

CONTRIBUTION DE LA METHODE DE SUIVI TEMPOREL DE RESISTIVITE A L'ETUDE DES PROCESSUS D'INFILTRATION EN ZONE DE SOCLE SAHELIENNE ET SOUDANIENNE D'AFRIQUE DE L'OUEST.

Maxime Wubda

▶ **To cite this version:**

Maxime Wubda. CONTRIBUTION DE LA METHODE DE SUIVI TEMPOREL DE RESISTIVITE A L'ETUDE DES PROCESSUS D'INFILTRATION EN ZONE DE SOCLE SAHELIENNE ET SOUDANIENNE D'AFRIQUE DE L'OUEST.. Géophysique [physics.geo-ph]. Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2017. Français. NNT : . tel-02141315

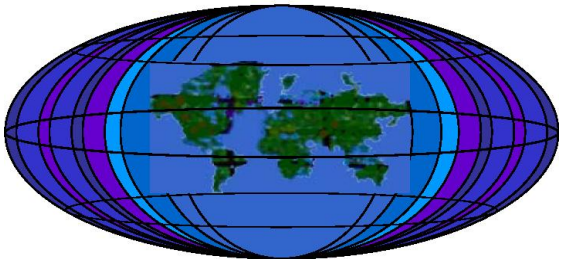
HAL Id: tel-02141315
https://hal.science/tel-02141315

Submitted on 27 May 2019

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

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

CONTRIBUTION DE LA METHODE DE SUIVI TEMPOREL DE RESISTIVITE A L'ETUDE DES PROCESSUS D'INFILTRATION EN ZONE DE SOCLE SAHELIENNE ET SOUDANIENNE D'AFRIQUE DE L'OUEST.



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

Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi en

Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Spécialité : Géophysique appliquée

Présentée par **Maxime WUBDA**

Sous la direction de :

Pr Moussa BOUKARI
Dr Marc DESCLOITRES

ICMPA PUBLISHING © 2017

CIPMA – Chaire UNESCO

Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN

Faculté des Sciences et Techniques (FAST)

Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications

(CIPMA - Chaire UNESCO)

N° 20072612 PhD/CIPMA/UAC/2017

CONTRIBUTION DE LA METHODE DE SUIVI TEMPOREL DE RESISTIVITE A L'ETUDE DES PROCESSUS D'INFILTRATION EN ZONE DE SOCLE SAHELIENNE ET SOUDANIENNE D'AFRIQUE DE L'OUEST.

Thèse de Doctorat de l'Université d'Abomey-Calavi en

Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Spécialité : Géophysique appliquée

Jury:

Président: **Pr Norbert HOUNKONNOU**…….....…….…..….(Université d'Abomey-Calavi, Benin)

Directeur de thèse: **Pr Moussa BOUKARI**…….……..……(Université d'Abomey-Calavi, Benin)

Co-directeur de thèse: **Dr Marc DESCLOITRES**…..(Institut de Recherche pour le Développement, France)

Examinateur: **Dr Nicaise YALO**…….….(Université d'Abomey-Calavi, Benin)

Rapporteurs: **Dr Youssouf KOUSSOUBE**……..…..(Université Ouaga I – Joseph Ki-Zerbo, Burkina Faso)

Dr Marie BOUCHER…….....…..(Institut de Recherche pour le Développement, France)

Cotonou, République du Bénin, 31 octobre 2017

Dédicaces

A mes parents Lucie et Emmanuel WUBDA

Remerciements

A l'issue de cette thèse qui consacre les résultats de nos travaux de recherche menés au Burkina Faso et au Bénin, nous voudrions à travers ces quelques lignes, adresser nos mots de remerciements à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre ont concouru à son aboutissement.

Au Burkina Faso,

Nos remerciements vont à l'endroit de la représentation de l'IRD et à l'équipe d'hydrologie avec laquelle nous avons travaillé pendant quatre années sur le site de Katchari. Nos pensées vont spécialement:

A Olivier Ribolzi, Hydrologue intrépide auprès duquel nous avons fait notre initiation au métier de la recherche ;

A Yann Le Troquer avec qui j'ai réalisé la plupart des mesures géophysiques d'abord sur le site Katchari puis sur celui de Ara au Bénin;

Aux techniciens de la joyeuse petite équipe de terrain à la quelle nous faisions partie : Moussa Barry, Jean Boéné, Yves Djoualy, Boureima Tou dit "le maçon" avec lesquels nous avons passé de bon moments pendant les campagnes des mesures sur site à Katchari tout comme au bureau dans les locaux de l'IRD à Ouagadougou.

A tous les doctorants, stagiaires ou enseignants qui ont participé aux recherches sur le site de Katchari et qui nous ont transmis d'une certaine façon leur savoir faire dans la conduite des investigations sur site mais également, le désir de présenter un jour à notre tour des résultats de recherches ; Nous pensons notamment à Harouna Karambiri, Angelbert Biaou, Dial Niang, Ghislain Toé, Denis et Mathieu,

Aux habitants des villages de Katchari et Dangadé avec lesquels nous avions une bonne cohabitation, en particulier Assane, notre lecteur du site du Dangadé aujourd'hui disparu.

Au Bénin,

Notre reconnaissance et nos remerciements s'adressent à notre école doctorale la CIPMA et à l'ensemble de son corps professoral, à la représentation locale de l'IRD notre employeur et à la Direction Générale de l'Eau qui est partenaire de l'IRD et site d'accueil de l'équipe de recherche

AMMA-CATCH à laquelle nous sommes intégrés en qualité de coordonateur d'activités de recherche pour l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de L'Ouémé (OHHVO).

Nos sincères remerciements aux Professeurs Boukari et Yalo ainsi qu'à Marc Descloitres avec qui j'ai effectué mes premières mesures géophysiques sur le site de Katchari au Burkina Faso en 2000, puis au Bénin sur le site de Nalohou depuis 2003. Merci à tous pour l'encadrement de ce travail mais également pour les encouragements tout au long des étapes qui ont conduit à la réalisation de cette thèse.

Nous n'oublions pas les chercheurs de l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement – Grenoble) responsables des sites AMMA-CATCH: Sylvie Galle, Christophe Peugeot et Luc Séguis qui nous ont fait suffisamment confiance pour mener nos travaux de thèse en parallèle avec nos responsabilités de coordination d'activités de recherches.

A nos collègues (de la Direction Général de l'Eau et de l'IRD), compagnons d'équipe technique et amis : Simon Afouda, Théodore Ouani, Marc Arjounin, Martial Dossou et Stéphane Boubkraoui reparti depuis à Grenoble, nous voudrions traduire toute notre joie d'avoir collaborer avec des personnes si chaleureuses sur lesquelles il nous a été permis de compter à tout moment aussi bien au bureau que le sur terrain. Nous saluons également le personnel local de Djougou dont l'aide à souvent été si précieuse dans la conduite de nos travaux sur site: Emile Pagou, Idrissou Imorou, Moussa Dia Werima, Tahirou Sarè, Harouna Gnonri du village de Babayaka qui se souviendra sans doute longtemps de tous ces kilomètres parcourus à pied dans la brousse pour réaliser les mesures EM 34.

A tous, nous vous souhaitons de voir en ce travail, le fruit de votre aide visible ou discrète avec le sentiment d'avoir fait œuvre utile dans la construction de notre personne à travers l'acquisition du savoir mais aussi, à toute la communauté à la quelle nous comptons transmettre ce que nous avons nous-mêmes appris.

Résumé

L’accès à l'eau potable en Afrique de l'Ouest constitue aujourd'hui un défi majeur pour le développement. Dans cette partie du continent constituée de pays pauvres, le manque de ressources financières est un frein à la construction de grandes infrastructures de stockage et de distribution de l'eau. Pour palier cette situation, la demande en eau de la population est alors satisfaite grâce à des systèmes simplifiés de pompage et de distribution d’eau souterraine qui sont moins coûteux. Cette dépendance accrue n’est toutefois pas sans conséquence dans un contexte géologique et pédologique dominé par des roches cristallines défavorables à l'infiltration et au stockage de l’eau souterraine et où le climat (tropical) avec un gradient de précipitations sud, nord, désavantage les régions de latitudes élevées (Sahel).

Dans des conditions aussi restrictives, assurer la disponibilité et la gestion durable des eaux souterraines, nécessite de comprendre les processus qui contribuent à son renouvellement. Certes, les questions liées à la recharge des eaux souterraines font l’objet d’études par plusieurs disciplines scientifiques (hydrologie, hydrogéologie, géophysique), mais de nombreuses questions restent sans réponse jusqu’à nos jours.

Cette étude veut contribuer à une meilleure compréhension de la diversité des processus hydrologiques en Afrique de l'Ouest à travers l'étude de deux sites sur socle cristallin, dans le Sahel (nord du Burkina) et la zone soudanienne (Nord du Bénin). Il s’agit d’évaluer l’apport des techniques géophysiques basées sur l’utilisation des mesures de résistivité électrique et électromagnétique dont la pertinence dans les études de processus d'infiltration est évoquée par plusieurs publications antérieures. Cette étude montre qu'il est possible d'observer avec la méthode de tomographie de résistivité électrique en suivi temporel (ERT "time-lapse"), la dynamique des changements de résistivité dans les couches profondes du sous-sol. De même, elle montre qu'à partir de la réalisation de cartes de résistivité par méthode électromagnétique à des moments clés de l'année, il est possible de mettre en évidence les variations latérales de résistivité. Dans les deux cas, la confrontation des résultats obtenus avec des données complémentaires telles que les humidités de sol et les niveaux de nappes montre que les variations de résistivité observées correspondent bien à des transferts d'eau dans le sol.

Mots clés

Bénin, Burkina Faso, climat sahélien, climat soudanien, socle, résistivité, tomographie de résistivité électrique, cartographie électromagnétique, suivi temporel de résistivité.

Abstract

Access to drinking water in West Africa is today a major challenge for development. In this part of the continent constitute by poor countries, lack of resources hampers the implementation of major water mobilization infrastructures. Then, the water demand of the population is satisfied with simplified systems of pumping and distribution of groundwater that are less costly. This increased dependence is however not without consequence in such soil and geological context dominated by crystalline rocks unfavorable to infiltration and groundwater storage and under a climate with a south, north rainfall gradient (tropical climate) which disadvantages higher latitudes regions (Sahel).

To face these conditions which can be very restrictive for the availability and sustainability of groundwater, it is necessary for the sustainable management of this resource, to understand the processes that contribute to its renewal. Subjects related to groundwater recharge are studied by several scientific disciplines (hydrology, hydrogeology, geophysics), but many questions remain unanswered steel today.

This study contributes to a better understanding of the diversity of hydrological processes in West Africa through the study of two sites in the Sahel (north of Burkina) and Sudan zone (north of Benin) on crystalline basement. It offers the contribution of geophysical techniques through the use of methods based on electrical and electromagnetic resistivity measurements whose relevance in the infiltration process studies was already demonstrated by several previous publications. This study shows that it is possible to observe with ERT time-lapse method, the dynamic of resistivity changes in the deeper layers of the subsoil. Similarly, it shows that from a mapping system at key times of the year, it is possible to highlight the lateral variations in resistivity. In these two cases, it bases on complementary data such as groundwater levels and soil moisture to show that the resistivity variations correspond to transfers of water in the soil.

Key words

Benin, Burkina Faso, sahelian climate, sudanian climate, hard rock basement, electrical resistivity tomography, electromagnetic mapping, time-lapse resistivity.

SOMMAIRE

Chapitre 1 : **INTRODUCTION GENERALE** **12**

1.1. Introduction **12**

1.2. L'eau dans les contextes sahélien et soudanien d'Afrique de l'ouest **14**

1.2.1. Un potentiel fonction de la variable climatique 15

1.2.2. Des stocks souterrains limités dans un contexte de socle 16

1.2.3. Une disponibilité fonction des processus hydrologiques locaux 19

1.2.4. Conséquences sur les ressources en eau 24

1.2.5. Impact sur les systèmes d'approvisionnement en eau 28

1.3. Méthodes géophysiques et exploration pour l'eau souterraine **29**

1.3.1. Recherche des aquifères par la méthode de résistivité en courant continu 30

1.3.2. Méthodes géophysiques et suivi de l'infiltration 33

1.4. Problématique de la thèse **36**

1.4.1. Attentes sur les apports des outils géophysiques 36

1.4.2. Questions adressées aux géophysiciens 39

1.4.3. Contribution des géophysiciens 40

1.5. Objectifs de la thèse **41**

1.5.1. Objectif général 41

1.5.2. Objectifs spécifiques 41

1.6. Organisation du manuscrit **41**

Chapitre 2 : **METHODOLOGIE** **44**

2.1. Choix des sites **44**

2.1.1. Choix des zones climatiques 44

2.1.2. Choix spécifique des sites de mesures 45

2.2. Choix de la résistivité comme paramètre utile **46**

2.2.1. Définition et domaine d'application 46

2.2.2. Mesure de la résistivité électrique des sols 50

2.2.3. Avantages et inconvénients du paramètre résistivité pour notre étude 58

2.2.4. Acquisition des données de résistivité sur les sites 59

2.3. Logiciel d'inversion des données ERT **71**

2.3.1. Présentation de DC2DInvRes 71

2.3.2. Calage des paramètres d'inversion 74
2.3.3. Simulations numériques 77
2.3.4. Calages retenus et implications 78
2.4. Outils de cartographie 80
2.5. Traitement des données et présentation des résultats 80
2.5.1. Données ERT 80
2.5.2. Données de suivi EM 82
2.6. Résumé de la méthodologie 83

Chapitre 3 **: LES ETUDES EN ZONE SAHELIENNE AU BURKINA FASO 84**
3.1. La zone d'étude 84
3.1.1. Généralités 84
3.1.2. Les sites de suivis hydrologiques et géophysiques 88
3.1.3. Fonctionnement hydrologique du site 94
3.1.4. Bilans hydrologiques et questions aux géophysiciens 95
3.2. Résultats des mesures géophysiques 96
3.2.1. Résultats du site de Katchari – BV0 96
3.2.2. Résultats du site de Dangadé 110
3.3. Conclusion sur les mesures en zone sahélienne 123

Chapitre 4: **LES ETUDES EN ZONE SOUDANIENNE AU NORD BENIN 125**
4.1. La zone d'étude 125
4.1.1. Généralités 125
4.1.2. Le site de suivi géophysique 131
4.1.3. Questions adressées aux géophysiciens 134
4.2. Les résultats géophysiques 135
4.2.1. Résultats de l'exploration préliminaire 135
4.2.2. Les résultats "time-lapse" 144
4.3. Conclusion sur les études du site soudanien 162

Chapitre 5 : **SYNTHESE ET DISCUSSIONS 164**
5.1. Bilan sur les choix méthodologiques 164

5.1.1. Pertinence des sites d'études 164
5.1.2. Pertinence du paramètre de mesure 166
5.1.3. Mise en œuvre des mesures géophysiques 166
5.1.4. Traitement et présentation des données 170
5.2. Résultats géophysiques et implications méthodologiques 172
5.3. Perspectives 175

CONCLUSION GENERALE 177

REFERENCES 179

Table des illustrations

Liste des figures

Figure 1: Carte des zones climatiques d'Afrique de l'ouest. 16

Figure 2 : Pluviogrammes caractéristiques des zones sahélienne et soudanienne 16

Figure 3: Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest 19

Figure 4: Esquisse pédologique générale de l'Afrique de l'ouest 22

Figure 5: Divisions floristiques de l'Afrique de l'ouest 24

Figure 6: Variations des débits et volumes d'eau écoulés sur l'Ouémé à la station de Bétérou 26

Figure 7: Schéma explicatif des étapes de prospection pour d'implantation d'un point d'eau 31

Figure 8: Coupe schématique des aquifères en région granitique 33

Figure 9: Modèle d'aquifère de socle 33

Figure 10: Modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique en zone sahélienne. 38

Figure 11: Modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique en zone soudanienne. 39

Figure 12: Dispositif élémentaire de mesure de la résistivité électrique 51

Figure 13 : Types de dispositif utilisé pour la mesure de la résistivité électrique 52

Figure 14: Fonction de sensibilité pour quelques dispositifs de mesures électriques courants. 54

Figure 15: Exemple de panneau de résistivité apparente et résultat de l'inversion. 55

Figure 16: Courbes de contribution des terrains au champ secondaire en fonction de la profondeur 57

Figure 17: Courbes de réponses cumulées en fonction de la profondeur 57

Figure 18: Relation entre résistivité et chimie des fluides d'imbibition. 59

Figure 19: Relation entre résistivité et saturation. 59

Figure 20: Vue du Syscal R2 et du matériel annexe. 62

Figure 21: Vues du Syscal Pro. 63

Figure 22: Vue de l'EM 34.. 64

Figure 23: Exemple de modélisation directe sous DC2DInvRes 72

Figure 24: Exemples de rajout de contraintes dans la grille de calcul d'inversion 74

Figure 25: Exemple de modèle synthétique et résultat d'inversion. 75

Figure 26: Test des paramètres d'inversion à partir de données synthétiques 78

Figure 27: Simulation d'une infiltration latérale 78

Figure 28: Carte de localisation du site d'étude. 87

Figure 29: Carte pédologique de la zone de Dori. 88

Figure 30 : Carte géologique de la zone de Dori. 88

Figure 31: Paysage du site de Katchari en saison sèche. 90

Figure 32: Carte topographique du site de Katchari avec les limites du bassin versant BV0. 91

Figure 33: Vue de la mare temporaire du site de Dangadé. 92

Figure 34: Présentation en coupe du dispositif expérimental de suivi temporel de la mare. 94

Figure 35: Localisation du site de suivi temporel dans la zone de prospection du village de Dangadé ... 94

Figure 36: Exemple de relation pluie-débits caractéristique du site. 95

Figure 37: Crue à l'exutoire du BV0. 95

Figure 38: Carte de résistivité apparente du site de Katchari 97

Figure 39: Sections de résistivités calculées pour les profils P1, P2 et P3. 99

Figure 40: Profils pédologiques aux points des forages F2, Z1 et F0. 101

Figure 41: Profondeurs d'investigation des mesures EM testes sur le profil ERT P1 103

Figure 42: Dynamique de résistivité apparente sur le site de Katchari - BV0 105

Figure 43: Dynamique saisonnière de résistivité apparente sur le site de Katchari – BV0 105

Figure 44: Modélisation de l'effet des couches superficielles conductrices sur la réponse EM 34 107

Figure 45: Suivi des comptages neutroniques dans les forages F0 et Z1. 109

Figure 46: Tests d'infiltration sous charge sur surface argileuseet sur affleurement rocheux. 109

Figure 47: Modèle de résistivités calculées correspondant à l'état du sous-sol au mois de mai.. 112

Figure 48: Traduction lithologique de l'image ERT à partir des profils des forages TN31 et D1. 113

Figure 49: Résultat du suivi temporel de résistivité dans la mare de Dangadé 116

Figure 50: Variations saisonnières des comptages neutroniques aux tubes TN32 et 34. 118

Figure 51: Zoom sur infiltration latérale 120

Figure 52: Dynamique saisonnières des nappes sur le site. 121

Figure 53: Carte de localisation du bassin d'Ara. 126

Figure 54: Carte géologique de la zone de Djougou 128

Figure 55: Carte des grands ensembles pédologiques du bassin d'Ara 130

Figure 56: Carte topographique du BV Parshall 133

Figure 57: Coupe du dispositif ERT de suivi temporel dans le bas-fond du BV Parshall. 133

Figure 58: Résultats des prospections géophysiques sur le bassin d'Ara en 2003 137

Figure 59: Sections de résistivité calculée pour les profils ERT de reconnaissance 140

Figure 60: Profils des forages de reconnaissance sur le BV Parshall. 142

Figure 61: Chronogramme des mesures du suivi temporel EM 34 et ERT 144

Figure 62: Carte de conductivité EM 34 du BV Parshall pour le mois de mars 146

Figure 63: Courbes comparées des valeurs mesurées et celles calculées par simulation numérique. 147

Figure 64: Résultats du suivi temporel EM 34 149

Figure 65: Variations saisonnières des comptages neutroniques sur le BV Parshall. 151

Figure 66: Variations des niveaux statiques et résistivité d'eau pour la nappe profonde 151

Figure 67: Simulations numériques sur blocs modèles de quelques cas de variations de résistivité 154

Figure 68: Variations des comptages neutroniques au point NAB au cours de la saison. 156

Figure 69: Variation des résistivités de l'eau de la ravine principale Ara. 156

Figure 70: Résultats des mesures ERT pour le mois de mars. 158

Figure 71: Résultats ERT du suivi temporel saisonnier. 160

Figure 72: Variations du comptage neutronique, du niveau de la nappe et de la résistivité de l'eau 162

Liste des tableaux

Tableau 1: Taux de succès des forages en fonction de la pétrographie du socle. 18

Tableau 2: Taux de succès des forages en fonction de la pluviosité. 18

Tableau 3: Débits minimums et maximums annuels de quelques cours d'eau en Afrique de l'ouest 26

Tableau 4: Propriétés de quelques matériaux courants et gammes de résistivité correspondantes 47

Tableau 5: Profondeurs d'investigation en fonction des différentes configurations de l'EM34. 64

Tableau 6: Organisation des prospections géophysiques par site et type de mesure. 65

Chapitre 1 : INTRODUCTION GENERALE

1.1. Introduction

L'eau est une ressource indispensable à la vie et à l'activité humaine et de ce fait utilisée par tous. Le terme de « denrée rare » qui lui est souvent associé peut paraitre paradoxal au regard du volume totale de l'eau des mers et océans de notre planète qui avoisine 1.33 milliard de km^3 (Charrette et Smith, 2010). Le fait est que les besoins en eau couramment exprimés se rapportent à l'eau douce (eau non salée) qui ne représente, elle, que 3 % du volume précédemment cité. Du reste, de ce faible pourcentage, il faudrait déduire la part des neiges et glaces permanentes qui vaut 1.7 %, ce qui ne laisse plus qu'une disponibilité de 1.3 % (Gleick, 1996).

La source principale de toute cette eau douce étant les précipitations, le volume de la ressource en un endroit donné va dépendre de ce fait dans un premier temps, des quantités de précipitations enregistrées et celles-ci sont très variables d'une région à une autre (12 m par an dans l'état Indien du Meghalaya, contre moins de 51 mm en moyenne pour l'Egypte). Dans un second temps, ce sont les conditions environnementales locales qui seront déterminantes dans la répartition au sol des précipitations enregistrées à savoir :

- La part des écoulements, de l'évapotranspiration et des infiltrations ;
- Les lieux de transit (cours d'eau temporaires ou permanents) et de stockage superficiel ou souterrain (lacs, nappes souterraines) ;
- L'état dans lequel l'eau des précipitations est disponible (glaces, brumes, eau liquide) et la qualité de celle-ci (niveau de contamination biologique ou minéralogique).

Au-delà de cette disponibilité naturelle, accéder à cette ressource en qualité et quantité suffisante va dépendre des moyens et dispositions mise en place pour sa mobilisation et sa gestion. En cela, les pays développés vont se distinguer de ceux plus pauvres. En effet, pendant que l'on estime à 100 % l'accès à l'eau potable dans les pays développés, le taux dans les pays en voie de développement est faible avec des disparités énormes : 47 % pour la République Démocratique du Congo, 76 % pour le Bénin, et 91 % pour le Pakistan (Données, Banque Mondial 2013. http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/ SH.H2O.SAFE.ZS). Pour les pays moins nantis donc, l'accès à l'eau apparait comme conditionné par la combinaison du facteur géo-climatique et celui du niveau de développement.

En Afrique, deuxième continent le plus sec après l'Australie (UNEP, 2008), et où la quasi-totalité des pays sont sous développés, le problème de l'accès à l'eau se pose d'avantage avec acuité. En effet, selon l'OMS (Rapport 2013), sur le milliard d'habitants que comptait le continent en 2011, près de 330 millions de personnes n'ont pas accès à une eau de qualité et la quasi-totalité de cette population vie en Afrique sub-saharienne (13 000 habitants seulement, en Afrique du nord). Par ailleurs, ces chiffres globaux cachent d'autres réalités : celles des grandes inégalités entres régions (92% de taux d'accès en eau potable en Afrique du nord, 63% au sud du Sahara), nations (99% en Egypte contre 29% en Somalie), villes et campagnes (Observatoire des inégalités - http://www.inegalites.fr/).

L'un des aspects cependant commun à tous les pays africains, est le recours important aux eaux souterraines surtout pour l'alimentation en eau potable. Près de 75% de la population africaine selon l'OMS (Rapport 2013), dépendent de cette ressource pour leurs besoins notamment en eau de boisson, alors qu'elle ne représente que 15 % du total de la ressource renouvelable. Cette grande dépendance issue d'une forme de résilience ancienne (accès à une ressource plus pérenne et plus à l'abri des contaminations) et moderne (choix guidés par des mobiles économiques liés au coût nettement plus bas des ouvrages de captage) n'est donc pas sans conséquence sur ces réserves dont on connait souvent mal le mode de renouvellement.

Si pendant longtemps, la question de gestion durable des ressources ne semblait guère recevoir des échos favorables, les crises climatiques majeures comme celle des années 70 ont permis de relancer les débats sur la nécessité de mieux connaitre les mécanismes du climat et du cycle de l'eau en général pour une meilleure résilience des populations notamment dans les zones naturellement plus vulnérables comme au Sahel.

La présente étude est menée en l'Afrique de l'ouest où l'accès à l'eau surtout potable est confronté à plusieurs défit majeurs :

- Une croissance démographique soutenue avec en parallèle une demande tout aussi croissante des besoins en eau surtout dans les villes qui sont des pôles de concentrations humaines mais également d'activités industrielles parfois importantes ;
- Une faible capacité économique des pays (qui sont pauvres) à financer de grands projets de mobilisation ou de gestion de l'eau, dont a cependant besoin le développement de l'agriculture et de l'élevage, base de leur économie ;

- La survenue de catastrophes naturelles cycliques d'origine climatique (sècheresses, inondations) sources de dommages multiples.

Face à ces défis, les réponses apportées par les pays semblent être les mêmes (multiplication des forages et de petits barrages) dans un contexte pourtant marqué par une variabilité des processus hydrologiques à l'échelle de la zone climatique. Or, il est nécessaire pour une meilleure gestion de la ressource, de progresser sur la connaissance des processus qui concourent à son renouvellement, en prenant en compte les spécificités locales du cycle de l'eau.

Notre étude participe à ce besoin de connaissances en apportant la contribution des méthodes géophysiques appliquées à la compréhension des processus de renouvellement de l'eau souterraine en zone de socle, un sujet d'importance au vue de la place qu'occupe de nos jours l'eau souterraine dans la problématique globale de l'accès à l'eau potable en Afrique de l'ouest.

1.2. L'eau dans les contextes sahélien et soudanien d'Afrique de l'ouest

L'Afrique de l'ouest est relativement bien pourvue en ressources hydriques. On estime en effet à plus de 1000 milliards de mètres cubes d'eau douce la ressource renouvelée chaque année à travers le cycle hydrologique normal de la région (Niasse, 2005). Contrairement donc à une idée reçue, la zone ne manque pas d'eau même si dans certaines zones comme le Sahel les quantités sont moins importantes. On remarque d'ailleurs que la plupart des pays affichent des volumes potentiels bruts par habitant supérieurs à la limite du seuil d'abondance admis qui est de 1700 m^3/hab/an (Lasserre et Descroix, 2011): Nigéria 2167 m^3/hab/an, Niger 2 429 m^3/hab/an, Mauritanie 3548 m^3/hab/an, Mali 7405 m^3/hab/an, Côte d'Ivoire 4500 m^3/hab/an, Sénégal 3332 m^3/hab/an. Seul le Burkina Faso possède une dotation brute inférieure à ce seuil : 1316 m^3/hab/an (Gleick et al, 2008). Cependant, c'est un fait que des problèmes d'accès à cette ressource existent car l'on ne dispose pas partout des volumes souhaités aux moments souhaités. Dans les parties soudaniennes et sahéliennes, cela est avant tout lié à un principal facteur contraignant qui est la tropicalité du climat caractérisée par l'alternance d'une saison sèche plus ou moins longue (période de stress hydrique) et d'une saison de pluie (période d'abondance). Dans un tel contexte, disposer d'eau en toute période va nécessiter la réalisation d'infrastructures de stockage et de distribution qui sont parfois très couteuses et souvent au-delà des capacités de financement des différents pays. Aussi, malgré les belles potentialités, l'accès à l'eau dans les pays d'Afrique de l'ouest surtout sahélienne et soudanienne, faute de moyens, reste tributaire des conditions naturelles notamment climatiques et géologiques (socle, sédimentaire) qui vont générer localement des processus hydrologiques facilitant ou entravant la disponibilité de l'eau.

1.2.1. Un potentiel fonction de la variable climatique

La pluie est le premier facteur qui règle les conditions de renouvellement des stocks hydriques. Elle a une variabilité qui dépend des zones climatiques. En Afrique de l'ouest, les zones climatiques ont une organisation latitudinale en grandes bandes subparallèles qui vont de la cote ouest (Sénégal, Gambie, Guinée) jusqu'au Tchad (limite Afrique de l'ouest). Du sud au nord on distingue : le climat guinéen, soudanien, soudano-sahélien, sahélo-saharien et enfin saharien. Cette organisation est définie par un gradient pluviométrique sud, nord (*Cf. Figure 1*) ainsi qu'un certain nombre de paramètres climatiques (température, évapotranspiration etc) qui vont conférer un potentiel hydrique à chaque zone climatique.

Le régime pluviométrique ouest Africain est lié au mouvement saisonnier de la zone de convergence intertropicale et des masses d'air humide venant de l'océan atlantique sud (mousson). Ce mouvement sud, nord crée à partir de la zone soudanienne (jusqu'aux limites du désert) un régime contrasté avec deux saisons distinctes : une saison sèche dont la durée s'allonge en remontant les latitudes et une saison pluvieuse caractérisée par un histogramme uni-modale avec un maximum de pluie au mois d'aout (*Cf. Figure 2*).

Dans la zone soudanienne, le total pluviométrique annuel varie entre 1200mm et 800 mm. La saison des pluies s'étend du mois de mai à celui de octobre voir novembre (6 à sur 7 mois) et les mois de juillet aout et septembre enregistrent près de 65% de la pluie annuelle. Cette période correspond également à celle où les valeurs d'évapotranspiration sont les plus faibles de l'année (*Cf.* histogramme de Djougou, *Figure 2*).

Dans la zone sahélienne par contre, les hauteurs de pluies annuelles sont plus faibles et varient entre 400 et 200 mm. La saison des pluies est également plus courte, concentrée sur quatre mois (juin, juillet, aout et septembre). Les maxima de température sont beaucoup plus élevés surtout en fin de saison sèche (mois d'avril et Mai) ou elles peuvent atteindre 45°C. Aussi l'évapotranspiration annelle très forte (2900 mm/ an –Station de Dori au Burkina, Niang, 2006), même si elle connait une légère baisse pendant la saison de pluies (*Cf.* histogramme de Niamey, *Figure 2*).

Enfin, l'Afrique de l'ouest qui est une zone dans laquelle les irrégularités pluviométriques interannuelles sont importantes, a connu ces trente dernières années (à partir des années 1970) des déficits pluviométriques chroniques avec des baisses allant jusqu'à 20% du total pluviométrique annuel (Paturel et al, 1998). Même si certains auteurs estiment qu'il existe de nos jours une certaine reprise (Ozer et al, 2003), cette sècheresse prolongée a eu néanmoins de graves conséquences sur le couvert végétal et les sols qui se sont fortement dégradés (Niasse et

al, 2004), entrainant du même coup la modification de certains processus hydrologiques notamment l'intensification du ruissellement.

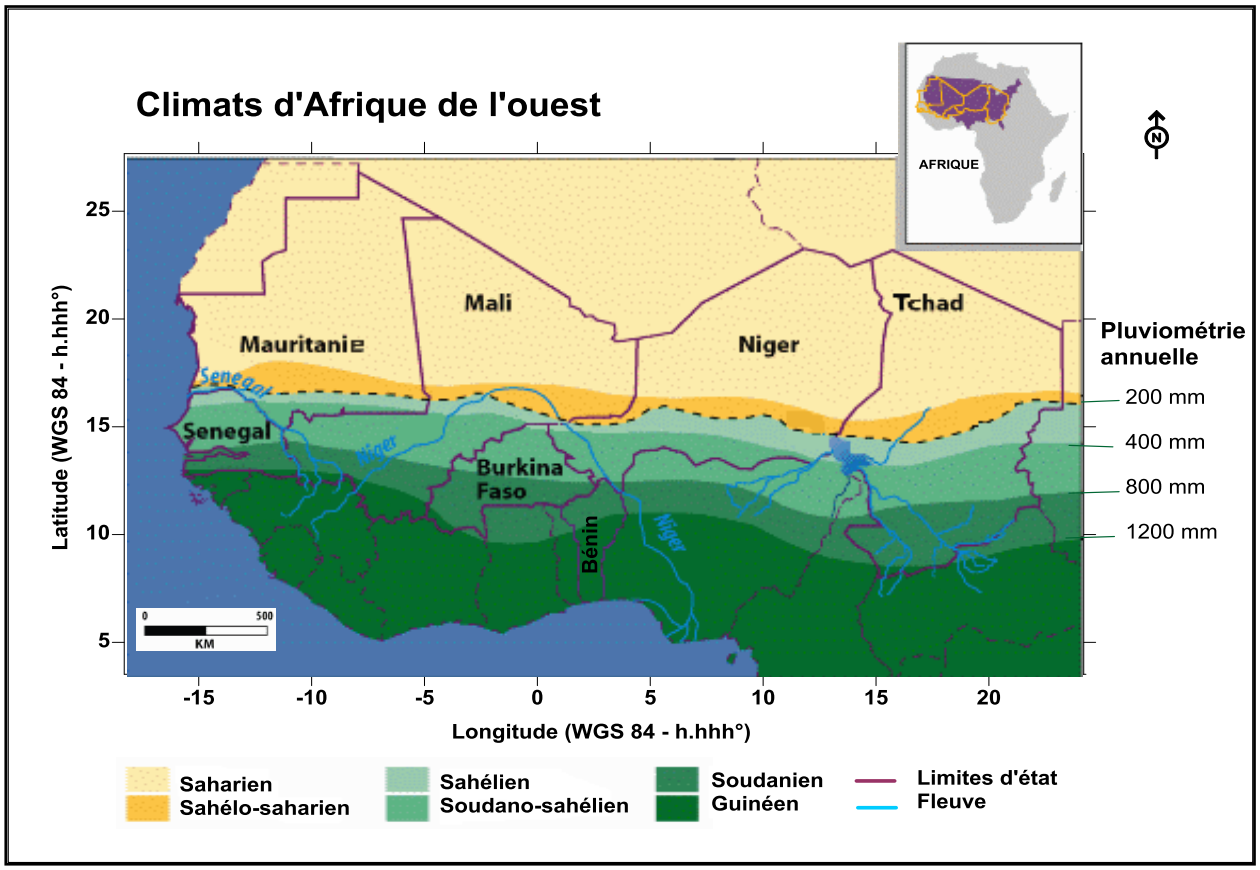


Figure 1: *Carte des zones climatiques d'Afrique de l'ouest. Source: FEWS, juin 1997.*

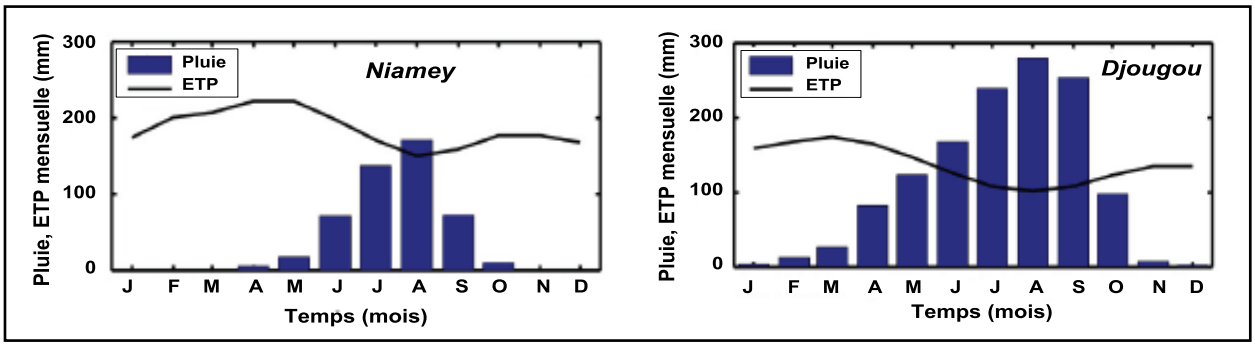


Figure 2 : *Pluviogrammes caractéristiques des zones sahélienne (Niamey au Niger) et soudanienne (Djougou au Bénin). Source : Hector B, 2014.*

1.2.2. Des stocks souterrains limités dans un contexte de socle

Du point de vu géologique, l'Afrique de l'ouest est caractérisée par un craton immense (4.500.000 km^2 environs) qui occupe près de 75 % de son sous-sol. Il est formé d'un ensemble de chaines pénéplanées largement granitisées d'âge précambrien et se compose de deux

dorsales (celle de Réguibat au nord et celle de Man ou Léo au sud) séparées par la plateforme sédimentaire Taoudéni (Naba, 2007).

Le contexte géologique ouest africain est donc dominé par un socle de roches cristallines (*Cf. Figure 3*) à majorité granitiques, mais aussi métamorphiques (gneiss, schistes) et volcaniques avec dans ses marges nord (dans la zone sahélienne), une couverture sédimentaires de roches détritiques plus récentes (d'âge cambrien, quaternaire, tertiaires) d'épaisseur variable pouvant atteindre jusqu'à 2000 m (bassin des Iullemmeden au Niger).

Cette zone de socle assez étendue (80 % du territoire au Burkina et autant au Bénin) est connue pour être difficile du point hydrogéologique. Cela provient du fait que les roches cristallines qui le compose ne possèdent pratiquement pas de porosité primaire comme celle des grès ou autres roches sédimentaires mais plutôt une porosité secondaire due à la fissuration et à l'altération permettant la circulation et l'accumulation de l'eau souterraine. De plus, leur altération chimique aboutit dans la plupart des cas, à la mise en place d'une altérite plus ou moins argileuse peu favorable l'infiltration mais également aux prélèvements de l'eau souterraine à cause de la porosité de drainage en général faible de ces matériaux. Les systèmes aquifères qu'on y trouve sont souvent discontinus, peu ou très profonds et constitués d'un ou plusieurs types de nappes :

- Les aquifères perchés temporaires qui se présentent sous la forme de petites nappes connecté ou non avec le système altéré inférieur. Ils sont souvent exploitées dans les bas-fonds en creusant des puisards de profondeur ne dépassant guerre 3 mètres et peuvent supporter une exploitation assez intensive (jusqu'à 200 m3 / jour) en saison des pluies (Defossez, 1958). Elles tarissent cependant assez rapidement en saison sèche ;
- Les aquifères des latérites qui se développent sur les plateaux cuirassés à des profondeurs pouvant varier entre 5 et 20 m. Ils sont également temporaires et parfois exploités à travers des puits villageois.
- Les aquifères pérennes d'altérite qui sont localisés dans des couvertures d'altération pouvant être de nature variable (allant d'un pôle sableux à argileux) et qui constituent souvent le prolongement des aquifères de fracture. La base de ces aquifères est constituée de roches fracturées voir démantelées. Elle est souvent dynamitée et déblayée lors de la réalisation des puits modernes (puits à grand diamètre busés).
- Les aquifères profonds qui sont ceux des milieux fracturés. Ils sont beaucoup plus pérennes mais également discontinus. Les forages d'eau tentent d'exploiter ce type d'aquifère mais du fait de la discontinuité des fractures, l'implantation des ouvrages

se révèle difficile. Cela justifie en partie les taux d'échec de forage assez élevés en zone de socle : 35% des forages sur un total 35000 au Bénin (Vouillamoz et al, 2014), un chiffre que l'on retrouve également au Burkina avec 30 % sur un échantillon de 7946 forages (Ricolvi, 1992). Plusieurs facteurs influencent la productivité de ces types d'aquifère (Gombert, 1997): La nature de la roche (*Cf. Tableaux 1*), l'importance de la fracturation, le climat (*Cf. Tableau 2*), la géomorphologie locale. Mais dans l'ensemble, les débits des forages ici sont assez faibles. 37% des forages au Bénin (sur un échantillon de 3410 forages pris en zone de socle) ont un débit inférieur à 2 m3/h et ceux ayant un débit de plus de 10 m3 / h de passent guère 10 % (Vouillamoz et al, 2014).

En marge de ce contexte globalement difficile, il subsiste cependant quelques formations assez favorables dans lesquelles les taux de succès peuvent être élevés à savoir les roches sédimentaires consolidées (grès, calcaires) que l'on retrouve par exemple à l'ouest du Burkina, à l'extrême nord du Bénin. Des travaux du CIEH sur le socle cristallin (1984) donnent à ce sujet quelques références (*Cf. Tableau 1*).

Faciès	**Taux moyen de succès (%)**	**Classe**
Grès pur, grès argileux	≥ 80	Très favorable
Grès calcaire, calcaire, schiste, pélite, granite	65 - 80	Favorable
Roche métamorphique et volcanique, quartzite, dolérite	< 65	Peu favorable

Tableau 1: *Taux de succès des forages en fonction de la pétrographie du socle d'après les travaux CIEH, 1984 (Gombert, 1988).*

Pays	**Pluviosité (mm)**	**Taux (%)**	**Effectifs**	**Références**
Ghana, Cote d'Ivoire	1000 - 2000	83	1624	Engalenc - 1978
Tchad, Mali Niger, Burkina Faso	400 - 1000	55	1314	Gombert (1990), Diagana (1990) Pontet ((1989), Omo (1990)
Tchad, Mauritanie	100 - 400	40	657	Gombert (1990), Omo (1990)

Tableau 2: *Taux de succès des forages en fonction de la pluviosité (Gombert, 1997).*

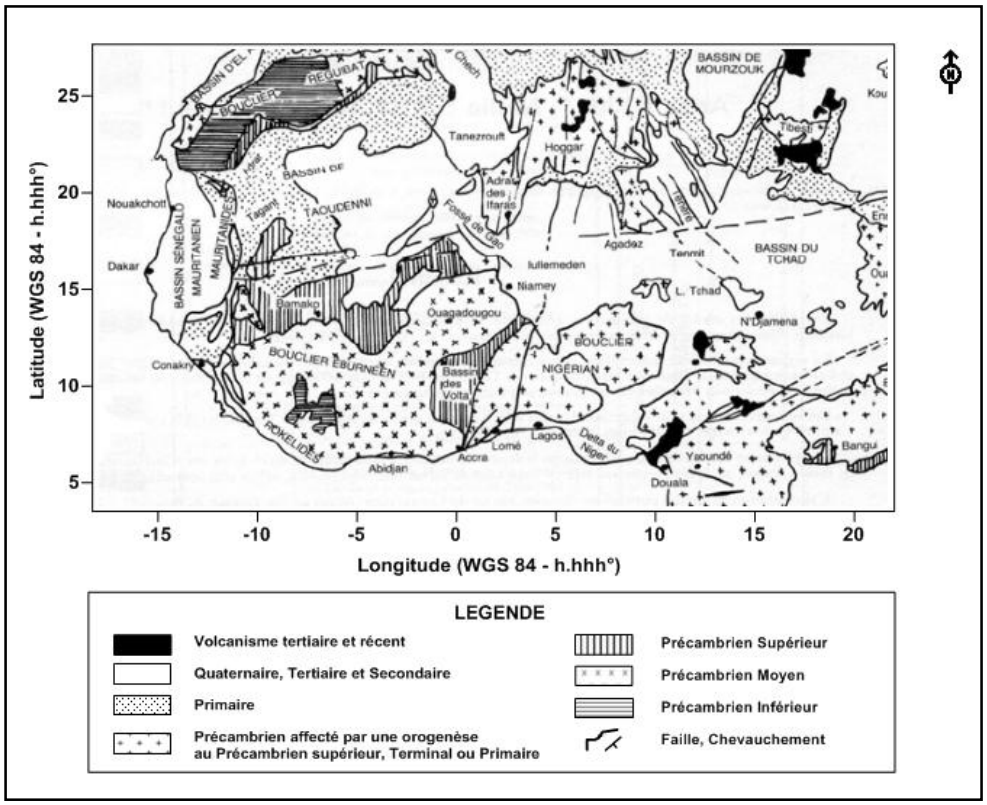


Figure 3: *Esquisse géologique de l'Afrique de l'ouest (Fabre, 1971).*

1.2.3. Une disponibilité fonction des paramètres environnementaux

Outre les facteurs climatiques et géologiques précédemment évoqués, la disponibilité de l'eau au plan local peut découler également des processus hydrologiques en cours. En effet une fois la pluie tombée, la persistance de l'eau à un endroit donné va dépendre de l'environnement local dont certains traits vont influencer fortement l'infiltration, l'évapotranspiration et/ou le ruissellement. Ces paramètres environnementaux concernent notamment la topographie (géomorphologie locale), les états de surfaces, les sols, la végétation et l'occupation du sol entre autre.

- *La topographie*

Le type de relief (pleines, plateaux, collines), la nature des pentes (douces, fortes) jouent un rôle déterminant dans le type de ruissellement et la vitesse des écoulements. Au plan morphologique, l'Afrique de l'ouest est plutôt le domaine de vaste pénéplaines et plateaux sur lesquels apparaissent quelques formations rocheuses majeures issues d'activités tectoniques (Le Fouta-Djalon en Guinée, la chaine de l'Atakora au nord Bénin-Togo) ou mineurs d'origine pédoclimatiques comme les buttes cuirassées. En cela, le facteur topographique ne favorise pas

particulièrement le ruissellement. En revanche, l'organisation morphologique générale de la région donne naissance à des bassins hydrographiques marqués par un exoréisme des écoulements.

Le système régional de drainage de toute l'eau de pluie tombée en zone de socle s'organise ainsi autour de cinq grands bassins : Le Niger, la Volta, le Sénégal, l'Ouémé et la Comoé, d'où s'évacue toute l'eau de surface vers la mer. Aussi, en dehors des fleuves qui drainent certains grands bassins précédemment cités (Niger, Sénégal) et dont les cours sont permanents, la fin de la saison des pluies marque début de la disparition des stocks d'eau de surface dans le paysage. Seules les zones topographiquement basses telles les bas-fonds, vont demeurer les endroits ou persistent encore pour quelques mois, un peu d'humidité ou d'eau dans les surcreusements de lits de rivières.

En marge de ce réseau exoréique régional, on rencontre dans les zones sédimentaires du sahel, des microsystèmes endoréiques générés par l'organisation des grands cordons dunaires et autres amas sableux. Ces systèmes sont composés de petites mares temporaires ou permanentes (Oursi au Burkina, Wankama au Niger) alimentées par des ravines au régime intermittent. Au même titre que les bas-fonds des zones de socle, ces mares temporaires jouent un rôle primordial dans l'accès à l'eau surtout en saison sèche dans la zone sahélienne.

- *Les sols*

La dynamique de l'eau sur et dans les sols est conditionnée par les caractéristiques de ceux-ci, notamment leur organisation superficielle (états de surface) verticale (structure du profil d'altération) et la nature des matériaux qui composent chacun de leurs horizons. En Afrique de l'ouest, il existe une multitude de types de sols en relation avec le substratum géologique et le type de climat, mais deux types caractérisent particulièrement les zones soudanienne et sahélienne de socle : il s'agit des sols ferrugineux tropicaux et des sols ferralitiques (*Cf.* Carte pédologique, *Figure 4*).

- Les sols ferrugineux tropicaux se développent sur des substratums assez variés d'origine plutonique (granites, granito-gneiss, granodiorites) ou métamorphique (Schistes, quartzites, amphibolites) sous climat peu humide (entre 400 et 1000 mm de pluie par an). Ce sont des sols à profil différencié peu à moyennement épais (2 à 5 m) avec des degrés de lessivage qui dépendent de la zone climatique, mais également des unités topographiques et du substratum géologique. Ils sont en général peu ou non lessivés dans les zones de pluviométrie annuelle comprise entre 400 et 600 mm, peu lessivé à lessivé entre 600 et 1000 mm. Ils se composent de trois horizons bien

distincts (Boulet et al, 1971): un horizon superficiel (A) humifère peu épais (20 cm) et de granulométrie très variée (limono-sableux, gravillonnaire, sableux) ; un horizon intermédiaire (Horizon B) plus ou moins argileux avec dans sa partie basse des concrétions ferrugineuses ; un horizon profond (C) constitué d'arènes ;

- Les sols ferralitiques sont ceux des zones plus humides (plus de 1000 mm par an). Contrairement aux précédents, ils ont des horizons peu différenciés avec un profil d'altération pouvant atteindre 30 m voir plus. Mais la plus grande différence réside surtout dans l'épaisseur et le degré de lessivage de l'horizon B dans lequel on retrouve une succession d'argile et de kaolinite. Cet horizon ne présente pas de niveau induré et sa structure nodulaire le rend assez drainant. Du point de vue capacité de stockage de l'eau souterraine, ces types de sols, de par l'épaisseur de leur profil d'altération offre une plus grande potentialité.

Ces deux types de sol sont affectés par le phénomène de "ferruginisation" qui est un processus de migration du fer qui aboutit à la mise en place d'un horizon ferrugineux à concrétions peu liées (horizon gravillonnaire ferrugineux) ou au contraire bien cimentées sous la forme de cuirasse ou carapace ferrugineuse. Les cuirasses sont observables dans les paysages soudaniens et sahéliens sous la forme de grosses dalles coiffant le sommet de certaines buttes, ou sous forme de blocs de plus ou moins grande taille dispersés en bas de pente. Comme nous le verrons dans la suite de cette étude, ces cuirasses peuvent jouer un rôle important dans les processus d'infiltration de l'eau dans le sol.

Enfin, il faut signaler la présence des sols dits hydromorphes qui sont circonscrits aux zones dépressionnaires (bas-fonds). Ces sols hydromorphes font référence à des sols de types variés dont la nature à été modifiée du fait de la présence d'eau en permanence dans leur zone de localisation, en l'occurrence les dépressions topographiques. L'hydromorphie se traduit par la présence dans les horizons superficiels, d'argile, de gley ou de pseudo gley avec ou sans accumulation organique. Cet aspect spécifique de ces sols leur confère un rôle important dans la conservation de l'humidité dans les bas-fonds. En effet, les couches argileuses superficielles s'humectent rapidement en début de saison de pluie, puis constituent un barrage à l'infiltration de l'eau de surface qui reste donc stockée dans le bas-fond tout au long de la saison des pluies et même largement au delà.

- *Les états de surface*

Bien plus encore que les types de sol ou l'épaisseur du profil d'altération, l'aptitude des sols à favoriser l'infiltration et donc la migration de l'eau vers de stockage plus profondes, va dépendre

avant tout de leur état de surface (Casenave & Valentin, 1989). Cette notion d'état de surface désigne la nature (sableuse, gravillonnaire), l'organisation superficielle du sol (meuble, fissurée, poreuse, encroutée), sa couverture végétale et sa microfaune. Les surfaces les plus favorables aux ruissellements seront celles nues et à porosité très faible ou inexistante. En cela, l'urbanisation grandissante (qui génère une imperméabilisation des sols en cause des habitations et infrastructures en bétons ou en bitume) en Afrique de l'ouest, les pratiques culturales, et la déforestation vont constituer des facteurs aggravant le ruissellement.

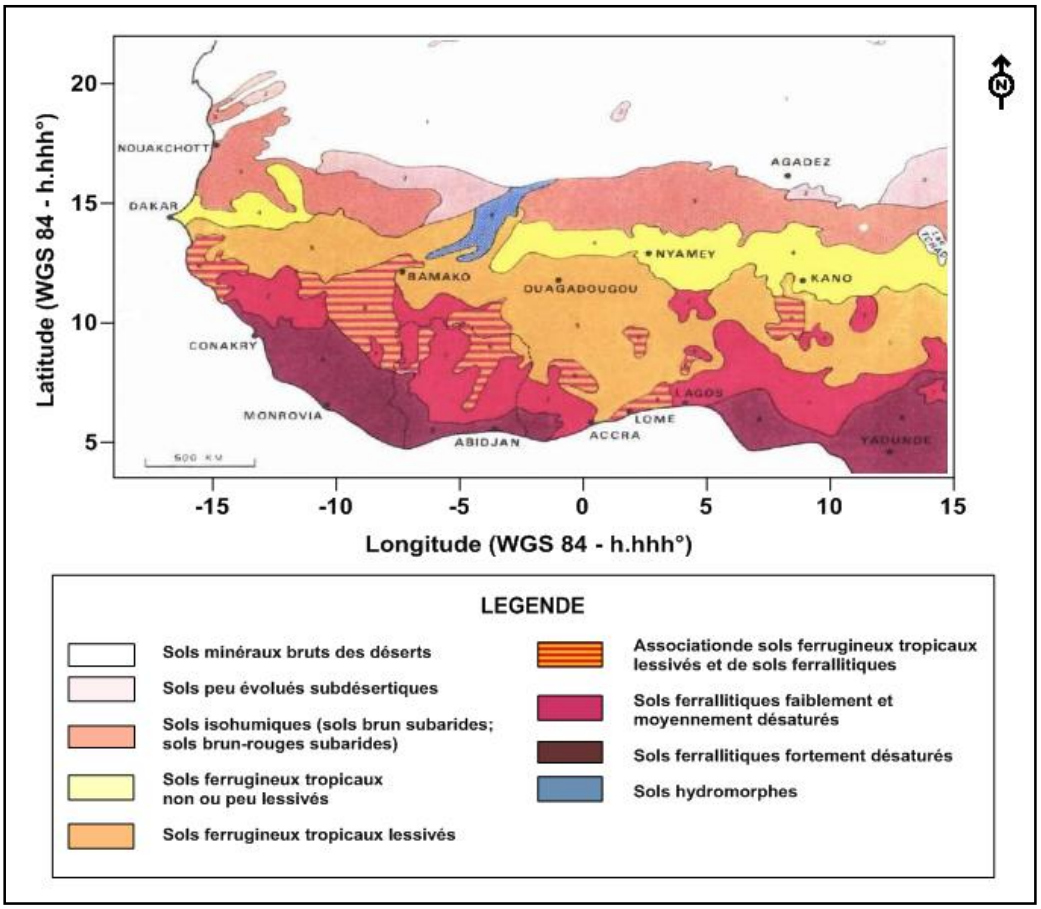


Figure 4: *Esquisse pédologique générale de l'Afrique de l'ouest (Boulet et al, 1971).*

- *La végétation et les pratiques culturales*

L'état de la couverture végétale est un autre facteur qui influence le cycle l'eau et ce, en raison de son rôle dans la réduction du ruissellement et de la conservation de l'humidité dans le sol (protection du sol contre l'érosion et l'évaporation directe lié à l'exposition au soleil). L'organisation de cette couverture végétale en Afrique de l'ouest est relativement simple dans sa présentation générale car calquée celle des zones climatiques (Hahn-Hadjali et al, 2010). Plusieurs critères sont utilisés pour qualifier ou délimités les diverses zones de cette végétation.

La classification de White (1986) qui prend en compte le continent entier est la plus couramment utilisée. Elle divise la végétation ouest africaine en quatre zones (*Cf.* Carte de végétation, *figure 5*) :

- La zone guinéo-congolaise qui correspond à la zone de forêt tropicale humide, est présente dans les zones où la pluviométrie dépasse 1300 mm / an (Guinée, sud Côte d'Ivoire, Ghana et Nigéria) ;
- La zone Guinéo-Congolaise / Soudanaise qui est une zone de transition entre la précédente et la zone soudanaise. Elle se caractérise par des forêts tropicales plus sèches, une mosaïque de forêts humides dégradées par l'activité humaine et de prairies de secondaires ;
- La zone soudanaise qui est représentée au Burkina à près de 91% et au Bénin à 87% est constituée de forêts claires et de savanes avec une strate herbacée dense et haute ;
- La zone sahélienne dans laquelle la végétation est faite de steppe arbustive avec des épineux épars et des strates herbacées discontinues et très courtes. Elle couvre 9% du territoire Burkinabè.

Toute cette végétation connait de nos jours un niveau dégradation assez avancé pour des raisons naturelles (sécheresses prolongées) mais surtout du fait de l'activité humaine (déforestation liée aux besoins d'urbanisation, extension des surfaces cultivées pour l'alimentation). En fonction de la zone cependant, la dégradation prend plusieurs visages. En zone forestière (sud Côte d'Ivoire, Ghana, Nigéria), elle se traduit souvent par la disparition des essences naturelles au profit d'espèces de production commerciales comme le café, le cacao, le palmier à huile etc. En zone soudanaise par contre, la végétation naturelle est supprimée au profit des champs de cultures notamment céréalières. Se présentent alors des paysages où la savane fait place à des habitations, des champs et jachères dans lesquels on retrouve de grands arbres isolés (en général des espèces sélectionnées). Les espaces boisés eux, se présentent souvent sous formes de forêts galeries le long des cours d'eau. Enfin dans le sahel, si la disparition de la végétation est imputable à la rudesse du climat et particulièrement ces dernières décennies, elle est aussi liée à la pratique de l'élevage extensive (bovins, caprins, équidés etc.) qui est très repandue dans cette région.

Qu'il s'agisse de la zone soudanienne ou sahélienne, la conséquence du recul de la végétation est l'exposition des sols à l'agression des éléments climatiques à savoir l'ensoleillement, les températures, les vents, les pluies, avec la mise en place à long terme de surfaces nues et encroûtées qui favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration. De même, les zones les

moins couvertes de végétation seront celles où le ressenti de sècheresse sera encore plus grand du fait de l'assèchement rapide de sol.

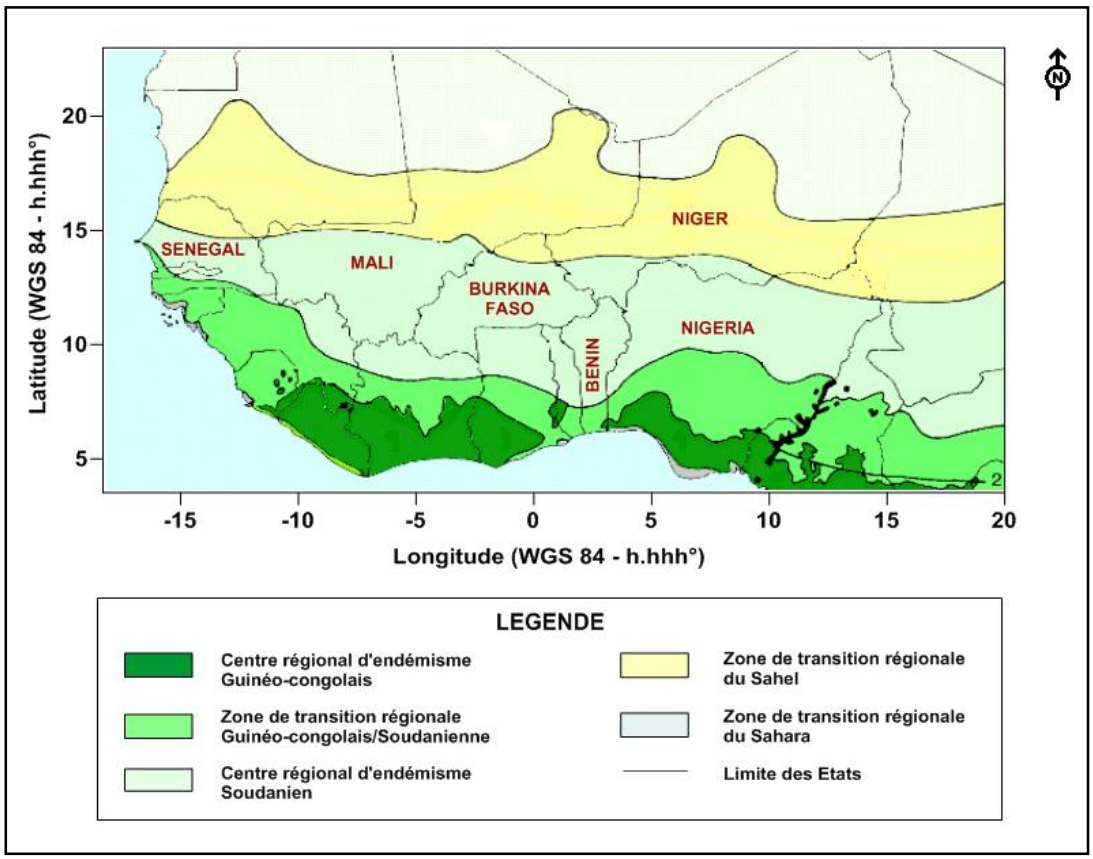


Figure 5: *Divisions floristiques de l'Afrique de l'ouest (White, 1986)*

1.2.4. Conséquences sur les ressources en eau

- *Sur les eaux de surface*

Dans la zone sahélienne comme soudanienne, le ruissellement est assez important et les principaux cours d'eau drainent par an des volumes considérables. Cependant, la disponibilité de cette eau de surface est, comme nous l'avons exprimé dans les paragraphes précédents, surtout fonction de deux facteurs qui sont le contexte climatique et l'exoréisme du système hydrographique. En conséquence, l'eau de surface est une ressource temporaire, inégalement répartie et son volume est très aléatoire dans le temps. En effet :

- Le régime des cours d'eau est guidé par l'organisation saisonnière des pluies. Les écoulements pour les cours d'eau mineurs débutent en fin juin, et les maxima de crues pour tous s'observent en général entre le mois d'août et celui de décembre avec des débits journaliers alors importants (*Cf. Tableau 3* et *figure 6*): 1542 m^3/s pour le

Niger à la station de Niamey en décembre 2014, 515 m^3/s à la station de Bétérou en septembre 2012 correspondant à des volumes journaliers respectifs de 133 et 44.5 millions de m^3. Cependant, les écoulements s'arrêtent pour la plupart des cours d'eau dès la fin de la saison des pluies. Ainsi, la saison des pluies correspond à une période d'abondance qui contraste fortement avec les réalités de saison sèche.

- L'exoréisme des écoulements des différents bassins versants entraine l'évacuation de toutes les eaux vers la mer. Aussi, en dehors des grands fleuves comme le Niger ou le Sénégal qui prennent leur source en zone forestière, la quasi-totalité des cours d'eau en zone sahélienne ou soudanienne sont à sec pendant la saison sèche, notamment entre janvier et juin (*Voir figure 6*). En zone sahélienne sédimentaire, les seuls points d'eau qui subsistent alors sont les mares issues des écoulements endoréiques locaux (exemple de la mare d'Oursi au Burkina Faso). En zone soudanienne par contre, les bas-fonds sont les endroits ou subsisteront encore pour quelques temps, des mares temporaires qui occupent les surcreusements des lits de cours d'eau ;

- La variabilité des volumes d'eau drainés par les cours d'eau est à l'image de l'organisation des zones climatiques et des variations pluviométriques interannuelles observées. Ces volumes sont décroissant du sud au nord, du fait de l'aridité progressive du climat mais aussi de la position en tête de bassin des zones plus au nord (cas du bassin de la Volta, de l'Ouémé, de la Comoé, de certains affluents du Niger et de tous les bassins côtiers). Ils peuvent également varier d'un facteur d'ordre 5 voire plus d'une année à l'autre quelque soit la zone climatique considérée (*Cf. Tableau 3 et Figure 6*). En outre, les périodes de sècheresse observées depuis les années 1970, ont considérablement réduit les débits des cours d'eau qui ont subit des déficits atteignant parfois 40% de leur débits moyen (Servat et al, 1997). Dans un tel contexte, même la présence d'ouvrages de stockage (lacs artificielles) censés assurer une certaine disponibilité de l'eau ne constituent plus une garantie, tant les niveaux de remplissage attendus sont souvent aléatoires ;

- Enfin, l'évaporation élevée qui caractérise ces deux zones climatiques (3500 mm par an en zone sahélienne et 2500 en zone soudanienne - Albergel et al, 1993), ôte de très grandes quantités à tout plan d'eau persistant après la saison des pluies provoquant ainsi son assèchement rapide.

En somme, en dépit de son volume annuel renouvelable important, l'eau de surface en zone sahélienne et soudanienne est une ressource qui ne subsiste que le temps de la saison des pluies. Pendant la saison sèche, elle est largement supplée par l'eau souterraine.

Cours d'eau	Station	Niveaux	H(cm)	Q(m3/s)	Date
Bani	**Beneny Kenny/Mali**	Maximum	522	1053	17/09/2014
		Minimum	37	9,40	31/05/2015
		Module annuel		**286**	
Gorouol	**Koriziéna/Burkina Faso**	Maximum	382	119	13/08/2014
		Minimum	0	0,000	01/06/2014
		Module annuel		**25,0**	
Niger	**Niamey/Niger**	Maximum	510	1542	23/12/2014
		Minimum	144	53,0	10/06/2014
		Module annuel		**752,0**	

Tableau 3: *Débits minimums et maximums annuels de quelques cours d'eau en Afrique de l'ouest*

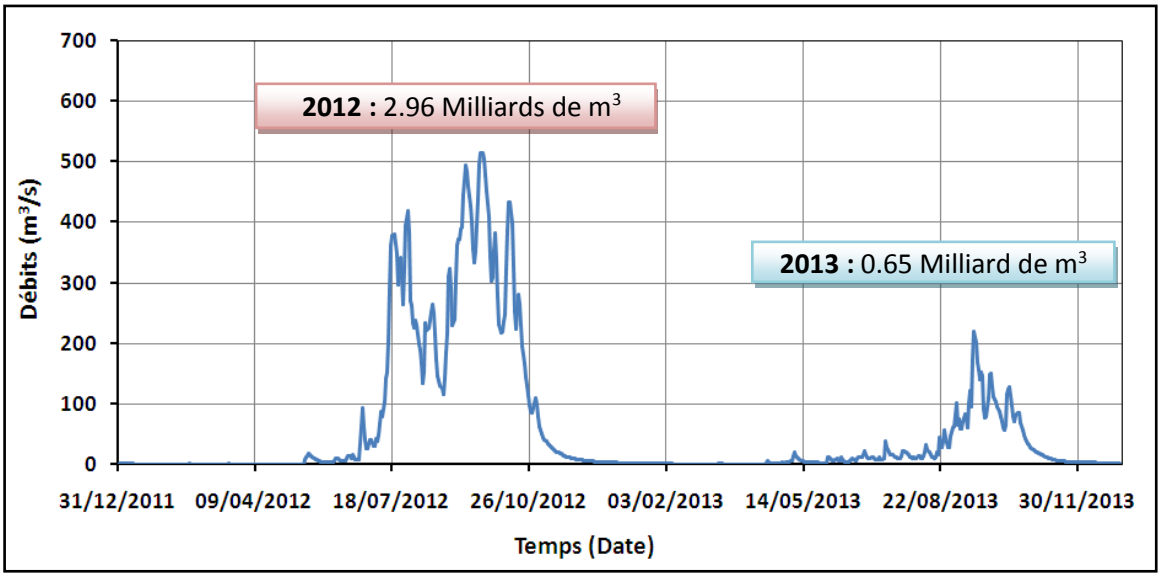


Figure 6: *Variations interannuelles des débits et volumes d'eau écoulés sur l'Ouémé à la station de Bétérou (nord Bénin). Le volume écoulé en 2013 ne représente que 22% de celui de 2012.*

- *Sur les eaux souterraines*

La variabilité des contextes géologiques en Afrique de l'ouest introduit également des grandes disparités dans l'importance des volumes d'eau souterrains stockés dans lequel le facteur pluviométrie semble jouer un rôle équilibrant. En effet, la zone soudanienne plus arrosée est dominée par le socle peu favorable à l'infiltration tandis que les zones sédimentaires plus favorables se retrouvent sous climat plus aride (sahélien). Néanmoins, quelque soit le contexte

géologique considéré, la quantité des ressources souterraines renouvelables est non négligeable même si les chiffres donnés dans les différents rapports sont approximatifs : 32 milliards de m^3 / an au Burkina, soit environ 15% de la pluie annuelle (Rapport DGH, 2001), 55 milliards de m^3/an au Mali (Rapport DNHE, 1990). Cependant, ce stock n'est pas pérenne au cours de l'année car une grande partie sera reprise par l'évapotranspiration qui peut ôter à elle seule près de 80% de celui-ci (Richard et al, 2013) générant ainsi un rabattement annuel très important des nappes. De plus l'accès à cette ressource présente quelques contraintes:

- En zone de socle, les sources d'eau les plus pérennes se trouvent dans les systèmes fracturés qui sont souvent profonds, difficiles à identifier depuis la surface et peu accessible par des moyens de creusage artisanaux (du fait de la nature et de l'épaisseur des altérites : cuirasses, argiles, socles granitiques). Les nappes n'y sont donc pas forcément continues ce qui impose pour y accéder de disposer d'outils de détection assez précis. En la matière, la méthode la plus utilisée en Afrique de l'ouest demeure encore la prospection électrique (trainée plus sondage) qui donne certes des résultats, mais également présente des limites, d'où les taux d'échec élevés (30%) évoqués plus haut. En zone sédimentaire sahélienne, les nappes sont en générales continues mais présentent l'inconvénient de se trouver parfois à de très grandes profondeurs (70 m voir plus dans la plaine du Gondo au nord du Burkina), ce qui rend l'exore manuel difficile.

- Les débits obtenus en forage en zone de socle sont en général faibles. Les études menées au Bénin montrent que seulement 10% des forages réalisés en zone de socle ont un débit supérieur à 5 m^3/ h, c'est-à-dire juste suffisant pour alimenter un gros village. De plus, les débits initialement observés ne sont pas garantis à long terme. Les puits villageois qui sont l'autre moyen de prélèvement de l'eau surtout en milieu rural, sont en général moins productifs du fait qu'ils sont creusés dans du matériau d'altération souvent argileux et donc peu transmissif. Ce sont en outre des ouvrages qui subissent rapidement l'impact du rabattement important de la nappe au cours de l'année. Les moins profonds ne tardent souvent pas à être sec en saison sèche.

En définitive, la localisation et le contexte de cette ressource peuvent parfois la rendre moins accessible à certains endroits que l'eau de surface. Cependant, en raison du besoin impératif de disposer d'eau potable à tout endroit pour les populations, notamment pour les utilisations domestiques courantes (boisson, cuisine), créer des ouvrages d'accès à l'eau souterraine s'impose pour obtenir tout de suite une ressource prête à être consommée. Cette solution facile à

mettre en œuvre va naturellement influencer la structure des systèmes d'approvisionnement des pays ouest africains.

1.2.5. Impact sur les systèmes d'approvisionnement en eau

En dépit de la diversité des potentialités créée par les facteurs naturels ci-après cités, les systèmes d'approvisionnement en eau en Afrique de l'ouest ne semblent pas tenir compte des spécificités environnementales locales. Ils résulteraient plus de la simple contrainte à résoudre des problèmes récurrents en utilisant des solutions économiquement plus accessibles. Aussi, quel que soit le pays considéré, l'on se rend compte que la satisfaction des besoins en eau se fait à travers un schéma d'approvisionnement reposant sur deux axes:

- L'utilisation de l'eau de surface directement prélevée dans les grands cours d'eau ou des lacs artificiels ou naturels (barrages, petites retenues d'eau, mares). C'est une solution est en général utilisée pour la satisfaction des besoins en grands volumes d'eau pas forcément potables comme la production d'électricité, l'agriculture (irrigation) et l'élevage, ou alors pour l'approvisionnement en eau potable des grandes villes. Elle est cependant couteuse car impose la construction d'infrastructures spécifiques (canaux d'irrigations, stations de traitement d'eau) en plus des indispensables ouvrages de stockage que sont les barrages. Cela explique sans doute la faible mobilisation des ressources en eau de surface dans la zone ouest Africaine qui se situe loin derrière les autres parties de l'Afrique. En effet, cette partie de l'Afrique qui représente 25% de la superficie du continent ne compte cependant que le dixième des grands barrages (capacité supérieure à 3 millions de m^3 d'eau – Commission Internationale des grands Barrages) présents sur le continent soit 110 sur près de 1300. Du reste à cause de leur coût, les ouvrages réalisés sont en général multifonctions : AEP, hydroélectricité, pisciculture, irrigation, élevage etc ;

- L'approvisionnement en eau potable à partir des puits et forages. Mode d'approvisionnement par excellence en milieu rural, il constitue également un système d'appoint en ville lorsque l'eau de surface est insuffisante, ou quand le réseau de distribution de l'eau courante peine à couvrir certaines zones. Le nombre de ces ouvrages qui a fortement augmenté au fil des programmes d'amélioration de l'accès à l'eau potable, atteint aujourd'hui dans certains pays des chiffres énormes : 65 000 au Burkina (Rapport AEP 2012), 35 000 au Bénin (Sources DGEau, Bénin, 2013). Si ce système rencontre autant de succès, cela tient à un certain nombre de facteurs dont:

- La facilité et le faible coût de sa mobilisation (4 millions de FCFA pour un forage équipé) ;
- Le prêt à consommer de la ressource mobilisée (l'eau des forages est déjà potable) et sa relative mise à l'abri des contaminations ;
- La pérennité saisonnière souvent mieux garantie que l'eau de surface ;
- Enfin, la possibilité de rapprocher les ouvrages des utilisateurs au point d'en faire des sources plus ou moins privées (forages ou puits pour écoles, dispensaires, fermes privées domiciles etc.).

En somme, l'approvisionnement à partir des forages répond mieux – du moins à court terme – à la nécessité des états d'améliorer rapidement et à moindre frais le taux d'accès de leurs populations à l'eau potable. Elle représente aussi une forme de résilience face aux effets des changements climatiques de ces dernières années dont on connait les effets sur la disponibilité des eaux de surfaces (sècheresses, baisse des débits des cours d'eau). Aussi, l'approvisionnement en eau potable à partir d'ouvrages d'exploitation de l'eau souterraine est devenu un moyen central des systèmes de mise à disposition de l'eau potable en Afrique de l'ouest et ce en dépit de toute la méconnaissance qui entoure le mode renouvellement de cette ressource surtout dans le contexte de changement climatique que nous connaissons de nos jours.

Ce constat relance donc la récurrente question de la connaissance du fonctionnement des systèmes aquifères dans la région et de l'amélioration des outils de prospection pour une exploitation efficiente de la ressource dans un contexte (socle) où les conditions du sous sol sont a priori assez défavorables à la fois pour l'infiltration et le stockage de l'eau de pluie.

1.3. Méthodes géophysiques et exploration pour l'eau souterraine

Le recours à l'eau souterraine comme source d'accès à l'eau potable dans les pays d'Afrique de l'ouest à également introduit la nécessité de disposer de méthodes d'implantation efficaces pour la réalisation des ouvrages de captation. Si pendant longtemps des méthodes traditionnelles d'implantation (utilisation de baguettes par les sourciers entre autre) étaient suffisantes pour la réalisation des ouvrages artisanaux (puisards et puits villageois), le lancement des programmes de création points d'eau modernes (forages) en grand nombre et dans des environnements variés, a nécessité l'introduction de nouvelles méthodes de prospection plus efficaces et plus facile à mettre en œuvre.

Plusieurs techniques de détection des zones favorables en l'occurrence les fractures ou linéaments sont alors utilisées : la photo aérienne et l'imagerie satellitaire, la reconnaissance directe d'indicateurs naturels sur le terrain, les mesures géophysiques. Parmi ces dernières, l'utilisation des méthodes géophysiques s'est largement imposée, seule ou en association avec d'autres techniques telle que le traitement de l'imagerie satellitaire (pour la détection préalable des linéaments). Pour des raisons sans doute de facilité de mis en œuvre, mais également de simplicité et de coût de matériel, la méthode géophysique souvent rencontrée est celle basée sur les mesures de résistivité électrique en courant continu.

1.3.1. Recherche des aquifères par la méthode de résistivité en courant continu

L'implantation des forages à l'aide de la méthode de résistivité électrique en courant continu est basée sur l'utilisation d'un quadripôle de mesure dans une configuration spécifique : en général un dispositif de type Schlumberger (voir détail dans méthode). La prospection sur le terrain repose sur deux types d'opérations:

- Le trainé qui consiste en des mesures ponctuelles de résistivité apparente effectuées le long d'un ou plusieurs transects (encore appelés profils électriques). Cette exploration spatiale vise la détection de zones d'altération épaisses (linéaments) dont la présence se traduit par une baisse conséquente de la résistivité apparente par rapport à celles voisines (*Cf. Figure 7B*). En général, au moins trois transects sont réalisés pour confirmer l'existence de l'anomalie conductrice, étant entendu que celle-ci est supposée présenter une certaine linéarité sur le terrain (*Figure 7A*).

- Le sondage. Il est pratiqué à l'endroit de la zone d'altération épaisse détectée (*SE1* et *SE2* sur la *Figure 7A*) et vise à caractériser précisément le profil d'altération. Il consiste en une série de mesures réalisées au même point en faisant varier progressivement la taille du quadripôle de mesure. Un logiciel d'inversion est ensuite utilisé pour interpréter le sondage et permettre la présentation du terrain en couches de résistivité (calculée) différenciée avec chacune une épaisseur correspondante (*Cf. Figure 7C*).

Dans la méthode ci-après décrite, il n'est donc pas question de détection directe de la présence de l'eau dans le sous sol (d'autres méthodes existent pour cela). Il s'agit plutôt à travers des mesures de résistivité, de rechercher une géométrie spécifique de la structure du sous-sol sensée être favorable à la présence d'eau. Aussi, c'est un mode d'exploration qui repose sur une certaine connaissance des modèles d'aquifère en zone de socle.

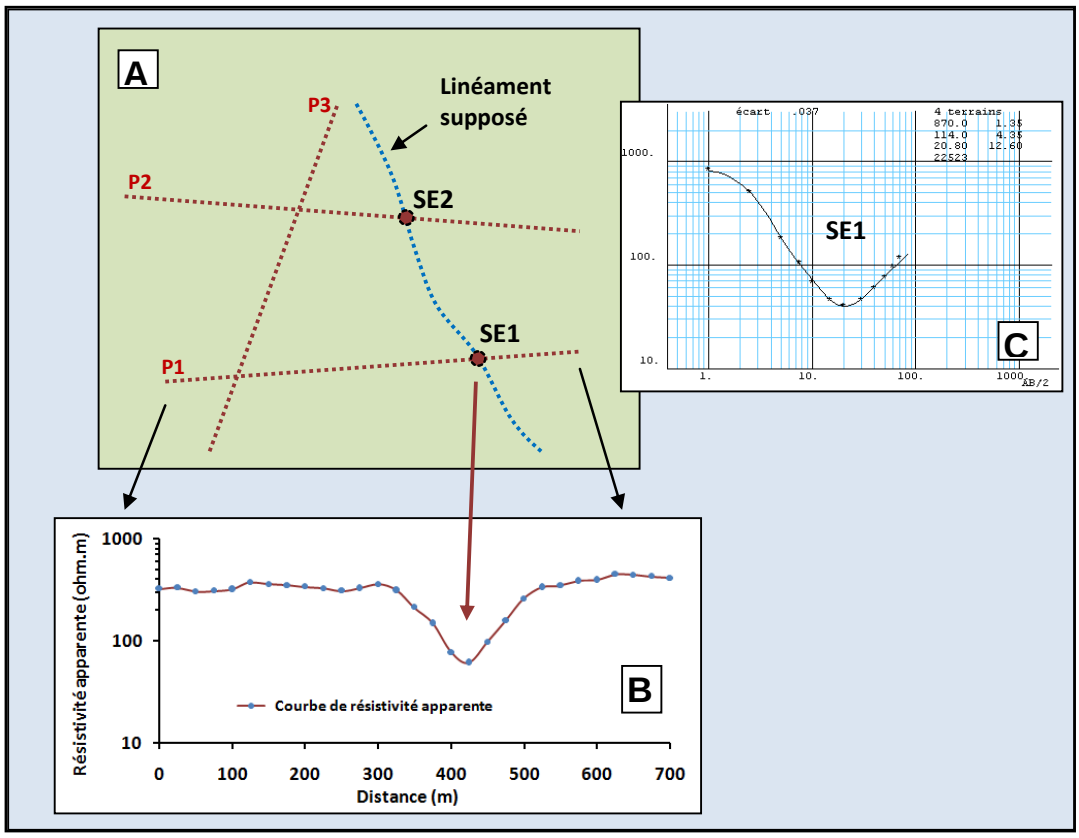


Figure 7: *Schéma explicatif des étapes de prospection pour d'implantation d'un point d'eau à l'aide de mesures de résistivité en courant continu.* ***(A)****, recherche du linéament à l'aide de mesures à pas réguliers sur des profils (P1, P2, P3).* ***(B)****, baisse de résistivité sur la courbe des valeurs d'un profil indiquant la présence probable d'un linéament.* ***(C)****, courbe de données et interprétation d'un sondage effectué à un point (SE1) du linéament supposé.*

- *Modèle d'aquifère en zone de socle*

L'altération des roches cristallines sous climat soudanien et sahélien laisse sur place des matériaux de nature variée en fonction du type de roche, organisés en couches plus ou moins différenciées en fonction du climat ou de la géomorphologie locale. D'une façon générale, le processus d'altération aboutie à la place d'un profil constitué de trois parties avec du haut vers la profondeur: des altérites meubles puis des altérites consolidés (zone fissurée et altérées), le tout reposant sur la roche seine. La description détaillée de ces zones d'altérites peuvent varier en fonction des types d'étude : pédologique, hydrogéologique ou géologique mais en général, on s'accorde sur un modèle standard dans lequel on retrouve les trois grandes parties du profil avec parfois associés les types de nappes ou les niveaux piézométriques en fonction des saisons.

La *Figure 8* (issue de Guiraud, 1987), montre un profil d'altération sur socle granitique avec des détails sur la nature des matériaux et la succession des couches ainsi qu'une vue des variations des niveaux piézométriques en saison sèche et saison des pluies. La *Figure 9* plus récente, est

issue d'une vision plus hydrogéologique et met plutôt l'accent sur les grandes différences structurelles du profil : altérites meubles, zone fissurée et roche saine. Quelques observations ressortent de ces schémas :

- La couche superficielle cuirassée qui est caractéristique des sols ferrugineux tropicaux que l'on rencontre en zone de socle est bien représentée. Souvent en sommet de butte, son épaisseur peut varier de 0,5 à 3 m. Elle peut être perméable et donc capable de stocker une certaine quantité d'eau qui pourrait modifier leur réponse à la mesure géophysique. Quand elle est affleurante et compacte (carapace), elle peut constituer un vrai obstacle à la réalisation de certaines mesures par contact comme les mesures électriques. Cependant, il arrive (même sur les sommets) qu'elle soit recouverte par un horizon qui augmente (couche meuble ou enherbé) ou entrave (surface encroutée) sa capacité d'infiltration ;
- La présence dans le profil de couches argileuses qui peuvent être très épaisses (5 à 30 m voire plus) tel que le montre la *Figure 8*. La structure de ces couches argileuses est assez variable : argiles massives, stratifiées avec alternance de couches plus ou moins sableuses. Elles abritent parfois une ou plusieurs nappes perchées avec ou sans interconnexion. La base de ce niveau argileux est constituée d'arènes qui représente la partie la plus altérée de la zone dite fracturée. Pour les mesures géophysiques surtout électriques, ces couches argileuses peuvent constituer un vrai obstacle car elles peuvent par leur grande conductivité faire écran aux lignes de courant empêchant ainsi une prospection profonde.
- L'aspect fracturé de la roche sous-jacente.

En zone de socle, la qualité des systèmes aquifères est liée entre autre à l'épaisseur de l'ensemble de la structure formée par les altérites meubles et la zone fracturée, d'où l'intérêt en implantation de rechercher les structures les plus épaisses. Seulement, avec la présence dans les profils de sol des couches argileuses souvent très conductrice, l'implantation des ouvrages par les méthodes électriques rencontre souvent des difficultés liées à la réponse prédominante de ces couches argileuses. Dans les faits, les zones détectées en implantation classique sont celles présentant un très fort contraste d'épaisseur d'altérite avec l'environnement immédiat (zones de fractures à droite des *Figures 8* et *9*), et se situant à des endroits où la faible épaisseur d'ensemble des altérites permet la détection facile des structures profondes telles les zones de broyage.

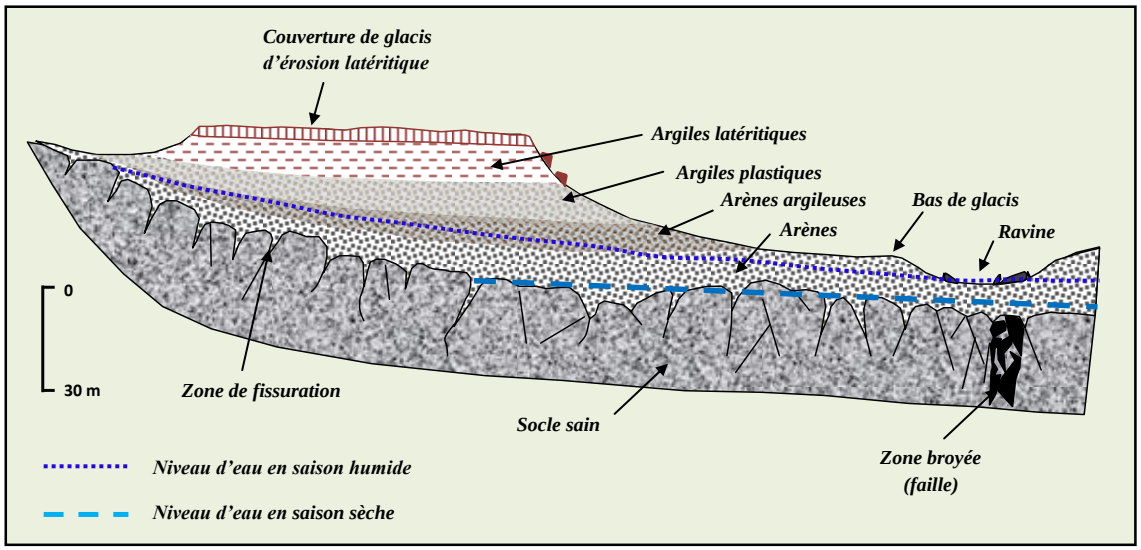


***Figure 8**: Coupe schématique des aquifères en région granitique (Guiraud R, 1988 - Redessiné)*

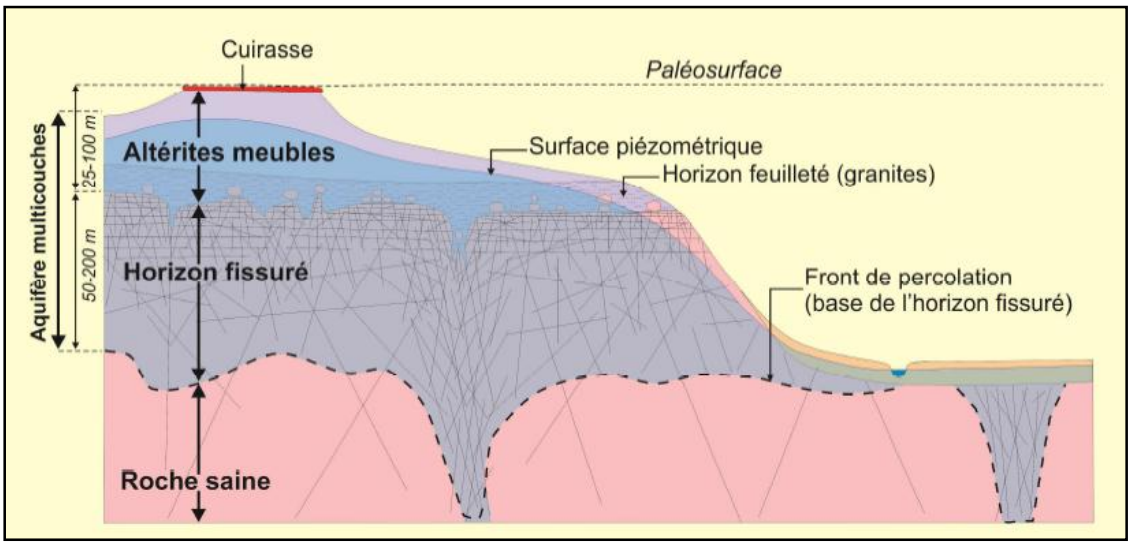


***Figure 9**: Modèle conceptuel d'aquifère de socle (Lachassagne et Wyns, 2005)*

1.3.2. Méthodes géophysiques et suivi de l'infiltration

Si la multiplication des points d'eau pour l'amélioration de l'accès à l'eau potable a pendant longtemps constitué des priorités nationales, la question du renouvellement de la ressource devant garantir la pérennité de fonctionnement des ouvrages ne s'était jamais vraiment posée. Plusieurs raisons sont à l'origine de ce désintérêt :

- La plupart des points d'eau crées pour l'approvisionnement en eau potable sont en milieu rural, là où les besoins ne nécessite pas forcément de gros volumes (prélèvements pour eau de boisson en priorité). De plus, l'exore au niveau de ces ouvrages étant manuel, les débits de prélèvement sont faibles. Aussi, les cas

d'assèchement de forages qui interviennent sont plutôt imputés aux mauvaises implantations et/ou équipements des ouvrages.

- Les ouvrages n'étant pas très couteux, le remplacement d'un point d'eau défectueux par un autre à un endroit plus favorable, a toujours plus ou moins été la solution naturelle à envisager.

Les problèmes ne sont apparus que lorsque certains ouvrage utilisés en complément des systèmes d'approvisionnement en eau potable en milieux urbains ou semi-urbains, ont vu leurs débits et niveaux statiques baisser drastiquement, suite aux sollicitations des capacités maximales des aquifères pendant un temps relativement long (parfois plus de 10 ans). Dans certains cas, les problèmes ont concerné des contaminations depuis la surface ou alors des intrusions internes biologiques ou minérales dans la nappe.

Des études pour comprendre la dynamique des nappes, évaluer la recharge ou dresser un état de la qualité des eaux ont alors parfois été réalisées mais sont restées souvent du domaine de l'hydrologie, de l'hydrogéologie ou de hydrochimie.

L'utilisation des méthodes géophysiques quant à elle, est plus récente. L'une des premières études d'infiltration en zone de socle sahélien (nord du Burkina) est celle de Descloitres et al (2003). En réalité, l'application des méthodes de résistivité au suivi de l'infiltration a connu un essor ces dernières années grâce au développement des équipements de mesures mais surtout des outils informatiques de traitement des données et/ou de modélisation. Parmi les méthodes utilisées, on peut citer :

- Celles qui à l'instar des outils traditionnelles utilisés en hydrogéologie ou hydrologie, peuvent servir à estimer les variations de stocks d'eau dans le sol. On peut citer entre autre la méthode gravimétrique et la résonance magnétique protonique (RMP) ;

- Celles qui sont utilisées pour l'étude qualitative des processus d'infiltration proprement dit. Ce sont notamment les méthodes utilisant la résistivité électrique ou électromagnétique fréquentielle.

La préférence des méthodes de résistivité pour le suivi des infiltrations tient à des raisons non seulement de facilité de mise en œuvre des mesures sur site (simplicité du matériel et de la mesure déjà évoquée plus haut) mais surtout, de la possibilité d'effectuer des mesures discriminantes (adaptées à l'étude du proche sous-sol) à petite ou grande échelle, aussi bien au

plan horizontal (cartographie de résistivité) que vertical, grâce notamment à la tomographie de résistivité électrique (ERT).

La méthode de suivi temporel de résistivité utilisé dans le cadre de cette étude, consiste en l'utilisation de ces deux types de mesures (prospection horizontale et verticale) pour le suivi pendant la saison pluvieuse de la dynamique de l'infiltration par le biais des variations de résistivité dans le sol provoquées par le passage de l'eau de la surface vers la profondeur.

Si malgré la simplicité de mise en œuvre des méthodes utilisant la résistivité, les études de suivi temporelle ne sont pas si nombreuses, cela tient d'une part au fait qu'elles sont longues et contraignantes (beaucoup de précautions à prendre pour l'acquisition et le traitement des données) et d'autre part, de la difficulté à interpréter les résultats sans un minimum de connaissance sur :

- La géométrie du sous-sol et la nature des matériaux en présence ;
- Le type de processus en cours dans le milieu ;
- Les lieux et modes de manifestation des processus.

En d'autres termes, non seulement il est difficile d'échantillonner le processus lorsqu'il est mal connu, mais également, les mesures géophysiques seules peuvent ne pas suffire à donner une bonne description des processus étudiés. Cela justifie en partie le fait que l'apport des mesures géophysiques se fasse en complément d'autres types d'investigations permettant de fournir justement un minimum de données annexes : pluie, humidité et température du sol, niveaux piézométriques, conductivité de l'eau du sol.

Pour toutes les raisons invoquées plus haut, le suivi temporel géophysique pour les études d'infiltration dans toute la zone ouest Africaine, reste du domaine de la recherche que de celui de la routine de mesures en ingénierie d'hydraulique villageoise.

1.4. Problématique de la thèse

Pour comprendre la dynamique des processus du cycle de l'eau notamment dans sa composante souterraine, les hydrologues et hydrogéologues disposent de multiples outils d'investigation. Parmi eux, on peut citer les capteurs ponctuels destinés à la quantification in situ des processus et les outils informatiques utilisés pour la modélisation. Tout comme pour les méthodes géophysiques, ces outils ont connu de nettes améliorations grâce notamment aux avancés informatiques. Cependant, leur utilisation optimisée introduit ou impose d'avantage certaines contraintes dont:

- La nécessité d'être précis au moment de la mise en place des capteurs, afin que l'échantillonnage du processus étudié soit représentatif du milieu ;
- La nécessité au moment de définir les paramètres de modélisation, de disposer d'une grille du terrain qui soit la plus détaillée et la plus précise possible avec en complément, une bonne description de la manifestation des processus à l'intérieur des terrains.

Ces deux types de besoins expliquent le recours aux méthodes géophysiques dont la contribution est souvent attendue sur la restitution de la géométrie des terrains et la description des processus de transfert de l'eau dans le sous-sol.

1.4.1. Attentes sur les apports des outils géophysiques

- *Au plan de la description de la géométrie des terrains* : les attentes dans ce domaine vis-à-vis de la géophysique se posent en général en termes de structures de détails. En effet, l'utilisation des modèles en hydrologie ou en hydrogéologie nécessite de fournir certains paramètres du sous-sol. Si pour une étude au plan régional, il est possible d'avoir recours à des cartes (géologiques, pédologiques) à plus ou moins petite échelle, les investigations à l'échelle d'un petit bassin nécessite en revanche une définition plus fine de la structure interne du site. Aussi, même s'il existe pour la zone de socle, des modèles conceptuels de géométrie de sol tels que nous les avons présentés plus haut en *Figures 8 et 9*, ceux-ci ne peuvent pas être utilisés dans le cadre de l'étude d'une zone restreinte parce que les profils de sol peuvent être spécifiques aux conditions climatiques et environnementales locales. Ainsi, le besoin de disposer de détails précis sur la structure locale du terrain à étudier aussi bien au plan vertical qu'horizontal, constitue un impératif dans le cadre des études à l'échelle du petit bassin versant (jusqu'à 10 km^2). Ce besoin de détail vaut aussi bien pour la bonne caractérisation du terrain que pour

l'implantation optimisée des capteurs ponctuels devant servir à quantifier ou qualifier les processus de transfert d'eau dans le sol.

- *Dans le domaine de la description des processus de transfert d'eau dans le sol*. Les processus hydrologiques qui participent au cycle de l'eau en zone de socle sont connus : il s'agit des précipitations, du ruissellement, de l'évapotranspiration et des transferts souterrains. Parmi ces processus, les trois premiers sont de « surface » et sont donc plus ou moins aisés à estimer en utilisant le matériel adapté.

L'infiltration qui est le processus souterrain, est celui sur lequel la contribution du géophysicien est souvent attendue. En effet, l'infiltration et les variations de stocks qui en résultent ne font pas couramment l'objet de mesures directes dans les études hydrologiques. Ce sont des données souvent déduites après estimation des processus de surface. Même quand elles sont estimées directement sur le terrain, elles proviennent de capteurs ponctuels dont il est parfois difficile d'apprécier la pertinence de l'implantation.

L'étude des propriétés hydrodynamiques des terrains est ainsi souvent confrontée à des problèmes qui concernent non seulement la représentativité des mesures prises par les capteurs ponctuels, mais également leur extension puis leur applicabilité à des zones similaires. Aussi, les hydrologues proposent souvent des modèles de fonctionnement hydrologiques de bassins qui laissent des verrous sur lesquels l'apport de la géophysique est attendu. La nature des verrous ainsi que les zones concernées dépendent de la zone climatique considérée. Les *Figures 10 et 11* présentent des modèles conceptuels de fonctionnement hydrologiques en zone sahélienne et soudanienne proposés par Descloitres (2010), à partir desquels nous présentons les problématiques qui seront traités dans le cadre de cette thèse.

Fonctionnement hydrologique en zone sahélienne et verrous à lever

La *Figure 10* présente le fonctionnement d'une topo-séquence en zone sahélienne. Dans cette zone où la pluviométrie annuelle faible (400 à 700 mm), l'évapotranspiration potentielle est très élevée (2000 mm/an). En raison de la rareté du couvert végétal et de la présence de surfaces encroutées qui y sont assez étendues, elle est plutôt le domaine du ruissellement. Pour cette zone sahélienne, il est proposé un modèle de fonctionnement dans lequel:

- L'évapotranspiration concerne tous les éléments du paysage ;
- Les versants sont considérés imperméables et donc uniquement ruisselants ;
- L'infiltration est indirecte et sensée se produire dans les bas-fonds (hypothèse prise sur les zones sédimentaires) et probablement sur les affleurements ;

- Le rôle des ravines de versants est méconnu ;
- Les placages sableux sont des lieux de stockage temporaire des eaux de pluies avec des connexions inconnues avec les couches profondes du sol.

A partir de ce modèle, les verrous sur lesquels le géophysicien est attendu en zone sahélienne portent sur :

- La confirmation de la nature de l'infiltration et les lieux ou elle se produit ;
- Le rôle des affleurements rocheux, des placages sableux et des ravines de versant ;
- La confirmation ou non de l'infiltration indirecte dans les ravines de bas-fond et la description du processus si elle existe.

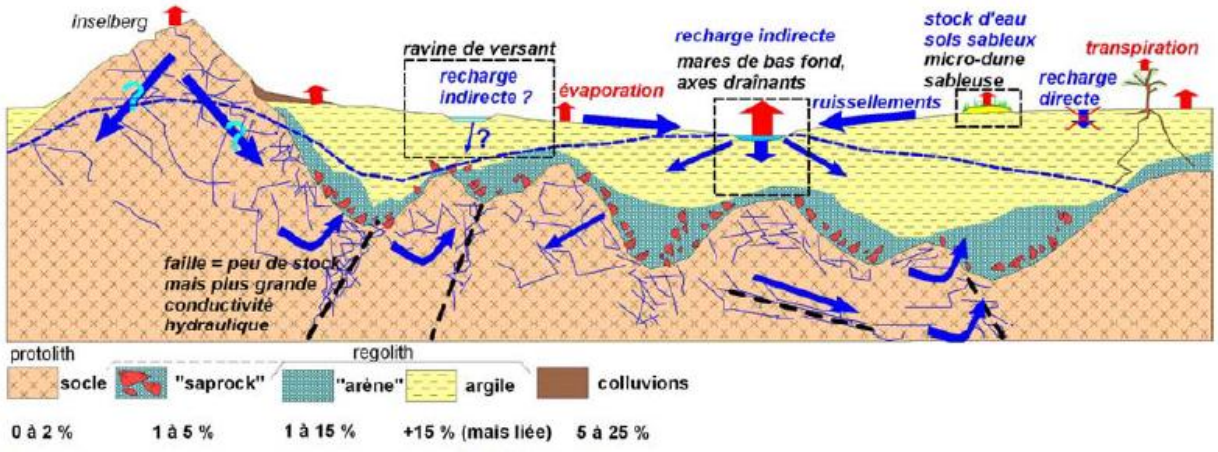


***Figure 10**: Modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique en zone sahélienne (Descloitres, 2010).*

Fonctionnement hydrologique en zone soudanienne et verrous à lever

Contrairement à la zone sahélienne, la pluviométrie atteint ici 1200 mm/an. Le couvert végétal est également plus abondant et donc l'ETR plus élevé. L'infiltration en zone soudanienne est considérée généralisée mais le rôle de certaines unités topographiques change (*Cf. Figure 11*):

- Les ravines principales sont considérées comme des zones de déversement des eaux de ruissellement et des écoulements hypodermiques mais pas comme une zone d'infiltration préférentielle ;
- Les ravines de versant par contre sont considérées comme potentiellement infiltrantes ainsi que les bas-fonds de versant.

Les verrous à lever ici portent sur deux aspects. Il s'agit dans un premier temps de confirmer la généralisation de l'infiltration au plan spatial par la mise en évidence de sa manifestation au niveau des unités morphologiques (versants, bas-fonds) tout en précisant certains de ces traits majeurs : infiltration superficielle, profonde, faible ou forte. Dans un second temps, les mesures devront prouver le rôle des bas-fonds de versant et permettre la description des processus de transfert d'eau qui s'y déroule.

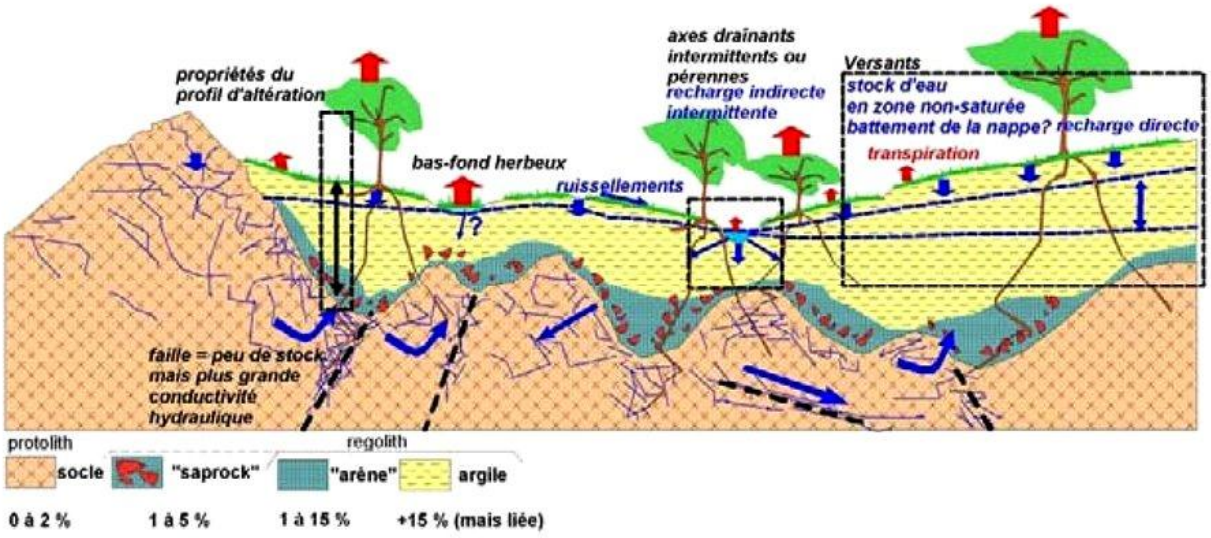


***Figure 11**: Modèle conceptuel de fonctionnement hydrologique en zone soudanienne (Descloitres, 2010).*

1.4.2. Questions adressées aux géophysiciens

La levée des verrous précédemment énoncés se fait dans la pratique à travers des questions qui sont posées aux géophysiciens associés aux études sur les sites. Nous proposons ici les questions couramment posées par les hydrologues et hydrogéologues et auxquelles les géophysiciens peuvent contribuer, en nous limitant à celles induites par les verrous constatés sur l'infiltration.

Questions sur la géométrie du terrain et les systèmes aquifères

- Peut-on connaitre la géométrie des terrains ? Peut-on l'avoir au plan vertical et horizontal ?
- Peut-on à partir des propriétés géophysiques, déterminer la nature des terrains ?
- Peut-on prédire les stocks ?
- Peut-on prédire les difficultés techniques lors des opérations de forage (argiles épaisses, sables, roches dures etc.) ?

Questions sur les processus

- Où se passent les infiltrations ?
- Atteignent-elles la nappe ?
- Est-on capable de suivre la dynamique temporelle et spatiale des infiltrations ?
- Où doit-on implanter les capteurs ponctuels ?
- Quels sont les paramètres hydrodynamiques des terrains en présence ?
- Peut-on spatialiser les processus à toutes les échelles et dans toutes les directions (carte/coupes) ?

1.4.3. Contribution des géophysiciens

Pour répondre à ces questions, le géophysicien dispose de plusieurs paramètres géophysiques qui sont : la résistivité électrique, la polarisation provoquée, la vitesse sismique, les propriétés magnétiques, la densité etc. Chaque paramètre peut être mesuré à l'aide d'un éventail de méthodes, chacune ayant ses avantages et ses limites. In fine, il appartient au géophysicien d'effectuer les mesures les plus appropriées qui puissent donner accès directement ou indirectement aux propriétés hydrodynamiques des terrains.

Parmi ceux-ci, la résistivité est un paramètre de choix couramment utilisé dans les études géophysiques appliquées à l'hydrogéologie. Le fait est que ce paramètre est lié à certaines propriétés physiques et chimiques des terrains par la loi d'Archie qui montre que pour un terrain sableux, la valeur de résistivité est fonction de la porosité, de la saturation et de la chimie des eaux d'imbibition (*Voir titre 2.3.3 dans le volet méthode*). Il s'agit donc grâce aux valeurs de résistivité, de déduire dans certaines conditions (en zone saturée notamment) des propriétés de terrain comme la porosité quand des données annexes sur la chimie des eaux par exemple sont disponibles.

Cette thèse explore les possibilités d'emploi de la résistivité grâce aux développements récents des techniques d'imagerie électrique, que nous allons employer particulièrement en mode "suivi temporel" pour mettre en évidence la dynamique des processus d'infiltration. Elle tentera de répondre aux différentes questions posées en contournant au maximum les problèmes posés par la mise en œuvre pratiques des techniques de mesures et les inconvénients liés aux paramètres de mesures choisis.

1.5. Objectifs de la thèse

1.5.1. Objectif général

L'objectif général de cette thèse est de contribuer par des moyens géophysiques, à la connaissance des processus d'infiltration en zone de socle dans les deux situations climatiques que sont la zone soudanienne et sahélienne. C'est un travail surtout méthodologique qui montre l'apport des techniques de suivis temporels de résistivité à l'étude des processus d'infiltration avec pour finalité de donner les conditions d'utilisation des différentes techniques de mesures, leurs avantages et leurs limites et enfin la possibilité de leur mise en œuvre ou non dans des routines classiques de mesures.

1.5.2. Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, il s'agira de répondre aux questions classiques de recherche énoncées plus haut, à travers l'utilisation d'un certain nombre de dispositifs de mesures dont on évaluera la pertinence dans la résolution du problème posé.

Concrètement, il s'agira à travers des cartes et coupes de résistivité du sous-sol, de montrer le parallèle entre dynamique de l'infiltration et variations de résistivité observées, avec pour finalité la présentation de la nature de l'infiltration (généralisée ou localisée) et son évolution (extension latérale ou verticale) au cours de la saison.

Pour atteindre ces objectifs, nous nous appuierons sur une méthodologie basée sur l'utilisation de techniques de mesures déployées dans les mêmes conditions sur des sites choisis dans les deux zones climatiques que nous désirons étudier. Les détails de cette méthode qui repose sur l'utilisation des mesures de résistivité en mode suivi temporel seront largement expliqués dans le chapitre 2 consacré à cet effet.

1.6. Organisation du manuscrit

Le présent manuscrit est organisé en six chapitres. Outre le présent chapitre 1 qui est dédié aux aspects introductifs de notre étude, il comprend :

Le chapitre 2 consacré aux aspects méthodologiques.

- Il expose les raisons du choix des zones climatiques, les précautions prises dans le choix des sites de recherches ;

- Il décrit en détail le paramètre de résistivité, ses avantages et ses limites, à la fois en mode ponctuel, et en suivi temporel ; les différentes techniques utilisées pour la mesure de la résistivité et les différentes façons de les interpréter en 1, 2 et 3D ;

- Il présente les difficultés de la mesure de résistivité en mode suivi temporel lorsqu'elle est employée avec les techniques d'imagerie 2D. Il montre la méthodologie adoptée dans cette thèse, en se basant sur l'expérience acquise de travaux précédents issus de la littérature ;

- Enfin, il donne le mode de représentation, la méthode d'interprétation et de comparaison des différents résultats.

Le chapitre 3 qui présente les études en zone sahélienne.

- Les généralités sur le site d'étude de la zone sahélienne (au nord du Burkina), les études antérieurs qui y ont été réalisées et dégage ses avantages et ses inconvénients ;

- Les résultats des études géophysiques menées en carte et en coupe sur différents éléments du paysage (Cartes électriques et électromagnétiques, Imagerie électriques 2D etc.) ainsi que les interprétations correspondantes.

Le chapitre 4 qui présente les études en zone soudanienne.

- Les généralités sur le site d'étude de la zone soudanienne (au nord du Bénin), les études antérieurs qui y ont été réalisées et dégage ses avantages et ses inconvénients dudit site ;

- Les résultats des études géophysiques menées en carte et en coupe sur différents éléments du paysage (Cartes électriques et électromagnétiques, Imagerie électriques 2D etc.) ainsi que les interprétations correspondantes.

Le chapitre 5 consacré à une synthèse.

- Il fait un point méthodologique sur les avantages et les difficultés de chaque technique ;

- Il présente une critique des résultats en termes d'apports à notre compréhension des processus dans chaque zone climatique.

- Il propose en perspective, des suggestions d'études qui, partant des résultats actuellement obtenus, ouvriraient d'autres champs de recherches complémentaire à celle présente.

La conclusion *dans laquelle :*

- Nous rappelons l'essentiel de nos résultats ;
- Nous préconisons les meilleures méthodes d'utilisation du paramètre résistivité appliqué à l'étude des infiltrations ;

Chapitre 2 : METHODOLOGIE

L'approche méthodologique de cette étude est basée sur l'utilisation de méthodes de prospection identiques qui sont mises en œuvre sur deux sites sur lesquels les questions posées sont les mêmes, mais où les processus sont différents du fait de la singularité des climats (soudanien et sahélien). Nous émettons donc l'hypothèse que les processus dans ces deux situations climato-géologico-hydrologiques se traduisent par des comportements différents des variations spatiales et temporelles annuelles de résistivité dans le proche sous-sol. Dans cette optique, nous cherchons à appliquer la même méthodologie aux sites sahélien et soudanien pour se donner une base unique de comparaisons et de conclusions.

Les paragraphes qui suivent donnent les détails de cette méthodologie:

- Les raisons du choix des sites sous climat nettement contrasté et le contexte de notre intervention sur les sites (répondre à des questions récurrentes de recherches) ;
- Le choix d'utiliser une technique d'investigation qui soit commune aux deux sites et dont on expose les détails et les justifications.

2.1. Choix des sites

2.1.1. Choix des zones climatiques

Pour mener cette étude, deux zones climatiques ont été retenues : la zone sahélienne et la zone soudanienne. Il s'agit de deux climats majeurs ouest africains avec une alternance saisonnière annuelle (une saison sèche, une saison de pluie) qui créé un contraste du point de vue cumul annuel de pluie enregistrée (400 et 1200 mm/an, respectivement) que nous estimons suffisants pour générer des différences d'état hydrique des sols entre les saisons:

- ***Au sahel*** nous estimons que l'état complètement sec des sols en fin de saison sèche devraient présenter un bon contraste d'avec son état humide en saison de pluie générant ainsi une variation de résistivité conséquente des sols;
- ***En zone soudanienne*** il devrait également exister un contraste saisonnier mais celui-ci pourrait être moindre à cause non seulement de la longueur de la saison des pluies mais également de la plus grande quantité de pluie annuelle.

Enfin, il s'agit de deux zones climatiques sous lesquelles le fonctionnement de certaines unités géomorphologiques telles que les ravines de versants et les bas-fonds qui sont des zones qui intéressent particulièrement notre étude, est supposé identique : lieux supposés d'infiltration.

2.1.2. Choix spécifique des sites de mesures

Nos sites de mesures ont été pris dans des zones de recherche déjà instrumentées et documentées par d'autres disciplines de recherches notamment en hydrologie. Sur ces sites, les mesures géophysiques sont intervenues postérieurement pour contribuer à la résolution de certaines questions d'ordre scientifique ou d'ingénierie. A l'inverse, ce choix permettait aux futures mesures géophysiques de disposer à leur tour de données externes facilitant leur l'interprétation.

Les sites choisis sont en milieu rural, dans des zones assez distantes des habitations. Ce sont des sites "naturels" transformés récemment par les pratiques agricoles et pastorales. Ils ont été en outre retenus parce que jugés représentatifs des processus hydrologiques actuels dans la zone.

Dans le sahel, l'objectif des mesures étant la détection des infiltrations localisées probables sur certains éléments du paysage supposés infiltrants comme les affleurements de rocheux (quartz), les ravines de versant au fond ensablé et les versants en dessous des gros placages sableux, la présence effective de ces unités géomorphologiques sur le site a constitué un impératif dans le choix de son implantation.

Dans la zone soudanienne, l'infiltration étant vraisemblablement généralisée, le choix du site s'est fait de manière à simplement intégrer les mêmes unités morphologiques que sur le site sahélien par souci de cohérence (pour les besoins de comparaison futures).

Les sites étudiés sont à l'échelle du petit bassin versant, correspondant à l'unité topographique de travail des hydrologues qui étudient finement les processus. C'est aussi l'échelle de la géophysique de détail. Les bassins versants choisis ne dépassent guère 1 km^2, ce qui permet la réalisation de mesures assez resserrées en un temps raisonnable (2 jours maximum). Cela permet également de densifier les mesures sur des cibles précises et de suivre la dynamique des processus annuels depuis les versants jusqu'aux bas-fonds.

Du point de vue géophysique et nonobstant les précautions prises dans le choix des sites, chaque zone a des avantages et des inconvénients qui imposent des dispositions particulières dans la mise en œuvre des mesures. En effet, si au sahel, l'absence de végétation rend les opérations de cartographie plus facile, la nature des horizons superficiels de sol (argilo-sableux très secs) pose particulièrement des problèmes de contacts (sol-électrodes) lors des mesures électriques. De plus, les amplitudes thermiques en saison sèche sont si grandes qu'elles peuvent affecter les

valeurs de résistivité des sols entre le matin et la mi-journée. Sur le site soudanien en revanche, les difficultés pratiques sont plutôt rencontrées en saison des pluies, causées par l'abondance de la végétation, la fréquence des pluies, les crues dans les ravines qui gênent le prospecteur dans le déploiement des instruments.

2.2. Choix de la résistivité comme paramètre utile

L'étude du sous-sol par le géophysicien peut se faire à l'aide de plusieurs paramètres. Lorsque l'on s'intéresse à la prospection du proche sous-sol constitués de matériau sableux, limoneux ou argileux, soumis à des variations hydriques qui peuvent être intenses, c'est généralement la résistivité électrique qui est adaptée pour la description de la géométrie des terrains, ainsi que pour l'étude de la dynamique de certains processus tel l'infiltration (Descloitres et al, 2003 ; Clément et al, 2009). Dans les lignes suivantes, nous décrirons en détail ce paramètre et donneront ses avantages et ses limites, à la fois en mode ponctuel, et en suivi temporel.

2.2.1. Définition et domaine d'application

La résistivité électrique d'un milieu est la propriété physique qui désigne sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. C'est la résistance ohmique d'un cylindre de section $\boldsymbol{S}$ et de longueur unitaire $\boldsymbol{L}$. Désignée par la lettre ρ, son unité est l'***Ohm.m (Ω.m)***. Son inverse ($1/\rho$) est la conductivité électrique qui s'exprime en ***S/m*** (Siemens/mètre) même si en pratique ce sont ses sous-multiples (***mS/m***, ***µS/cm***) qui sont le plus utilisés par les hydrologues.

$$\rho = R\frac{S}{L} \qquad \textit{Eq 1}$$

Avec :

$\boldsymbol{R}$: résistance (Ohm) ;

$\boldsymbol{L}$: longueur (m)

$\boldsymbol{S}$: section (m^2).

La résistivité d'un milieu poreux dépend d'un certain nombre de caractéristiques qui peuvent être :

- permanentes : nature du matériau (argiles, quartz, granite), texture, composition, porosité et forme des pores;
- ou conjoncturelles : teneur en eau, température, concentration ionique des fluides dans le matériau (c'est-à-dire, la conductivité électrique de l'eau d'imbibition).

Aussi, la résistivité est utilisée dans des études environnementales variées (géologie, hydrogéologie, pédologie, agronomie) en se basant sur les caractéristiques permanentes des éléments et/ou la dynamique des facteurs conjoncturels qui les affectent pour les discriminer.

Mesure ponctuelle de la résistivité

Mesurer la résistivité d'un terrain à un moment donné permet d'avoir des informations sur la nature du matériau qui le constitue, en étant guidé par les gammes de valeurs des matériaux courants connus (Voir quelques exemples en *Tableau 4*) et/ou de la connaissance que l'on a du sous-sol de la zone. Ainsi, il est possible de faire de la résistivité un bon indicateur de la structuration électrique dudit terrain et partant de là, de sa structure pédologique ou géologique. Cette connaissance ne doit pas cependant empêcher les vérifications, car plusieurs matériaux peuvent présenter une même valeur de résistivité à l'état naturel. De plus, la résistivité initiale d'un matériau peut se trouver fortement modifiée dans le temps sous l'influence d'un des facteurs conjoncturels cités plus haut.

Roches	Porosité totale (%)	Perméabilité (cm/s)	Résistivité (ohms*m)
Argilite	35	10^{-8} - 10^{-9}	70 à 200
Craie	35	10^{-5}	30 à 300
Tuf volcanique	32	10^{-5}	20 à 300
Marnes	27	10^{-7} - 10^{-9}	20 à 100
Grès	3 à 35	10^{-3} - 10^{-6}	30 à 800
Dolomite	1 à 12	10^{-5} - 10^{-7}	200 à 10'000
Calcaires	3	10^{-10} - 10^{-12}	200 à 10'000
Métaschistes	2.5	10^{-4} - 10^{-9}	300 à 800
Gneiss	1.5	10^{-8}	1'000 à 20'000
Quartzite	<1	10^{-10}	1'000 à 10'000
Granite	1	10^{-9} - 10^{-10}	1'000 à 15'000
Gabbro	1 à 3	10^{-4} - 10^{-9}	6'000 à 10'000
Basalte	1.5	10^{-6} - 10^{-8}	800 à 15'000

Tableau 4: *Propriétés de quelques matériaux courants et gammes de résistivité correspondantes (Chapellier et Mari, 2000)*

La valeur de résistivité peut en outre servir à déterminer une propriété physique particulière d'un terrain (sableux) en se servant de la loi d'Archie qui relie la résistivité à certains paramètres physiques du terrain.

La relation s'exprime tel qu'il suit :

$$\boldsymbol{\rho_r = \rho_w a \emptyset^{-m} S^{-n}} \quad \textit{Eq 2}$$

Avec

$\boldsymbol{\rho_r}$: résistivité du terrain (en Ω.m) ;

$\boldsymbol{\rho_w}$: résistivité de l'eau d'imbibition (Ω.m) ;

$\boldsymbol{\phi}$: porosité totale qui représente le rapport entre le volume des pores et le volume total (sans dimension) ;

$\boldsymbol{a}$: facteur dépendant de la lithologie (compris entre 0.6 et 2) ;

$\boldsymbol{m}$: facteur de cimentation (varie entre 1.3 pour des sables non consolidés et 2.2 pour des calcaires cimentés) ;

$\boldsymbol{S}$: Saturation en eau (sans dimension) ;

$\boldsymbol{n}$: facteur empirique de saturation (≈ 2)

Il, est d'usage de regrouper la porosité et les facteurs lithologiques et de cimentation sous le terme de facteur de formation :

$$\boldsymbol{F = a \emptyset^{-m}} \quad \textit{Eq 3}$$

D'où,

$$\boldsymbol{\rho_r = F \rho_w S^{-n}} \quad \textit{Eq 4}$$

Avec une mesure de résistivité, il est donc possible connaissant deux autres facteurs de déduire le troisième. Exemple : déduction de la saturation, connaissant le facteur de formation et la conductivité de l'eau.

La mesure de résistivité doit cependant tenir compte de l'influence de la température dont une relation est donnée par l'équation de Keller et Frischnecht (1966) :

$$\boldsymbol{\rho_{25} = \frac{\rho_t}{(1+\alpha(25-t))}} \quad \textit{Eq 5}$$

Avec,

$\boldsymbol{\alpha}$: constante expérimentale égale à 0,025 °C^{-1}

$\boldsymbol{\rho_{25}}$: résistivité standard à 25°C ;

$\boldsymbol{t}$: température de mesure (°C)

Suivi de résistivité

Le suivi de résistivité est le point méthodologique majeur de ce travail de thèse. S'il est très peu utilisé dans la routine des prospecteurs c'est parce qu'il réclame beaucoup de soin, et nécessite bien entendu, de réaliser des prospections à intervalles réguliers au cours du processus étudié. Le suivi temporel de résistivité ou "time-lapse" est en général utilisé pour étudier l'influence des paramètres conjoncturels sur les résistivités de départ. C'est une technique qui consiste à effectuer une mesure initiale (à un temps dit t_0), puis d'autres séries, à des moments clés (ou supposés tels) de la dynamique du processus, dont on espère qu'il influencera la valeur de résistivité dans le temps. Les résultats sont présentés sous la forme de rapports bruts de résistivité (ρ finale / ρ initiale) exprimés en ratios, ou de différences normalisées (ρ initiale -ρ finale/ρ initiale) données en pourcentages.

Ce procédé d'estimation de la dynamique de résistivité en suivi temporel se base au fond sur la loi d'Archie en émettant l'hypothèse de la non variabilité des facteurs de formation du milieu pendant le suivi. On considère alors que la variation temporelle de la résistivité du terrain ne dépend plus que de la variation de la résistivité de l'eau d'imbibition et/ou celle de la saturation.

Aussi, le rapport de résistivité entre l'état initial ($\boldsymbol{\rho_i}$) et l'état final ($\boldsymbol{\rho_f}$) s'établi tel que présenté dans l'équation 6 :

$$\frac{\boldsymbol{\rho_f}}{\boldsymbol{\rho_i}} = \frac{\boldsymbol{\rho_{wf} S_f^{-n}}}{\boldsymbol{\rho_{wi} S_i^{-n}}} \quad \textit{Eq 6}$$

La pertinence de l'application de la résistivité en suivi temporel à l'étude des phénomènes d'infiltration découle ainsi de la possibilité d'utiliser cette loi simplifiée d'Archie. En effet, avec seulement deux paramètres en jeu, il est aisé dans certains cas de déduire le facteur influençant la résistivité:

- *En zone saturée*, on admettra alors que la dynamique de résistivité (du temps initial au temps final) est seulement guidée par la *variation temporelle de conductivité* de l'eau d'imbibition, la saturation étant elle, constante.

$$\frac{\boldsymbol{\rho_f}}{\boldsymbol{\rho_i}} = \frac{\boldsymbol{\rho_{wf}}}{\boldsymbol{\rho_{wi}}} \quad \textit{Eq 7}$$

Il sera ainsi possible de savoir si l'eau de l'aquifère s'est enrichie d'éléments minéraux (ce qui fait baisser la résistivité) ou au contraire, qu'elle se dilue (ce qui génère une augmentation de la résistivité).

- *En zone non saturée* par contre, il est plus difficile de donner d'emblée le facteur dominant qui influence la résistivité. Il peut s'agir en effet :
    - D'une variation de la saturation uniquement;

$$\frac{\rho_f}{\rho_i} = \frac{S_f^{-n}}{S_i^{-n}} \quad Eq\ 8$$

    - D'une variation de la chimie des fluides d'imbibition uniquement comme dans le cas d'une en zone saturée. Le rapport de résistivité est alors le même que celui donné dans l'équation 7 plus haut.

    - D'une variation des deux paramètres (saturation et conductivité de l'eau) dans diverses proportions. En l'absence de toute autre indication, il devient alors difficile de « déconvoluer » les effets de l'un ou de l'autre. Dans certains cas cela peut même aller jusqu'à la neutralisation des variations de résistivité donnant l'impression d'une dynamique nulle (*Equation 9*):

$$\frac{\rho_{wf} S_f^{-n}}{\rho_{wi} S_i^{-n}} = 1 \quad Eq9$$

Ainsi, l'interprétation des résultats en suivi temporel de résistivité en zone non saturée exige que l'on puisse disposer de données annexes sur la saturation ou la conductivité des fluides d'imbibition. C'est la raison pour laquelle nous sous sommes placés sur des sites capables de nous apporter des renseignements extérieurs pour aider nos interprétations.

2.2.2. Mesure de la résistivité électrique des sols

La mesure de la résistivité électrique est basée sur trois principes : la mesure en courant continu, la mesure en électromagnétisme basse fréquence (fréquentiel ou temporel) et en réflectométrie (Time Domain Reflectometry). Dans les paragraphes qui suivent, nous évoquerons seulement deux types de mesures correspondant à celles utilisées dans cette étude. Nous en donnerons quelques notions pouvant servir à la compréhension de certains aspects de notre méthodologie. Pour un accès complet aux principes de base et la mise en œuvre des méthodes de résistivités, il existe plusieurs ouvrages dédiés dont certains (en éléments de cours) sont en en ligne : http://www-ig.unil.ch/cours/ .

Principe de la mesure de la résistivité électrique en courant continu

En courant continu, la mesure de la résistivité électrique est basée sur l'utilisation d'un dispositif élémentaire constitué de quatre électrodes (*Cf. figure 12*) : deux électrodes (nommées

couramment A et B) à partir desquelles est injecté un courant d'intensité donnée (I), et deux autres (nommées M et N) à partir desquelles est mesuré le potentiel résultant (ΔV).

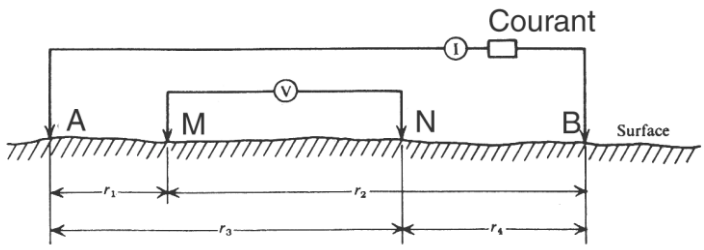


Figure 12: *Dispositif élémentaire de mesure de la résistivité électrique (Chapellier, 2000).*

Le calcul de la résistivité se fait alors en multipliant le rapport potentiel sur intensité par un facteur géométrique (***K***) qui dépend de la configuration des électrodes de mesure.

$$\rho_a = K\frac{\Delta V}{I} \qquad \textit{Eq 10}$$

Avec : $\boldsymbol{\rho_a}$, résistivité apparente (*ohm.m*) ; $\boldsymbol{\Delta V}$, différence de potentiel (*volt*) ; $\boldsymbol{I}$; intensité du courant (*ampère*).

Le facteur géométrique K est donné par la relation :

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}-\frac{1}{AN}\right)-\left(\frac{1}{BM}-\frac{1}{BN}\right)} \qquad \textit{Eq 11}$$

Avec : ***AM***, ***AN***, ***BM***, ***BN***, distances entre électrodes (*m*).

La résistivité ainsi déterminée est qualifiée d'apparente parce qu'elle correspond à la réponse intégrée du terrain (qui est composite) de la surface jusqu'à une profondeur donnée. Pour un terrain homogène et isotrope, elle correspond à sa résistivité vraie.

Plusieurs types de dispositifs sont utilisés pour la mesure depuis la surface de la résistivité apparente sur le terrain (*Cf. Figure 13*). Ces dispositifs peuvent être des :

- Dipôles : dispositif pôle-pôle avec les électrodes B et N à l'infini ;
- Tripôles : dispositif pôle-dipôle avec les électrodes A ou B à l'infini (A à l'infini = Pôle-dipôle reverse ; B à l'infini = Pôle-dipôle forward);
- Ou des quadripôles : Quatre électrodes dans des configurations dites du type Wenner, Schlumberger, Dipôle-dipôle.

En fonction des objectifs, ils sont mis en œuvre suivant des méthodes d'exploration de terrain qui sont utilisées dans cette thèse :

- Des sondages et des tomographies de résistivité électrique (ERT – Electrical Resistivity Tomography) ;
- Des mesures en forage ou diagraphie de résistivité ;
- Des traînées électriques : mesure de variations latérales de résistivité apparente le long de transects donnés ;
- Des cartographies de résistivité apparente : réalisation de mesures ponctuelles de résistivité apparente, interpolées ensuite sous forme de cartes d'iso-valeurs.

Pour l'ERT, la mesure de résistivité en courant continu est rendue plus pratique de nos jours par le développement d'instruments automatisés plus compact et plus performants qui optimise les campagnes de mesures.

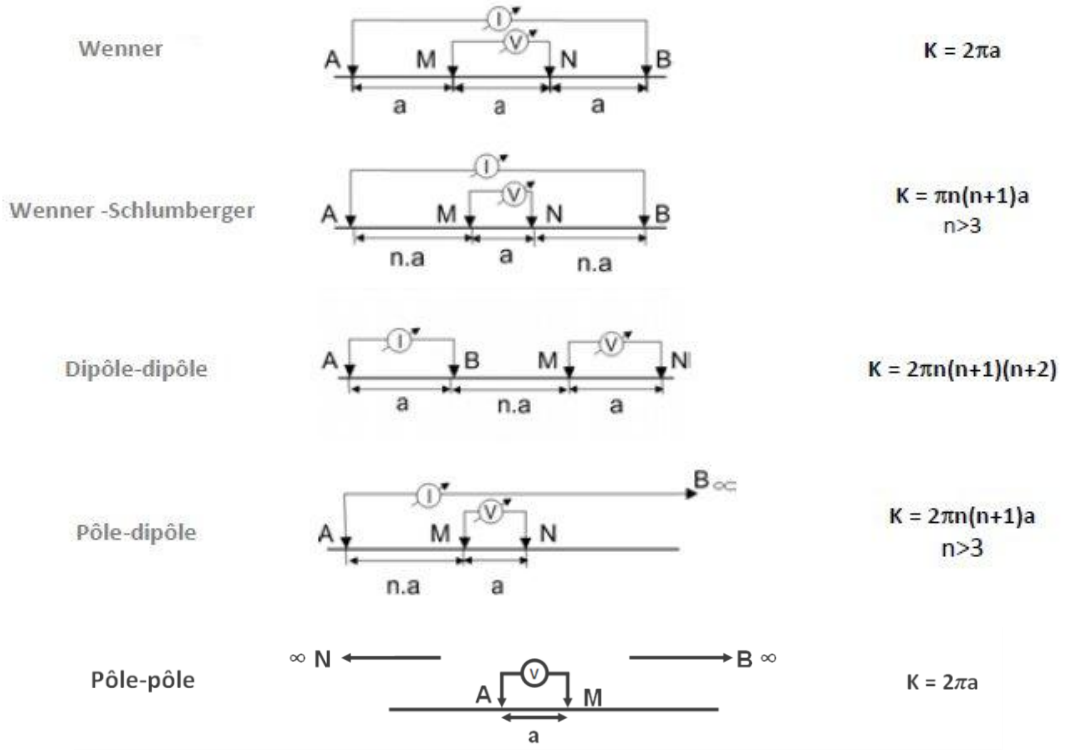


Figure 13 : *Types de dispositif utilisés pour la mesure de la résistivité électrique.*

Avantages et inconvénients des dispositifs de mesures en courant continu

Le choix de mise en œuvre d'un des dispositifs ci-dessus présentés, dépend d'une part de la nature et de la structure du terrain à étudier et d'autre part, des propriétés du dispositif. Parmi ces propriétés, on notera la sensibilité aux anomalies verticales et/ou horizontales, la profondeur d'investigation, la couverture horizontale et la force du signal.

La sensibilité d'un dispositif se définit comme étant la proportion dans laquelle une anomalie située à proximité d'une électrode influence la mesure de potentiel faite à partir de celle-ci. La *Figure 14* présente les fonctions de sensibilité pour quelques dispositifs courants utilisés en prospection géophysique. Les variations de la forme des lignes de sensibilité montrent qu'il existe des différences entre les dispositifs :

- Wenner : Contours de sensibilité plutôt horizontaux à l'aplomb du centre du dispositif. Le Wenner sera donc plus sensible au changement verticaux qu'horizontaux de résistivité. Il sera ainsi recommandé pour la détection de structures tabulaires. Par contre, on remarque que les valeurs de grande sensibilité restent assez superficielles ce qui signifie une profondeur d'investigation faible pour ce dispositif ;

- Schlumberger ou Wenner-Schlumberger : C'est le dispositif le plus couramment utilisé en sondage électrique. Pour cause, les iso-valeurs de sensibilités montrent une plus grande sensibilité au centre du dispositif (propice à la détection d'une anomalie au centre du dispositif). De plus, elles ne sont ni verticales, ni horizontales, ce qui suppose un compromis entre la résolution verticale et horizontale avec une meilleur pénétration au centre par rapport au Wenner classique (profondeur d'investigation plus grande) ;

- Dipôle-dipôle : C'est un dispositif couramment utilisé en ERT. L'une de ses variantes est également assez connue : il s'agit du Wenner dit Bêta qui est un dipôle-dipôle avec électrodes équidistantes. Ce dispositif est sensible à l'aplomb des deux dipôles et les contours de la fonction sont essentiellement verticaux. Il est de ce fait sensible aux changements horizontaux de résistivité et donc recommandé pour la détection des anomalies verticales.

Pour tirer avantage des caractéristiques spécifiques de chaque dispositif, on l'utilisera l'un ou l'autre, dans des conditions qui soient les plus adaptées possibles. Dans cette thèse, nous avons choisi pour pallier les limites de chacun d'eux de mesurer avec plusieurs dispositifs en même temps pour accroitre la résolution des structures du sous sol et se donner toutes les chances de mieux cartographier les variations temporelles de résistivité.

Description de la tomographie de résistivité électrique (ERT)

Très utilisée dans cette thèse, la tomographie de résistivité électrique (Electrical Resistivity Tomography - ERT) est une technique de mesure de mesure visant à obtenir une image 2D de la distribution des résistivités du sous-sol. Elle est basée sur l'utilisation d'un protocole de mesures qui est un petit programme d'exécution automatique dans lequel sont compilés les paramètres de la mesure : nombre, type et taille des quadripôles, enchainement des mesures, temps d'injection du courant. Une fois installé dans la mémoire d'un résistivimètre, le protocole permet à celui-ci de réaliser de façon autonome la série des mesures unitaires programmées à partir d'un dispositif physique d'électrodes installées en ligne et à intervalle régulier sur le terrain. Le nombre de mesures dépendent du type de dispositifs élémentaires compilés dans le protocole (Wenner, Pôle-Dipôle) ainsi que du nombre d'électrodes pris en compte (24, 48, 64, 96). Le résultat obtenu est un panneau (ou pseudo-section) de résistivités apparentes interpolées sous forme de carte avec des contours d'iso-valeurs (*Cf. Figure 15*). Pour obtenir les équivalents en résistivités vraies (résistivités calculées), les données de terrain en résistivités apparentes devront être inversées à l'aide de logiciels dédiés (*voir détails dans titre 2.3*).

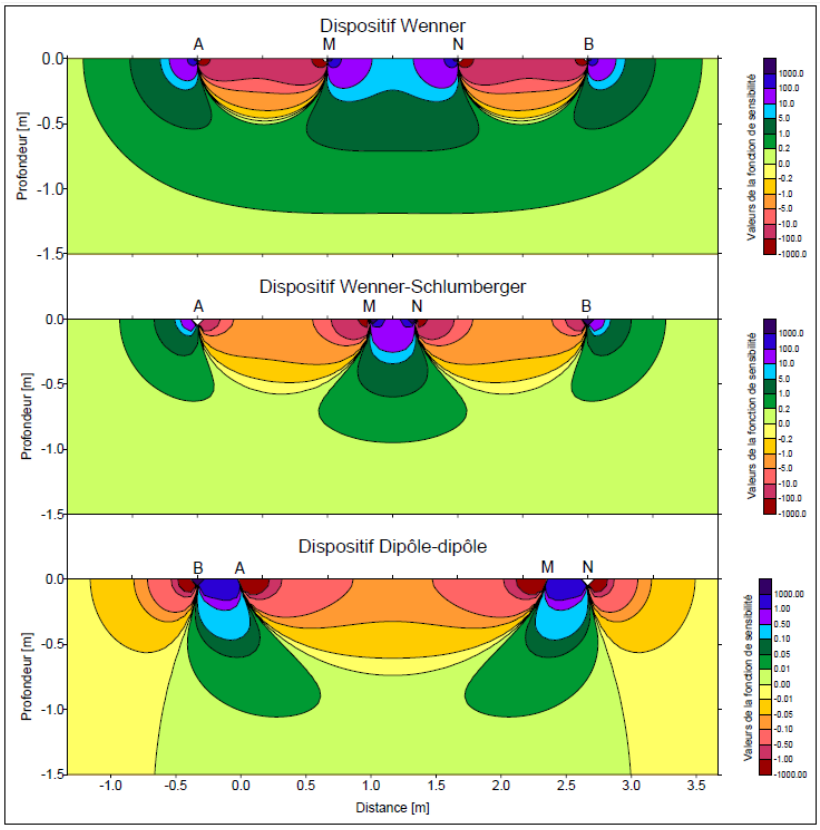


Figure 14: *Fonction de sensibilité pour quelques dispositifs de mesures électriques courants (Roy et Apparao, 1971).*

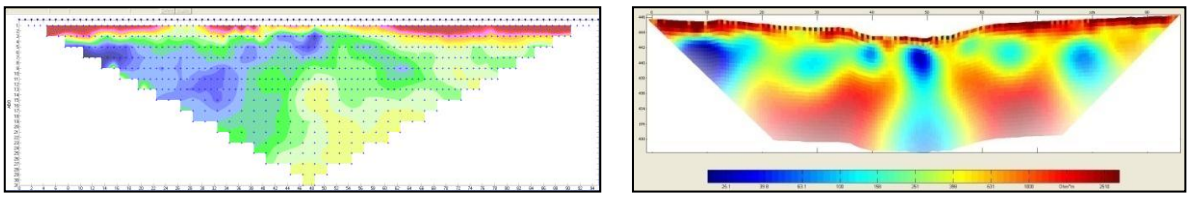


Figure 15: *Exemple de panneau de résistivités apparentes (gauche) et résultat de l'inversion incluant la topographie (droite).*

Mesure de la résistivité apparente en électromagnétisme fréquentiel

Les méthodes de mesures de résistivité apparente en électromagnétisme sont variées et sont fonction du domaine (fréquentiel, temporel) et de la source utilisée (naturel, artificiel). La méthode décrite ici est du type fréquentiel basée sur l'utilisation des appareils de mesures du type « Slingram ».

Ce sont des appareils dit à faible nombre d'induction qui ne mesurent pas la résistivité mais plutôt son inverse c'est-à-dire la conductivité donnée en *mS/cm*. Ils se composent de deux bobines, dont une émettrice et une réceptrice toutes deux montées sur un support rigide ou reliées par un câble électrique:

Leur fonctionnement est relativement simple :

- Un courant oscillant injecté dans la bobine émettrice génère un champ magnétique primaire ;
- Le champ primaire au contact des conducteurs du sol crée des courants induits (courants de Foucault) ;
- Les courants induits génèrent à leur tour un champ secondaire capté par le récepteur qui le traduit en nombre d'inductions.

$$\boldsymbol{B = \frac{\gamma S}{2i^{1/2}}} \qquad \textbf{\textit{Eq 12}}$$

Avec :

$\boldsymbol{B}$: nombre d'induction

$\boldsymbol{S}$: distance entre émetteur et récepteur (m)

$\boldsymbol{i}$: √-1

γ : paramètre de réponse de l'instrument qui est une fonction complexe liée à la fréquence d'émission (*f*), à la perméabilité magnétique du vide (μ_0) et à la conductivité (σ) du terrain prospecté ; $\gamma = (i2\pi f\mu_0\sigma)^{1/2}$

La valeur du champ secondaire quant à elle, est donnée par la relation suivante :

$$\frac{Hs}{Hp} \approx \frac{i\omega\mu_0\sigma S^2}{4} \quad \textit{Eq 13}$$

Avec :

Hs : champ secondaire (*A/m*)

f : fréquence d'émission (*Hz*)

Hp : champ primaire (*A/m*)

S : distance émetteur-récepteur (*m*)

ω : fréquence angulaire du signal = $2\pi f$ (*rad*)

σ : conductivité du terrain (*mS/m*)

μ_0 : perméabilité magnétique du vide = $4\pi\ 10^{-7}$

Le ratio du champ secondaire au champ primaire étant linéairement proportionnel, l'estimation de la conductivité apparente d'un terrain par l'instrument se fait à l'aide de la relation ci-après :

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 S^2} \cdot \frac{H_s}{H_p} \quad \textit{Eq 14}$$

Avec σ_a, la conductivité apparente exprimée en **mS/m**.

Pour un terrain multicouche, la valeur de résistivité apparente lue par l'instrument est fonction de la sensibilité instrumentale (qui dépend de la position des bobines : horizontale ou verticale), de la conductivité et à l'épaisseur des différentes couches. La sensibilité instrumentale est définie sous la forme d'une dérivée de fonction représentant la contribution au champ secondaire d'un terrain situé à une profondeur z.

$$R(z) = \int \Phi(z)dz \quad \textit{Eq 15}$$

Avec :

R(z) : réponse cumulée des couches au dessus de la profondeur **Z** ;

Φ(z) : contribution au champ secondaire d'une couche à la profondeur **Z** considérée ;

Z : profondeur normalisée (*Profondeur/distance entre bobine*).

Les *Figures 16* et *17* donnent les courbes de contribution de terrain ainsi que les réponses instrumentales en configuration dipôle horizontal et vertical en fonction de la profondeur normalisée ***Z***.

- La *Figure 16* montre que la contribution au champ secondaire des couches superficielles est maximale en dipôle horizontal mais que la sensibilité instrumentale baisse rapidement avec la profondeur. En dipôle vertical par contre, les couches superficielles sont transparentes et le maximum de contribution est donné par les couches autour de 0,4 ***Z*** ;
- A travers la *Figure 17*, on peut observer en revanche que la réponse cumulée des couches est plus forte en dipôle vertical, d'où les profondeurs d'investigation plus importantes dans cette configuration.

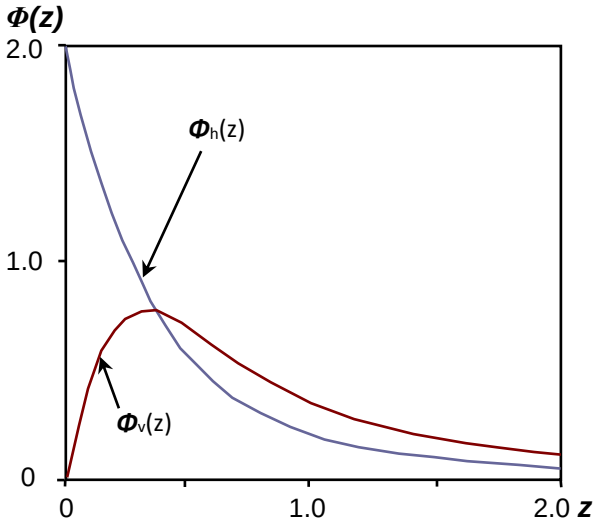


Figure 16: *Courbes de contribution des terrains au champ secondaire en fonction de la profondeur pour les configurations DH et DV.*

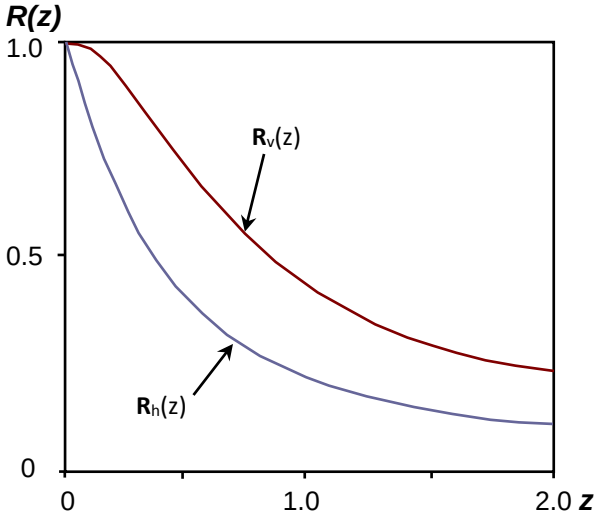


Figure 17: *Courbes de réponses cumulées en fonction de la profondeur pour les configurations en dipôles horizontal et vertical.*

La mesure EM 34 ponctuelle est ainsi une donnée intégratrice qui représente la somme des réponses individuelles des terrains qui composent le sous-sol. Elle est donnée la relation :

$$\sigma_a = \sigma_1\left(1 - R(z)\right) + \sigma_2 R(z) + \sigma_n R(z) \quad \textit{Eq 16}$$

Avec σ_a, la conductivité apparente mesurée (*mS/m*); σ_n, la conductivité de couches de sol (*mS/m*) et ***R(z)***, la réponse instrumentale telle que donné par la *Figure 17*.

Au même titre que les dispositifs de mesures en courant continue, les méthodes en électromagnétisme peuvent être utilisées pour de l'exploration spatiale (cartographie de résistivité apparente) ou verticale par sondages (en écartant les bobines ou en changeant leur orientation).

Pour les appareils à bobines fixes (EM31, EM38 de Geonics par exemple), seul le mode de cartographie est possible. L'on dispose néanmoins de deux possibilités d'investigation donnée par le choix de la position des bobines, chacune d'elle correspondant à une profondeur d'investigation donnée:

- Mesures avec des bobines alignées et en position verticale (dispositif en VCP, Vertical Coplanaire Position, encore appelé Dipôle Horizontal, DH) pour des explorations de faible profondeur ;
- Mesures avec des bobines alignées et en position horizontale (dispositif en HCP – Horizontal Coplanaire Position encore appelée Dipôle Vertical, DV) pour des profondeurs d'investigation plus importantes.

Les équipements à bobine libre comme l'EM34 que nous avons utilisé, proposent quant à eux, des options supplémentaires portant sur choix des écartements entre bobines. Ils offrent de ce fait un nombre de configurations plus important (deux positions de bobines pour chaque écartement) et donc plus de choix de profondeur d'investigation (chaque écartement correspondant également à une profondeur d'investigation). Ils peuvent ainsi être utilisés pour faire un sondage EM.

2.2.3. Avantages et inconvénients du paramètre résistivité pour notre étude

Avantages

La résistivité a le gros avantage d'être un paramètre rapide à mesurer à l'aide d'équipement en générale peu lourd et facile à mettre en œuvre. Les données acquises ne nécessitent pas de prétraitement particulier et en cas de cartographie peuvent être spatialisées telles quelles (pour obtenir une carte de résistivité apparente).

La réponse en résistivité des variations de la saturation fait de celle-ci un bon indicateur des infiltrations surtout en zone sahélienne. En effet, la fonction qui lie la résistivité à la saturation est du type parabolique (*Cf. Figure 18*). Aussi, le passage de l'état sec à un état saturé même faible, génère une variation de résistivité assez conséquente pour être détectée sur le terrain. En dehors de la saturation, la résistivité est également sensible aux variations de conductivité des fluides d'imbibition avec laquelle elle a une relation quasi linéaire (*Cf. Figure 19*).

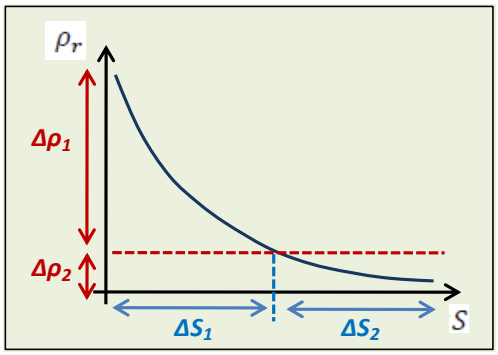


Figure 18: *Relation entre résistivité et saturation.*

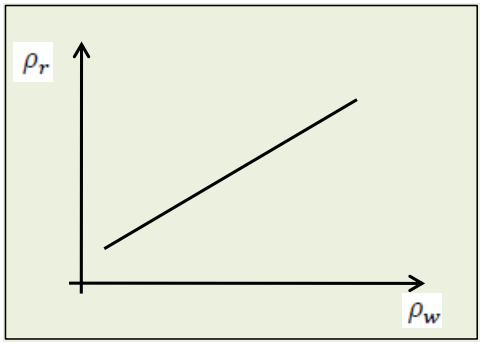


Figure 19: *Relation entre résistivité et chimie des fluides d'imbibition.*

Inconvénients

Le premier inconvénient découle de la relation entre résistivité et saturation. De la figure 18, on peut en effet observer que la variation de résistivité ($\Delta\rho_2$) correspondant à la gamme de différenciel de saturation élevée (ΔS_2), est faible. Cela constitue une limite pour les mesures sur terrain où l'assèchement des couches n'est pas très marqué : cas des bas-fonds en zone soudanienne par exemple.

Les mesures de résistivité envisagées dans cette étude se feront en condition de terrain non saturé. L'on s'attend donc à ce que les valeurs mesurées résultent de l'effet combiné de la saturation et de la conductivité des eaux d'imbibition. Sans une détermination de l'influence réelle de chaque paramètre, il sera alors impossible d'interpréter les mesures réalisées.

2.2.4. Acquisition des données de résistivité sur les sites

2.2.4.1. Quelques enseignements des études antérieures

Mettre en œuvre les techniques de mesures de résistivité précédemment décrites sur le terrain commande d'abord que l'on prenne en compte les avantages et les inconvénients des différents dispositifs en relation avec les objectifs de notre étude. De même, l'on peut s'inspirer des expériences et pratiques tirés des études antérieures en vue d'éviter les pièges liés à l'acquisition, au traitement ou à l'interprétation des données de résistivité.

Pour notre étude, les mesures électriques en courant continu sont mises en œuvre à travers la tomographie de résistivité électrique (ERT) et la diagraphie. Quand à la cartographie, elle a été prévue pour être faite à l'aide d'un seul équipement de mesure électromagnétique. Avant la mise œuvre sur nos sites, nous avons cherché dans la littérature les mises en garde et recommandations sur l'utilisation des techniques envisagées.

Mesures électriques

Pour les mesures électriques, les principales mises en garde concernent :

- Le choix du dispositif : l'un des points clef de l'utilisation de la résistivité électrique réside dans le choix des dispositifs à mettre en œuvre parce que chacun d'eux présente des avantages et des inconvénients. En fonction des cibles recherchées et/ou de la structure pressentie du terrain, on tiendra compte de la sensibilité du dispositif, de la profondeur d'investigation qu'il offre et de sa facilité de la mise en œuvre sur le terrain. En ce qui concerne l'ERT qui est notre méthode de prospection principale, les études préconisent en général l'acquisition des données à l'aide de plusieurs protocoles de mesures (Wenner, Pôle-dipôle), que l'on pourra ensuite combiner lors de l'inversion pour une meilleure définition de l'image du sous-sol. C'est donc cette technique qui a été adoptée.

- Les précautions au moment de l'installation : le non respect de l'alignement correct des électrodes et de l'intervalle inter-électrodes prévu dans le dispositif choisi sont à la base de petites incertitudes dans l'estimation du facteur géométrique. Du fait de l'installation au décamètre des électrodes sur le terrain, les erreurs sur les distances et alignements sont de l'ordre centimétrique. Elles seront donc plus significatives pour les petits dispositifs (ERT en électrodes peu espacées) qui devrait alors être installés précisément. De même en cas de relief marqué, les données d'une mesure ERT doivent intégrer les données topographiques dans l'inversion. Nous avons suivi cette recommandation pour les profils ERT réalisés en travers des bas-fonds.

- L'erreur sur la mesure du potentiel qui peut être introduite par plusieurs facteurs dont les bruits de fonds telluriques mais surtout par des problèmes de contacts entre les électrodes et le sol. Sur le terrain, nous avons souvent assuré la qualité des contacts par un léger arrosage des points d'implantation des électrodes.

- La prise en compte de la sensibilité et de la profondeur d'investigation dans le choix du dispositif à mettre en œuvre. Pour une première exploration en ERT, il est intéressant de coupler un dispositif sensible aux structures verticales à un autre sensible aux structures horizontales (couplage Wenner Alpha et Bêta). Pour une meilleure résolution en profondeur il est alors possible d'associer des mesures ayant une bonne profondeur d'investigation (Pôle-dipôle, forward et reverse). Le choix que nous avons fait d'acquérir les données à l'aide de protocoles basés sur plusieurs types de dispositifs a résolu de même coup ce problème sur le terrain.

- Descloitres et al (2003) et Clément et al (2009), attirent l'attention sur le fait que les inversions des données ERT (quelques soit le logiciel utilisé) génèrent quelques fois des artéfacts dans les images de résultats finaux. Ils mettent donc en garde contre les interprétations sans un minimum de vérification. Sur l'ensemble de nos sites, nous avons réalisé à cet effet des forages pour l'obtention de profils lithologiques du sous-sol devant servir à la confrontation avec les données géophysiques.

Mesures électromagnétiques

L'équipement de mesure électromagnétique que nous avons utilisé est un conductivimètre à bobines de type Slingram (voir section sur l'équipement de mesure). D'une mise en œuvre assez simple, son utilisation sur le terrain fait l'objet de quelques mises en garde portant notamment sur :

- La sensibilité de la mesure aux conducteurs superficiels surtout en configuration VCP (bobines verticales). Nous en avons particulièrement tenu compte sur nos sites sahéliens où il existe des sols à horizon superficiel argileux qui deviennent très conducteurs en saison de pluie. Des modélisations et des tests sur site ont été effectués pour évaluer l'impact de ces variations superficielles sur les mesures.
- La sensibilité de l'équipement aux bruits électromagnétiques naturels (orages, variations du champ terrestre), ou artificiels (lignes téléphoniques ou électriques haute tension) qui peuvent influencer les valeurs mesurées au cours de la journée. Pour éviter la prise en compte de mesures biaisées, il est recommandé de vérifier la dérive instrumentale par des contrôles (plus ou moins fréquents dans la journée) sur une base fixe. C'est ce procédé qui a été adopté pour l'ensemble de nos campagnes de mesures.

2.2.4.2. Présentation du matériel de mesure électrique

L'équipement de mesure de résistivité électrique se compose de deux résistivimètres du fabricant IRIS Instruments : Un "Syscal R2" et un "Syscal Pro".

Le Syscal R2

C'est un résistivimètre alimenté par une batterie de 9 Volts (6 piles LR 20 de 1,5 Volts, pour l'électronique interne). Il permet de réaliser des mesures avec les dispositifs de base (Wenner, Schlumberger) dont les configurations sont déjà préinstallées dans la mémoire. Il permet ainsi d'effectuer des sondages, des trainés, avec un accès automatique à la valeur de résistivité

apparente qui est calculée à partir des dimensions du dispositif que l'opérateur peut introduire à l'avance. Cependant, avec ses multiples accessoires, il est plus adapté à une utilisation en exploration par ERT avec au maximum 64 électrodes. L'ensemble du matériel pour cet opération se compose alors de (*Cf. Figure 20*) :

- Un jeu de 64 électrodes avec des câbles de connections ;
- Un convertisseur DC/DC à multiple intensité d'injection de courant ;
- Des switchs externe (multinodes) sous forme de boîtiers à multiples connexions (16 chacun) ;
- Un RCM (Remote Control Multiplexer) qui constitue le relais entre le Syscal et les multinodes ;
- Deux batteries de 12 Volts pour le courant d'injection, et l'alimentation du RCM ;
- Un câble de transfert de données.

En plus de ce matériel, l'utilisation d'un ordinateur est nécessaire en mode mesures ERT, pour la programmation du résistivimètre et la récupération des jeux de données mesurées.

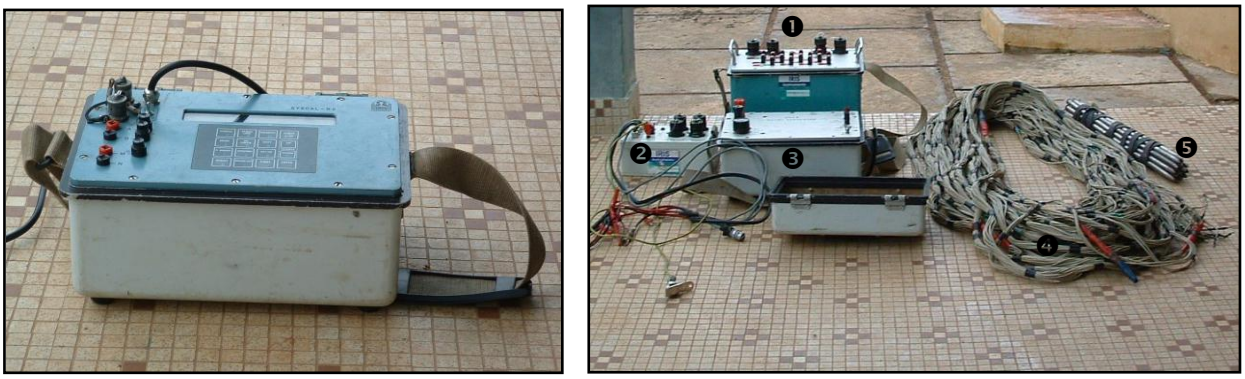


Figure 20: *Vue du Syscal R2 (à gauche) et du matériel annexe (à droite). (1) multinodes, (2) RCM, (3) Convertisseur, (4) câbles de connections, (5) électrodes.*

Le Syscal Pro

Il a été développé après le Syscal R2 dont il garde les fonctions essentielles : protocoles de mesures en traînés ou sondages avec les dispositifs élémentaires principaux déjà préinstallés. Il s'en distingue par un boîtier plus gros qui abrite en plus de l'électronique de fonctionnement de l'appareil, les switchs et deux batteries pour l'injection et l'alimentation. C'est donc un appareil tout en un qui n'utilise qu'en option une batterie pour l'injection (*Cf. Figure 21*).

Plus performant, il peut effectuer des mesures sur un panneau de 96 électrodes, avec en option pour certains types de protocole (Pôle-dipôle), la possibilité de mesurer simultanément sur 10 canaux avec une seule injection de courant, d'où un gain de temps énorme.

Plus que le Syscal R2 donc, il permet de couvrir en un seul panneau une grande distance avec une profondeur d'investigation plus importante (l'écartement entre les électrodes aux extrémités étant plus grande). De plus, Il gère automatiquement les intensités d'injection de courant en fonction des résistances de prises et la qualité de la mesure de potentiel.

Même sans accessoires, c'est un appareil qui comme le R2, est peu adapté à la réalisation de traînés électriques en raison de son poids.



Figure 21: *Vues du Syscal Pro. A gauche, l'arrière de l'appareil avec les connexions directes sur les switchs internes ; A droite, le Syscal Pro avec la batterie externe pour l'injection de courant et l'ordinateur de terrain pour le transfert des protocoles et des données.*

2.2.4.3. Présentation du matériel de mesure électromagnétique (EM34)

L'EM 34 type Slingram de Geonics est un appareil de mesure électromagnétique à faible nombre d'induction utilisé principalement pour réaliser deux types de prospections géophysiques : le sondage et le traîné. Il se compose de deux parties (*Cf. Figure 22*):

- Une partie « émetteur » qui comporte un appareil d'émission connecté à une bobine de 63 ou 100 cm de diamètre ;
- Une partie « récepteur » constituée de l'appareil de réception et de lecture, lui aussi connecté à une bobine de 63 cm de diamètre. Le récepteur est doté de deux écrans

servant l'un, à l'alignement des bobines et l'ajustement de la distance qui les sépare et l'autre, à l'affichage numérique des valeurs de conductivité.

Ces deux parties sont reliées par un câble de longueur pouvant être de 10, 20 ou 40 m.

L'EM34 mesure des conductivités (mS/m) dans des gammes comprises entre 0 et 300 mS/m. En plus de pouvoir être utilisé en configuration dipôle vertical (bobines horizontales – HCP) ou horizontal (bobines verticales – VCP), il est possible également de jouer sur la distance entre bobines en utilisant l'un des câbles fournis. L'ajustement de la fréquence en fonction de la distance des bobines se alors fait automatiquement par sélection à l'aide d'un bouton dédié placé sur l'émetteur.

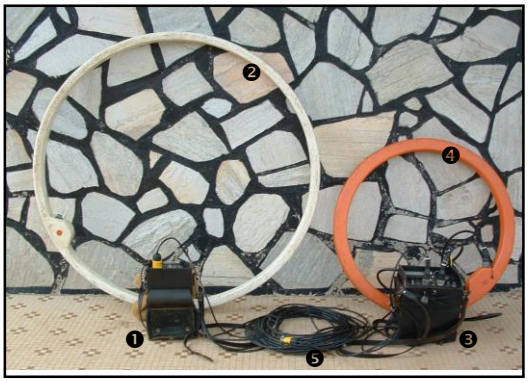


Figure 22: *Vue de l'EM 34. A gauche, la partie émettrice avec l'émetteur (1) et la bobine (2). A à droite, la partie réceptrice avec le récepteur (3) et la bobine (4). Entre les deux, le câble de liaison (5).*

L'EM34 peut être ainsi utilisé en six configurations correspondant aux combinaisons entre positions de bobines et la distance qui les séparant, chacune des configurations offrant une profondeur d'investigation donnée (voir tableau).

		Distance émetteur-récepteur (m)		
		10	**20**	**40**
Profondeur d'investigation maximale (m)	**VCP**	7.5	15	30
	HCP	15	30	60

Tableau 5: *Profondeurs d'investigation en fonction des différentes configurations de l'EM34.*

La prospection par l'EM 34 sur le terrain est très aisée. Il est rapidement mis en route en connectant les bobines avec la longueur de câble souhaité et en choisissant sur l'émetteur les paramètres correspondant à la configuration en cours. Deux opérateurs suffisent alors pour effectuer les mesures en se déplaçant d'un point à un autre.

2.2.4.4. Méthode d'acquisition de données

L'acquisition des données repose sur un protocole qui est commun aux sites sahélien et soudanien. Elle s'est faite en trois étapes : L'exploration préliminaire, le suivi temporel, la collecte des données complémentaires. Le tableau 6 récapitule pour les deux sites, l'ensemble des opérations qui ont été menées et dont la description détaillée est exposée dans les paragraphes qui suivent. Nous rappelons également que les campagnes de mesures sur les deux sites ne datent pas de la même année, cependant, nous avons veillé à ce que les protocoles de mesures soit strictement similaires.

	Site sahélien	Site soudanien
Exploration préliminaire (saison sèche)	Carte de résistivité électrique (syscal R2)	Carte de conductivité électromagnétique (EM 34)
	Profils ERT de reconnaissance (5)	Profils ERT de reconnaissance (6)
	Forages de reconnaissance (3)	Forages de reconnaissance (10)
	Diagraphie en forage (1)	Diagraphie en forage (1)
Suivi temporel (saison des pluies)	Carte de conductivité EM 34 (Mai - Octobre)	Carte de conductivité EM 34 (Mars - Juin - Septembre)
	Coupe de résistivité électrique (ERT) (Mai - Juin - Août - Octobre)	Coupe de résistivité électrique (ERT) (Mars - Juin - Septembre)
	Diagraphie de résistivité électrique (Mai - Juin - Août - Octobre)	Diagraphie de résistivité électrique (Mars)
Données complémentaires (suivi annuel)	Pluie et données météorologiques (journalières)	
	Humidité de sol en comptages neutroniques (mensuelles)	
	Niveaux statiques (3jours)	
	Conductivité de l'eau du sol (3 jours)	
	Données topographiques (lévés uniques)	

Tableau 6: *Organisation des prospections géophysiques par site et type de mesure.*

L'exploration préliminaire

C'est une opération qui avait pour but de donner les premiers éléments de reconnaissance des sites (au plan géophysique). Elle a consisté sur l'ensemble des sites à la réalisation de panneaux électriques devant fournir des informations sur l'organisation verticale des résistivités, la profondeur d'altération, la nature éventuelle du socle et sa géométrie. Ces premières mesures devaient en outre servir de base au choix des paramètres pour la future opération de cartographie.

Les explorations ont été entièrement réalisées à l'aide du résistivimètre Syscal R2 avec lequel les mesures ont été prises en utilisant un protocole dans ses deux variantes : Wenner Alpha et Bêta. Ces deux variantes ont été choisies pour leurs sensibilités complémentaires. Le Wenner Alpha est en effet sensible aux variations horizontales de résistivité (donc à la tabularité des terrains) tandis que le Wenner Bêta est sensible aux anomalies verticales. Sur tous les sites, l'exploration préliminaire a eu lieu en saison sèche afin de profiter des avantages d'un site plus sec et plus dégagé du point de vue végétation (conditions favorables à l'accès et aux observations annexes).

Sur le site sahélien

L'exploration s'est fait à partir de panneaux réalisés avec un écartement inter-électrode de 4m choisi pour une investigation profonde dans un contexte ou l'altération est supposée épaisse (plus de 20 m) :

- Trois panneaux sur le haut de versant dont deux orientés nord, sud et un troisième plus long qui couvre tout le site sur une diagonale ;
- Deux panneaux en bas de versant (zone de bas-fond).

Pour trouver les correspondances lithologiques aux résistivités mesurées, des forages ont été réalisés sur chacune des parties du versant au passage des profils. En plus de la description lithologique du sous-sol, des observations de surface ont été menées pour la localisation des affleurements rocheux, la reconnaissance des états de surfaces et l'organisation du réseau de ravine.

Sur le site soudanien

Six panneaux électriques orientés ouest, est et long de 400 m environs (dans le sens de la largeur du site) ont été utilisés pour couvrir l'ensemble site du sud au nord. Ces profils sont espacés de 100 m et ont été réalisés avec un écartement inter-électrodes de 2 m pour une meilleure résolution de la sub-surface au dépend de la profondeur d'investigation. Il faut dire que l'épaisseur d'altération moyenne sur ce site est connue pour être assez faible (15 m - Wubda, 2003).

Le site est en outre doté d'un certains nombre d'équipement comme des piézomètres et des tubes de sonde à neutron, avec des descriptions de forages qui ont été utiles à l'établissement des correspondances lithologiques avec les données de résistivité des panneaux électriques.

Le suivi temporel

Le suivi temporel sur les sites porte sur deux opérations : le suivi en carte EM 34 et en coupe ERT. La méthode pour la mise en œuvre de ces deux types de suivi est exactement la même. Elle consiste en une mesure d'état initial dite t_0 effectué en saison sèche à un moment ou le sol est le plus sec possible, puis à une ou plusieurs séries de mesures réalisées à des moments clés de la saison pluvieuse aux mêmes endroits avec les mêmes équipements et les mêmes protocoles. Le suivi temporel en carte a été effectué à l'aide de l'EM34 utilisé pour réaliser des mesures en trainée sur plusieurs profils couvrant le site à prospecter. Celui en coupe concerne des sites cibles choisi pour être suivi à l'aide de mesures ERT.

Sur le site sahélien

- *Suivi temporel en carte*

Le suivi de résistivité en carte a concerné deux sites en haut et bas de versant, le but étant de s'assurer de la similitude de fonctionnement des versants dans les deux types d'environnement. Les mesures sur le haut de versant porte sur une zone de 1 km^2 (site de Katchari) dans laquelle est délimité un bassin versant (BV0) suivi par les hydrologues.

Dans le bas de versant, la zone de suivi (site de Dangadé) est plus petite (0,5 km2). Elle couvre un bas-fond drainé par une ravine comportant des surcreusements sous fourme de petites mares. Les profils de mesure coupent perpendiculairement cette ravine.

Les mesures réalisées à l'aide de l'EM34 ont été prises avec les paramètres suivants :

- Configuration HCP de l'EM 34 pour une prospection privilégiant le proche sous-sol ;
- Ecartement maximal entre les bobines (40 m) pour une exploration entière de la zone altérée qui est épaisse de 25 à 30 m ;
- Pas de mesure de 50 m, choisi après un test en pas plus serré de 25 m ;
- Orientation des profils nord-ouest, sud-est (à peu près perpendiculaire à l'orientation principale de la fracturation des roches). Il faut signaler que la carte géologique au 500 000^e de Dori, indique la présence d'une formation massive sans orientation ni fracturation particulière des structures à l'endroit de notre site ;
- Ecartement entre profils de 50 m, choisi également après test en espacement de 25 m.

Deux séries de mesures ont été réalisées sur ces sites :

- Les mesures initiales (t_0) en haut et bas de versant dans le mois de mai ;
- Une mesure finale (t_1) en début octobre, c'est-à-dire juste à la fin de la saison pluvieuse, sur le haut de versant uniquement.

Quant aux mesures de suivi en bas de versant, elles ont été abandonnées suite à l'analyse des résultats en carte obtenus en haut de versant et ceux en coupe dans le bas-fond (explications plus détaillées dans le chapitre sur les résultats).

- *Suivi temporel en coupe.*

Le suivi de résistivité en coupe s'est fait au travers d'une des mares temporaires de la ravine qui draine le bas de versant où un dispositif de mesures de résistivité électrique y a été installé (voir détail en *chapitre 4*). Ce dispositif se compose :

- Une série de 64 électrodes disposées sur un profil perpendiculaire à la ravine et devant servir à l'ERT. L'écartement inter-électrodes adopté est de 2 m. Il s'agit d'un compromis entre le besoin de traverser la mare avec une seule série de mesure, l'obtention d'une profondeur d'investigation suffisante pour toucher le substratum et le souci de conserver une bonne résolution de la mesure ;
- De tubes de diagraphies situés sur une berge et au centre de la mare ;
- De tubes d'accès neutroniques.

Les premières mesures (t_0) ont eu lieu au mois de mai. Il s'agit d'une série de mesures ERT à l'aide de quatre protocoles (Wenner Alpha et Bêta, Pôle-dipôle forward et reverse) et d'une mesure initiale de diagraphie en dipôle-dipôle.

La dynamique de résistivité en coupe (ERT et diagraphie) a été suivie avec des mesures plus rapprochées, soit environ une par mois : juin, juillet, aout, octobre ; et toujours en utilisant les mêmes protocoles que pour la mesure initiale. Pour s'assurer de réaliser les mesures exactement aux mêmes endroits, toutes les électrodes ont été laissées sur place pendant toute la campagne de mesure.

<u>*Sur le site soudanien*</u>

- *Suivi temporel en carte EM*

A l'instar du site sahélien, le suivi en carte s'est effectué à l'EM 34 avec une configuration HCP. Il a porté sur un site de 0,4 km^2 représentant un micro-bassin versant (appelé BV Parshall) drainé

par une petite ravine dont l'exutoire comporte un ouvrage de mesure de débit de type "Parshall". Les paramètres de mesures ici sont les suivants :

- Ecartement entre les bobines de 10 m pour une profondeur d'investigation maximum de 8 m dans un contexte de substratum proche (autour de 12 m) ;
- Profils orientés ouest, est pour recouper les structures qui sont orientées ici nord, sud ;
- Un pas de mesure de 20 m pour pouvoir échantillonner plusieurs fois une même structure. Les tests effectués par Wubda (2003), ont montré qu'il était inutile d'avoir un pas plus fin, d'où ce choix ;
- Distance entre profils de 50 m. Cet écartement pouvait selon les tests de Wubda (2003), aller jusqu'à 100 m sans de grandes pertes d'informations sur la géométrie des structures. L'écartement choisi tien donc plus du besoin d'éviter une grande disproportion dans le maillage du terrain.

Le suivi porte sur l'année 2014 avec :

- Une mesure initiale (t_0) en mars ;
- Un premier suivi en juin ;
- Un second suivi en septembre.

Chaque campagne de mesures dure une journée et demie pendant lesquelles sont réalisés 21 profils de mesures long chacun de 400 m.

- *Suivi temporel en coupe ERT*

Il a porté sur la petite ravine qui draine le micro-bassin versant BV Parshall et a été réalisé à l'aide du résistivimètre Syscal Pro. Comme sur le site sahélien, il repose sur un dispositif de mesures électriques placé en travers de la ravine, précisément à un endroit où préexiste des équipements de mesures hydrologiques (piézomètres, tube de sonde à neutron). Le dispositif se compose de :

- Une série de 96 électrodes (maximum d'électrodes supporté par le Syscal Pro) placées le long d'un profil qui traverse la ravine d'ouest en est. Ces électrodes qui servent aux mesures ERT sont espacées de 1 m pour une bonne résolution de la zone à prospecter. Elles ont été laissées sur place le temps du suivi ;

- Un trou temporaire de diagraphie de 2,5m de profondeur avec une mesure tous les 20 cm.

Les mesures effectuées à partir de ces dispositifs suivent le même calendrier que celles en carte :

- Les mesures initiales ont été effectué en juin, avec quatre protocoles pour l'ERT (Wenner Alpha, Bêta et Pôle-dipôle forward et reverse comme sur le site sahélien) ;
- Les suivis ERT ont lieu en même temps que ceux en carte c'est-à-dire en juin et en septembre ;
- Les mesures de diagraphie ont été effectuées seulement en surface et pour le mois de mars à cause de certains problèmes techniques (effondrement du forage de diagraphie).

L'acquisition des données complémentaires

Les données complémentaires sont celles prises dans le cadre des études hydrologiques. Il s'agit de données piézométriques, de conductivité d'eau souterraine ou de surface, d'humidité de sol (Comptages mesurés à la sonde à neutron), de descriptions de forages effectuées lors des installations des piézomètres ou des tubes neutroniques.

Sur le site sahélien, l'essentiel des données utilisées a été acquis par nous même à partir d'équipement installés en complément des dispositifs géophysiques. Ils se composent notamment de piézomètres, de tubes neutroniques et de thermistances placés le long du dispositif ERT qui équipe la mare temporaire du site de Dangadé (bas de versant). Les mesures prises dans ce contexte suivent celles de besoins géophysiques :

- Données piézométriques, sonde à neutron, et niveau de la mare prise tous les trois jours ainsi qu'aux dates précises des mesures de suivis géophysiques ;
- Mesures de température du sol (thermistances) à chaque période de suivi géophysique.

Le site soudanien était lui, complètement équipé pour les besoins de recherches hydrologiques : exutoire de bassin calibré, piézomètres, tube d'accès neutronique, pluviomètre, station météo etc. Aussi, toutes les données issues de ces dispositifs et bien d'autres encore (données topographiques, description de forages) nous ont été fournies par les collègues sur place. La périodicité de ces données (quand il s'agit de chroniques) est très variable en fonction des besoins du volet d'étude hydrologique concerné, mais globalement, elles sont prises à pas de

temps assez fin pour satisfaire aux besoins du suivi géophysique. En complément de ces données, quelques mesures spécifiques (sonde à neutron, niveaux piézométriques et conductivité des eaux) on été effectuées aux dates précises des suivis géophysiques.

2.3. Inversion des données ERT

Le logiciel d'inversion que nous avons choisi d'utiliser dans le cadre de cette thèse est ***DC2DInvRes***. Il a été développé par T. Gunther en 2005 et utilisé par Descloitres et al dans l'étude des processus d'infiltration au Burkina Faso (Descloitres et al, 2007), et Clément dans le cadre de sa thèse portant sur le suivi de l'injection des lixiviats dans les massifs de déchets (Clément, 2010).

Pour notre part, le choix porté sur DC2DInvRes a surtout été guidé par le besoin au cours de cette étude, de procéder à plusieurs modélisation numériques synthétiques. Il a été donc retenu pour sa grande aisance d'utilisation dans cette fonctionnalité.

2.3.1. Présentation de DC2DInvRes

DC2DinvRes est un logiciel gratuit fonctionnant sous Windows. Il est téléchargement libre sur le site "Resistivity" (http://www.resistivity.net) et utilisable en mode toutes options sur simple accord du développeur (mail à envoyer via le site). Une fois installé, il possède une rubrique d'aide dont on peut se référer pour le détail des fonctionnalités de tous les outils. Aussi, la description ci-après que nous en faisons vise à donner une idée de ses fonctions principales.

DC2DInvRes permet de réaliser trois opérations majeures:

La simulation numérique de données synthétiques

Ce logiciel permet à partir d'un dispositif théorique de mesures dont on peut préciser les caractéristiques, de générer un jeu de données synthétiques. Pour cela, il dispose d'une grille de calcul sous forme graphique à travers laquelle il est possible de dessiner les composantes de terrain (forme et résistivité supposées) dont on souhaite connaitre la réponse (*Cf. Figure 23 A*). En outre, il est possible à l'aide de quelques outils, de définir la taille de la grille (longueur, profondeur) et celle des cellules de calculs qui la composent.

Après calcul des réponses de résistivité apparente (modélisation dite "directe"), le logiciel propose en plus le l'affichage graphique (*Figure 23 B*), un fichier de données numériques éditable (*Figure 23 C*) auquel il est possible d'ajouter des données topographiques : altitudes

relatives des électrodes (avec possibilité de simuler des mesures avec des électrodes placée sous une lame d'eau).

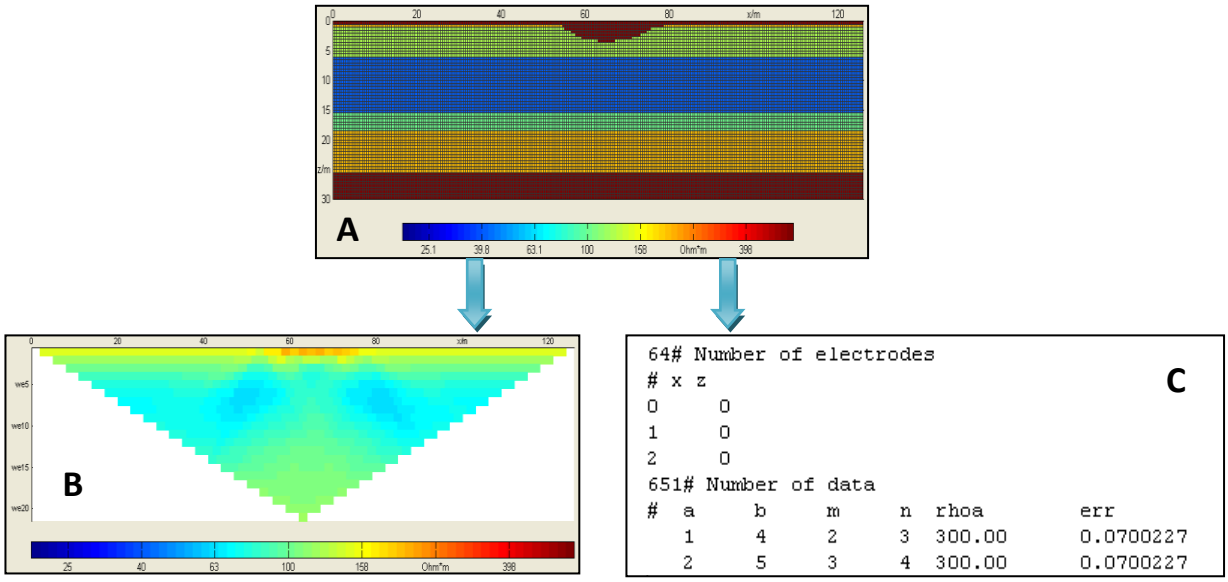


Figure 23: *Exemple de modélisation directe sous DC2DInvRes. (**A**) Modèle synthétique, (**B**) résultat graphique du calcul direct de réponse, (**C**) données du fichier numérique généré.*

L'inversion des données synthétiques ou de terrain

La seconde fonction importante du logiciel est son outil d'inversion des données synthétiques ou acquises sur le terrain. Le logiciel propose pour le calcul des itérations, l'algorithme de "Newton-Gauss" auquel il est possible d'appliquer un coefficient d'amortissement (entre 0,1 et 100).

En fonction du type d'inversion envisagé, deux options de contrainte de model sont proposés :

- ***En inversion indépendante*** (inversion d'un jeu unique de données quelconque), l'option *"smoothness"* permet de réaliser une inversion dans laquelle la variation de résistivité suit un gradient réglable à l'aide du facteur d'amortissement dont l'augmentation produit des variations de résistivités calculées de plus en plus lissées ;

- ***En inversion time-lapse*** *(guidée par un modèle initiale obtenu en inversion indépendante)* l'utilisation de l'option *"minimum-lenght"* permet parmi l'ensemble des équivalences de modèles de résistivités calculées, de choisir celui ou les écarts de variations de résistivités sont minimaux.

Outre ces paramètres de contraintes majeures, il est possible d'affiner le calcul à l'aide d'outils complémentaires qui requièrent par contre une certaine connaissance des conditions

d'acquisition des données ou des traits de la zone étudiée. En suivant les recommandations issues des travaux de Clément (2009), nous avons utilisé certains de ces outils. Il s'agit des options :

- *Fixing regions*: il permet de fixer la résistivité connue d'une zone et rendre ainsi toute les valeurs concernées invariables au cours des calculs; C'est une option qui a été utilisée sur les données de notre site sahélien pour fixer la résistivité de l'eau de la mare (*Cf. Figure 24*).

- *Decoupling line* : Il sert à introduire une rupture nette entre deux zones pour lesquelles il ne peut exister aucune forme de continuité (cas du fond de la mare sur le site sahélien, *Figure 24*). Il permet ainsi au logiciel de procéder aux calculs en considérant des matrices indépendantes;

- *Z weight* : Il contrôle les distorsions liées à la forme des composantes du modèle. Il peut être choisi entre 0 et 2. Par défaut, sa valeur est de 1 et désigne l'absence de contrainte sur la distorsion. Les valeurs inférieures à 1 introduisent de contraintes de distorsions horizontales et celles supérieures, des distorsions verticales.

Enfin, pendant et à la fin des processus d'itération, on peut apprécier la qualité de l'inversion en se référant à deux types d'erreurs de calculs : l'erreur *RMS* et le Chi^2.

L'erreur *RMS* (ou RMSE, Root Mean Square Errror - ou encore Erreur Quadratique Moyenne) est une estimation de la différence qui existe entre les valeurs de résistivité calculées (modèle) et celles apparentes (mesurées sur le terrain). En d'autres termes, elle indique à quel point le modèle calculé est représentatif des données acquises. Elle s'exprime par l'équation suivante :

$$\boldsymbol{RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_{data,i} - x_{model,i})^2}{x_{data,i}}}{N}}} \qquad \textbf{Eq 17}$$

Dans laquelle $\boldsymbol{N}$ représente le nombre total de données.

Le $\boldsymbol{Chi^2}$ permet quant à lui d'avoir une estimation de l'erreur représentative de l'ensemble des résistivités. Il mesure l'écart entre la distribution des résistivités apparente et celle obtenue après calcul d'itération. Il permet ainsi plus de valider la qualité du calcul surtout dans les cas ou les données d'entrés sont connues pour être bruités (*RMS* pas forcément faible après itérations).

$$\boldsymbol{Chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_{data,i} - x_{model,i})}{e_i}}{N}} \qquad \textbf{Eq 18}$$

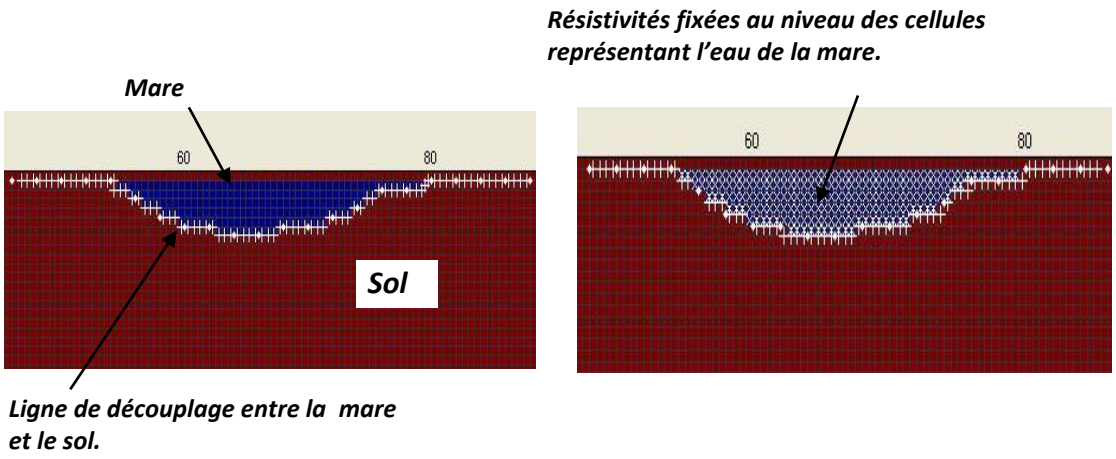


***Figure 24**: Exemples de rajout de contraintes dans la grille de calcul d'inversion des données du site sahélien. A gauche, le découplage entre l'eau de la mare et le sol. A droite, la fixation des valeurs de résistivité de l'eau de la mare en plus du découplage mare-sol.*

La comparaison des modèles

La comparaison des modèles sous DC2DInvRes se fait en utilisant l'outil "*Compare models*". Le résultat de cette opération est affiché sous forme graphique à travers lequel sont représentés les ratios de résistivité (rapport de résistivité, modèle 1/ modèle 2) entre les modèles comparés. Par cette opération, on peut :

- D'une part, apprécier le calage des paramètres d'inversion en comparant le résultat d'une inversion indépendante avec le modèle synthétique de base à partir duquel les données ont été générées (*Cf. Figure 25*) ;
- D'autre part, faire ressortir la dynamique temporelle de résistivité en comparant en time lapse, un modèle final à un modèle initial. Pour notre étude, la présentation des variations de résistivité en suivi temporelle utilise toujours le rapport état final/état initial. Sur l'échelle des variations qui accompagne les figures, le ratio 1 indique une absence de variation, tandis que les valeurs supérieures et inférieures indiquent respectivement des hausse et baisses de résistivité par rapport à l'état initial.

2.3.2. Calage des paramètres d'inversion

Cette opération a pour but le choix des meilleurs paramètres calculs pour la nature de données dont nous disposons et les types d'inversions que nous comptons réaliser : inversions indépendantes et time-lapses. Les essais de calage se sont déroulés en deux étapes :

Calage en inversion indépendante

Les tests pour le choix des paramètres en inversion indépendante suivent la démarche ci-après :

- Création d'un modèle synthétique de terrain aux traits les plus proches possible de la réalité connue ou supposée de terrain (*Figure 23 A*) ;
- Génération d'un fichier de données synthétiques par calculs directs de réponse (*Figure 23 C*) ;
- Inversion des données synthétiques avec un jeu de paramètres donné ;
- Comparaison du modèle de résistivités calculées avec le modèle synthétique de départ.

Pour chaque inversion, les calculs ont été effectués en laissant les itérations se conduire jusqu'à obtention des valeurs d'erreurs (*RMS* et CHI_2) les plus faibles possibles (inférieur à 1). Une fois le résultat acquis, la pertinence du choix d'un jeu de paramètres s'apprécie alors en se basant sur des critères:

- Graphiques : présence effective des couches modélisées, reproductibilité des formes et des valeurs de résistivités, forme de la transition entre couches (*Cf. Figure 25*);
- Numériques : rapports entre valeurs numériques des fichiers début (modèle synthétique) et fin (modèle de résistivités calculées) en utilisant soit directement les outils dédiés du logiciels ou tout autre outil d'analyse statistique.
- Quantitatifs : valeur du CHI_2 et du *RMS* le plus petit possible.

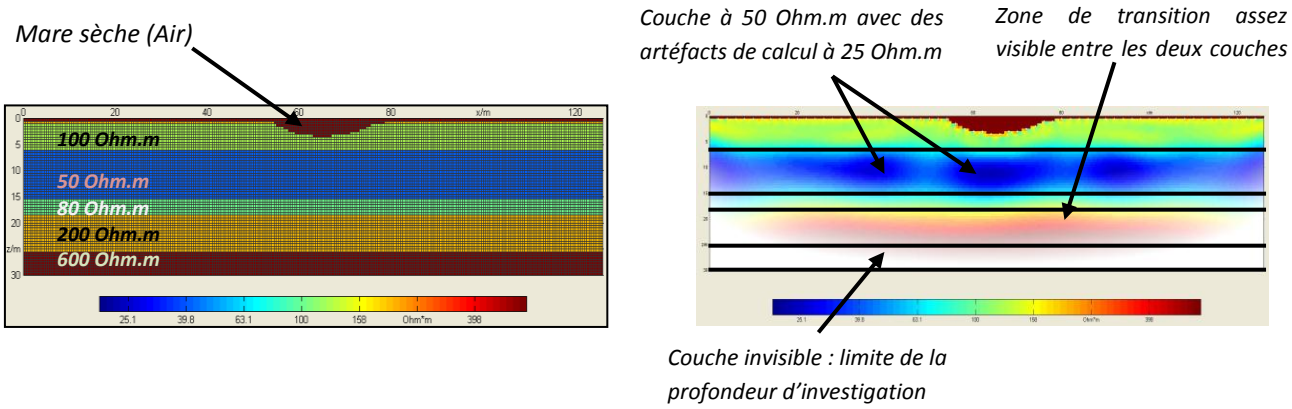


Figure 25: *Exemple de comparaison graphique entre le modèle synthétique de terrain (A gauche) et le résultat de l'inversion (A droite).*

L'ensemble des tests réalisés ont utilisé des données synthétiques calculées à partir de tous les types de dispositifs de mesures employés sur le terrain : Wenner Alpha et Bêta, Pole-dipôle forward et reverse. Ils ont porté également sur la pertinence des combinaisons de données issues de plusieurs dispositifs (Wenner et Pôle-dipôle).

En vue d'obtenir après calculs une bonne définition des éléments du modèle, une grille de calcul suffisamment fine a été choisie. Elle est composée de cellules dont la taille de 0,25 x 0,25 m présente certains avantages :

- Les cellules sont suffisamment petites pour faciliter l'intégration de données topographiques plus précises surtout en cas de modélisation des situations d'acquisition de données avec électrodes submergées ;
- Le nombre total de cellules dans la grille reste dans une gamme facilement gérable par le logiciel de calcul qui peut terminer les opérations dans un lapse de temps assez court (2 heures) offrant ainsi l'opportunité de multiplier rapidement les essais de modélisation.

A l'issue de tous nos tests, nous avons observé que nos paramètres retenus étaient finalement proches de ceux recommandés par le développeur :

- Type d'algorithme : *Newton-Gauss*
- Contrainte du modèle : *Smothness 1st order*
- Facteur d'amortissement (*Lambda*) : *30*
- *Z weight* : *1*
- *Global regularisation*

Calage en inversion time-lapse

Les tests en inversion time-lapse ont utilisé les paramètres retenues en inversion indépendante pour suivre les recommandations des études antérieures (Clément et al, 2009 ; Descloitres et al, 2007). Ainsi, nous avons modifié deux d'entre eux : le type de contrainte du modèle et la valeur du facteur d'amortissement :

- Contrainte du modèle : *Minimum length ;*
- Facteur d'amortissement *(Lambda) : 15.*

Enfin, nous avons utilisé le mode "*découplage*" pour isoler le front d'infiltration (quand celui-ci est connu – Données sonde à neutron) des autres couches ou alors pour délimiter l'interface eau-sol dans le cas des électrodes submergées.

2.3.3. Simulations numériques

Elles ont consisté en une série de tests d'itérations réalisées à l'issue du choix des paramètres d'inversion. Ces tests sont faits à partir de données synthétiques issues d'une part de modèles supposées de sous-sol de nos sites, et d'autre part de multiples scénarios d'infiltration (voir exemples sur le site sahélien présentés par les *Figures 26* et *27*). Plusieurs objectifs sont visés par cette opération :

- Confirmer la validité des paramètres d'inversion retenus par leur application sur des modèles synthétiques de terrain très proches de ceux supposés sur les sites ;
- Déterminer les dispositifs et configurations de mesures adaptés à l'étude de l'infiltration en fonction de la manifestation locale du processus ;
- Trouver les combinaisons de données (Données Wenner Alpha + Beta seule, ou combinées avec données pôle-dipôle) offrant les meilleurs résultats à l'inversion ;
- Détecter les problèmes de calculs (persistance d'artéfacts) ;
- Disposer d'un canevas de présentations graphiques et valeurs calculées de résistivité pour les différentes formes d'infiltration supposées présentent sur les sites.

Pour le site sahélien, ces simulations ont porté notamment sur :

- L'influence des variations de résistivité des couches superficielles sur les mesures profondes ;
- Le niveau de précision des données topographiques de la mare temporaire à intégrer aux données de résistivité pour une optimisation des calculs d'inversion ;
- L'effet de l'immersion d'une partie des électrodes (celles surtout situées dans la mare) pendant la saison pluvieuse sur les mesures de résistivité ;
- La capacité de chaque dispositif (type et écartement entre électrodes) à reproduire la géométrie du terrain ainsi que les variations de résistivités simulées à l'aide de plusieurs scénarios d'infiltrations (latérale, verticales, en lobe sur l'ensemble de la mare).

Concernant le site soudanien, l'accent a surtout été mis sur la modélisation des variations possibles de résistivité des couches causées par une infiltration généralisée ou à une remonté de la nappe.

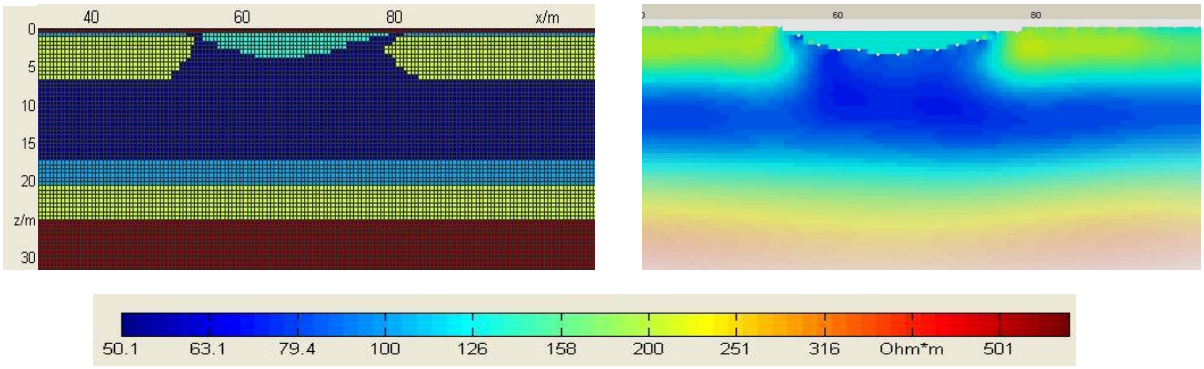


***Figure 26**: Test des paramètres d'inversion à partir de données synthétiques (Wenner Alpha et Beta) issues d'un modèle de terrain (à gauche) inspiré de notre site sahélien : simulation d'une infiltration sous une mare. La cohérence du résultat d'inversion (à droite), avec le modèle synthétique valide le choix des paramètres de calculs. Ce résultat montre aussi, qu'en configuration Alpha et Beta, la définition des couches est faible à partir de 17 m.*

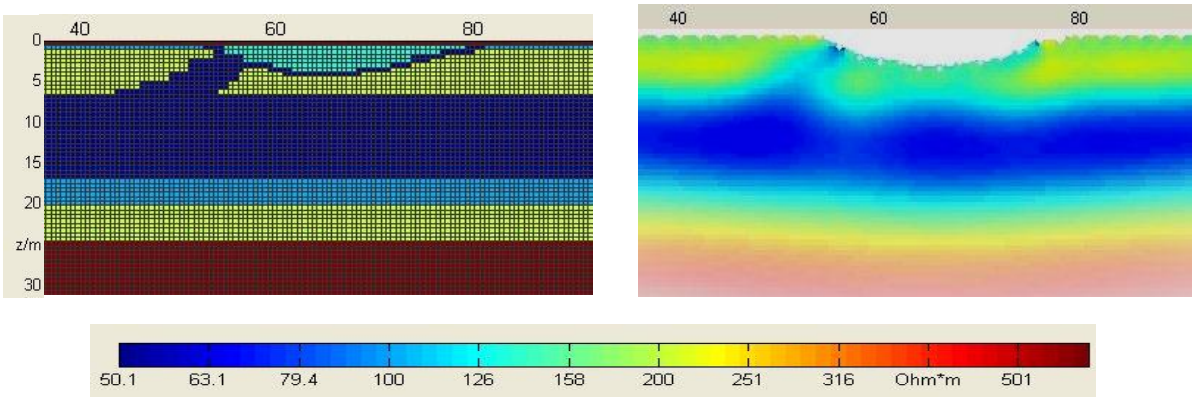


***Figure 27**: Simulation d'une infiltration latérale à partir du modèle de terrain de la figure 25. Les données synthétiques générées sont en pôle-dipôle avant et arrière. Le résultat de l'inversion confirme à nouveau la validité des paramètres d'inversion choisis. En revanche, on remarque que l'infiltration latérale n'est pas très bien définie, alors que la couche profonde résistante est assez visible.*

2.3.4. Calages retenus et implications

Des multiples simulations réalisées, quelques observations utiles ont été relevées :

En inversion indépendante (T_0) :

- La conduite des itérations jusqu'à l'obtention des erreurs les plus faibles améliore la qualité du modèle. Toutefois, elle peut également être source d'apparition d'artéfacts

de calculs se traduisant par des zones artificielles d'anomalies de résistivités (*Cf. Figure 23*, page 72);

- Les modèles calculés se rapprochent assez bien de ceux synthétiques de départ tant au niveau de la présence des différentes couches que de la conformité des résistivités. Cependant, on observe des zones de transition artificielles entre les couches, conséquence de la valeur d'amortissement choisie (pourtant ici un bon compromis) ;

- L'erreur observée sur les profondeurs est de l'ordre de 1 m malgré la grille de calcul choisie (0, 25 x 0,25 m) ;

- Les inversions en combinaison Wenner Alpha et Bêta qui sont deux dispositifs complémentaires du point de vue sensibilité, donnent de très bons résultats. Par contre, la géométrie triangulaire de leur panneau d'acquisition pose des problèmes d'interpolation pour les couches profondes qui ne sont représentées que par seulement quelques points de mesures (en milieu de panneau). Il apparait souvent en bas de panneau, des ondulations (des couches profondes) causées par un mauvais calcul d'interpolation dont l'origine est l'absence de données aux extrémités inférieures des panneaux. La meilleure solution pour résoudre ce problème, est d'adjoindre les panneaux de mesures en pôle-dipôle (forward et reverse). Cette solution, en plus d'améliorer la qualité de l'inversion, élimine les ondulations en apportant justement les mesures latérales manquantes (les configurations pôle-dipôle présentant un bon échantillonnage de mesures latérales). A défaut, il est impératif de supprimer les données profondes du panneau.

En inversion time-lapse :

- Une insensibilité à des variations de résistivité de moins de 10 % pour les couches à plus de 20 m (effets de la faible résolution en profondeur) ;

- La possibilité d'apparition d'artéfacts pouvant être causés d'une part par le modèle de départ, mais aussi d'autre part par les calculs propres au time-lapse ;

Les observations ci-après ont donc été prises en compte dans la procédure de traitement de données l'interprétation des résultats issus des calculs.

2.4. Outils de cartographie

Pour traiter et représenter nos mesures de suivi temporel en carte, nous avons eu recours au logiciel ***SURFER*** qui sert au traitement de données et à la visualisation graphique. Trois outils de ce logiciel ont été utilisés :

- Celui servant à la génération de variogrammes ;
- Celui du calcul d'interpolation. Il propose plusieurs types de calculs dont le krisage qui permet l'intégration d'un variogramme prédéfini dans les calculs ;
- Celui de l'affichage qui permet de présenter des données interpolées sous forme de cartes d'iso-valeurs avec des échelles de couleurs modulables.

Les cartes crées sous ***SURFER*** sont exportables en fichiers images éditables (par certains logiciels de traitement d'images) ou directement utilisables sous forme d'objets à coller dans une page de traitement de texte.

2.5. Traitement des données et présentation des résultats

2.5.1. Données ERT

2.5.1.1. Filtrage des données

Avant d'être utilisées pour les calculs d'inversion, les données ERT subissent une série de filtrage. Il s'agit d'opérations consistant à éliminer des valeurs aberrantes ou de qualité douteuse liées parfois aux mauvaises conditions de mesures sur le terrain. Ce filtrage s'effectue à l'aide des logiciels de récupération et de prévisualisation des données. Ceux-ci proposent plusieurs modes d'analyse des données.

- Graphique : par affichage des mesures de résistivités apparentes sous formes de pseudo-section présentant des iso-contours différenciées par des palettes de couleurs (nuances de couleurs chaudes pour les valeurs élevées, froides pour les valeurs faibles) et à travers lesquelles les valeurs aberrantes sont facilement identifiables.
- Numériques : à l'aide de plusieurs outils qui analyse les valeurs et permettent leurs filtrages par simple introduction des paramètres de tri souhaités (valeurs négatives, potentiel ou résistivité apparente supérieure ou inférieure à une valeur fixée).

En plus de permettre l'obtention de données propres pour les calculs d'inversion, les opérations de filtrage constituent souvent de vraies aides à la décision sur le terrain. Elles permettent en effet de rendre compte sur site de l'état des données collectées et d'envisager une reprise des mesures après résolution des problèmes à la base des mauvaises mesures.

2.5.1.2. Introduction des données topographiques

Pour les profils ERT time-lapse, l'introduction des données topographiques s'est fait suivant deux formats de fichiers imposés par l'utilisation du logiciel d'inversion (***DC2DInvRes***) et correspondant à deux situation sur le terrain :

- Des électrodes immergées (sous une mare) pour le site du sahel ;
- Des électrodes toutes à même la surface du sol pour le site soudanien.

En fonction du cas considéré, il a été nécessaire d'adapter la précision des mesures topographiques (pas de mesure et précision du dénivelé) à celle de la grille de calcul choisie pour l'inversion (une topographie fine pour une grille à maille large alourdie les calculs sans pour autant présenter au résultat final, une restitution tout aussi précise des niveaux topographiques). Aussi, plusieurs essais ont été nécessaires pour aboutir au choix des valeurs topographiques les plus optimisées qui, dans le rendu final de l'inversion, reproduit au mieux les dénivelés effectivement présents sur le terrain (sans trop de distorsions).

2.5.1.3. Combinaison des données pour l'inversion

Tous les calculs d'inversion réalisés au cours de cette étude utilisent des combinaisons de données issues de protocoles de mesures différents :

- Une combinaison de données en Wenner Alpha et Bêta pour les profils d'exploration ;
- Une combinaison de quatre types de données (Wenner Alpha et Bêta ; Pôle-dipôle forward et reverse) pour les profils time-lapse.

Comme le montre la *Figure 26*, la combinaison des données Wenner Alpha + Beta est suffisante pour obtenir à l'inversion, une bonne définition des couches supérieures ainsi qu'une profondeur d'investigation satisfaisante pour les besoins de description de la lithologie.

L'ajout de données Pôle-dipôle permet en plus, d'améliorer la qualité du résultat pour les couches profondes du sous-sol qui sont peu définies par l'inversion en combinaison Alpha et Bêta seule (*Cf. Figure 26 et 27*). C'est un ajout qui se révèle surtout utile en suivi temporel, pour

la détection des variations de résistivité des couches profondes en cas d'envahissement par une remontée de nappe par exemple.

2.5.1.4. Inversion et présentation des résultats

Les inversions ont été conduites selon le procédé décrit en section 2.3. Les résultats obtenus se présentent sous la forme d'une coupe en 2D du sous sol organisée en classes de résistivités calculées transcrites en couleurs : rouge pour les valeurs fortes, bleu pour les valeurs faibles. L'agencement des couleurs suit une échelle logarithmique (différence aussi marquée entre 1 et 9 qu'entre 1000 et 9000). Elle est donnée en bas de chaque figure par l'échelle des classes de résistivités calculées.

Les figures proposées présentent en outre une disproportion d'échelle volontairement introduite pour les commodités de lecture. L'échelle des distances (en abscisse) est en effet nettement plus petite de celle des profondeurs (en ordonnée).

Le suivi de la dynamique de résistivité en time-lapse est également illustré par des figures de la même nature. Cependant, les couleurs correspondent cette fois-ci à des rapports de résistivités entre état final et état initial. Ces rapports sont exprimés en ratios dont les gammes sont également données par une échelle de couleurs présente en dessous des figures. Les couleurs chaudes présentent les augmentations de résistivité et les froides, les baisses. Entre les deux, les couleurs au voisinage du ratio 1 (couleurs vertes), représentent les zones inchangées.

2.5.2. Données de suivi EM

La première forme de présentation des données EM est celle considérée à l'échelle du profil de mesure. Les valeurs mesurées sont alors affichées sous la forme d'une courbe montrant à chaque point mesure la réponse du sous-sol exploré. Pour donner aux lecteurs une clef d'interprétation de ces mesures, la présentation des courbes EM est associée à celle des coupes ERT des profils de mesures correspondants. Cet affichage juxtaposé permet ainsi d'établir le lien entre la mesure EM et la structure de terrain (couches et résistivités).

La seconde forme de présentation est celle spatialisée. Comme mentionné plus haut en section 2.4, les mesures EM ont été Krigées à l'aide du logiciel ***SURFER*** en adjoignant pour chaque jeu de données (de suivi mensuel) son variogramme propre. Les trois étapes du suivi annuel sont représentées par trois cartes présentant chacune l'état des conductivités apparentes au moment des mesures. L'échelle de couleur choisie est la même pour toutes les cartes. Celle-ci est formée d'une palette de couleurs contraintes par un petit programme pour suivre une progression logarithmique.

2.6. Résumé de la méthodologie

La méthodologie adoptée pour l'étude de nos sites est construite autour d'une démarche consistant en l'application d'outils géophysiques mis en œuvre de façon identiques dans des zones au même contexte géologique mais soumises à des conditions climatiques différentes. Elle est basée sur l'utilisation de mesures de résistivité électriques et électromagnétiques pour le suivi de dynamiques de résistivité du sol générées par les processus d'infiltration.

Les détails de cette démarche méthodologique qui sont exposées dans les paragraphes précédents s'articulent autour de cinq points importants qui sont les suivants :

- Le choix des sites de recherches pris tous en zone de socle mais sous climat contrastés: zone soudanienne et sahélienne ;
- Le choix de la résistivité comme paramètre pertinent pour le suivi des infiltrations sur les deux sites ; Ce paramètre qui est déjà couramment utilisé en prospection géophysique de sub-surface, présente l'avantage supplémentaire d'être liée à deux propriétés du sol qui intéressent la présente étude: la saturation et la conductivité de l'eau du sol dont nous exploitons les variations pour illustrer la dynamique de l'infiltration pendant la saison des pluies sur nos sites ;
- Le mode d'investigation sur site qui est axé sur le suivi temporel de résistivité en carte (EM 34) et en coupe (ERT) ;
- Le mode de traitement des données qui intègre deux volets : celui des données ERT qui profite des outils d'un logiciel gratuit mais également de certaines bonnes pratiques tirées des expériences acquises au cours d'études antérieures ; Celui des données électromagnétiques EM 34 spatialisées sous forme de cartes de résistivités apparentes ;
- La technique d'interprétation des données géophysiques qui découlent de l'analyse des résultats en coupes et en cartes mais également, des données hydrologiques collectées dans le cadre du suivi général du cycle de l'eau effectué sur nos sites par les hydrologues.

Chapitre 3 : LES ETUDES EN ZONE SAHELIENNE AU BURKINA FASO

Les études géophysiques dans la zone sahélienne du Burkina Faso ont lieu de 2000 à 2003. Elles s'inscrivent dans le cadre de la collaboration interdisciplinaire entre équipes de recherche IRD d'une part, et d'autre part entre équipes IRD et chercheurs nationaux. Conduites sur un site de recherche du nord du Burkina, elles ont accompagné des études agronomiques et environnementales menées par l'Institut National de l'Environnement et de Recherches Agronomiques (INERA), et des études hydrologiques menées par une équipe de recherche IRD dirigée par Olivier Ribolzi.

Les investigations géophysiques ont été effectuées par l'équipe des géophysiciens IRD constituée de Marc Descloitres, Yann Le Troquer et moi-même. Elles ont également connues la participation de chercheurs étrangers parmi lesquels Roger Guérin et Christian Camerlinck du Laboratoire de Géophysique Appliquée de l'Université Pierre et Marie Curie (LGA/UPMC, Paris 6). Plusieurs autres personnes sont en outre intervenues lors des mesures : Mathieu Beck et Denis Girardet (EPF de Lausanne), Ghislain Toé (UPMC, Paris), Henri Robain (IRD, Bondy).

3.1. La zone d'étude

3.1.1. Généralités

La zone d'étude du Burkina est une station de recherche de l'INERA située au nord du pays. Elle est localisée à 13 km au sud-ouest de la ville Dori (14°00'42" N et 00°07'55" O, *Cf. Figure 28*) et s'étant sur environ 15 km^2. Cette station appelée Katchari, tient son nom de celui du plus gros village mitoyen du site. En dehors de sa vocation scientifique, l'espace occupé par la station est traditionnellement dédié à des activités agro-pastorales pratiquées par les populations riveraines.

3.1.1.1. Le climat

Situé au delà du 13ème parallèle, le climat du site est du type sahélien. La moyenne pluviométrique annuelle ici est de 512 mm (Casenave, 1998) avec des pluies concentrées sur une courte saison de pluie (mois de juin à septembre) que précède une longue saison sèche. Durant les deux années (2001, 2002) pendant lesquelles s'est réalisée la présente étude, les totaux annuels enregistrés à la station voisine de Yakouta (à 5 km au nord du site), étaient en dessous de la moyenne interannuelle précédemment annoncée. Ils étaient respectivement de 389 et 404 mm en 2001 et 2002. L'année 2003 a enregistré cependant un total pluviométrique exceptionnel de 713 mm.

Typiques de la zone sahélienne, les températures sont marquées par des extrêmes et des amplitudes fortes. La saison des pluies qui est la période la plus douce, se caractérise par des températures moyennes journalières de 28°C avec des amplitudes modérées (plus ou moins 6 degrés). Elle présente des conditions complètement à l'opposé de la saison sèche qui elle, est marquée par deux périodes :

- La période fraiche (décembre à février) générée par l'activité des vents d'harmattan venus du Sahara. Elle est caractérisée par des températures minimales basses au levé du jour (parfois jusqu'à 9° C pendant le mois de janvier) et des maximales qui restent élevés en milieu de journée (36° C). C'est également une période pendant laquelle l'air est très sec avec souvent de la suspension poussiéreuse causée par les rafales de vents ;

- La période de fortes chaleurs (mars à mai) pendant laquelle s'enregistrent des pics de température en mi-journée atteignant parfois 47° C avec des températures au sol (sur les 10 premiers centimètres) de près de 75° C.

Au point de vue climatique, le sahel est sans conteste le domaine des grands contrastes : entre la saison des pluies (où l'eau est abondante et la nature verdoyante) et la saison sèche (pendant laquelle tout devient sec et le paysage complètement dégagé), entre les périodes de fraicheur et celles des fortes chaleurs et enfin, entre les journées (chaudes) et les nuits (fraiches). Cela impose d'une part, la prise de dispositions adaptées aux conditions climatiques locales aux moments des campagnes pour le bon fonctionnement des équipements de mesures et d'autre part, la prise en compte de l'effet de la température (de l'air et du sol) sur les mesures géophysiques, surtout lorsqu'il s'agit de comparer des données d'un même point prises à des heures, jours ou mois différents.

3.1.1.2. Géologie et géomorphologie

Sur la carte géologique du Burkina au 1/1000 000^{e}, on peut observer que la géologie du site d'étude est constituée essentiellement de deux formations géologiques (*Cf. Figure 30*) : des granites et des amphibolites. Bien que ne constituant aucun relief majeur, ces deux formations se retrouvent sur le site parfois affleurant sous forme d'amas rocheux plus ou moins disloqués avec pour chacune d'elles une zone de présence assez marquée : Amphibolites au nord du site et granite au sud. Elles sont en outre injectées de filons de quartz qui se signalent par des épandages localisés de graviers anguleux au milieu desquels apparaissent (à peine dissimulé par le sable) des dalles ou gros blocs toujours bien en place.

Enfin, on n'observe pas à cette échelle de la carte, la présence d'un accident géologique majeur (fractures, failles, chevauchements) qui pourraient présager de l'existence à proximité d'autres plus petits.

Du point de vue hydrologique, notre site d'étude est inclue dans le grand bassin qui alimente l'actuel barrage de Yakouta situé à 5 km plus au nord (barrage qui n'existait pas encore au moment des mesures). Il est typique de la morphologie de tout le paysage environnant, avec de longs versants aux pentes quasi nulles (1‰) sur lesquels s'alternent des étendues de placages sableux (sous forme de micro-plateaux, butes ou simples épandages sableux) plus ou moins importants et des zones nues constituées de surfaces de croûtes argileuses compactes. Les affleurements rocheux quand ils existent, ne marquent pas réellement la topographie. Au même titre que les anciennes formations de cuirasses, ils se signalent en général par des épandages gravillonnaires dans le paysage. Le réseau hydrographique est ici assez diffus et débouche parfois sur des petites zones d'inondation temporaires. Les ravines bien marquées partent seulement des bas de versant vers des zones de bas-fond qui sont souvent assez éloignées des hauts de versants (3 à 5 km).

3.1.1.3. La végétation et les sols

La végétation est une steppe arbustive plus ou moins dégradée (Ganaba et Ginko, 1995) composée d'arbustes isolés dominé par des espèces à épineux comme *Acacia Radiana, Balanitès Aegiptiaca* et d'une strate herbacée saisonnière courte et discontinue. L'état général de la végétation sur les versants contraste avec celui des bas-fonds au niveau desquels se développent des forêts galeries constitués d'arbres et d'arbustes en densité parfois forte. En dehors des bas-fonds, l'essentiel de la végétation se retrouvent sur les placages sableux qui constituent des zones de rétention d'eau en saison de pluies. Cette végétation dont le cycle est adapté à la courte saison de pluie, reverdit dès les premières pluies en juin (métamorphosant complètement le paysage) pour s'assécher juste après l'arrêt des dernières pluies en début octobre.

Les sols rencontrés ici sont du type ferrugineux tropical peu lessivé sur sables éoliens ou des solonetz sur matériau argilo-sableux issu de granites (*Cf. Figure 29*) avec des états de surface variés mais marquées par deux phénomènes :

- L'encroutement provoqué par la forte battance des pluies sur les surfaces nues (sableuses ou argileuses) ;
- L'ameublissement causé par le piétinement du bétail (important dans la zone) et l'action du vent (arrachement ou nouveau dépôt de sables).

Un autre trait majeur des sols est l'importance des couches argileuses dans leur profil. Quelques observations faites à partir des puits, berges de ravines et forages réalisés dans le cadre de cette thèse, révèlent en effet de grandes épaisseurs d'horizons argileux pouvant aller jusqu'à 40 m, ce qui témoigne de la faible capacité de drainage des couvertures d'altération dans la zone.

3.1.1.4. Les aspects humains

A l'instar de toute la zone de Dori, les villages à proximité du site d'étude sont peuplés par des peulhs plus ou moins sédentarisés. Ceux-ci pratiquent principalement l'élevage extensif de gros et petits ruminants (bœufs, moutons et chèvres) et possèdent souvent des cheptels pouvant compter des centaines de têtes. L'agriculture est également présente et porte surtout sur la culture du mil. Elle est pratiquée sur les sols de sables consolidés (grands cordons dunaires, placages sableux) à l'aide d'outils de labour traditionnelles appelé "Hilaire" (soc porté sur un long manche) ou de charrues à traction bovine ou asine. Ces deux activités qui constituent la base de subsistance des populations sont celles également à l'origine de la dégradation (anthropique) de l'environnement locale à cause notamment du surpâturage et des techniques agricoles peu adaptées au type de sol en présence. Aussi, en raison des exigences des études menées au niveau de la station, la pratique de ces activités a été interdite sur l'espace du site de recherche. Cependant, on peut observer que si cette interdiction est strictement respectée pour les pratiques culturales, elle ne l'est pas en revanche pour l'élevage car il n'est pas rare de croiser des troupeaux sur le site.

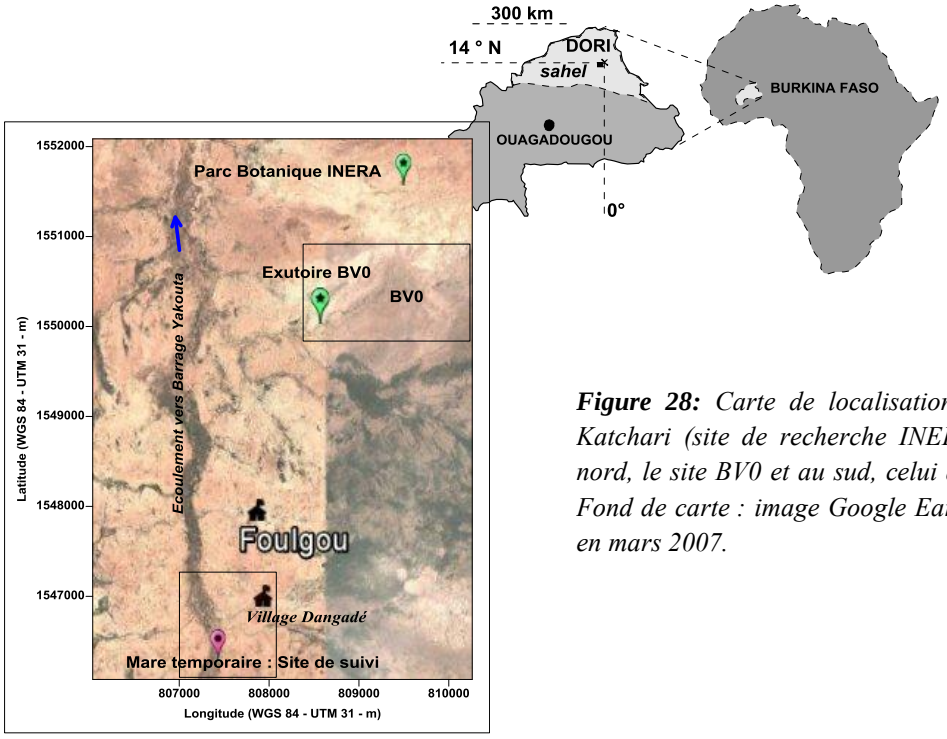


Figure 28: *Carte de localisation du site de Katchari (site de recherche INERA) avec au nord, le site BV0 et au sud, celui de Dangadé. Fond de carte : image Google Earth, situation en mars 2007.*

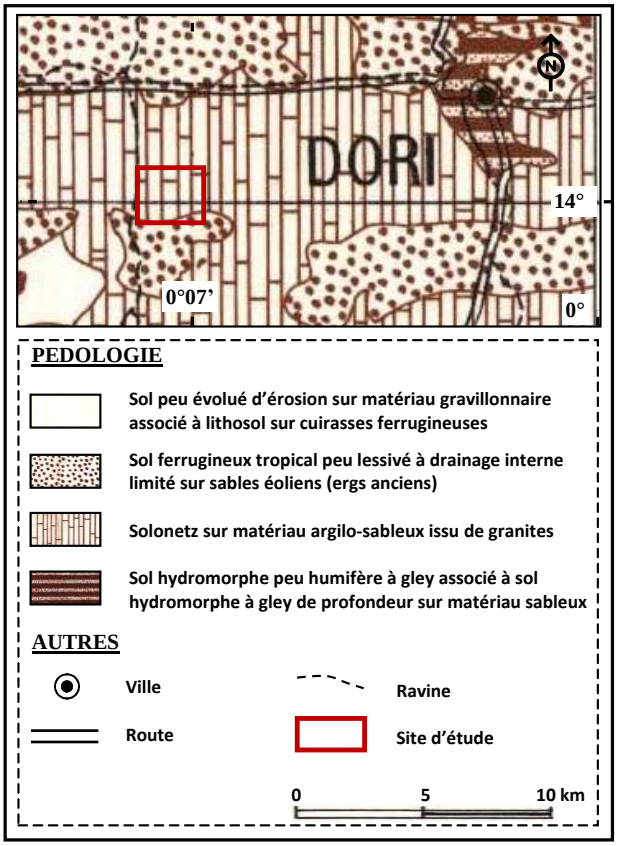


Figure 29: *Carte pédologique de la zone de Dori. Extrait de la carte pédologique de reconnaissance du centre nord de la Haute-Volta au 1/500 000e. ORSTOM, 1975.*

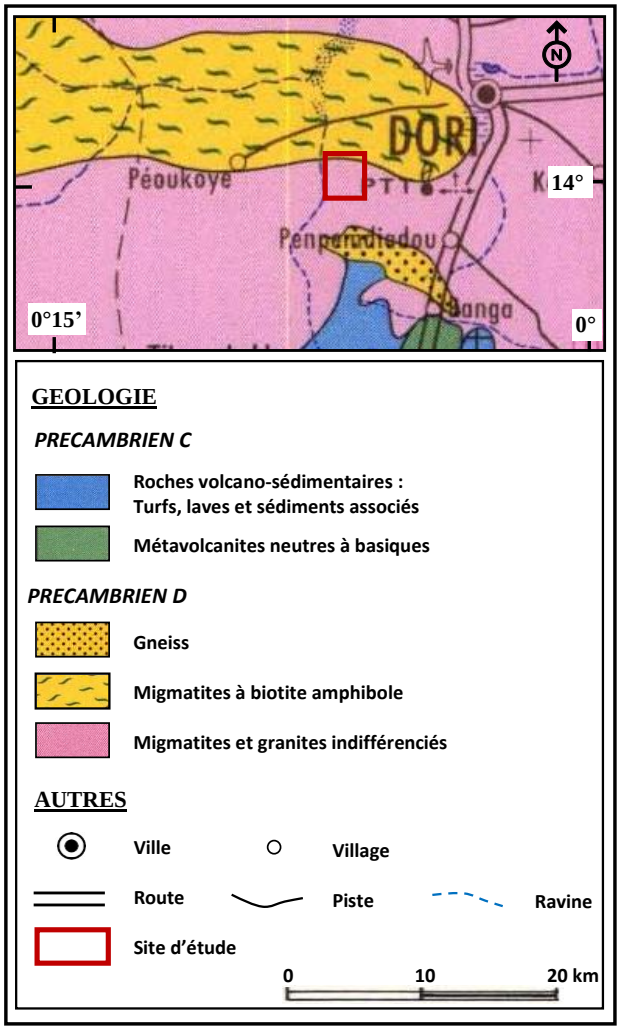


Figure 30 : *Carte géologique de la zone de Dori. Extrait de la carte géologique du Burkina au 1/1 000 000e. Direction de la Géologie et des Mines, 1976.*

3.1.2. Les sites de suivis hydrologiques et géophysiques

Deux sites ont été implantés à l'intérieur de la zone de recherche de l'INERA par les équipes de l'IRD à des dates différentes en fonction de l'évolution des problématiques de recherches :

- Le premier, crée en 1998, est un site dédié à l'étude des versants. C'est le site de Katchari, ainsi nommé à cause de sa proximité avec certaines parcelles expérimentales de l'INERA qui font partie du domaine du village de Katchari ;

- Le site de Dangadé, crée plus tard en 2000, est spécifiquement géophysique. Il est dédié à l'étude des infiltrations à l'aide des techniques géophysiques en contexte de bas-fond. Situé au sud-ouest du précédent, près d'un hameau dont il porte justement

le nom, il est l'extension (qui s'est avérée nécessaire) du premier site et a été étudié entre 2000 et 2003.

3.1.2.1. Le site de haut de versant : Katchari

- *Présentation*

C'est une zone de haut et mi-versant de 1,5 km^2 situé dans la partie nord-est du site INERA (*Cf. Figure 28*). Elle délimite un petit bassin versant nommé BV0, instrumenté pour des études hydrologiques.

Du point de vue géomorphologique, c'est un glacis assez plat, avec une pente générale de 0,6 % orientée nord-est (amont), sud-ouest (aval). Il n'y existe aucun relief majeur et le paysage est monotone (*Cf.* Carte topographique du site, *Figure 32*). On peut noter cependant au nord-est du site, la présence d'un petit affleurement de quartz sous la forme d'une butte circulaire de 3 m de hauteur. Les autres micro reliefs sont constitués des placages sableux (amas de sables épars, difformes et peu étendus - 10 à 500 m^2 - qui s'élèvent du sol entre 0,5 et 1 m) et de ravines au tracé souvent discontinue et seulement bien marqué près de l'exutoire du bassin. A cet endroit, elles présentent des berges verticales et un fond plat tapissé d'une couche de sable meuble.

Les sols du site sont des solonetz sur substratum granitique avec des profondeurs d'altération atteignant 20 m. Ils présentent en surface un horizon limono-argileux compact associant parfois des graviers (nodules ferrugineux et grains de quartz) plus ou moins grossiers. Cet horizon très peu perméable (2 mm/h – Niang, 2006) est recouvert par endroit par les placages sableux de degré de compacité variable mais nettement plus perméables (44 mm/h - Niang, 2006). Cette structuration élémentaire est également à l'origine des états de surfaces rencontrés sur le site:

- Surfaces de sables meubles et croûtes de dessiccation sur les placages sableux avec des variantes notamment sur la présence ou non de couverture végétale (herbacée) de réseau racinaire ou de macro-pores liés à l'activité de la micro faune ;
- Surfaces encroûtées sur les sols à horizon superficiel argileux ou limono-argileux. Deux types se distinguent : les croûtes d'érosion liées à la battance de la pluie et les croûtes de dessiccation issues du dessèchement des surfaces argileuses préalablement imbibées superficiellement. Toutes ces surfaces sur sols argileux sont en général nues et représentent près de 60 % du site.

L'essentiel de la végétation est ici porté par les placages sableux qui sont d'origine éolienne. L'espèce arbustive dominante est *Acacia radiana* que l'on retrouve en pieds isolés sur le site. La

strate herbacée est saisonnière, courte et discontinue. Asséchée, puis broutée et piétinée par les animaux, elle est quasiment inexistante en fin de saison sèche laissant les sols complètement nus (*Cf. Figure 31*).



Figure 31: *Paysage du site de Katchari en saison sèche. La très faible densité des arbustes et la quasi absence de la strate herbacée offrent pendant cette saison une vue dégagée sur plusieurs centaines de mètres.*

- *Dispositif expérimental*

Les équipements installés sur ce site sont avant tout destinés aux mesures hydrologiques effectuées sur le bassin BV0. Aussi, le bassin est doté d'un exutoire équipé d'instruments de mesure de hauteur d'eau (échelles limnimétriques et limnigraphe) et d'une mini station météorologique à enregistrement automatique de données. Le reste des équipements est réparti surtout sur des micros sites destinées à l'étude à toute petite échelle des phénomènes de ruissellement et d'infiltration. On distingue :

- Un micro bassin hydrologique situé au centre nord du bassin (*Figure 32.1*), constitué en réalité de deux bassins emboités nommées BV1 et BV2. D'une superficie d'environ 20 ha, Il est équipé d'un exutoire calibré, d'un pluviomètre, de tubes neutroniques et batteries de tensiomètres à bougie placé sur différents types de surface pédologique ;

- Un site de suivi d'infiltration sous ravine (*Figure 32.2*) sur lequel sont couplées des mesures géophysiques et hydrologiques. Il est équipé de piézomètres, de tubes d'accès neutronique et d'un dispositif fixe de mesure ERT en 64 électrodes ;

- Enfin, un site sur placage sableux (*Figure 32.3*) pour l'estimation du stock annuel d'eau sur recouvrement sableux fixé. Ce site est doté de tubes d'accès neutroniques et possède non loin, un pluviomètre.

Parmi ces équipements, certains ont été utilisés dans le cadre de l'étude géophysique. Il s'agit notamment des tubes d'accès neutroniques dont les mesures étaient nécessaires pour l'interprétation ou la validation des données géophysiques.

Pour les prospections géophysiques spécifiquement réalisées dans le cadre de cette étude (électriques ou électromagnétiques), il n'existait pas de dispositif fixe de mesure. Pour bien orienter les profils de prospection et reprendre au besoin les mesures aux mêmes points, le site à été quadrillé par des jalons fixes géo-référencés (*Cf. Figure 32*).

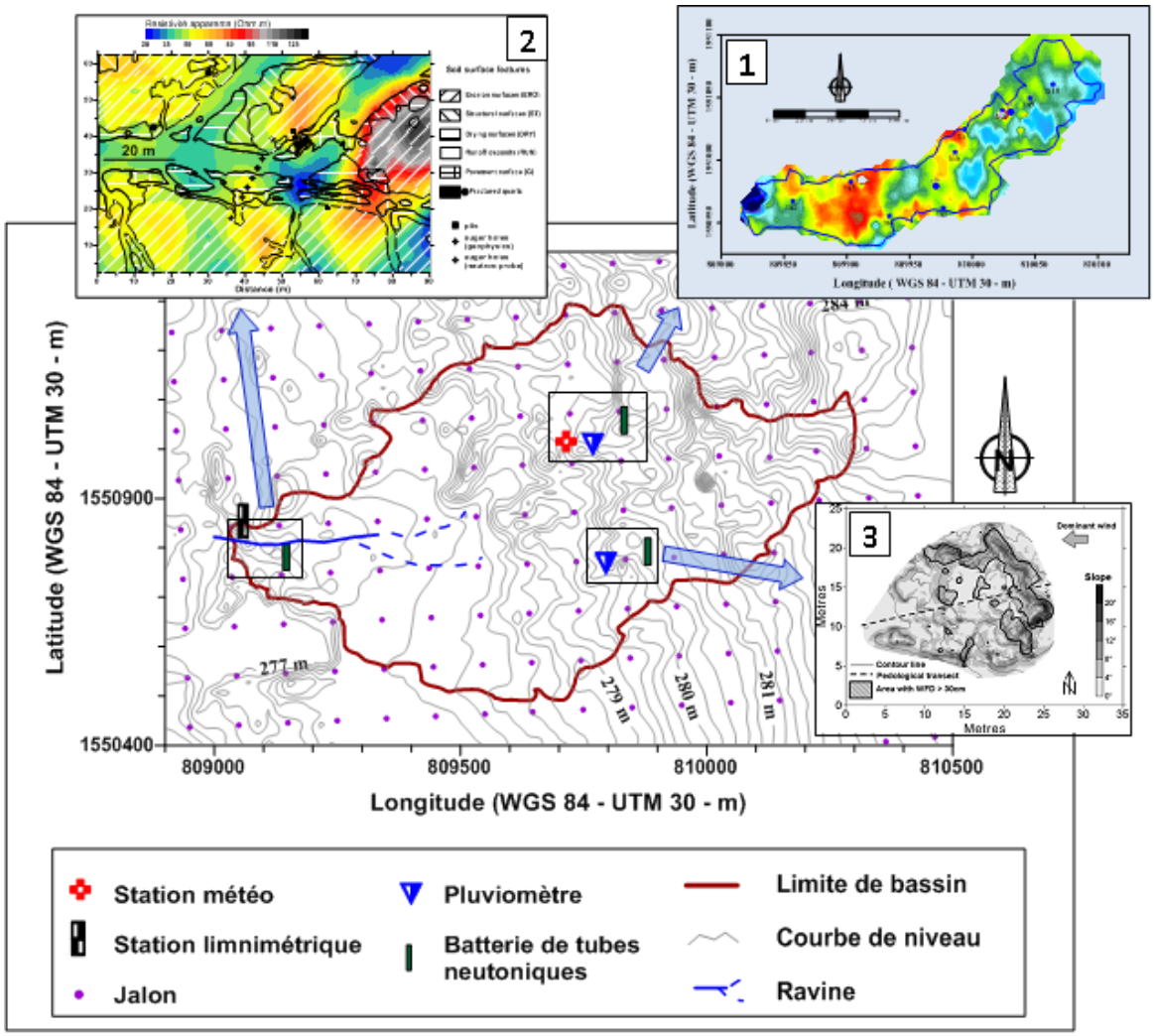


Figure 32: *Carte topographique du site de Katchari avec les limites du bassin versant BV0, la position de quelques équipements de mesures hydrologiques et la localisation des micros sites de suivi hydrologique et géophysique à petite échelle : (2), Descloitres et al, 2003 ; (1), Rajot et al, 2009 ; (3), Ribolzi et al, 2006.*

3.1.2.2. Le site de bas-fond : Dangadé

- *Présentation*

Il est localisé au sud-ouest du précédent et distant de celui-ci d'environ 3 km (*Cf.* Carte de localisation, *Figure 28*). Situé en bas de versant, c'est un bas-fond à l'intérieur duquel a été délimitée une zone de suivi de 1 km^2. Le site est drainé par un réseau de ravines dont la principale coule du sud vers le nord en direction du barrage de Yakouta à 5 km plus loin. Le long de son tracé qui est particulièrement sinueux, la ravine principale donne lieu à des surcreusements dont le remplissage en saison de pluies crée de petites mares parmi lesquelles celle qui a été choisie pour la présente étude (*Cf. Figure 33*).

La mare retenue est situé au sud du site. Elle est large de 25 m et long de 50 avec une profondeur maximal n'excédant pas 3,5 m. Ses berges sont verticales et son fond plat est recouvert d'une couche argileuse peu épaisse. Mare saisonnière, elle sert d'abreuvoir à bétail pendant la saison des pluies et de briqueterie en saison sèche.



Figure 33: *Vue de la mare temporaire du site de Dangadé. A gauche, la mare en saison sèche; A droite, en saison pluvieuse.*

Les versants qui alimentent la ravine sont en pente très faible (0,2%) et sont souvent inondés sur près de 80 m de la ravine lors des crues épisodiques en saison de pluies. Aussi, les sols ici présentent un horizon superficielle limono-argileux à argileux sous forme de dépôt mince (10 à 20 cm) qui recouvrent un horizon sableux beaucoup plus épais (2 à 5 m).

En raison de la plus grande disponibilité en eau dans cette partie du site, la végétation est plus dense et constitué de plusieurs espèces : *Combretum micranthum*, *Balanites aegyptiaca*, *Piliostigma reticulatum* etc. La strate herbacée est dense et continue en saison des pluies mais disparait complètement en saison sèche.

Enfin, il existe sur ce site quelques indices considérés par les hydrogéologues comme indicateurs de la présence probable d'eau souterraine. En effet, on peut y observer des termitières ainsi que quelques arbres dits hygrophiles (*Piliostigma reticulatum, Diospyros mespiliformis*). A 100 m au nord de la mare se trouve également un forage fonctionnel à plein temps et plus loin, un puits à grand diamètre dont le niveau de la nappe remonte fortement en saison de pluies.

- *Dispositif expérimental*

Il est installé au travers de la mare temporaire et est constitué de quatre types d'équipements tous placés le long d'un profil de mesures (*Cf. Figure 30 et 31*, pages 92, 93). Il est constitué de :

- Un dispositif de tomographie de résistivité électrique centré sur la mare. Il comprenant 64 électrodes espacées de 2 m (longueur totale, 126 m), qui traverse la mare d'Est en Ouest. Les électrodes ainsi que les câbles qui les relient restent fixes toute la saison et la partie du dispositif sous la mare est enterrée à 15 cm dans la vase du fond du lit ;

- Deux tubes de diagraphie de résistivité (Log2 et D1) placés sur la berge est et au centre de la mare. Ils sont équipés d'électrodes espacées de 50 cm jusqu'à une profondeur de 9 m, puis de 1 m jusqu'à la profondeur maximale (30 m pour Log1 et 25 pour D1) ;

- Des tubes d'accès neutroniques à de multiples profondeurs servant également de piézomètres (tubes crépinés). Ces tubes sont exclusivement placés sur la moitié est du profil électrique pour des raisons surtout pratiques : facilité d'accès en pleine saison de pluies ;

- Une échelle limnimétrique pour la lecture des variations du niveau de la mare.

Enfin, ce dispositif est complété par des observations et mesures (niveau et conductivité de l'eau) faites sur les forages et puits villageois avoisinants.

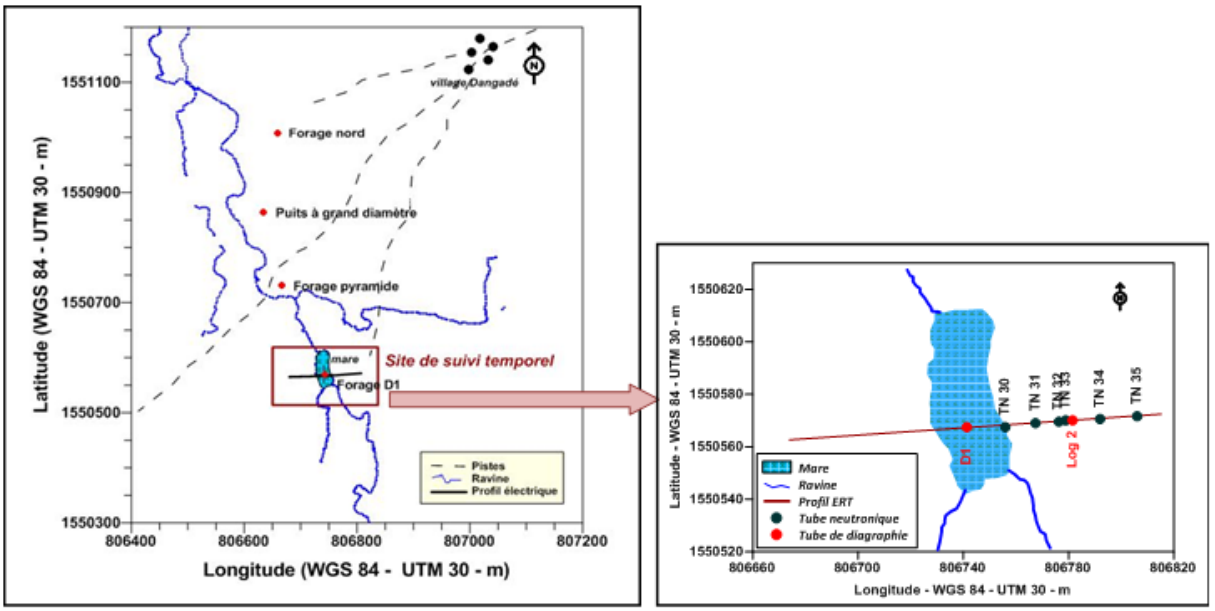


Figure 34: *Localisation du site de suivi temporel dans la zone de prospection du village de Dangadé (à gauche); Zoom sur la mare et le dispositif expérimental installé (à droite).*

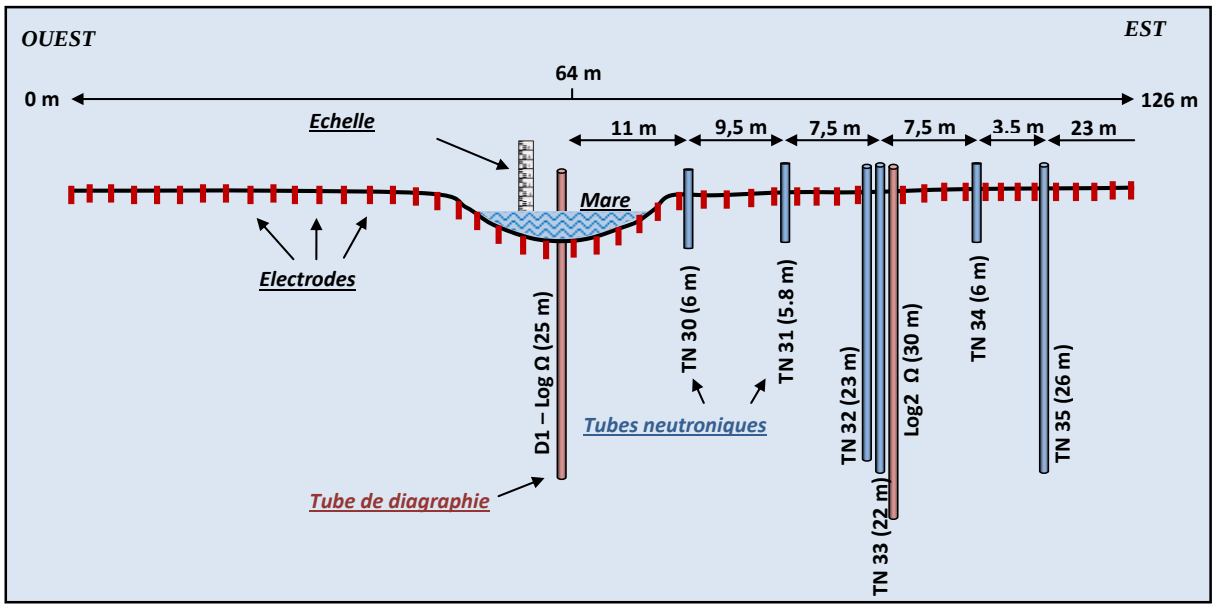


Figure 35: *Présentation en coupe du dispositif expérimental de suivi temporel de la mare de Dangadé.*

3.1.3. Fonctionnement hydrologique du site

A l'instar de toute la zone sahélienne, le site de Katchari est soumis pendant la longue période sèche qui va d'octobre à mai, aux éléments climatiques (fort ensoleillement, vents chauds et sec) qui assèchent complètement les sols. En outre, du fait du cycle naturelle des ligneux qui perdent leurs feuilles en saison sèche et du pâturage qui élimine la strate herbacée, les sols en fin de saison sèche sont dépourvus de toute protection végétale. Les premières pluies au mois de juin tombent alors sur des sols secs et complètement nus.

Ici plus qu'ailleurs, l'essentiel des pluies qui tombent s'évacuent sous forme de ruissellement pouvant représenter plus de 60 % de la pluie enregistrée.

Sur le site du BV0 qui est en haut de versant, le ruissellement apparait très vite après le début de la pluie (5 à 10 mn – *Voir Figure 36*) et se propage sous forme de lame d'eau étendue qui s'écoule sur les pentes faibles des versants avant de se concentrer dans la ravine principale pour donner une crue subite (*Cf. Figure 37*).

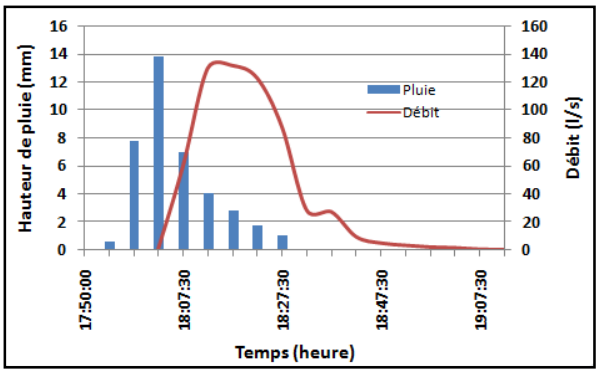


Figure 36: *Exemple de relation pluie-débits caractéristique du site.*



Figure 37: *Crue à l'exutoire du BV0 (juin 2001).*

Le bas de versant par contre (Site de Dangadé) en raison de sa position topographique est le lieu de convergence de toutes les eaux de ruissellement. La faiblesse des pentes ici, ralenti l'écoulement et provoque des inondations événementielles qui remplissent toutes les dépressions topographiques donnant ainsi lieu aux mares qui restent alimentées en eau toute la saison par les pluies successives.

3.1.4. Bilans hydrologiques et questions aux géophysiciens

Faire le bilan hydrologique d'un bassin nécessite la connaissance de tous les termes du bilan. Or parmi eux, l'infiltration fait partie des termes difficilement quantifiables car, même si il est connu qu'elle se produit en zone sahélienne dans les mares et les ravines de bas fond (sans exclure dans certains cas les ravines de versant) il est difficile en revanche d'être très précis sur l'endroit exact où elle se produit. Cela constitue un handicap majeur pour la pose efficace de capteurs permettant de la quantifier.

C'est dans le cadre de cette difficulté à localiser précisément les infiltrations que l'apport des méthodes géophysique a été considéré. Pour les géophysiciens, il s'agit de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la nature et la géométrie du sous-sol ?
- Quelle est la géométrie exacte de l'infiltration sur le site ?
- Quelles sont les zones préférentielles d'infiltration ?
- Peut-on avoir une idée de la dynamique saisonnière au plan horizontal et vertical ?

La réponse à ces questions a nécessité la mise en œuvre de mesures dont nous livrons dans les paragraphes qui suivent, les résultats.

3.2. Résultats des mesures géophysiques

Les résultats sont présentés suivant la chronologie des mesures : site de haut de versant (Katchari – BV0), puis celui de bas de versant (Dangadé). Pour les deux sites, nous présenterons dans un premier temps les résultats des explorations préliminaires qui permettent d'introduire ceux des suivis temporels qui seront présentés dans un second temps.

3.2.1. Résultats du site de Katchari – BV0

3.2.1.1. Résultats de l'exploration

Ils portent sur trois opérations complémentaires : la cartographie de résistivité, la tomographie de résistivité et les forages de reconnaissance.

- *La carte de résistivité apparente*

La *Figure 38* présente les résultats de la cartographie de résistivité électrique du site en son état du 25 mai 2000. Cette carte a été réalisée à l'aide d'un dispositif Wenner Alpha de longueur total égale à 150 m (50 m entre électrodes). Le pas de mesure est de 50 m et les mesures sont réalisées le long de profils orientés nord sud et espacés entre eux de 50 m. Le résistivimètre utilisé était le Syscal R2.

La gamme de résistivité apparente sur la carte est comprise entre 50 et 400 ohm.m et est illustrée par un canevas de couleurs allant des gammes froides (valeurs faibles) à chaudes (valeurs élevées) avec une progression logarithmique. L'observation de cette carte montre:

- Une distribution des résistivités apparentes qui ne révèle pas une structuration spatiale particulière du terrain (organisation compartimentée, orientation des formations géologiques par exemple). Le centre de la zone prospectée, correspondant quasiment à la surface du bassin BV0 est occupée par des résistivités élevées

(supérieures à 150 ohm.m) avec deux zones plus marquées (à plus de 350 ohm.m) au nord-ouest et au sud-est ;

- Des zones conductrices sous forme de petits compartiments plus ou moins isolés à l'extérieur du bassin. On peut distinguer également une bande conductrice sud, nord qui traverse la moitié sud du bassin à l'emplacement du profil P3.

Pour tenter de donner une première interprétation à cette carte, nous lui avons superposé quelques observations faites sur le terrain notamment celles portant les affleurements rocheux. Les taches blanches sur la carte représentent les affleurements de quartz qui, sont les plus nombreux. A première vue, l'emplacement de ces filons de quartz ne semble pas en lien direct avec les valeurs de résistivité présentées. En effet, si la plupart des filons s'observent en zones résistantes, quelques uns sont également observables sur zones conductrices. On peut noter en outre, l'alignement de certains affleurements indiquant sans doute le prolongement des filons, sans que cela ne se traduise concrètement par des variations visibles de résistivités apparentes.

A ce stade donc de l'interprétation, peu de choses peuvent être déduites de cette carte, d'où le recourt à la tomographie de résistivité pour une explication de la réponse du sous-sol qui a été mesurée.

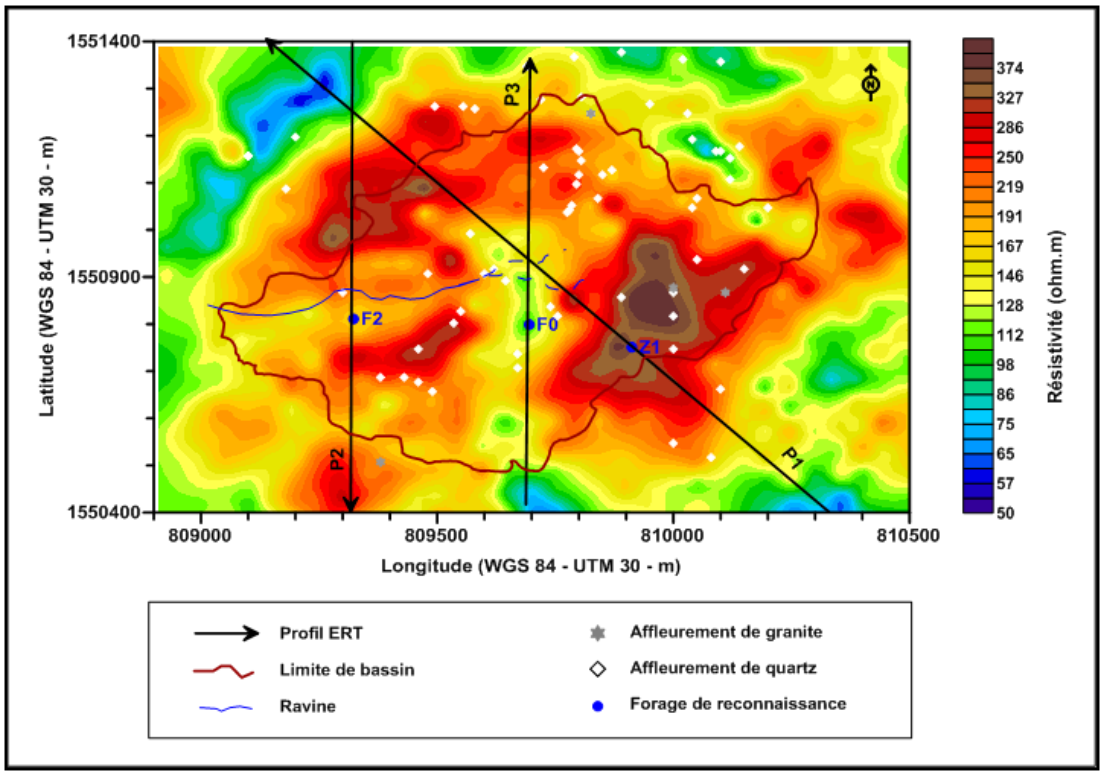


Figure 38: *Carte de résistivité apparente du site de Katchari. Résistivité électrique - Wenner Alpha - AB=150 m.*

- *Les profils 2D de résistivité calculée*

Plusieurs profils de mesures en tomographie de résistivité électrique ont été réalisés sur le site. Trois d'entre eux ont été sélectionnés pour illustrer toutes les situations permettant d'expliquer la carte de résistivité apparente (voir localisations sur la carte en *Figure 38*). Les flèches qui les matérialisent indiquent le sens de réalisation des mesures, chaque profil étant constitué de plusieurs panneaux concaténés.

- Le profil P1 traverse tout le site en diagonal en passant par les zones conductrices et résistantes majeures ;
- Le profil P2 à l'ouest, traverse des zones de résistivité intermédiaire mais recoupe surtout la ravine principale ;
- Le profil P3 traverse dans le sens de la longueur, l'anomalie conductrice au centre du bassin.

Ces profils sont réalisés à l'aide d'un dispositif Wenner en 64 électrodes (nombre maximal d'électrodes supporté par le Syscal R2) espacées de 4 m ce qui permet d'obtenir une profondeur d'investigation supérieure à 30 m. Les mesures ont été réalisées à l'aide de protocoles Wenner Alpha et Beta et les résultats présentés (*Cf. Figure 39*) proviennent de l'inversion combinée sous ***DC2DInvRes*** de ces deux types de données. Pour une certaine cohérence de lecture, les coupes de résistivité des profils sont présentées toutes orientées sud, nord. Sont également superposées à ces images, les positions des forages de reconnaissance dont les détails de profils sont illustrés à travers la *Figure 40*.

La *Figure 39* montre la distribution verticale des résistivités calculées pour les profils P1, P2 et P3. A l'instar de la carte, les résistivités sont représentées par une palette de couleur allant des gammes froides à chaudes avec une progression logarithmique. La profondeur investigation calculée par l'inversion est de 40 m et la gamme de résistivité comprise entre 10 et 3200 ohm.m.

Sur les trois profils, on observe une organisation générale bicouches du sous-sol avec en profondeur des zones de résistivité élevée sous formes de couches ondulées et en surface des couches plus ou moins conductrices. Confrontée aux connaissances que nous avons du sous-sol, cette organisation permet d'envisager une première interprétation des résultats. On peut ainsi assimiler :

- Les zones résistantes profondes (plus de 500 ohm.m) au socle ;
- Les zones conductrices aux altérites.

Les détails d'organisation au niveau de chaque profil montrent des similitudes entre le P1 et le P3 avec :

- Des alternances entre pointements de socles jusqu'au environ de 10 m (profil 1 au niveau de Z1) et altérites conductrices profondes allant au-delà de 40 m (milieu de P1 et P3, puis nord de P1) ;
- Des couches résistantes superficielles au milieu du profil P1 et sur tout le long du profil P3.

Le profil P2 quant à lui, se signale surtout par la régularité de la profondeur de socle situé au environ de 20 m et surmonté par des altérites de résistivité comprise entre 20 et 100 ohm.m.

Ces résultats permettent ainsi de compléter un peu plus l'interprétation de la carte de résistivité d'autant plus qu'avec les gammes de résistivité des couches obtenues, nous avons calculé les profondeurs d'investigation de notre dispositif d'exploration, celui-ci se situant entre 25 et 30 m.

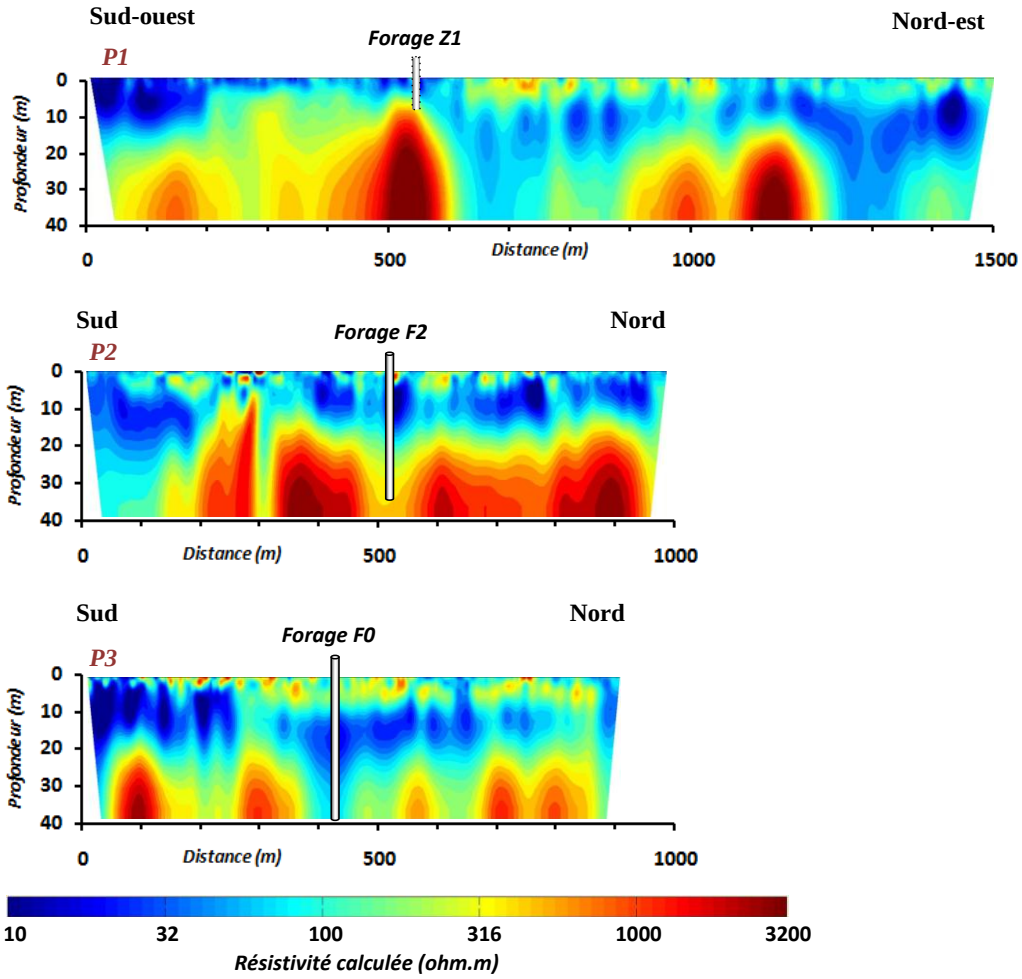


Figure 39: *Sections de résistivités calculées pour les profils P1, P2 et P3.*

Avec cette profondeur investiguée, chaque mesure représente soit la réponse des altérites seules, soit celle des altérites et du socle intégrées. Aussi, la lecture de la carte peut se faire de la façon suivante :

- Les zones de résistivité élevée correspondent à du substratum proche (entre 20 et 10 m de profondeur) recouvert d'altérites peu épaisses et moyennement résistantes ;
- Les zones conductrices correspondent à des altérites épaisses conductrices ;
- Les zones de résistivité intermédiaire correspondent à du substratum peu profond (autour de 20 m) recouvert d'altérites de résistivité variable.

La nature du substratum et des altérites ainsi que les épaisseurs précises des différentes couches sont quant à elles données par les forages de reconnaissance.

- *Résultats des forages*

Trois forages placés sur les profils ERT ont été choisis pour illustrer les différentes anomalies de résistivité rencontrées sur le site. Les profils de forages sont présentés dans la *Figure 40* et confirment bien les résultats ERT.

- Le forage Z1 (profil 1), placé sur une zone pressentie être de substratum proche a révélé des arènes sableuses sèches à partir de 5 m de profondeur et la présence effective de granite sein à partir de 7 m, d'où l'arrêt du forage à 10 m. Le reste des altérites quant à elles se composent de couches plus ou moins argileuses avec en surface la présence d'un horizon gravillonnaire constitué de nodules ferrugineux ;
- Le forage F2 (Profil2) qui est placé dans une zone de conductivité intermédiaire a montré des altérites de nature et composition variées mais intégrant toutes une importante proportion d'argile. Le socle, comme observé sur l'image ERT, se trouve bien à 22 m de profondeur et est constitué de granite ;
- Le forage F0 (profil3) qui est placé dans une zone conductrice sensée représenté une zone d'altérite épaisse, confirme la présence effective d'une couche d'argile blanche très épaisse. Celle-ci atteint 13 m et surmonte un horizon d'arènes granitique tout aussi épais (10 m) avec une bonne proportion d'argile (38%). La présence du socle ici à environ 35 m n'est cependant pas en adéquation avec l'image géophysique qui le situe plus profondément (en dehors de la zone de résolution de l'ERT). Cette différence est expliquée par le fait que l'ERT ne possède pas suffisamment de

résolution pour résoudre précisément, à ces profondeurs de 40 m, le toit du substratum résistant sous les altérites conductrices.

En plus de valider les résultats des profils ERT, ces forages apportent donc des informations nouvelles sur :

- La nature et la profondeur du substratum que l'on sait désormais être dominé par des formations granitiques se trouvant en moyenne à 22 m de profondeur avec des pointements à 7 m. La résistivité de ce substratum est supérieure à 1000 ohm.m et celle des arènes qui le recouvre, comprise entre 300 et 1000 ohm.m ;
- La nature des altérites dominées par des couches argileuses dont certaines peuvent être particulièrement épaisses. La résistivité de ces couches argileuses qui s'étale sur une gamme assez large (10 à 100 ohm.m) rend également compte de la diversité de sa composition granulométrique et sa teneur en eau (caractéristiques appréciées au touché lors des opérations de forage) ;
- La nature des zones superficielles résistantes (300 à 1000 ohm.m) comme celles particulièrement visibles sur le profil ERT P3. Ces résistivités élevées de gamme semblable à celles des arènes granitiques, sont liées à la présence d'horizons latéritiques à concrétions ferrugineuses, remarquables à leur couleur bien ocre.

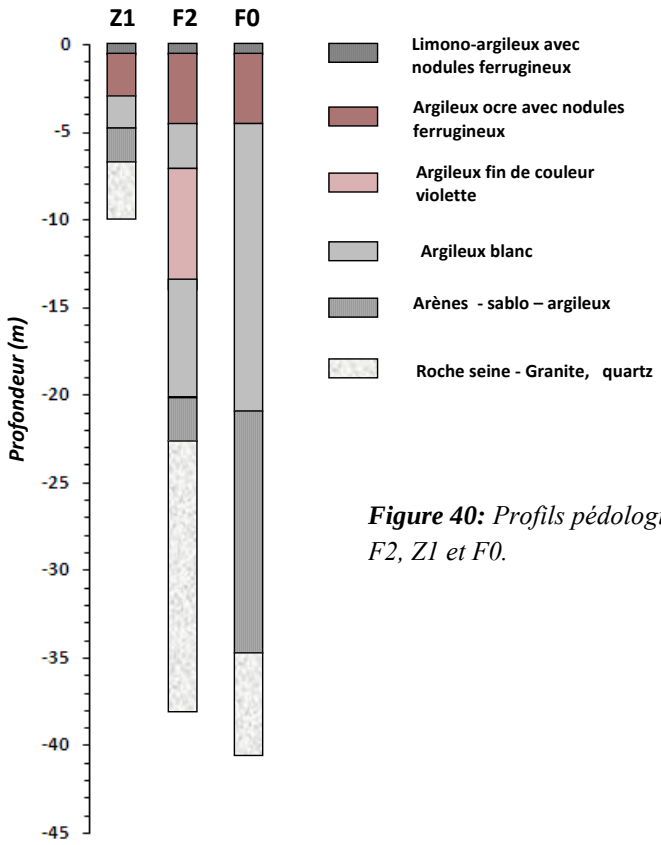


Figure 40: *Profils pédologiques aux points des forages F2, Z1 et F0.*

3.2.1.2. Conclusions sur l'exploration du site

Les résultats obtenus à l'issue de cette phase d''exploration nous permettent de présenter l'organisation et la nature des couches du proche sous-sol.

Le substratum géologique du site est constitué principalement de roches granitiques se trouvant à une profondeur moyenne de 22 m avec des zones de pointement à des profondeurs beaucoup plus faible (moins de 10m). Sur la carte de résistivité, la présence du substratum à ces profondeurs correspond à toutes les parties de résistivité apparente supérieure à 120 ohm.m.

Sur le terrain, on remarque des injections de filons de quartz dans les affleurements de roches granitiques. Cependant, ceux-ci n'apparaissent ni dans les mesures en cartes ni dans celles ERT sans doute à cause de leur petite taille mais également de leur résistivité proche de celle de la roche encaissante. De même, les images ERT signalent la présence de zones d'altération profonde sans que nous ne puissions dire si celle-ci correspondent à de simples ondulations de la surface rocheuse ou à des accidents de terrains (fractures).

Enfin, le substratum est recouvert par des altérites épaisses de nature surtout argileuse. En fonction de la résistivité et de l'épaisseur des ces couches, elles se signalent sur la carte de résistivité apparente par des zones conductrices. Au regard de leur extension, nous pensons qu'elles constituent un écran à l'infiltration profonde sur la quasi-totalité du site. Aussi, l'étude de l'infiltration ici, devrait se concentrer sur les couches superficielles.

3.2.1.3. Les résultats time-lapse

Les mesures de suivi temporel de résistivité apparente en carte du site de Katchari ont été réalisées à l'aide de la méthode électromagnétique en utilisant un conductivimètre EM 34 de GEONICS.

Les mesures sont toutes réalisées selon un maillage de 50 x 50 m avec l'appareil orienté dans le sens des profils qui sont nord, sud. La configuration utilisée est le dipôle horizontal avec 40 m d'écartement entre bobines. Dans cette configuration, les profondeurs d'investigation atteintes varient entre 20 et 25 m en fonction de la résistivité des terrains mesurés et permettent ainsi de prendre en compte dans la plupart des cas, une portion représentative des altérites (*Cf. Figure 41*).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les résultats de l'opération de suivi temporel illustrés en trois cartes : l'état initial mesuré en début de saison des pluies en mai, l'état final

correspondant aux mesures de fin de saison en début octobre et enfin, les rapports de résistivité apparentes entre ces deux états.

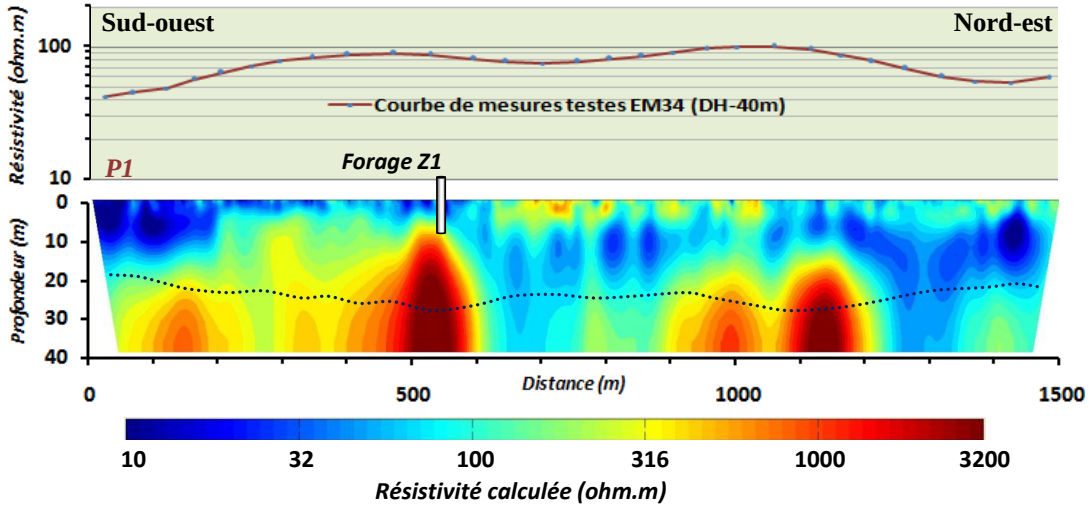


Figure 41: *Profondeurs d'investigation calculées (ligne en pointillés sur l'image ERT) à partir de mesures EM testes sur le profil ERT P1. Ces mesures confortent le choix de la configuration de l'EM 34 (DH – 40 m) qui permet avec une investigation sur 22 à 25 m de profondeur de bien échantillonner la réponse des couches d'altérites.*

- *Etat initial*

La *Figure 42A* présente l'état des résistivités apparentes électromagnétiques du site au 25 mai 2000. Les résistivités apparentes vont de 40 à 110 ohm.m et leur organisation rappelle celle de la carte de prospection électrique. La partie centrale de la carte est occupée par les résistivités apparentes les plus élevés. Dans les marges de la zone prospectée, se retrouvent les résistivités apparentes faibles avec quasiment les mêmes extensions spatiales que sur la carte électrique.

A partir de cette carte qui caractérise l'état des altérites à une période ou elles sont les plus sèches possible, nous avons réalisé une autre carte d'état final en octobre, pour observer si des changements sont survenus au cours de la saison des pluies dans la tranche d'investigation de l'appareillage qui correspond aux premiers 20 m du sous-sol.

- *Etat final et dynamique saisonnière*

La carte de l'état final représentée par la *Figure 42B* correspond à l'état des résistivités apparentes mesurées à la date du 05 Octobre. A première vue, cette carte est très semblable à celle du mois de mai, mises à part quelques petites différences observables au centre (dans le compartiment résistant) et au sud-est de la carte (zone conductrice).

Pour faire apparaitre la dynamique saisonnière, nous présentons à travers la *Figure 43*, la carte des rapports de résistivité apparente entre la fin de la saison des pluies ($\boldsymbol{\rho_{final}}$) et le début de celle-ci ($\boldsymbol{\rho_{initial}}$). Cette carte affiche la dynamique de résistivité apparente sous forme de ratios ($\boldsymbol{R}$) en pourcentage de hausses ou baisses par rapport à l'état initial selon la formule :

$$\boldsymbol{R}_{(\%)} = \left(\frac{\boldsymbol{\rho_{final}} - \boldsymbol{\rho_{initial}}}{\boldsymbol{\rho_{initial}}}\right) \cdot \mathbf{100} \quad \textit{Eq 19}$$

Les zones en couleurs chaudes indiquent les augmentations de résistivité apparentes et celles en couleurs froides les zones de baisse.

- D'emblée, on remarque que la gamme de variation des ratios est faible, comprise entre -4,5 et 3 % ;
- Une partie de la carte est laissée vierge (en blanc). Elle correspond aux valeurs pouvant être assimilées à l'erreur de mesure instrumentale ou à celle d'appréciation de l'opérateur (0 à plus ou moins 2 % au regard des valeurs mesurées) ;
- Les zones de diminution de résistivité sont quasiment les seules représentées (une toute petite zone de hausse apparait à peine au nord-est de la carte). Elles sont pour les plus "significatives" (baisse de plus de 3%) localisées hors bassin et leurs formes n'épousent pas celles des anomalies de résistivité apparente préalablement observées sur la carte de reconnaissance électrique.
- Enfin, la dynamique saisonnière des résistivités apparentes, comme le montre le fond de carte topographique, semble sans rapport avec la présence des affleurements rocheux, des ravines ou autre élément topographique.

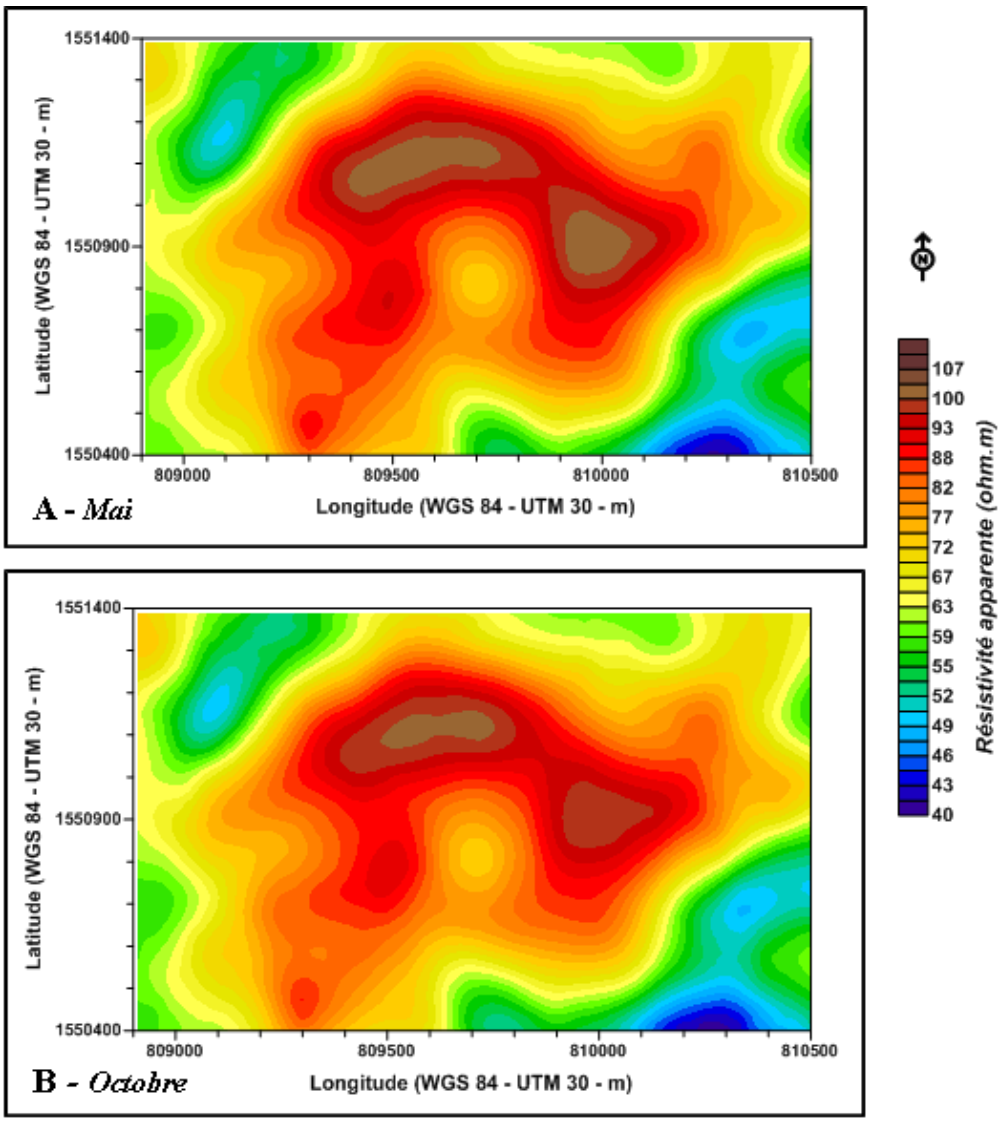


Figure 42: *Dynamique de résistivité apparente sur le site de Katchari - BV0, avec à en haut, la situation au mois de mai et en bas, la situation au mois d'octobre.*

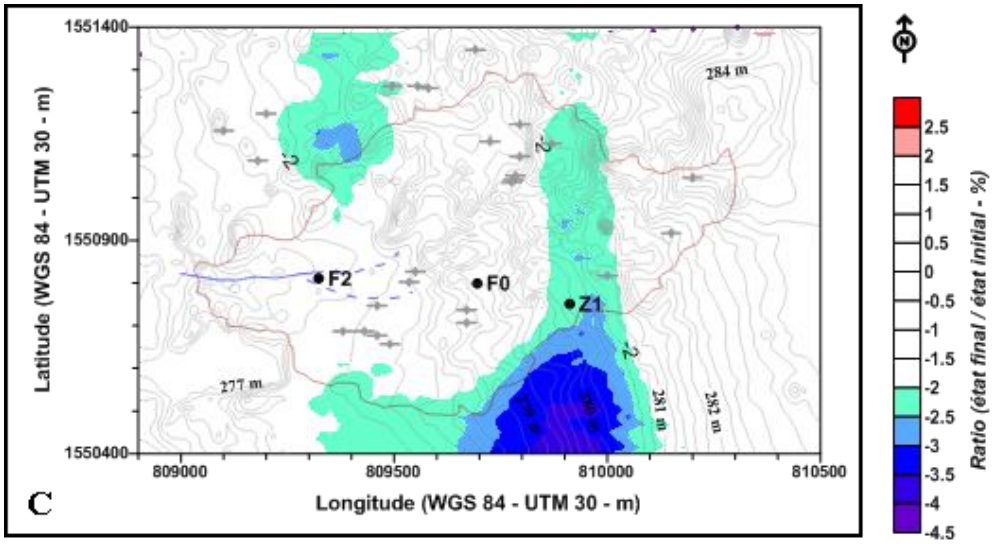


Figure 43: *Dynamique saisonnière de résistivité apparente (exprimée en pourcentage de variation par rapport à l'état du mois de mai) sur le site de Katchari – BV0. En fond de carte, les courbes de niveau topographique, la position des forages de reconnaissance (F2, F0, Z1) et des affleurements rocheux (symboles en gris).*

- *Discussion sur la dynamique saisonnière*

Expliquer les résultats affichés sur la carte nécessite de revenir sur certains aspects importants de ceux-ci. On peut en effet remarquer que :

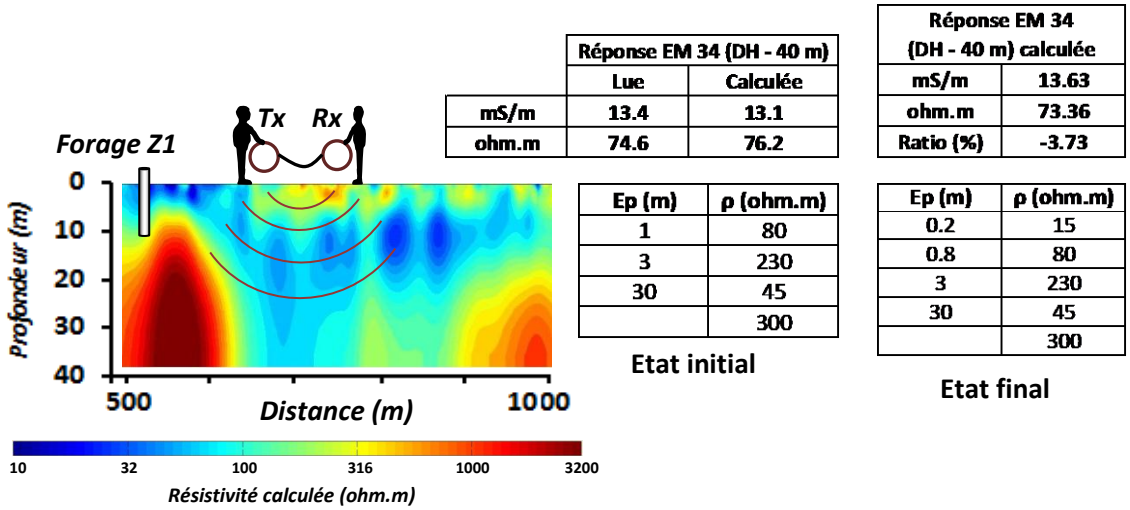
- Les ratios de résistivité observés sont très faibles. Ils sont de plus ou moins 4 % maximum et portent sur des valeurs de résistivités apparentes initiales comprises entre 70 et 110 ohm.m, ce qui signifie des augmentations ou baisses enregistrées de l'ordre de 2 à 5 ohm.m maximum dans l'absolu. Pour la gamme concernée, ce sont donc des variations peu importantes. De plus, en considérant cette dynamique comme résultant de la réponse cumulée de toutes les couches prospectés (épaisseur de l'ordre de 25 m), la contribution de chacune au regard de son épaisseur et de sa résistivité initiale serait alors plus qu'anecdotique ;

- Les variations portent essentiellement sur des baisses de résistivité apparentes, une tendance qui en dehors de la manifestation d'une propriété chimique d'éléments connus du sous sol tendrait plutôt à indiquer une hausse de la teneur en eau des couches du sol durant la saison ;

- La dynamique observée sur la carte ne correspond cependant pas à l'organisation pédologique observée sur le terrain. En principe, notre site est caractérisé par la présence d'un seul type de sol : solonetz. Celui-ci est recouvert par des dépôts sableux éoliens et hydriques d'étendue et d'épaisseur variables et disséminés partout sur le site. Or la principale zone active (qui est hors bassin) se trouve justement dans une partie où se rencontrent des épandages de sables, d'argiles et de graviers en mince épaisseur, recouvrant des dalles argileuses compactes. Des mesures de sonde à neutron réalisées au niveau du forage Z1 (*Cf. Figure 45*) qui présente des conditions pédologiques similaires, montrent que les fronts d'infiltration ne dépassent jamais l'épaisseur du recouvrement qui est de l'ordre de 20 cm (la partie argileuse étant quasi imperméable). De ce fait, s'il existait des variations de résistivité sur ces types de surfaces, elles ne pourraient pas correspondre à des infiltrations profondes depuis la surface.

A partir de ces constats, deux pistes s'offrent à nous pour tenter d'expliquer la présence de la zone dynamique observée, en retenant l'hypothèse de l'augmentation de la saturation comme cause de baisse de résistivité apparente.

La première possibilité résiderait dans une réponse des épandages argilo-sableux dont l'augmentation de la teneur en eau cours de la saison est un fait qui engendre d'énormes baisses mesurées aux environs de 20 ohm.m à certains endroits. Cependant, s'il est vrai que le niveau de humidité de ces couches peuvent être très élevé, il n'est en réalité que très superficielle puisque l'épaisseur des dépôts argilo-sableux dans la zone concernée dépasse rarement 20 cm. Pour trancher définitivement sur l'influence de ces humectations superficielles sur la réponse instrumentale, nous avons conduit quelques modélisations qui simulent des variations importantes des dépôts superficiels, en utilisant les valeurs de résistivités tirées du profil P1 à la distance 700 m.



	Réponse EM 34 (DH - 40 m)	
	Lue	Calculée
mS/m	13.4	13.1
ohm.m	74.6	76.2

Ep (m)	ρ (ohm.m)
1	80
3	230
30	45
	300

Etat initial

Réponse EM 34 (DH - 40 m) calculée	
mS/m	13.63
ohm.m	73.36
Ratio (%)	-3.73

Ep (m)	ρ (ohm.m)
0.2	15
0.8	80
3	230
30	45
	300

Etat final

***Figure 44**: Modélisation de l'effet des couches superficielles conductrices sur la réponse EM 34 de l'ensemble des couches du sous-sol.*

La *Figure 44* présente l'extrait de la zone à modéliser accompagné de deux blocs modèles à partir desquels ont été calculées des réponses EM 34.

- Le premier bloc modèle représente l'état initial du sous-sol tel qu'illustré également sur l'image ERT. Pour des raisons de contraintes liés au calcul de la réponse EM 34, nous avons rajouté une couche profonde de résistivité égale à celle des arènes granitique afin de limité volontairement l'épaisseur de la couche argileuse (pour qu'elle ne paraisse pas infini dans le modèle de calcul). Ce modèle initial reproduit assez bien la configuration du terrain puisque la réponse EM 34 calculée se rapproche bien de celle lue sur site ;

- Le second bloc modèle correspond à une simulation de l'état final du terrain. Il est une reprise du premier, avec la différence que nous avons fait passer les 20 premiers

centimètres de la couche superficielle, d'une résistivité de 80 à 15 ohm.m. La réponse calculée pour cette simulation donne un ratio par rapport à l'état initial de -3.7 %.

Les résultats de cette simulation montrent donc qu'une forte chute de résistivité (telle que constatée au cours de la saison des pluies sur les dépôts argilo-sableux) sur de très faibles épaisseurs (20 cm), sont suffisantes pour générer les écarts observés sur notre carte de dynamique saisonnière.

Aussi, l'explication la plus plausible à la baisse de résistivité apparente mis en évidence par le suivi temporel en carte, serait l'effet des variations de saturation des couches superficielles argileuses sur les mesures EM. Quelques observations de terrain confortent cette conclusion parce que le bassin à mi versant se recouvre pendant la saison des pluies de fines couches argilo-sableuses déposées par les écoulements laminaires.

3.2.1.4. Conclusion sur les mesures du site de Katchari-BV0

La conclusion que l'on peut tirer après les mesures de suivi temporel en carte sur ce site, est que les versants à l'exception des premiers décimètres dans certaines zones, sont massivement non infiltrants. Cette déduction que confortent les résultats du suivi neutronique de nos forages de reconnaissance (F0, et Z1 – *Cf. Figure 45*), est également corroborée par les conclusions des études antérieures entreprises par l'équipe d'hydrologues qui travaillaient sur le même site. En effet :

- Les mesures de sonde à neutron réalisées par les l'équipes d'hydrologues sur les micros sites 2 et 3 avaient déjà établi le caractère imperméable des versants. L'infiltration quand elle existait, ne concernait que les recouvrements sableux ou argilo-sableux (placages sableux et dépôts limono-sableux superficiels), dont le rôle se limite à un stockage superficiel et saisonnier des eaux de pluies (Ribolzi et al, 2006). Ces observations basées sur des mesures ponctuelles de sonde à neutron et de tensiomètres notamment, avaient besoin pour être validées à l'échelle du site, d'être confirmées par un autre type de suivi proposant des valeurs spatialisées. Les résultats du suivi géophysique EM 34 sont donc venus valider l'imperméabilité de tout le site, en y montrant l'absence de dynamique de résistivité apparente au plan spatial qui pourrait être la conséquence d'une éventuelle alimentation en eau du sous-sol depuis la surface ;

- Enfin, les études conduites par Descloitres et al (2003 et 2007) sur le micro site 2 et qui portaient sur le rôle de certaines structures pressenties favorables comme les zones d'affleurement rocheux (quartz notamment) ou la ravine principale du bassin, ont conclu après des suivis géophysiques et des essais d'infiltration sous charge (*Cf. Figure 46*), sur une imperméabilité de ces dites structures.

En définitive, l'ensemble des études entreprises sur le site de Katchari – BV0, ont convergé vers la conclusion unique de la non contribution de cette zone de haut de versant aux infiltrations profondes, une situation qui à l'observation des profils d'altération des sols du site, est liée à la nature argileuse généralisée des altérites.

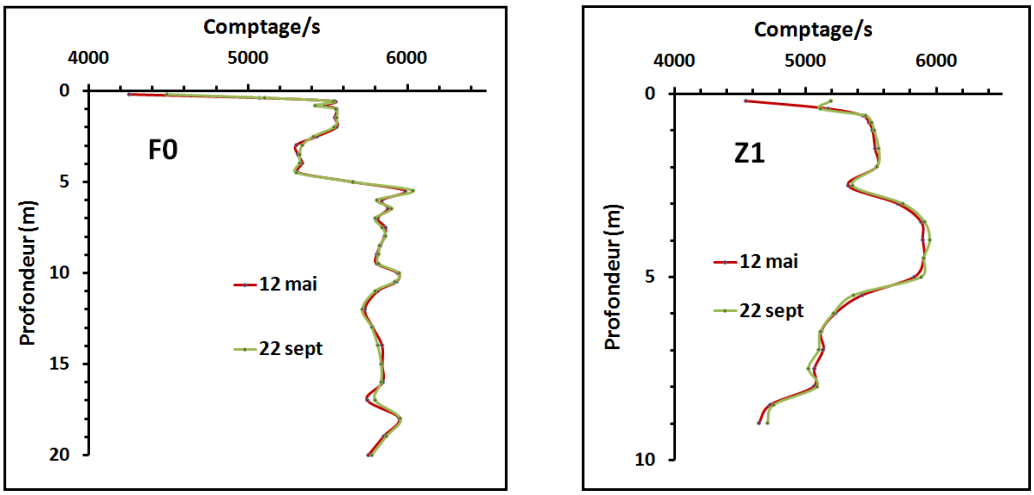


Figure 45: *Suivi des comptages neutroniques dans les forages F0 et Z1. En dehors de la variation de comptage observée sur la première mesure en surface, le reste des valeurs restent inchangées à la fin de la saison des pluies.*



Figure 46: *Tests d'infiltration sous charge sur surface argileuse (photo de gauche) et sur affleurement rocheux (photo de droite). Photos: Descloitres M, 2002.*

3.2.2. Résultats du site de Dangadé

Le suivi de résistivité sur le bas de versant, contrairement à celui en haut de versant qui était généralisé sur l'ensemble du site, est centré sur une zone restreinte équipée d'un dispositif fixe (tel que décrit plus haut en *Figure 35*). C'est un suivi temporel de résistivité en coupe verticale basé sur des mesures périodiques de tomographie de résistivité électrique (ERT) que l'on interprète en les comparant à des données de piézométrie, d'humidité et de conductivité de l'eau du sol. Le but principal de ce suivi est d'arriver à illustrer la dynamique de l'infiltration (si elle se produit) à l'aide de l'imagerie géophysique.

Les résultats que nous présentons portent sur le suivi au cours de la saison 2001. Il a débuté en mai avec la réalisation d'un état initial à sec (t_0), suivi au cours de la saison pluvieuse de mesures à périodicité variables : mensuelles pour les mesures ERT (juin, juillet, août, octobre et décembre), tous les trois jours pour les mesures piézométriques et d'humidité neutronique du sol.

3.2.2.1. Etat initial

- *Résultats au temps t_0*

La *Figure 47A* présente le modèle de résistivité calculée pour le mois de mai, période à laquelle la mare est complètement à sec. C'est le résultat d'une inversion indépendante combinant des données Wenner Alpha et Beta mesurées à l'aide du dispositif ERT installé sur place.

L'image obtenue montre l'organisation du sous-sol sur une profondeur de 25 m avec une gamme de résistivité allant de 25 (couleur bleue claire) à 300 ohm.m (couleur rouge bordeaux). Les lignes que nous avons rajoutées correspondent aux limites entre classes de résistivités de différence significative.

Ce modèle de départ laisse apparaître une organisation quasi-horizontale des résistivités avec, de la surface vers la profondeur :

- Une zone de résistivité comprise entre 80 et 150 Ohm.m sur une épaisseur d'environ 6 m (1) avec quelques parties plus résistantes notamment à l'est (250 ohm.m) et au centre (200 0hm.m).

- Une zone de faible résistivité (40 – 60 Ohm.m) sur 10 mètres d'épaisseur (2) avec des transitions plus résistantes au niveau des limites supérieures et inférieures;

- Une zone de transition plus mince de 3 m, avec des résistivités comprises entre 120 à 200 ohm.m (3).

- En profondeur, on note la présence d'une zone résistante de plus de 250 ohm.m (4).

Enfin, il existerait aussi tout en surface mais très peu visible, des poches de résistivité organisées en zones plus ou moins diffuses et discontinues que nous avons matérialisées par les lignes en tirets.

Au plan numérique, le résultat de l'inversion pour ce modèle du mois de mars, satisfait les critères de qualité : la valeur de l'erreur RMS est de 1.87%. Cependant, nous avons également procédé à une évaluation indépendante de la section de résistivité calculée. La *Figure 47B* présente les courbes de mesures directes de diagraphie dans le tube D1 et celle des valeurs de résistivité calculée extraites de la coupe ERT à la verticale de D1. Les données manquantes dans la courbe de diagraphie sont dues à l'impossibilité d'effectuer les mesures par absence de contact entre le sol et les électrodes, à certaines profondeurs peu humides.

Comparés aux valeurs de résistivités obtenues par diagraphie au centre du dispositif, on constate que celles calculées dans le modèle ne sont pas assez cohérentes sur les premiers mètres de la surface : entre 2 et 7 m. D'une part, on remarque que le modèle simule mal les variations brusques successives de résistivité et d'autre part, qu'une erreur d'environ 1 m (de plus) existe dans l'estimation de la profondeur des couches. Moins qu'une remise en cause de la validité du modèle, c'est un constat qui permet de se rendre compte des limites de résolution du terrain à partir des mesures de surface qui utilisent comme dispositif de mesure unitaire un quadripôle de 6 m (mesures réalisées en Wenner Alpha et Beta avec un dispositif à électrodes distantes de 2 m). Le niveau de détail présenté par notre modèle est donc bien celle attendu et nous concevons qu'il soit en deçà de celui des mesures prises en forages directement au contact des différentes couches.

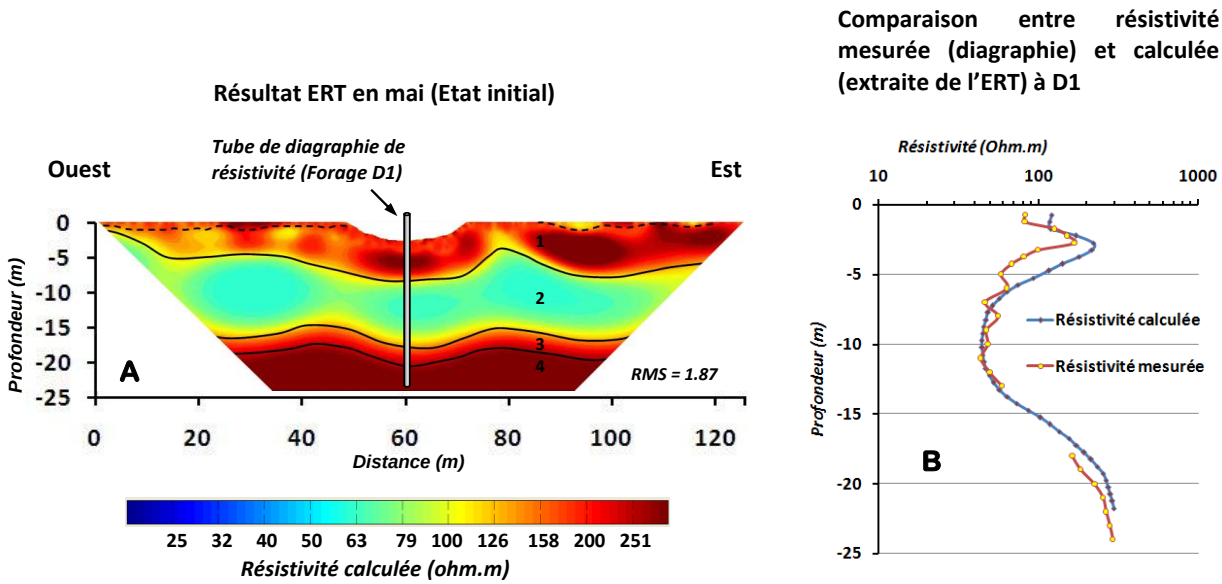


Figure 47: (A), *Modèle de résistivités calculées correspondant à l'état du sous-sol au mois de mai.* ***(B),*** *Comparaison entre courbe de diagraphie de D1 et courbe de résistivité calculée issue du modèle de mai, à la verticale du forage de digraphie D1.*

- *Traduction lithologique du modèle de résistivité*

Pour interpréter l'image géophysique, celle-ci a été confrontée à la description des profils de sol faite lors des forages d'installation des tubes neutroniques ou de diagraphie. De la comparaison entre ces deux types d'investigation, le niveau de précision de l'image géophysique apparait clairement. Elle est nettement en deçà de celui que peut obtenir un observateur décrivant les couches du sol sur la base de la nature des matériaux, de leur couleur ou leur granulométrie.

La *Figure 48* illustre l'interprétation faite de l'image géophysique à partir des données de forage prises au niveau du tube neutronique 31 (foré à la tarière) et du tube de diagraphie D1 (foré à l'aide d'une petite foreuse pneumatique). A l'observation de ces deux profils on constate que :

- Le profil du tube neutronique 31 qui est creusé dans les premiers mètres du sol, montre une fine couche argileuse, suivie de couches sableuses de granulométrie, couleur et degré d'humidité variés. Cet ensemble d'horizons est illustré par l'image géophysique comme une unique couche d'environ 150 ohm.m ;

- La couche géophysique 2 très conductrice, correspond elle aussi en réalité une multitude d'horizons argileux, chacune avec son épaisseur et sa granulométrie propre ;

- Seules les deux dernières tranches de résistivité en profondeur représentent chacune un horizon homogène unique : arènes granitiques puis, granite fracturé.

L'interprétation des résultats de la tomographie de résistivité sur ce site permet ainsi de décrire le sous-sol comme une succession de quatre terrains composée de haut en bas : d'une couche sableuse résistante (150 ohm.m), d'une couche argileuse conductrice (50 ohm.m), des arènes sableuses résistantes (200 ohm.m) et enfin un substratum résistant (plus de 250 ohm.m).

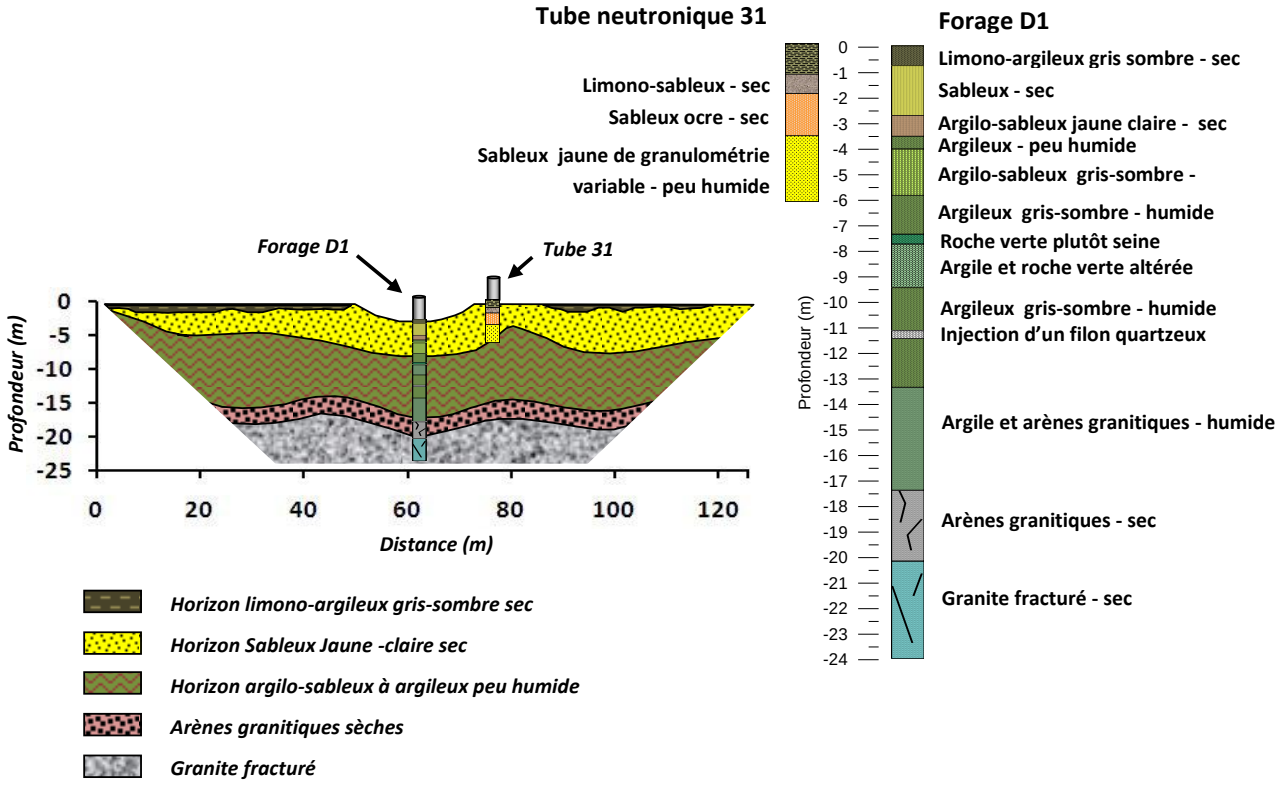


Figure 48: *Traduction lithologique de l'image ERT à partir des profils des forages TN31 et D1.*

Ces résultats montrent que la résistivité ne présente pas de façon très détaillée les couches du terrain. Ceci est particulièrement vrai d'autant plus que l'on n'aperçoit pas la présence des couches minces. A travers les classes de résistivité, on accède par contre aux grands ensembles lithologiques : sables, argiles, substratum rocheux.

Enfin, au niveau de la morphologie du site, l'image ERT permet de confirmer que la mare est bien une simple entaille créée par l'érosion dans les couches sableuses et argileuses superficielles.

3.2.2.2. Suivi temporel

Le suivi de la dynamique saisonnière de la résistivité s'est étendu du mois de mai (t_0) au mois d'octobre.

La *Figure 49* présente à gauche, les sections de résistivité calculée par inversion « time-lapse » pour les mesures mensuelles (images de gauche) avec une échelle de résistivité qui est la même

que celle du modèle t_0 (mai). Les sections de droite, illustrent chacune les rapports de résistivité par rapport au mois de mai pour la période de suivi correspondante. Les rapports sont donnés en ratios (ρ_{final} / $\rho_{initial}$) traduits en gamme de couleurs distribuées autour de la valeur 1 qui représente l'absence de variation. Les couleurs chaudes traduisent les hausses de résistivité, celles froides les baisses. Les parties en vert clair correspondent aux zones invariantes (ou considérées comme telles à cause de la variation très faible). Sur certaines sections, les variations majeures ont été annotées en utilisant des équivalents en pourcentages (calculés à partir de *l'Equation 20*) pour faciliter les comparaisons avec l'état initial t_0.

L'analyse de la *Figure 49* montre des variations saisonnières de résistivité au niveau de ce site qui se manifestent de la façon suivante :

- En juin (début de la saison pluvieuse), le remplissage de la mare occasionne les premières variations de résistivité. Celles-ci portent essentiellement sur la zone de contact entre l'eau et la cuvette de la mare qui forme un lobe d'épaisseur décimétrique (50 cm à 1 m). Dans cette zone, on note une diminution de résistivité qui passe de 80 à 55 ohm.m en moyenne, soit une baisse d'environ 32 % ;

- En juillet, la baisse de résistivité sous la mare se confirme avec la formation d'un lobe à l'épaisseur métrique représenté par des valeurs en baisse de 43 % en moyenne de la valeur initiale. La baisse s'étend également aux versants sur lesquels on voit apparaitre de petites zones superficielles minces (0,5 à 1 m, notre modèle ne peut pas être plus précis) et discontinues devenues plus conductrices (baisse de l'ordre de 30%) ;

- En août, la baisse de résistivité enregistrée sous la mare se maintient à 43 %. Les zones conductrices superficielles isolées apparues en juillet sont désormais connectées, formant une bande mince continue sur les versants. Cependant, le fait marquant à cette période de l'année est l'apparition en profondeur au niveau de la berge est, d'une grande zone de baisse de résistivité se présentant sous la forme d'un panache oblique qui part de la berge de la mare vers les couches inférieures pour atteindre une profondeur d'environ 8 m. Les résistivités dans ce panache baissent en proportion de 30 à 50% des valeurs initiales se rapprochant ainsi de la dynamique observée au fond de la mare. Enfin, on peut observer au niveau des couches les plus profondes (entre 18 et 25 m), un léger accroissement de la résistivité d'environ 15%. Cette valeur qui frôle cependant la limite de l'erreur de calcul de notre modèle ne peut à ce stade être directement validée ;

- Le suivi du mois d'octobre qui marque le début de la saison sèche, montre un net retrait du panache de basses résistivités observées en août. Cette régression de la zone conductrice s'accompagne par ailleurs de hausses locales de résistivités en surface le long des versants. L'état en ce mois d'octobre semble indiquer une dynamique tendant à un retour progressif vers l'état initial du mois de mai.

Au final, on peut se rendre compte que la dynamique saisonnière au niveau de ce site est surtout marquée par une baisse des résistivités en surface qui se concentrent notamment sur les berges et le fond de la mare qui sont les parties en contact direct et permanent avec l'eau. Elle débute en juin avec la saison des pluies qui occasionne le remplissage de la mare, pour se stabiliser tout de suite en juillet et se maintenir ainsi jusqu'en début de saison sèche en octobre.

La dynamique majeure se traduit sous forme d'intrusion progressive d'une zone de basse résistivité qui prend sa source depuis l'une des berges de la mare pour gagner latéralement les couches plus profondes. En dehors de cette manifestation majeure, il n'existe aucune dynamique verticale à partir de la surface qui soit profonde et ce, qu'il s'agisse du fond de la mare ou des versants.

Enfin, il existe de faibles augmentations de résistivité au niveau des couches profondes mais la qualité des inversions, surtout pour les profondeurs concernées, ne permet pas de les confirmer d'emblée sur la base des critères géophysiques uniquement.

Au plan lithologique, les variations de résistivité révélées par les images ERT affectent surtout des couches sableuses superficielles ou profondes (arènes granitiques). Sur le site, on peut également observer que l'extension des zones superficielles de baisse de résistivité au niveau des berges correspondant à celle des surfaces temporairement inondées lors des crues. Ces premières observations font ressortir deux conditions favorables (possibilité d'une infiltration sous charge sur matériaux sableux épais) qui tendraient à expliquer la baisse de résistivité par une augmentation de la saturation des couches en eau, surtout que les autres parties de la mare qui sont également affectées sont celles en contact direct avec l'eau stagnante.

En retenant l'hypothèse d'une hausse de la saturation, il s'agit de montrer que la dynamique de résistivité observée peut être mise en relation avec celle de la saturation en eau. Nous proposons pour cette analyse, une confrontation avec les mesures d'humidité neutroniques et de variations piézométriques au cours de la saison.

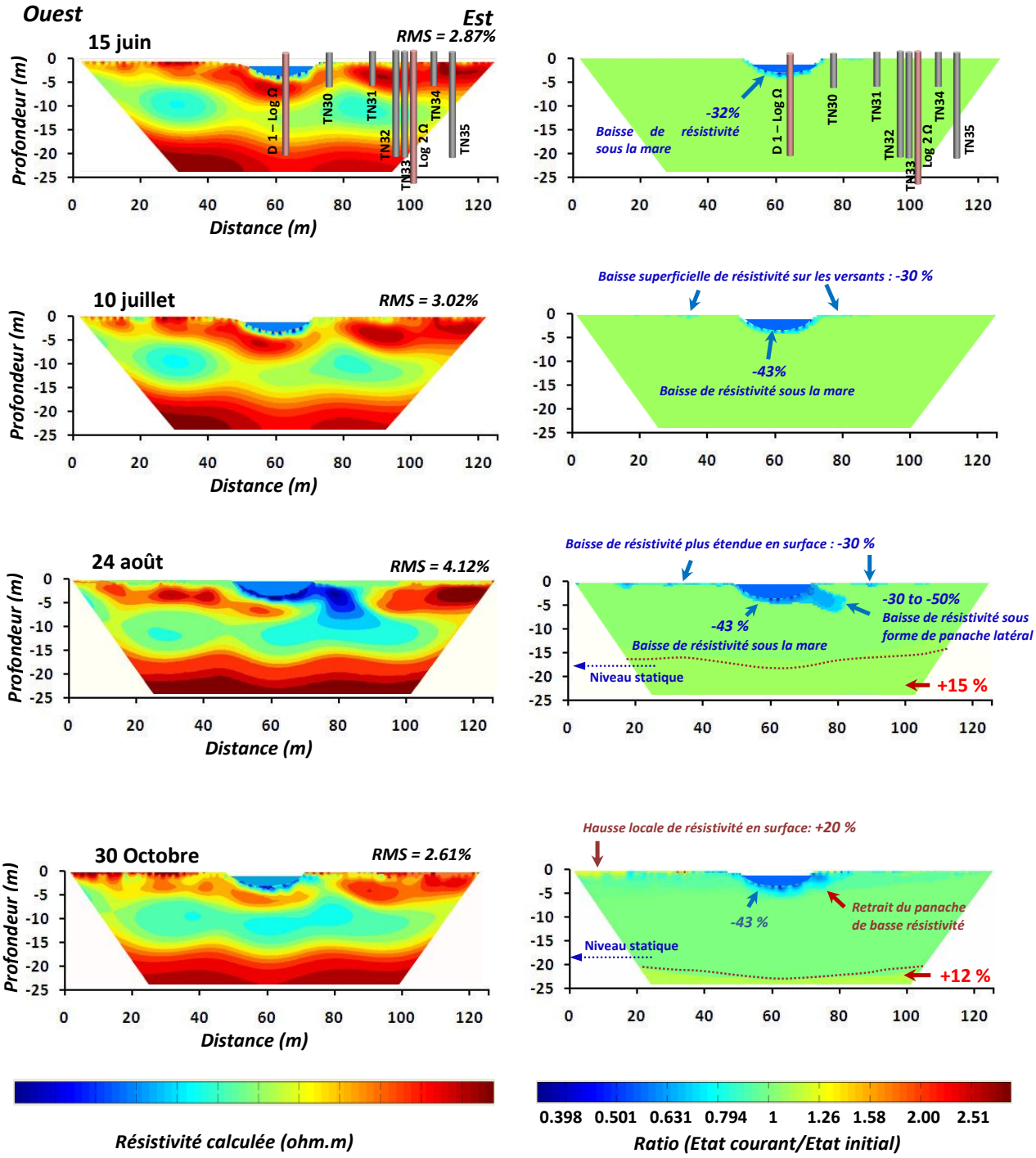


Figure 49: *Résultat du suivi temporel de résistivité dans la mare de Dangadé. A gauche, les modèles de résistivité calculée pour chaque mois (avec comme modèle de référence celui du mois de mai); A droite, les sections montrant les ratios de variations de résistivité (pour chaque modèle correspondant à gauche) par rapport au mois de mai.*

3.2.2.3. Interprétation hydrologique de la dynamique de résistivité

Pour donner une explication à la dynamique temporelle de résistivité ci-après décrite, nous avons eu recours aux mesures piézométriques et d'humidité de sol relevées parallèlement au cours du suivi temporel.

Les humidités de sol au cours de la saison sont obtenues à travers les mesures prises dans les six tubes de sonde à neutrons placés le long du profil électrique. Les mesures neutroniques ne correspondent pas directement à des humidités volumiques ou massiques du sol. Il s'agit de comptages "bruts" par seconde (non rapportées à des courbes d'étalonnage d'humidité) qui caractérisent de façon relative les niveaux d'humidité du sol entre une période et une autre, en l'occurrence ici, la période allant du mois d'avril au mois d'août.

Sur les six tubes installés, et pour la période de suivi concernée, les cinq premiers situés sur le versant de la mare (du tube 35 au tube 31) ne présentent pas de variations en profondeur. Aussi, les courbes de mesures dans ces tubes sont similaires à celles du tube 32 (TN32) illustrées sur la *Figure 50*. Les courbes affichées montrent des valeurs restées constantes au cours des premiers mois de la saison (avril à juillet) pour toutes les profondeurs en dessous des 50 cm. Cette absence de changement sur toute l'épaisseur des couches interne, conforte le fait qu'aucune variation de résistivité n'ait été enregistrée dans cette partie du versant jusqu'au mois de juillet. Sur la courbe du mois d'août à la date du 24, on remarque par contre une augmentation des valeurs de comptage au niveau des couches profondes (au-delà de 16 m de profondeur). Cette variation signale la remontée de la nappe dont le niveau mesuré au centre de la mare à cette période, se trouve à 17 m (plus de précision seront données sur les variations piézométriques dans la suite de ce chapitre). Parallèlement, l'image ERT de la période correspondante révèle une augmentation de résistivité de près de 15 % qui affecte les zones en dessous de 17 m.

La dynamique des 50 premiers centimètres du sol est mise en évidence par les mesures au tube 34 (*Graphe TN34, figure 50*) utilisé ici pour présenter en détail, l'humidification superficielle qui affecte les versants à partir du milieu de la saison. A travers les courbes illustrées, on peut noter pour les mesures de surface, des variations en comptages allant de 3000 au mois d'avril à 8000 au mois d'août. Cet écart de comptage qui traduit une grande variation de la teneur en eau du sol, est à l'origine des baisses superficielles de résistivité visibles sur les versants des panneaux électriques des mois de juillet et d'août. Les mesures de ce tube neutronique montrent en outre que la saturation du sol intervient rapidement entre le mois de juin et juillet et se maintient le reste de la saison (les courbes de juillet et août sont confondues). Enfin, elles

confirment le fait que ces variations de teneur en eau, quelque soit la période de l'année, restent superficielles (inférieures à 1 m).

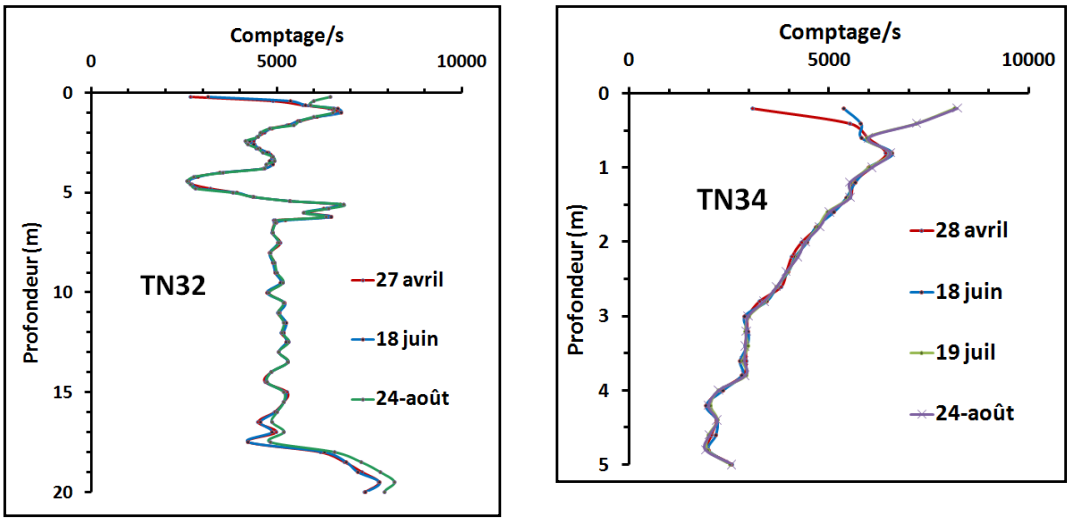


Figure 50: *Variations saisonnières des comptages neutroniques aux tubes TN32 et 34.*

Comme le montrent les résultats du suivi ERT, le maximum de la dynamique saisonnière sur notre site s'observe au mois d'août et elle concerne surtout la mare et ses berges immédiates.

La *Figure 51* présente une synthèse en quatre images de toutes les mesures réalisées pour le suivi particulier de cette zone. Les images A et B présentent les comptages neutroniques mesurés aux tubes 30 et 31 qui sont les plus proches de la mare. Sur l'image B sont affichées les courbes de diagraphie de résistivité établies à partir des mesures prises au centre de la mare au forage D1. Enfin, au centre de la figure se trouve un extrait zoomé du panache de résistivité observé en août sous la berge est de la mare.

De cette figure on peut faire les constats suivants :

- L'humidification superficielle sur les berges est mise en évidence par les valeurs de comptages des tubes 31 et 30 dans le premier mètre du sol. Cette augmentation de teneur en eau superficielle génère une baisse de résistivité calculée par l'ERT de 20 à 30% ;

- La baisse de résistivité consécutive à l'humidification du fond de la mare au moment de son remplissage, est mise en évidence par le suivi de diagraphie au forage D1. La baisse de résistivité mesurée est également conforme à celle de l'ERT (-40%). Ce

suivi confirme en plus, que l'humidification ne concerne que les couches sableuses superficielles du fond de la mare dont l'épaisseur ne dépasse pas 2 m.

- Le panache de baisse de résistivité sous la berge Est, est clairement mis en évidence par les mesures neutroniques du tube 30 à la profondeur 5 m. A cette profondeur, l'augmentation des comptages neutroniques observée entre le mois d'avril et celui d'août est accompagnée d'une baisse de résistivité de l'ordre de 30 à 50 %. Selon la forme du panache affichée par l'image ERT, celui-ci a une extension qui n'atteint pas l'emplacement du tube 31. Les mesures neutroniques dans ce tube le confirment effectivement (pas de variation de comptage le long du tube en dessous de 50 cm) ;

- Enfin, les données de diagraphie du mois d'août montrent une augmentation de résistivité de 25 % entre les profondeurs 18 et 22 m (les valeurs juste au dessus de 18 m étant manquantes). Or à cette période de l'année, le niveau de la nappe est de 17 m. Cette hausse de résistivité pourrait donc être liée à celle de l'eau qui deviendrait plus résistante électriquement. Si nous n'avons pas pu mesurer directement la conductivité de l'eau dans le forage D1, nous l'avons fait dans un puits villageois voisin à partir duquel nous suivions parallèlement la remontée de la nappe. Ce suivi montre que l'eau du puits devenait de plus en plus résistante au fil de la remontée de la nappe passant de 135 µS/cm en début juin à 39 µS/cm en fin août. Par ces observations, nous validons alors la hausse de résistivité vue en profondeur par l'ERT. La valeur de 15% enregistrée en ERT est inférieure à celle mesurée en diagraphie, mais cette sous-estimation de la résistivité par l'ERT peut être due à la diminution de la résolution des mesures à cette profondeur.

Les données d'humidité viennent donc confirmer d'une part, l'absence d'infiltration verticale à partir des versants et sous la mare et d'autre part, l'existence d'une infiltration latérale majeure dans une des berges de la mare, à l'endroit où les villageois exploitent l'argile pour la confection des briques.

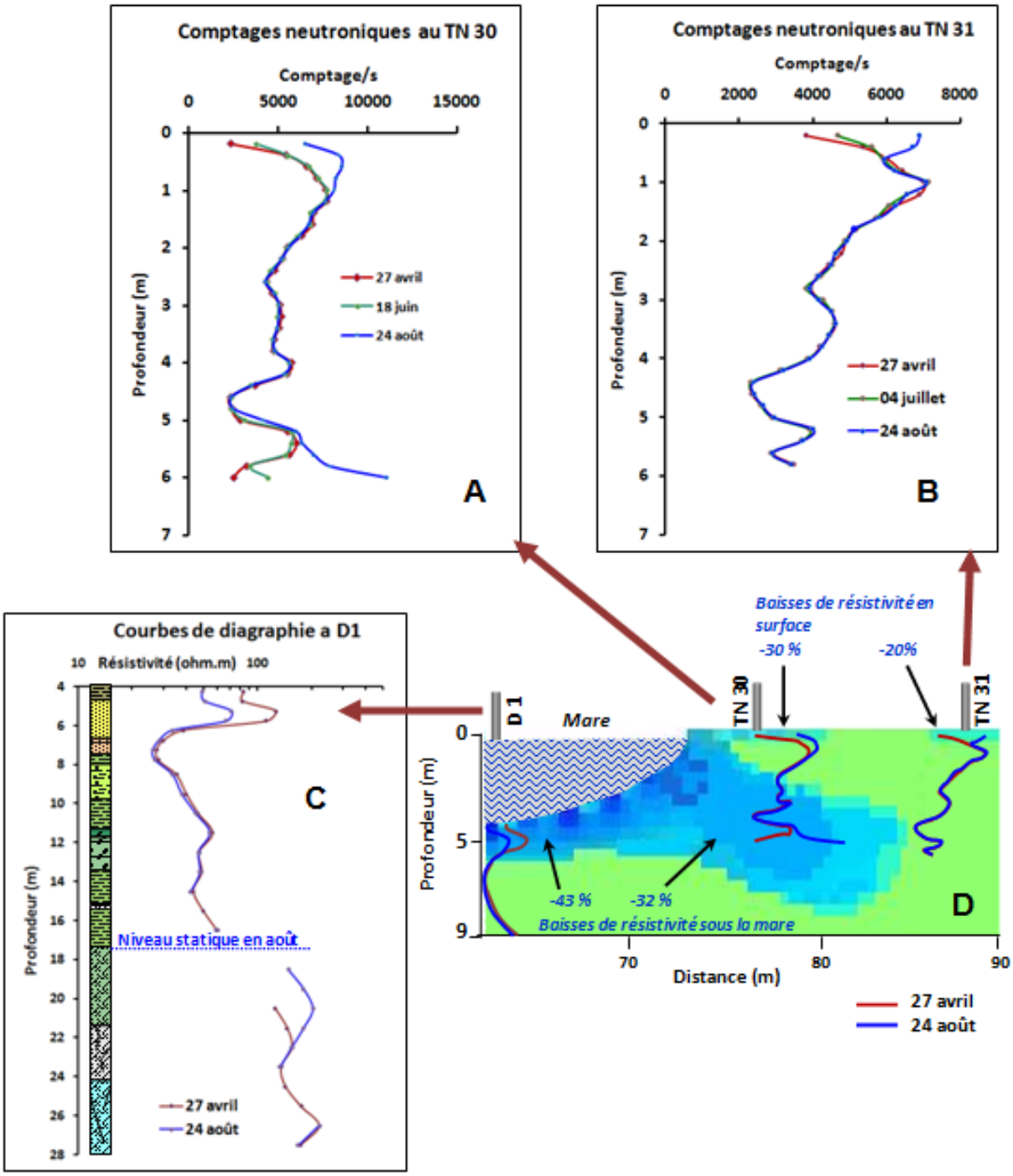


Figure 51: *Zoom sur l'infiltration latérale ainsi que les mesures de confirmation effectuées dans cette zone restreinte.*

Ces premières conclusions peuvent être corroborées en observant le détail des données piézométriques relevées dans les tubes neutroniques et les ouvrages hydrauliques du village (puits et forage) situés à proximité du site. *La Figure 52* présente l'ensemble de ces observations avec : les variations de niveau de la mare en tête de figure et les niveaux statiques (par rapport au niveau du sol) affichés en dessous, au regard de la structure lithologique du terrain.

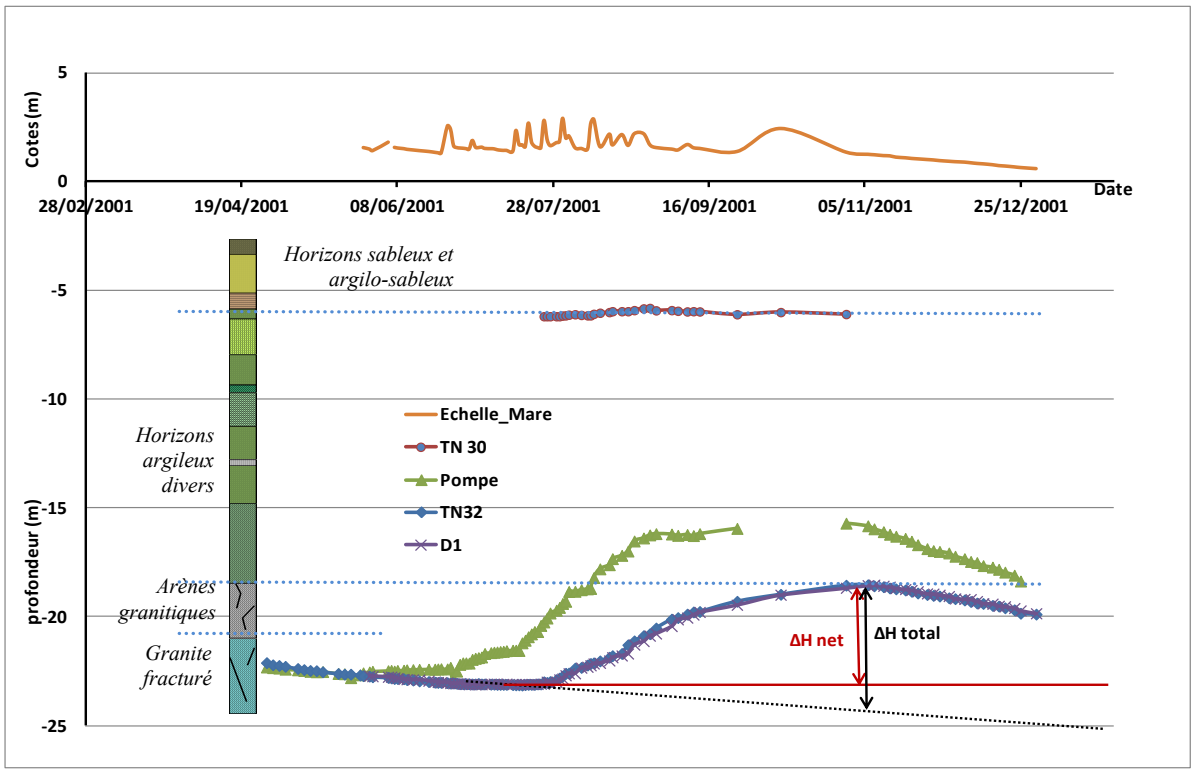


Figure 52: *Dynamique saisonnières des nappes sur le site. Comparaison avec les variations du niveau d'eau dans la mare.*

Les courbes piézométriques affichées sur la *Figure 52* renseignent sur l'existence sur le site de deux nappes :

- Une nappe perchée temporaire et très localisée aux environ du tube 30. Elle apparait à la fin du mois de juillet et est alimentée pendant une courte période de la saison (juillet à octobre). Les mesures réalisées dans le tube 30 montrent des variations de son toit entre 5,5 et 6 m qui est la profondeur maximale du tube. La localisation de cette nappe qui se situe dans la zone d'infiltration latérale vue par la géophysique, montre qu'elle correspond à celle-ci. Ainsi la baisse de résistivité en panache observée en ERT ne traduit pas simplement une légère humidification des couches à cet endroit mais bien une importante accumulation d'eau sous forme de nappe perchée. Le caractère temporaire de cette nappe est également confirmé par la géophysique qui montre un retrait significatif du panache dans l'image du suivi temporel du mois d'octobre ;

- Une nappe profonde vue par le suivi géophysique sous forme de légère hausse de résistivité (15% en août et 12% en octobre) et confirmée par le suivi de diagraphie au forage D1. Cette nappe est également captée par les tubes les plus profonds du site comme le TN32 ou le forage D1, mais aussi par le forage du village. Les courbes piézométriques pour ces trois points sont illustrées sur la *Figure 52*. Les périodes

sans mesure ou avec les mesures très espacées, correspondent aux périodes d'inondation du bas-fond dans lequel se trouve la mare. Les niveaux enregistrées au TN32 et au forage D1 montrent un démarrage de la recharge en fin juillet c'est à dire plus de deux mois après le remplissage de la mare. La remontée au cours de la saison se fait sur près de 4,5 m (ΔH net) et atteint son maximum à 18 m en mi-octobre, date à partir de laquelle, la nappe recommence à baisser lentement. Cette dynamique saisonnière ne semble pas être affectée par les variations multiples du niveau de la mare au cours de la saison des pluies. Aussi, ni la géophysique, ni le suivi piézométrique ne permet d'affirmer l'existence d'une connexion directe entre cette nappe et la surface de ce site.

En résumé, le site et sa dynamique saisonnière vus par notre suivi géophysique, piézométrique et neutronique se présente de la façon suivante :

- Le site est un bas-fond composé de couches tabulaires avec en son centre une mare sans doute causé à l'origine par l'érosion hydrique mais agrandi par l'activité humaine (briqueterie) ;

- En surface, le terrain comporte une couche sableuse épaisse sèche recouverte par une fine couche limono-sableuse. Cet ensemble est vu par la géophysique comme une couche unique de 150 ohm.m. Avec le début de la saison des pluies, cette couche est la première à passer de l'état sec à humide et cette différence de teneur en eau crée une baisse de résistivité que perçoivent les mesures de suivi géophysique. Ce phénomène touche d'abord le fond de la mare à son remplissage, avant de s'étendre aux versants. En pleine saison, alors que la mare est complètement remplie, une infiltration latérale se crée sur une des berges à l'emplacement de la briqueterie. Elle envahie localement la couche sableuse dont la base complètement saturée donne naissance à une nappe perchée temporaire. La différence de teneur en eau ainsi créée est bien visible par les mesures géophysiques ;

- La couche intermédiaire sur le site est faite de multiples bancs argileux dont la résistivité varie entre 40 et 50 ohm.m. Selon le suivi temporel géophysique, la résistivité de celles-ci ne changent pas au cours de la saison des pluies. Ajouté au fait que les données de sonde à neutron ne montrent aucune variation dans ces couches, on peut donc conclure qu'elles sont très peu ou pas du tout perméables. Cela explique le fait que l'infiltration au niveau de la berge ait tendance à s'étaler latéralement ;

- En profondeur, des arènes granitiques sableuses recouvrent la roche saine. Celles-ci sont envahies en pleine saison de pluies par la remontée d'une nappe dont l'eau nouvelle est plus résistante électriquement. Le suivi géophysique est sensible à cette remontée malgré la faible résolution de la mesure à cette profondeur.

Une question restée sur notre site à l'échelle des mesures réalisées, concerne le passage de l'eau de la surface vers la nappe profonde qui n'a pas été constaté. Pour expliquer alors la recharge de la nappe profonde observée, nous avançons deux hypothèses : le passage de l'eau par de petits canaux (non détectables par la résolution de la mesure ERT) traversant les couches argileuses ; l'infiltration à partir d'une autre zone située hors de notre dispositif de suivi.

3.2.2.4. Conclusion sur le suivi temporel en coupe

Les résultats présentés permettent de répondre aux questions qui nous étaient posées sur ce site de bas-fond. On peut affirmer que l'infiltration est indirecte et se produit dans les zones de concentration des eaux de pluies comme les mares temporaire des bas-fonds. Cette infiltration contribue pendant la courte saison de pluies, à réalimenter la nappe profonde dont nous avons constaté la remontée, même si les chemins verticaux n'ont pas pu être mis en évidence sur notre coupe.

Ces résultats corroborent des études similaires conduites en zone sahélienne sur terrains sédimentaires (De Marsily, 2003 ; Descroix et al, 2011). Notre étude en zone de socle qui confirme que ce processus y existe aussi, constitue une validation de la manifestation du processus dans un tel contexte malgré la forte argilisation des couvertures d'altération se développant sur les roches cristallines. Sur notre site, nous avons remarqué que l'infiltration est préférentielle sur un des cotés de la mare dont le sol avait été excavé pour la confection de briques. L'autre berge, sans exploitation d'argile, est restée imperméable à des infiltrations profondes.

3.3. Conclusion sur les mesures en zone sahélienne

A l'issue des prospections réalisées sur l'ensemble de nos sites sahéliens de Katchari BV0 (versant) et Dangadé (bas-fond), les résultats obtenus permettent de répondre à la plupart des questions qui nous étaient posées au départ. Si la détermination de la géométrie du sous-sol était un objectif connu pour être atteignable par nos techniques, la question du suivi de l'infiltration par suivi temporel de résistivité constituait un défi. Pour suivre l'évolution de la résistivité dans le temps, nous avons posé l'hypothèse que les écarts de teneur en eau du sol entre la saison sèche

et la saison des pluies, pouvaient générer suffisamment de changements de résistivité qui soient mesurables par nos équipements. Ce suivi temporel a été réalisé sur notre site à la fois en haut et en bas de versant.

Les résultats en haut de versant ont montré que cette partie du site était complètement imperméable à l'exception des premiers décimètres du sol. Aucune infiltration profonde n'a été détectée. Ce résultat vient ainsi confirmer l'imperméabilité des versants dans la zone sahélienne de socle. Si notre résultat s'extrapole à l'ensemble des versants de la région, cela a pour conséquence d'écarter l'existence d'un processus de recharge annuelle à partir des versants. Aussi, toute exploitation d'un aquifère d'altérite dans une zone de versant – à compter qu'il soit présent - doit prendre en compte le fait que la recharge de celui-ci ne sera pas directement possible, compromettant ainsi son exploitation à court terme.

Comme l'a montré notre suivi, les infiltrations ont lieu dans les zones de ravines de bas de versant, les bas-fonds et nous pensons par extension, dans les mares temporaires, lacs artificiels etc. Ces zones sont celles où une recharge peut se produire favorisant ainsi un renouvellement de la ressource.

Enfin, notre étude permet de conclure que sur des zones localisées, un suivi temporel de résistivité en utilisant l'ERT en mode "time-lapse" est une méthode pertinente si des protocoles de mesure appropriés sont utilisés et les données traitées avec toutes les précautions nécessaires pour la conduite des inversions en mode "time lapse". Pour une meilleure interprétation des résultats géophysiques, il faudrait toutefois disposer de sources de données extérieures.

Chapitre 4: LES ETUDES EN ZONE SOUDANIENNE AU NORD BENIN

4.1. La zone d'étude

4.1.1. Généralités

Le site d'étude en zone soudanienne est localisé au nord du Bénin, à 10 km au nord-ouest de la ville de Djougou, plus précisément selon les cordonnées (WGS 84) 01°31'08" E et 09°44'49" N. C'est un petit bassin hydrologique de 12 km^2 inclus dans l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouéme (OHHVO) qui est le dispositif d'observation de l'IRD à travers le programme AMMA-CATCH. Cet observatoire de près de 15 00 km^2 est constitué de bassins versants emboités (correspondant à différentes échelles d'études) parmi lesquels notre site d'étude appelé "Ara", du nom de la petite rivière qui y prend sa source. Bassin versant situé en tête du dispositif d'observation (à l'ouest dans le bassin de la Donga - *Cf.* Carte de localisation, *Figure 53*), le site est le plus densément instrumenté de tous les bassins.

Les études sur le bassin d'Ara ont débuté en 2003 avec une prospection géophysique préliminaire qui a permis de dresser une carte de conductivité électromagnétique générale du bassin ainsi qu'une esquisse géologique du site (Wubda, 2003).

4.1.1.1. Climat

Le climat du site est du type soudanien. Il s'agit à l'instar du type sahélien, d'un climat à saisons contrastées avec une saison pluvieuse et une saison sèche. L'évolution des températures au cours de l'année ainsi que la distribution mensuelle des pluies sont assez similaires à la situation sahélienne (voir histogrammes de pluies et courbes de températures en *Figure 2*). Les différences que l'on peut noter portent sur:

- Le cumul pluviométrique annuel plus élevé qui est de 1200 mm (moyenne de 1950 à 2010). Cette valeur moyenne cache une variabilité interannuelle de plus ou moins 300 mm maximum (900 mm en 2006 contre 1500 mm en 2009 – Données de la station de Djougou) ;
- La saison des pluies qui est beaucoup plus longue. Elle va de Mai à Octobre avec un maximum de pluie en Août atteignant 300 à 400 mm ;
- Des extrêmes thermiques moins accentués et des amplitudes de températures journalières moins importantes aussi bien en saison sèche qu'en saison de pluie ;

- L'ETP annuelle d'environ 1700 mm (moyenne de la station de Natitingou, Le Barbé et al, 1993), avec une ETR proche de ETP du fait de la disponibilité importante en eau (Mamadou O, 2014).

Comparé au climat sahélien, le ressenti d'humidité sous climat soudanien est plus marqué. La saison des pluies en plus d'être longue, connait souvent des successions de plusieurs jours très pluvieux. Les bas-fonds eux, restent verts même en pleine saison sèche.

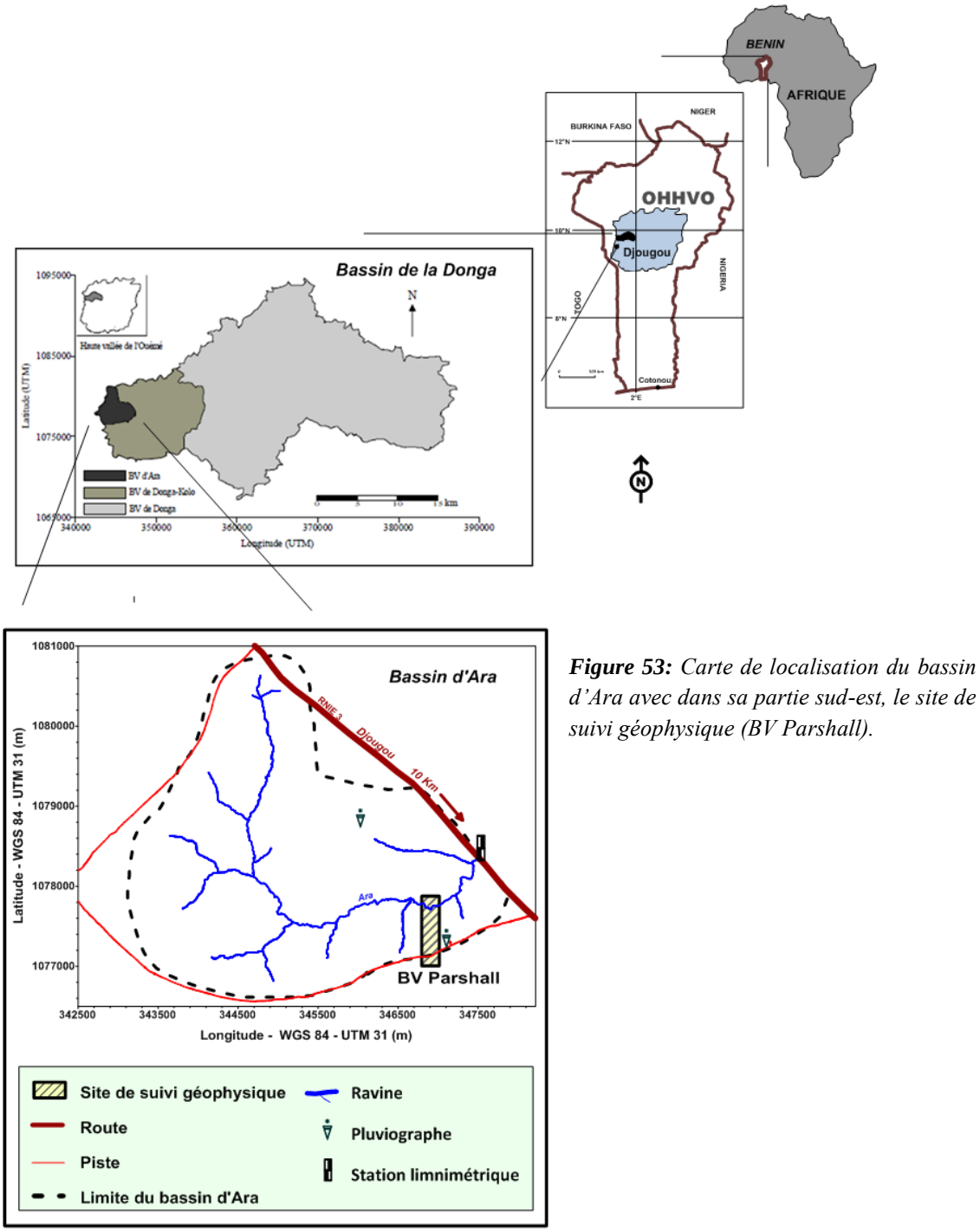


Figure 53: *Carte de localisation du bassin d'Ara avec dans sa partie sud-est, le site de suivi géophysique (BV Parshall).*

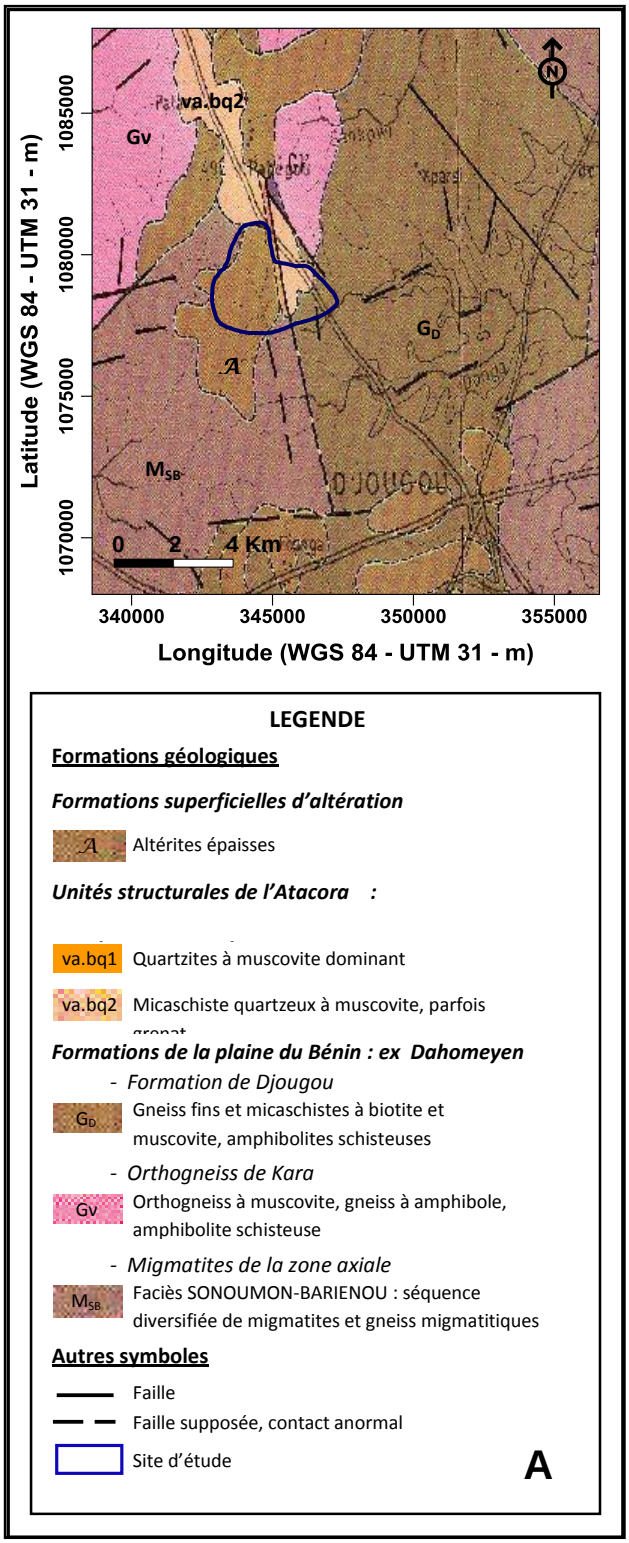
4.1.1.2. Géologie et géomorphologie

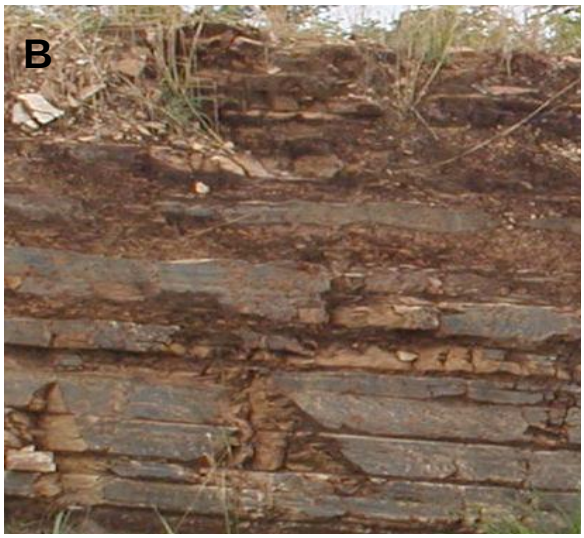
Comme pour le Burkina Faso, le contexte géologique du site est celui d'un socle. Au Bénin, il est affecté par un métamorphisme généralisé et un degré de fracturation assez élevé des roches. La carte géologique de la feuille de Djougou au 1/200 000^{e} permet de décrire le bassin d'Ara comme présentant deux unités structurales (*Cf. Figure 54*): Celle de l'Atakora et celle de la plaine du Bénin (ex Dahomeyen).

L'unité structurale de l'Atakora occupe la partie nord-est du bassin et se compose de deux formations géologiques toutes issues du Protérozoïque supérieur. La première affleure au nord est du bassin sous la forme d'un massif rocheux à la structure linéaire orientée nord, sud. Il est constitué de bancs de quartzites à muscovites qui présentent des lignes de schistosités orientées dans la direction de l'affleurement. Un aperçu de l'organisation de cette formation est donné au nord-est du bassin, à l'endroit de l'entaille de la route Djougou-Natitingou (Photo en haut de la *Figure 54*). La seconde formation se localise à l'est du bassin. Elle est constituée de micaschistes quartzeux à muscovite et donne lieu à de petits affleurements dispersés plus loin à l'est du bassin. Sur la carte géologique, la limite entre ces deux formations est matérialisée par une faille orientée -5° nord qui traverse le bassin dans sa partie centrale. Cependant, nos mesures géophysiques et nos observations sur le site ne permettent pas de confirmer son existence.

L'unité structurale de la plaine du Bénin se compose également de deux formations géologiques qui affleurent à plusieurs endroits dans le lit de la ravine principale. Au sud-est, on retrouve la formation de Djougou constituée de gneiss fins et de micaschistes à biotite et muscovite. La seconde formation dite 'de la zone axiale' se retrouve elle, dans toute la partie ouest du bassin. Elle se compose de séquences diversifiées de migmatites et de gneiss migmatitiques à biotite presqu'en totalité recouvertes d'une couche d'altérite épaisse.

Enfin, on retrouve au sud et à l'est de cette unité, des accidents de terrain linaires et parallèles, pouvant correspondre à des fractures ou à des failles.





Affleurement de quartzites au nord du bassin d'Ara. Le détail de la vue permet de se rendre compte de l'aspect métamorphisé et stratifié de la roche.



Gros blocs de cuirasses latéritiques. Souvent sous forme de graviers épars, de dalles ou de gros blocs (comme sur cette image), les cuirasses constituent une formation superficielle prépondérante sur le bassin d'Ara.

Figure 54: *(**A**), Carte géologique de la zone de Djougou avec le bassin versant d'Ara au centre de l'image (source : carte géologique de la feuille de Djougou au 1/200 000e). A droite, deux photos des roches (**B**) et formations superficielles couramment rencontrées sur le Basin d'Ara (**C**).*

Le contexte géologique du site a fortement impacté la morphologie de celui-ci. Le bassin se caractérise en effet par la présence de l'affleurement majeur de quartzite qui crée une structure linéaire de 30 m de dénivelé qui domine un paysage d'une altitude moyenne de 455 m.

Ailleurs dans le bassin, l'aspect du relief semble guidé par la présence ou non de formations superficielles cuirassées ou de filons de quartz qui localement modèlent la topographie (effet de vallonnement). Globalement, le terrain est cependant peu accidenté et les versants sont en pentes douces (0 à 2 %) jusqu'à l'emplacement de l'entaille des ravines qui présentent souvent des berges verticales.

A l'ouest et au nord du bassin, les cuirasses formes des plateaux continus au bas desquelles naissent des sources qui avant de drainer leurs eaux vers la ravine principale, donnent lieu à de petits bas-fonds temporairement ou permanemment inondés. Le réseau hydrographique est ainsi constitué de petites ravines qui partent de ces bas-fonds vers la ravine principale dont le tracé est en partie guidé par la position et l'orientation du massif de quartzite qui obligent les écoulements à effectuer un détour dans sa partie sud du bassin.

4.1.1.3. Végétation et sols

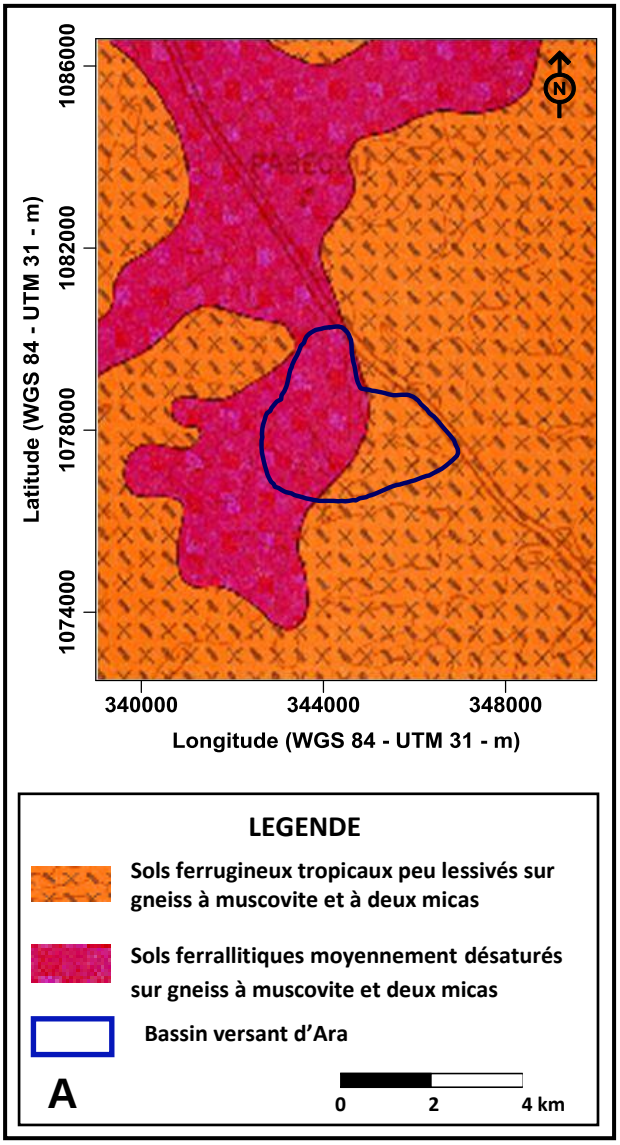
Le site du bassin versant d'Ara est un espace à vocation agricole avec un paysage qui alterne parcelles de cultures et jachères (nouvelles et anciennes). Aussi, la végétation est constituée de grands arbres isolés (espèces utiles comme le karité et le néré) sur les parcelles de cultures et d'une savane arbustive plus ou moins dense au niveau des jachères. Le long de la ravine principale, on observe la présence d'une petite forêt galerie très dense à certains endroits (*Cf. Figure 55 C*). La strate herbacée qui est quasi inexistante en saison sèche, est dense en saison pluvieuse et certaines zones colonisées par les andropogons offrent des strates pouvant atteindre 3 m de haut.

Cette végétation se développe sur des sols qui sont de deux types : les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés et les sols ferralitiques. Sur le bassin, ces deux types occupent chacun les deux cotés du massif de quartzite (*Cf. Figure 55 A*) avec :

- A l'est, les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur socle gneissique. Ils sont représentatifs de toute la zone de Djougou et occupent tous les versants en dehors des zones de bas-fonds. Peu profonds (7 à 10 m), ils ont la particularité sur le bassin de présenter un horizon B alternant de fines strates argileuses et argilo-sableuses conséquences de la structure initiale des gneiss ;

- A l'ouest, les sols ferralitiques beaucoup plus profond (jusqu'à 25 m) avec des horizons B argileux très épais (plus de 10 m).

L'un des aspects communs à ces deux types de sol est le degré de ferruginisation des horizons supérieurs. Il se traduit par la présence de couches gravillonnaires constituées de nodules ferrugineux ou alors de cuirasses latéritiques en dalles compactes ou démantelées. Enfin, les surfaces de ces sols sont pour la plupart parsemées de graviers divers : quartz, gneiss, cuirasses ferrugineuses (*Cf. Figure 55 B*).





Surface de sol sur le bassin d'Ara. Les surfaces sont marquées par la présence significative de graviers de quartz, gneiss ou cuirasses ferrugineuses.



Vue de la végétation en saison de pluies aux abords de la ravine principale.

Figure 55: *(**A**), Carte des grands ensembles pédologiques du bassin d'Ara (source: Carte pédologique de la feuille de Djougou au 1/200 000e) avec illustré à droite, une vue de surface de sol courante (**B**) et une vue de la végétaion le long de la ravine principale(**C**).*

4.1.1.4. Les aspects humains

L'espace du bassin versant est exploité par trois villages qui lui sont riverains : Babayaka au sud-ouest, Nalohou I et II respectivement au nord-est et au sud-est. Les populations pratiquent ici une agriculture et un élevage à l'échelle familiale. L'agriculture est surtout basée sur la production de cultures céréalières (maïs, sorgho) mais également de tubercules notamment l'igname et le manioc. La culture du coton, principale produit de rente dans la région est cependant peu représentée, supplanté par la production du soja servant à la fabrication d'un fromage local.

4.1.2. Le site de suivi géophysique

- *Présentation*

Le site de suivi géophysique est un sous-bassin versant nommé "BV Parshall", situé au sud-est du bassin d'Ara (*Cf. Figure 53*). C'est un site choisi pour l'étude à petite échelle du fonctionnement d'un des multiples petits bas-fonds rencontrés sur le bassin. Il a ainsi déjà fait l'objet de plusieurs études portant notamment sur les stocks d'eau (Hector et al, 2013) et la dynamique piézométrique (Séguis et al, 2011). Ces études antérieures en plus de procurer des éléments de comparaison avec la notre, ont laissé sur le site, des dispositifs de mesures à partir desquels nous avons pu collecter des données complémentaires.

D'une superficie d'environ 4 ha, le BV Parshall présente une morphologie simple (*Cf. Figure 56*):

- L'axe du bassin a une orientation sud, nord qui est également le sens général de l'écoulement des eaux ;
- Les versants est et sud sont en pente relativement douce (1 à 2 %) et ne présentent aucun relief significatif ;
- Le versant ouest, morphologiquement identique aux précédents, présente dans sa partie avale de nombreux affleurements de cuirasses en dalles et gros blocs consolidés ;
- Enfin, la partie centrale du micro bassin présente une entaille linéaire (large d'environ de 20 m) aux berges sub-verticales et un fond plat qui donne lieu à un petit bas-fond temporairement inondé en saison de pluies. Ce bas-fond est la zone de naissance d'une petite ravine qui draine les eaux en direction de la ravine principale Ara situé à environ 50 m au nord.

L'espace de ce bassin est entièrement anthropisé, occupé par des parcelles de cultures et des jachères aux âges variés. A l'instar de toute la partie est du bassin d'Ara, le seul type de sol présent ici est le celui ferrugineux tropical peu évolué sur socle gneissique. Il offre un horizon superficiel assez homogène limono-sableux avec une forte présence de graviers constitués d'un mélange de petits blocs de quartz, de gneiss et de petits nodules ferrugineux.

- *Equipements*

Le micro-bassin Parshall possède des équipements destinés à des études de processus hydrologiques à fine échelle. Il compte également un dispositif permanent du suivi gravimétrique débuté sur le site depuis 2010 (*Cf. Figure 56*). En tout, le site comporte :

- Une station hydrométrique (à l'exutoire du bassin) sous forme d'ouvrage maçonné de type Parshall équipé d'échelles limnimétriques et d'un enregistreur automatique de hauteurs d'eau pour les futurs calculs de débits ;

- Des points de mesures multi paramètres comportant des piézomètres, des tubes d'accès neutroniques et des placettes de suivi gravimétriques ;

- Trois stations de mesures d'humidité de sol installées le long d'un transect allant du haut vers le bas de versant et dont deux (NAM et NAB) se retrouvent sur le site de suivi (NAH étant plus loin à l'est) ;

- Une station de mesure de flux d'énergie servant de station météorologique.

En dehors de ces équipements spécifiques, le site bénéficie d'autres dispositifs de mesures installé dans le cadre de l'étude générale du bassin versant d'Ara dont un pluviomètre et un gravimètre supraconducteur tous localisés juste à la limite sud-est du BV Parshall.

L'équipement de suivi géophysique spécifique à cette étude se compose lui principalement, d'un dispositif ERT placé en travers de la ravine qui draine le bassin. C'est un dispositif fixe (installé pour la saison) composé d'une série de 96 électrodes espacées de 1 m, placées sur un profil orienté ouest, est. Le centre de ce dispositif comporte un point de suivi hydrologique (DCPS) composé d'un piézomètre et d'un tube d'accès neutronique auquel s'ajoute un forage de diagraphie électrique (*Cf. Figure 57*).

Sur l'ensemble du secteur à prospecter (rectangle comportant le BV Parshall) un système de jalons temporaires faits de piquets de bois a également été utilisé pour le marquage des débuts et fins de profils pour les mesures de cartographie EM 34.

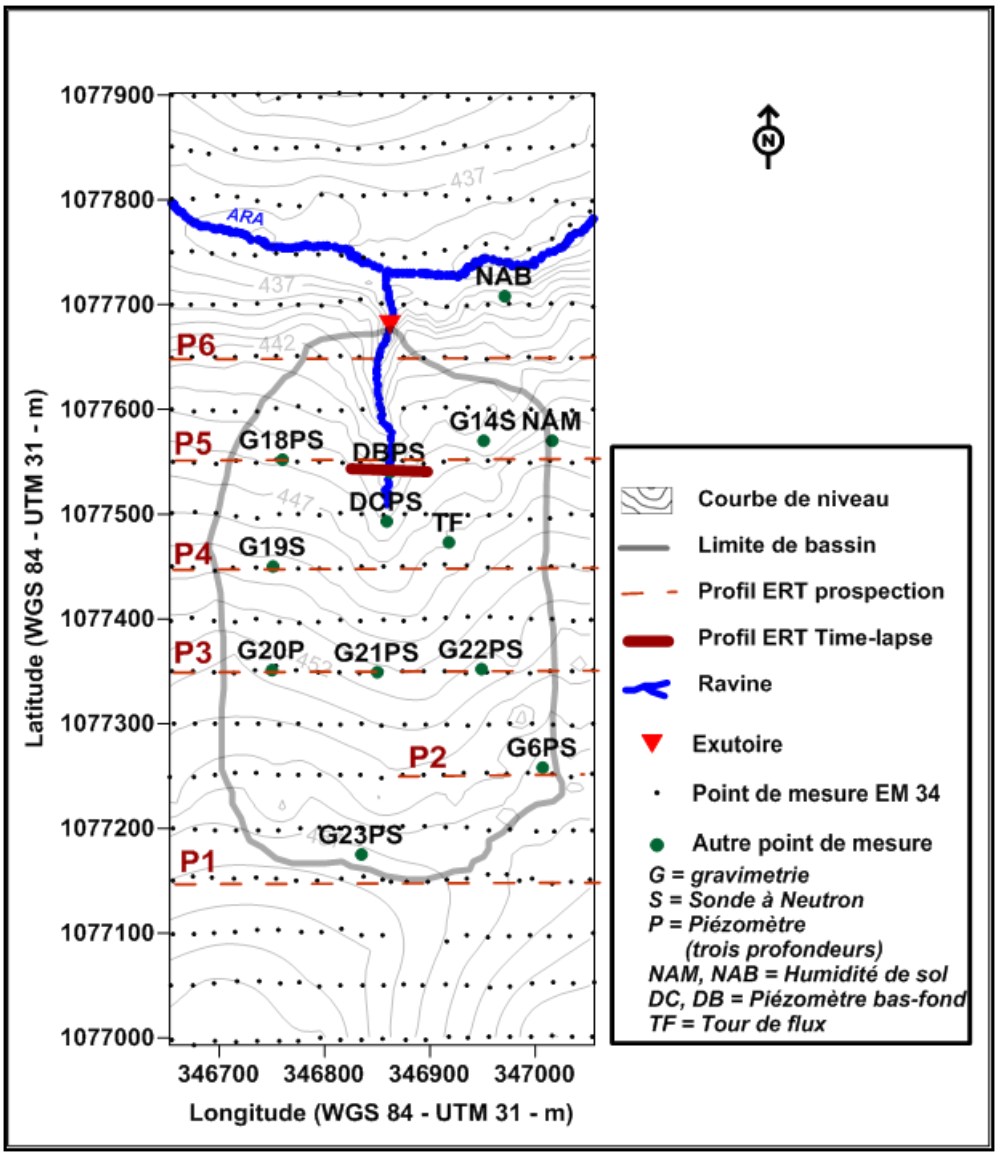
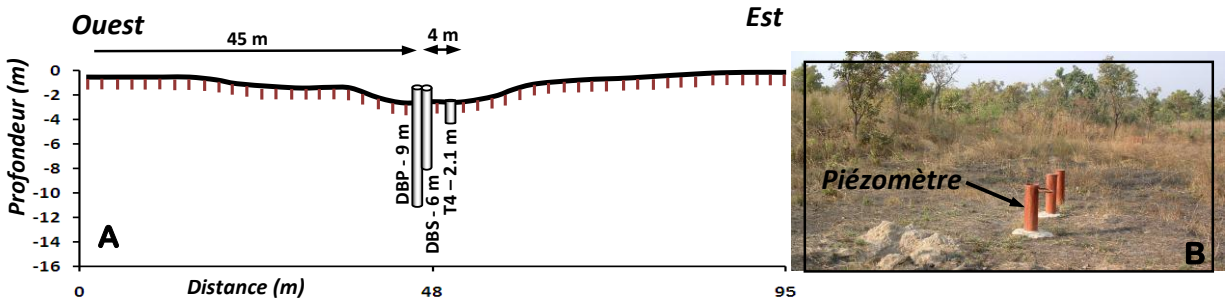


Figure 56: *Carte topographique du BV Parshall avec la localisation des profils ERT de reconnaissance, des points de suivi EM 34, d'humidité de sol et de niveaux statiques.*



DBP: Piézomètre **DBS: Tube d'accès neutronique**

T4: Forage de diagraphie de résistivité

Figure 57: (A), *Coupe du dispositif ERT de suivi temporel dans le bas-fond du BV Parshall.* ***(B),*** *vue du bas-fond en saison sèche avec quelques piézomètres installés à l'avant plan.*

4.1.3. Questions adressées aux géophysiciens

Les processus hydrologiques en œuvre dans la zone soudanienne sont différents de ceux en zone sahélienne notamment en ce qui concerne le volet de l'infiltration. En effet, s'il est admis que celle-ci est indirecte dans le sahel, elle est en revanche directe (généralisée) en zone soudanienne (Descloitres, 2010). Sur le site du bassin d'Ara en particulier, les nombreuses études qui s'y sont déjà effectuées (Hector & al, 2013 ; Richard & al, 2013) confirment ce fait. Cependant, pour les hydrologues en charge suivi du comportement hydrologique du bassin d'Ara, il reste important de savoir s'il existe des comportements singuliers de certains terrains permettant d'améliorer la compréhension du régime hydrologique du bassin à son exutoire.

Sur ce site donc, les problèmes concernant l'infiltration se posent prioritairement au plan spatial et les questions des hydrologues y sont naturellement relatives :

- Quelles est la nature des terrains présents et leur organisation au plan spatial et vertical ?
- Est-il possible de suivre la dynamique de l'infiltration sur ces terrains au cours de la saison? Peut-on la connaitre au plan spatial et/ou vertical ?
- Existe-il des zones privilégiées d'infiltration ? Où doit-on implanter les capteurs ponctuels pour mieux quantifier les flux d'infiltration.
- Quel est le rôle des bas-fonds notamment en termes de recharge des aquifères?

Pour donner des réponses à ces questions, nous avons utilisé le même matériel et les mêmes méthodes de prospection que sur le site sahélien, avec cependant une mise en œuvre sur le terrain adapté aux conditions locales (végétation et topographie du milieu) notamment pour le suivi temporel de résistivité apparente en carte. En outre, nous étions avertis de la difficulté sur ce site d'interpréter les données de suivi de résistivité du fait de la faible variation de la teneur en eau du sol au cours de l'année (Hector et al, 2013).

Contrairement au site sahélien, nous avons retenu comme hypothèse devant justifier les variations de résistivité, les changements de la conductivité de l'eau du sol (en raison de la faible variation de la teneur en eau attendue). Nous avons focaliser nos essais de spatialisation des infiltrations (mesures EM 34 en carte) sur la zone non saturée du sol (0-7 m de profondeur) en utilisant nos équipements dans une configuration qui offre la profondeur d'investigation adapté à cette tranche de terrain.

4.2. Les résultats géophysiques

4.2.1. Résultats de l'exploration préliminaire

Une carte de conductivité EM 34 de l'ensemble du bassin d'Ara avait été réalisée en 2003 (Wubda, 2003) dans une configuration en dipôle horizontale avec 20 m d'écartement entre bobine. Le maillage optimisé de cette carte (20 m en pas de mesures sur des profils ouest- est, distants de 100 m) permet d'avoir un rendu de l'organisation des résistivités apparentes sur le site de suivi (BV Parshall). La tranche de sol investiguée dans la configuration choisie est également représentative des altérites dont l'épaisseur moyenne se situe autour de 20 m. Deux grands profils ERT de reconnaissance ont également été réalisés pour aider l'interprétation de la carte (*Cf. Figure 58*): Le Profil A au nord du bassin, long de 1700 m et orienté ouest, est, et le Profil B, à l'est, orienté nord, sud.

Le profil B qui côtoie le site de suivi, fourni des indications sur la nature des formations ainsi que les gammes de conductivité présentes dans cette partie sud-est du bassin d'Ara. Les données de ce profil (vérifiées à l'aide de forages) révèlent:

- L'importance des couches superficielles résistantes présentes tout le long du profil (couleurs chaudes superficielles sur l'image du profil). Avec des valeurs de résistivité allant de 500 à 3000 ohm.m, elles ont été identifiées comme correspondant à des horizons ferrugineux gravillonnaires associés ou non à des cuirasses superficielles massives ou disloquées ;

- La présence de couches intermédiaires conductrices relativement épaisses (5 à 7 m) et continues qui s'amincissent seulement au niveau de la ravine (point topographique le plus bas au milieu du profil). Ces zones conductrices illustrées par les couleurs froides sur l'image du profil, regroupent des plages de résistivité allant de 20 à 100 ohm.m avec des zones de transition dans les limites supérieures et inférieures plus résistantes (100 à 400 ohm.m). Elles correspondent à des couches plus ou moins argileuses présentant des granulométries et des degrés d'humidité variables. Les résistivités les plus faibles (autour de 20 ohm.m) témoignent de couches fortement argileuses et très humides ;

- La faible profondeur du substratum géologique situé à 15 m. Il est constitué de gneiss et micaschistes disposés en bancs alternés avec un pendage de 20 degré vers l'est. Il présente une résistivité supérieure à 400 ohm.m.

Ces premières données quoiqu'intéressantes, ne nous semblaient pas offrir le niveau de détail requis à la bonne compréhension des unités morphologiques du bassin telle que souhaitée dans cette étude. Nous avons donc réalisé de nouveaux profils ERT visant l'acquisition d'images du sol détaillant au maximum l'organisation verticale des résistivités du site dans la tranche 0-15 m. Outre la description du sous-sol, ces données ERT sont prévues pour constituer des supports numériques à des tests de modélisation visant la prédiction des valeurs des futures mesures EM 34. Six profils ERT notés de 1 à 6 ont été réalisés à partir d'un dispositif de 64 électrodes écartées de 4 m. Ils sont disposés à latitudes équidistantes de 100 m et sont orientés ouest, est (*Cf. Figure 56*). Chaque profil long de 380 m (à l'exception du P2 - 200 m), comporte deux panneaux (64 + 32 électrodes) mesurées en configurations Wenner Alpha et Beta.

4.2.1.1. La carte de conductivité du BV Parshall

La *Figure 58* donne une image des conductivités du site de suivi extraite de la carte générale de conductivité du bassin d'Ara. L'échelle des couleurs qui donnent les gammes de conductivité représentées a été doublée d'une conversion en résistivité pour permettre une lecture dans les unités qui seront utilisées plus loin dans la description des profils ERT servant l'interprétation.

A première vue, la carte de conductivité du site de suivi temporel se caractérise par son organisation en deux zones de conductivité bien contrastée et alignées dans la direction nord, sud. La gamme de résistivité présentée va de 60 à 500 ohm.m.

- La moitié est du site présente une zone résistante de 350 ohm.m en moyenne. Cette zone résistante correspond à la partie ouest d'un bloc plus étendu, qui couvre tout l'extrême est du bassin ;

- La partie ouest et sud-ouest est nettement moins résistante avec en moyenne 100 ohm.m. Sur la carte de conductivité générale du bassin d'Ara, cette zone conductrice apparait bien étendue. Elle est linéaire, large d'environ 100 m et traverse toute la partie est du bassin dans la direction sud, nord. Elle fait partie d'une série de zones conductrices qui se rencontrent dans la partie est du bassin d'Ara. Leur orientation et leur succession semblent indiquer l'existence de bandes rocheuses dont l'altération conduirait à la mise en place de ces zones conductrices linéaires (altération argileuse liée à la préexistence de roches abondamment feldspathées par exemple) ;

- Au niveau de la ravine Ara, la zone conductrice est très réduite. Elle traverse un espace résistant (300 à 500 ohm.m) qui occupe toute la partie nord du site de suivi ;

- Enfin, on constate que le contact entre anomalies conductrices et résistantes est assez franc (quasi absence de zone de transition).

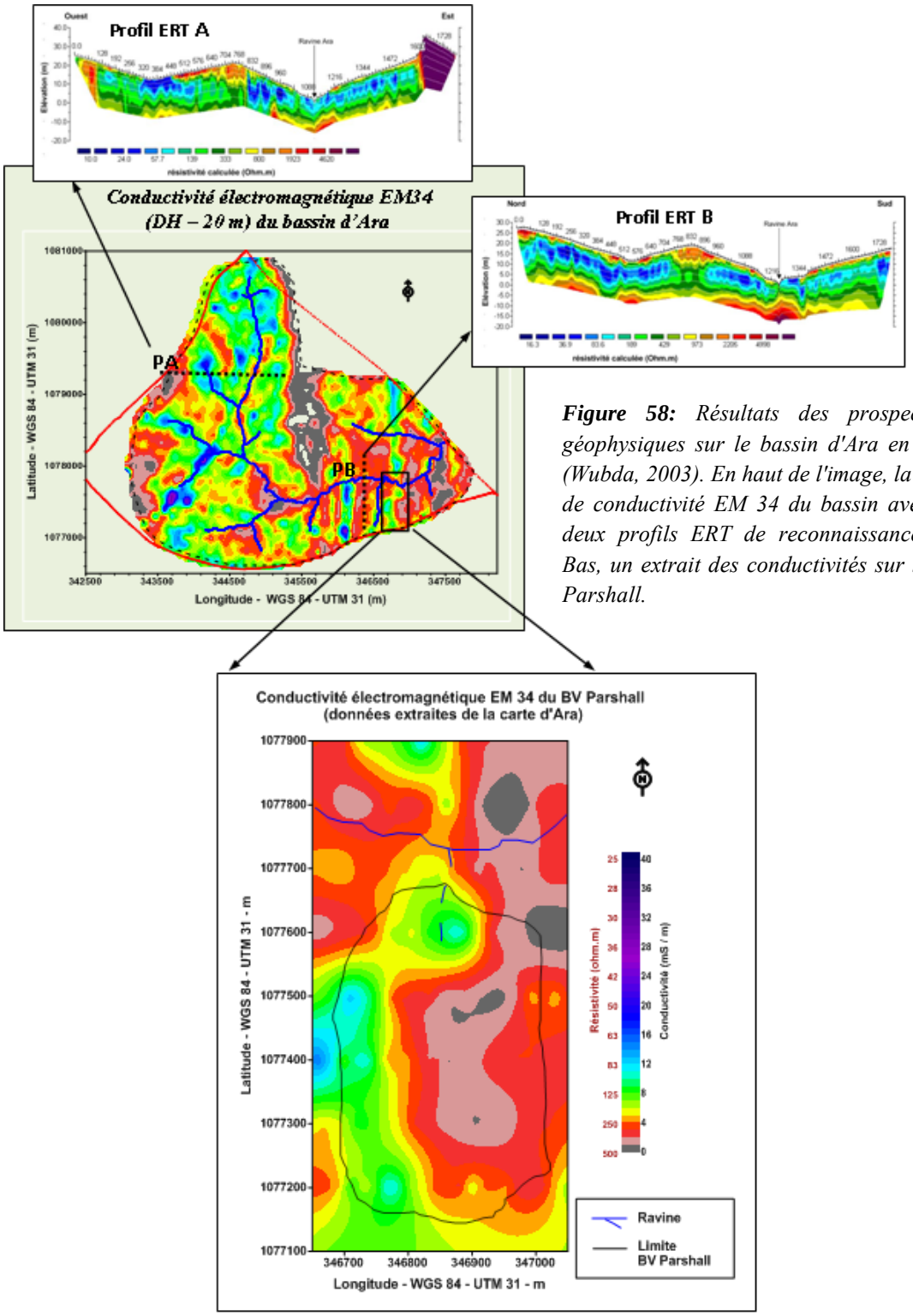


Figure 58: *Résultats des prospections géophysiques sur le bassin d'Ara en 2003 (Wubda, 2003). En haut de l'image, la carte de conductivité EM 34 du bassin avec les deux profils ERT de reconnaissance. En Bas, un extrait des conductivités sur le BV Parshall.*

La configuration EM 34 utilisée (DH – 20 m) pour cette première reconnaissance du bassin d'Ara permettait d'explorer les 15 premiers mètres du sol. Dans cette partie du bassin et pour l'épaisseur de sol investiguée, nous connaissons grâce aux reconnaissances géologiques

antérieures, la nature des matériaux qui ont pu être pris en compte par les mures EM. Il s'agit notamment :

- Des formations superficielles cuirassées et horizons gravillonnaires que l'on retrouve entre 0 et 3 m de profondeur maximum;
- Des couches argileuses épaisses situées entre 1 et 15 m.

Dans certains cas, la mesure peut également intégrer une partie du substratum rocheux dont les pointements se retrouvent parfois à moins de 5 m en dessous du niveau du sol.

4.2.1.2. Résultats des mesures ERT

Les résultats d'inversion des données ERT sont illustrés par la *Figure 59*. Chaque coupe ERT présente la géométrie des résistivités du sous sol sur 35 m de profondeur avec une définition de l'ordre du mètre (taille des cellules de la grille de calcul). Tous les profils présentés sont en orientation ouest, est, avec une exagération verticale (Y vaut 2.3 fois X) permettant de mettre en relief les détails en profondeur qu'en distance. Sur certains de ces profils, nous avons également affiché la position de quelques forages de reconnaissance représentatifs de la lithologie du site.

Du nord au sud, les six profils réalisés présentent la caractéristique commune d'afficher des zones à dominante résistante (plus de 200 ohm.m) avec une organisation assez complexe. En effet, si les résistivités les plus fortes (plus de 2000 ohm.m) se retrouvent généralement en bas de profil, ce qui permet de les assimiler de prime à bord au substratum géologique, l'existence de plusieurs connexions avec la surface vient compliquer l'interprétation de ces profils en introduisant des zones de conductivités intermédiaires dont on devine difficilement la nature. Dans l'ensemble on peut distinguer trois zones de résistivité :

- Les zones résistantes superficielles qui se présentent sous forme de couches minces (3 m d'épaisseur maximum) avec des valeurs de résistivité de plus de 500 ohm.m. Bien visible sur la partie nord du site notamment sur les profils P5 et P6 où elles sont en outre continues, elles peuvent également être entrecoupées de plages conductrices sur des distances importantes comme au niveau du P4, P3 et surtout P1 ;
- Les zones conductrices intermédiaires qui apparaissent sur l'ensemble de la partie ouest des profils sous forme de plages continues de résistivité inférieure à 100 ohm.m avec plus ou moins centrées, des poches de résistivité encore plus basse (inférieur à 30 ohm.m). Globalement, ces zones se retrouvent entre les profondeurs 3 et 15 m et leurs formes dans le détail sont plutôt variées : ondulations latérales et

extensions parfois verticales vers la profondeur comme sur les profils P5, P3 et P1. En dehors des parties ouest des profils, elles sont moins présentes (à l'exception du P1) et constituent des taches isolées difformes ;

- Les zones résistantes profondes que l'on retrouve à partir de 15 m profondeur. Elles sont présentes sur l'ensemble des profils et leur résistivité est supérieure à 500 ohm.m. Zones assez tabulaires surtout dans la partie ouest des profils P6 et P4, elles sont parfois entrecoupées par des zones conductrices verticales. Dans la partie est des profils, elles possèdent des extensions vers la surface qui se connectent aux zones résistantes superficielles posant du même coup une question de détection des limites entre les formations lithologiques qui les représentent : couches superficielles épaisses ou pointement de couches profondes ?

Les résultats obtenus à travers l'image de ces six profils permettent d'établir la logique d'organisation des résistivités de la carte de prospection EM 34. On s'aperçoit en effet que la partie résistante de la carte (partie est) correspond à la réponse cumulée de couches résistantes superficielles et profondes parfois complètement connectées. La bande conductrice de la partie ouest par contre, résulte de la réponse prédominante de couches intermédiaires conductrices épaisses qui atténue la réponse d'une couche résistante superficielle mince et même celle d'une autre plus épaisse située à environ 15 m de profondeur.

4.2.1.3. Résultats des forages de reconnaissance

Pour compléter l'interprétation de la carte EM, des forages de reconnaissance ont été réalisés dans le but d'identifier la nature des matériaux correspondant à chaque gamme de résistivité observée sur les images ERT. Si les forages réalisés sont assez nombreux (chaque point de mesures piézométriques ou de sonde à neutron correspond à un forage documenté) ceux que nous avons représenté sur les profils en *Figure 59* ont été retenus pour illustrer les organisations majeures de terrains rencontrées aussi bien de point de vue de la stratification des couches que de la nature des matériaux présents.

Comme l'illustre le détail des profils de forages présentés sur la *Figure 60*, l'ensemble des terrains rencontrés sur le site se caractérise avant tout par la présence en surface d'une couche limono-sableuse intégrant également des gravillons composés de petits blocs de quartz, de gneiss ou de cuirasses ferrugineuses. Cette couche qui ne dépasse pas 50 cm d'épaisseur n'est pas visible sur les images ERT car se confondant avec celle sous-jacente. Elle représente la partie cultivée du sol et sa surface tout comme son degré de compacité dépend de son utilisation en cours : parcelle de culture, nouvelle ou ancienne jachère.

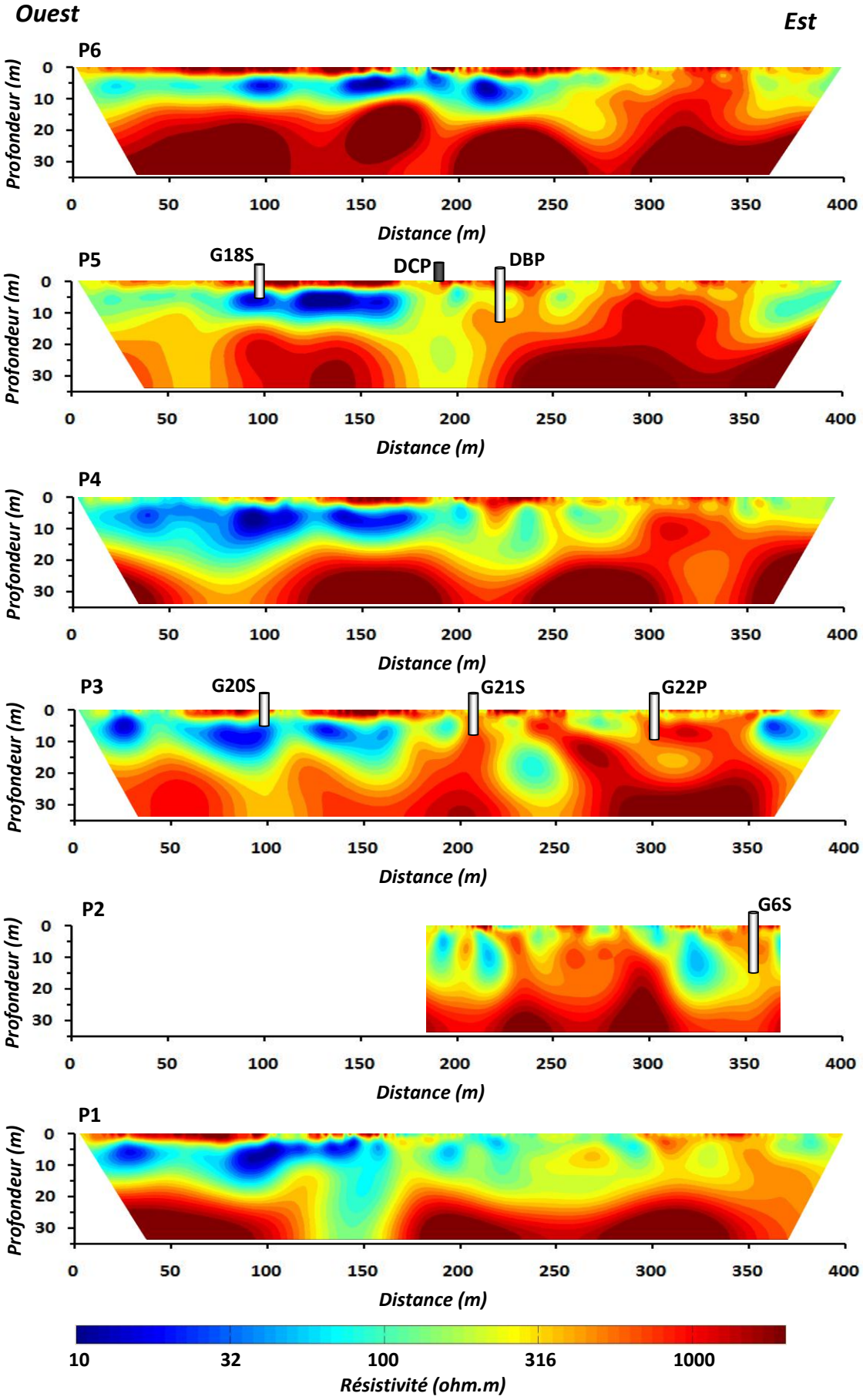


Figure 59: *Sections de résistivité calculée pour les profils ERT de reconnaissance sur le BV Parshall.*

La seconde caractéristique également commune à tous les profils est la présence de la couche "latéritique" sub-superficielle visible juste en dessous de l'horizon cultivé et qui existe aussi bien en haut qu'en bas de versant. Elle a une composition variée mais en général, on retrouve surtout un mélange ocre formé d'argile et de nodules ferrugineux. Sur les images ERT (*Figure 59*), elle est associée aux zones superficielles résistantes dont la gamme de résistivité va de 500 à plus de 2000 ohm.m. Plus visible dans la partie nord-ouest du site, les observations montrent qu'elle correspond à des cuirasses affleurant sous forme de dalles ou gros blocs démantelés. Les profils de forages réalisés montrent en outre que c'est dans cette partie du site qu'elle est plus épaisse : jusqu'à 3 m comme à G18S ou G20S. Enfin, elle peut se présenter sous la forme d'un horizon unique (cuirasse ou horizon gravillonnaire uniquement ; *Voir profil du G22P*) ou multi-stratifié avec de haut en bas, une partie très consolidée (cuirasse latéritique) suivie d'une strate gravillonnaire puis d'une autre, argileuse de couleur ocre (cas du forage G20S).

L'aspect du reste du profil de sol sur le site suit pour la plupart celui présenté sur le forage G6S. On distingue en dessous de la couche latéritique :

- Un horizon argileux plus ou moins massif, presque toujours très humide et de résistivité (selon les images ERT) comprise entre 10 et 60 ohm.m. L'épaisseur de cette couche argileuse est particulièrement importante dans la partie ouest du site et son degré d'argilisation y est tel que les opérations de forage ont été impossibles une fois la couche atteinte (cas des forages G18S et G20S). Seules les images ERT permettent d'en estimer l'épaisseur : plus de 10 m voir au-delà de 30 m dans les zones d'altération profonde. Dans la partie est du site par contre, il existe des zones ou elle est quasi absente (G22P) ;

- Des arènes issues de l'altération des gneiss qui forment des horizons épais (G6S et G22S). En comparant les images ERT et les données de forages, on se rend compte que celles-ci couvrent une large gamme de résistivité. En effet, en fonction de l'humidité et de la granulométrie des arènes (présence plus ou moins importante d'argile), celle-ci peut aller de 80 à 400 ohm.m. Rencontrées souvent à très faible profondeur dans la partie est du site (1,5 m à G22P), leur limite avec la roche mère est parfois difficile à déterminer lors des forages. A cause de la structure déjà fragmenté des gneiss, les cuttings remontés offre un aspect sableux qui s'apparente fortement à ceux des arènes ;

- Enfin, la roche saine à une profondeur moyenne d'environ 15 m, comme on peut le constater sur les parties ouest des images ERT. Elle est représentée par des

résistivités de plus de 400 ohm.m et est constituée de gneiss dont la structure feuilletée offre des différences de dureté qui se remarquent pendant les opérations de foration. Les gneiss sont injectés de filons de quartz mais surtout, sont entrecoupés de larges bans de schistes dont la localisation correspond à l'emplacement des zones d'altération profonde. Leur présence à été confirmée lors de forages réalisés au sud-ouest de notre site pour l'alimentation en eau potable du village mitoyen.

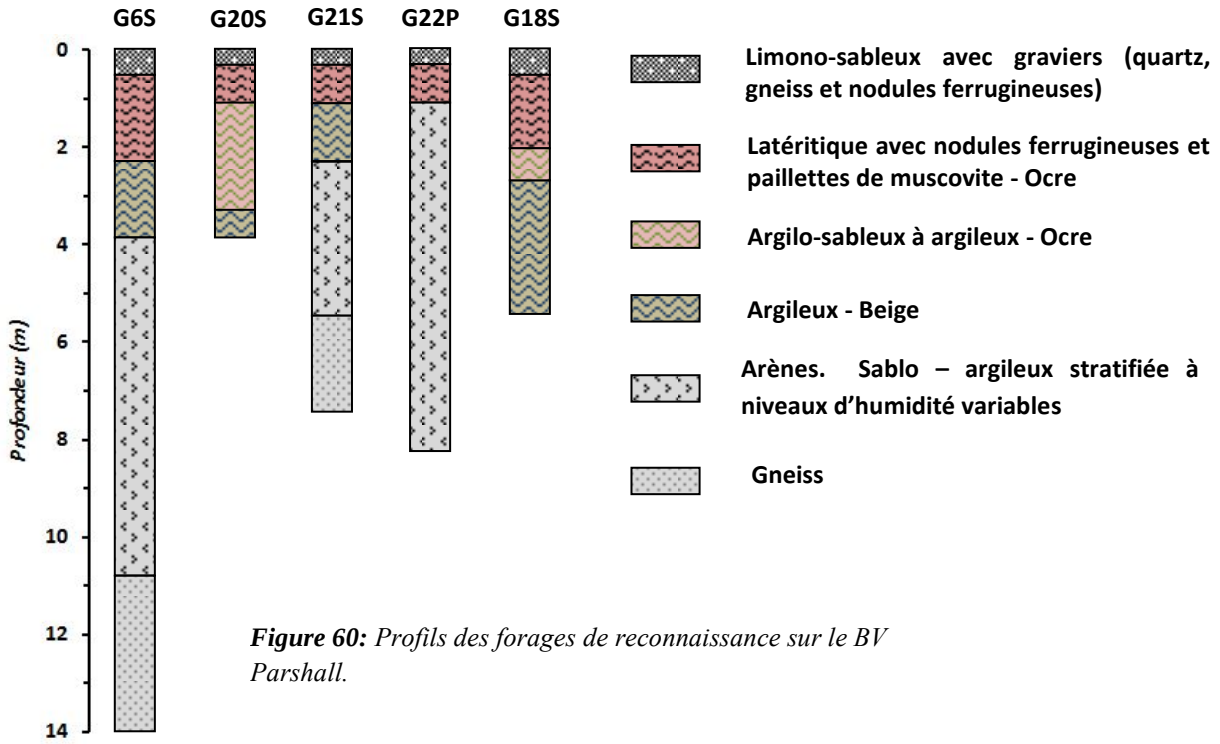


Figure 60: *Profils des forages de reconnaissance sur le BV Parshall.*

A l'analyse des profils de forages ci-après décrits, on peut dire que la structure des sols sur le présent site est marquée par des altérites peu épaisses coiffées d'une couche latéritique quasi présente sur l'ensemble du site. Enfin, l'autre trait marquant de ce site, est la présence de la couche argileuse que l'on retrouve sur les forages ouest. Parfois très épaisses comme au niveau des zones d'altération profondes, on peut imaginer que sa présence dans cette partie du site puisse conférer un comportement hydrologique différent à celui de la partie où elle est mince voire parfois totalement absente.

4.2.1.4. Conclusion sur la morphologie générale du site

L'ensemble des opérations de cette phase de prospection préliminaire aura permis de bien connaitre le sous sol du site dans ces moindres détails. En effet, si grâce à la carte de prospection EM 34 réalisée en 2003 on pouvait déjà se rendre compte de la structure du site en deux de zones

de conductivité contrastée (ouest et est), réaliser les profils ERT et les forages de reconnaissance lors de cette prospection préliminaire a permis non seulement de confirmer cette organisation et de montrer les relations entre celle-ci et la structure verticale du sous sous-sol aussi bien au plan de la distribution des résistivités que de la nature des matériaux représentés.

En combinant les résultats de toutes les opérations de prospection précédemment réalisées, nous pourrions présenter notre site comme une zone dans laquelle :

- La surface est dominée par des couches latéritiques très épaisses dans la partie nord du site et plus particulièrement au nord-ouest. Plus minces dans la partie sud, elles disparaissent à certains endroits laissant presqu'affleurant des couches limono-argileuses ;

- La partie ouest qui comporte sous la latérite, des couches argileuses épaisses et compactes, contraste fortement avec celle est dans laquelle, les couches latéritiques semble presqu'en contact direct avec le socle qui remonte à cet endroit ;

- Il existe un petit bas-fond qui constitue la zone de départ du drainage des eaux vers une ravine principale situé plus loin au nord. L'origine de ce bas-fond ne semble pas être géologique (les images ERT n'y montrent pas une organisation particulière du socle) mais plutôt juste morphologique. Il paraît en effet plus correspondre à une entaille effectuée par l'érosion dans une partie sans doute fragile de la couche latéritique qui domine la zone.

Enfin, en évoquant les différentes facettes de la structure de notre site, nous avons fait peu cas de l'organisation de surface rencontrée : détails de l'occupation du sol, états de surface, etc. La raison est que notre site sur ces aspects, présente une certaine homogénéité. Le site étant complètement anthropisé, les sols sont tous dédiés aux pratiques culturales et sont de ce fait remaniés à des degrés divers. Les états de surface quasi similaires, sont limono-sableux, légèrement encroutés et intègrent beaucoup de graviers et matière végétale.

En décidant de réaliser un suivi de résistivité en carte sur un tel site, l'idée est de voir si les différents compartiments ci-après décrits possèdent chacun des caractéristiques hydriques propres qui influencent différemment l'infiltration. Nous faisons l'hypothèse que les différences d'aptitude à l'infiltration des compartiments vont se traduire par des variations de résistivité au cours de la saison hydrologique. Compte tenu de la profondeur de la nappe qui n'est pas très grande sur ce site (entre 2 m en pleine saison de pluie et 8 m en fin de saison sèche), nous avons, comme mentionné dans la partie méthode, décidé de mesurer sur les 7 à 8 premiers mètres du

terrain afin de nous focaliser sur les processus dans la zone non saturée. A cette profondeur d'exploration, les mesures vont donc surtout intégrer les couches latéritiques et argileuses (ou limono-argileuses) sous-jacentes.

4.2.2. Les résultats "time-lapse"

Le suivi de résistivité time-lapse s'est déroulé pendant l'année 2014 à trois périodes clés : en saison sèche, en début et fin de saison de pluie (*Cf. Figure 61*). Il a porté sur un suivi de résistivité (en carte EM 34 et coupe ERT) couplé à un monitoring de l'humidité du sol par sonde à neutron, des variations de niveaux statiques et conductivités de l'eau dans des piézomètres.

Tout comme sur le site sahélien, il s'est agit de vérifier les manifestations de l'infiltration sur les différents compartiments du site avec un accent particulier sur la zone de bas-fond dont on aimerait pouvoir comprendre également le rôle.

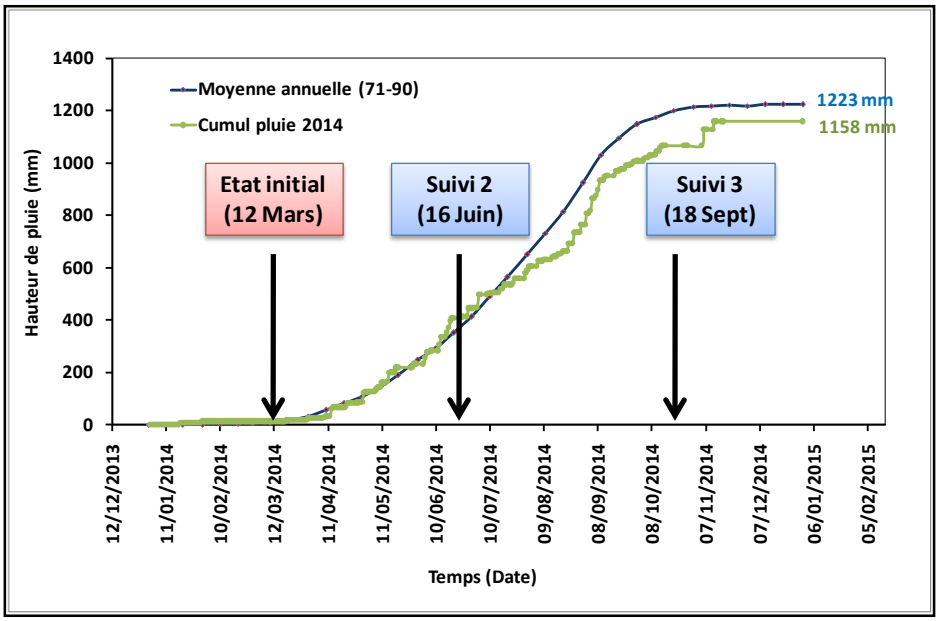


Figure 61: *Chronogramme des mesures du suivi temporel EM 34 et ERT. Les dates de mesures sont affichées sur le graphique de la pluviométrie de la saison afin de donner une idée de la quantité de pluie déjà tombée à chaque étape des mesures.*

4.2.2.1. Suivi en carte

Il s'agit d'un suivi de résistivité électromagnétique effectué à l'aide de l'EM34 en configuration dipôle horizontal (comme pour le site sahélien) avec une séparation de bobines de 10 m offrant une profondeur d'investigation de 7.5 à 8 m maximums. Les mesures sont prises à pas de 20 m sur des profils orientés ouest, est et séparés de 50 m.

Le suivi s'est effectué en trois étapes dont les dates sont précisées sur la *Figure 61*: une mesure d'état initial en mars suivi de deux autres mesures d'étapes en juin et septembre. Les résultats d'étape ainsi que les dynamiques de résistivités observées sont présentés ci dessous.

- *Etat initial*

Les mesures EM 34 pour l'état initiale ont lieu au mois de mars, période normalement la plus sèche de l'année (il avait néanmoins déjà plu 24 mm au mois de février). La *Figure 62* présente la distribution des résistivités apparentes après spatialisation par krigeage des valeurs mesurées. Tout comme les cartes précédentes, les gammes de couleurs choisies illustrent les mêmes tendances : couleurs chaudes pour les résistivités apparentes élevées et froides pour les résistivités apparentes faibles. La variation des couleurs suit une progression logarithmique. Enfin, les valeurs de résistivité apparentes présentées sur la carte sont issues de la conversion des mesures initiales de l'EM 34 qui sont des conductivités données en mS/m.

A première vue, l'aspect général de cette carte rappelle celle de 2003. La division du site en deux zones de résistivité contrastée (parties ouest et est) est d'avantage marquée. Cette nouvelle carte comporte en outre plus de détails qui se justifient par la densification des points de mesure (20 x 50 m au lieu de 20 x 100 m en 2003) mais aussi par la profondeur d'investigation plus faible (7.5 au lieu de 15 m comme en 2003) qui prend en compte seulement les couches superficielles dont l'organisation spatiale est plus variée. On notera aussi que la distribution des résistivités apparentes ne suit pas l'organisation topographique du site, les contours de résistivités n'étant pas du tout corrélés avec les courbes de niveaux affichées en filigrane en fond de carte.

La gamme de résistivité apparente mesurée va de 60 à 700 ohm.m avec une prédominance des valeurs résistantes : 85 % des données supérieures à 100 ohm.m. Avec une profondeur investiguée de 7.5 m en moyenne, seules les contributions des couches de sub-surface sont prises en compte par les mesures. Leur valeur ne correspond donc pas à la réponse de toute l'épaisseur des altérites telles que présentées sur les images ERT plus haut.

Pour donner les clés d'interprétation de cette carte, nous présentons à travers la *Figure 63*, les relations entre les valeurs de résistivité apparente mesurées et celles calculées par modélisation de la réponse des couches mises à contribution sur l'image ERT du profil P3 (voir localisation sur la carte en *Figure 62*). La courbe bleue correspond aux données de mesures directes sur le profil. A coté de celle-ci, la courbe rouge est composée de valeurs calculées par simulation de réponse instrumentale EM34 en utilisant les résistivités ERT à la verticale de chaque point. La concordance entre ces deux courbes valide non seulement les mesures directes mais témoignent également de la qualité de l'interprétation ERT qui a servi de support aux calculs.

La lecture de la *Figure 63* montre que les basses résistivités apparentes (inférieure à 150 ohm.m) correspondent à la contribution prépondérante des couches conductrices c'est-à-dire, à celle des couches argileuses sous les latérites. Les fortes résistivités apparentes en revanche (plus de 400 ohm.m), représente la contribution combinée des couches latéritiques et du socle quand celui-ci est très proche de la surface. Entre ces deux extrêmes, la multitude des valeurs intermédiaires résultent d'équivalences diverses entre résistivité et épaisseur de couche des horizons latéritiques et argileux.

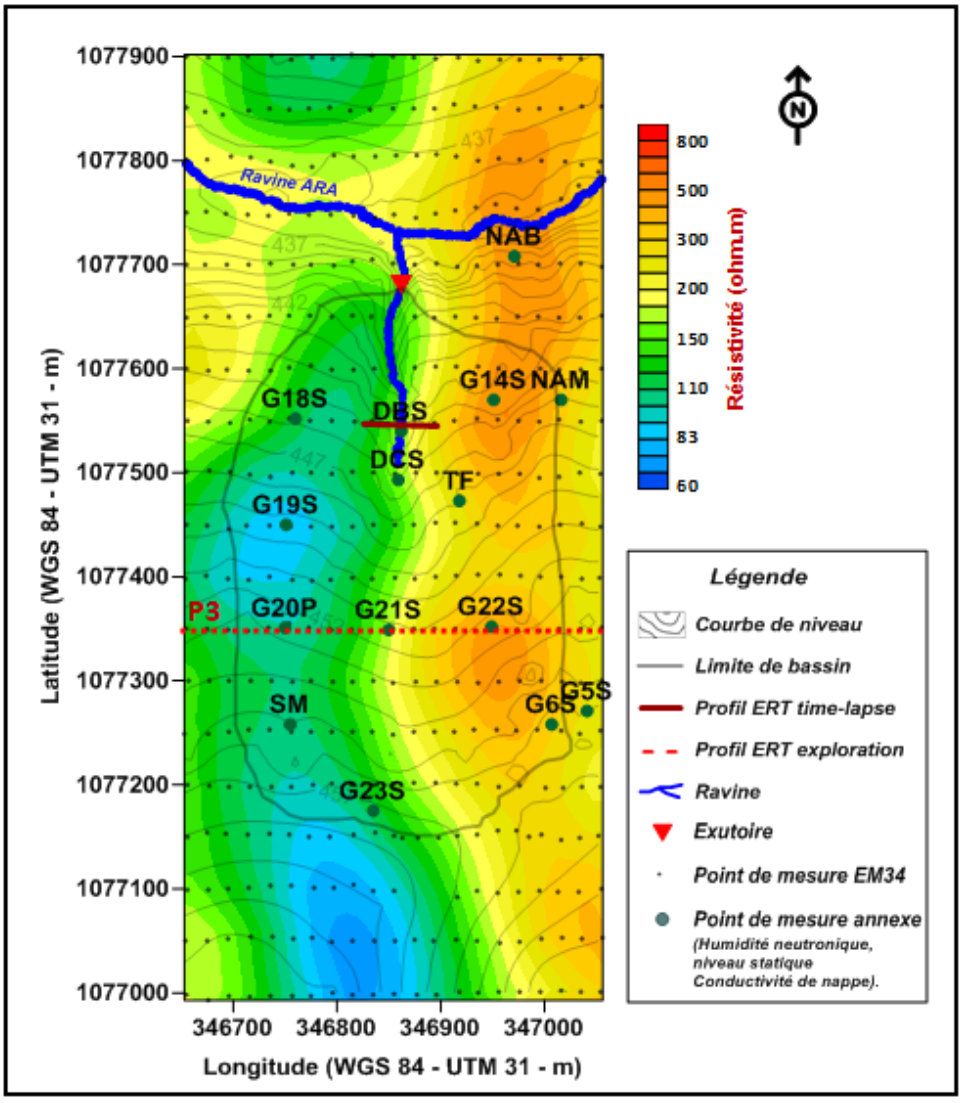


Figure 62: *Carte de résistivité EM 34 (DH - 10 m) du BV Parshall pour le mois de mars. Etat initial des mesures de suivi temporel.*

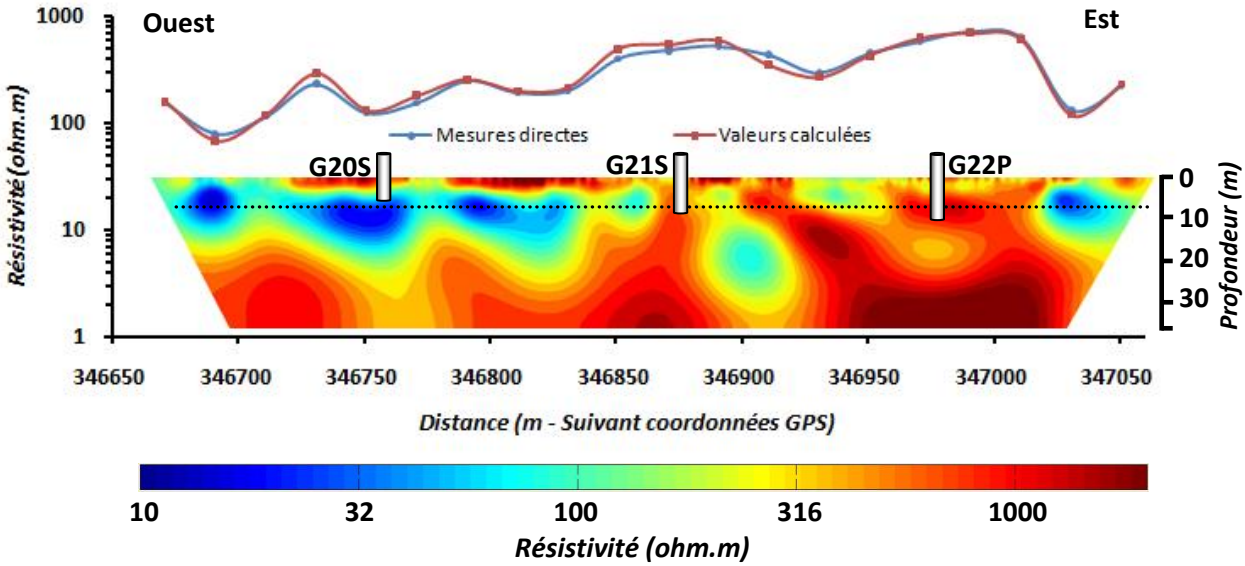


Figure 63: *Courbes comparées des valeurs mesurées et celles calculées par simulation numérique sur le profil ERT P3. La ligne en pointillé représente la profondeur d'investigation utilisée pour les simulations. La concordance entre les deux courbes (mesures directes et simulées) témoigne de la qualité des mesures prises sur le terrain et de celle de l'interprétation ERT.*

- *Résultats du suivi temporel*

A partir du mois de mars considéré comme l'état initial de l'observation, le suivi de la dynamique de résistivité au cours de la saison s'est fait à travers deux états : celui de juin et de septembre, en reprenant les mesures exactement aux mêmes points qu'en mars. La *Figure 64* illustre le résultat de ce suivi en deux images A et B.

La *Figure 64A* présente les états de résistivités apparentes pour les trois périodes mesurées afin de permettre une appréciation au plan spatial, de l'évolution de la dynamique en fonction de l'avancée de la saison. Cependant à première vue, ces cartes se ressemblent fortement. On distingue à peine une augmentation de la résistivité dans la partie nord-est du site en juin, une variation que l'on ne retrouve plus d'ailleurs dans la même zone sur la carte de septembre.

La *Figure 64B* présente la dynamique observée aux mois de juin et septembre en ratios (%) de baisse ou d'augmentation par rapport au mois de mars. Le calcul des ratios suit la méthode présentée précédemment par l'*Equation 19* (page 104). Les hausses de résistivité sont représentées en couleurs chaudes et les baisses en couleurs froides. Les zones vierges sur les cartes correspondent quant à elles aux variations très faibles (comprises entre 0 et 2% - gamme d'incertitude des mesures). De ces deux cartes, l'on peut faire les observations suivantes :

- En juin, on note une zone étendue d'augmentation de résistivité dans la partie nord du site, de part et d'autre de la ravine secondaire. Les augmentations y sont de 15% aux extrêmes ouest et est (au point NAM) du bassin, et plus faibles au centre (de

l'ordre de 3 à 5%) dans la zone de la ravine (DCS ou G21S). Un peu plus loin aux extrêmes sud-ouest et nord-est, se trouvent également de plus petites zones de hausse de résistivité. Les zones de baisse de résistivité quant à elles constituent de petites unités isolées visibles au sud, au sud ouest et surtout au nord, sur les berges de la ravine principale Ara. Comparativement aux hausses, les baisses enregistrées sont faibles. En dehors du point NAB sur la berge de la ravine Ara au nord est, ou elles atteignent 9 %, elles ne dépassent guère 5% dans les autres parties. Enfin, on note que les parties invariantes occupent tout de même une proportion non négligeable de la carte, mais ne semble pas être liées à une composante particulière du site ;

- En septembre, la configuration des zones dynamiques change nettement. On note en effet un recul prononcé des zones résistantes et au contraire, un renforcement des zones conductrices aussi bien au niveau de l'extension spatiale que de l'importance de la baisse de résistivité. Les fortes baisses concernent notamment les zones autour de la ravine principale (jusqu'à 30%) englobant également la ravine secondaire et l'extrême sud-est du site (15%).

Donner une interprétation quantitative à la dynamique est rendu difficile par la nature de la mesure de l'EM 34 qui est intégratrice. En effet, la mesure ponctuelle EM représente la contribution totale de plusieurs couches, chacune ayant sa résistivité propre. Or cette résistivité peut changer au cours de la saison sous l'influence de multiples facteurs (*Cf. Chapitre 2, Section 2.2.1*). Il s'agit de ce fait, d'une mesure ne pouvant pas d'emblée avoir une explication unique (problème d'équivalence) à moins de se trouver en présence d'un terrain homogène, infini (situation 1D parfait).

Sur notre site, les couches concernées par les mesures comme le montre la *Figure 60*, sont multiples et généralement constituées par des cuirasses et horizons gravillonnaires (latérite) épaisses surmontant des couches argilo-sableuses à argileuses. Dans quelques rares cas, la latérite absente est remplacée par un dépôt argileux mince. Les variations de résistivité qui sont enregistrées, traduisent de ce fait un changement d'état de ces couches.

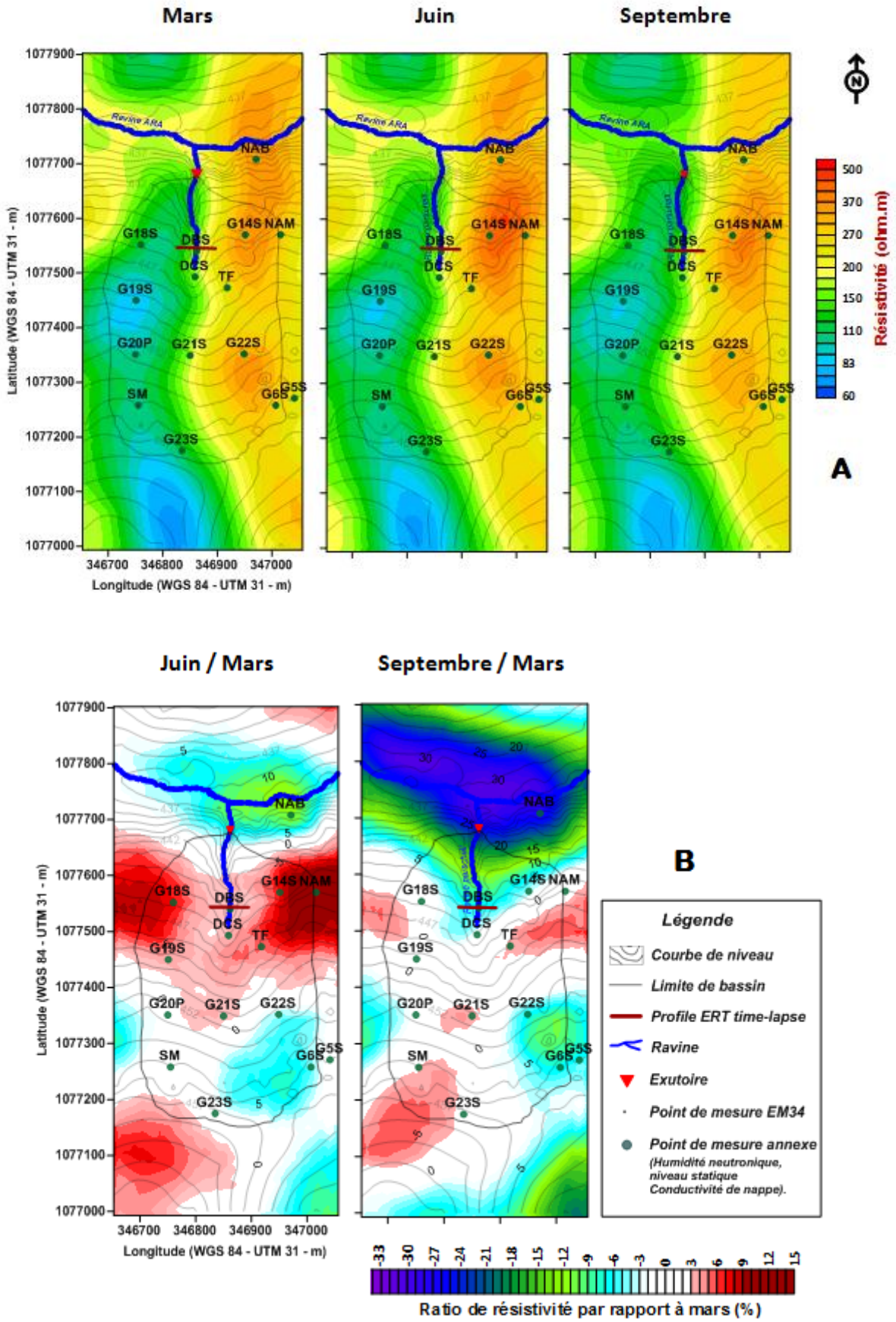


Figure 64: *Résultats du suivi temporel EM 34.* ***(A)****, Cartes de résistivité pour les mois de mars, juin et septembre.* ***(B)****, cartes des variations de résistivité (ratio) au mois de juin et septembre par rapport au mois de mars.*

En outre, nous avons connaissance des processus qui affectent les couches au cours de la saison des pluies. Il s'agit notamment de :

- L'infiltration généralisée à partir de la surface dont l'évolution vers les couches profondes est suivie par des mesures neutroniques effectuées dans les tubes d'accès prévus à cet effet. La *Figure 65* illustre à ce propos l'évolution de cette infiltration sur certains des points de suivi du bassin en l'occurrence à G18, 21, 23S et NAM. Les mesures neutroniques (en comptages/s) montrent que l'infiltration au mois de juin atteint déjà à certains endroits 3 m de profondeur (G18S) et qu'elle se poursuit jusqu'en septembre sur des profondeurs encore plus importantes (plus de 4 m à G23S). En pleine saison de pluie, elle donne parfois naissance à des nappes perchées dont l'eau est très résistante (G19S, *Figure 66*). Constituée donc d'une eau nouvelle (eau de pluie), l'infiltration depuis la surface engendre une augmentation de résistivité au niveau des couches latérites et argilo-sableuses (changement pouvant aller jusqu'au doublement de la résistivité) et au contraire, fait baisser celle des couches argileuses qui en passant de l'état peu humide à saturé deviennent très conductrices ;

- La remontée de la nappe profonde en fin de saison de pluie. La nappe sur le bassin au moment des mesures en mars se situe à des profondeurs voisines de 5 m (*Cf.* DBS*, Figure 65*) et sa descente se poursuit jusqu'au mois de juin ou elle peut atteindre 9 m (*Cf.* DBP, *Figure 72*). Nous pensons alors, qu'elle n'a été prise en compte par les mesures que partiellement en mars, et sans doute pas du tout en juin. Cette nappe a une résistivité d'environ 100 ohm mais connait au cours de la saison des apports d'eau nouvelle qui augmente sa résistivité (120 à 150 ohm.m ; voir illustration en G14S, *Figure 65*) ;

- L'état de saturation généralisée des couches en fin de saison de pluies. La remontée de la nappe, l'importance de la hauteur d'eau de pluie tombée depuis le début de la saison (autour de 900 mm) occasionnent à partir du mois d'août, la saturation des couches superficielles et la naissance de nappes perchées. Ces nappes perchées qui continuent à être alimentées par l'infiltration jusqu'en fin septembre, vident l'excédent d'eau dans les ravines et petits bas-fonds qui deviennent alors des zones entièrement gorgées d'eau.

Pour essayer de donner une explication aux variations observées en suivi temporel, nous avons combiné les informations ci-dessus pour modéliser les réponses de l'EM en simulant sur blocs

modèles, des situations pouvant correspondre à celles observées sur le site. Les calculs de réponse instrumentale sont faits grâce à un programme (PC LOOP) fourni par le constructeur.

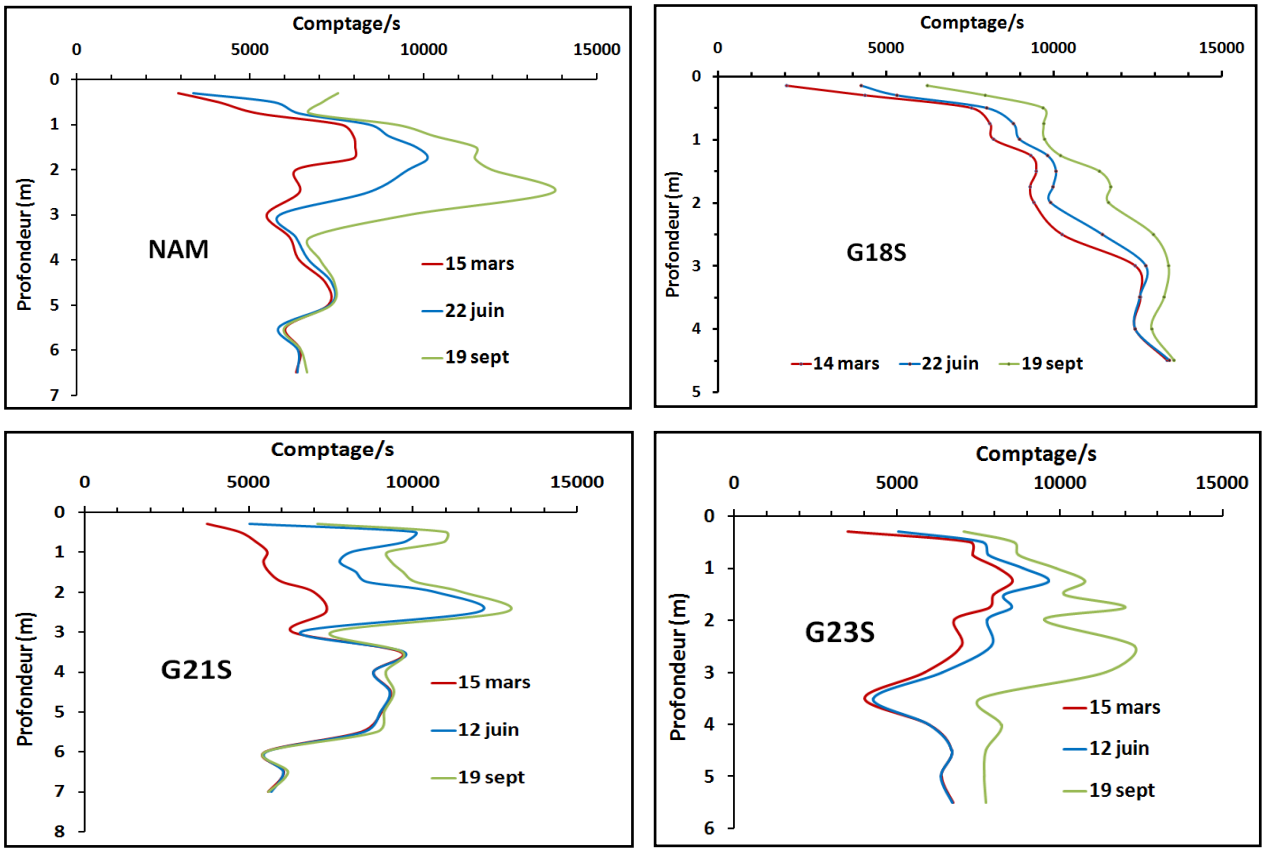


Figure 65: *Variations saisonnières des comptages neutroniques sur le BV Parshall: En Amont (G23S), au centre (G21S) et en aval (NAM et G18S).*

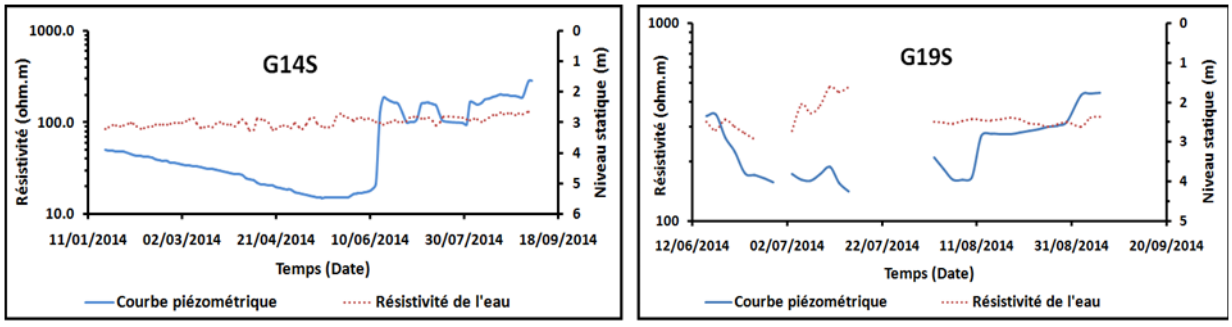


Figure 66: *Variations des niveaux statiques et résistivité d'eau pour la nappe profonde au point G14S et la nappe perchée au point G19S.*

Nous présentons dans la *Figure 67*, les résultats de ces simulations qui considèrent trois situations assez représentatives du site :

- Premièrement, nous partons de la situation observée au nord-est du bassin avec la hausse de plus de 15% de résistivité en juin. Cette zone est constituée d'une couche

latéritique épaisse surmontant une autre, argilo-sableuse. La *Figure 67A1* présente la situation en mars avant le début de la saison des pluies avec un bloc à deux couches (1500 ohm pour la latérite et 150 ohm.m pour la couche argilo-sableuse). Nous vérifions si l'augmentation de la résistivité apparente de 15% observée en juin peut être expliquée en considérant une infiltration qui ne concerne que la couche latéritique uniquement (3m d'épaisseur), tel que montré par le graphe G18S de la *Figure 65* au mois de juin. Pour cela, nous augmentons la résistivité de la couche latéritique de 100% (de 15600 à 3000 ohm.m) dans la *Figure 67A2*. La variation de résistivité apparente correspondante est seulement de 4%. Cette simulation montre qu'une variation élevée (100%) de la résistivité de la couche superficielle seule, ne génère que 4% de hausse de la réponse totale et ne peut donc pas justifier la valeur de 15% observée. Dans la *Figure 67A3*, nous simulons alors une infiltration plus profonde qui touche la partie supérieure de la couche argilo-sableuse sur 2 m avec une résistivité passant de 150 à 250 ohm.m. La réponse simulée montre une hausse de 14%, une valeur proche de celle effectivement observée sur le terrain par mesure directe. Ainsi, en se référant à cette modélisation, nous pensons que les fortes hausses de résistivité sont engendrées par des infiltrations profondes ayant atteint la couche argilo-sableuse sous la latérite. Cela est confirmé par le suivi neutronique en certains points comme au G18S (*Figure 65*) ;

- Deuxièmement, nous avons essayé d'expliquer comment la résistivité apparente pouvait diminuer de plus de 20% à certains endroits. Sachant que les sols à horizon superficiel argileux peu épais sont également présents sur notre site, nous simulons à travers les *Figures 67B1* et *67B2*, un cas d'humectation de cette couche argileuse. Nous faisons pour cela, passer la première couche (argile) épaisse de seulement 0,5 m, de 60 ohm.m à 24 ohm.m. La valeur simulée correspondante indique également une baisse de la résistivité apparente de 24%, comme on peut l'observer dans certaines zones de nos cartes ;

- Enfin, nous vérifions si une remontée de la nappe profonde en fin de saison (comme observé dans nos forages) a pu affecter les mesures de résistivité apparente lors du suivi temporel. Pour cela, nous simulons une situation qui utilise le bloc modèle A3 dont la dernière couche est envahie par la remontée de la nappe jusqu'à 5 m. La résistivité de cette partie envahie est fixée à 120 ohm, en concordance avec celle de l'eau, tel que observée au point G14S (*Figure 65*). Le résultat affiché dans la *Figure 67C2* montre un rapport de - 0,6%. Cette valeur qui est complètement à l'opposée de

celle simulée pour une infiltration profonde à partir de la surface (14%, cas A3) indique que les mesures EM ont été vraisemblablement sensibles à la montée de la nappe. Il apporte de ce fait en partie, une explication à la diminution des zones résistantes en septembre.

De ces simulations numériques, nous pouvons proposer l'interprétation qui suit de nos cartes:

- Les zones d'augmentation de résistivités apparentes observées sur la carte de juin correspondent à des parties ou la couche latéritique est imbibée par de l'eau nouvelle apportée par l'infiltration directe depuis la surface. A certains endroits, cette infiltration est assez profonde pour atteindre la couche argilo-sableuse sous-jacente. Les zones dans lesquels la résistivité apparente baisse, correspondent par contre aux parties ou la couche superficielle est argileuse. Celle-ci, en passant de l'état peu humide à très humide voire saturée, voient sa résistivité baisser. Cette baisse superficielle même faible, impacte suffisamment la mesure EM au point de masquer tout processus sous-jacent ;

- Le retrait des zones résistantes en septembre s'explique d'une part par la remontée du niveau de la nappe plus conductrice et d'autre part, par le degré de saturation particulièrement élevée des couches en cette période de la saison des pluies.

- Les zones restées constantes sur les cartes de juin et septembre ne peuvent pas être associées à des zones non dynamiques (l'infiltration étant généralisée sur le bassin). Elles peuvent correspondre et à des situations d'équilibre résultant de processus produisant des variations antagonistes de résistivité : augmentation de la résistivité de l'eau neutralisée par une variation de teneur en eau tout aussi élevée.

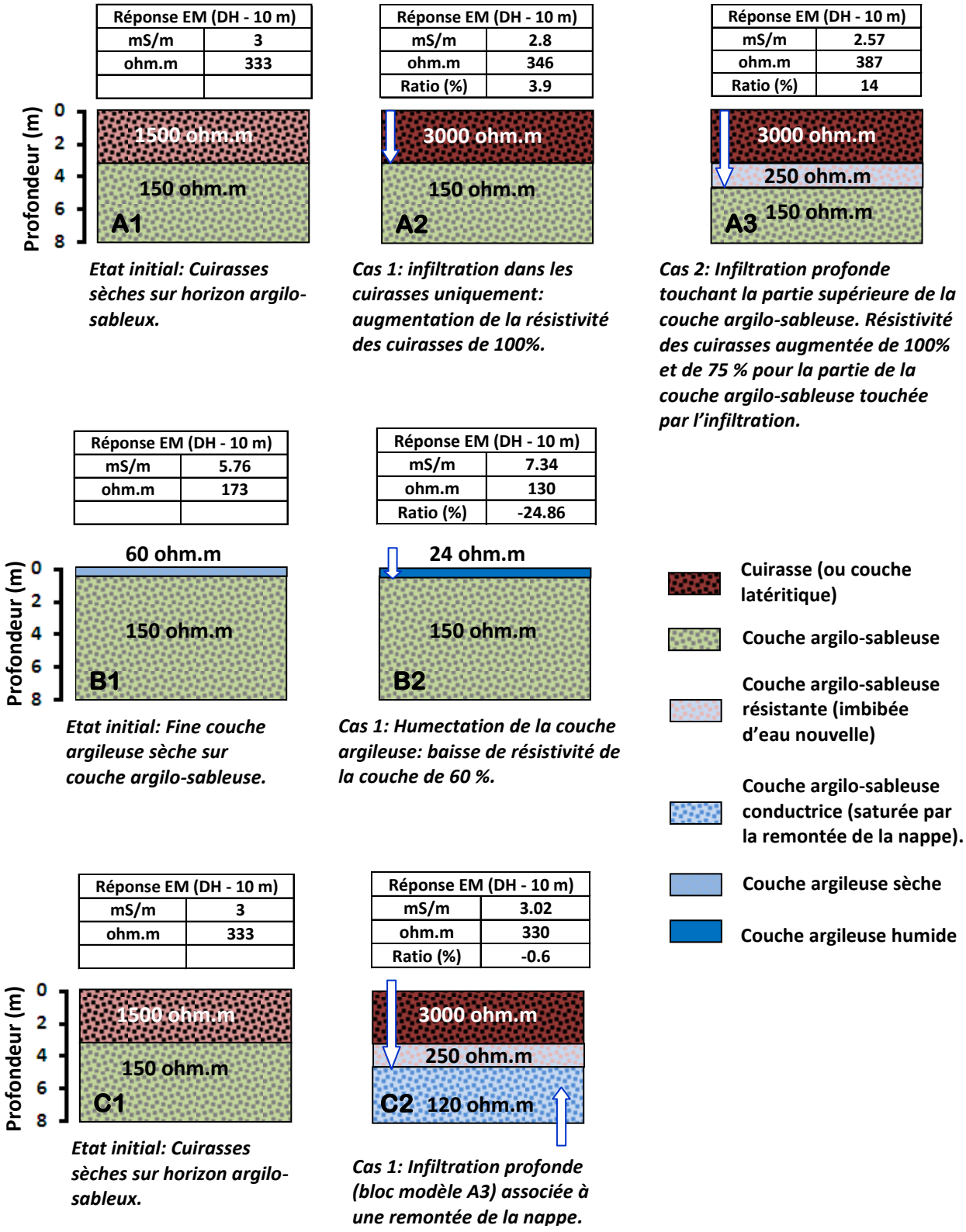


Figure 67: *Simulations numériques sur blocs modèles de quelques cas de variations de résistivité au niveau des couches de sol et leur réponse en mesures EM 34.*

Au-delà de ces conclusions que nous avons pu tirer en nous aidant de modèles numériques et de données annexes, il faut dire que l'interprétation des résultats de ce suivi en cartes restent partielles tant il est difficile d'attribuer le bon scénario à toutes les mesures qui ont été effectuées. Les résultats obtenus ne nous permettent donc que de répondre en partie aux questions qui nous ont été initialement posées.

En effet, si après la phase d'exploration nous pouvions être précis sur nature et la géométrie des composantes du sous-sol, il nous est impossible à la fin du suivi temporel de produire une carte avec les contours précis des zones préférentielles d'infiltration. On peut dire que les couches latéritiques jouent un rôle important dans l'infiltration, mais nous n'aurons pas été capables de donner leur extension sur les versants. De plus, le rôle du petit bas-fond du BV Parshall sur lequel nous étions questionnés, ne transparait pas clairement après ce suivi, d'où le besoin d'effectuer dans cette zone, un suivi spécifique en coupe à l'aide de la tomographie de résistivité (objet de la partie suivante).

Enfin, nous n'avons pas particulièrement fait cas au cours de ce suivi, de la dynamique de résistivité apparente observée dans la zone de la ravine principale. Cela s'explique avant tout par le fait que notre étude était consacrée au BV Parshall. Aussi, nous n'avons pas installé d'équipement spécifique dédié au suivi de cette zone, ni procédé à un suivi ERT en travers de la ravine. Néanmoins, à partir des données du seul dispositif situé à proximité de la ravine (NAB – *Figure 68*) et des valeurs de conductivité de l'eau de la rivière recueillies à l'exutoire du bassin (*Figure 69*), il nous est possible d'attribuer la baisse de résistivité observée en septembre dans les marges de la ravine à un fort effet de saturation. En effet, la courbe de résistivité des eaux de la rivière au cours de la saison, montre que celles-ci sont résistante (250 ohm.m avec des pics à plus de 700 ohm.m au cours des grosses crues) tout au long de la saison des pluies. Aussi, entre le mois de mars où la rivière est sèche et celui de septembre pendant lequel la rivière est gorgée d'eau résistante, la dynamique de résistivité devrait être à la hausse. Cependant, nous observons plutôt un fort effet inverse. L'explication la plus plausible à notre avis, vient de l'effet de la forte humidification des couches du sol qui prend le dessus sur celui de la résistivité de l'eau. Cette hypothèse est confortée par les données de sonde à neutron prises au point NAB (*Cf. Figure 68*). Les comptages neutroniques effectués montrent en septembre, une augmentation simultanée de l'humidité des couches aussi bien superficielles (jusqu'à 2 m), que profondes (2,5 à 7,5 m) par rapport au mois de mars. Cela est sans conteste le résultat de l'effet conjugué de l'infiltration depuis la surface et de la remontée de la nappe, deux processus qui ont conduit à la forte saturation des couches du sol.

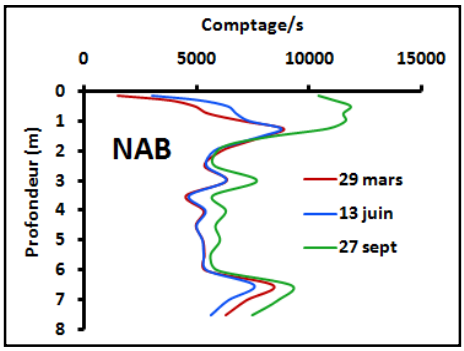


***Figure 69**: Variations des comptages neutroniques au point NAB au cours de la saison.*

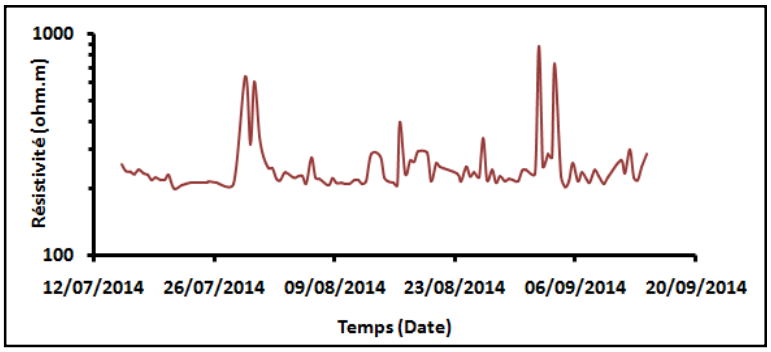


***Figure 68**: Variation des résistivités de l'eau de la ravine principale Ara pendant la période d'écoulement permanent.*

Comme on l'aura constaté, l'infiltration vue par la mesure EM34 est une combinaison entre la nature des formations superficielles et les phénomènes internes qui les affectent au cours de la saison. Les processus ne se manifestant pas de la même manière au cours de la saison, il est important pour leur détection d'effectuer les mesures à bonne date. Enfin, cette partie de notre étude montre à quelle point il est impossible d'interpréter avec fiabilité les cartes de suivi EM sans données annexes permettant de réduire les champs d'équivalences à prendre en compte.

4.2.2.1. Suivi en coupe

Pour pallier les incertitudes de la prospection EM et tenter d'en apprendre plus sur l'infiltration, nous avons décidé de nous focaliser sur le bas-fond lui-même grâce à un suivi en coupe ERT en travers de celui-ci. Le suivi ERT a été effectué à partir d'un dispositif constitué de 96 électrodes séparées de 1 m, disposées le long d'un profil qui traverse le bas-fond d'ouest en est. Ce profil long de 95 m, coupe transversalement la petite ravine qui draine le bas-fond (*Cf. Figure 55 et 56*). Ce dispositif est équipé en son centre par des forages qui tiennent lieu de piézomètre (DBP), de tube d'accès neutronique (DBS) et de puits de diagraphie de résistivité (T4).

Les données sur le dispositif ERT ont été acquises à l'aide d'un résistivimètre Syscal Pro exactement aux dates de suivi en cartes. Les résultats présentés proviennent d'inversions effectuées (comme expliqué dans la méthode) avec des combinaisons de données issues de plusieurs types de protocoles (Wenner et Pôle-dipôle).

- *Etat initial*

Les résultats des premières mesures effectuées en mars pour l'état initial sec sont donnés par la *Figure 70* composée de quatre images.

- La *Figure 70A* présente la section de résistivité calculée obtenue après inversion des données. La profondeur d'investigation est de 15 m et la gamme de résistivité est semblable à celle déjà observée sur ce site : 25 à 3000 ohm.m.

- Sur la *Figure 70B*, sont présentées les courbes comparatives entre les mesures de diagraphie au T4 et les valeurs de résistivités calculées extraites du panneau électrique à la verticale de T4. La courbe mesurée qui devait couvrir toute la profondeur du panneau s'est limitée à 2,5 m à cause d'un effondrement du forage. Les points mesurés sur la petite profondeur restante, confirment cependant l'existence du terrain conducteur sub-superficiel détectée par le panneau électrique ;

- La *Figure 70C* présente la traduction géologique du panneau électrique réalisée à partir des informations contenues dans le profil du forage DBP en *Figure 70D*.

De ces mesures, le sous-sol du bas-fond peut être décrit de la façon suivante :

- De la surface jusqu'à 2 - 3 m de profondeur, on distingue une couche latéritique de résistivité variant entre 1500 et 3000 ohm.m. Sur le terrain, la nature de cette couche est différente selon les versants. A l'ouest, elle est constituée de cuirasses épaisses en dalles ou gros blocs disloquées. A l'est par contre, il s'agit d'une couche gravillonnaire constituée de nodules ferrugineux et d'argile de couleur ocre. Au centre du bas-fond (à l'emplacement de la ravine) la latérite est moins épaisse et recouverte d'une mince couche argileuse (*Cf. Figure 70D*) ;

- En dessous de la couche latéritique, s'étend d'ouest en est une couche argilo-sableuse, d'épaisseur variable (plus épaisse aux extrémités du panneau qu'au centre) avec une résistivité moyenne de 150 ohm.m. Cette couche présente un aspect stratifié qui rappelle la structure des gneiss. Elle se compose en effet d'une alternance de petits bancs sableux et argileux. L'argilisation est particulièrement marquée à l'ouest avec l'intrusion latérale d'un banc de 25 ohm.m qui marque le début du grand horizon argileux que l'on retrouve dans tout le versant ouest du bassin. Ce type d'horizon argileux se retrouve également en petites zones isolées au centre (en dessous de T4) et à l'est du profil ;

- Enfin, en bas de panneau se trouve un substratum formé de gneiss de résistivité comprise entre 300 et 3000 ohm.m. Celui-ci est scindé en deux parties en son centre par une zone conductrice verticale qui semble correspondre à une altération préférentielle dans la roche. Le forage DBP qui traverse cette zone sur le côté montre qu'elle est constituée de débris sableux grossiers et friables.

Bien que petite taille, le bas-fond présente ainsi une structure de sous-sol assez complexe qui augure sans doute d'un comportement tout aussi différencié des couches qui la composent.

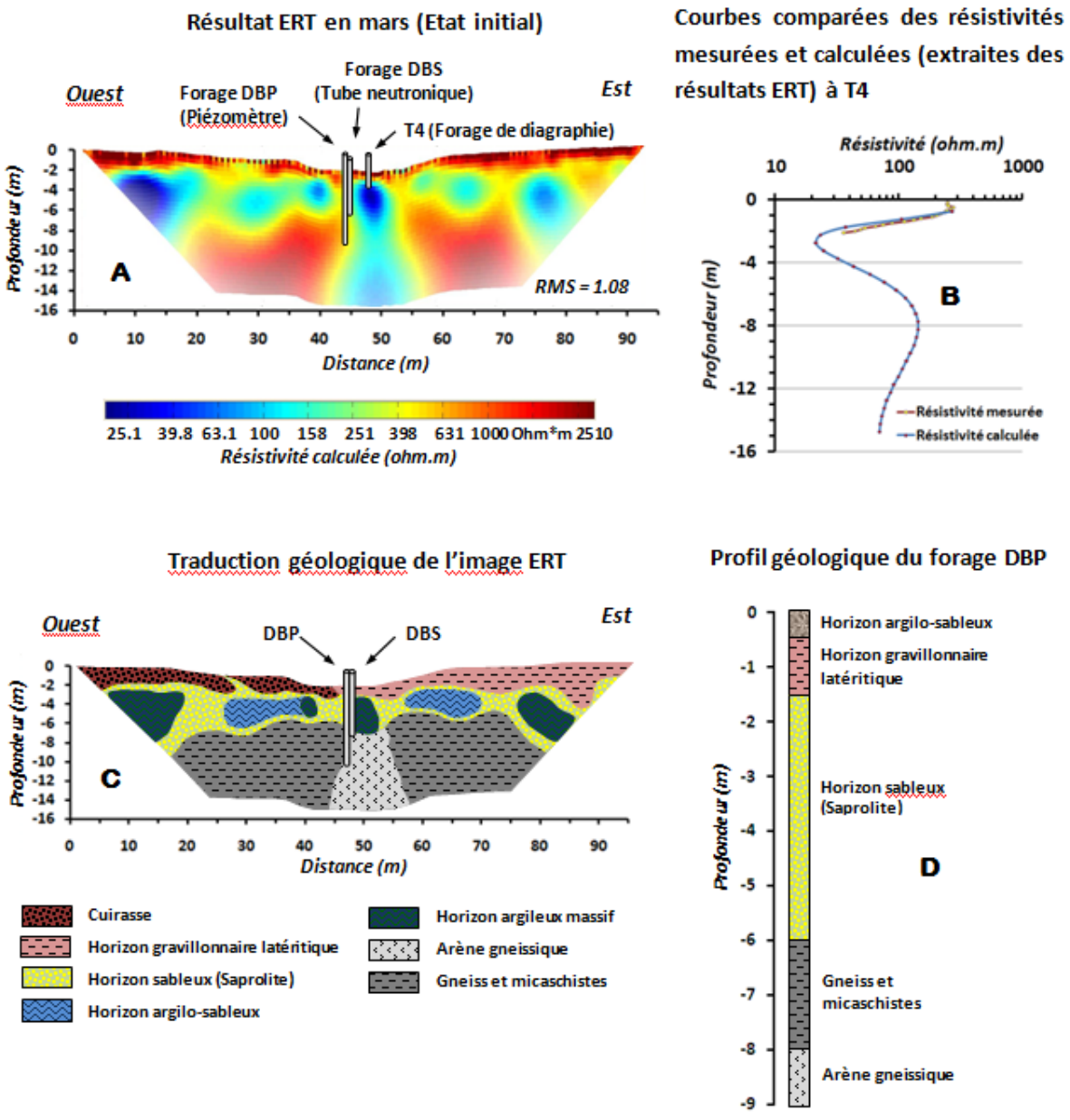


Figure 70: *Résultats des mesures ERT pour le mois de mars: Mesures initiales.* ***(A)****, section de résistivité calculée pour le mois de mars ;* ***(B)****, Validation des résultats ERT par comparaison des valeurs calculées avec celles de la diagraphie au point T4;* ***(C)****, Image interprétée de la section de résistivité calculée à partir des données du profil du forage DBP* ***(D)****.*

- *Suivi temporel*

La *Figure 71* présente les résultats du suivi de résistivité pour les mois de juin et septembre. A l'instar de la méthode appliquée pour le suivi en zone sahélienne, les inversions ont été faites en utilisant les résistivités calculées du modèle de mars comme modèle de référence. Sur la figure, les modèles calculés pour les deux mois sont présentés à gauche et les ratios calculés par rapport au mois de mars, à droite.

L'analyse de la *Figure 71* montre une évolution des résistivités au cours de la saison tel qu'il suit :

- Dans le mois de juin, les résistivités ne semblent pas avoir subi des changements significatifs. Les seuls qui existent portent surtout sur les horizons superficiels ou se succèdent latéralement des zones de hausse et de baisse de résistivité sur une profondeur de 50 cm à 1 m. Une petite augmentation peut être noté au centre du dispositif, en dessous des forages mais les valeurs observées étant en dessous du seuil de validité de nos calculs (10% pour l'ERT), elles ne peuvent pas être prises en compte ;

- En septembre, les variations de résistivités deviennent importantes et portent surtout sur des hausses. Cette dynamique est cependant différente selon les versants. Dans la partie ouest, il apparait une grande zone de hausse de résistivité qui va de la profondeur vers la surface à hauteur de 4 m, avec une connexion possible avec la surface à l'extrême ouest. Les hausses enregistrées y atteignent 20 à 30%. Au milieu du bas-fond, cette zone résistante est connectée avec une autre verticale, présentant de très forte hausse de résistivité (30 à 100%). Cet anomalie verticale en forme de bulbe va de la surface et descend jusqu'à la profondeur 7 m. Dans le versant est par contre, toute la partie profonde est invariante. On note cependant en surface (entre 2 et trois m de profondeur), l'apparition d'une zone résistante qui évolue latéralement pour se connecter à l'anomalie résistante au centre du bas-fond. Enfin, et tout en surface, on observe que les couches sur le versant ouest et au centre du bas-fond connaissent des baisses importantes de résistivité (30 à 60%), ce qui contraste avec la dynamique des résistivités en profondeur.

Après la mise en évidence les variations saisonnières de résistivité en coupe dans le bas-fond, nous vérifierons dans les paragraphes qui suivent, la cohérence de ces résultats ERT avec ceux affichés sur la carte EM dans la zone du bas-fond et tenterons de donner l'explication hydrologique permettant de justifier la dynamique observée.

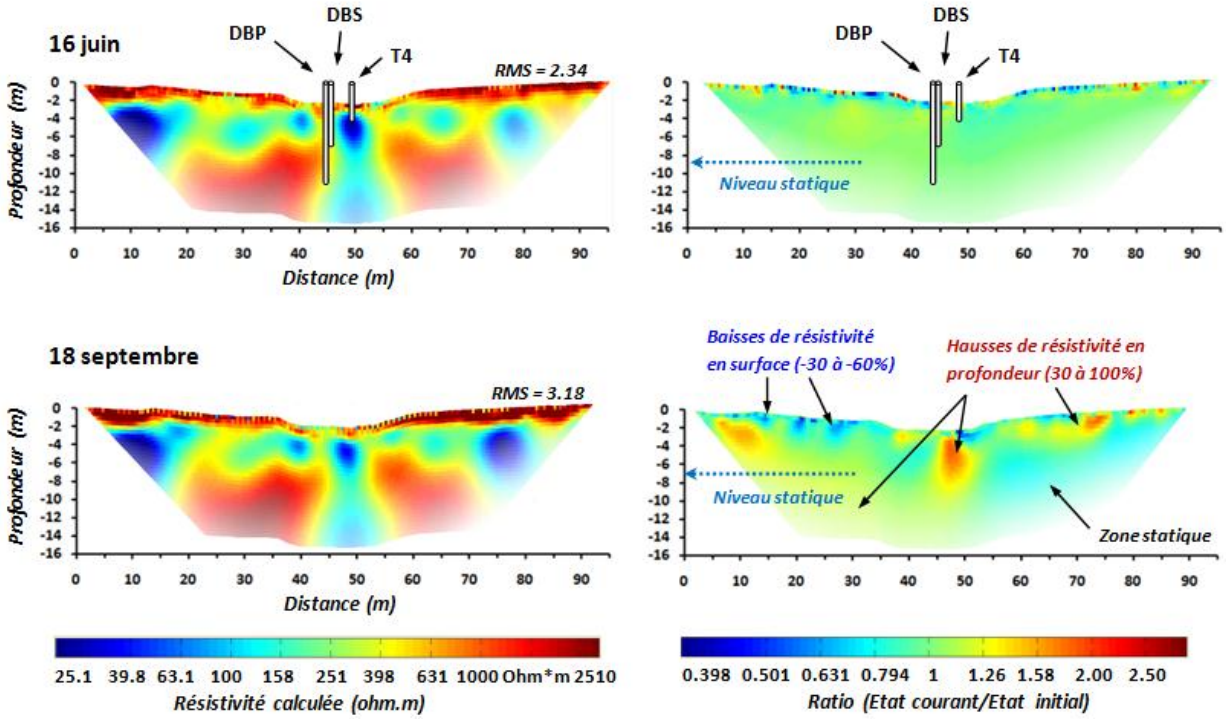


Figure 71: *Résultats ERT du suivi temporel saisonnier. A gauche, les sections de résistivité calculée pour les mois de juin et septembre. A droite, les ratios respectifs par rapport au mois de mars.*

Cohérence des données ERT avec la carte EM

La carte des rapports de résistivité apparente du mois de juin (*Cf. figure 63B*) montre à l'emplacement du bas-fond, une hausse de résistivité de l'ordre de 3 à 5%. Dans le même temps, les ratios de résistivités calculées sur la coupe ERT font apparaître des variations faibles et différenciées (hausses et baisses) qui n'affectent que les couches superficielles du sol.

La carte des rapports de résistivité EM, traduit cette situation de faible dynamique à double tendances dans laquelle, la réponse des couches résistantes est légèrement prépondérante par rapport à celles conductrices.

Sur la carte des rapports de résistivité apparente du mois de septembre par contre, on remarque que la zone qui englobe le profil ERT devient conductrice. Cela peut paraitre paradoxal au regard des résultats de la coupe ERT qui montrent de fortes hausses de résistivité au niveau des couches profondes et/ou de sub-surface. Pour comprendre ce paradoxe, il faut revenir aux blocs modèles présentés en *Figure 67B*. Nous avions alors, simulé la réponse d'une couche conductrice (24 ohm.m) superficielle mince (de seulement 0,5 m d'épaisseur) et montré à quel point sa réponse pouvait être prépondérante par rapport à celle résistante sous-jacente, pourtant nettement plus épaisse. Cette situation s'apparente à celle observée sur la coupe ERT du mois de septembre. Les couches conductrices superficielles affichées, présentent des résistivités voisines de 20 à 30 ohm.m pour des épaisseurs de 2 à 3 m. Le calcul de leur réponse montre qu'elles sont

suffisamment conductrices et épaisses pour masquer l'effet des hausses de résistivité enregistré au niveau des couches profondes.

La carte EM au niveau du bas-fond, présente donc en septembre, une situation qui rend seulement compte de l'état des couches superficielles qui sont conductrices.

Explication hydrologique de la dynamique observée

En se servant des données hydrologiques complémentaires que nous avons collectées, nous proposons dans cette partie une interprétation de la dynamique de résistivité observée qui aide à comprendre le fonctionnement au plan hydrologique du bas-fond.

Selon les résultats de notre suivi aussi bien en carte qu'en coupe, le bas-fond n'est actif en début juin que dans la toute proche surface. Les mesures de sonde à neutron effectuées à la date du 11 juin au point DBS et présentées dans la *Figure 72*, attestent effectivement de la faible infiltration dans le lit de la ravine à cette période (autour de 1 m). Cependant, on remarque que l'infiltration est rapidement à son maximum (en l'espace de deux ou trois semaines) vers la fin du mois de juin, suite à l'avènement de quelques averses. Le front d'infiltration atteint alors près de 3 m et le degré de saturation du sol semble rester quasiment le même jusqu'au mois de septembre (Courbe du 22 juin confondue à celle du 19 septembre).

Les données du mois de septembre révèlent la nature différenciée du fonctionnement du bas-fond selon les versants.

On remarque que l'apparition de la zone résistante sur le versant ouest, s'accompagne de la remontée de la nappe jusqu'à une profondeur de 6 m (son niveau était à 9 m en juin). La dynamique au cours de la saison de cette nappe est donnée en DBP sur la *Figure 72*. Elle est en outre détectée par la mesure de la sonde à neutron en septembre (décrochement de la courbe de septembre à la profondeur 7 m). On peut donc attribuer l'augmentation de résistivité dans cette partie du versant à l'envahissement des couches profondes par la nappe devenue résistante par l'apport d'une eau nouvelle. Cette hypothèse peut être corroborée par l'observation du processus en cours au centre du bas-fond. En effet, il y apparait également une zone d'infiltration représentée par la zone résistante en forme de bulbe. Les données du piézomètre DBP qui la traverse, révèle en plus de la remontée de la nappe à cet endroit, un accroissement de la résistivité de l'eau qui confirme l'apport d'une eau nouvelle (résistante). Du fait de la connexion entre le centre et l'ouest du bas-fond (prouvée par l'image ERT du suivi du mois de septembre), il apparait alors logique que toute la nappe paraisse résistante puisque diluée par l'eau nouvelle venue entre autre de la partie centrale du bas-fond.

Le fonctionnement de la partie est par contre est plus difficilement expliquée. Son caractère invariant reste quelque peu énigmatique. Une explication que l'on peut invoquer est la présence au dessus du substratum, d'une lentille argileuse. Vue en effet la structure stratifiée de la couche argilo-sableuse au dessus du substratum qui intègre bancs sableux et argileux, la présence d'une lentille argileuse qui bloquerait localement les infiltrations n'est pas à exclure. Elle expliquerait d'ailleurs très bien la forme de la zone résistante au dessus, qui semble montrer une circulation latérale de l'eau de la sub-surface vers le centre du bas-fond.

En somme, l'utilisation des mesures ERT pour présenter la dynamique des processus dans le bas-fond a été beaucoup plus porteuse que l'essai de cartographie de résistivité EM 34. Sans contredire le suivi en carte, elle permet de mieux restituer chaque processus dans le compartiment dans lequel il se produit. Cependant, tout comme pour la carte EM, la nécessité de disposer de données annexes pour confirmer l'interprétation des résultats reste un impératif.

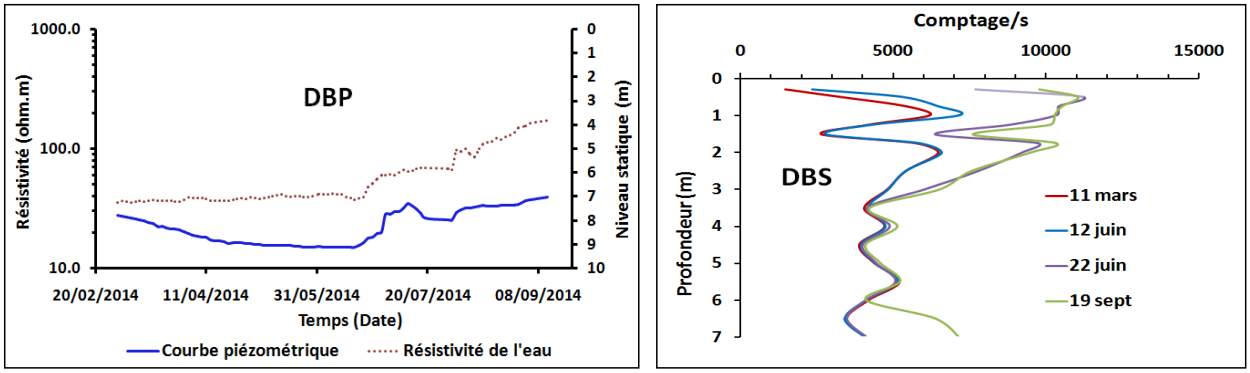


Figure 72: *Variations du comptage neutronique (**DBS**), du niveau de la nappe et de la résistivité de l'eau (**DBP**) au centre du bas-fond (point **DB**) du BV Parshall.*

4.3. Conclusion sur les études du site soudanien

Du point de vue de la mise en œuvre des mesures, le site soudanien s'est révélé en définitive plus pratique que celui sahélien. Pour les différentes prospections, aussi bien en cartographie de résistivité apparente EM 34 qu'en tomographie de résistivité électrique, la réalisation des mesures s'est avérée pratique avec les avantages offerts par le site : terrain dégagé en saison sèche, conditions de température plus favorables à l'utilisation de l'équipement, état du sol plus favorable aux mesures ERT (moins de problème de contact sol-électrodes). Les difficultés pratiques surviennent surtout en saison des pluies, période pendant laquelle les campagnes de mesures doivent composer avec les jours de pluies successives, la végétation abondante et la présence permanente d'eau dans les rivières et bas-fonds.

Concernant les résultats, le suivi temporel de résistivité a montré comme cela avait été pressenti, que le facteur important qui guide l'évolution saisonnière des résistivités du sol sur ce site, est avant tout celle de l'eau d'imbibition du sol et non les variations de teneur en eau comme au sahel. La saturation intervient ici en fin de saison de pluie et constitue un facteur d'atténuation des effets de la conductivité de l'eau du sol. Aussi, le choix des bonnes périodes pour le suivi est un impératif si l'on veut saisir la dynamique dans les détails de sa manifestation.

Par le suivi en carte de résistivité apparente EM, nos mesures ont pu faire ressortir les manifestations de l'infiltration sur certains compartiments du site notamment les cuirasses latéritiques. Cependant, pouvoir trouver une interprétation cohérente à toutes les variations de résistivité alors observées s'est avéré difficile du fait du nombre important d'équivalences (en termes de résistivité) pouvant permettre de les justifier. Dans notre contexte où le site de suivi est suffisamment équipé de capteurs annexes, nous avons réussi dans certains cas, à donner des justifications aux dynamiques enregistrées en nous servant des données complémentaires à disposition. Dès lors, on comprend que la réalisation d'un suivi dans un contexte ne disposant pas de données annexes se serait soldée par des résultats non vérifiables.

Le suivi de résistivité dans le bas-fond de notre petit bassin versant à l'aide de l'imagerie ERT a été plus simple dans la mise en œuvre ainsi que dans l'exploitation de données recueillies. Tout comme pour la zone sahélienne, le suivi ERT a permis de mettre en évidence une infiltration à partir du bas-fond et de ses versants. Ces infiltrations se traduisent par des augmentations de résistivité liées à l'apport d'eau nouvelle (eau de pluie moins minéralisée), qui affectent progressivement les couches du sol au cours de la saison des pluies. Cette dynamique de résistivité que nous avons pu mettre en relation avec les variations de teneur en eau du sol, nous a permis de monter l'existence d'infiltrations profondes à partir du bas-fond et de confirmer de ce fait, le caractère infiltrant de celui-ci.

Contrairement donc au contexte sahélien dans lequel les ravines de versants sont imperméables, les ravines de versant en zone soudanienne sont infiltrants et contribuent à la recharge de la nappe.

Chapitre 5 : SYNTHESE ET DISCUSSIONS

En l'entame de nos travaux de recherche, nous nous proposions d'apporter la contribution des méthodes géophysiques basées sur l'utilisation de la résistivité à l'amélioration des connaissances sur l'infiltration en zone de socle d'Afrique de l'Ouest. Il s'agissait concrètement de montrer la pertinence de l'utilisation du suivi temporel de résistivité dans la mise en évidence et la caractérisation des processus d'infiltration sous climats sahélien et soudanien. Pour ce faire, nous avons opté pour une démarche méthodologique axée sur l'étude de deux sites choisis sous climat sahélien et soudanien, à partir desquels nous avons appliqué les mêmes techniques d'investigations géophysiques. A travers cette démarche, il s'est agit de montrer pour chaque site, les conditions de mise en œuvre des méthodes de prospection et les résultats obtenus en fonction des types de mesures réalisés avec pour objectif final, de répondre aux questions relatives aux processus d'infiltration qui affectent spécifiquement ou non chaque site.

A l'issue de nos investigations dont les résultats ont été exposés dans les chapitres précédents, nous faisons ici le bilan de la pertinence de nos choix méthodologiques et donnons la contribution de nos résultats à la levée des verrous initialement présentés sur les modèles conceptuels de fonctionnement hydrologique en zone sahélienne et soudanienne de socle.

5.1. Bilan sur les choix méthodologiques

5.1.1. Pertinence des sites d'études

- *Choix des zones climatiques*

Nos sites d'études ont été choisis pour représenter deux climats majeurs de la zone de socle ouest africaine : le climat sahélien et le climat soudanien, sous lesquels la connaissance des processus d'infiltration et de recharge des aquifères constitue de nos jours un enjeu de taille dans la gestion à moyen et long terme de la ressource en eau souterraine. Les résultats de nos mesures montrent que sous ces deux climats, les processus d'infiltration se manifestent différemment et à des endroits également différents. Ainsi, le choix de ces zones climatiques qui sont assez différenciées nous a permis de confirmer une diversité des processus en fonction du facteur climatique.

En outre, il nous a permis de passer en revue les verrous existant sur les modèles de fonctionnement hydrologiques correspondant aux dits climats pour en lever définitivement certains.

Enfin, le choix de nos sites a comblé nos attentes sur le plan de la dynamique de l'état des sols sous chaque type de climat. En effet, nos hypothèses de base pour le choix du paramètre à mesurer (la résistivité) et le type de mesure envisagé (suivi temporel), reposait sur une évolution de l'état des sols en saison des pluies spécifiques aux contions climatiques locales: fortes variations de la teneur en eau du sol en zone sahélienne et variations de la conductivité de l'eau d'imbibition du sol en zone soudanienne. Ces hypothèses se sont révélées exactes sur nos sites car nos mesures ont confirmé que le marqueur de la résistivité en zone sahélienne est la teneur en eau tandis qu'en zone soudanienne, le premier facteur influençant les variations de résistivité en début de saison est la variation de conductivité de l'eau du sol, l'effet de la teneur en eau intervenant beaucoup plus tard en fin de saison.

- *Choix spécifique des sites de mesures et échelle d'exploration*

Nos zones d'exploration correspondent toutes à des bassins versants expérimentaux de petite taille (1 km^2 maximum) sur lesquels se déroulent des recherches en dehors de celles géophysiques. Même à cette échelle, le niveau de complexité de la géométrie des sous-sols et des processus qui s'y déroulent (comme le montrent nos mesures), est tel qu'il se pose la nécessité de réaliser des mesures à pas très fins. Dans ce contexte, choisir des zones de prospection de petite taille comme nous l'avons fait, garantie la possibilité de réaliser une prospection avec un maillage optimisé et dans un délai de travail court (1 à 2 jours). Cela a particulièrement son importance pour les mesures de suivi temporel qui doivent être suffisamment rapides pour donner un état de tout le site avant l'intervention de changements majeurs liés par exemple à la survenue d'une pluie.

Lors de la présentation de nos résultats, nous avons montré a qu'elle point il était nécessaire pour l'interprétation des mesures de disposer de données hydrologiques complémentaires. Le choix des sites géophysiques sur des bassins versant déjà instrumentés pour d'autres études, a donc été judicieux pour répondre à ce besoin impératif de données annexes sans lesquelles l'exploitation des mesures géophysiques est rendue difficile voire sujette à des interprétations hasardeuses.

Enfin, nos sites d'études correspondent à des milieux ruraux avec des paysages où se côtoient végétation naturelle et parcelles de cultures. Ils sont représentatifs de l'environnement semi-naturel qui caractérise la plupart des zones hors ville. Ce choix rend possible une certaine extension de nos résultats aux milieux dits "naturels" sous les deux types de climats si l'on s'en tient aux types d'unités géomorphologiques qui ont été pris en compte sur nos sites : versants, ravines secondaires et bas-fonds notamment.

5.1.2. Pertinence du paramètre de mesure

Le choix de la résistivité comme paramètre de mesure dans le cadre de cette étude se justifie par deux grands avantages que celle-ci présente :

- Elle est mesurée à travers des protocoles simples qui autorisent à la fois la réalisation de mesures discriminantes au plan spatial (cartes) et vertical (coupes de résistivité), ce que beaucoup d'autres méthodes ne permettent pas.

- Elle est liée à la teneur en eau du sol et à la conductivité de l'eau d'imbibition, une propriété qui a été exploitée sur nos sites à travers l'utilisation du suivi temporel, pour la mise en évidence du processus d'infiltration pendant la saison des pluies.

En réalité, la résistivité est connue pour être un paramètre pertinent pour les investigations de sub-surface et nous avons exploité certains de ses avantages dans la conduite de nos travaux.

5.1.3. Mise en œuvre des mesures géophysiques

La mise en œuvre des mesures ERT et EM 34 sur le terrain avaient pour objectif l'obtention de données en coupes et en cartes au temps t_0 et en suivi temporel. Pour obtenir les résultats qui satisfassent nos attentes, les mesures ont été effectuées à travers certaines techniques et précautions dont nous rappelons ici à nouveau les aspects importants.

- *Mesures EM 34*

Pour les besoins de notre étude qui visait l'exploration des couches superficielles du sol dans le sahel comme dans le soudanien, la configuration de l'équipement choisie est celle en dipôle horizontal. Mise en œuvre en mode exploration en carte en saison sèche, cette configuration révèle bien l'organisation spatiale du sous-sol avec une qualité comparable à d'autres techniques de prospection par la résistivité (traîné électrique par exemple).

Sur le site sahélien de haut de versant (Katchari -BV0), les mesures EM 34 (réalisées avec 40 m d'écartement entre bobines) font ressortir une organisation spatiale des résistivités dont le degré de précision peut s'apprécier en se référant à la carte de résistivité électrique réalisée sur le même site. Pour le même pas de mesures utilisé (50 x 50 m) et des profondeurs d'investigation semblables (25 m), les deux cartes présentent en effet des zones de résistivités apparentes aux contours similaires. Le même constat peut être également fait sur le site soudanien où il existe une ancienne carte d'exploration EM 34 dont les résultats pour le site du BV Parshall sont comparables à ceux présentement obtenus.

Aussi, l'utilisation de l'EM 34 pour l'exploration en carte au temps t_0, en plus d'être assez pratique et rapide (comparée au traîné électrique par exemple), a permis d'obtenir un bon rendu de l'organisation spatiale des terrains sur nos sites. Dans des conditions de terrain qui sont comparables aux nôtres, son utilisation pour l'exploration ne pose donc aucun problème. Deux précautions sont justes à observer : la définition d'un maillage de points optimisé pour l'exploration en carte (orientation des profils, pas de mesures) et le contrôle de la dérive de l'instrument à intervalles réguliers sur une base fixe.

Pour les mesures en suivi temporel, nous avons pris des précautions supplémentaires mais qui ne sont pas de l'ordre de la mesure elle-même. Il s'agit plutôt de dispositions d'ordre protocolaire liées à la mise en œuvre du suivi temporel. Celles-ci concernent :

- Le balisage du terrain pour la reprise des mesures exactement aux mêmes points. Il s'agit d'une disposition préparatoire importante pour le suivi temporel dont l'omission compromet la réalisation des futures mesures du suivi. Le suivi temporel se prépare ainsi dès le début de la campagne de mesure (t_0) et ne se décide pas en milieu de saison quand les premières mesures ont déjà été effectuées avec un repérage approximatif.

- Le choix de la configuration de l'équipement. Utilisé dans le cadre de nos investigations en VCP, l'EM 34 est dans cette position particulièrement sensible aux conducteurs superficiels. Cette situation comme nous l'avons montré dans nos résultats, peut être gênante dans les conditions de mesures en zone sahélienne où les sols possèdent des horizons superficiels argileux qui une fois humides, deviennent très conductrices et masquent la réponse des couches profondes. Il s'agit d'un problème qui peut être anticipé en modélisant l'impact des couches conductrices afin d'évaluer le risque du choix de configuration et de modifier celui-ci si nécessaire. Nous recommandons fortement cette opération de modélisation avant la réalisation des mesures de suivi temporel sur sites sahéliens.

- *Mesures ERT*

L'exploration en coupe est le domaine dans lequel, l'évolution matériel a beaucoup impacté la qualité de la mesure, la rapidité d'acquisition et de traitement des données, des avancées dont ont profitées nos dernières mesures en site soudanien.

Sur nos sites, les mesures ERT ont été dans un premier temps utilisées pour l'exploration préliminaire en coupe. La réalisation de ces coupes ERT matérialisées par des sections de

résistivités calculées représentant l'organisation du sous-sol, est absolument nécessaire pour la connaissance de la géométrie de celui-ci. C'est également une étape sans laquelle l'interprétation des cartes de résistivité apparente est impossible.

Les mesures d'exploration préliminaire en ERT de nos sites, ont été effectuées à l'aide de dispositifs Wenner alpha et Beta en 64 électrodes que nous avons déplacé plusieurs fois sur un profil quand celui-ci était long (profils du site sahélien). L'espace inter-électrodes utilisé était de 4 m, une taille qui permet le déploiement d'un long dispositif couvrant rapidement les distances et offrant une grande profondeur d'investigation (30 à 40 m). Si ce choix nous a permis d'obtenir des coupes jugées acceptables pour la description de la structure du sous sol, nous avons tout de même observé une erreur d'estimation de l'épaisseur des couches, souvent présent sur les sections de résistivités calculées. Aussi, avons-nous réduit tout de suite la distance entre électrodes lorsqu'il s'agissait de réaliser les mesures de suivi temporel.

Tout comme pour les mesures EM 34, les mesures ERT en suivi temporel ont fait l'objet de prises de dispositions particulières :

- En zone soudanienne, elles ont été réalisées avec un dispositif unique de 96 électrodes placées au travers du bas-fond à étudier et laissées sur place tout au long de la saison des pluies pour les besoins de reprise des mesures. Les données acquises on été de bonne qualité grâce à l'utilisation du résistivimètre Syscal Pro, peu sensible aux problèmes de contacts sol-électrodes. Avec sa capacité de prise en charge de 96 électrodes, l'utilisation de ce résistivimètre nous a permis de traverser le bas-fond avec un dispositif composé d'électrodes séparées de 1 m, essentiel à l'obtention d'une image bien définie du sous-sol ;

- Sur le site sahélien du bas-fond de Dangadé par contre, le résistivimètre utilisé était le Syscal R2 avec un nombre d'électrodes par dispositif limité à 64. Pour traverser toute la zone de la mare large d'environ 100 m, nous avons opté pour un dispositif unique avec électrodes en 2 m d'écartement enterrées à 5 cm sous la surface du sol. Ce choix était un compromis entre le besoin de couvrir la section de la mare sur toute sa largeur, la nécessité d'avoir une profondeur d'investigation qui atteigne le substratum rocheux et la conservation d'une bonne résolution des couches du sous-sol à explorer. Dans la présentation de nos résultats, nous faisions mentions de la conséquence de ce choix sur la précision de la section de résistivité calculée, notamment sur l'estimation de l'épaisseur des couches ;

- Enfin, toutes les meures de suivi temporel ERT ont été effectuées à l'aide de quatre protocoles (Wenner Alpha et Beta, pôle-dipôle forward et reverse) suivant les recommandations des études antérieures qui attestent de l'amélioration des résultats d'inversion par l'utilisation de jeux de données issues de plusieurs types de protocoles.

Toutes ces options de mise en œuvre des mesures ERT ont permis d'obtenir des données de bonne qualité constatées au moment des calculs d'inversion. En comparaison aux données du site soudanien, celles du site sahélien sont de moindre qualité (densité de mesures plus faible) liées à l'écartement plus grand entre électrodes (2 m au lieu d'un mètre comme sur le site soudanien) mais également aux conditions de mesures : sol très sec en saison sèche, contraste de résistivité élevé entre les couches superficielles et celles profondes, équipement de mesure moins performant.

Dans l'ensemble, l'ERT s'est révélé adapté à l'exploration de la géométrie du sous-sol comme à la réalisation du suivi temporel sur les deux sites. Sa mise en œuvre n'a pas exigé de dispositions particulières. Moyennant quelques précautions d'installation des dispositifs de mesures : respects de la géométrie du dispositif (écartement entre électrodes) et vérification des contacts sol-électrodes, les mesures ont pu être rapidement exécutées surtout lorsqu'elles étaient faites à l'aide d'un résistivimètre Syscal Pro à 96 électrodes comme sur le site soudanien.

- *Conclusion sur la mise en œuvre des mesures géophysiques*

Au regard des types de mesures qui étaient envisagées dans le cadre de notre étude notamment le suivi en carte et en coupe, nous pouvons dire à la fin des campagnes de prospection que le matériel dont nous disposions est adapté aux mesures qui étaient prévues. Il a été relativement facile d'utilisation en zone sahélienne comme soudanienne malgré l'existence de certaines contraintes propre à chaque site (problèmes de contacts au sahel, densité importante de végétation et de parcelles de cultures en zone soudanienne).

Il faut signaler que nous avions tout de même connaissance de la pertinence de l'emploi de nos équipements pour des mesures ciblant des objectifs comme ceux de notre études et dans des conditions de terrains qui étaient celles de nos sites. Aussi, les difficultés attendues n'étaient pas prévues au niveau de la mise en œuvre des mesures mais plutôt au niveau du traitement et de l'interprétation des données.

5.1.4. Traitement et présentation des données

- *Données en carte*

Les données en cartes (mesures ponctuelles de résistivités apparentes électriques ou électromagnétiques) ont été spatialisées en utilisant la méthode du "Krigeage" qui est l'option de calcul d'interpolation de notre outil de traitement graphique (Surfer) permettant de joindre un variogramme.

Pour la présentation des résultats, deux types de cartes ont été proposées :

- Les cartes des contours d'anomalies de résistivité apparente qui servent à l'illustration de l'organisation des résistivités à chaque étape des suivis;
- Les cartes de rapports normalisés de résistivité apparentes (*Cf. Equation 19*) qui traduisent la dynamique par rapport à l'état dit initial (t_0).

L'introduction des variogrammes dans les calculs d'interpolation que nous avons effectuée, répond au besoin de privilégier l'expression des tendances générales au détriment des effets prononcés de certaines valeurs isolées. Les conséquences graphiques de son introduction ont été variables en fonction du type de données à illustrer :

- Sur la présentation des contours d'anomalies de résistivité apparentes à partir des mesures ponctuelles prises sur le terrain, l'effet graphique de l'introduction des variogrammes dans le calcul d'interpolation n'est quasiment pas visible. Cela s'explique d'une part, par le fait que les organisations de résistivité apparente sur les sites sont assez simples et d'autre part, par la densité optimisée des points de mesures qui permettent la bonne restitution de ces organisations. Pour illustrer uniquement les contours de résistivités apparentes avec le nombre de points de mesures que nous avions, l'utilisation des variogrammes ne s'imposait donc pas vraiment.

- Pour l'illustration des rapports de résistivité apparente en suivi temporel par contre, son utilisation a été nécessaire. Elle a permis de faire ressortir les tendances majeures à partir des variations observées sur chaque point tout en évitant la surreprésentation des pics isolés de variation. Cela a entrainé de facto, l'introduction d'un lissage dans les données et la perte d'information au niveau de certains points.

Les résultats en carte qui ont été présentés ont ainsi été obtenus à partir d'une méthode de calcul d'interpolation qui lissent les données dans une certaine proportion avec des impacts peu visibles

sur les contours des anomalies de résistivité apparente mais un peu plus prononcés sur ceux des rapports de résistivité montrant la dynamique saisonnière.

- *Données en coupe*

Les données en coupes sont celles pour lesquelles le mode de traitement a été d'une importante capitale. Le recours aux bonnes pratiques recommandées par les études antérieures sur les inversions de données ERT a été la base du succès des traitements qui ont été réalisés. Outre le choix des paramètres d'inversion, la prise de certaines dispositions supplémentaires ont été nécessaire pour l'obtention des meilleurs résultats selon le type d'inversion.

Pour les données ERT en mode exploration, les inversions réalisées à partir de la combinaison de deux jeux de données (Wenner Alpha et Beta) ont été suffisantes pour parvenir à une bonne représentation de la géométrie du sous-sol de nos sites.

Pour les données de suivi temporel, la prise des précautions commence d'emblée dans le traitement des données des mesures t_0. Ce modèle initial qui doit servir de référence aux calculs en inversion time-lapse a été contraint au maximum par:

- L'utilisation pour l'inversion de 4 jeux de données issus de quatre protocoles différents (Wenner Alpha et Beta ; pôle-dipôle forward et reverse) ;
- L'introduction de données de forage pour contraindre les limites des couches ;
- La fixation des valeurs de résistivité pour les zones de résistivité connue.

Ajoutés aux paramètres d'inversion préalablement testés et validés, l'application des ces contraintes supplémentaires a permis l'obtention de modèles t_0 avec des erreurs mathématiques faibles (RMS < 3%) et un rendu graphique traduisant assez bien la réalité du terrain.

Enfin pour l'inversion en mode time-lapse des données des suivis mensuels successifs, nous avons pu confirmer l'intérêt du découplage des interfaces non interactives : front d'infiltration superficielle, zone de contact mare-sol.

L'ensemble des résultats issus de ces traitements ont été présenté suivant les modèles conventionnels :

- Sections de résistivité calculée pour les panneaux en mode exploration ou time lapse t_0 ;
- Sections de rapports de résistivité (état final/ état initial) pour les résultats de dynamiques saisonnières.

A l'issue de la phase de traitement de nos données ERT, nous avons pu valider l'intérêt de la mise en pratique de toutes les précautions et mise en garde citées dans les études antérieures au sujet du traitement des données ERT aussi bien en mode indépendant (***t_0***) qu'en "Time-lapse". Nous les recommandons alors à notre tour pour le traitement des données ERT notamment à partir du logiciel que nous avons utilisé (***DC2DInvRes***) et qui est d'accès gratuit sur internet.

- *Données complémentaires*

Concernant les données hydrologiques complémentaires ayant servi à l'interprétation de nos mesures géophysiques, nous n'avons pas jugé nécessaire de leur appliquer un traitement particulier. Elles ont été utilisées telles des données qualitatives pour justifier des observations ou expliquer des manifestations de processus dans une étude qui n'a pas de visée quantitative. Aussi, nous avons choisi de les illustrer sous forme de graphes montrant des tendances similaires ou opposées à celles observées par les mesures géophysiques.

En revanche, il nous semble pertinent de rappeler ici leur importance dans l'interprétation des résultats géophysiques qui a eux seuls ne suffisent pas à la bonne compréhension des processus étudiés.

5.2. Résultats géophysiques et implications méthodologiques

Au vue des résultats géophysiques obtenus lors de cette étude, nous pouvons désormais répondre aux questions sur l'infiltration qui nous étaient précédemment posées et donner parallèlement la contribution de chaque méthode géophysique utilisée à l'obtention des différents résultats.

- *En zone sahélienne*

Nos mesures en carte sur le BV0 qui est un site de haut de versant, ont montré que les variations saisonnières de résistivité apparentes étaient très faibles et exclusivement provoquées par l'humidification des premiers centimètres (10 à 20 cm) des couches superficielles argileuses. Nous déduisons ainsi de ce suivi, que les versants ainsi que les ravines de versants sur ce bassin, sont imperméables. Cette conclusion est corroborée par les travaux de Descloitres et al (2008) qui y a également réalisé un suivi sur zone plus restreinte. Cette imperméabilité généralisée est sans doute la conséquence conjuguée d'états de surface peu favorables (surfaces encroutées dominantes) et la présence de couches argileuses superficielles très épaisses.

A partir de ce premier résultat, on peut recommander que la recherche de zone d'infiltration dans le sahel se focalise sur d'autres unités géomorphologiques que les hauts de versant. L'on pourra privilégier les bas-fonds qui sont connus pour être plus favorables.

Pour suivre d'ailleurs cet apriori, nous avons mené des investigations sur le site de Dangadé qui est une zone de bas-fond. Nos recherches y ont porté sur une mare temporaire avec un suivi saisonnier ERT qui a mis en évidence l'existence d'une infiltration indirecte à partir d'une des berges de la mare. Les images de suivi mensuel montrent qu'elle se traduit par des baisses de résistivité (due à l'augmentation de la teneur en eau) à travers des couches résistantes (plus sèches). Elle est circonscrite aux berges de la mare et ne touche pas les versants. Par ailleurs, nous avons pu constater que l'infiltration y est suffisamment profonde pour atteindre la nappe car les données piézométriques collectées ont montré une remontée de celle-ci. En revanche, les mesures ERT n'ont pas permis de mettre en évidence les passages de l'infiltration des couches superficielles vers celles profondes. C'est l'une des questions à laquelle notre suivi ne répond pas précisément. Plusieurs hypothèses existent mais restent à vérifier : infiltration à partir d'un autre endroit de la berge, d'une autre mare voisine ou plus lointaine.

En résumé, l'utilisation de l'ERT pour le suivi des infiltrations dans les bas-fonds est pertinente. Le suivi ERT permet de distinguer en effet la dynamique des résistivités générées par les variations de teneur en eau dues à l'infiltration dans des couches préalablement sèches. Comme ce fut le cas pour notre étude, il est possible que tous les chemins de l'infiltration de la surface vers la profondeur ne soit pas visible à partir du suivi d'un unique profil ERT. Une des solutions pour résoudre ce problème pourrait consister à la cartographie de l'extension spatiale de la zone d'infiltration pour essayer de la suivre à plusieurs endroits avec un dispositif un peu plus optimisé que le notre (dispositif en 96 électrodes espacées de 1 m ou moins). Enfin, il sera impératif de disposer de capteurs complémentaires (humidité du sol, niveaux piézométriques et conductivité des eaux du sol) qui permettront de valider les dynamiques de résistivités observées.

- *En zone soudanienne*

Le suivi de résistivité apparente en carte sur le site soudanien a mis en évidence l'existence d'une dynamique assez complexe. En effet, sur toute l'étendue de notre site, l'infiltration est généralisée mais elle se traduit différemment en fonction de la nature des formations superficielles (présence de cuirasse ou non) et de la topographie (ravine de versant, ravine principale).

Nos mesures ont montré qu'il était possible de connaitre l'extension de chaque zone dynamique à travers la réalisation de cartes de résistivités apparentes en suivi temporel en EM34. Cependant, l'interprétation des cartes de suivi est rendue difficile parce qu'aux résultats présentés peuvent correspondre plusieurs explications (nombre élevé d'équivalences de résistivité). Aussi, doit-on avoir recours non seulement à de nombreuses modélisations mais également, à des données extérieures (niveaux piézométriques, humidité du sol, conductivité des fluides d'imbibition) comme guides d'interprétation.

L'utilisation de l'EM34 pour une cartographie en temps t_0 pour la reconnaissance des structures du terrain comme en suivi temporel pour l'étude des infiltrations est possible en zone soudanienne. Pour des raisons pratiques, on préfèrera la configuration en VCP qui ne présente pas de problème de sensibilité ici (les couches superficielles du sol sont souvent résistantes) et qui facilite le passage des zones particulièrement boisées ou cultivées.

Avant toute opération de suivi temporel EM34 cependant, il sera impératif de s'assurer de disposer de données hydrologiques complémentaires sans lesquelles l'interprétation des cartes de suivi sera pratiquement impossible.

Les résultats du suivi ERT dans la ravine secondaire nous ont permis de savoir qu'en plus d'être directes, les infiltrations en zone soudanienne étaient profondes et atteignaient la nappe. Ce suivi confirme aussi qu'en plus des versants, les ravines secondaires et les petits bas-fonds constituent des zones d'infiltration préférentielle. L'utilisation de l'ERT pour le suivi des infiltrations dans ces unités géomorphologiques est également pertinente. Contrairement à la zone sahélienne, on pourra observer que la dynamique saisonnière de résistivité est ici surtout influencée par les changements de conductivité de l'eau du sol liés notamment aux dilutions par l'infiltration de l'eau de pluie.

Moyennant donc quelques préalables, l'utilisation de l'ERT tout comme la cartographie EM donnent de bons résultats en zone soudanienne. Les cartes de suivi EM sont certes difficiles à interpréter mais elles peuvent constituer des documents de base à des explorations plus ciblées par d'autres méthodes géophysiques ou hydrologiques. Pour le suivi de l'infiltration au plan vertical, l'utilisation de l'ERT est parfaitement adaptée surtout lorsque l'on dispose de quelques données hydrologiques complémentaires pour l'interprétation.

5.3. Perspectives

En complément de la présente étude, nous proposons ici en perspectives quelques pistes de recherche qui pourraient être envisagées dans le futur et qui contribueraient d'une part à combler les lacunes de notre démarche méthodologique, et d'autre part à répondre à des questions laissées en suspend dans cette thèse.

L'un des premiers apports pourrait concerner la mise en œuvre des mesures EM sur site soudanien. Dans les résultats de suivi en carte que nous avons présenté au niveau de ce site, nous mettions en avant le rôle des formations superficielles sur l'infiltration. A ce sujet, nos mesures EM 34 ne sont pas suffisamment discriminante puisqu'elles intègrent la réponse des altérites sur une épaisseur de 7 à 8 m. Or sur cette épaisseur, il existe plusieurs couches ayant chacune sa propriété propre et dont il aurait sans doute fallu montrer le rôle exacte. Cependant, nous avons été confrontés à une limite instrumentale de l'EM 34 qui ne peut mesurer moins profond que dans la configuration qui avait été choisie (VCP, 10 m). Pour obtenir des mesures plus discriminantes en surface, des mesures supplémentaires à l'aide de l'EM 31 dont l'écartement entre bobines est plus petit (3 m) pourraient être réalisées. En utilisant l'EM 31 dans ses deux configurations possibles (VCP et HCP), le suivi offrirait alors des cartes de prospection en profondeur d'investigation de 2 et 4 m qui viendraient compléter celle de l'EM 34 en 7 m de profondeur d'investigation. Les cartes obtenues permettraient alors d'illustrer les variations spatiales de résistivité apparente depuis la surface jusqu'à la profondeur de 7 m et parallèlement permettre de présenter au plan spatiale, le transit de l'eau de la surface vers les couches profondes.

Outre ce premier apport, l'on pourrait envisager également des essais de calage entre les valeurs de résistivités et celles de la teneur en eau du sol. Nous pensons qu'il ne sera pas possible d'utiliser directement la loi d'Archie à cause de la présence en proportion assez considérable de l'argile dans tous les sols qui ont été étudiés (en zone sahélienne comme soudanienne). Néanmoins, il serait intéressant de tenter le calage des résultats ERT avec les humidités mesurées à l'aide de la sonde à neutron, avec pour objectif de passer de l'information qualitative que nous avons présentée à de la donnée quantitative qui rendrait compte des volumes d'eau engagées dans les processus décrits. Cela passera sans nul doute par des améliorations à apporter aux inversions des données ERT (nouveaux tests avec les paramètres d'inversion, changement de logiciel d'inversion, création d'un programme spécifique d'inversion correspondant à la nature et qualité des données disponible) pour l'obtention de résultats qui soient les meilleurs possibles pour permettre de valider ou non la faisabilité du calage avec les données d'humidité.

Dans le même ordre d'idée, une comparaison de nos résultats avec ceux d'autres études quantitatives pourrait être également envisagée. Il faut dire à ce sujet que sur notre site soudanien, il a été déjà entrepris un suivi de variations des stocks d'eau du sol à l'aide d'une autre méthode géophysique basée sur la mesure des signaux gravimétriques (Hector et al, 2013). Le suivi gravimétrique ayant été réalisé au niveau de certains points de mesures d'humidité neutronique de notre site, nous avons alors tenté une comparaison des résultats avec ceux du suivi de résistivité apparente en carte aux mêmes points. Cette première confrontation a permis d'observer une cohérence entre augmentation de résistivité et stock d'eau à certains points, mais pour la plupart des points, les résultats divergeaient. Nous n'avons pas poussé plus loin cet exercice parce qu'il a été confronté à un problème méthodologique majeur : la valeur de résistivité apparente EM en plus d'être complexe (jeu entre conductivité et teneur en eau), correspond ici à l'effet de l'infiltration, seulement sur les 7 premiers mètres du sol (profondeur d'investigation de l'EM 34 dans la configuration utilisée). La donnée gravimétrique par contre, porte sur le signal du stock total de l'eau, abstraction faite de la profondeur. Aussi, si cette comparaison peut être intéressante, elle nécessite avant quelques ajustements méthodologiques.

Enfin, nous suggérons d'approfondir les études sur le rôle des mares dans la recharge des aquifère en zone sahélienne. Certains pays comme le Burkina possèdent en effet d'innombrables retenues d'eau et barrages sous lesquels passent des fractures. Si le rôle de recharge de ces barrages pouvait être confirmé par des suivis géophysiques et/ou piézométriques à partir de forages plus ou moins distants, cela offrirai une solution d'implantation de point de prélèvement d'eau souterraine dont la pérennité serait plus ou moins garantie par le bon niveau de remplissage des ouvrages de stockage d'eau de surface. Cependant, nous sommes conscients que cela passe également par la résolution au préalable de certains problèmes techniques et pratiques : nature des dispositifs à utiliser, mode de mise en œuvre, gestion des capteurs sous l'eau, méthode de quantification de la recharge.

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de notre étude, nous pouvons tirer les conclusions suivantes sur l'utilisation du suivi de résistivité en carte et en coupe appliquée à l'étude de l'infiltration sur les sites sahélien et soudanien:

- L'ERT en mode suivi temporel est un très bon outil 2D pour l'étude des processus d'infiltration à travers les couches profondes à la fois dans la région sahélienne et soudanienne, à condition de bien définir les paramètres d'inversion de données. Pour améliorer les résultats de l'inversion, une attention particulière devrait être accordée à la prise des mesures sur le terrain:

    - Choix de la plus petite distance possible entre les électrodes (0.5, 1m) pour garantir l'obtention d'une bonne résolution de l'image 2D du terrain. L'espacement de 2 m, choisi pour les mesures au Burkina (compromis entre les limites matériels et les besoins de l'étude) s'est révélé peu optimisé quand il s'est agit d'effectuer les calculs d'inversion à l'aide de grilles finement définies (cellules de calcul de 0 ,25 m^2);

    - Acquisition de jeux de données multiples à l'aide de plusieurs types protocoles (Wenner Alpha et Bêta, pôle-dipôle arrière et en avant) qui serviront à améliorer les résultats des futures inversions par l'utilisation de combinaisons de données variées.

- Les résultats ERT une fois confrontés aux données extérieures (Piézométrie et sonde à neutrons) ont été assez faciles à interpréter. Ils ont montré clairement les différences dans le processus de recharge sur les deux sites étudiés.

Sur le site du sahélien, l'infiltration est indirecte et a lieu dans les bas-fonds et plus précisément au niveau des mares temporaires. Les résultats ERT montrent qu'elle se traduit par l'apparition de zone de faible de résistivité sous forme de panache dans les couches antérieurement résistantes. Ce phénomène affecte les couches superficielles jusqu'à une profondeur de 6 m et contribue à la recharge de la nappe profonde dont on peut observer la remontée dans les piézomètres au cours de la saison des pluies. Cependant, nous n'avons pas pu montrer clairement les zones de passage de l'eau des couches supérieures vers celles profondes et les possibles explications que nous avions sont restées au stade d'hypothèses : passage de l'eau par des canaux trop petits pour être détectés par notre dispositif, canaux d'infiltration profonde en dehors de notre dispositif.

Dans la zone soudanienne, l'infiltration est généralisée et affecte des couches entières. Deux situations se présentent alors :

- Des augmentations de résistivité des couches superficielles jusqu'à la nappe liées à une dilution de l'eau initiale du sol par celle de la pluie beaucoup plus résistante (effets de conductivité) ;

- Des zones de baisse de résistivité dans lesquelles l'effet de la teneur en eau du sol est prédominant.

Pour bien appréhender la dynamique de ce processus qui est à double tendance, il est important d'effectuer les mesures de suivi à bonne date. En effet, si l'influence de la conductivité de l'eau sur la résistivité est plus visible en début de saison de pluie, elle est ensuite masquée en fin de saison par l'effet de la saturation généralisée des couches.

- La cartographie de résistivité EM pour localiser les zones potentielles d'infiltration est également possible. Dans cette étude, nous avons utilisé un conductimètre EM 34 dans une configuration VCP. Cette configuration qui est adaptée à l'exploration en surface, présente cependant l'inconvénient d'être très sensible aux couches conductrices superficielles. Aussi, nous ne la recommandons pas pour le suivi temporel dans les conditions de terrain sahélien où les couches superficielles argileuses prédominantes, deviennent particulièrement conductrices dès le début de saison de pluie. Les résultats de notre suivi en carte sur le site sahélien de haut de versant (BV0) en est la parfaite illustration. En revanche, le suivi EM sur site soudanien donne de bons résultats. En effectuant les mesures à bonne date et en disposant de données complémentaires pour l'interprétation des cartes de suivi, on pourra y mettre en évidence les variations des résistivités liées au processus de dilution des eaux du sol par celle de la pluie.

- En fin de compte, l'utilisation de la résistivité électrique et électromagnétique apporte une contribution non négligeable dans la localisation et la caractérisation des processus d'infiltration dans les deux zones climatiques que nous avons étudiées. Elle nous a permis de confirmer la manifestation différenciée de l'infiltration en fonction de la zone climatique et cela a été rendu possible parce que notre hypothèse de base sur la dépendance de la résistivité avec un marqueur principal sur chaque site (saturation pour la zone sahélienne et conductivité de l'eau pour la zone soudanienne) s'est révélée exacte. En confirmant les différences de modes de recharge des nappes sous les deux types de climat, les résultats de cette étude participent à la prise en compte au niveau publique des choix spécifiques à opérer pour l'installation, la protection et la gestion des points de prélèvement de l'eau souterraine en fonction des zones climatiques.

REFERENCES

Albergel, J., Lamachère, JM., Lidon, B., Mokadem, A., Van Driel, W., 1993. Mise en valeur agricole des bas-fonds au sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. *Rapport final du projet CORAF-R3S. Ouagadougou, Burkina Faso, CIEH*, 335 p.

Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Society of Petroleum Engineers – Transaction of the AIME, Volume 146*, pp 54 – 62.

Arora, T., Ahmed, S., 2011. Time Characterization of recharge through complex vadose zone of a granitic aquifer by time-lapse electrical resistivity tomography. *Elsevier – Journal of applied geophysics 73*, pp 35 - 44.

Auclair, A., Lasserre, F., 2013. Aménagements, politiques et conflits sur l'eau en Afrique de l'Ouest. *VertigO – Volume 13, Numéro 2, septembre 2013,* 20 p.
http://www.vertigo.revues.org/13994 ; DOI : 10.4000/vertigo.13994

Azontonde, H. A., 1991. Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone (Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991). IAHS Publ. no. 199, 1991,* pp 249 - 258.

Boucher, M., Favreau, G., Descloitres, M., Vouillamoz, J. M., Massuel, S., Nazoumou, Y., Cappelaere, B., Legchenko, A., 2009. Contribution of geophysical surveys to groundwater modeling of a porous aquifer in semiarid Niger: An overview. *C R Geosciences 341 (2009)*, pp 800 - 809.

Boulet, R., Fauck, R., Kaloga, B., Leprun, J.C., Riquier, J., Vieillefon, J., 1971. Carte pédologique à 1/5 000 000 de l'Afrique de l'Ouest avec notice. *Atlas International de l'Ouest Africain*, *Ed OUA.*

Casenave, A., 1998. Dynamique des milieux de savane sèche au Burkina Faso : dégradation des systèmes écologiques et conséquences sur le cycle de l'eau. *Rapport préliminaire : analyse de la pluviométrie. Documents internes de l'IRD, Ouagadougou, Burkina Faso,* 49 p.

Casenave, A., Valentin, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne: Influence sur l'infiltration. *Editions de l'ORSTOM - Collection Didactique, Paris*, 231 p.

Callegary, J. B., Ferre, T. P. A., Groom, R. W., 2007. Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone Journal, 6 (2007),* pp 158 - 167.

Carlier, Ph., Favin, H., Léger CH, 1992. Etude de la recharge naturelle et artificielle des nappes de bas-fonds de la région de Bidi. *ORSTOM – BRGM, Revue 34447, janvier 1992*, 66 p.

Chapellier, D., 2000. Prospection électrique de surface. *Cours de géophysique – Résistivités électriques, 2000 – 2001. Université de Lausanne – Institut Français du Pétrole,* 99 p.
https://www-ig.unil.ch/pdf/doc_pro/pro_f.pdf

Chapellier, D., Mari, J-L., 2000. Principes de base. *Cours online de géophysique. Université de Lausanne – Institut Français du Pétrole,* 99 p.
https://www-ig.unil.ch/pdf/doc_res/res_f.pdf

Charette, M. A., Smith, W. H. F., 2010. The Volume of Earth's Ocean. *Oceanography*, *june 2010, Volume 23, N°2*, pp 112-114.

Clément, R., 2010: Etude du suivi des injections des lixiviats dans les massifs de déchets: combinaison entre méthodes géophysiques et simulation hydrodynamique. *Thèse de doctorat – UJF Grenoble I, LTHE, 2010,* 251 p.

Clément, R., Descloitres, M., Gunther, T., Ribolzi, O., Legchenko, A., 2009. Influence of shallow infiltration on time-lapse ERT: Experience of advanced interpretation. *Elsevier - CR Geosciences 341*, pp 886 - 898.

Comte, J. C., Cassidy, R., Friel, C., & al., 2010. Contribution of geophysical methods at catchment-scale to validate and refine hydrogeological conceptual models of Irish complex hard rock aquifers. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, H13D-0987, AGU, Washington, DC*.

De Marsily, G., 2003. Importance of the maintenance of temporary ponds in arid climates for the recharge of groundwater. *Elsevier - CR Geosciences 335*, pp 933 - 934.

Defossez, M., 1958. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la boucle du Niger. *Thèse, Université de Strasbourg. Mémoires du BRGM, 13 (1962),* 174 p.

Descloitres, M., 2010. Aquifères, recharges et transferts d'eau en zone non-saturée: Caractérisation par spatialisation et suivi temporel géophysique. *Dossier HDR, LTHE,* 251 p.

Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troquer, Y., Albouy, Y., 2003. Study of infiltration in a Sahelian gully erosion area using time-lapse resistivity mapping. *Elsevier – Catena 53,* pp 229 – 253.

Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troque,r Y., Thiebaux, J. P., 2007. Study of water tension differences in heterogeneous sandy soils using surface ERT. *Elsevier – Journal of applied geophysics, 64 (2008)*, pp 83 – 98.

Descloitres, M., Séguis, L., Legchenko, A., Wubda, M., Cohard, J. M., 2011. The contribution of MRS and resistivity methods to the interpretation of actual evapo-transporation measurements: A case study in metamorphic context in north Bénin. *Near Surface Geophysics, Vol 9 – N°2, april 2011*, pp 187 – 200.

Desconnets, J. C., Taupin, J. D., Lebel, T., Leduc, C., 1997. Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. *Elsevier – Journal of hydrology 188 – 189*, pp 155 - 178.

Desconnets, J. C., Galle, S., Leduc, C., Peugeot, C., 1995. Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel. *L'hydrologie tropicale : Géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), IAHS, Publication N° 238, 1996*, pp 125 – 137.

Descroix, L., Laurent, J-P., Vauclin, M., Amogu, O., Boubkraoui, S., Ibrahim, B., Galle, S., Cappelaere, B., Bousquet, S., Mamadou, I., Le Breton, E., Lebel, T., Quantin, G., Ramier, D., Boulain, N., 2011. Experimental evidence of deep infiltration under sandy flats and gullies in the Sahel. *Elsevier – Journal of Hydrology 424 – 425*, pp 1 – 15.

Descroix, L., Amogu, O., 2012. Consequences of land use changes on hydrological functioning, water resources management and modeling. *Dr. Purna Nayak (Ed.), ISBN: 978-953-51-0246-5, InTech*, pp 87-108.
http://www.intechopen.com/books/water-resources-management-andmodeling/consequences-of-land-use-changes-on-hydrological-functioning

Diouf, S., 1999. Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental. Application de la méthode électrique 1D et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs. *Thèse de doctorat, Université Cheick Anta Diop de Dakar*, 160 p.

Fabre, J., 1971. Esquisse géologique de l'Afrique de l'Ouest.

Ganaba, S., Guinko, S., 1995. Etat actuel et dynamique du peuplement ligneux de la région de la mare d'Oursi (Burkina Faso), Etudes Flore et végétation ; *Burkina Faso 2 : 3-14*.

Gleick, P.H., Cohen, M.J., 2008. The World's Water 2008-2009. The Biennial Report on Freshwater Resources. *Island Press, Washington, D.C,* 435 p.

Gombert, P., 1997. Variabilité spatiale de la productivité aquifère du socle sahélien en hydraulique rurale. *Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997)***.** *IAHS, Publ.N° 241*, pp 113 – 122.

Guiraud, R., 1988. L'hydrogéologie de l'Afrique. *Journal of African Earth Sciences, Vol. 7, N°3,* pp. 519-543.

Günther, T., 2004. Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements. *PhD these, University Bergakademie Frieberg*, 150 p.

Hector, B., Seguis, S., Hinderer, J., Descloitres, M., Vouillamoz, M., Wubda, M., Boy, J. P., Luck, B., Le Moigne, M., 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. *Geophysical Journal International,* p. 1-13; doi: 10.1093/gji/ggt146.

Hahn-Hadjali, K., Wittig, R., Schmidt, M., Zizka, G., Thiombiano, A., Sinsin, B., 2010. La végétation de l'Afrique de l'Ouest. *Atlas de la Biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome II. Burkina Faso. BIOTA, Ouagadougou & Frankfurt/Main,* pp 78 – 85.

Hector, B., 2014. Caractérisation hydrogéophysique multi-échelles et dynamique des stocks d'eau souterrains d'un bassin versant en zone soudanienne de socle : apport de la gravimétrie. *Thèse de doctorat, Université de Strasbourg – Institut de Physique du Globe*, 314 p

Hector, B., Séguis, L., Hinderer, J., Cohard, J.-M., Wubda, M., Descloitres, M., Benarrosh, N. and Boy, J.-P., 2015. Water storage changes as a marker for base flow generation processes in a tropical humid basement catchment (Benin): Insights from hybrid gravimetry, *Water Resour. Res*., n/a–n/a, doi:10.1002/2014WR015773.

Kamagate, B., 2010. Fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Donga au Bénin - Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements du bassin de la Donga dans la haute vallée de l'Ouémé en milieu tropical de socle au Bénin. *Editions Universitaires Européennes (EUE)*, 328 p.

Karambiri, H., Ribolzi, O., Delhoume, J. P., Ducloux, J., Coudrain-Ribstein, A., Casenave, A., 2003. Importance of soil surface characteristics on water erosion in a small grazed Sahelian catchment. *Hydrological Processes, Volume 17, issue 8,* pp 1495 – 1507.

Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. *Pergamon Press, New York,* 517 p.

Kim, K-J., Cho, I-K., 2011. Time-lapse inversion of 2D resistivity monitoring data with a spatially varying cross-model constraint. *Elsevier – Journal of applied geophysics 74*, pp 114 - 122.

Lachassagne, P., Wyns, R., 2005. Aquifères de socle : nouveaux concepts – Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences n° 2 : 32-37.* 6 p.

Lasserre, F., Descroix, L., 2011. Eaux et territoires : tensions, coopérations et géopolitique de l'eau. *Presses de l'Université du Québec, Québec, 3e éd,* 490 p.

Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., Gualde, R., 1993. Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. *ORSTOM/DH. Ed ORSTOM, Collection Monographies Hydrologiques N°11, Paris (France),* 540 p.

Le Barbé, L., Lebel, T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950- 1990. *Elsevier - Journal of Hydrology 188 - 189*, pp 43 - 73.

Lebel, T., Cappelaere, B., Galle, S., Hanan, N., Kergoat, L. & al., 2009. AMMA-CATCH studies in the Sahelian region of West-Africa: an overview. *Elsevier - Journal of Hydrology*, 2009, pp.1-34.

Leduc C, Bromley J, Schroeter P, 2003. Water table fluctuation and recharge in semi-arid climate: some results of the HAPEX-Sahel hydrodynamic survey (Niger). *Elsevier – Journal of hydrology 188 – 189*, pp 123 - 138.

Le Lay, M., Galle, S., 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest africaine en climat soudanien. *Hydrological Sciences Journal - Volume 50 (3)*, pp 509 - 524.

Lloyd J W, 1999. Water ressources of hard rock acquifers in arid an semi-arid zones. Studies and repport in hydrology; *UNESCO publishing*, 284 p.

Loke, M. H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. http://www.geo.mtu.edu/

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

Malam Abdou, M., Vandervaere, J-P., Descroix, L., Moussa, B. I., Maiga, O. F., Abdou, S., Seyni, B. B., Daouda, M. L. O., 2015. Évolution de la conductivité hydraulique d'un sol sableux cultivé dans l'Ouest du Niger. *BASE - Volume 19 ,* Numéro *3*, pp 270-280.

Mamadou, O., 2014. Etude des flux d'évapotranspiration en climat soudanien : comportement comparé de deux couverts végétaux au Bénin. *Thèse de doctorat, UJF Grenoble – UAC Bénin*, 236 p.

Massuel, S., Favreau, G., Descloitres, M., Le Troquer, Y., Albouy, Y., Cappelaere, B., 2006. Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modeling. *Elsevier – Catena 67*, pp 105 – 118.

McNeill, J.D., 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Technical note TN6 – Geonics Limited*, 15 p.

Naba, S., 2007. Propriétés magnétiques et caractères structuraux des granites du Burkina Faso oriental (Craton Ouest Africain, 2,2 – 2,0 Ga) : implications géodynamiques. *Thèse de doctorat, Université Toulouse III*, 166 p.

Niang, D., 2006. Fonctionnement hydrique des différents types de placages sableux dans le sahel burkinabè. *Thèse de doctorat, EPFL*, 136 p.

Niasse, M., Afouda, A., Amani, A., 2004. Réduire la vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest aux impacts du climat sur les ressources en eau, les zones humides et la désertification : éléments de stratégie régionale de préparation et d'adaptation. *Gland et Cambridge, UICN,* 71 p.

Niasse, M., 2005. Climate-induced Water Conflict Risks in West Africa: Recognizing and Coping with Increasing Climate Impacts on Shared Watercourses. *Texte présenté à l'atelier international Human Security and Climate Change, Oslo, GECHS, 21-23 juin,* 15 p.

Nonguierma, A., Dautrebande, S, 1995. Modélisation hydrologique de petits bassins versants ruraux sahéliens : apport de la télédétection et des systèmes d'information géographique pour la détermination des paramètres. *FAO corporate document repository, Télédétection et ressources en eau (Actes de l'atelier international de Montpellier, novembre 1995), 1997*.

Ozer, P., Erpicum M., Demaree, G., Vandiepenbeeck, M., 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal, 48*, pp 489 – 492.

Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O., 1998: Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques – 43(6)*, pp 937 – 946.

Rajot, J-L., Karambiri, H., Ribolzi, O., Planchon, O., Thiebaux, J-P., 2009. Interaction entre érosions hydrique et éolienne sur sols sableux pâturés au Sahel : cas du bassin-versant de Katchari au nord du Burkina Faso. *Secheresse 2009, vol 20(1)*, pp 131 – 138.

Ribolzi, O., Hermida, M., Karambiri, H., Delhoume, J-P., Thombiano, L., 2006. Effects of aeolian processes on water infiltration in sandy Sahelian rangeland in Burkina Faso. *Elsevier – Catena 67*, pp 145 – 154.

Richard, A., Galle, S., Descloitres, M., Cohard, J-M., Vandervaere, J-P., Séguis, L., Peugeot, C., 2013. Interplay of riparian forest and groundwater in the hillslope hydrology of soudanian West Africa (northern Benin). *Hydrology and Earth System Sciences (17 (12), 2013)*, pp 5079 – 5096.

Ricolvi, M., 1992. Document-guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débit en zone de socle cristallin. *Série hydrogéologie – CIEH, Ouagadougou, Burkina Faso.* 135 p.

Roy, A., Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct-current methods. *Geophysics, 36 (5)*, pp 943-959.

Ruiz, L., Murari Varma, R. R., Mohan Kumar, M. S., Sekhar, M., Marechal, J. C., Descloitres, M., Riotte, J., Kumar, S., Kumar, C., Braun, J. J., 2009. Water balance modelling in a tropical watershed under deciduous forest (Mule Hole, India): regolith matric storage buffers the ground water recharge process. *Journal of Hydrology, Vol 380, Issues 3-4,* pp 460 – 472.

Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J-L., Galle, S., Peugeot, C., Gosset, M., Le Barbé, L., Malinur, F., Van Exter, S., Arjounin, M., Boubkraoui, S., Wubda, M., 2011. Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in the sub-humid soudanian zone : the Donga basin (Benin, West Africa). Inter annual variability of water budget. *Journal of Hydrology (402, 2011)*, pp 1 - 13.

Servat, E., Paturel, J.E., Lubes-Niel, H., Kouame, B., Ouédraogo, M., Masson, J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology, 191*, pp l-15

Telford, W. M., Geldart, L. P., Cheriff, R. E., 1990. Applied geophysics. *Second edition. Cambridge University Press*, 2012, 770 p.

Thiombiano, L., 2000. Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédo-paysagiques, dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso. *Thèse d'état, mention pédologie, Université d'Abidjan*, 208 p.

UNEP., 2008. Afrique – Atlas d'un environnement en mutation. *Division of Early Warning and Assessment (DEWA), United Nations Environment Programme (UNEP), DEW/1000/NA,* 52 p.

Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: the example of Benin. *Journal of Applied Geophysics,107,* pp 16–24.

Wenceslas, M-R., Leduc, C., 2003. Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel : l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger). *Elsevier - CR Geosciences 335*, p 461 - 468.

West, G. F., Macnae, J. C., 1991. Physics of the electromagnetic induction exploration method. *Investigations in geophysics N°3 – Electromagnetic methods in applied geophysics, Vol 2, Chap 1,* pp 13 - 36.

White, F., 1986. La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique. *UNESCO / AETFAT / UNSO - ORSTOM et UNESCO, Paris, collection Recherches sur les ressources naturelles, n° 20,* 384 p.

WHO – UNICEF., 2013. Progress on sanitation and drinking-water. *Update 2013, WHO Press, ISBN 9789241505390,* 39 p.

Wubda, M., 2003. Reconnaissance géophysique du bassin versant d'Ara (Djougou, nord Bénin). *Mémoire de DESS de géophysique appliquée, UPMC – Paris VI*, 65 p.