

Projet : Développement de synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologique de la zone Nord et Est du Burkina Faso

VILLES CONCERNEES : BOUROUM, BOURZANGA, DEOU, DJIBO, DORI, FADA, GORGADJI, TITAO

## **Annexes du Rapport final version définitive**

*FINANCEMENT : RVO*

## Liste de annexes

Annexe 1.1: Termes de référence (révisé)

Annexe 2.1 : Rapport visite de Dori

Annexe 2.2 : Rapport visite de Fada

Annexe 2.3 : Rapport visite de Kaya

Annexe 3.1 Cartes de structures a base des données magnétiques aériennes

Annexe 4.1 : Résumé des études de cartographie des eaux souterraines existantes à l'aide d'une analyse multicritère.

Annexe 4.2 : Les cartes de favorabilité avec zones de recherche indiquées.

Annexe 6.1 Méthodologie et instrumentation géophysiques

Annexe 6.2 Rapports de liste de contrôle



## TOR pour une caractérisation hydrogéologique de certaines villes à fort présence de personnes déplacées au Burkina Faso

### 1. CONTEXTE

---

Depuis début janvier 2019, la situation humanitaire au Burkina Faso s'est détériorée. Le nombre de personnes déplacées continue d'augmenter (principalement dans la région du Sahel et du Centre-Nord) en raison de l'augmentation des attaques de groupes extrémistes violents, couplée à des affrontements intercommunautaires.

Selon le Plan d'action humanitaire de 2020 révisé, 2,9 millions de personnes sont touchées par la crise. Plus de 1 million d'entre eux étaient des personnes déplacées à l'intérieur du pays (PDI), et 1,2 million d'entre eux ont été directement privés de leur accès aux soins de santé et à l'éducation en raison du conflit.

La réponse Wash selon le plan HRP 2020 prévoit une assistance en eau, hygiène et assainissement à 1,035,000 personnes PDI et communautés hôtes.

L'accès des acteurs humanitaires dans les zones touchées par les situations d'urgence diminue rapidement, ce qui compromet la possibilité d'apporter des aides humanitaires. La situation humanitaire actuelle, conjuguée à la réduction de l'allocation des ressources intérieures aux secteurs sociaux, exerce une pression importante sur l'accès déjà limité à des services sociaux de base de qualité au sein de la population.

Le groupe sectoriel WASH urgence au Burkina Faso existe depuis 2012 (principalement en réponse à la crise malienne) mais doit être renforcé pour pouvoir soutenir la coordination aux mêmes normes d'un cluster activé. En décembre 2019, le système de clusters a été activé au Burkina Faso. Cela signifie une demande et des attentes accrues de la part des partenaires en faveur d'un mécanisme de coordination sectorielle robuste, d'accroître les responsabilités et les risques de réputation pour l'UNICEF en tant qu'agence lead du cluster.

Pour favoriser la synergie et la coordination des interventions, les membres ont besoin de développer des outils qui soutiennent cet objectif de coordination. En ce qui concerne le volet eau, l'un des défis majeurs constatés dans leur zone d'intervention, c'est que les acteurs font face à de nombreuses difficultés et contraintes du fait du manque de connaissance sur les ressources en eau, ce qui rend difficile son exploitation et sa gestion. Dans leur effort d'augmenter la disponibilité d'eau, les acteurs humanitaires ont tenté de réaliser des

nouveaux forages dans ces régions et malheureusement l'expérience n'a pas été très encourageante vu la proportion des forages négatifs dans certaines zones. Cela entrave fortement l'efficacité de leurs interventions qui visent un accès durable des populations à l'eau potable.

En plus, les déplacements internes des populations se fait vers les gros centres et certaines villes touchée par la crise ont doublé leur population donc augmentation significative de besoin et de la pression exercée sur les ouvrages d'eau et d'assainissement existants. Il faut signaler que le taux de satisfaction en eau dans ces villes n'était pas bien couvert même avant la crise pour diverses raisons dont entre autres le faible rendement de production des certains forages.

C'est donc pour mettre à la disposition de tous les acteurs des connaissances qui vont favoriser une plus grande efficacité dans leurs actions et une synergie d'action des différents acteurs que ces présents termes de références sont élaborés.

## **2. JUSTIFICATION**

---

Les zones concernées par cette étude sont situées dans une zone défavorable aussi bien du point de vue climatique qu'hydrogéologique. En effet, une grande partie de cette zone possède un climat sahélien marqué par une faible pluviométrie et des températures élevées. Ces conditions climatiques sont très peu favorables à l'abondance et au renouvellement des ressources en eau. De plus, cette zone est située sur le socle cristallin qui présente un faible potentiel en eau et qui demeure très peu connu. Dans ce contexte où les aquifères sont du types fissurés et discontinus, la mobilisation des ressources en eau pose de sérieuses difficultés. Pourtant, en milieu rural la satisfaction des besoins en eau potable repose essentiellement sur les ressources en eau souterraine à partir de puits et de forages.

Dans les zones couvertes par les interventions humanitaires WASH, il a été donné de constater que beaucoup de forages sont réalisés sans une bonne connaissance de la disponibilité de la ressource. De cela découle un taux d'échec de forages élevé, de nombreux forages avec un débit faible et des baisses de débits de forages observées au cours de l'exploitation. Cette situation contribue à miner les efforts des acteurs en manière d'approvisionnement en eau potable des populations. En outre, la multiplication de forages dans ces zones où le contexte hydrogéologique est complexe peut engendrer des problèmes de gestion et de pérennité de la ressource en eau. En effet, sans une bonne connaissance de la disponibilité de cette ressource (localisation, quantité disponible, taux de renouvellement), elle pourrait être soumise à une surexploitation qui peut conduire à son épuisement à long terme.

C'est fort de tous ces constats que cette étude est initiée en vue de contribuer à l'amélioration des connaissances sur cette zone. Elle va permettre d'asseoir une base de connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie afin de faciliter la réalisation des forages et l'exploitation efficace, efficiente et durable de la ressource.

### **3. OBJECTIF ET RESULTATS ATTENDUS DE LA MISSION**

---

#### **3.1. Objectif général**

L'étude vise à améliorer la connaissance de l'hydrogéologie dans 4-8 centres fortement touchés par la crise sécuritaire. Elle va mettre en évidence les contraintes liées à la disponibilité et à la mobilisation de la ressource en eau.

Ainsi l'étude permettra de rendre disponible des informations utiles pour une intervention efficace des différents acteurs dans la zone ; ce qui va contribuer à améliorer le taux de réussite des forages ainsi que la gestion de l'exploitation de la ressource.

Cette étude va en particulier servir dans un premier temps aux ONG humanitaires membres du Cluster WASH pour faciliter leurs interventions dans les zones cibles ; et dans un second temps les communes et les autres partenaires de développement.

L'étude devra dans la mesure du possible être complémentaire avec les études similaires en cours de réalisation par la Banque Mondiale, UNICEF, OXFAM.

#### **3.2. Objectifs spécifiques**

Les objectifs spécifiques se déclinent comme suivant :

- Identifier et collecter l'ensemble des données et informations existantes sur l'hydrogéologie des villes couvertes par l'étude;
- Organiser l'ensemble des données et informations collectées au sein d'une base de données EXCEL facilement exploitable ;
- Faire une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques de ces zones ;
- Faire une cartographie des zones aquifères potentielles à travers une analyse multi critères;
- Déterminer les paramètres hydrodynamiques de ces zones aquifère ;
- Présenter une situation de l'état des nappes de la zone ; y compris des informations sur les débits, les type et prix moyens des forages en fonction de la zone, etc.
- Formuler des recommandations opérationnelles adressées aux ONG visant à faciliter une exploitation de la ressource en eau dans cette zone qui soit plus efficace, efficient et plus durable ;
- Formuler des recommandations adressées au Cluster WASH et au MEA visant à améliorer/ approfondir les résultats de cette étude

### 3.3. Résultats attendus

Les résultats attendus de l'étude sont les suivants :

- L'ensemble des données et informations existantes sur l'hydrogéologie de la zone d'étude ont été collectées ;
- L'ensemble des données et informations collectées ont été organisées au sein d'une base de données EXCEL facilement exploitable;
- Une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques de chaque zone concernée est disponible ;
- Une situation de l'état des nappes de la zone est disponible ;
- Des recommandations visant à faciliter une exploitation de la ressource en eau dans cette zone qui soit plus efficace et plus durable ont été formulées ;
- Des recommandations visant à améliorer/ approfondir les résultats de cette étude ont été formulées.

## 4. LOCALISATION ET CONSISTANCE DE LA MISSION

---

### 4.1. Zone d'étude

La zone d'étude couvre 4-8 villes à forte présence de personnes déplacées et qui rencontrent des défis en termes d'accès à l'eau au sein des régions du Centre-Nord, du Nord, du Sahel, de la Boucle du Mouhoun et de l'Est, dans la zone indiquée dans la carte en annexe.

La liste des villes exactes sera fournie lors de la réunion de démarrage de l'étude.

### 4.2. Consistance de la mission

Le déroulement de l'étude comporte quatre grandes étapes :

- **Identification et collecte des données et informations disponibles sur la zone concernée**

Il s'agit de répertorier l'ensemble des données (données géophysiques, données de forages, données piézométriques, toutes données géologiques et hydrogéologiques, estimations sur l'exploitation actuelle de la ressource) ainsi que l'ensemble de la documentation (rapports d'études hydrogéologiques, mémoires d'études, articles scientifiques, etc.) disponibles sur la zone. Il appartiendra à l'expert d'identifier les détenteurs de ces données/ informations et de procéder à la collecte. Les informations pourraient se trouver aussi bien au niveau central (MEA à Ouagadougou, BUMIGEB, Université de Ouagadougou, autres acteurs) qu'au niveau local (Directions Régionales de l'Eau et de l'Assainissement, autres acteurs) et même au niveau international (universités francophones en France, Suisse, Belgique, Canada ; communes jumelées, structures partenaires, etc.) . L'expert effectuera les démarches nécessaires y compris des déplacements au sein du Burkina si nécessaires pour collecter l'ensemble des informations disponibles.

Dans le cas où les données secondaires existantes seraient insuffisantes, l'étude pourra inclure une collecte de données primaires notamment concernant l'inventaire des ouvrages existants et les estimations sur la consommation actuelle en eau dans certaines villes. Cette collecte de donnée sera à effectuer en partenariat avec un bureau d'étude local.

#### - **Organisation des données au sein d'une base de données**

A la suite de la collecte des données/ informations disponibles, l'expert travaillera à les organiser au sein d'une base de données. Il est attendu l'organisation des documents dans des dossiers électroniques bien classés, ainsi que la saisie des métadonnées (une description simple) de l'ensemble des informations collectées dans une base de données Excel en établissant un lien ou un référencement permettant facilement de retrouver la source des données/informations elles-mêmes.

La présentation de la base de données doit être simple et intuitive afin de faciliter son exploitation. Les données et documentations collectées doivent être organisées et archivées de manière à en faciliter l'accès à toute personne.

La mise en œuvre de cette étape va nécessiter des échanges avec les commanditaires de l'étude afin de prendre en compte leurs besoins.

Il n'est PAS demandé la création d'une plateforme en ligne interactive. La base de données créée sera un simple fichier Excel et les documents seront classés dans des fichiers et hébergés sur le Google Drive du Cluster WASH.

#### - **Synthèse et analyse des données collectées**

Partant de l'ensemble des données et documentations collectées, l'expert fera une revue documentaire complétée au besoin par une analyse des données brutes collectées afin de présenter une description des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des aquifères dans les 4-8 villes concernées par l'étude (nature et structure géologique, caractéristiques hydrodynamiques). Dans cette analyse, il s'agira aussi de ressortir l'état de la disponibilité de la ressource, les zones défavorables ainsi que celles qui sont favorables à l'implantation de forages d'exploitation. A partir des données, l'expert analysera également l'état de la nappe du point de vue quantitatif et dans la mesure du possible il donnera un aperçu de la qualité des eaux. Sur le plan quantitatif, il s'agira de présenter le niveau général des nappes, d'analyser l'impact des prélèvements sur les nappes et identifier des zones vulnérables (surexploitation, baisse importante du niveau de la nappe).

A la lumière des principaux constats observés, l'expert formulera des recommandations adressées aux ONG visant à faciliter une exploitation de la ressource en eau dans ces villes qui soit plus efficace et plus durable (en termes de : zones à éviter ou zones à privilégier pour les campagnes de forages, procédures de suivi piézométrique à mettre en place, mode d'exploitation et/ou type de technologie à privilégier en fonction de la zone, etc.)

A la lumière de cette synthèse et des besoins de connaissances additionnelles sur l'hydrogéologie de la zone, l'expert formulera des recommandations qui vont permettre

d'initier des actions complémentaires. Il s'agit de toutes actions utiles à mener pour améliorer la connaissance et la gestion des ressources en eau souterraines de cette zone.

- **Elaboration et présentation du rapport de l'étude.**

Le rapport de l'étude présente les différentes étapes de l'étude ainsi que les résultats atteints en lien avec les objectifs présentés plus haut. Le rapport devra inclure pour chaque ville la présentation du contexte hydrogéologique de chaque ville, la présentation de l'exploitation actuelle de la ressource dans ces villes ; des analyses sur la durabilité de l'exploitation actuelle ; des recommandations sur comment d'accroître la production d'eau dans ces villes (à court terme et à plus moyen/long terme). En plus, des recommandations seront formulés sur comment améliorer les méthodologies géophysiques et les campagnes de forage dans ces zones. Ces recommandations seront sous forme de orientations techniques destinées aux bureaux d'études et entreprises œuvrant dans ce domaine.

Enfin, les résultats généraux et recommandations de l'étude seront présentés dans un atelier national destiné au personnel des ONG humanitaires. Les orientations techniques sur les méthodologies géophysiques seront présentées dans une deuxième rencontre destinée à du personnel spécialisé des ONG, personnel du Ministère de l'eau et des bureaux d'études et entreprises œuvrant dans ce domaine. Les deux rencontres pourront avoir lieu le même jour et au même endroit si besoin est (ex. le matin et l'après-midi).

## **5. LES LIVRABLES**

---

- Un rapport de démarrage contenant la méthodologie détaillée, le programme détaillé du déroulement de l'étude et les moyens de mise en œuvre sera soumis à l'UNICEF au bout de 7 jours après le démarrage de la mission; le rapport de démarrage pourra également fournir des suggestions sur comment être complémentaire et éviter les redondances avec les autres études actuellement en cours par la Banque Mondiale, UNICEF et OXFAM.
- Un rapport provisoire présentant les résultats de l'ensemble de l'étude qui sera soumis à l'UNICEF pour validation.
- Un rapport final de l'étude intégrant les amendements sur le rapport provisoire qui sera soumis à l'UNICEF au bout de 10 jours après réception des amendements ;
- Une présentation power point du rapport final qui sera présenté à l'ensemble des acteurs lors d'un atelier national ;
- L'ensemble des données collectées dans le cadre de la mission ainsi que la base de données Excel conçue au cours de la mission.

## 6. CALENDRIER D'EXECUTION

---

La mission aura une durée de 3 mois sur la base d'un niveau d'effort de 60 hommes-jour. Son déroulement aura lieu pendant les mois de Janvier à Avril 2020.

L'expert proposera un planning détaillé d'exécution de la mission.

## 7. MOYENS HUMAINS

---

Pour la conduite de cette étude l'UNICEF envisage recruter un expert ou un stand-by Partner international répondant aux critères minimum suivant :

<b>Diplôme sollicité</b>	Bac + 5 en hydrogéologie, hydraulique ou génie rural
<b>Expérience professionnelle générale</b>	Au moins 7 ans d'expériences professionnelles dans la conduite d'étude hydrogéologique visant la connaissance des ressources en eau souterraine
<b>Expérience professionnelle spécifique</b>	Justifier d'au moins trois expériences similaires Avoir une expérience confirmée dans l'hydrogéologie du domaine de socle au Burkina
<b>Langue</b>	Parfaite connaissance de la langue française orale et écrite.

**NB: L'expert chef de mission** fournira les pièces suivantes:

- Un curriculum vitae à jour, paraphé et signé (cinq pages maximum)
- Une photocopie légalisée du diplôme
- Une attestation de disponibilité durant toute la période de la mission

## 8. MOYENS MATERIELS ET LOGISTIQUES

---

L'UNICEF mettra à la disposition de l'expert un bureau avec un accès à une connexion internet.

## **Annexe 1 de TdR : liste non exhaustive des données et documents existants**

### **Cartes**

- Carte hydrogéologique du Burkina Faso à l'échelle 1:500.000 avec notice explicative en format numérique : feuille Dori.
- Carte hydrogéologique du Burkina Faso à l'échelle 1:500.000 avec notice explicative en format numérique : feuille de Fada N'Gourma.
- Carte hydrogéologique du Burkina Faso à l'échelle 1:500.000 avec notice explicative en format numérique : feuille de Ouagadougou.

### **Documents**

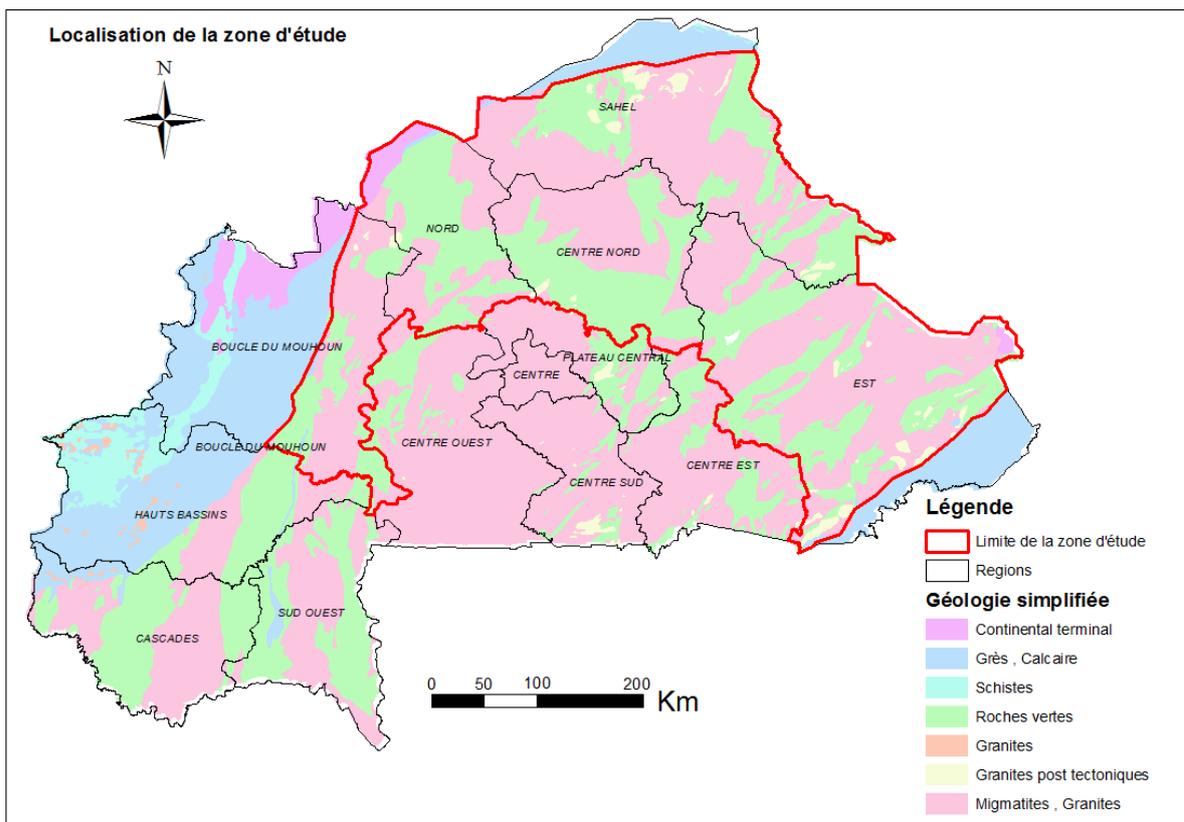
- Autorité du bassin du Niger, 2005. Rapport de synthèse régionale des études multisectorielles nationales
- Benamour, A. , 1972; Hydrogéologie de la région du Liptako-Gourma , CIEH .
- CIEH BGR, 1989, Contribution à la méthodologie de prospection des eaux souterraines sur le bouclier cristallin d'Afrique de l'ouest : étude hydrogéologique et géophysique au Burkina Faso.
- Danert. K, Ouedraogo, JP, Amadou, B et Zombre, A (2018) Bonnes pratiques pour la réalisation de forages au Burkina Faso – 2017, Note de mission, Skat Foundation, Direction Générale des Ressources en Eau, Burkina Faso et UNICEF
- Dieng, B.; De Heusch Kouassi, A.; Bakyono, B. A., 2008, Optimisation de l'implantation géophysique des forages en zone de socle au Nord du Burkina Faso
- Du Berger, R; Lemieux, G H; Rouleau, A; Bégin, R, 1996, Étude des facteurs de productivité des aquifères du socle cristallin du Burkina Faso: rapport final
- Elie Sauret, 2005, Caractérisation hydrochimique et qualité des eaux souterraines du projet hydraulique villageois 310 forages dans la boucle du Mouhoun dans les provinces des Banwa des Balés, Mouhoun et de la Kossi (Burkina Faso), Université Cheikh Anta Diop - Institut des Sciences de la Terre (IST), Dakar, Senegal
- Julien Nikiema, 2009, Caractérisation des potentialités hydrologiques et hydrogéologiques dans la zone de Tikaré, province du Bam, Burkina Faso (Afrique de l'Ouest) Un modèle de gestion et de développement des ressources en eau dans la zone au sud du sahel
- Lésage, P., 1982, Mission Hydrogéologie villageoise dans les régions de Djibo, Arbinda, Sebba (Haute Volta): rapport de prospection géophysique par methode électrique
- Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2000. Connaissance des ressources en eau sur le plan quantitatif - Pertinence du système de suivi - Version definitive
- Ministère de l'Environnement et de l'Eau, 2001. État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion.

- Ministère des relations extérieures - coopérations et développement, 1984, Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie du socle cristallin et cristallophyllien, et du sédimentaire ancien de l'Afrique de l'ouest
- ONEA, 2013. Adduction d'eau potable de Oursi, Gorom Gorom, Déou et Dori à partir du forage Christine - Rapport d'Avant-Projet Sommaire Version définitive.
- Ouédraogo, P., 1991; Hydrogéologie des bassins versants de la Sirba et de Bonsaga sur le degré carré de Fada N'Gourma
- Nikiéma Patarbtalé Joseph, 1993, Contribution à l'étude des forages et à la cartographie hydrogéologique de la province de la Gnagna (région de l'est Burkina).
- Programme VREO, 2009. Schéma directeur d'aménagement et de gestion des ressources en eau du bassin du Mouhoun- (avant-projet)- volume n°1 : analyse & diagnostic de l'état des lieux des ressources en eau du bassin -Version finale
- Renvoisé Luc. 1987. Schéma hydrogéologique du Burkina Faso. Wageningen: CTA-CIRAD-IEMVT, p. 13, échelle: 1:2000000, <https://doi.org/10.18167/agritrop/00530>
- Samuel Nakolendousse, 1991. Méthode d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso : géologie, géophysique, télédétection.
- Sayoba KAFANDO, 2014. Amélioration des connaissances des ressources en eau souterraine au Burkina Faso : cas de la carte hydrogéologique de la région du sahel.
- Toé Ghyslain, 2004. Apport de nouvelles techniques géophysiques a la connaissance des aquifères de socle - Tomographie électrique, électromagnétisme fréquentiel, résonance magnétique protonique - Applications au Burkina Faso.
- Youssouf Koussoubé, 1996, Hydrogéologie en milieu de socle cristallin du Burkina Faso : cas du bassin versant du bas-fond de Bidi (province du Yatenga), Thèse de 3ème cycle.
- Youssouf Koussoubé, Alain Nindaoua Savadogo et Samuel Nakolendoussé, 2003, les différences signatures des fractures de socle cristallin en zone sahélo-soudanienne du Burkina Faso (bassin versant de bidi, province du Yatenga), Université de Ouagadougou
- Le rapport synthèse de l'équipe d'experts de la Banque mondiale sur « Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au Burkina Faso », juin 2017;
- Le rapport diagnostic sur les ressources en eau souterraine de juin 2017 par l'équipe d'experts de la Banque ;
- Hydrogéologie de la commune de Ouahigouya : Exploitation durable de la ressource en eau souterraine de la commune de Ouahigouya (<https://www.chambery-ouahigouya.com/a-ouahigouya/eau-et-assainissement/>)

## **Données**

- Données de la base de données INO de la Direction Générale de l'Eau potable;
- Données de la base de données sur les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines disponible à la Direction Générale des ressources en eau;
- Données piézométriques de la Base de données SIG Piézométrique de la Direction Générale des Ressources en Eau.

## Annexe 2 de TdR: localisation de zone d'étude



## 1. Les rencontres

### 1.3 1.1 Haut Commissariat

Date : 11 mars 2021 à 8h

Personnes Rencontrées

SIMPORE Arouna)

Sommaire :

Le Haut Commissaire n'était pas disponible. En effet le même jour il y avait la visite du Ministre des Affaires Étrangères à Dori.

Des discussions il est ressorti que le camp de Goudébo relevait du Ministère des Affaires Étrangères et que les personnes qui y sont, sont des Réfugiées et non des Personnes Déplacées Interne (PDI).

L'accès au site est conditionné par une autorisation du HCR à travers le Ministère des Affaires Etrangères.

Pour s'y rendre il faut en plus un protocole de sécurisation par les Forces de Défenses et de Sécurité (FDS).

Les PDI relèvent du Ministère de l'Action Sociale. Par conséquent il fallait prendre attache avec la Direction Régionale de ce Ministère. Par conséquent il nous a orienté vers ce ministère.

### 1.4 1.2 Direction Régionale de l'Action Sociale

Date : 11 mars 2021 à 9h

Personnes Rencontrées :

DIALLO Karim, Directeur provincial

Sommaire :

Le Directeur Régional était absent, probablement pour les mêmes raisons que le Haut Commissaire. Auprès de son secrétariat on a pris les dispositions pour un rendez-vous, dès qu'il serait disponible pour nous recevoir.

Par contre, on a pu rencontrer le Directeur Provincial. De la rencontre il est ressorti que pour avoir un accès aux sites des PDI ou pour l'acquisition de données, il fallait une procédure administrative ministérielle. Étant donné que la Direction n'a pas été touchée à cet effet, le Directeur Provincial ne pouvait pas se prononcer. Par la suite, nous n'avons pas eu de retour de la Direction régionale pour une rencontre.

### 1.5 1.3 UNICEF / cluster WASH

Date : 11 mars 2021 à 9h

Personnes Rencontrées :

Kossi WOZUAME, PO Wash, bureau UNICEF de Dori

Moustapha CHETIMA, Chef de Bureau UNICEF de Dori

Sommaire :

Les difficultés rencontrées au niveau de l'action sociale ont été évoquées. Mais il est ressorti des échanges qu'on n'avait pas besoin d'autorisation comme tel pour l'accès aux sites étant donné que nous avons à faire des observations techniques et non à interagir avec les personnes déplacées. De plus ils nous ont rassurés qu'en cas de besoin sur les sites on pouvait toujours les toucher.

Le chef de Bureau a souligné l'importance que revêt la mission pour les interventions de l'UNICEF ainsi que des différents acteurs intervenant dans l'amélioration des conditions de vie des personnes déplacées internes.

[1.6](#) [1.4 ONEA](#)

Date : 11 mars 2021 à 9h

Personnes Rencontrées :

ZANTE Simon

Sommaire :

L'ONEA n'exploite plus les forages à cause du barrage. Du coup, le suivi des forages (données d'exploitations, caractéristiques des ouvrages) n'est plus à jour. L'ONEA suggère de rechercher les caractéristiques des ouvrages à Ouagadougou (DPI ONEA, Koné Mamadou).

La ville dispose de quatre (04) châteaux (à Yakouta, Huggo Sambouel et 2 au centre-ville), ce qui est insuffisant. Les capacités de stockages sont les suivantes 25m<sup>3</sup>, 150 m<sup>3</sup>, 500m<sup>3</sup> et 700m<sup>3</sup>.

Pour les déplacés, il est ressorti que l'UNICEF et le Conseil Danois ont demandé des bornes fontaines.

[1.7](#) [1.5 DREA](#)

Date : 11 mars 2021 à 9h

Personnes Rencontrées :

Directeur Régional, KABORE Paul

BAKOUANE Baya, chef SAEP

FOFANA Yacouba, Directeur provincial de l'Oudalan

Sommaire :

La Direction déplore le manque de synergie dans les interventions des acteurs ce qui a pour conséquence le manque de capitalisation des efforts. En effet une autre étude similaire semble être en cours (Mission de Faso Ingénierie il y a une semaine).

Les puits sont déclassés au niveau de la DREA. Par conséquent aucune donnée de puits n'y est conservée.

Selon la vision de M. Bakouane, au niveau de la ville de Dori, les besoins en eau peuvent être couverts par la capacité actuelle de l'ONEA. Cependant, il y a insuffisance d'infrastructures pour apporter l'eau aux populations. **En conséquence, la recherche des potentialités hydrogéologiques devrait s'étendre à toute la commune en vue d'identifier des sites en mesure de renforcer les ressources du barrage en prévision de l'accroissement de la demande.**

**Comme exemple, pour la couverture des besoins en eau potable de la ville de Gorgadji, où il ya des déplacés internes et qui est concernée par l'étude en cours, il a fallu réaliser un forage à 15 km de la ville.**

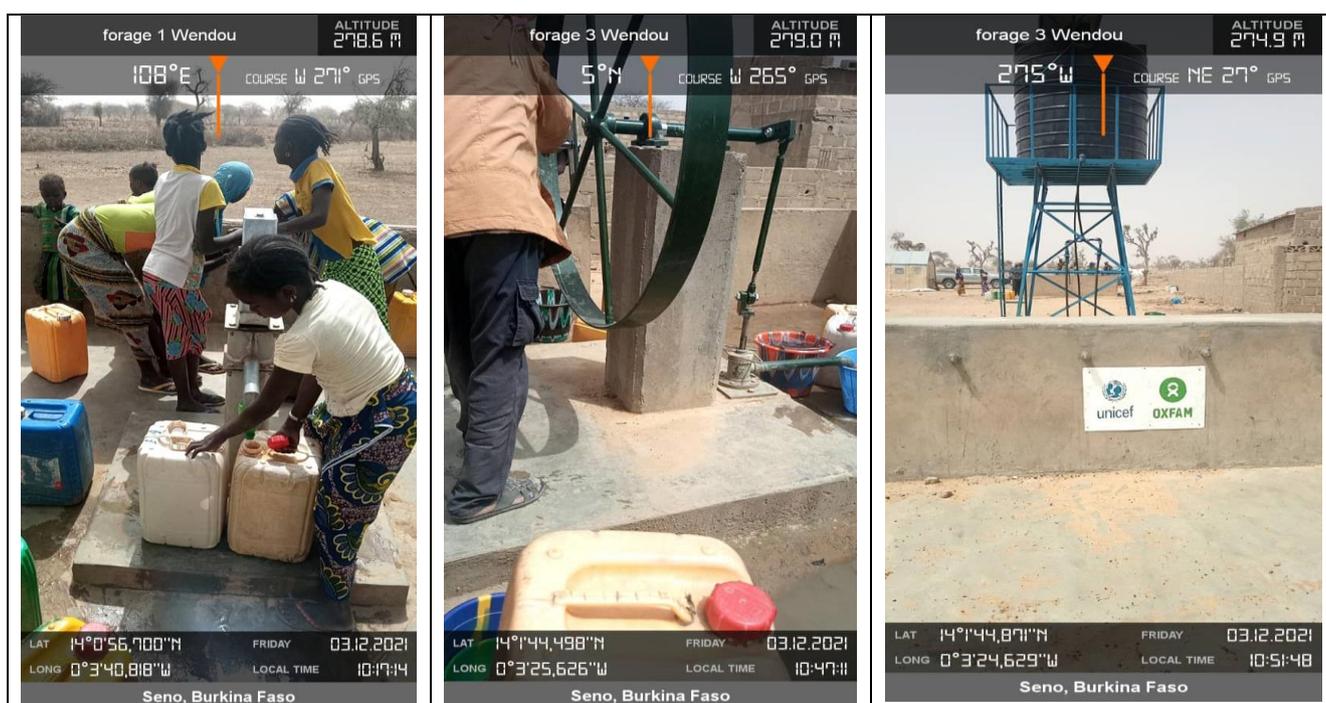
Des données de forages ont également été collectées à la DREA. Ces données seront intégrées dans la base de données.

## 2. OBSERVATIONS SUR LES OUVRAGES

### 1.8 Camp d e Wendou : 12 / 03 /2021

Trois forages en exploitation

N° Forage	Coordonnées géographiques		Observations
	Latitude	Longitude	
1	14°0'56.52 N	0°3'40.80" W	Réalisé par OXFAM en octobre 2020. Superstructure dégradé et pompe en panne.
2	14°0'56.631"N	0°3'40.814"W	Réalisé par SOLIDAR Suisse en novembre 2020
3	14°1'44.523" N	0°3'25.606 " W	Poste d'eau autonome en cours de réalisation. Débit du forage faible : 0,7m <sup>3</sup> . Réalisation UNICEF - OXFAM



### 1.9 Camp Petit Paris, 12/03/2021

Deux forages en exploitation

N° Forage	Coordonnées géographiques		Observations
	Latitude	Longitude	
1	14°2'41.365'' N	0°0'34.038'' W	Forage réalisé par OCADES CARTAS. Pompe Volanta installé.
2	14°2'37.458'' N	0°0'36.67'' W	Pompe INDIA MK II installée.

### 1.10 Camp Nyarela, 13/03/2021

Un forage en exploitation, mais la pompe est en panne.

Trois forages négatifs.

## 3. OBSERVATIONS GEOLOGIQUES

Des observations et mesures ont été faites sur les affleurements. Ces observations sont résumées dans le tableau ci-dessous :

N°	Type de structure	Coordonnées géographiques		Direction	Observations
		Latitude	Longitude		
1	Faille	N14°0'42.225''	W0°0'24,363''	N183°S	
2	Faille	N14°0'42,629''	W0°0'24,056''	N113 E	
3	Faille	N14°0'42.659''	W0°0'23,926''	124SE	
4	Intrusion	N14°0'43,394''	W0°0'23.623''	265W/	Intrusion de pegmatite
5	Intrusion	N14°0'43,076''	W0°0'23,248''	279W /	Pegmatite
6	Faille	N14°0'43,458''	W0°0'23,656''	23NE/	
7	Faille	N14°0'43,456''	W0°0'23,658''	240	
8	Faille	N14°0'44,057''	W0°0'23,477''	303°NW	Nœud de croisement de failles
9	Faille	N14°0'44,057''	W0°0'23,477''	273°	
10	Faille	N14°0'44,112''	W0°0'23,514''	235°SE	Nœud de croisement de failles
11	Faille	N14°0'44,112''	W0°0'23,514''	195°	
12	intrusion	N14°0'44,157''	W0°0'22,980''	87°E/	Intrusion de pegmatite
13	intrusion	N14°0'44,038''	W0°0'22,959''	82°E/	Intrusion de pegmatite
14	Intrusion	14°0'44,134''	W0°0'23,385''	174°S	Croisement de faille, intrusion de pegmatite
15	Intrusion	14°0'44,134''	W0°0'23,385''	169°	
16	Intrusion	N14°0'44,091''	W0°0'23,412''	281W	Intrusion de pegmatite
17	Intrusion	N14°0'43,601''	W0°0'22,942''	85°E	Intrusion de pegmatite

18	Faille	N14°0'43,644''	W0°0'23,003''	51°NE	Croisement faille /Intrusion de pegmatite
19	Intrusion	N14°0'43,644''	W0°0'23,003''	66°NE	
20	Intrusion	N14°0'43,070	W0°0'23,207''	279°W /S163°	Croisement intrusion / Faille
21	Faille	N14°0'43,070	W0°0'23,207''	289°	
22	Faille	N14°0'42,660''	W0°0'23,797''	329°NW/ 259°W	
23	Intrusion	N14°0'42,746''	W0°0'23,748''	321°NW/348N	
24	Faille	N14°0'42,231''	W0°0'24,396''	189°S/224°SW	
25	Faille	N14°0'43,404''	W0°0'23,592''	305NW / 180S	Nœud de croisement
26	Intrusion	N14°0'43,404''	W0°0'23,592''	275°	

Quelques Affleurements / Structures	Images, cordonnées et directions
AF1	

<p>AF2</p>	<p>intrusion Nyarela</p> <p>ALTITUDE 276.2 m</p> <p>279°W COURSE 5 163° GPS</p>  <p>LAT 14°0'43.070"N SATURDAY 03.13.2022 LONG 0°0'23.207"W LOCAL TIME 09:33:22</p>
<p>AF3</p>	<p>faille Nyarela</p> <p>ALTITUDE 278.8 m</p> <p>329°NW COURSE W 259° GPS</p>  <p>LAT 14°0'42.660"N SATURDAY 03.13.2022 LONG 0°0'23.797"W LOCAL TIME 09:34:00</p>



#### 4. Conclusion

De manière générale, la disponibilité des personnes à rencontrer. Cette difficulté a été renforcée par la présence au même moment du Ministre des Affaires Étrangères dans la commune.

A cause de l'insécurité, les sorties terrains ne pouvaient pas être spontanément liées aux constats ni improvisées. De ce fait, bien que Goudébo ne soit pas concerné (réfugiés et non PDI), ce site aurait pu faire l'objet de sortie terrain.

## 1 Les rencontres

### 1.1 DREA

Date : 18 mai 2021 à 09h30

Personnes Rencontrées :

OUATTARA Bakary, chef SAF

NATAMA Djiar, Agent Service AEP

Sommaire :

Il ressort de l’échange qu’il y a une concentration des interventions à l’adresse des PDI dans la ville de Fada. Les autres localités reçoivent moins d’attention de la part des acteurs bien que les problèmes y soient aussi graves. Il s’agit entre de Matiacoali, Pama, Diapaga, Bogandé, Gaéri, Kompienga.

A Fada même ce sont les zones périphériques qui reçoivent surtout les PDI notamment les zones non-loties des secteurs 1, 6, 8 et 11.

Dans ces zones, l’AEP est surtout dominé par des particuliers qui réalisent des réservoirs poly tank et revendent l’eau.

On devrait orienter les interventions des acteurs vers les AEPS et déconseiller les PMH.

Date : 19 mai 2021 à 08h

Personnes Rencontrées :

BANAO Bakary Guy Bessounadié, Chef SAEP

Les échanges ont confirmé les points débattus la veille avec M. Ouattara et Natama. De plus, des informations sur les forages à grands débits ont été obtenues ainsi qu’un rapport d’étude sur une analyse des paramètres de la productivité des forages dans la région de l’Est.

Mairie

Date : 18 mai 2021 à 10h30

Personnes Rencontrées :

BOLY Soumaye, Point Focal WASH de la Mairie de Fada

Sommaire :

Il ressort de l’échange qu’il n’y a pas de camps de PDI comme tel. Les PDI se retrouvent au sein de familles d’accueil et dans les zones non-loties des quartiers périphériques. Sont surtout concernées les zones non-loties des secteurs 1, 2, 3, 6, 8, 9 et 11.

Beaucoup d'ONG interviennent, mais pas suffisamment de façon concertée. En conséquence les informations sur les caractéristiques des ouvrages ne sont pas disponibles en général. Parmi les ONG intervenant actuellement sur le terrain, nous avons entre autres :

ACF, dans un programme de réalisation de 350 latrines, réalisation de 6 forages

WHH 3050 latrines, 013 forages neufs, 7 réhabilitations de forages

MSF : 5 forages

A la suite des échanges, une sortie sur le terrain a été organisée.

Les zones non-loties du secteur 1 (et une frange du secteur 2) ont surtout fait l'objet de cette sortie. Les ouvrages rencontrés ont été réalisés notamment par ACF (Action Contre la Faim), MSF (Médecins Sans Frontières) et WHH (....).

Le constat a aussi été fait quant à la vente d'eau par des particuliers qui ont réalisé des mini-système d'AEP.

### 1.2 ONEA

Date : 19 mai 2021 à 09h30

Personnes Rencontrées :

COMPAORE Emmanuel, Chef Service Assainissement

Sommaire :

Les responsables techniques de l'ONEA, notamment le chef d'exploitation était et le Directeur étaient en déplacement. Les échanges ont eu lieu avec le responsable de l'assainissement, de sorte qu'on n'a pas pu rentrer en possession de données techniques des forages exploités par l'ONEA.

### 1.3 UNICEF / cluster WASH

Date : 19 mai 2021 à 10h

Personnes Rencontrées :

Marcelin ILBOUDO, PO Wash, bureau UNICEF de Fada

Arsène NIANGARAN, Chef de Bureau UNICEF de Fada

Sommaire :

Les échanges ont porté sur le debriefing des constats observés sur le terrain à Fada.

Le chef de Bureau a souligné l'importance que revêt la mission pour les interventions de l'UNICEF ainsi que des différents acteurs intervenant dans l'amélioration des conditions de vie des personnes déplacées internes.

## 2 OBSERVATIONS SUR LES OUVRAGES

### 3 Zones non-loties du secteur 1 : 18/05/2021

Forages en exploitation

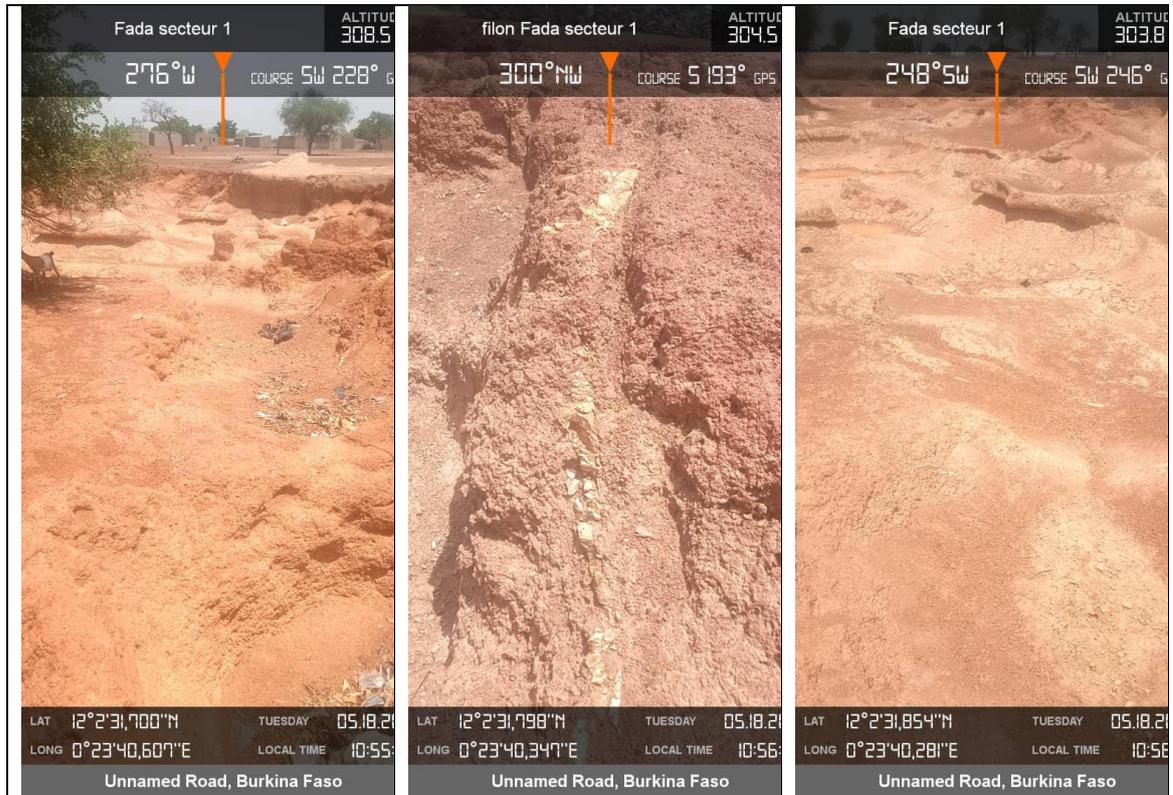
N°	Coordonnées géographiques		Caractéristiques			Observations
	Latitude	Longitude	Débit (m3/h)	Capacité de stockage (m3)	Date de réalisation	
1	N12°3'18,5''	E0°20'50,5''	6	10	2014	PEA Public
2	N12°03'58,9''	E0°23'29''	2,5	5	2021	PEA public
3	N12°03'28,4''	E0°23'36,2''	2,3	1	2021	PEA Privé
4	N12°03'25,0''	E0°23'21,4''	2,4	1	2014	PEA privé
5	N12°03'26,1'''	E0°23'19,6''	3	1	2019	PEA privé
6	N12°03'14,6''	E0°23'05,4''	4	10	2018	PEA privé
7	N12°03'12,4''	E0°22'54,0''	3,5	1	2018	PEA privé
8	12°03'14n3''	E0°22'35,7''	4	1	2019	PEA privé
9	N12°02'36,5''	E0°20'32,6''	4,2	15	2014	PEA public
10	N12°04'29,0''	E0°21'56'	-	10	2007	PEA Privé
11	N12°04'55,5''	E0°21'37,8''	4,2	15	2014	PEA public
12	N12°02'59,8''	E0°23'2,1''	4,1	15	2014	PEA public
13	N12°02'37''	E0°23'36,5''	2,1	5	2021	PEA privé
14	N12°01'53,1''	E0°23'22,4''	2,4	5	2016	PEA privé
15	N12°01'53,7''	E0°23'22,3''	1,2	5	2018	PEA privé
16	N12°02'39,5''	E0°22'31,8''	2,3	5	2017	PEA privé
17	N12°02'33,5''	E0°22'14,0''	5,2	20	2009	PEA privé
18	N12°02'32,9''	E0°22'11,2''	4,3	5	-	PEA privé
19	N12°02'48,2''	E0°21'20,1''	0,7	5	2020	PEA privé
20	N12°02'52,2''	E0°21'16,9''	1,2	5	2021	PEA privé
21	N12°02'22,3''	E0°20'6,9''	15	10	2021	PEA pulic



#### 4 OBSERVATIONS GEOLOGIQUES

L'altération de supérieure à 10 m

## Présence de filons



Les sorties de terrain ont permis de se rendre compte de la profondeur d'altération ainsi que des directions structurales.

## 5 Conclusion

De manière générale, la disponibilité du personnel de l'ONEA a été la principale difficulté.

Cette sortie de terrain a permis de se rendre compte du besoin réel des populations. Compte tenu de la forte présence de postes d'eau autonome, il serait judicieux de maintenir le même type de qualité de service en orientant les projets vers la réalisation de PEA. Il importe donc d'orienter les études vers la recherche des gros débits.

Annexe 2.3 Rapport de visite de Kaya

Annexe 3.1 Cartes de structures a base des données magnétiques aériennes

Figure 1: Carte linéaire du bassin versant de Dori - Gorgadji

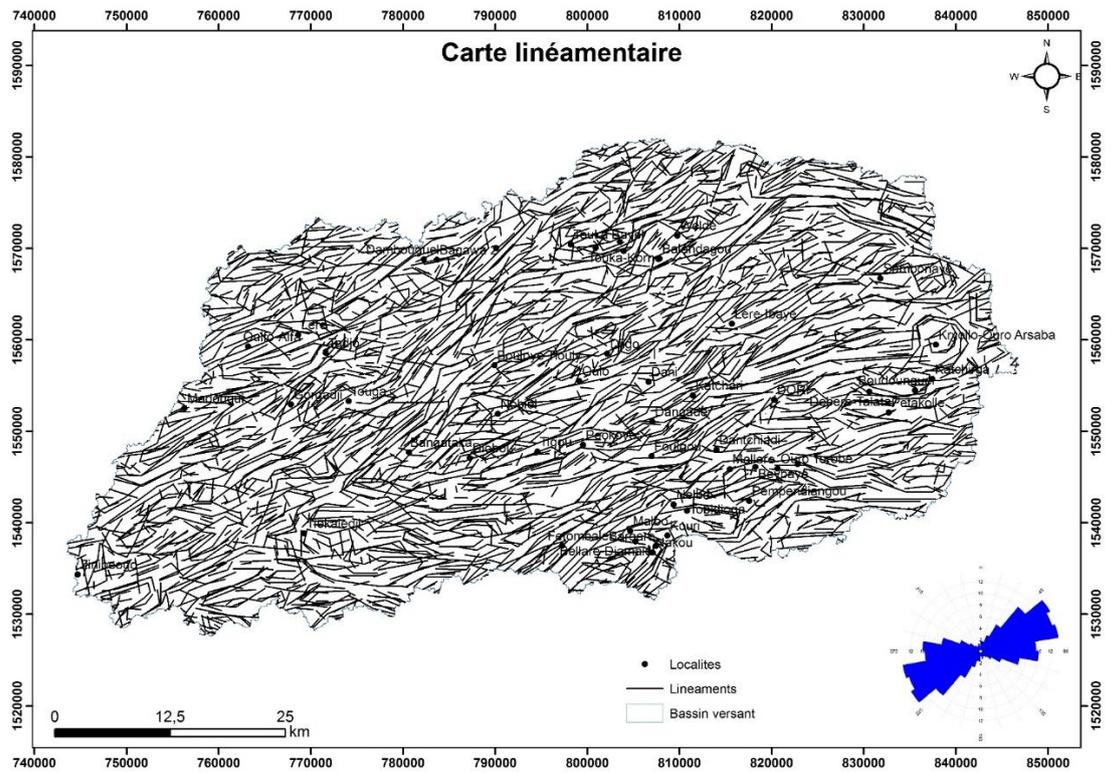






Figure 4: Carte linéaire du bassin versant de Titao

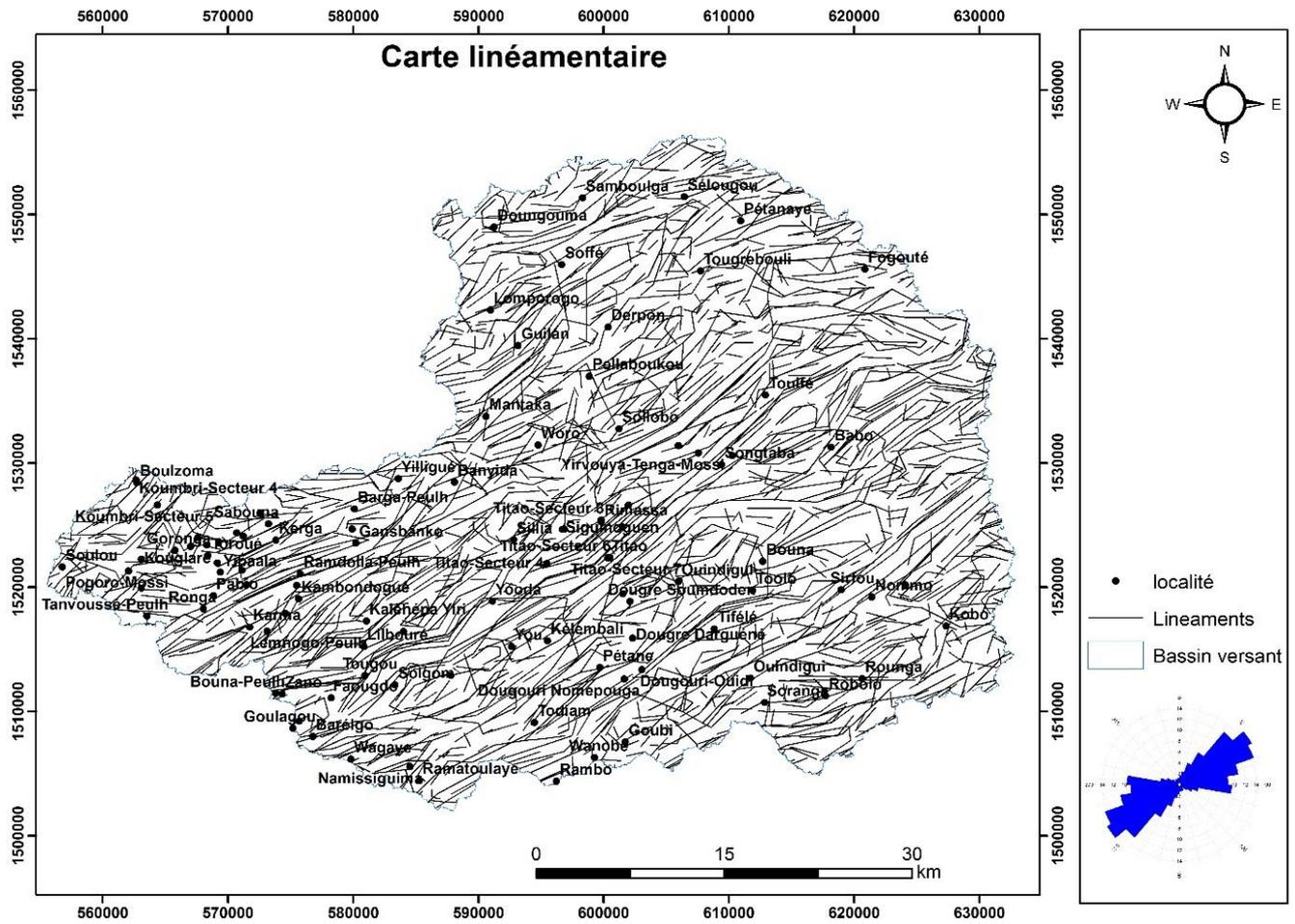


Figure 5: Carte linéaire du bassin versant de Bouroum

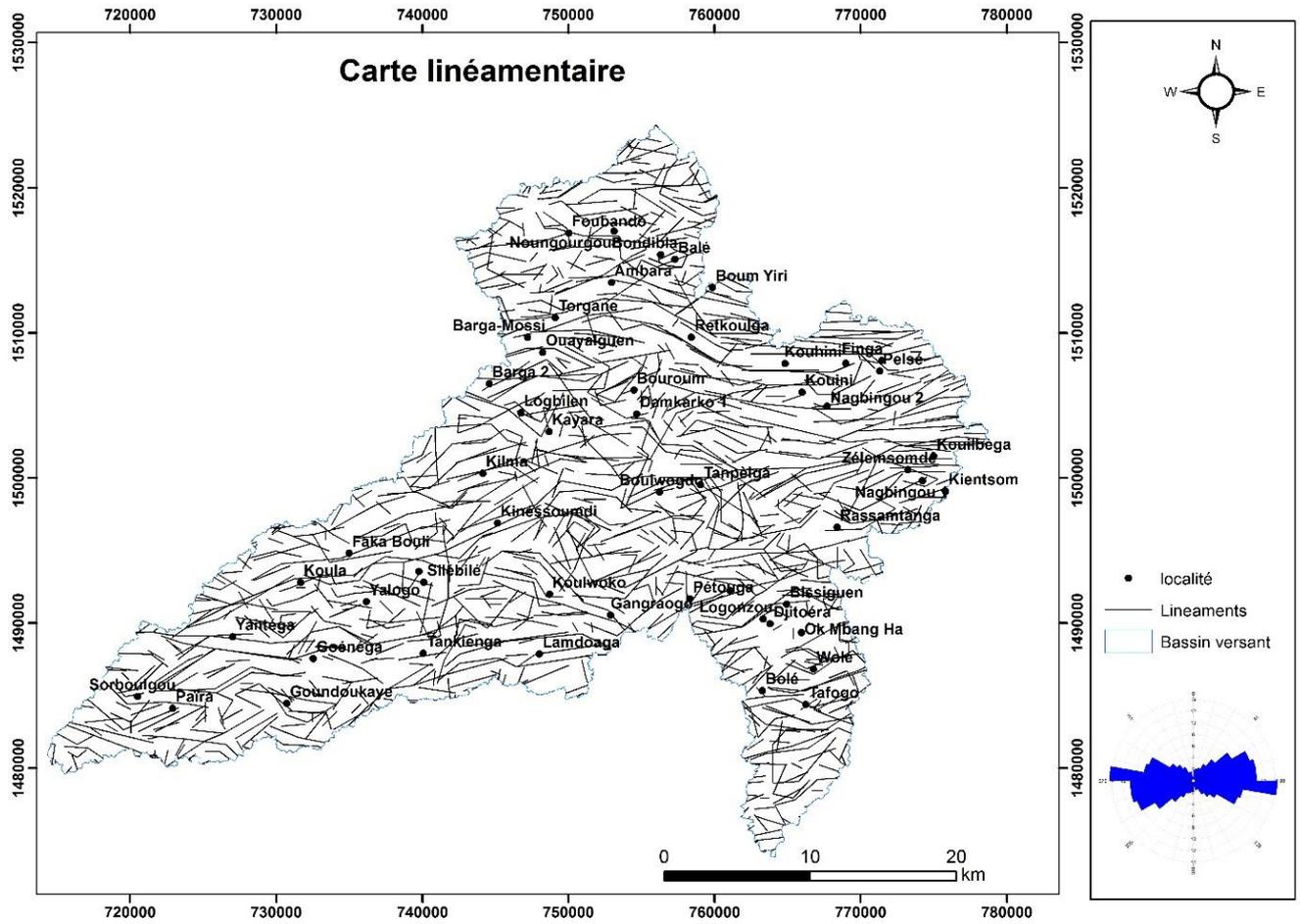
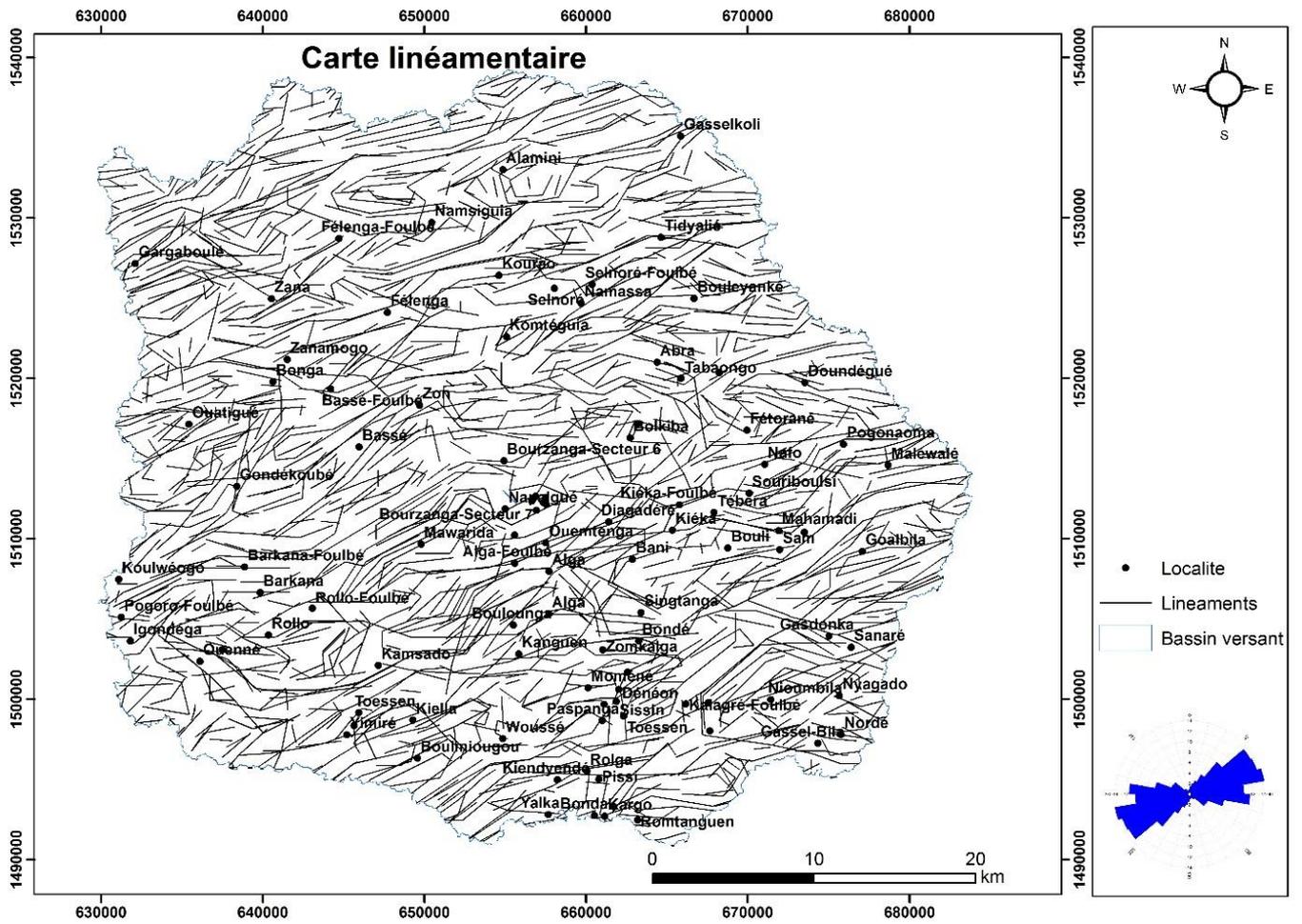


Figure 6 Carte linéaire du bassin versant de Bourzanga:





Annexe 4.1 : Résumé des études de cartographie des eaux souterraines existantes à l'aide d'une analyse multicritère..

Critères utilisés pour déterminer la potentialité des eaux souterraines par différents chercheurs

Auteurs Pays Zone/bassin vers.	Abdou Babaye, 2012 Niger Comm. de Diagorou et Tera	Adeyeye et al, 2019 Nigeria Dengi area, Plateau State	Arulbalaji et al 2019 India Kerala, Bassin de Vamanapuram	Bashe, 2017 Ethiopia Sud-ouest, Bassin de Weito	Fenta et al, 2015 Ethiopia Tigray, Vallée de Raya	Murthy & Mammo, 2009, Ethiopia Zone de Borena
Geologie	Socle cristalline Precambrien	Socle cristalline Precambrien	Socle cristalline Precambrien	Socle cristalline Precambrien, Basalts Tertiaires	Socle cristalline Precambrien, Basalts Tertiaires, alluvium	Socle cristalline Precambrien, Basalts Tertiaires, Roches sed. Mésozoïques
Methodology de poids	Estimation auteur et a base de littérature	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par auteur avec methode Saaty AHP	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP
Validation	nitrate. Productivite avec debit de forages existants et forages secs	Pas quantitatif	Pas quantitatif	Non	Non	Avec debit de forages existants
Criteres						
Recharge						
Epaisseur d'alteration						
Pente		19	8.5	17.5	10	9
Densite de fracturation/lineaments	25	13	10	12.5	24	
Lith. superf./Sol/Fraction de argile	25	8	10	7.5		
Densite de drainage	30	9	8.5	9.5	6	5
Niveau piezometrique	20					
Debit d'exploitation						
Lithologie/geologie	35	13	10	13.5	38	42
Elevation		19				
Proximite lianements/contacts		10				17
Proximite drainage		9				
Geomorphology/landscape						
Utiliation/couverture de sol (LU/LC)			13.5	15.5	16	24.5
Precipitation			11.5	6.5	2	2.5
Topographic wetness Index (TWI)			6.5	17.5	4	
Indicateur de rugosité de topografie			5			
Topographic position index (TPI)			5			
Courbure pente (concave, convexe)			5			
Profondeur de forage						
Indice de succes de forages						
Temperature de surface						
Norm. Differ. vegetation index (NDVI)						
somme	100	100	100	100	100	100

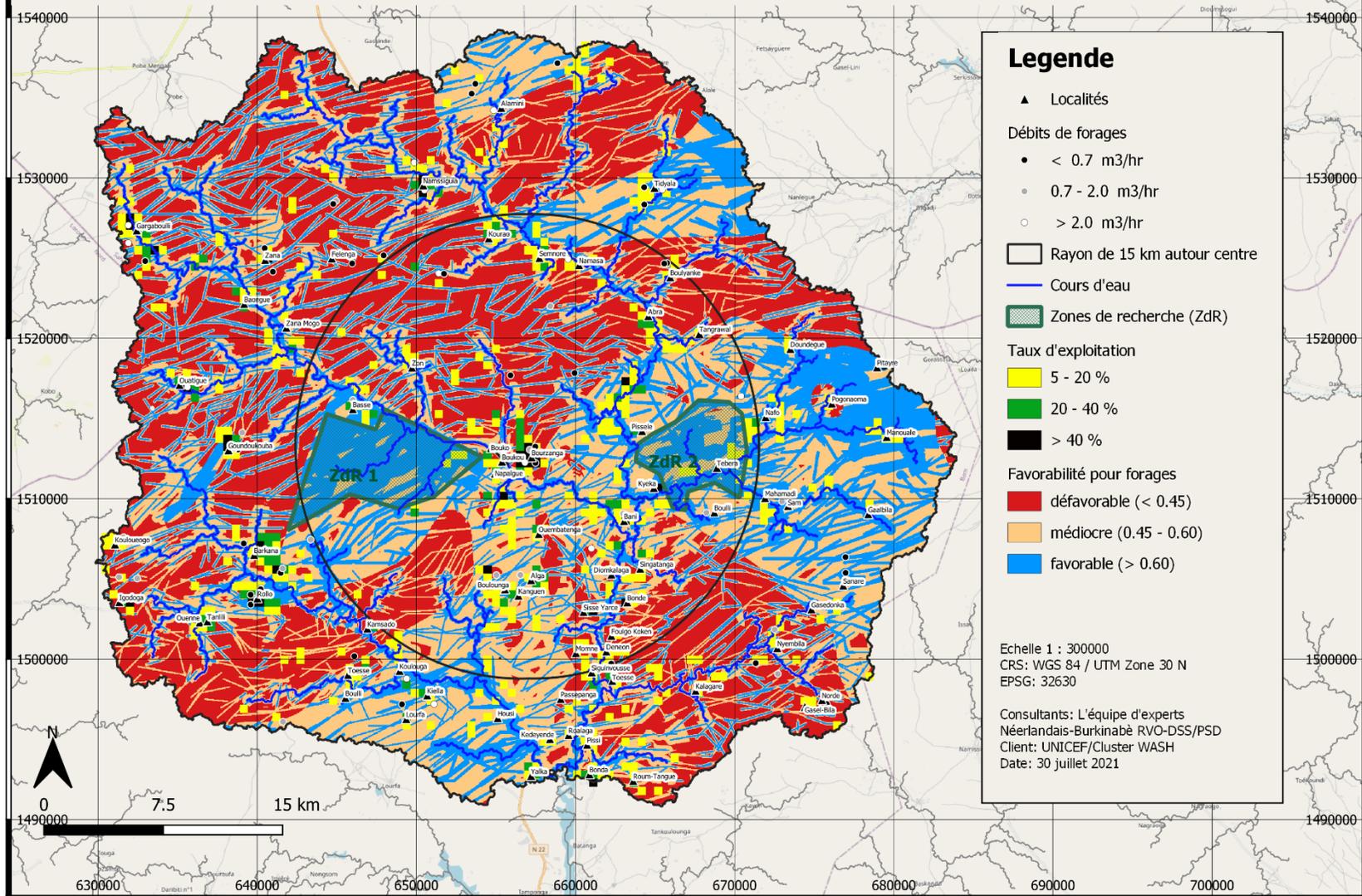
Critères utilisés pour déterminer la potentialité des eaux souterraines par différents chercheurs

Auteurs Pays Zone/bassin vers.	Owolabi et al 2020 South Africa Bassin de Buffalo, Southern Cape	Gumma & Pavelic, 2012 Ghana Pays entier	Hyann et al, 2015 Cote d'Ivoire District de Denguélé	Mangoua et al, 2019 Cote d'Ivoire Bassin du Bandama	Yao_et al_2016_Cotedivoire Cote d'Ivoire Bassin versant de la Lobo	Acacia_Water_2020 Ethiopia Zone de Borena
Geologie	Sandstones, mudstones and dolerites Karoo Group	Socle cystalline Precambrien, Roches sedimentaire de bassin Volta	Socle cystalline Precambrien	Socle cystalline Precambrien	Socle cystalline Precambrien	Socle cystalline Precambrien, Basalts Tertiaires
Methodology de poids	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimations des auteurs	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par auteurs avec methode Saaty AHP	Estimation par experts hydrogeologues avec methode Saaty AHP durant etalier
Validation	Avec debit de forages existants	Avec debit de forages existants	Non	Non	Non	Non
Criteres						
Recharge			25	71.5	50	25
Epaisseur d'alteration			4	11.5	8	8
Pente		12.5	50	64	25	7
Densite de fracturation/lineaments	21		8	17	12	
Lith. superf./Sol/Fraction de argile		13				
Densite de drainage	4	14.5	13		5	
Niveau piezometrique			75	25	25	
Debit d'exploitation	22	14.5	25	75	75	
Lithologie/geologie						
Elevation						38
Proximite lienaments/contacts						23
Proximite drainage						
Geomorphology/landscape		18				
Utiliation/couverture de sol (LU/LC)	21	13				
Precipitation	24	14.5				7
Topographic wetness Index (TWI)	6					
Indicateur de rugosité de topografie						
Topographic position index (TPI)						
Courbure pente (concave, convexe)						
Profondeur de forage			25	75	75	
Indice de succes de forages			75	25	25	
Temperature de surface	2					
Norm. Differ. vegetation index (NDVI)						
somme	100	100	100	100	100	100

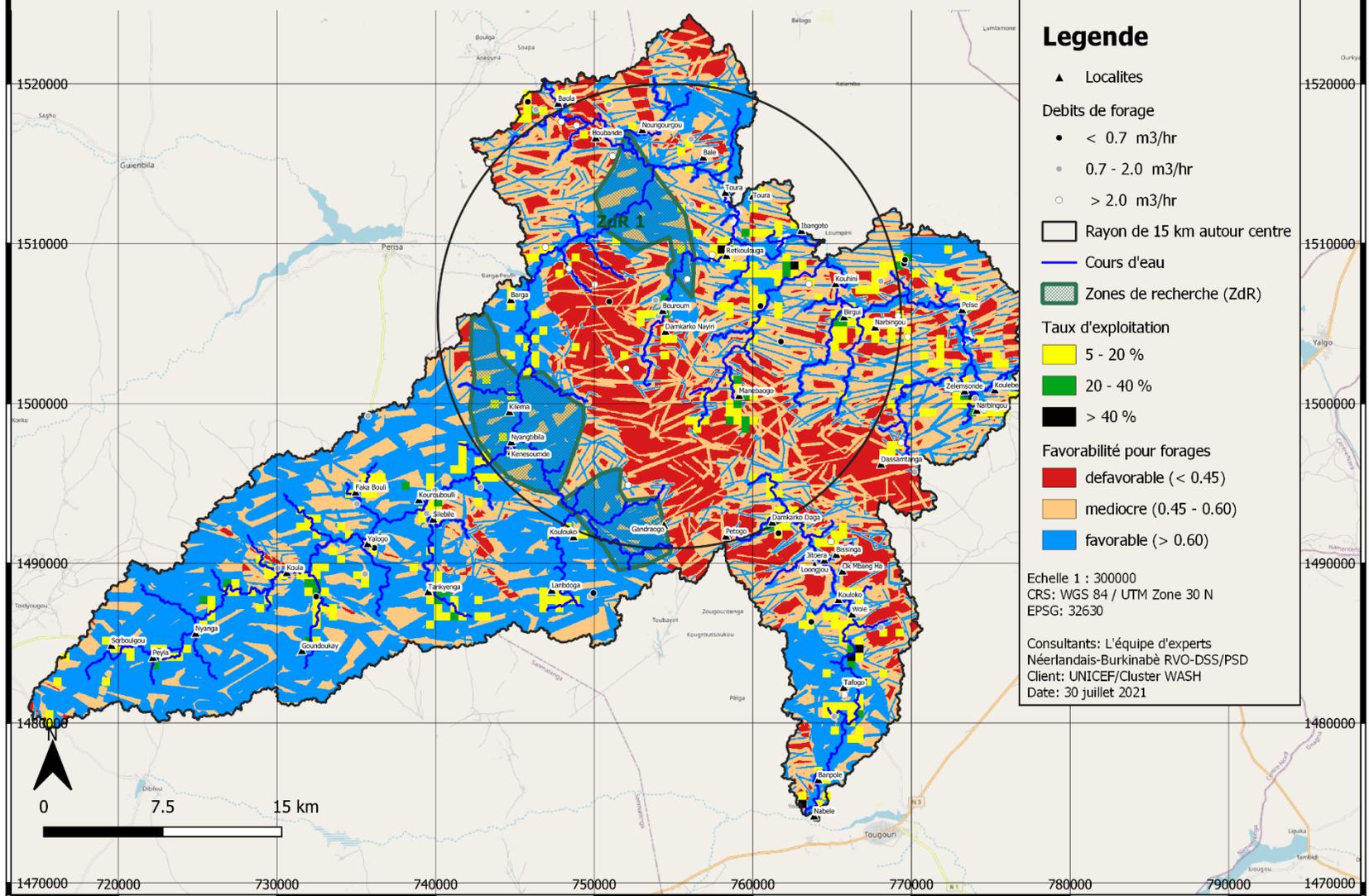
**Annexe 4.2 Cartes de favorabilité avec zones de recherche indiquées**

**(veuillez imprimer au format A3)**

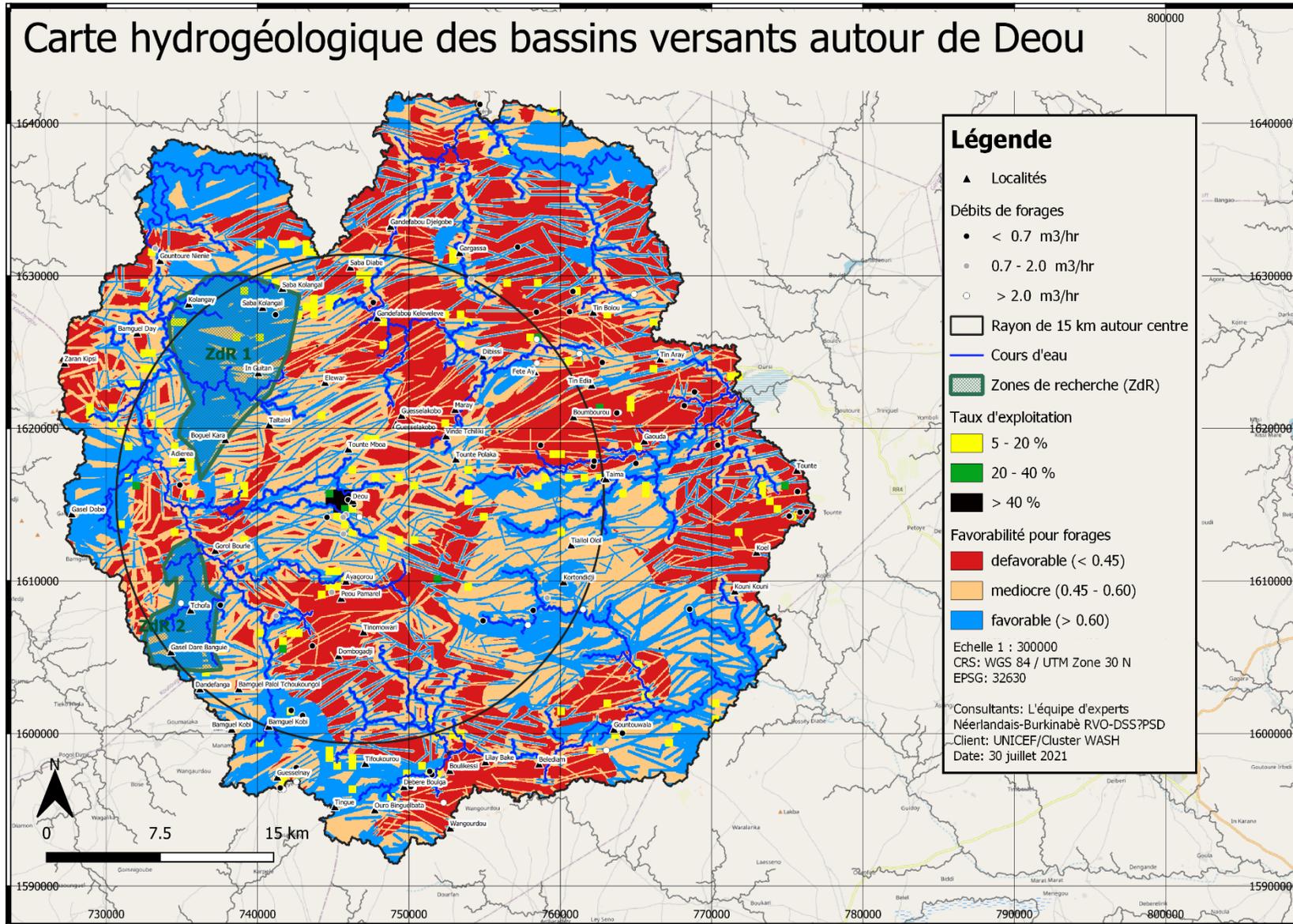
# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Bourzanga



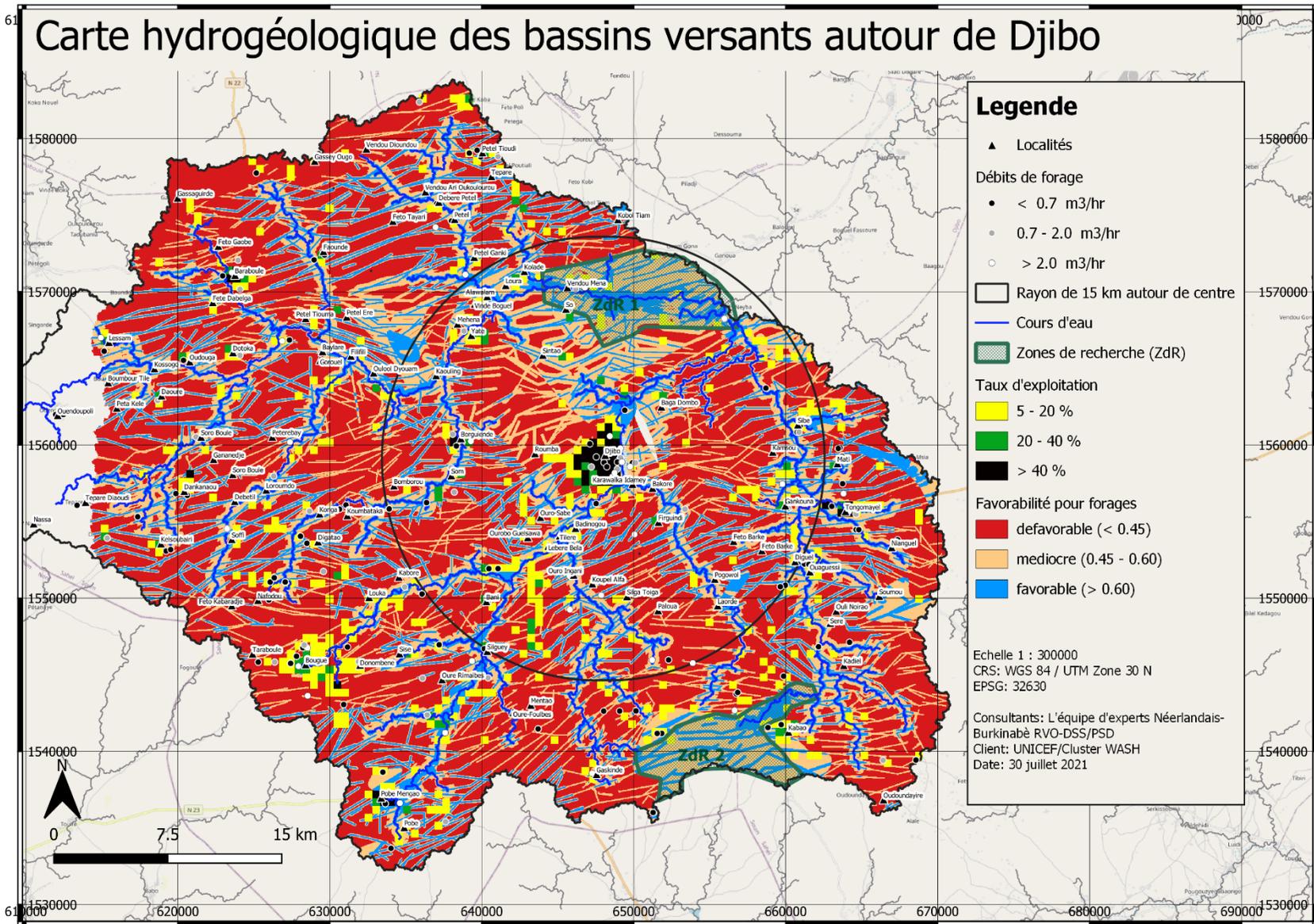
# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Bouroum



# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Deou



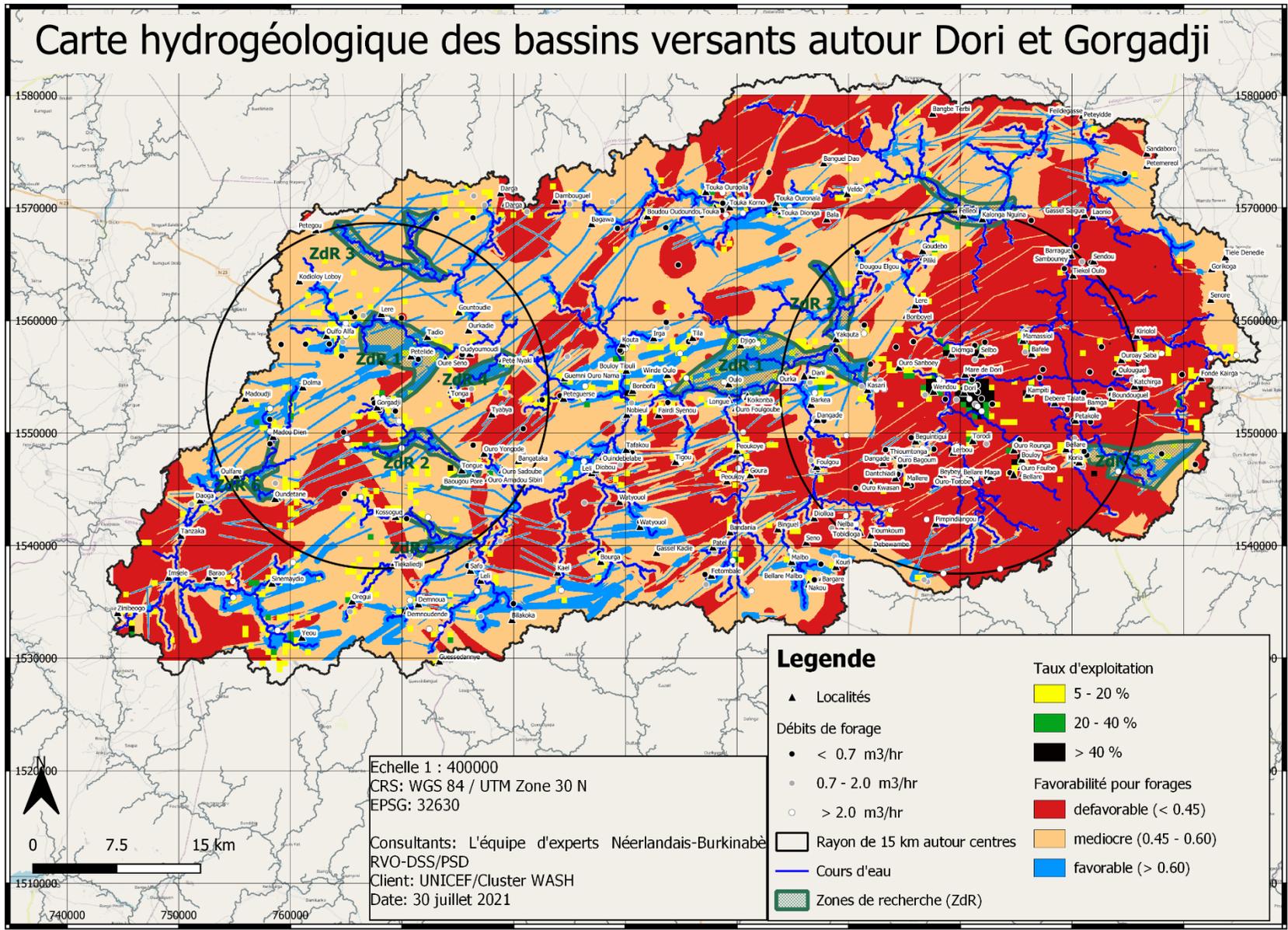
# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Djibo



## Legende

- ▲ Localités
  - Débits de forage
    - < 0.7 m<sup>3</sup>/hr
    - 0.7 - 2.0 m<sup>3</sup>/hr
    - > 2.0 m<sup>3</sup>/hr
  - Rayon de 15 km autour de centre
  - Cours d'eau
  - ▨ Zones de recherche (ZdR)
  - Taux d'exploitation
    - 5 - 20 %
    - 20 - 40 %
    - > 40 %
  - Favorabilité pour forages
    - defavorable (< 0.45)
    - mediocre (0.45 - 0.60)
    - favorable (> 0.60)
- Echelle 1 : 300000  
 CRS: WGS 84 / UTM Zone 30 N  
 EPSG: 32630
- Consultants: L'équipe d'experts Néerlandais-Burkinabè RVO-DSS/PSD  
 Client: UNICEF/Cluster WASH  
 Date: 30 juillet 2021

# Carte hydrogéologique des bassins versants autour Dori et Gorgadji

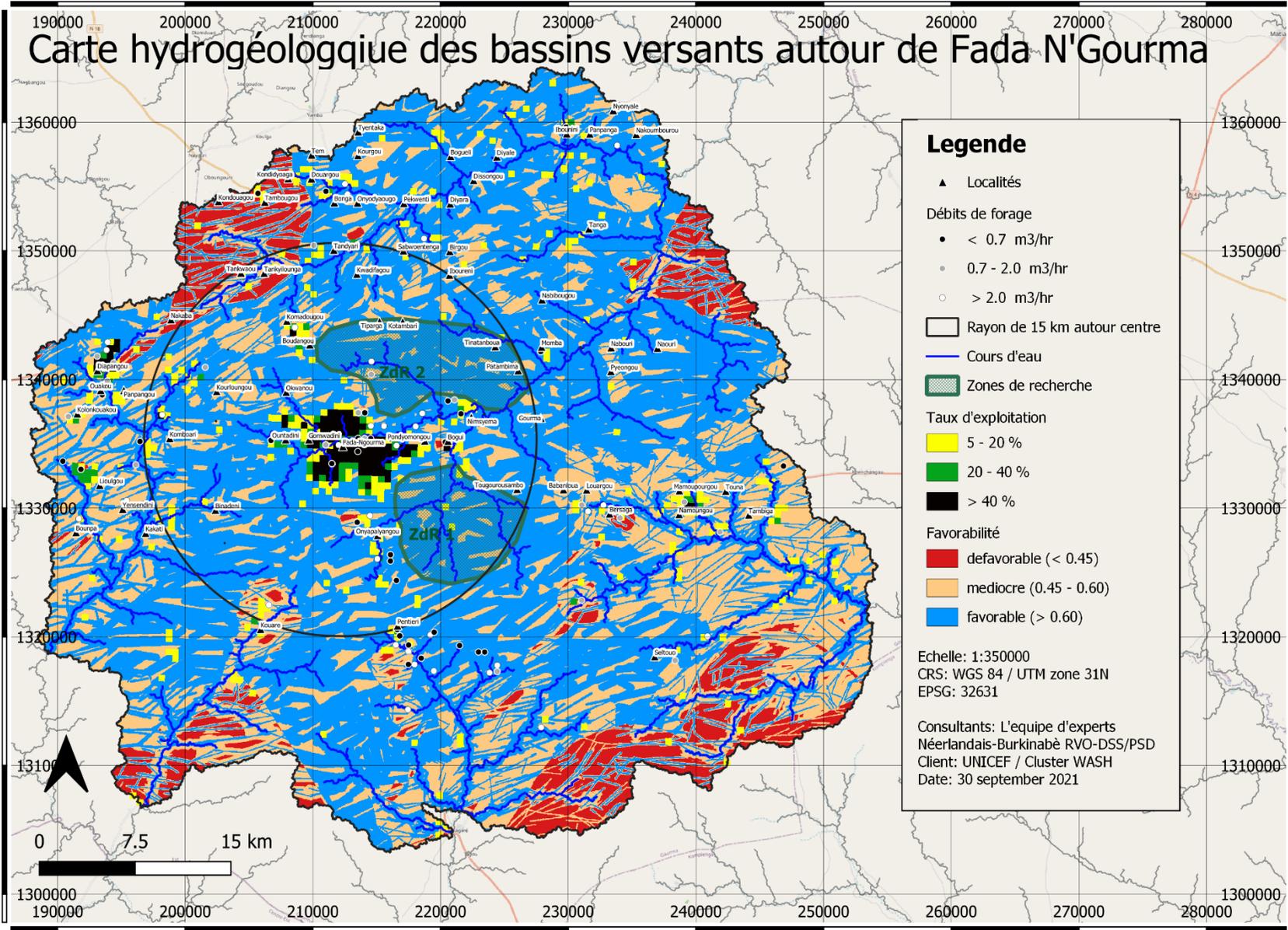


## Legende

- ▲ Localités
- Débits de forage
  - < 0.7 m<sup>3</sup>/hr
  - 0.7 - 2.0 m<sup>3</sup>/hr
  - > 2.0 m<sup>3</sup>/hr
- ◻ Rayon de 15 km autour centres
- Cours d'eau
- ▨ Zones de recherche (ZdR)
- Taux d'exploitation
  - 5 - 20 %
  - 20 - 40 %
  - > 40 %
- Favorabilité pour forages
  - defavorable (< 0.45)
  - mediocre (0.45 - 0.60)
  - favorable (> 0.60)

Echelle 1 : 400000  
 CRS: WGS 84 / UTM Zone 30 N  
 EPSG: 32630  
 Consultants: L'équipe d'experts Néerlandais-Burkinabè  
 RVO-DSS/PSD  
 Client: UNICEF/Cluster WASH  
 Date: 30 juillet 2021

# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Fada N'Gourma

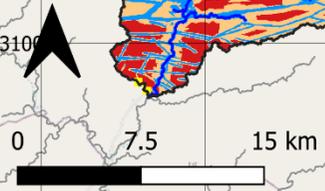


## Legende

- ▲ Localités
- Débits de forage
  - < 0.7 m3/hr
  - 0.7 - 2.0 m3/hr
  - > 2.0 m3/hr
- Rayon de 15 km autour centre
- Cours d'eau
- ▨ Zones de recherche
- Taux d'exploitation
  - 5 - 20 %
  - 20 - 40 %
  - > 40 %
- Favorabilité
  - defavorable (< 0.45)
  - mediocre (0.45 - 0.60)
  - favorable (> 0.60)

Echelle: 1:350000  
 CRS: WGS 84 / UTM zone 31N  
 EPSG: 32631

Consultants: L'equipe d'experts  
 Néerlandais-Burkinabé RVO-DSS/PSD  
 Client: UNICEF / Cluster WASH  
 Date: 30 september 2021



1300000 190000 200000 210000 220000 230000 240000 250000 260000 270000 280000 1310000 1320000 1330000 1340000 1350000 1360000

# Carte hydrogéologique des bassins versants autour de Titao

## Legende

▲ Localités

Débits de forage

• < 0.7 m3/hr

○ 0.7 - 2.0 m3/hr

○ > 2.0 m3/hr

□ Rayon de 15 km autour centre

— Cours d'eau

▨ Zones de recherche (ZdR)

Taux d'exploitation

■ 5 - 20 %

■ 20 - 40 %

■ > 40 %

Favorabilité pour forages

■ defavorable (< 0.45)

■ mediocre (0.45 - 0.60)

■ favorable (> 0.60)

Echelle 1 : 300000

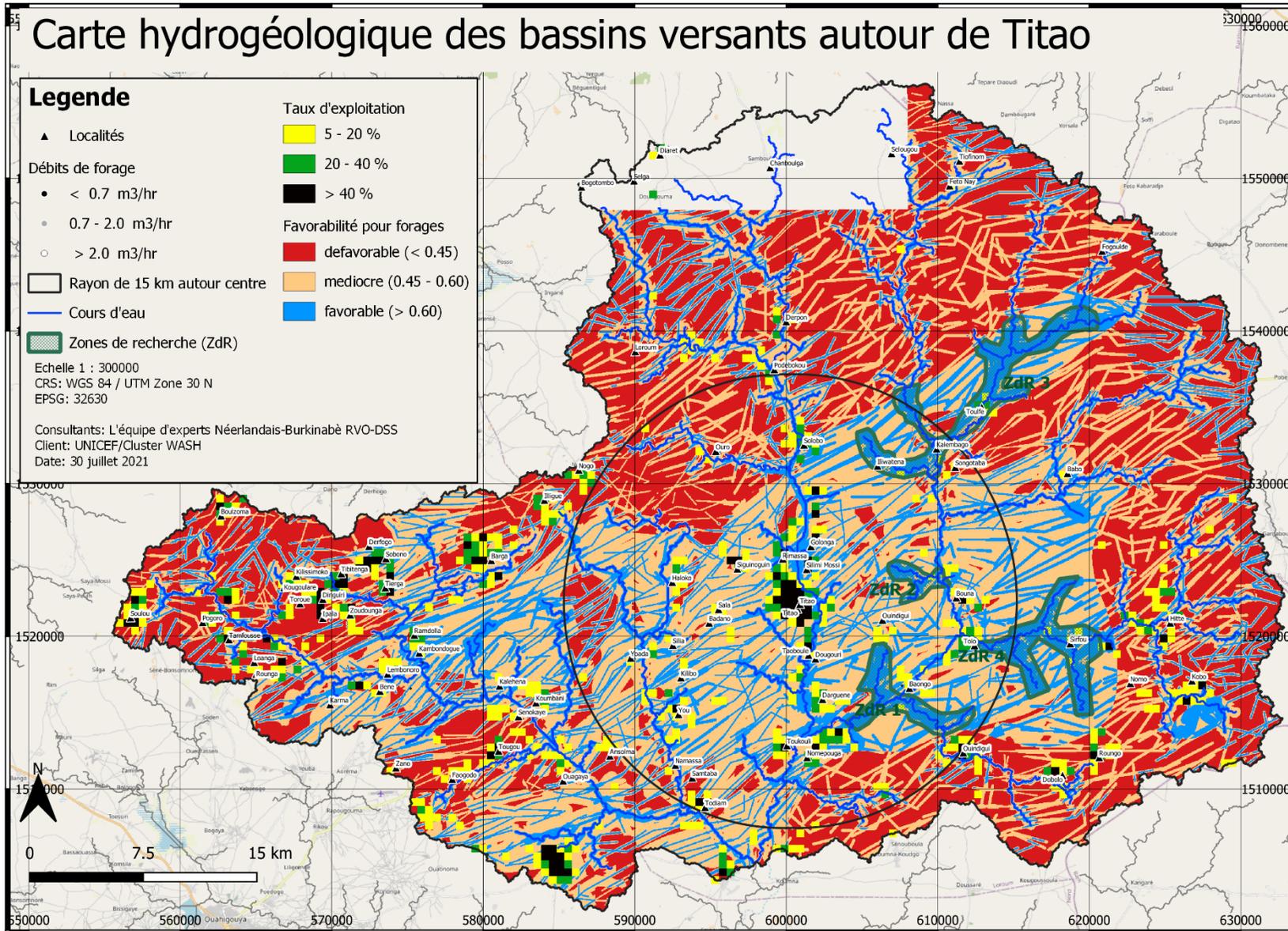
CRS: WGS 84 / UTM Zone 30 N

EPSG: 32630

Consultants: L'équipe d'experts Néerlandais-Burkinabè RVO-DSS

Client: UNICEF/Cluster WASH

Date: 30 juillet 2021



## Annexe 6.1 Méthodologie et instrumentation géophysiques

### Contenu:

#### 1) Vue d'ensemble

#### 2) Méthodes

##### 2.1 Application des méthodes conventionnelles VES et HEP

##### 2.2 Application de la tomographie par résistivité électrique (ERT)

##### 2.3 Application du sondage électromagnétique dans le domaine

#### 1) Vue d'ensemble

Dans cette annexe, plusieurs méthodes et instruments seront discutés et évalués pour l'application sur la géologie du socle du Burkina Faso. Tout d'abord, un bref aperçu des méthodes sera donné et quelques informations de base très basiques sur la résistivité de la terre. Ensuite, la méthodologie, l'instrumentation, les procédures de terrain et l'interprétation des données sont discutées pour chaque méthode. A la fin de chaque paragraphe, l'application spécifique à la situation du Burkina Faso est discutée. Les principales conclusions et une approche par étapes ainsi qu'un résumé des principales conclusions de l'étude kenyane sont résumés à la fin. Pour VES, HEP, ERT, TDEM et FDEM, des informations sont également données sur les procédures de terrain.

Tableau 1 : Brève explication des méthodes géophysiques

Abréviation	La description
SP	Self Potentiel, cette méthode mesure la tension (potentiel naturel de la terre) entre 2 électrodes de potentiel (souvent des coupelles en céramique remplies de sulfate de cuivre), avec une distance fixe le long d'un profil. Des changements de lithologie ou de type de sol peuvent entraîner un changement de SP. Le système est purement qualitatif. Une interprétation directe n'est pas possible. L'effet SP peut provenir d'une faible profondeur, d'une plus grande profondeur ou d'une combinaison de changements de résistivité de la terre. Les changements de SP correspondent souvent aux emplacements indiqués par la radiesthésie. SP sortira du cadre de ce chapitre. Le SP est utilisé dans l'exploration de minerai (à haute conductivité).
VES	Le sondage électrique vertical (VES) est un sondage unidimensionnel largement utilisé basé sur le courant continu (CC). Avec 2 électrodes de courant, un courant continu est induit. Deux électrodes de potentiel mesurent le potentiel induit par ce champ électrique continu. La résistivité apparente est calculée avec la profondeur en augmentant les distances des électrodes. La profondeur d'investigation typique d'un VES est d'environ un sixième (1/6) de la plage d'électrodes AB. Des modèles en couches de véritable résistivité (horizontales) peuvent être dérivés avec un logiciel

	spécial. La configuration des électrodes est Schlumberger ou Wenner avec des couches supérieures à haute résistance.
HEP	Le profilage électrique horizontal (HEP) est généralement utilisé pour localiser ou délimiter rapidement les variations latérales de la résistivité apparente du milieu et implique généralement le déplacement d'un réseau d'électrodes à séparation constante horizontalement le long de la surface. La profondeur exacte des anomalies est généralement difficile à établir et correspond souvent à des effets proches de la surface. Aucune inversion en couches n'est possible. Les matrices peuvent être standard ou plus dédiées (Schlumberger, Wenner, dipôle, etc.) La configuration des électrodes HEP doit être soigneusement choisie et dérivée du sondage VES.
ERT	La tomographie par résistivité électrique (ERT) est une méthode à courant continu bidimensionnelle (2D). Fondamentalement, il s'agit d'une combinaison de nombreuses mesures HEP et VES dans un seul ensemble de données intégré, et est donc également appelé CVES (VES continu). De longs câbles avec de nombreuses électrodes sont utilisés. Avec la répétition, la méthode peut être mise à l'échelle jusqu'à un modèle 3D. La profondeur d'exploration est fondamentalement la même qu'avec VES et HEP. Les modèles en couches 2D peuvent être calculés (« inversés ») avec un logiciel spécial. La méthode ERT est très limitée applicable dans les zones à fort bruit artificiel (zones urbaines, lignes électriques, tuyaux métalliques enterrés, etc.) De même, dans les zones avec une couche arable à haute résistance, l'application est limitée et un arrangement spécial pour augmenter le contact des électrodes est nécessaire.
IP	La polarisation induite, souvent combinée dans les instruments ERT, est une application DC dans le domaine temporel. La diminution du potentiel est mesurée dans le temps après coupure du courant. Il peut s'agir de la décroissance totale (spectrale ou forme d'onde complète) ou de la décroissance en % entre deux fenêtres temporelles distinctes. Des valeurs IP élevées correspondent à certains types d'argile. L'inversion de l'IP dans un modèle de couche doit être effectuée en combinaison avec la résistivité et est souvent difficile à interpréter. La propriété intellectuelle n'entre pas dans le champ d'application de cette annexe.
TDEM	Time Domain Electro-Magnetic (TDEM) est basé sur un champ EM primaire intermittent dans une antenne émettrice (ou boucle). Le champ secondaire (appelé "courants de Foucault" est induit dans la sous-surface, en raison du changement de ce champ primaire à zéro (arrêt). Ce champ secondaire décroissant au fil du temps (microsecondes) est mesuré dans une boucle de récepteur après chaque arrêt du champ primaire. Le graphique du temps en fonction de l'amplitude (Nano-micro Volts) est calculé en un graphique de la profondeur de la résistivité apparente. Avec un logiciel spécial, un modèle de couche peut être dérivé (inversion). La méthode est plus sensible à la conductivité relative (faible couches de résistivité). ZONGE, WalkTEM et TDEM aéroporté (par exemple SKYTEM) sont des instruments TDEM spécifiques. La méthode TDEM n'est pas applicable dans les zones à fort bruit artificiel (zones urbaines, à proximité de lignes électriques, clôtures métalliques, etc.)
FDEM	Domaine de fréquence Electro Magnetic est basé sur un champ EM continu avec une fréquence fixe. Un émetteur et un récepteur sont à distance fixe reliés par un fil. Le signal primaire transmis par l'émetteur est directement envoyé au récepteur et se déplace dans la terre. La combinaison de ce champ EM primaire et du champ EM secondaire inductif, qui est le champ total, est mesurée dans le récepteur. En soustrayant le champ primaire (via le fil) du champ total, le champ EM secondaire est enregistré et une mesure sous certaines conditions pour la conductivité apparente. En modifiant la distance, l'orientation des antennes et la fréquence de la profondeur

	d'exploration du champ EM peuvent être modifiées dans certaines limites. FDEM est sensible aux bruits artificiels (lignes électriques, clôtures métalliques, etc.)
MRS	<p>Sondage par résonance magnétique (MRS)</p> <p>Les mesures de sondage par résonance magnétique des protons de surface (SRM) ou de résonance magnétique nucléaire (RMN) peuvent être utilisées pour estimer indirectement la teneur en eau des zones saturées et non saturées du sous-sol terrestre. Le MRS est utilisé pour estimer les propriétés de l'aquifère, y compris la quantité d'eau contenue dans l'aquifère, la porosité et la perméabilité hydraulique. Une enquête MRS type se déroule en trois étapes. Tout d'abord, le bruit électromagnétique ambiant (EM) est mesuré. Ensuite, une impulsion de courant électrique est transmise à travers un câble à la surface du sol, appliquant un champ électromagnétique externe au sous-sol. Enfin, le champ EM externe est terminé et le signal de résonance magnétique est mesuré. La méthode n'est pas applicable dans les zones à fort bruit artificiel (zones urbaines, (à proximité de lignes électriques, clôtures métalliques, etc.)</p>
AMT	<p>Le sondage audio-magnéto tellurique (AMT) est une méthode électromagnétique (EM) unidimensionnelle (1D), utilisant une source naturelle, un champ EM basse fréquence induit par l'éclairage orageux et le rayonnement cosmique (vent solaire). L'antenne du récepteur AMT doit être orientée exactement selon le vrai nord magnétique. Des profondeurs d'investigation jusqu'à 600 m ou plus sous terre peuvent être atteintes en fonction des fréquences enregistrées. La résolution est médiocre et doit être effectuée en combinaison avec TDEM. Dans les zones urbanisées, les mesures AMT ne sont pas possibles en raison du bruit EM artificiel. La résistivité apparente peut être calculée à partir des mesures. Les modèles en couches peuvent être calculés avec un logiciel spécial à partir d'une combinaison de TDEM et AMT. La méthode n'est pas applicable dans les zones à fort bruit artificiel (zones urbaines, (à proximité de lignes électriques, clôtures métalliques, etc.)</p>

Tableau 2; Brève explication de certains concepts et définitions géophysiques

Résistivité apparente	La résistivité apparente ou apparente $\rho_a$ est la résistance réelle mesurée corrigée de la distance des électrodes en ohmmètre. C'est la résistivité totale ou en vrac (distribution) dans la sous-surface jusqu'à la profondeur d'exploration.
Résistivité spécifique	La résistivité calculée avec l'inversion d'une couche spécifique avec à une profondeur spécifique. Si le modèle est correct, la résistivité spécifique $s$ est la même que la résistivité de formation de la couche spécifique. Les diagraphies de forage et les mesures sur des échantillons de roche et de sol peuvent mesurer la résistivité spécifique.
Inversion	Le processus de calcul dans lequel la résistivité apparente est calculée dans un modèle de couche avec des résistivités et des profondeurs spécifiques.
Modèle	Le modèle de couche calculé avec des résistivités et des profondeurs spécifiques à partir d'un logiciel dédié. Ce modèle peut être traduit en un modèle hydrogéologique.
Équivalence 1	Le modèle dérivé de la résistivité apparente n'est pas unique. Plus de modèles s'adapteront sur un ensemble de données. Plus de points de données (augmentation de la résolution) ou si des informations externes utilisées dans l'inversion entraîneront une diminution de l'équivalence du modèle.
Équivalence 2	Un modèle de couche peut être interpolé dans un modèle (hydro)géologique. Différentes lithologies peuvent avoir la même résistivité. Le sable avec des eaux souterraines saumâtres peut avoir la même résistivité que la couche d'argile. D'autres informations sont nécessaires pour le distinguer.
Résiduel	Le résiduel ou RMSE est un chiffre en % qui exprime en quoi un modèle calculé diffère des données de terrain réelles. La résistivité apparente mesurée est comparée à la résistivité calculée qui appartient au modèle. Un petit RMSE signifie un bon ajustement. ( $\ll 5\%$ ).
Modélisation prospective	C'est le processus par lequel un modèle de résistivité basé sur un concept (hydro)géologique est calculé en un ensemble de données synthétiques de résistivité apparente. Cet ensemble de données peut être inversé et comparé à l'inversion de l'ensemble de données réel. Avec la modélisation avancée, la résolution d'une méthode proposée peut être testée pour une certaine cible. Les modèles avancés de concepts hydrogéologiques peuvent être comparés à des ensembles de données réels.

### Remarque sur la résistivité

Les méthodes (sauf MSR) décrites dans ce chapitre mesurent (indirectement) la résistivité apparente ou la résistivité apparente ( $\rho_a$ , Rho-a) du sous-sol jusqu'à une certaine profondeur (profondeur d'exploration) et résolution. La profondeur et la résolution dépendent de la méthode et de l'instrumentation. Si la résistivité apparente est mesurée avec un émetteur ou un écartement d'électrode croissant, cela entraînera une augmentation de la profondeur. Si suffisamment de points de données sont collectés, la résistivité apparente peut être inversée en un modèle de couche (profondeur et résistivité spécifique) à l'aide d'un logiciel dédié. C'est ce qu'on appelle l'inversion. Bien sûr, plus d'un modèle s'adaptera au même ensemble de données (équivalence). Dans le même temps, un modèle de résistivité en couches ne peut pas être traduit sans ambiguïté en lithologie. L'équivalence peut être diminuée si d'autres informations (c'est-à-dire provenant des forages) sont incorporées dans l'interprétation. Dans ce processus, une profondeur ou résistivité connue peut

également être prééglée dans l'inversion. La profondeur d'exploration souhaitée et la résolution nécessaire sont importantes à estimer avant le travail sur le terrain car elles indiquent si une cible proposée peut être détectée et ce qui ne peut pas être détecté avec la méthodologie et l'instrumentation choisies. La résolution dépend de la quantité de points de données mesurés verticalement et latéralement. La résolution sera différente selon la méthode et l'application utilisées. La résolution ainsi que la profondeur d'exploration peuvent être testées avec une modélisation avancée. C'est le contraire d'une inversion : le calcul de la résistivité apparente à partir d'un modèle selon la méthode et les spécifications utilisées. Après inversion d'un jeu de données synthétiques, la résistivité spécifique est calculée avec la profondeur. Ce modèle synthétique peut être comparé au modèle réel d'inversion de données. Ce processus peut aider à comprendre la géométrie d'une cible (voir aussi la figure 5 du chapitre 4 et les figures 8, 15, 26 de cette annexe). La résistivité spécifique ou de formation réelle des sols, des sédiments et des roches dépend de la résistivité de la matrice de sédiments ou de roches, de la porosité et de la quantité et de la qualité de la teneur en eau. (Tableau 3). Cette résistivité de formation peut être approchée avec la loi (empirique) d'Archie, qui n'est valable que pour une matrice non conductrice :

$$\rho f = F * \rho w$$

$\rho f$  (résistivité de la formation) ,  $\rho w$  (résistance à l'eau)

$F$  (facteur empirique, facteur de formation)

#### **Le facteur de formation F :**

$$F = s^{-n} \cdot a p^{-m}$$

$S$ =saturation en eau,  $a$ =facteur de cimentation,  $p$ =porosité,  $n$ =exposant de saturation (lié à la quantité relative d'eau et d'hydrocarbures),  $m$ =facteur de cimentation lié à l'interconnexion des espaces poreux).

#### **Pour les sédiments non conducteurs saturés en eau, il peut être réduit à :**

$$F = a p^{-m}$$

Pour les sédiments non consolidés, non conducteurs et saturés d'eau, en règle générale, une approximation de F : F va de 1 à 5, 1 = sable très fin, 5 est lié à l'argile. Pour les sédiments consolidés ou cimentés, F sera beaucoup plus gros.

Exemple : L'eau interstitielle avec une conductivité électrique de 400 micro Siemens/cm (frais) dans les sédiments avec un F de 3 (sable grossier moyen) aura une résistivité de formation de :  $10000/400 * 3$  Ohmm. = 75 ohmm.. Le même sédiment saturé d'eau de mer (EC=40000 microS/cm):  $10000/40000 = 0.25 * 3 = 0.75$  ohmm.. La même formation, avec le même facteur de formation contenant une eau interstitielle de qualité différente, aura des résistivités de formation différentes. Dans le cas d'argile ou de sédiments avec une certaine quantité d'argile, la loi d'Archie

n'est pas applicable, car l'argile elle-même (matrice) est conductrice. Dans ce cas, l'équivalence se produira entre les argiles et le sable avec des eaux interstitielles saumâtres légères ou des eaux souterraines riches en nitrates (agriculture) ou en sulfates (solution de gypse).

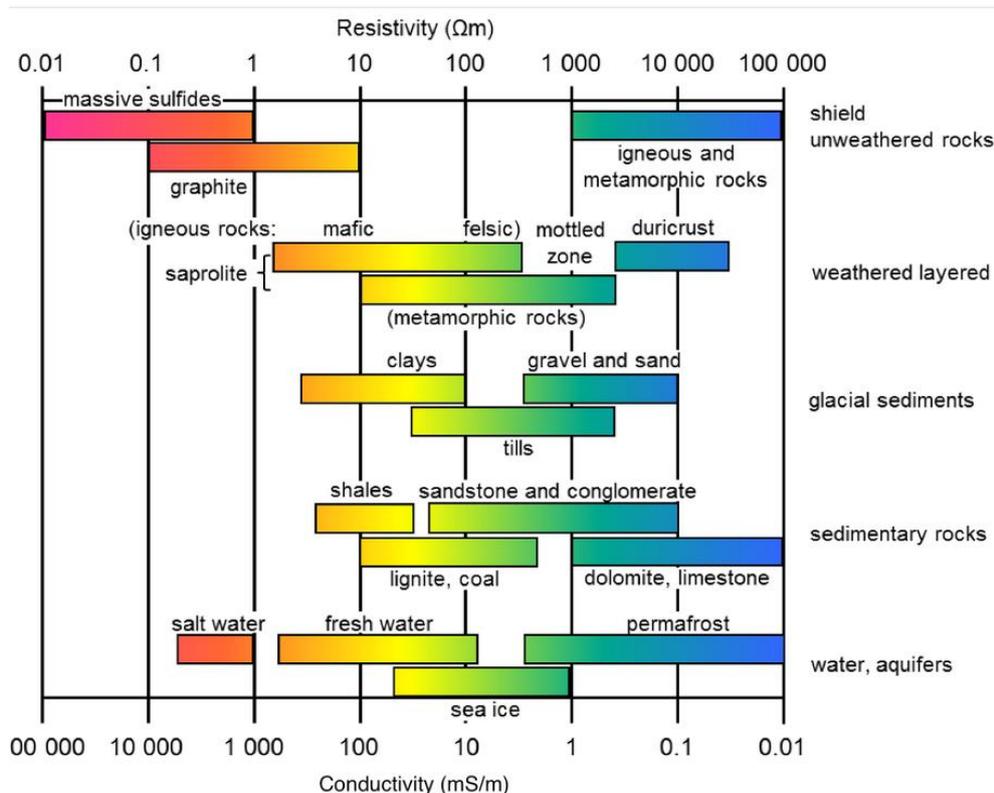


Tableau 3, aperçu généralisé des résistivités et conductivités de terre communes

Dans les zones avec un substratum rocheux altéré ou des sédiments cimentés (grès), les facteurs de formation seront beaucoup plus élevés et ne seront pas uniformément répartis. Dans les zones avec socle rocheux, les résistivités de formation typiques de la couche altérée ne seront pas sans ambiguïté à établir. De plus, la profondeur exacte du substrat rocheux frais ne peut pas être définie en raison de son changement progressif de résistivité avec la profondeur. Dans certains types de roches, le processus d'altération produit une certaine quantité d'argile, dans ce cas la résistivité de la matrice diminuera souvent dans la partie supérieure la plus altérée et augmentera vers le bas. Dans les régions arides, le processus d'altération peut également donner lieu à des horizons épais d'oxyde de fer (latérite) qui ont une résistivité très élevée. Dans les roches granitiques, l'argile résultant des feldspaths dégénérés peut être lavée en laissant une couche de sable sec de grains de quart sur le dessus, ce qui entraîne une résistivité élevée de la couche supérieure. Dans les sols tropicaux, le processus de lessivage peut conduire à une argile constituée d'oxyde d'aluminium pur (bauxite) qui a également une résistivité très élevée. Les roches volcaniques peuvent être conductrices d'elles-mêmes. Les argiles résultant de l'altération des roches volcaniques ont souvent une très faible conductivité. De tout cela, l'interprétation de la distribution des résistivités dans le sous-sol n'est pas simple et de type rocheux, les processus d'altération, le climat, les contacts géologiques, la possibilité d'une paléotopographie enfouie liée au paléoclimat, etc. doivent être pris en compte (figure 1).

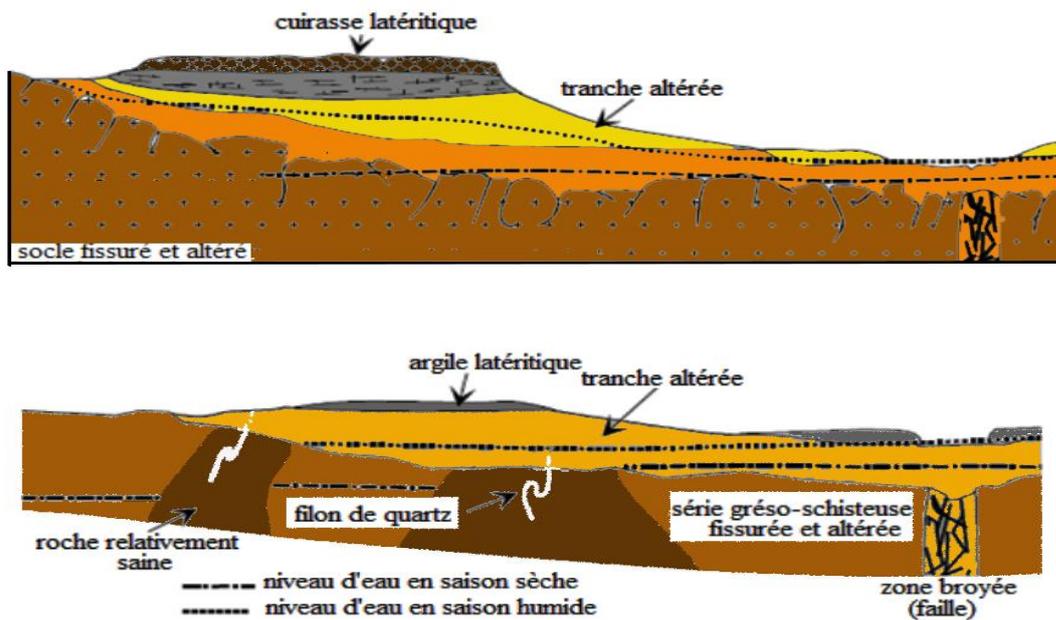


Figure 1, exemple simplifié d'altération dans 2 types de sous-sol, granit (en haut) et schistes (en bas). (Modifié d'après M. Ouedraogou, 2016)

Malgré le fait que la profondeur exacte jusqu'au sous-sol soit souvent difficile à établir avec les méthodes de résistivité lorsqu'elles sont appliquées correctement, le changement relatif de profondeur peut devenir visible. Les profondeurs relatives peuvent être calculées et comparées en fixant la résistivité de la couche altérée dans chaque sondage le long d'un profil dans le processus d'inversion (si les données permettent l'inversion). En supposant que la ou les couches altérées aient la même résistivité et proviennent du même type de roche, le changement relatif de profondeur par rapport au substrat rocheux deviendra visible. En général, les systèmes de failles se traduiront par une couche altérée plus profonde, parfois en combinaison avec un changement de lithologie. Ainsi, les linéaments visibles sur les photos de surface, associés à des failles, et s'ils sont altérés plus profondément, fonctionnent comme un système de drainage, et conduisent donc souvent à des rendements plus élevés. Les modèles avancés aideront à comprendre les inversions et à tester la profondeur et la résolution d'exploration, voir également les figures 6.5 du chapitre 6.

## 2) Méthodes

### 2.1) Application des méthodes conventionnelles (VES et HEP)

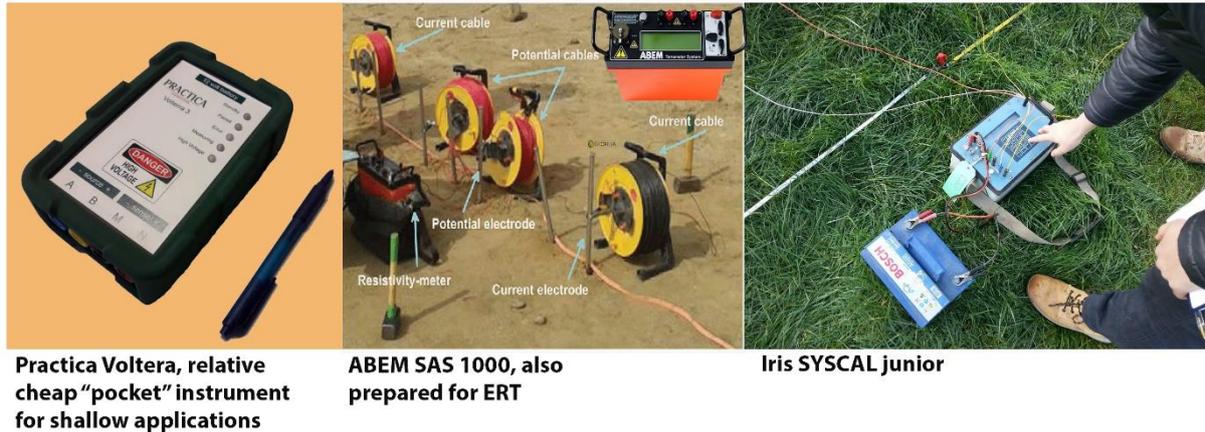


Figure 2, examples of Instruments for VES and HEP, a gauche instrument de poche bon marché pour des applications peu profondes et limitées, au milieu ABEM sas 1000 aussi préparé pour ERT, a droite Iris SYSCAL junior

Le sondage électrique vertical 1D à courant continu (VES) est une technique géophysique largement utilisée pour l'exploration des eaux souterraines. Depuis les années 80, le VES et le profilage électrique horizontal (HEP) associé sont la norme commune, pratiquée par de nombreux consultants dans les enquêtes hydrogéologiques en se reposant pour les meilleurs emplacements de forage. Malgré leur utilité avérée dans une variété d'applications, ces méthodes ont des limites strictes qui ne sont pas toujours reconnues par les consultants et les superviseurs de projet sur le terrain. Cela peut conduire à des interprétations trompeuses, à des résultats décevants et à un mauvais positionnement des puits et encore plus important en ce qui concerne la durabilité, une mauvaise compréhension du système aquifère.

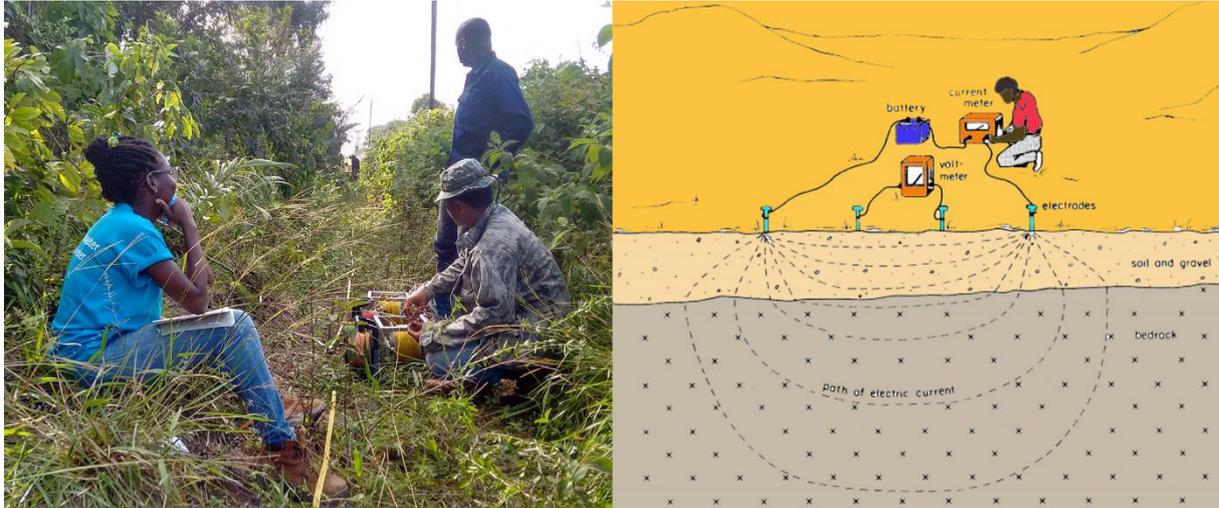


Figure 3, à gauche, Un transect a été coupé pour un sondage VES en ligne droite, à droite, image schématique du sondage VES.

### Méthodologie VES

VES est un système de sondage qui applique un courant continu (CC). Dans une configuration standard, il utilise 4 électrodes : 2 électrodes de courant externes et 2 électrodes de potentiel internes, la connexion entre les 2 paires d'électrodes (courant et potentiel) est le sol (supérieur). Un émetteur transmet une tension fixe (souvent jusqu'à 400 - 1000 volts) à travers les électrodes de courant, dans ce circuit le courant est mesuré. En raison de ce courant continu qui traverse le sous-sol injecté par les électrodes de courant (AB), un champ de potentiel est généré dans le sous-sol. Une partie de ce champ est mesurée avec les 2 électrodes de potentiel (MN). En appliquant la loi d'Ohm ( $V/I=R$ ) (calcul de la résistance) et un facteur de correction F pour les distances des électrodes la résistivité apparente ( $\rho_a$  (Rho-a), peut être calculée ( $F * V/I) = \rho_a$ , = ohmm., V=volts, I=ampère). Certains instruments calculent directement cela en fonction de distances de mesure prédéfinies. Lorsque les distances entre les électrodes de courant sont augmentées, la profondeur d'exploration augmente également. Un graphique de la résistivité apparente (Y) par rapport à la moitié de la distance actuelle de l'électrode ( $X=1/2AB$ ) doit être tracé sur le terrain et « devrait » être « lisse ». (voir illustration 4).

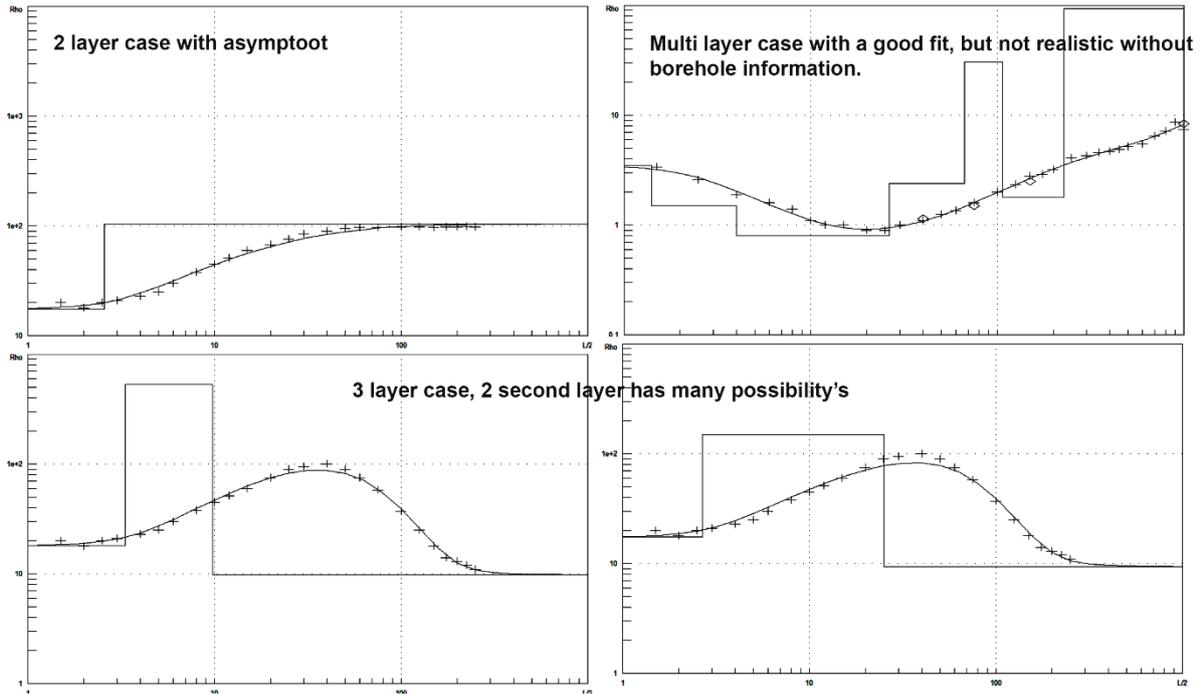


Figure 4, sondages VES, en haut à gauche : cas à 2 couches, en bas à gauche et en bas à droite : cas à 3 couches avec équivalence, en haut à droite ; boîtier multicouche avec un modèle irréaliste mais un bon ajustement. La ligne pointillée est le graphique de champ ; le trait continu est la résistivité apparente selon le modèle (blocs). L'axe Y est un log de la résistivité apparente ou de la résistivité de formation (modèle inversé) en ohmmètre, l'axe X est le log de la distance d'électrode à moitié actuelle ( $1/2 AB$ ) ou le log de la profondeur du modèle en mètres). Les sondages peuvent être effectués dans une configuration Wenner (la distance entre les quatre électrodes est maintenue la même, toutes les électrodes doivent être déplacées en augmentant la distance) ou dans une configuration Schlumberger, dans laquelle la distance potentielle des électrodes est au moins 5 fois inférieure à la distance actuelle des électrodes. Les électrodes de potentiel sont maintenues à la même distance jusqu'à ce que le signal disparaisse dans le bruit de fond (potentiel naturel de la terre).

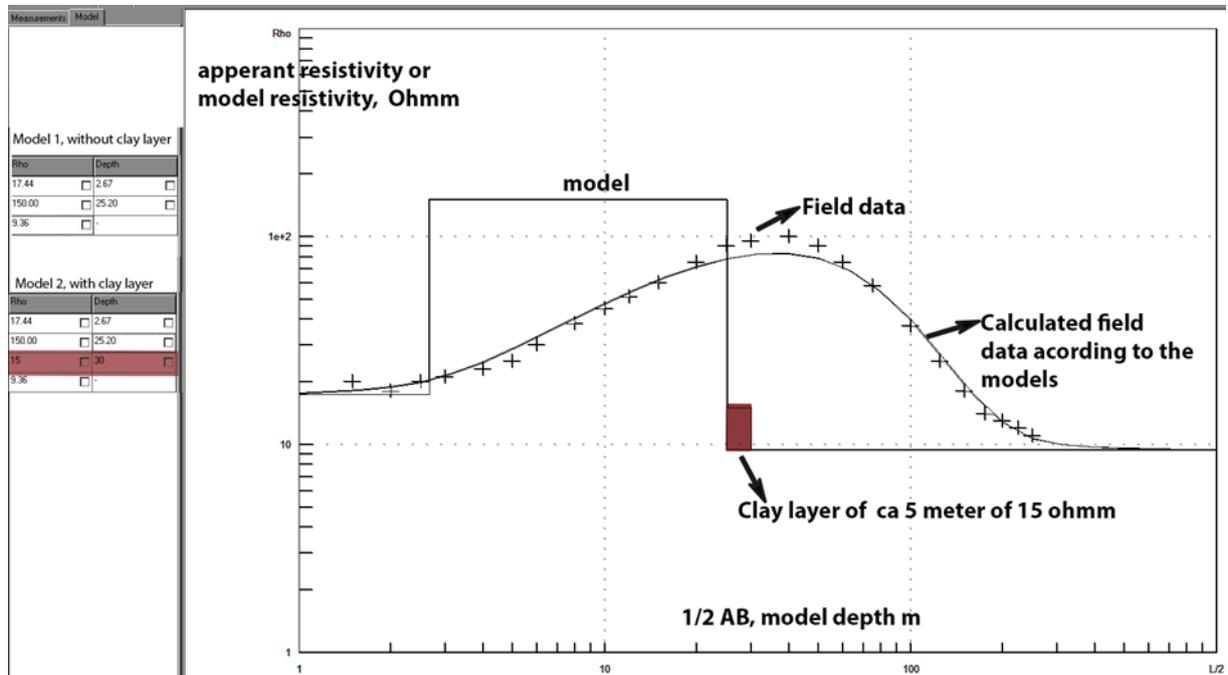


Figure 5, Exemple de graphique de champ et 2 modèles, avec et sans couche « argile », la couche « argile » de 5 m d'épaisseur et 15 ohms n'est pas visible" dans le graphique de résistivité apparente calculé et ne peut pas être détectée avec ce contraste (épaisseur et résistivité), les croix sont les mesures de champ, la ligne lisse est calculée selon le modèle, les blocs représentent les couches modélisées.

Les résistivités apparentes et les distances des électrodes de courant peuvent être inversées dans un modèle de résistivité en profondeur avec un logiciel dédié en supposant une stratification horizontale. (Voir les figures 4 et 5) Dans ces figures, les graphiques de champ sont indiqués par une ligne pointillée, la résistivité apparente en fonction de la moitié de la distance actuelle de l'électrode est tracée sur du papier log-log. Le trait continu est la résistivité apparente selon le modèle. La différence entre la ligne pointillée et la ligne continue représente l'ajustement. Notez que l'échelle horizontale est en Ohmm. à la fois pour la résistivité du modèle et la résistivité apparente. L'échelle horizontale est en mètres à la fois pour  $1/2L$  et la profondeur. A partir de ce chiffre, la différence entre la profondeur d'exploration et  $1/2L$  devient claire ! La modélisation directe peut être utilisée pour observer si une certaine couche est détectable. Cela peut être fait avec la plupart des logiciels d'inversion car le logiciel calcule la résistivité apparente en fonction du modèle.

### **Méthodologie HEP**

HEP est une méthode de *profilage* DC ; les 2 paires d'électrodes sont déplacées le long d'une ligne de profil à distance fixe. La résistivité apparente est mesurée aux différentes stations le long du profil (souvent à la même distance que la plus petite distance d'électrode). Un graphique est fait de la résistivité apparente (Y) en fonction de la distance des stations (X). Aucun modèle de couche ne peut être calculé (pas d'inversion). Différentes configurations d'électrodes sont possibles en fonction de la géométrie de la cible et du contraste. (voir figure 6) Le système est appliqué perpendiculairement à la structure géologique attendue pour détecter les changements latéraux. La distance des électrodes et le protocole de mesure doivent être soigneusement décidés et basés sur les résultats du VES ainsi que sur la taille, la direction et la profondeur de la cible. Étant donné que la résistivité apparente est mesurée et qu'un modèle de couche ne peut pas être construit, l'interprétation n'est pas toujours simple. Un changement latéral superficiel (peu profond) a un effet beaucoup plus fort sur le graphique que les phénomènes plus profonds. Cela peut être vu dans la figure 7 où les profils HEP sont comparés avec l'ERT et la figure 8, où les profils HEP synthétiques sont générés sur la base de différents modèles avancés d'ERT. Les configurations HEP peuvent être Wenner, Schlumberger, Dipole Dipole, etc., voir figure 6. Chacune ayant des résolutions et des applications différentes. Le plus couramment utilisé est le Wenner car l'intervalle de station peut être le même que les distances d'électrode (souvent indiqué par « a »). La résolution latérale est limitée mais la méthode est moins sensible au bruit (cela convient particulièrement aux zones avec une couche supérieure hautement résistive), SCHLUMBERGER est plus sensible au bruit (en raison des distances potentielles relativement faibles) mais a une meilleure résolution latérale. Dipole Le dipôle est le plus sensible au bruit en raison des faibles distances de potentiel et de la distance des électrodes de courant, mais il a une excellente résolution latérale.

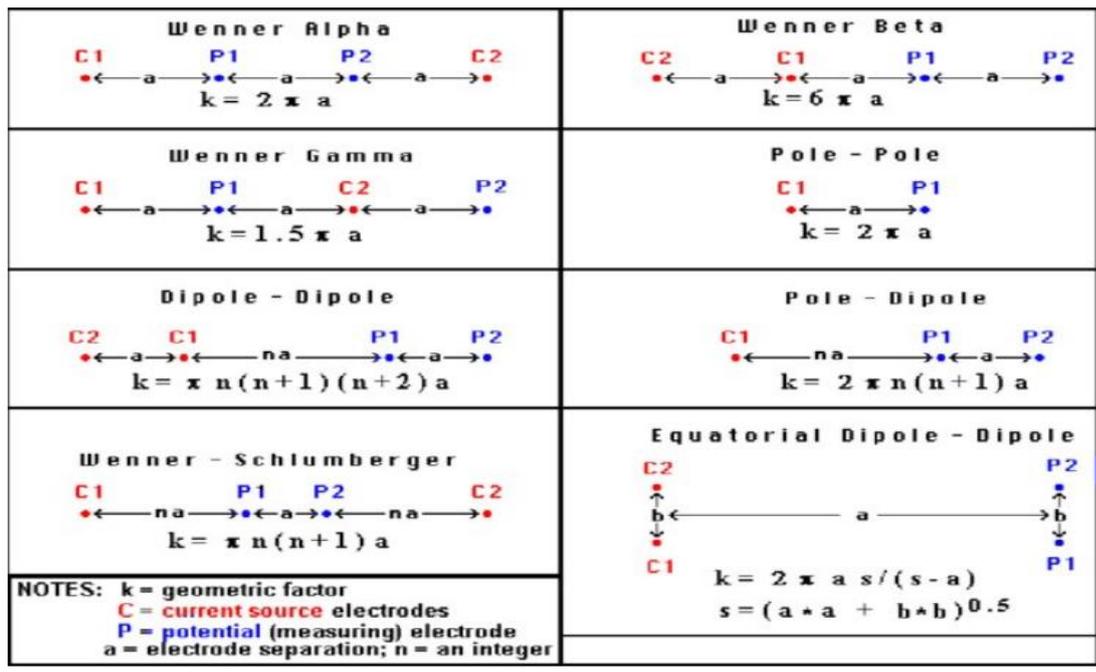


Figure 6, différentes configurations d'électrodes

**Pratique sur le terrain.**

Pour HEP et VES, 3 à 4 personnes sont nécessaires en fonction de la distance souhaitée. Avec le VES et le HEP, il faut veiller à de bons contacts d'électrode, les électrodes doivent être en acier inoxydable, de préférence d'une longueur de 60 cm ou plus, d'au moins 20 mm de diamètre, des connexions électriques stables et de bons fils et connecteurs isolés, en particulier dans les conditions salines et humides sont fortement recommandées. Les électrodes doivent être martelées sur plus de 80 % de leur longueur dans le sous-sol de manière à ce que le sol soit en contact étroit avec l'électrode. De l'eau salée et/ou de l'argile bentonite peuvent être ajoutées pour améliorer le contact dans les sols résistifs. Les travailleurs doivent être soigneusement instruits. Les instruments modernes utilisent plus de 400 voire 1000 volts, ce qui est dangereux et peut provoquer de graves brûlures ou même la mort. À de grandes distances, l'utilisation de talkies-walkies est cruciale. Les résultats (résistivité apparente par rapport à 1/2 AB (VES) ou numéro de station de distance (HEP) doivent être tirés sur le terrain pour la vérification des données). Le sondage VES doit être parallèle à une structure géologique, HEP perpendiculaire. Un sondage VES typique jusqu'à 100 m peut prendre plusieurs nôtres à une demi-journée. Les distances des électrodes HEP doivent être dérivées des sondages VES

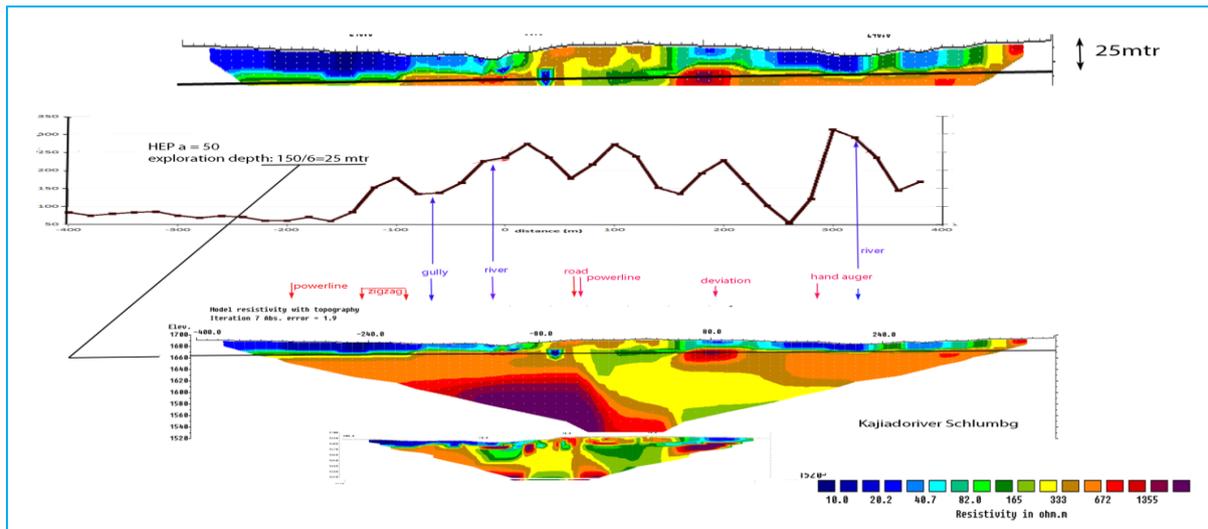


Figure 7, données réelles d'un profil HEP comparé sur le même transect que l'ERT (voir application de l'ERT), les couches superficielles d'argile avec une ligne HEP de 150 m dominent le profil HEP, la zone de faille profonde visible dans l'ERT n'est pas détectée dans le profil HEP appliqué.

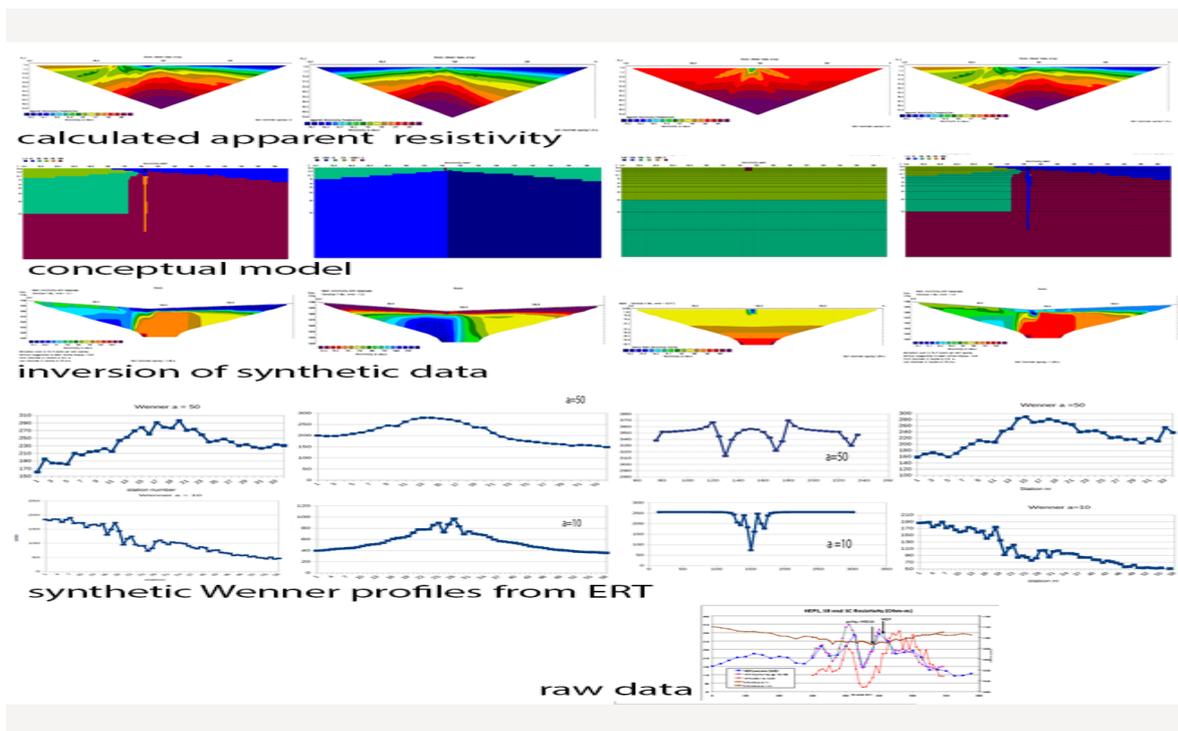


Figure 8, à partir de données ERT synthétiques, des profils HEP avec différentes distances et configurations d'électrodes peuvent être construits et comparés à un ensemble de données réelles pour montrer l'influence des couches d'argile peu profondes et des changements latéraux profonds.

## Résumé de la méthodologie VES et HEP et ses limites

Some of the main limitations and common misunderstandings on the VES and HEP methodology are listed below:

- *Profondeur d'exploration des sondages*

5.2.1 VES En règle générale, la profondeur d'investigation d'un sondage VES est d'environ 1/6 de la plage d'électrodes AB mais dépend de la configuration des électrodes et de la résistivité apparente de la sous-surface (les couches épaisses à faible résistivité (c'est-à-dire les couches d'argile) diminueront la profondeur d'exploration). En d'autres termes, un espacement minimum des électrodes AB d'au moins six fois ou plus la profondeur d'intérêt est nécessaire pour garantir que des données suffisantes ont été collectées. Par exemple : si l'on veut explorer une certaine cible, par exemple un socle rocheux à haute résistance, jusqu'à une profondeur de 50 m, une distance maximale d'électrode d'au moins 300 m est requise. Les failles sont altérées plus profondément, donc pour la profondeur du sous-sol non altérée à l'intérieur de la faille, la distance devrait être encore plus grande...

- *Longues distances d'électrodes et changements latéraux dans les sondages VES*

Pour les profondeurs d'exploration profondes, un sondage VES avec une longue distance (AB) entre les électrodes est requis. Cela entre souvent en conflit avec l'hypothèse VES pour l'inversion des couches horizontales : les électrodes à large portée peuvent (et passeront souvent) une zone de fracturation ou un autre changement latéral important de la géologie. La direction des sondages VES doit être parallèle à la structure géologique.

- *Discontinuité dans les graphiques de sondage VES*

La ligne mesurée de résistivité apparente est en principe une courbe lisse lorsque le sous-sol est stratifié horizontalement (hypothèse 1D, stratification horizontale). Si le graphique n'est pas lisse, cela peut avoir plusieurs raisons : Bruit, causé par de mauvais contacts d'électrode ou des fuites des bobines et des fils, bruit artificiel (lignes électriques, tuyaux métalliques) ou changement latéral très probablement près de la surface. Il est important de le reconnaître et de prendre des précautions : vérifiez les contacts des électrodes, les fuites à la terre et les connexions, augmentez la distance potentielle lorsque le signal devient trop faible pour surmonter le bruit de fond naturel ou le potentiel de la terre. Lorsque l'électrode potentielle est augmentée, un seul décalage vertical se produit souvent (voir également ci-dessous). Lorsque le graphique apparaît à plus de 45 degrés, il y a une fuite au centre d'une bobine de courant ou le sondage se fait le long d'un tuyau métallique horizontal enterré.

- *Discontinuité dans les graphes de sondage VES au changement d'électrodes de potentiel.*

Lorsque les électrodes potentielles sont modifiées (avec les sondages Schlumberger), les deux valeurs à la même distance d'électrode actuelle doivent être enregistrées. Souvent, ces points présentent un décalage (vertical) (ou un décalage). Dans la plupart des cas, c'est l'effet d'une inhomogénéité géologique latérale (peu profonde) qui est devenue à la portée des électrodes potentielles. Dans la littérature, il n'est pas toujours clair comment gérer un tel décalage/décalage dans l'interprétation : utiliser les deux points (le mieux), calculer la moyenne ou corriger le décalage (peut être soit vers le haut, soit vers le bas). La correction appliquée influencera l'inversion et le calcul de la résistivité de formation des couches plus profondes. Si une correction est appliquée, au moins tous les graphiques doivent être corrigés de la même manière.

- *Profondeur d'exploration de profilage HEP*

Il faut savoir que chaque mesure dans le profilage HEP est la même qu'une seule mesure dans un sondage VES. Ainsi, la « règle empirique » sur la profondeur d'exploration s'applique également à HEP. Avec HEP, la résistivité apparente est également mesurée mais pour un seul point de données à une profondeur d'exploration (plus ou moins) fixe. Le terme « profondeur de sondage » est un malentendu clair de la méthode de profilage HEP. Dans un profilage de Wenner avec un réseau de  $a=50\text{m}$  ( $AB=150\text{m}$ , qui est une distance couramment utilisée), chaque mesure HEP donne la résistivité moyenne pondérée du sommet  $\sim 17\text{ m}$  ( $150/6$ ), c'est la résistivité apparente. En fait les mesures sont dominées par les changements de résistivité de la couche arable. Il est recommandé avec le profilage HEP d'appliquer 2 distances d'électrodes différentes sur la même ligne de profil ou d'appliquer des sondages VES aux emplacements avec un changement significatif.

- *AB/2 n'est pas la profondeur (VES et HEP)*

$AB/2$  sur l'axe des  $x$  dans le graphique mesuré. Parfois, cet  $AB/2$  est pris à tort comme profondeur d'exploration. Il faut se rendre compte que le graphique mesuré donne la résistivité apparente, telle que mesurée à la distance d'électrode de demi-courant spécifique  $AB/2$ . Suivant la règle empirique du DOI, il donne la moyenne pondérée d'un « bloc de sous-surface » d'environ  $AB/6$  d'épaisseur. Cet effet peut être observé après le calcul d'inversion, si le modèle est tracé dans le même graphique ; la profondeur d'une couche spécifique est toujours inférieure à la moitié  $AB$  de sa valeur mesurée (apparente)

- *Interprétation et inversion (VES)*

Un défi majeur dans l'inversion des données de sondage VES est le problème de l'équivalence/non-unicité : la conversion de la courbe mesurée (de la résistivité apparente) en un modèle de couche de la « vraie » résistivité (ou de la résistivité spécifique ou de formation) n'a aucun et-seule solution unique. La « qualité de l'ajustement » entre la courbe mesurée et la courbe théorique est quantifiée par le RMSE (Root Mean Squared Error). Un demi-espace uniforme se traduira par une ligne horizontale. Un cas à deux couches, lorsque la première couche est suffisamment épaisse, donnera 2 asymptotes horizontales. Dans un cas à 3 couches, lorsque la deuxième couche n'est pas assez épaisse pour atteindre son asymptote horizontale, une quantité infinie de combinaisons d'épaisseur et de résistivité s'adaptera aux données. C'est ce qu'on appelle l'équivalence (de modèle). (Voir les figures 4 et 5) D'autres informations sont nécessaires pour déterminer soit la profondeur (diagrammes géologiques) soit la résistivité (diagrammes de résistivité ou qualité des eaux souterraines). L'équivalence doit être visualisée en montrant les modèles équivalents dans certaines limites réalistes (changement de la qualité de l'eau, teneur en argile, changement de la taille des grains, épaisseur de la couche altérée, etc.) Lors de l'ajout de couches dans le logiciel, un RMSE optimal (minimum) sera atteint à un certain nombre de couches. Des couches supplémentaires avec le même bon ajustement sont douteuses, à moins qu'il n'y ait des preuves de telles couches à partir de trous de forage existants à proximité. Dans ce cas, vous pourriez conclure que la méthode n'est pas sensible (adapté) pour détecter ces couches en raison du manque de contraste. Dans le même temps, dans le monde réel, les couches n'ont pas de limites précises et dans de nombreux cas, il y aura un changement progressif de résistivité, par exemple si la couche altérée se transforme progressivement en substrat rocheux. Une approche de couche lisse (plusieurs couches avec la même épaisseur fixe) sera plus réaliste. Le « meilleur » modèle a un nombre minimum de couches ayant le RMSE minimum adapté à la profondeur d'exploration. De cette façon, un profil peut être construit avec plusieurs sondages VES (sur un transect) pour démontrer le changement latéral.

- *Profondeur d'exploration*

Une déception fréquemment observée dans les rapports est une interprétation qui va bien au-delà du DOI ( $\sim 1/6$  AB profondeur d'investigation) car elle est liée à une profondeur de forage suggérée. C'est trompeur. La profondeur du modèle calculé doit être en accord avec la profondeur d'exploration de VES.

- *Changement latéral*

Les inversions VES supposent une stratification horizontale, un changement latéral superficiel peut être observé dans le graphique de terrain un changement latéral profond est difficile à détecter. La direction du VES doit être parallèle à la géologie et aux structures attendues, HEP perpendiculaire.

- *Incertitude du modèle*

La plage d'incertitude (90 %) des paramètres du modèle (couche et résistivité) peut être quantifiée dans la plupart des logiciels d'inversion (c'est-à-dire le logiciel Schlumberger, C. Hemker ou 1DRESINV Ioke (logiciel gratuit)). Pour une interprétation correcte des résultats du sondage VES, la plage d'incertitude doit être prise en compte. Dans la plupart des logiciels, l'inversion des données de résistivité apparente aux modèles de couche se fait par le calcul de la plage de (in)certitude (ou « intervalle de confiance ») des paramètres de la couche : profondeur et résistivité. Il donne la plage de valeurs de paramètres possibles avec une confiance de 90 %. L'incertitude augmente avec la profondeur des couches du modèle. D'autres concepts de modèle de couche peuvent donner un intervalle de confiance différent.

- *Rapports*

Dans de nombreux rapports, des informations essentielles manquent, au moins il devrait y avoir un tableau (Voir tableau 2 et figure 13) avec les emplacements, les coordonnées GPS (avec le système de coordonnées) du centre (VES), la direction de la mesure (Azimut du VES) ou coordonnées des points de données (HEP), données brutes (distance des électrodes et résistivité apparente), logiciel d'inversion utilisé et incertitude du modèle. En général, les outils géophysiques comme le VES unique ne peuvent pas indiquer directement où vous pouvez trouver de l'eau. Après inversion de la résistivité apparente en un modèle de couche de résistivité, ce modèle (en particulier la profondeur d'exploration de ce modèle) doit être traduit et interprété en géologie et s'intégrer dans un concept hydrogéologique mais aussi en indiquer les limites et les hypothèses. Les résultats géophysiques doivent être combinés avec toutes les informations existantes provenant des enquêtes précédentes, des forages, de la topographie, de la géologie, des images satellites, etc. Toutes ces informations doivent conduire à une compréhension conceptuelle du système d'eau souterraine et être évaluées. Sur la seule base de cette évaluation, la meilleure option pour l'emplacement d'un trou de forage et la profondeur de forage doivent être indiquées. Dans le même temps, le raisonnement pour la profondeur de forage conseillée doit être clairement évalué par rapport à la profondeur d'exploration de la méthode utilisée.

Interpreted geo-electric resistivity model																					
coordinates (WGS84)				Electrode	RMS	surface layer			Layer 2				Layer 3				Basement (Rho≥1000)			REMARKS	
name/ location	VES nr.	LAT (S)	LONG (East)	Elev (mas)	spacing AB/2 (m)	error x10-2	TOP (m)	Rho (Ωm)	confidence	TOP (m)	confidence	Rho (Ωm)	confidence	TOP (m)	confidence	Rho (Ωm)	confidence	TOP (m)	confidence		Rho (Ωm)
Kajado R VES14	14	01°49'03.4"	36°45'53.4"	1675	100	6	0	40	(10 - 50)	1	(0.5 - 1.4)	3	(<5)					7	(3 - 9)	>> 1000	
Kajado Ri VES15	15	01°49'03.5"	36°45'59.8"	1692	500	1.5	0	480	(340 - 700)	7	(2 - 12)	200	(185 - 210)					80	(65 - 95)	>800	large discontinuity
Kajado R VES17	17	01°49'11.0"	36°46'03.8"	1675	250	4	0	60	(large)	0.3	(0 - 3)	20	(12 - 40)					13	(11 - 15)	>>>1000	
Kajado R VES18	18	01°49'11.1"	36°46'03.5"	1675	160	2.3	0	600	(300 - 1500)	1.2	(1 - 3)	3	(1 - 10)	1.7	(large)	240	(50 - 600)	80	>30		discontinuity
Kajado R VES19	19	01°49'06.2"	36°46'11.6"	1675	500	1.9	0	1200	(large)	0.7	(0 - 5)	80	(30 - 150)	9	(3 - 30)	500	(300 - 800)	33	(>25, uncertain)		major discontinuity
Kajado R VES20	20	01°49'03.7"	36°46'04.3"	1680	200	1.7	0	800	(250 - 2600)	1.2	(1 - 4)	5	(large)	2.4	(large)	300	(140 - 700)	90	(>45, uncertain)		short AB reach

Table 2, example of a data table with inversion models, missing is the azimuth of the VES.

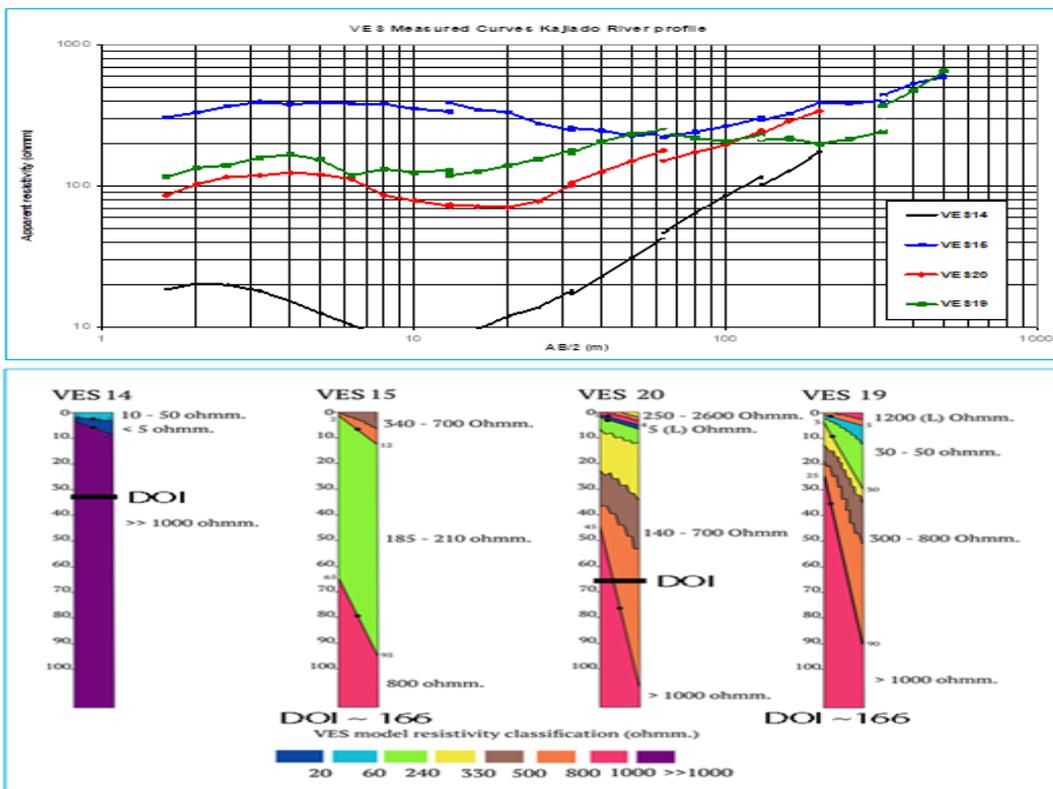


Figure 9, exemple de représentation graphique des résultats du VES sur la géologie du substratum rocheux, les données brutes et l'interprétation du modèle avec les incertitudes de profondeur indiquées.

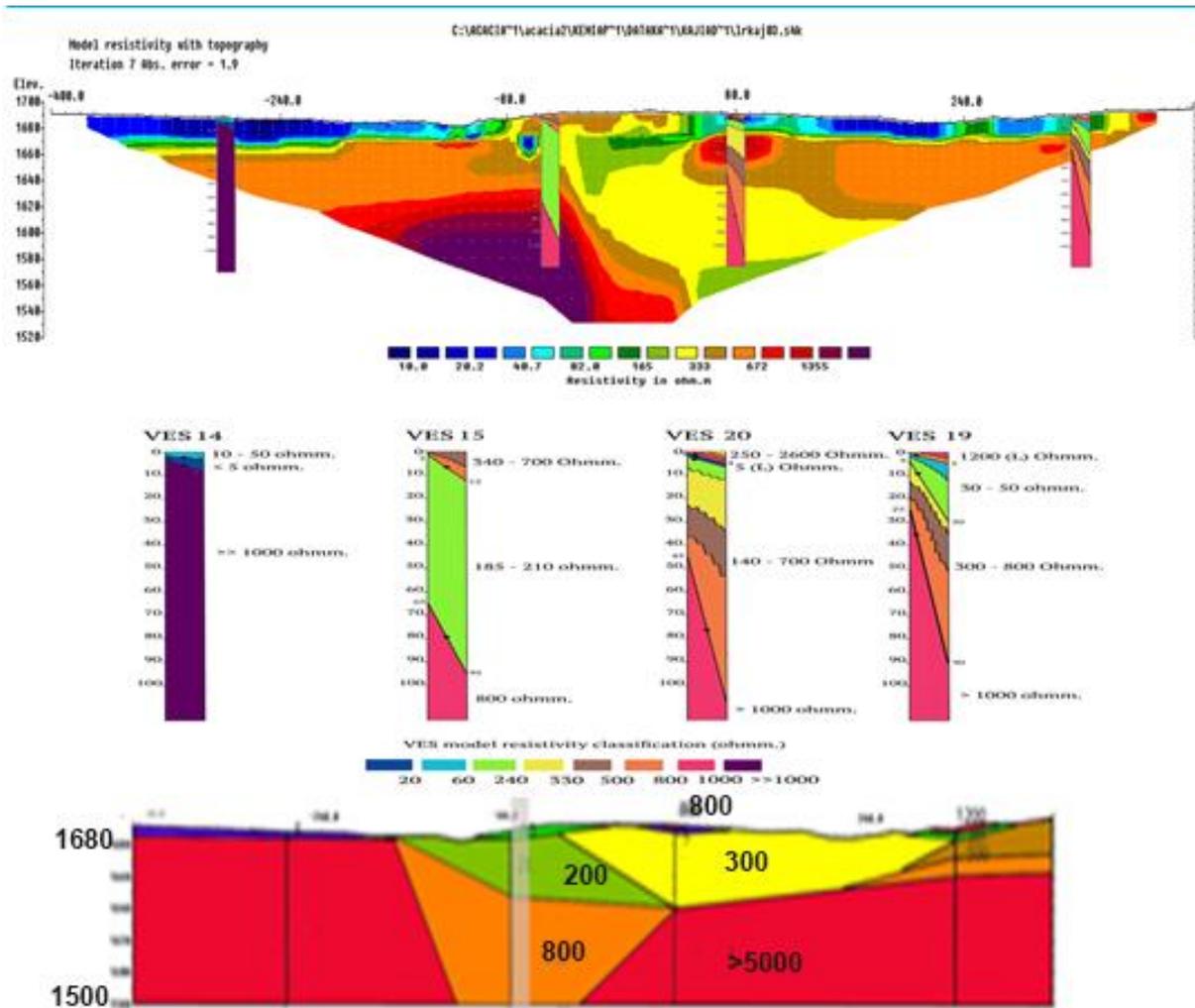


Figure 10, sondages VES (au milieu) et le profil schématique du VES construit à partir de sondages VES uniques existants avant la campagne de terrain et comparés à l'ERT (d'après les données réelles de Kajjado, Kenya).

L'autorité concédante (et le client si possible) pourrait s'améliorer dans la vérification de la qualité des rapport et l'exactitude de l'interprétation des sondages VES selon une liste de contrôle. Une telle liste de contrôle devrait au moins inclure : résultats d'inversion expliqués dans un contexte hydrogéologique, raisonnement et argumentation sur l'emplacement et la profondeur de forage conseillés.

### VES et HEP pour le Burkina Faso

L'instrumentation pour VES et HEP est fondamentalement la même et peut être relativement simple et bon marché. Les spécifications des instruments peuvent assez différer. Au moins 4 personnes sont nécessaires et au moins une personne qualifiée dans le domaine (opérateur). De préférence compétent dans les procédures de mesure, la qualité et l'interprétation des données. Les sondages sont 1D, la stratification horizontale est supposée, la résolution est limitée en raison de l'équivalence. La profondeur d'exploration est également limitée ; l'étalement (distance max électrode actuelle) est important par rapport à la profondeur d'exploration. Avec le profilage HEP, seule la résistivité apparente est mesurée, l'interprétation de la profondeur et/ou de la résistivité spécifique n'est pas possible. Dans la figure 6.5 du chapitre 6, il est clairement démontré que les anomalies HEP sur des profils HEP uniques ne donnent pas une image claire des fractures, des failles et du contact géologique. La combinaison de plusieurs profils avec différentes distances d'électrodes et plusieurs sondages VES, en étant conscient des limites, avec la bonne application et la bonne configuration en

combinaison avec une étude documentaire et un concept hydrogéologique peut être une approche relativement simple et rentable pour l'assise du forage. Il est recommandé d'appliquer une modélisation avancée avec des programmes tels que MODRES2DINV (Loke) sur un concept supposé et de dériver les profils HEP synthétiques afin de comprendre les anomalies causées par différentes cibles. L'équipement est souvent robuste mais les câbles et les connexions doivent être manipulés avec soin, un bon contact avec les électrodes est essentiel.

## 2.2) Application de la tomographie par résistivité électrique (ERT)



Figure 11, Instrumentation ERT de différentes marques

ERT (Electrical Resistivity Tomography) est une méthode à courant continu comme HEP et VES. En fait, il s'agit d'une combinaison de plusieurs mesures HEP et VES dans un seul ensemble de données intégré. La méthode est également appelée CVES (Continuous VES). Le système connecte jusqu'à 80 électrodes ou même plus, la quantité exacte dépend du système et de la marque utilisés. Les électrodes sont connectées individuellement à un ou plusieurs câbles et les câbles sont connectés à un boîtier de commutation. Un émetteur et un récepteur combinés sont intégrés à un ordinateur dans les instruments modernes. Différentes combinaisons de configurations d'électrodes et de distances peuvent être utilisées avec les 2 paires d'électrodes (potentiel et courant comme avec VES). Cela se traduira par un profil de résistivité apparente 2D qui peut être inversé en un modèle de couche lisse 2D avec un logiciel dédié.

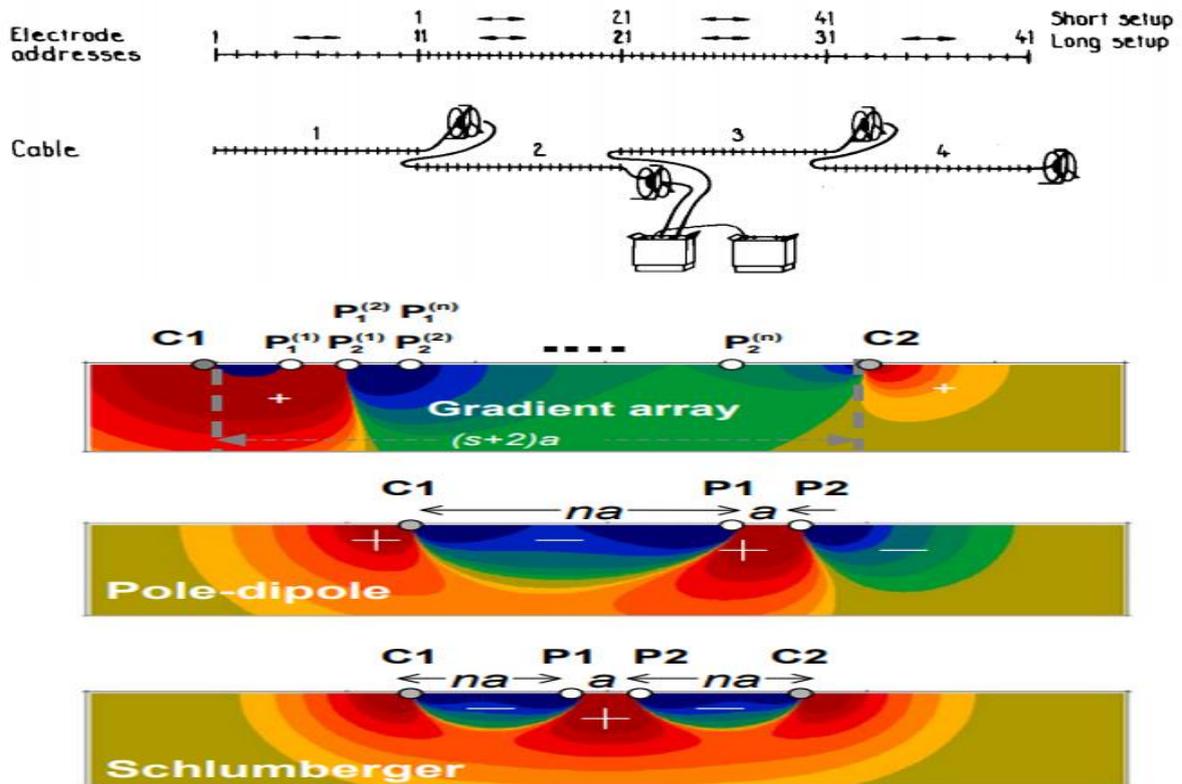


Figure 12, schéma du système ABEM SAS4000 Lund, 4 câbles, 64 électrodes (ci-dessus), différentes configurations et leur schéma de sensibilité (ci-dessous), d'après le manuel Terrameter ABEM.

La distance maximale des électrodes individuelles dépend des câbles utilisés. Les câbles peuvent aller jusqu'à une distance d'électrode individuelle de 10 mètres ou plus, ce qui peut entraîner une longueur de profil (maximum) de 800 mètres. C'est plus ou moins la limite de ce qui peut être disposé à la main. Bien entendu, des distances plus étroites avec le même câble sont également possibles. Les câbles peuvent être commandés à volonté selon les souhaits du client. Différentes configurations de mesure d'électrodes peuvent être sélectionnées avec le même câble utilisé (Wenner, Schlumberger, Dipole-Dipole, Pole-Pole, Gradient), chacune d'elles influençant la résolution, la profondeur d'exploration et la sensibilité aux stratifications horizontales et/ou aux structures verticales. (Voir figure 15). Différentes configurations peuvent être exécutées sur la même ligne de profil et comparées par la suite. Certains des protocoles sont utiles lors de l'utilisation d'instruments multicanaux. À la même distance d'électrode de courant, davantage d'électrodes potentielles peuvent être mesurées (gradient, dipôle dipôle). Il existe également des systèmes qui mesurent le potentiel à toutes les autres paires d'électrodes (potentielles). Cela se traduira par une augmentation de la résolution dans le même temps de mesure, mais également par une augmentation des mauvais points de données en raison du rapport signal-bruit. Les mauvais points de données doivent être soigneusement filtrés, car ils influenceront l'inversion. Les distances d'électrodes utilisées peuvent être programmées dans l'instrument ; il calcule et mémorise ensuite les bonnes résistivités apparentes. Une longueur de profil initiale de, disons, 800 mètres se traduira par une profondeur d'exploration d'environ  $800/6$ , soit environ 130 à 140 mètres. Elle dépend également de la distribution de résistivité du sous-sol et du protocole de mesure. Un profil ERT peut être étendu dans deux directions sur la même ligne de profil (droite) (vers l'avant ou vers l'arrière).

Cette séquence de mesure appelée « rouler le long » est plus rapide que la configuration initiale car tous les points de données n'ont pas besoin d'être mesurés lors du roulage. Veuillez noter que l'extension du profil de cette manière (roll-along) n'entraînera pas d'augmentation de la profondeur d'exploration. Pour plus de détails sur les configurations des électrodes et de nombreuses autres questions pratiques, le lecteur est renvoyé aux manuels d'instruments tels que le manuel du terramètre ABEM SAS4000 .

## Méthodologie de l'ERT

L'inversion est en principe la même que pour les sondages VES, qui est la détermination d'un modèle de profondeur de résistivité « vraie » à partir de la résistivité apparente mesurée. Dans l'inversion ERT, le changement latéral est incorporé, l'inversion est contrainte latéralement, ce qui donne un modèle de couche lisse. Le résultat est un modèle dit à contraintes latérales lisses, un exemple est donné sur la figure 13.

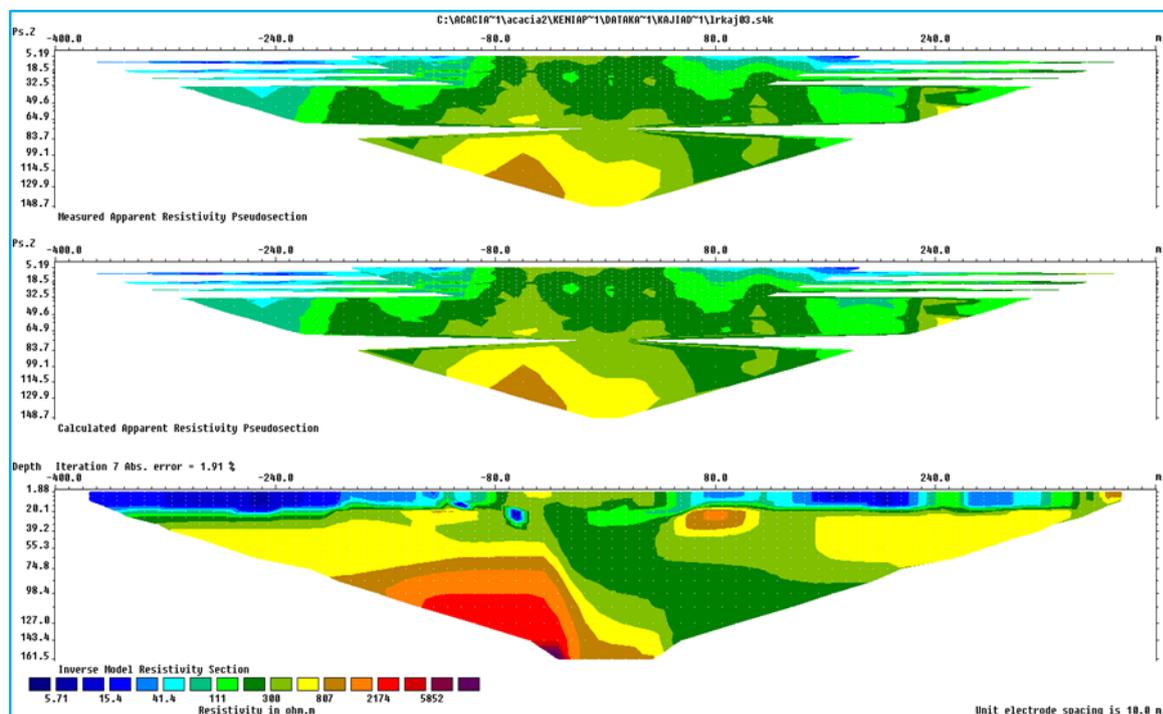


Figure 13, ERT a mesuré les données de résistivité apparente (ci-dessus), le modèle d'inversion lisse (ci-dessous) et la résistivité apparente calculée selon le modèle (au milieu), la différence entre les chiffres du haut et du milieu représente l'ajustement du modèle aux données mesurées.

Dans ce modèle lisse, l'espacement entre les bandes de couleur (chaque bande de couleur représente une plage de résistivité différente) représente le contraste entre les couches. Plus la bande de couleur est petite, plus le contraste est grand. Parce que l'ERT est en fait une combinaison d'un certain nombre de VES sur la même ligne de transect, l'inversion a beaucoup moins d'équivalence (plusieurs quantités de modèles de couches possibles) qu'un seul ensemble de données (VES). Il est également possible de générer des données synthétiques basées sur un modèle de résistivité. Cette modélisation prospective mentionnée précédemment est extrêmement utile non seulement pour tester les applications liées à la cible, mais également pour aider avec les concepts

hydrogéologiques. Des exemples sont donnés dans la figure 15 de données transmises et réelles sur une vallée enfouie liée à un système de failles à Kajiado Kenya. A partir de ces données synthétiques, des données HEP peuvent également être dérivées. L'interprétation (inversion) se fait avec un logiciel dédié comme RES2DINV (GEOTOMO [www.geotomosoft.com](http://www.geotomosoft.com)). Ce que l'on appelle « l'ajustement du modèle » est la différence entre les données de résistivité apparente mesurées sur le terrain et les données de résistivité apparente calculées qui appartiennent au modèle en couches lisse généré. Cet ajustement est également appelé facteur résiduel ou RMS. Ce facteur, (en %), est une indication de la fiabilité du modèle, il doit de préférence être bien inférieur à 5%. La figure 13 donne un exemple d'inversion ERT : en haut : les données brutes du champ (résistivité apparente mesurée), au milieu : la résistivité apparente, qui appartient au modèle lisse, et en dessous : le modèle en couches lisses. L'ajustement dans ce cas est de 1,93%, soit la différence entre l'image du milieu et celle du haut. Remarque : les deux images du haut avec la résistivité apparente sont également appelées « pseudo sections ». Voir la figure 16 pour un exemple d'un très mauvais ajustement (87 % ne s'adapte pas), clairement dû à un mauvais contact d'électrode.

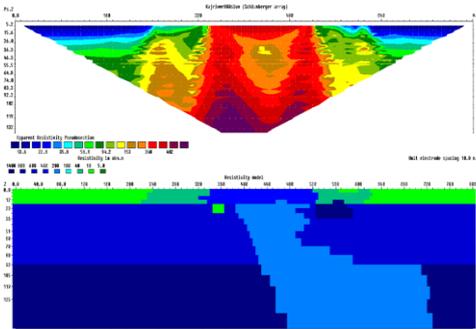


*Figure 14, Vue d'ensemble de la mise en place de l'instrumentation ABEM ERT sur le terrain : quatre bobines sont interconnectées, avec au centre un ABEM Terrameter LS. Cette photo a été sélectionnée en raison de la bonne vue d'ensemble. L'emplacement était aux Pays-Bas, les distances des électrodes étaient relativement courtes (0,5 m), ce qui a donné une longueur de profil de 40 m, pour surveiller le développement de lentilles d'eau douce peu profondes au fil du temps en raison de nouveaux systèmes d'irrigation. La profondeur d'exploration avec cette configuration n'est que de 7 mètres, avec une très haute résolution.*

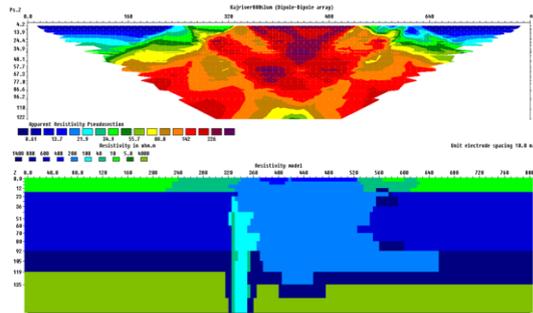
#### **Remarque sur la IP.**

La plupart des instruments ERT mesurent également l'effet IP ou la chargeabilité. Il s'agit d'une application dans le domaine temporel d'une application à courant continu (courant continu). En fait, le temps pendant lequel le potentiel généré en raison du courant induit dans la sous-surface diminue jusqu'à la valeur de fond après l'arrêt du courant. Certains instruments enregistrent cette décroissance sous forme d'onde complète (spectrale) ou sous forme de pourcentage de la diminution sur une certaine période de temps spécifiée (Milli secondes). Une chargeabilité élevée pourrait être une indication des argiles. IP augmentera considérablement le temps de mesure et de bons contacts d'électrode sont encore plus importants que dans les mesures de résistivité. Les données IP peuvent

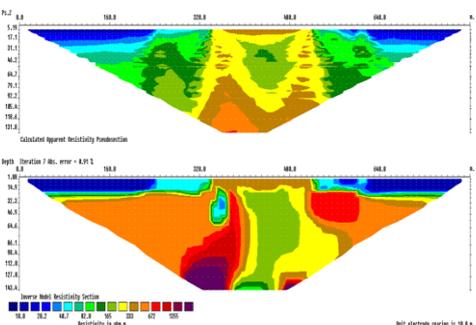
également être inversées et sont mesurées dans le même cycle de mesure que les mesures de résistivité mais l'inversion n'est pas toujours directe si les couches d'argile ne sont pas horizontales ou discontinues ou dans le cas de la superposition de couches d'argile plus (minces). Les mesures IP peuvent être utiles dans les cas où la faible qualité des eaux souterraines joue un rôle et où les couches d'argile ont la même résistivité que les couches de sable contenant des eaux souterraines saumâtres (équivalence).



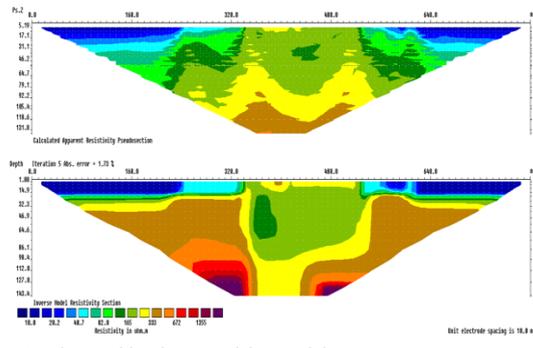
Forward model without fault



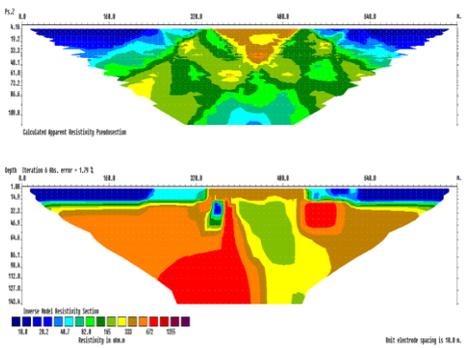
Forward model with fault



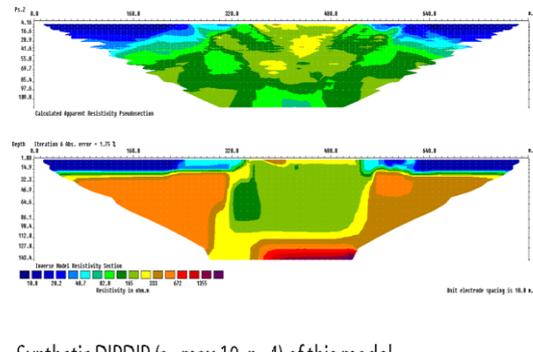
Synthetic schlumberger of this model, apparent resistivity (above), and inversion (under)



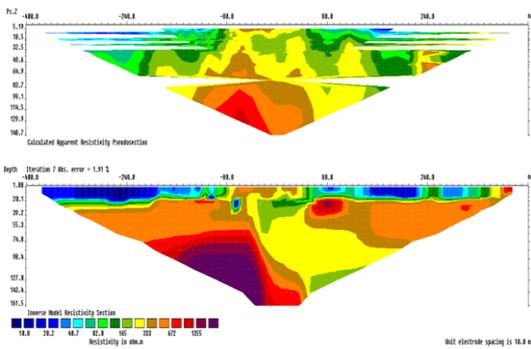
Synthetic schlumberger of this model, apparent resistivity (above), and inversion (under)



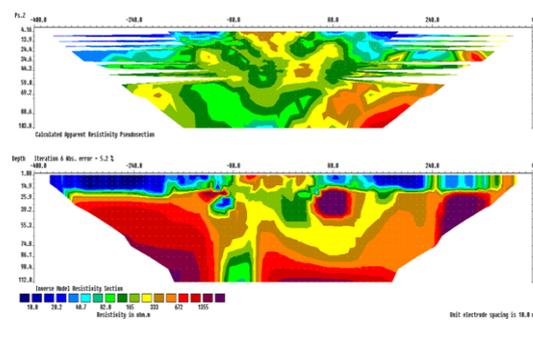
Synthetic DIPDIP (a=max 10, n=4) of this model, Apparent resistivity (above), and inversion (under)



Synthetic DIPDIP (a=max 10, n=4) of this model, Apparent resistivity (above), and inversion (under)



Real data, Schlumberger



Real data, dip dip

Figure 15, exemple de modélisation directe sur un modèle de résistivité d'une vallée enfouie liée à un système de failles. Les modèles directs

*sont testés avec et sans défaut profond, 2 protocoles différents sont comparés (Dipole Dipole et Schlumberger) avec les données réelles.*

## **Procédures de terrain ou ERT.**

Cette section explique les étapes générales des procédures de terrain de l'ERT (voir aussi les manuels des instruments).

1. **Commencez par la modélisation prospective.** Générer un modèle ERT synthétique lisse basé sur les idées sur le concept hydrogéologique local (résistivité) à partir des informations hydrogéologiques existantes (géologie, levés VES, forages). La modélisation prospective aidera à décider si la résolution et la profondeur d'exploration sont conformes à la méthodologie ERT proposée et à la capacité de l'instrument
2. **Essayez d'établir les conditions locales du terrain,** les propriétaires fonciers, l'accessibilité du terrain, les clôtures, les câbles électriques, la résistivité de la couche arable, la saison des pluies, etc. etc. land owners, terrain accessibility, fences, power cables, resistivity of the top soil, rain season etc. etc.
3. **Déterminer la profondeur d'exploration requise et en rapport avec celle-ci la longueur du profil initial (sans enroulement) et la configuration des électrodes utilisées.** En règle générale, la longueur initiale du profil (longueur totale des câbles utilisés) doit être au moins six fois la profondeur d'exploration souhaitée. La profondeur d'exploration est également sensible à la configuration des électrodes dans le protocole de mesure et à la distribution réelle de la résistivité. La profondeur d'exploration peut également être examinée par modélisation prospective.
4. **Établir la direction et la longueur requise du profil (y compris l'extension),** principalement dans la direction du changement latéral de la géologie. Un profil peut être étendu avec la procédure dite de « roll-along ». Dans ce cas, la profondeur d'exploration de chaque section étendue restera la même que le profil initial. Une ligne de profil doit être une ligne droite, sinon la résistivité apparente calculée sera surestimée et des corrections sont nécessaires.
5. **Choisissez les configurations d'électrodes souhaitées,** cela dépend de l'objet d'étude (cible), de sa taille, de sa géométrie, du contraste de résistivité avec les couches entourées et de la résistance d'électrode attendue avec le sol. À titre d'exemple, Schlumberger et Wenner sont plus adaptés à la géologie en couches horizontales, Dipole-Dipole a une meilleure résolution pour les structures verticales mais la profondeur d'exploration sera inférieure à celle des autres protocoles. Dans le même temps, Dipole-Dipole a une meilleure couverture latérale et est plus sensible aux structures verticales, mais est plus sensible au bruit. Certains instruments (plus chers) ont des caractéristiques spéciales pour la réduction du bruit. Lorsque les circonstances sont difficiles (résistivité élevée de la couche supérieure en combinaison avec de grandes distances d'électrodes), Wenner est favorable en raison de sa distance relativement grande d'électrodes potentielles, donnant un meilleur rapport signal sur bruit. La résolution d'une configuration Wenner est bien inférieure à celle de Schlumberger ou de Dipole-Dipole car le nombre total de points de données est inférieur. A noter que la profondeur d'exploration avec la configuration Dipole Dipole s'étend sur plus de la moitié de la longueur du profil et sa profondeur d'exploration maximale mais est inférieure à Schlumberger. Un protocole de gradient utilisé dans les instruments multicanaux permet une meilleure extension latérale de la profondeur d'exploration). La configuration

Schlumberger n'atteint la profondeur maximale qu'au centre. Les configurations des électrodes peuvent être sélectionnées via des fichiers de protocole dédiés dans l'instrument. Les instruments multicanaux (comme ABEM Terrameter LS et ABEM SAS 4000, Siscal) contiennent des protocoles spéciaux qui combinent plusieurs configurations en une seule session de mesure.

6. **Utilisez de longues électrodes en acier inoxydable**, assurez-vous que les électrodes sont bien en contact (voir figure 16 !) avec le sol. Ils doivent être placés au moins à 80% de sa longueur dans le sol pour assurer un bon contact. Les positions des électrodes doivent être marquées avec un GPS. Avec de longues lignes, enregistrez les positions des électrodes avec un GPS. Au moins la position dernière, milieu et première électrode. De plus, leur position par rapport aux lignes électriques, aux ravins, aux changements distincts de topographie, aux affleurements, aux fourmilières (etc.) doit être décrite pour évaluation. Lorsque la différence de topographie est de l'ordre de la distance minimale des électrodes ou plus, la topographie doit être prise en compte dans l'inversion (voir figure 5 du chapitre d'introduction).
7. **Commencez les mesures avec un test d'électrode**, avec une instrumentation comme ABEM, les connexions d'électrode et les résistances d'électrode séparées (qui est la résistance de contact électrique avec le sol) peuvent être testées. Lorsque la résistance de l'électrode est élevée ( $>>1 \text{ k}\Omega$ ), toutes les configurations ne peuvent pas être exécutées et souvent seul Wenner peut être appliqué. Surtout lors de l'utilisation de grandes distances d'électrodes. Les contacts des électrodes peuvent être améliorés en ajoutant de l'eau salée autour de l'électrode, de la bentonite ou des électrodes plus longues de plus grand diamètre, ou en utilisant plusieurs électrodes à une seule position proche les unes des autres et perpendiculaires au profil. During the measurement.
8. **Vérifier l'évolution des écarts types**. Dans la plupart des instruments, la pile maximale (quantité de mesures à la même position d'électrode à moyenner) peut être modifiée en fonction de l'écart type souhaité.
9. **Téléchargez les données et effectuez une inversion simple (robuste) sur le terrain** et vérifiez le « fit » : l'erreur entre la résistivité apparente calculée qui appartient au modèle et la résistivité apparente mesurée. Ensuite, décidez d'effectuer un roll-on ou de modifier la configuration des électrodes, d'ajuster la longueur du profil (ou les deux) ou de démarrer un profil parallèle, etc.
10. **W0**. Pendant la collecte, **comptez et nettoyez tous les équipements, électrodes, marteaux, connecteurs d'électrodes, etc. après l'enquête** ; Des précautions particulières doivent être prises pour les connecteurs de câble.
11. **Interprétation des données** avec le logiciel d'inversion commence par exterminer les mauvais points de données et exécuter plusieurs inversions avec des paramètres différents. L'étape suivante consiste à comparer les résultats d'inversion de différentes configurations d'électrodes si elles sont mesurées. En général, les résultats seront différents, selon la géométrie de la distribution de résistivité. La configuration dipôle-dipôle est plus sensible pour les conducteurs verticaux relativement petits (par exemple dans les fractures); ces conducteurs peuvent être supervisés dans une configuration Schlumberger ou Wenner. Cela dépend de la forme, de l'emplacement et du contraste de résistivité de ces anomalies verticales. En même temps, la configuration Dipole a tendance à exagérer ces conducteurs verticaux. Ceci est clairement illustré dans les figures 17 et 18 où pour les protocoles DIPOLE DIPOLE et Schlumberger différents paramètres d'inversion sont utilisés. Si nécessaire, une

autre session de modélisation prospective peut être tentée pour appuyer l'interprétation hydrogéologique (figure 15). D'autres sources de données peuvent être utilisées. Les inversions peuvent être contraintes par les informations (diagraphies électriques) des forages. Un programme d'inversion couramment utilisé est RES2DINV et la modélisation avancée avec le logiciel RES2DMOD comme mentionné précédemment. Bien que beaucoup moins que dans VES, l'équivalence (plus de modèles ayant le même ajustement sur un seul ensemble de données) peut toujours être un problème. Une application correcte de l'ERT est plus que produire une belle image en couleur. L'interprétation et la présentation (coloration) des résultats de l'ERT vers le concept (hydro)géologique nécessite des compétences professionnelles et si possible une vérification par différentes méthodes géophysiques. Intégration avec toutes les informations existantes (et, espérons-le, disponibles) et peut enfin être confirmée par des puits (tests).

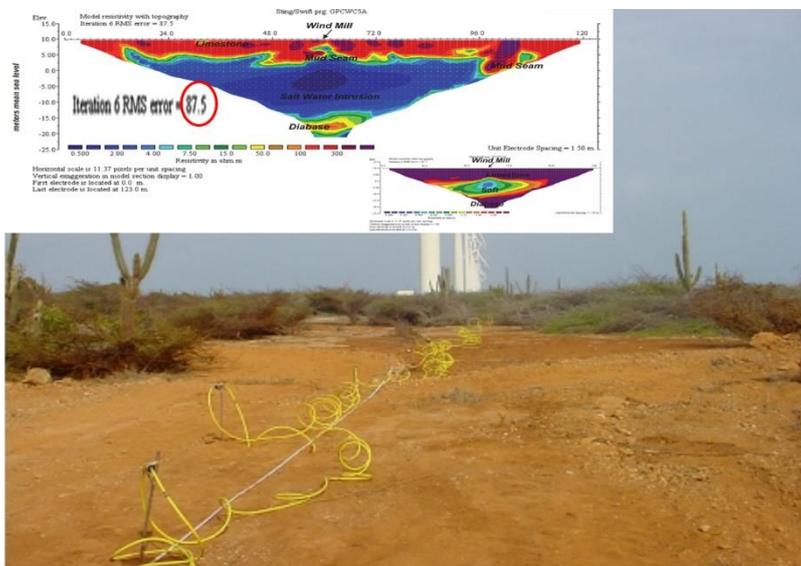


Figure 16, exemple d'une mauvaise façon d'exécuter l'ERT, les électrodes n'établissent pas suffisamment de contact dans une couche arable à haute résistance, ne sont pas en ligne droite, ce qui entraîne une erreur d'ajustement de 87%. D'où une interprétation absurde. Ceci a été présenté sans aucun commentaire dans le rapport.

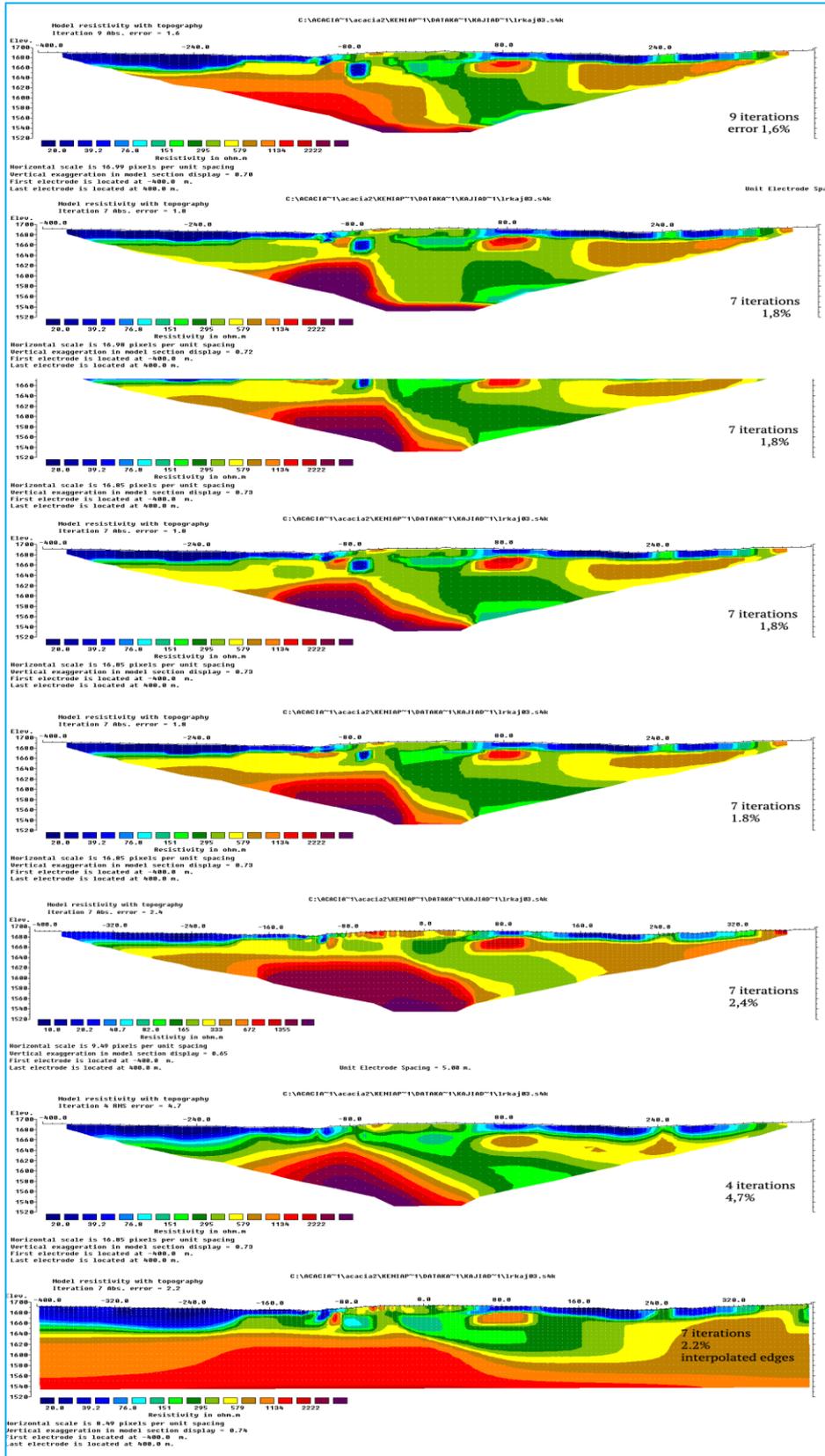


Figure 17. Plusieurs inversions Schlumberger de l'ensemble de données de la rivière Kajiado, avec différents paramètres sur le même ensemble de données classés en

fonction de leur ajustement. Notez que dans l'inversion avec arêtes extrapolées (ci-dessous), l'ajustement ne compte pas pour l'ajustement de ces arêtes !!

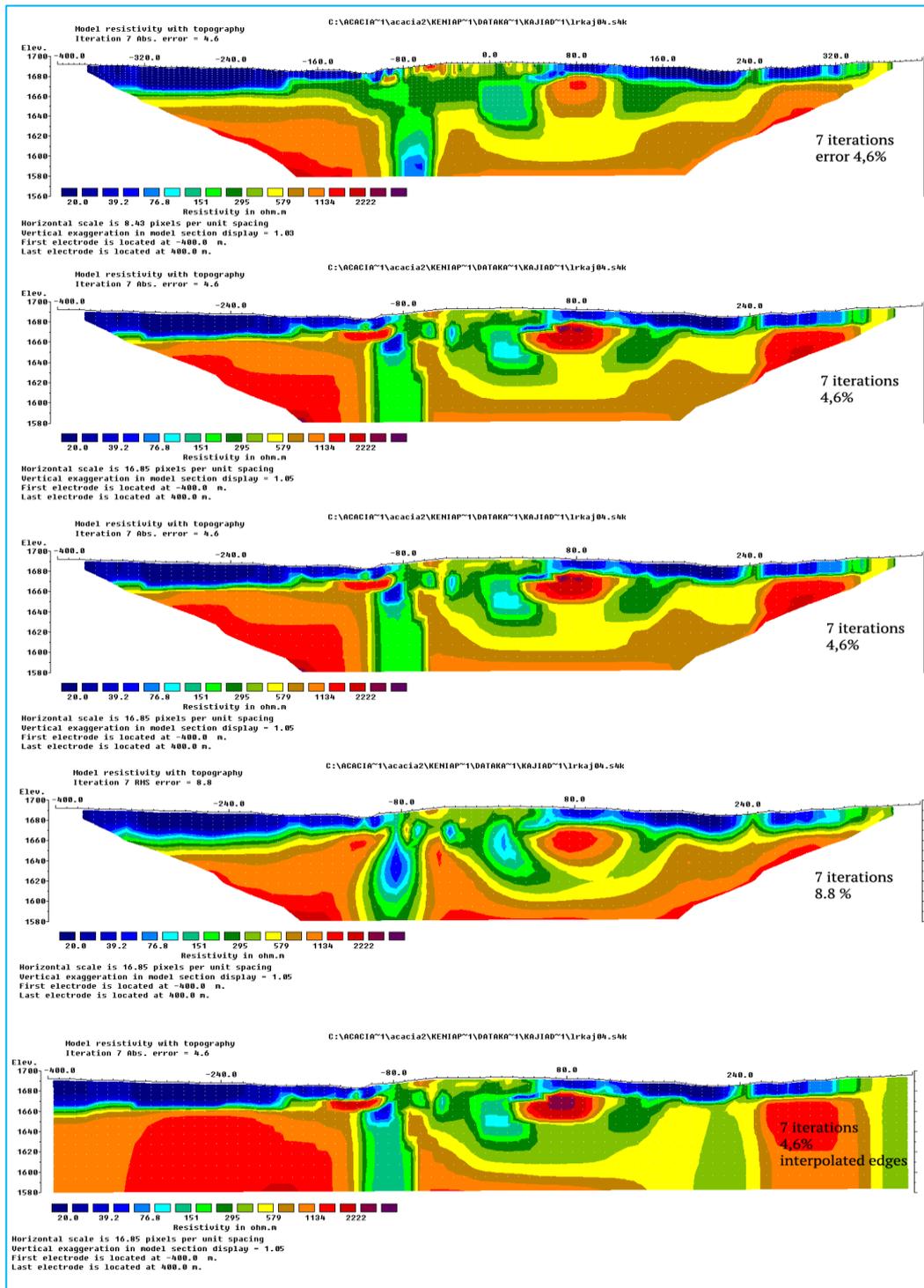


Figure 18. Plusieurs variantes d'inversion dipôle-dipôle sur l'ensemble de données de la rivière Kajiado, avec différents paramètres sur le même ensemble de données

*classés en fonction de leur ajustement. Notez que dans l'inversion avec arêtes extrapolées (ci-dessous), l'ajustement ne compte pas pour l'ajustement de ces arêtes !*

Dans la figure 19a, b montrent un profil ERT dans une image satellite google traversant 2 rivières liées à une vallée enfouie dans une zone fracturée (Kajiado, Kenya).

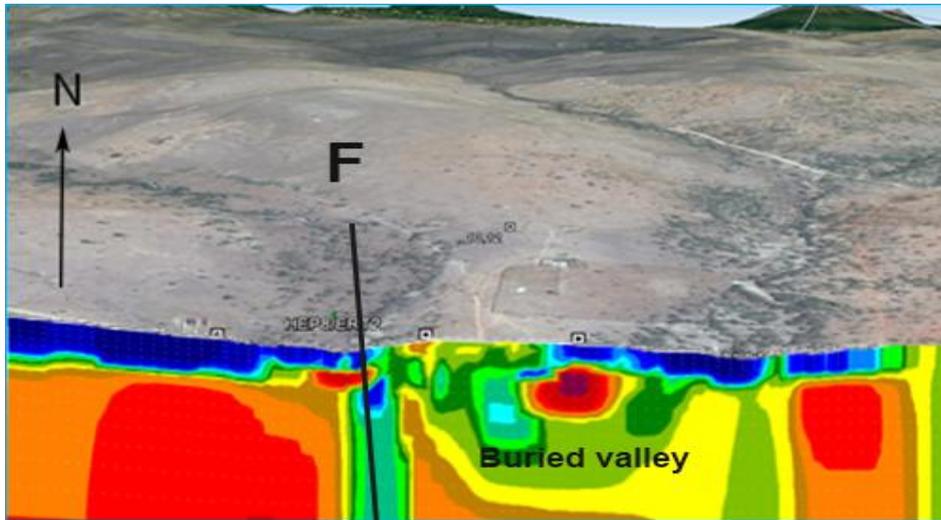
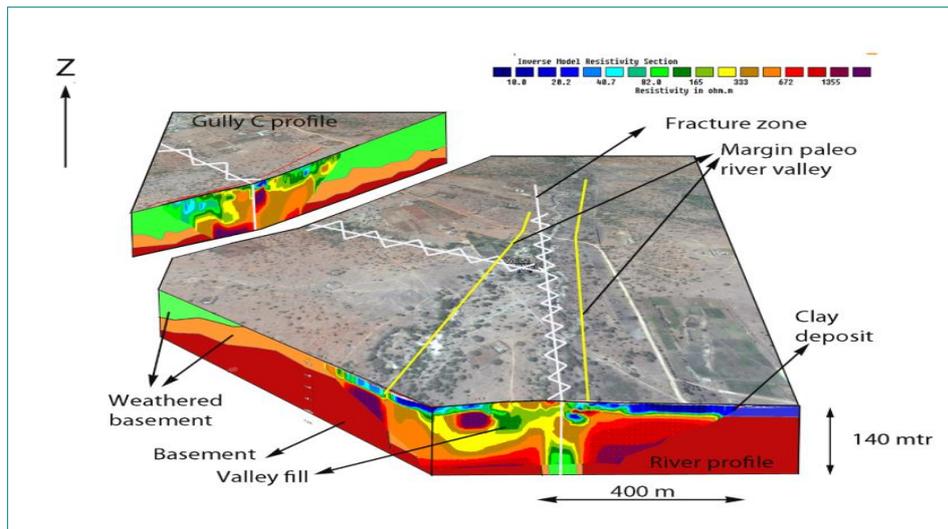


Figure 19a, Dipole Dipole ERT profile crossing the Kajiado River and a tributary.



La figure 19b, le profil de l'ERT a abouti à un concept final. Notez que le sous-sol altéré par la résistivité ne diffère pas beaucoup du remplissage de la vallée; cependant la perméabilité sera différente. La partie la plus productive était le système de failles lui-même, rechargé par les sédiments de la vallée.

### Conclusions ERT pour le Burkina Faso

L'ERT est une méthode à haute résolution latérale qui est bénéfique pour le type d'aquifères de cette zone. L'instrumentation peut être coûteuse et avoir des performances différentes, des câbles spéciaux et de nombreuses électrodes sont nécessaires, 3 à 4 personnes nécessaires pour la préparation (selon la longueur du profil), des compétences sont nécessaires en particulier pour les configurations et les protocoles. La résistivité de la couche supérieure pour les protocoles autres que Wenner doit être préférable en dessous de 1kohm. Étant donné que la méthode est relativement chronophage (environ 2 à 3 profils/jour), les emplacements des profils doivent être prédéfinis à l'aide d'une étude documentaire et de préférence à l'aide d'autres méthodes (FDEM). La modélisation prospective d'un concept hydrologique avant et après l'acquisition des données est fortement recommandée. La longueur totale des câbles utilisés doit être adaptée à la profondeur d'exploration souhaitée en tant que distance d'électrode pour la résolution. L'équipement est souvent robuste mais les câbles et les connexions doivent être manipulés avec soin. La direction des profils doit être perpendiculaire à la structure géologique ou aux linéaments.

#### 2.3) Application du sondage électromagnétique dans le domaine temporel (TDEM)

En général, TDEM est utilisé pour des sondages profonds avec une résolution relativement faible. Au Kenya, il est utilisé par KenGen pour des applications d'énergie hydrothermale (DOI > 500 m.). Une nouvelle instrumentation récemment développée permet de mesurer moins profondément avec une résolution plus élevée. TDEM est une méthode 1D supposant une stratification horizontale à portée du signal de l'émetteur. Le profilage peut être réalisé par la combinaison et l'interprétation conjointe de plusieurs sondages le long d'une ligne de profil. Dans les applications aéroportées, des inversions semi- 2D et 3D à contrainte latérale peuvent être réalisées. La méthode est inductive, aucune électrode n'est requise et relativement rapide.

Le TDEM n'est pas (encore) largement utilisé dans l'exploration des eaux souterraines en Afrique. La raison pourrait être l'instrumentation plus compliquée et plus chère, tandis que l'interprétation n'est pas aussi simple que la méthode VES conventionnelle. Cependant, les récents développements en

instrumentation (comme WALKTEM) et en logiciels (comme SPIA, Aarhus workbench ou Zond) permettent de surmonter cela. Un avantage de TDEM est qu'une plus grande profondeur d'exploration est plus facile à atteindre que VES, avec un plus petit spread (taille de la boucle de l'émetteur). Parce que TDEM est basé sur l'induction, la méthode est particulièrement adaptée à l'exploration de conducteurs profonds sous des couches supérieures à haute résistance sans avoir besoin d'électrodes. La méthode est connue pour être moins applicable dans les endroits à résistivité élevée et croissante avec la profondeur. La profondeur d'une couche conductrice ainsi que la conductivité (ou résistivité) de cette couche, est bien approximée, la résistivité et la profondeur des couches hautement résistives moins précises. La méthode n'est pas adaptée aux applications très peu profondes (environ moins de 10 m.) La nouvelle instrumentation a une résolution nettement plus élevée.

TDEM est particulièrement utile dans les applications avec une profondeur d'exploration relativement importante par rapport à VES et ERT, pour résoudre l'apparence de couches d'argile (profondes) ou d'eaux souterraines salines. De plus, la mise en page du champ prend moins de temps qu'avec VES. Avec TDEM, une profondeur d'exploration de 100 à 300 mètres est relativement facile à atteindre en fonction de la boucle de l'émetteur et du courant utilisé. Avec une petite étendue d'émetteur (40 X 40 m), une profondeur d'exploration allant jusqu'à 150 - 200 m avec un rayon d'influence latéral (150 m) peut être atteint en 1 heure. En comparaison avec VES : une profondeur d'exploration de 150 m nécessite une étendue de près de 1 km ! Dans ce rayon, l'apparition d'un changement latéral est à prévoir. C'est pourquoi la profondeur d'exploration des sondages VES en pratique est limitée à environ 100 m. La profondeur d'exploration avec ERT est en général jusqu'à 150 m car la longueur totale des câbles dans ce cas est de 800 m et un excellent contact d'électrode est nécessaire.

Des systèmes plus sophistiqués (mais très coûteux) pour cartographier les changements latéraux régionaux (2D et 3D) sont les systèmes TDEM aéroportés (comme SKYTEM, 3) [Pedersen et al. 2017 et PWN, Artesia 2013]. Ces systèmes basés sur des hélicoptères à vol « lent » peuvent cartographier de vastes zones avec une résolution latérale relativement élevée. Étant donné que le TDEM aéroporté est très coûteux, l'applicabilité concernant la profondeur et la résolution d'exploration doit être soigneusement testée avec des sondages uniques à la surface du sol avant de prendre la décision d'appliquer le TDEM aéroporté. Dans les zones urbaines, à proximité des voies ferrées, des clôtures et des lignes électriques, le TDEM n'est pas applicable et ces zones doivent être exclues du plan de vol.

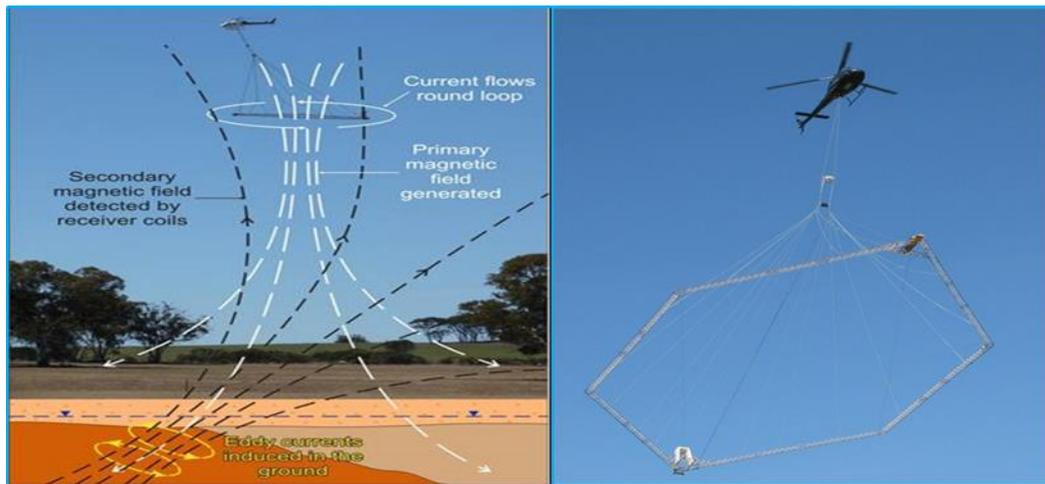


Figure 20, SKYTEM



Figure 21 Instrumentation de différentes marques

## Méthodologie TDEM

En général, les méthodes électromagnétiques (EM) sont basées sur la théorie et les équations de Maxwell : un champ électrique changeant dans une antenne émettrice (ou boucle) génère un champ EM. Ce champ électromagnétique primaire traverse le sous-sol et induit un champ secondaire (« courants de Foucault ») dans les couches les plus conductrices. L'intensité de ce champ secondaire augmente avec l'augmentation de la conductivité du sous-sol. En même temps ce signal diminue avec la profondeur à cause de l'atténuation du champ primaire. TDEM est l'un des deux systèmes EM couramment utilisés pour l'exploration des eaux souterraines. FDEM (Frequency Domain EM) est le second.

Dans TDEM, le champ EM primaire (figure 22) est généré par un émetteur qui envoie un courant commuté basse fréquence dans une antenne d'émetteur ou ce qu'on appelle une boucle d'émetteur. Cette antenne émettrice peut être typiquement un simple fil de cuivre isolé, posé en carré sur la surface de la terre allant de 40 X 40 m jusqu'à même 1000 X 1000 m côte à côte. La période de

commutation peut être arrangée et s'étend de 2 Hz à 100 Hz ou plus selon l'instrumentation. Augmenter la fréquence diminuera la profondeur d'exploration mais augmentera la résolution. Ce champ EM primaire commuté induit des courants de Foucault dans le sous-sol. Au moment où l'émetteur est éteint, le récepteur commence à mesurer l'induction générée avec ce champ primaire dans le sous-sol dans une antenne réceptrice avec le temps. Cette antenne peut être une simple boucle monofilaire isolée ou une antenne réceptrice amplificatrice à plusieurs bobines plus sophistiquée.

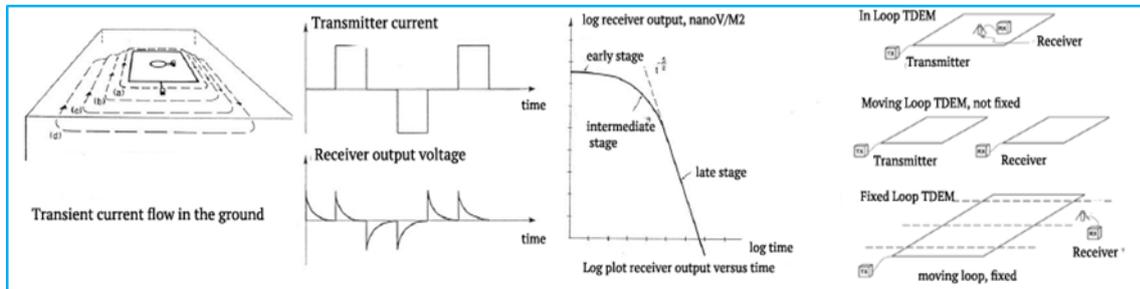


Figure 22, Gauche : le champ primaire génère un champ EM dans la terre, au centre à gauche : présentation graphique du champ EM de transmission alternatif et induit, réaction secondaire dans le récepteur, au centre à droite : courbe de décroissance, à droite : diverses configurations de champ

Le changement d'intensité du champ électromagnétique induit (« magnitude ») dans l'antenne du récepteur est mesuré en temps (micro- et millisecondes) et en (nano-micro) volts (ou ampères). Cette courbe de décroissance temps-amplitude est en fait une mesure du changement de conductivité ou de résistivité avec la profondeur. Le courant généré dû à l'induction du champ primaire à partir du sous-sol dans l'antenne réceptrice est mesuré dans des fenêtres temporelles discrètes. Les mesures dans les premières fenêtres temporelles (premières arrivées) proviennent de couches plus proches de la surface et les dernières fenêtres temporelles contiennent des informations provenant de couches plus profondes. Le graphique de l'amplitude en fonction du temps peut être calculé en un graphique de résistivité apparente en fonction du temps ou de la profondeur. Ce graphique peut être inversé dans un modèle de couche (résistivité de la formation en fonction de la profondeur de la couche). Comme avec VES, il y a plus de solutions possibles pour un seul graphe de sondage (équivalence) et une stratification horizontale est également supposée. L'antenne du récepteur peut être située à l'intérieur de la boucle émettrice (en boucle), au même endroit que la boucle émettrice (boucle coïncidente) ou à l'extérieur de la boucle émettrice (boucle externe ou mobile fixe ou avec une distance émetteur récepteur croissante). Voir figure 22,



*Figure 23, demonstration of a WalkTEM sounding in Kwale, Kenya, only one person could handle this set up (40 X 40m) transmitter loop, exploration depth up to 150m.*

Les systèmes EM mesurent l'induction générée dans le sous-sol ; c'est la raison pour laquelle ils sont particulièrement sensibles aux couches conductrices et moins sensibles aux couches à haute résistivité. C'est une différence fondamentale entre les systèmes DC (VES, ERT) et EM. Le TDEM est donc sensible à la conductivité et à la profondeur d'un conducteur, comme une couche d'argile ou une eau souterraine saline et est moins sensible aux changements de résistivité élevée ou à l'augmentation de la résistivité avec la profondeur, comme un socle rocheux (comme dans le cas de Kajiado).

Une seule mesure TDEM peut être considérée comme un sondage unidimensionnel. L'inversion TDEM basée sur une seule mesure suppose une stratification horizontale (identique à VES). Des sondages multiples le long d'une ligne de profil donneront des informations sur une échelle relativement grande de changement latéral.

La résolution latérale et verticale du TDEM appliquée en tant que sondage multiple dans les profils est en général inférieure à celle des méthodes de tomographie telles que l'ERT. Néanmoins, les systèmes TDEM peuvent facilement atteindre des profondeurs de centaines de mètres, sans utiliser d'électrodes grâce à un couplage inductif et avec une extension latérale moindre (et sont donc moins influencés par les effets des changements latéraux) par rapport aux VES conventionnels. Des conducteurs verticaux ou de forts changements latéraux conducteurs donneront des anomalies dans le graphique de sondage (par rapport aux sondages VES) ces graphiques ne peuvent pas être inversés dans un modèle en couches (horizontal). C'est la même chose qu'avec VES lorsque le graphique de sondage n'est pas lisse en raison de l'effet du changement latéral, l'inversion dans un modèle en couches est moins fiable ou impossible.

La méthode TDEM mesure la décroissance de ce champ secondaire dans le temps (microsecondes) après l'« arrêt » du champ primaire, à chaque fois. La fréquence d'arrêt du champ primaire et de sa recharge, est en fait la fréquence de la mesure (répétitions). Avec l'augmentation du temps de

décroissance, la profondeur d'exploration de la mesure augmentera également jusqu'à ce que le signal soit perdu dans le bruit de fond. La taille de la boucle de l'émetteur (la plupart des systèmes utilisent une boucle de l'émetteur comme un carré à un seul fil), le nombre de tours de la boucle de l'émetteur, le courant de l'émetteur, la fréquence de l'impulsion « d'arrêt » ainsi que la résistivité de la terre influencera la profondeur de pénétration et la profondeur à partir de laquelle la mesure commence. Le premier dixième de compteur est perdu en raison du temps d'arrêt ou du temps de retard Tx (microsecondes) du système. Ce délai dépend également du courant et de la taille de la boucle. Les systèmes très rapides démarrent plus tôt mais ils pourraient avoir une profondeur d'exploration limitée en raison des faibles courants. L'augmentation de la taille ou du courant de la boucle de l'émetteur augmentera ce temps d'arrêt et donc la profondeur de départ de l'information de résistivité. Plus le système est sophistiqué, plus vous pouvez obtenir (plus rapidement) d'informations des premières couches et avec l'application d'une combinaison de courants faibles (peu profonds) et élevés en profondeur), meilleure sera la profondeur de pénétration. Les systèmes tels que WALKTEM (ABEM) sont équipés d'une option dite à double moment qui donnera à la fois des informations à la fois peu profondes et des couches plus profondes, en raison de l'application de deux amplitudes du courant de l'émetteur juste après l'autre, dans la même séquence de mesure. Les données peuvent être combinées dans un seul graphique de sondage TDEM.

Cela dépend de la taille, de la profondeur et du contraste de résistivité de la cible, de la façon dont l'opérateur doit décider de la taille de la boucle, de la quantité de courant, des tours de boucle et d'autres paramètres pour une meilleure résolution et une profondeur de pénétration optimale.

La taille de la boucle peut être utilisée comme indication de la profondeur d'exploration, souvent 1,5 à 3 fois d'un côté d'une boucle carrée est indicative mais dépend également de la résistivité du sous-sol (faible résistivité, profondeur de pénétration inférieure), du courant de l'émetteur, de l'émetteur virages et bruit de fond. Cette profondeur d'exploration dans les systèmes TDEM est grossièrement approchée avec la profondeur dite de diffusion, qui est liée à la profondeur de peau et peut être estimée en fonction de la fenêtre de temps qui est encore au-dessus du bruit et de la résistivité globale de la terre :

*$D$  (profondeur de diffusion) =  $40\sqrt{t}/\sigma$  équivalent profondeur d'exploration,  $D= 28\sqrt{\rho t}$  (mètres)*

- *$t$  = temps millisecondes (fenêtre de temps)*
- *$\sigma$  = conductivité apparente (Siemens/m)*
- *$\rho$  = résistivité apparente (Ohmm)*

La résistivité apparente est calculée à partir de l'amplitude mesurée à un instant précis. Jusqu'à ce qu'il disparaisse dans le bruit de fond. La plupart des instruments fournissent ce calcul à l'écran.

Un exemple pour la profondeur de diffusion : pour une couche homogène avec une résistivité de 400 Ohmmètre (sous-sol altéré), mesurée à une fenêtre temporelle de 1 milliseconde, cette profondeur de diffusion pourrait être supérieure à 500 mètres, si la force du signal est toujours supérieure au

bruit. Cela dépend de la taille de boucle d'émetteur choisie et du courant d'émetteur. Une résistivité uniforme de 10 ohmmètre se traduira par une profondeur d'exploration équivalente beaucoup plus faible, même inférieure à 100 m.

### 5.2.2 Bruit

Plus le bruit de fond est élevé, plus la profondeur d'exploration est limitée. Le bruit de fond est important dans les zones urbaines, à proximité des lignes électriques et autres structures artificielles. Les lignes électriques et les clôtures métalliques doivent être à au moins 100 mètres de distance ou 1 à 4 fois la distance d'un côté ou du rayon de la boucle. Ils créeront une induction indésirable. Avec l'augmentation de la résistivité de la terre, la distance à ces structures devrait également être augmentée. Le couplage inductif avec ces structures artificielles ne peut pas être filtré.

Deux types de couplage avec des structures artificielles peuvent être distingués : le couplage galvanique et le couplage capacitif. Le couplage galvanique, dû au couplage avec les lignes électriques aériennes, entraînera un changement d'amplitude régulier sur de nombreux points de données, ce qui est très difficile à reconnaître à partir de sondages uniques. Le couplage capacitif, dû aux conducteurs (mis à la terre) dans la sous-surface (conduites enterrées, lignes électriques, clôtures ou conducteurs naturels) présentera une grave perturbation de la courbe de décroissance : à la fois une amplitude lisse (entraînant une résistivité calculée plus faible) sur de nombreux points de données et une anomalie en forme de sinus pointu dans plusieurs points de données. (Figure 24) Ces effets semblent cependant minimes dans le graphique de magnitude log-log en fonction du temps ; le décalage dans le calcul d'un modèle de couche (inversion) sera sévère. Dans ce cas la résistivité sera ou la profondeur surestimée. Les sondages à proximité de ces structures peuvent être interprétés à tort comme une couche altérée locale plus profonde, il convient de noter que l'effet de couplage n'est pas le même que le bruit de fond. Un autre type de perturbation est dû à la polarisation induite (IP) causée par certains sédiments comme les couches d'argile avec des minéraux à forte susceptibilité magnétique comme la magnétite. Cela peut être reconnu car l'effet IP générera des lectures négatives

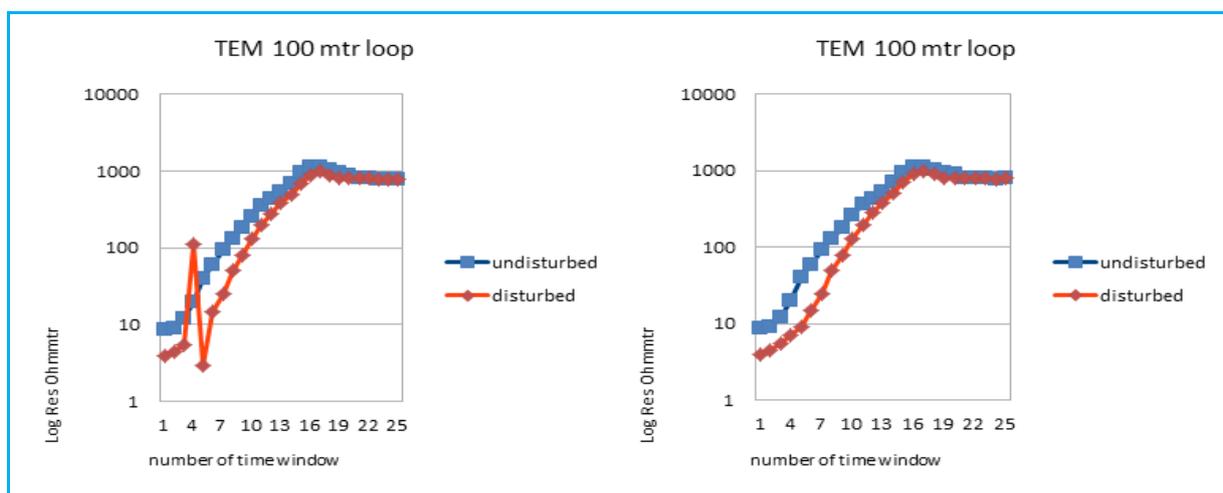


Figure 24, Exemples synthétiques basés sur des mesures sur le terrain de l'effet du couplage capacitif (à gauche) et du couplage galvanique (à droite) sur les graphiques de sondage TDEM.

La configuration de la boucle centrale (figure 22) est plus sensible à cet effet IP. Il sera visible dans les premiers temps, il se déplacera plus tard avec une taille de bobine émettrice croissante, l'effet sera diminué.

Les configurations décalées (l'antenne réceptrice est placée à l'extérieur de la boucle d'émission) d'autre part sont extrêmement sensibles aux petites variations de la résistivité de la surface proche, ce qui peut influencer l'interprétabilité des désintégrations. La configuration en boucle (l'antenne du récepteur est placée à l'intérieur de la boucle de l'émetteur) est beaucoup moins sensible pour cela. La configuration de décalage est également très sensible aux petites déviations du réseau. Pour le profilage hydrogéologique avec plusieurs sondages, les configurations en boucle ou coïncidentes sont donc préférables dans la plupart des zones. Dans les configurations en boucle, l'utilisation d'un courant d'émetteur élevé peut entraîner une saturation des amplificateurs récepteurs et un signal déformé aux premiers temps d'arrivée. Le courant doit être maintenu relativement faible avec de petites boucles d'émetteur. Ou une combinaison de tailles de boucles croissantes et de courant croissant peut être explorée à la même station. Les instruments avec une option à double moment (courant faible pour les temps précoces) et un courant élevé pour les arrivées tardives peuvent surmonter ce problème (ABEM, WALKTEM). Un changement latéral sévère de la géologie peut affecter les différentes désintégrations au même endroit avec des moments différents d'une manière différente ; dans ce cas, ils ne peuvent pas être combinés

### **Procédures terrain ou TDEM**

Les procédures sur le terrain dépendent du système et de la marque des instruments utilisés. Certains instruments, émetteurs et récepteurs, sont conçus pour des sondages profonds, d'autres pour des applications ou des combinaisons peu profondes ou intermédiaires. Dans ce cas, nous discuterons des résultats dans Kajjado exécutés sur le même profil que celui discuté dans la section ERT. Dans un premier temps, les mesures TDEM ont été exécutées par KENGEN avec un type spécifique d'équipement Zonge. Cela a donné des résultats décevants en raison de la faible résolution de cet ensemble d'équipements. Dans une seconde période en route vers une seconde zone de recherche (sédimentaire) nous avons pu utiliser un instrument avec une résolution plus élevée notamment à faible profondeur (WALKTEM). Le laps de temps de cette période était très court en raison des fortes précipitations ; seulement 4 mesures ont pu être effectuées.

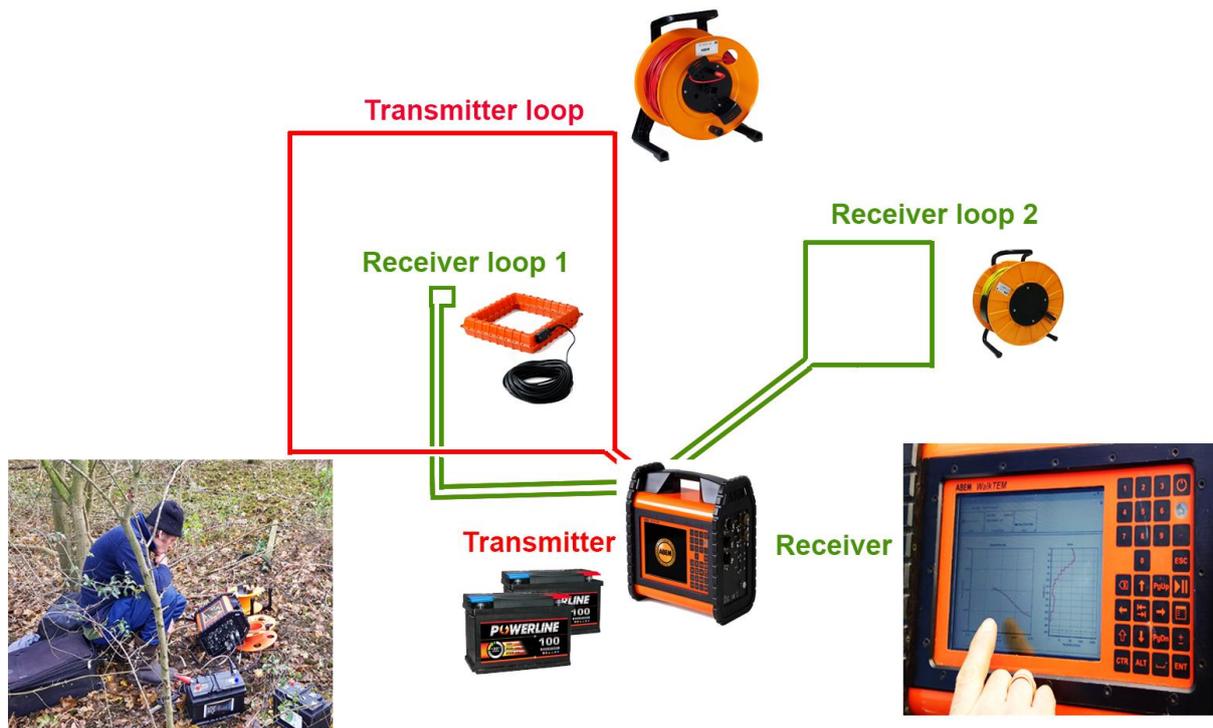


Figure 25, exemple d'installation sur le terrain ABEM-WALKTEM, avec deux récepteurs séparés, en boucle et en boucle décalée conçus pour des applications moins profondes. La boucle de l'émetteur est un fil à un tour dans une boucle de 40 X 40, la boucle du récepteur hors jeu est un fil à 2 tours de 5 X 5 m. La boucle centrale du récepteur est une boucle ou une bobine de 20 tours de 1 X 1 m. Les sondages plus profonds (en général) utilisent des boucles d'émetteur plus grandes et des récepteurs en boucle plus grands comme la boucle décalée de cette figure. Les données mesurées en temps réel peuvent être vues à l'écran et inversées. Notez que le récepteur décalé peut également être situé au centre. Cela entraînera une perte de certains des premiers points de données en raison de l'effet des antennes les unes sur les autres. En cas de changement latéral attendu et d'informations peu profondes, des mesures séparées pourraient être exécutées avec les différents récepteurs au centre et combinées avec le logiciel par la suite.

## Procédures de terrain TDEM

- 1) **Modélisation prospective initiale.** En général, la modélisation prospective est conseillée pour déterminer si une cible proposée est détectable. Avec la modélisation avancée, la sensibilité aux changements de profondeur d'un sous-sol (altéré) ou la détectabilité des couches à faible résistivité (conducteurs) peut être testée. Les résistivités des VES existants ou des diagrapies de forage peuvent être utiles dans la modélisation. La plupart des programmes d'inversion prennent en charge la modélisation directe. En fait, l'ajustement de courbe, où l'ajustement d'un modèle est comparé aux données de terrain, est en fait un moyen de modélisation prospective. De nombreux logiciels gratuits sont disponibles auprès de l'Université d'Aarhus, au Danemark, le programme s'appelle EMMA . Pour utiliser Emma, l'expérience de la technique et des principes TDEM est nécessaire. Avec la modélisation avancée, l'équivalence peut également être testée. L'équivalence signifie que plus d'un modèle en couches a un bon ajustement sur les données de terrain. L'équivalence se produira toujours, comme dans VES et ERT (bien que dans ERT beaucoup moins). En TDEM, l'équivalence sera plus sévère dans la partie à haute résistivité de la sous-surface. En général, le TDEM est plus sensible sur la résistivité des couches conductrices et son épaisseur ou

profondeur mais est moins sensible (plus d'équivalence) dans la partie la moins conductrice (haute résistivité) du sous-sol. Ce qui signifie que les circonstances telles qu'attendues et rencontrées dans la géologie du socle de Kajiado pourraient être moins favorables pour le TDEM;

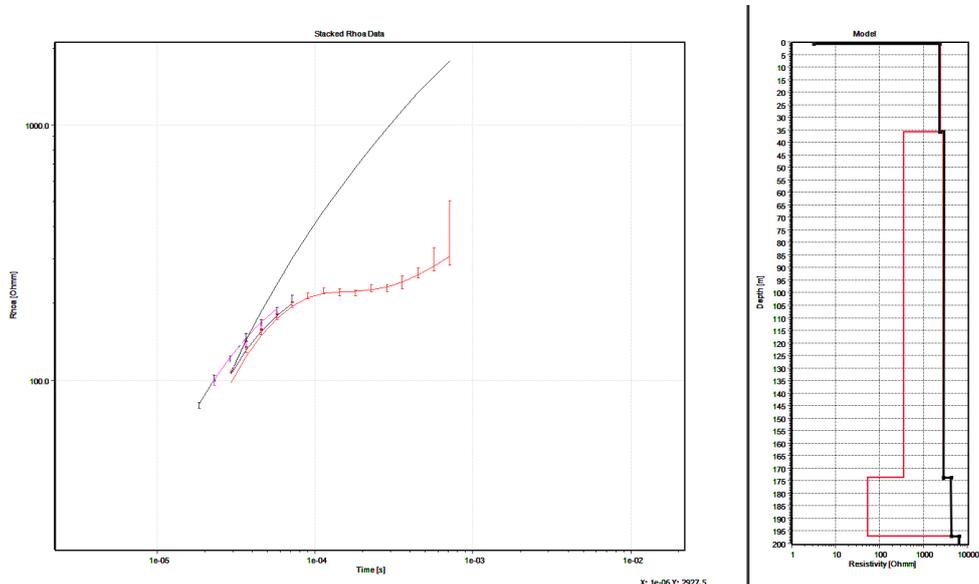


Figure 26, exemple de modèle avancé d'un sondage TDEM avec une résistivité croissante (en noir), dans ce cas, un modèle avec le substratum rocheux est supposé proche de la surface est comparé à des données réelles sur un emplacement avec une zone altérée profonde (en rouge). À gauche, le graphique de résistivité apparente en fonction du temps et à droite, le modèle en couches calculé avec l'inversion. Le modèle est réalisé avec le logiciel d'inversion SPIA.

- 2) **Taille et tours de boucle d'émetteur optimaux.** L'étape suivante consiste à effectuer un test sur le terrain avec la taille de boucle d'émetteur la plus favorable (si nécessaire plusieurs tours de boucle) en fonction de la profondeur d'exploration (et de la résolution) souhaitée. Le côté test doit de préférence avoir un faible bruit de fond, loin des lignes électriques, des clôtures métalliques et le plus favorable sur une zone d'intérêt homogène mais représentative et si disponible avec des informations de forage. De préférence pas trop près d'un changement (latéral) attendu de la géologie, comme des fractures. L'antenne du récepteur est dans la plupart des cas un récepteur à plusieurs bobines (voir figure 25). Cependant, un seul fil de cuivre isolé peut également être utilisé comme antenne réceptrice. Ces simples antennes réceptrices monofilaires peuvent être posées en carré de même taille (boucle coïncidente) ou plus petite que la boucle de l'émetteur (en boucle).
- 3) Une fois que l'émetteur et la boucle du récepteur sont posés, **le bruit de fond** doit être enregistré (dans ce cas, l'émetteur est éteint). C'est le niveau du signal mesuré où les courants de Foucault (l'induction générée revenant de la sous-surface) disparaissent dans le bruit de fond. La fenêtre temporelle correspondante sera la dernière utilisable et est une indication de la profondeur d'exploration. Avec des niveaux de bruit de fond élevés, il est conseillé d'augmenter le nombre de répétitions. Le courant peut également être augmenté, mais cela affectera le temps de retard et la profondeur à partir de laquelle les données peuvent être prises.
- 4) A ce stade, plusieurs **tests** avec différents courants d'émetteur, temps de retard, fréquences de mesure et répétitions peuvent être exécutés et les courbes de décroissance

correspondantes évaluées. La taille de la boucle de l'émetteur ou ce que l'on appelle le moment de l'émetteur (le moment est la surface de la boucle de l'émetteur multipliée par le nombre de tours) influencera la profondeur d'exploration, la résolution et la profondeur de départ de la mesure. Plus la boucle d'émetteur est grande, plus le courant d'émetteur nécessaire est élevé, plus la profondeur d'exploration deviendra profonde, ce qui entraînera cependant une résolution inférieure et souvent plus de données manquantes des premières couches en raison des temps d'arrêt accrus de l'instrumentation. C'est ce que l'on appelle le temps de retard TX et en fait le temps ou le moment où le récepteur peut commencer à mesurer. Pour des boucles plus grandes, plus de courant est nécessaire et le système utilisé doit être capable de générer ce courant.

- 5) Les paramètres importants qui doivent être programmés ou sont déjà préprogrammés dans certains instruments sont :
- Tours de boucle de l'émetteur : le nombre de tours influencera également le moment de l'émetteur (surface de la boucle d'antenne) et donc le délai Tx (augmentation). Plus il y a de virages, plus le moment est élevé, plus le délai Tx est long, plus vous obtiendrez de profondeur, mais en même temps, vous perdrez des informations sur les couches supérieures.
  - La boucle du récepteur, qui se traduira par le moment du récepteur, dépend du récepteur utilisé : multi-bobine ou monofilaire. Dans le cas d'un seul fil, le moment récepteur est la surface du carré récepteur. Cette valeur est nécessaire dans le calcul des résistivités dans le logiciel d'inversion. Parfois, il y a une loupe prise en compte en fonction des tours de boucle. Les récepteurs à plusieurs bobines se traduiront par des moments de réception plus élevés en gardant la surface de la boucle petite. Plus l'antenne du récepteur contient de surface, plus vous obtiendrez des informations en profondeur. Certains instruments (WALKTEM) ont 2 canaux d'entrée, ce qui permet d'utiliser 2 récepteurs séparés en même temps : un petit multi-bobine et un plus grand récepteur monofilaire en même temps. Afin d'éviter une influence mutuelle, le fil unique est placé à l'extérieur de la boucle de l'émetteur.
  - Temps de retard de l'émetteur (Tx-delay) : Il s'agit du temps de retard après la coupure du courant et indique le début de la mesure du champ en déclin, influençant ainsi la profondeur à partir de laquelle des informations peuvent être obtenues. Certains systèmes peuvent mesurer le temps de retard Tx en fonction de la taille de la boucle, des tours de boucle et du courant utilisé. Il peut également être calculé. Ce sera en microsecondes. Des temps de retard incorrects entraîneront un point de données manquant au début ou à la fin. Les fenêtres de temps seront décalées en fonction du délai.
  - Fréquence EM : les systèmes TDEM utilisent des fenêtres temporelles fixes auxquelles la décroissance est mesurée. Ces fenêtres dépendent des fréquences de mesure choisies (temps d'allumage et d'extinction de l'émetteur). Par conséquent, la résolution et la profondeur dépendent également de la fréquence choisie. Avec des fréquences plus basses, les fenêtres deviennent plus éloignées et se déplaceront vers des périodes ultérieures. Plus la fréquence est basse plus le temps de mesure est long, ce qui augmentera donc la profondeur d'exploration mais en même temps diminuera la

résolution (épaisseur de couche versus contraste de résistivité) et la profondeur de départ.

- Courant de l'émetteur : le courant réglé dans l'émetteur influencera également la profondeur d'exploration, plus le courant est élevé, plus les systèmes mettent du temps à couper l'alimentation. Courant élevé cela augmentera la profondeur de départ (à cause de l'augmentation du retard) de la mesure et en même temps la profondeur d'exploration à cause du signal plus fort. Des courants très élevés peuvent saturer les amplificateurs du récepteur. Le préfiltrage, tel que les filtres coupe-bande de ligne électrique ou les filtres audio passe-bas, est possible dans la plupart des systèmes. Les filtres peuvent entraîner un délai supplémentaire, et donc une perte d'informations de la ou des première(s) couche(s).
- Les réglages de gain, peuvent être manuels ou entièrement automatiques, le gain est nécessaire pour optimiser l'échelle de mesure des canaux d'entrée en fonction de la force du signal pour éviter la saturation. Le processus de gains dépend du type d'instrument.

L'effet combiné du retard Tx, de la fréquence de mesure et du courant à une certaine taille de boucle d'émetteur (moment d'émetteur) interagissent et influencent la profondeur d'exploration, la résolution et la régularité de la décroissance. Ils doivent être appliqués avec prudence et discernement. Lors de la modification de la boucle ou des virages de l'émetteur, ces paramètres doivent également être modifiés. La courbe de décroissance (temps par rapport à l'amplitude mesurée) doit être un graphique descendant régulier. Ce graphique peut être calculé en un graphique de résistivité lisse en fonction du temps ou de la profondeur. Ce graphe peut être testé pour les inversions vers un modèle de couche. Certains instruments ont la possibilité d'utiliser des réglages programmés ce qui facilite leur utilisation. La plupart des instruments peuvent effectuer une inversion très grossière pour un premier jugement. Le système WALKTEM d'ABEM peut effectuer une inversion complète (automatique) sur l'instrument lui-même ; également différents graphiques de mesure au même endroit avec d'autres variables peuvent facilement être combinés. A partir de l'inversion, la profondeur d'exploration peut également être observée. L'amplitude mesurée dans les courbes de décroissance doit être bien supérieure au bruit de fond pour les fenêtres temporelles mesurées. Pendant la mesure, les données d'une fenêtre temporelle spécifique peuvent être observées pour leur amplitude et leur écart type dans le processus de moyennage (elle doit être stable et bien au-dessus du bruit de fond), certains instruments l'affichent graphiquement. Dans la plupart des cas, certains des premiers points de données et des derniers points de données (au niveau du fond) doivent être exclus avant l'inversion. Les doublures extérieures dans les arrivées précoces pourraient être dues à un temps de retard Tx trop court selon la ou les fenêtres de première fois ou à une surcharge conductrice et à une inhomogénéité latérale. La saturation due à des courants d'émetteur élevés pourrait également provoquer des doublures.

6) **Un filtrage standard** doit être appliqué:

Filtre anti-alias : la composante de fréquence maximale qu'un système de données d'échantillonnage peut gérer avec précision est ce qu'on appelle la limite de Nyquist. La fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à deux fois la composante de fréquence la plus élevée du signal d'entrée. Lorsque cette règle est violée, des signaux

indésirables ou indésirables apparaissent dans la bande de fréquence d'intérêt. C'est ce qu'on appelle le "crénelage".

- 7) **L'écart type** pourrait être optimisé par l'empilement des données. Il peut s'agir du nombre de points de données mesurés (répétitions) et moyennés au cours d'une acquisition ; c'est ce qu'on appelle des piles. Notez que ce n'est pas la même chose que l'empilement utilisé dans l'acquisition sismique où le signal est additionné (amélioré) à chaque nouvelle mesure ; could be optimized by data stacking. This can be the amount of data points measured (repetitions) and averaged within one acquisition; this is called stacks. Note that this is not the same as stacking as used in seismic acquisition where the signal is added up (enhanced) every new measurement;
- 8) Après ce premier test sur le terrain, si les courbes de décroissance sont satisfaisantes (lisses) avec la taille de boucle et le courant correspondants en fonction de la profondeur d'exploration souhaitée, les données peuvent être **testées pour l'inversion**. Pour l'inversion, les points de non-raccordement doivent être ignorés. Ces points, comme discuté, sont dans la plupart des cas (aux) arrivées précoces et les arrivées tardives qui disparaissent dans le bruit de fond;
- 9) Lorsque les réglages sont satisfaisants, un profil avec **plusieurs sondages dans la direction du changement de géologie** peut être exécuté. La distance entre les sondages (stations) pourrait être de l'ordre de  $\frac{1}{2}$  à 2 fois la taille du côté de la boucle. Cela dépend de la géologie locale (changement latéral attendu) et de la taille de la zone à étudier. Les sondages individuels doivent être vérifiés. Si nécessaire entre 2 stations, lorsqu'un changement brutal est visible, un autre sondage peut être ajouté entre les deux;
- 10) **Les inversions** peuvent être effectuées sur les courbes de sondage simples ou avec un logiciel qui combine et intègre les sondages dans un profil. La première étape de l'interprétation (à chaque emplacement de sondage) consiste à sélectionner, combiner et faire la moyenne des meilleurs empilements (décroissances avec la même taille de boucle, fréquence et courant) exclure les doublures et vérifier les inversions lisses pour juger le nombre de couches et tendance de la courbe. Ce type d'inversion lisse est basé sur une inversion multicouche à profondeurs fixes à partir de laquelle la résistivité est calculée.

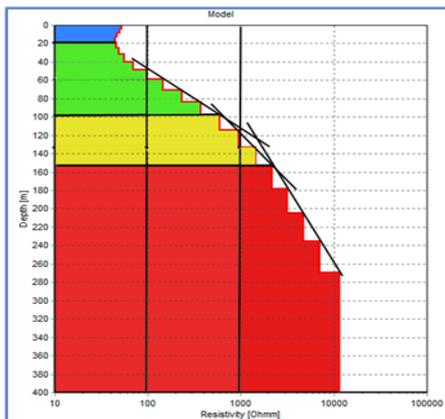


Figure 27, exemple d'inversion lisse, sur sous-sol. Inversion douce comme indication de la profondeur du substratum rocheux. Ce sondage pourrait être interprété comme une couche d'argile supérieure (à la fois sédiments et altération in situ) d'un substrat rocheux entièrement altéré, se transformant progressivement en substrat rocheux altéré, partiellement altéré et non altéré. Intéressant est le changement de l'angle de la tangente, ce qui pourrait indiquer une sorte de superposition. Sur cette base, un modèle simplifié à 4 couches pourrait être appliqué. Il n'y a aucune preuve claire de la nappe phréatique.

Le résultat de cette inversion n'est pas la vraie distribution de résistivité du sous-sol mais aide à juger de la tendance du sondage lorsque les couches ne sont pas claires. Sur la base de ces informations, un modèle de couche peut être essayé. Avec des essais et des erreurs, un meilleur ajustement peut être obtenu, ou plusieurs points de données peuvent être ignorés. Après avoir sélectionné la partie du graphique qui peut être utilisée pour l'inversion, il est également possible de combiner les décroissances de différentes fréquences et courants dans un seul graphique de résistivité.

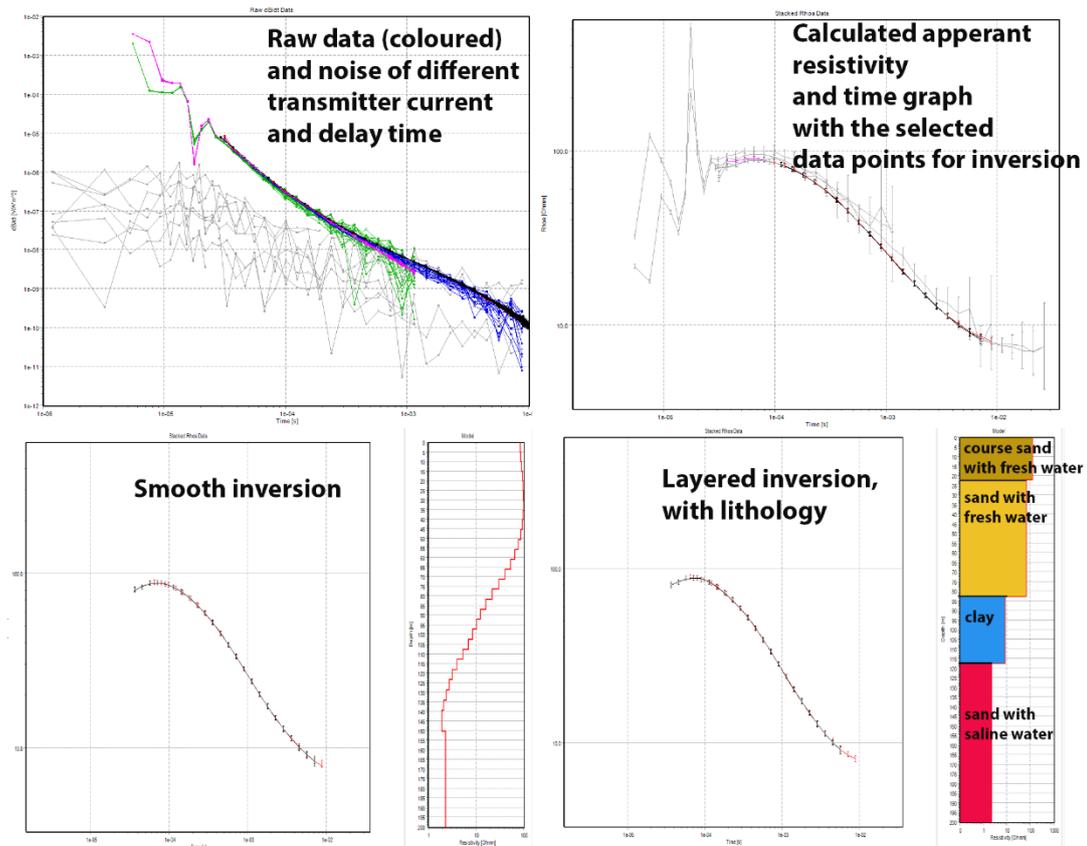
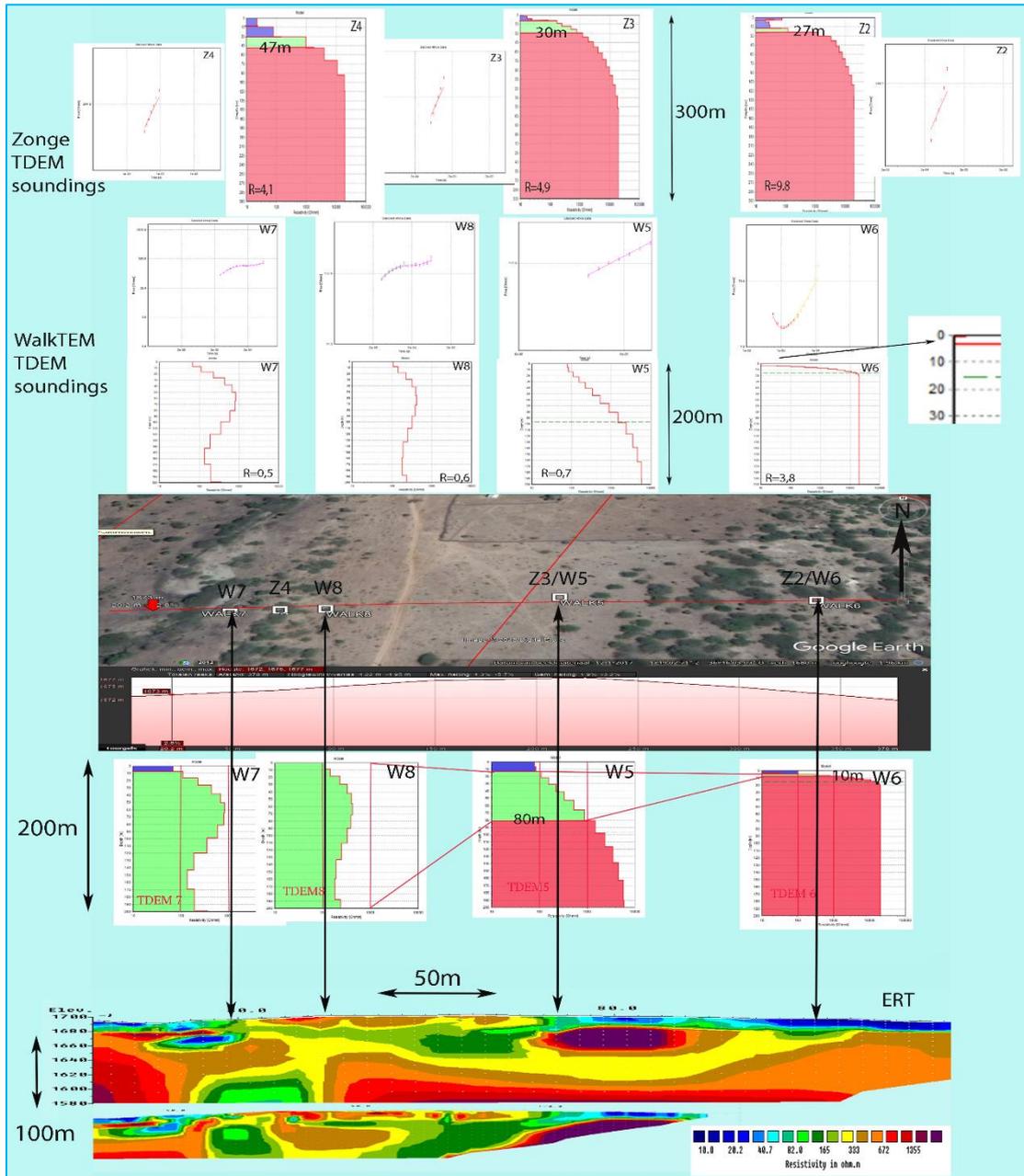


Figure 28, exemple de séquence de traitement et d'interprétation des données TDEM dans un aquifère de sable non consolidé proche de la côte. L'argile a également été rencontrée dans un forage à proximité. En haut à gauche : données brutes (colorées) et bruit, combinaison de différents courants et temps de retard. En haut à droite : données de résistance apparente calculées en fonction du temps avec les points de données sélectionnés pour l'inversion. En bas à droite : inversion lisse (30 couches). En bas à droite : Modèle de couche avec lithologie interprétée

L'ajustement du modèle avec les données de terrain réelles est appelé résiduel, cet ajustement doit être inférieur à 4%, mieux est inférieur à 1%. Il est important de réaliser que plus le nombre de points de données est ignoré, meilleur sera le résidu d'ajustement, mais le modèle peut être moins représentatif pour cet emplacement spécifique. Si des informations d'autres méthodes, comme les sondages VES sont disponibles, elles peuvent être utilisées pour l'interprétation des premières couches. Le logiciel d'inversion utilisé dans ce projet est SPIA (Aarhus GeoSoftware, Aarhus, Danemark) et le logiciel d'inversion Zonge, distribué par le fabricant de l'équipement. Avec ce logiciel, les graphiques de sondage de différents instruments ou paramètres au même endroit peuvent être combinés ou comparés.

Enfin, les mesures peuvent être sélectionnées pour une inversion 2D intégrée le long du profil basée sur une inversion lisse ou en couches.



Figures 29, deux marques différentes d'instrumentation TDEM comparées le long du transect ERT. Ci-dessus se trouve le Zonge avec un émetteur et une configuration plus restreinte pour les sondages profonds résultant en une faible résolution et aux mêmes emplacements des sondages WALKTEM dans une configuration moins profonde avec une résolution beaucoup plus élevée. Notez que les inversions sont des inversions lisses. Les modèles de couches prêtent à confusion en raison de l'équivalence due à l'augmentation progressive de la résistivité en profondeur liée au processus d'altération.

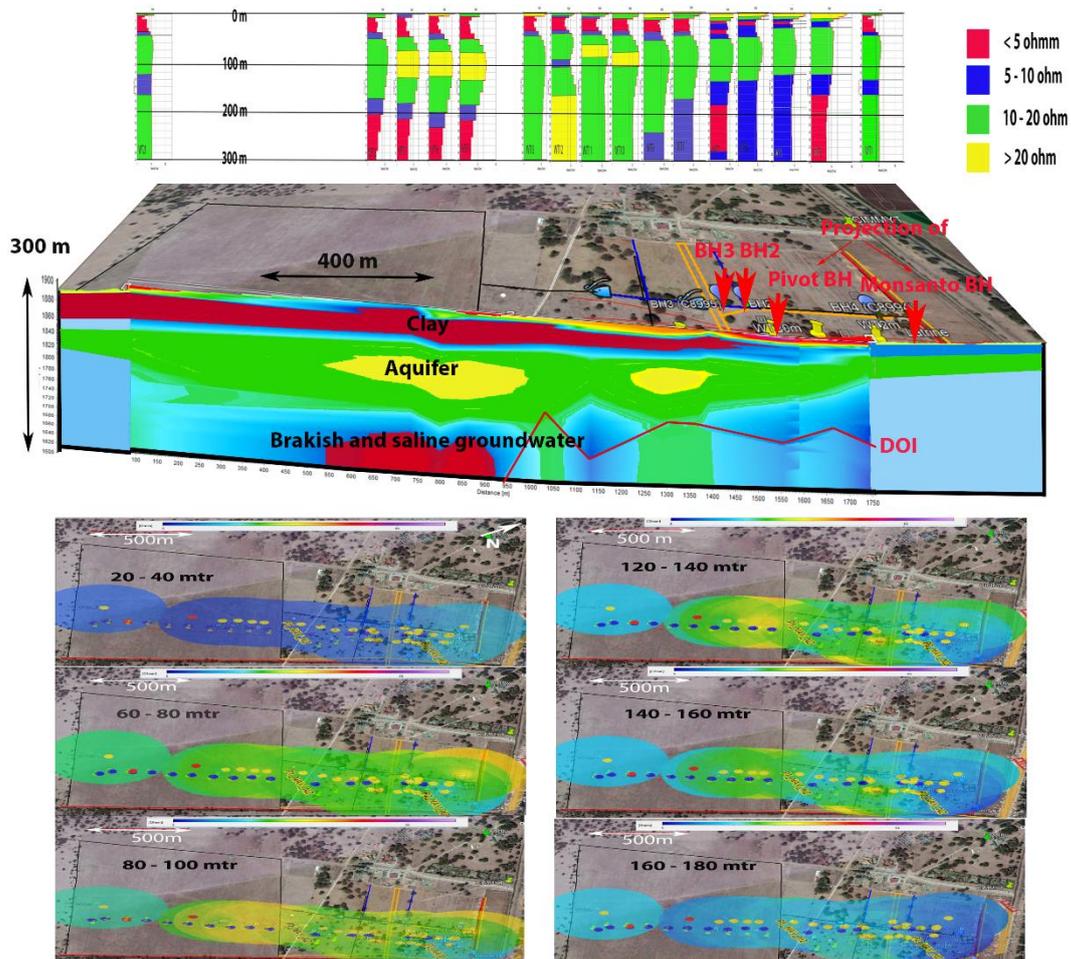


Figure 30, exemple d'interprétations 2D TDEM WALKTEM à Naivasha (sédiments volcaniques) avec SPIA (1D, ci-dessus) et le logiciel appelé « Aarhus workbench » (au milieu et en dessous).

### Conclusions du TDEM pour le Burkina Faso

Les systèmes TDEM sont coûteux et doivent être traités avec soin et expérience. L'équipement est souvent fragile et les câbles et connecteurs doivent être manipulés avec soin. TDEM est un système de sondage 1D, en supposant une stratification horizontale, pour le profilage, des séries de sondages sont nécessaires le long d'une ligne de profil. Une petite taille de boucle d'émetteur avec un récepteur combiné à plusieurs bobines à faible moment (courant) sera alors la meilleure option. Un changement latéral dans la disposition et le rayon d'influence entraînera une inversion irréaliste. Des sondages relativement peu profonds standard peuvent être réalisés en 1 heure.

Le temps total d'acquisition des données pourrait, dans le cas du profilage, être comparé à l'ERT en fonction de la longueur du profil et de la quantité de sondages. ERT devrait avoir une résolution plus élevée. Dans les zones avec une couche supérieure hautement résistive, de meilleurs résultats peuvent être obtenus avec le TDEM qu'avec les systèmes d'électrodes en raison du contact des

électrodes, en particulier pour les sondages plus profonds. Des précautions doivent être prises avec les sols arables ou les calottes dures à forte susceptibilité magnétique (comme l'hématite), ils peuvent perturber les mesures et entraîner des inversions peu fiables. Les instruments tels que WALKTEM sont portables et peuvent être utilisés par une seule personne avec des applications peu profondes (<150m).

La profondeur de pénétration est supérieure à 100 m. Pour les applications très peu profondes (<20m selon l'instrument)) le système n'est pas applicable. La résolution peut être limitée (selon le type d'instrument et la cible) en particulier dans les zones avec une résistivité croissante avec la profondeur ce qui est le cas dans Burkina Faso. Le système peut détecter la profondeur et la résistivité d'une couche horizontale à faible résistivité dans un sous-sol hautement résistif. Mais n'est pas capable de séparer la couche de résistivité élevée. Cela peut être testé avec une modélisation prospective. Dans ce cas, seules des inversions multicouches lisses automatiques peuvent être utilisées pour comparer la profondeur au substrat rocheux de manière plus qualitative (voir figure 29). La convivialité diffère des différentes marques mais des compétences sont nécessaires pour juger de la qualité des données sur le terrain comme pour l'interprétation des données.

#### **2.4) Application du profilage EM dans le domaine fréquentiel (et sondage)**

Le domaine fréquentiel EM est comme le TDEM également une méthode basée sur l'induction électromagnétique. Dans FDEM, un champ EM continu est appliqué avec une ou plusieurs fréquences fixes. Comme pour le TDEM, des antennes émettrices et réceptrices sont également utilisées. Ce sont souvent des bobines d'antenne multitours. Le récepteur et l'émetteur sont à une ou plusieurs distances fixes. La profondeur d'exploration dépend de la fréquence, de l'orientation de la bobine, de la distance et de la conductivité sous-surface.

L'augmentation de la fréquence diminuera la profondeur d'exploration. L'augmentation de la distance des bobines, bien que de manière plus limitée, augmente la profondeur d'exploration. L'utilisation des bobines en position horizontale est appelée boucle horizontale, en position verticale est appelée boucle verticale. Le champ EM généré dans la bobine émettrice est appelé champ primaire ; la réponse inductive du sous-sol est appelée champ secondaire. Le champ primaire et le champ secondaire sont mesurés dans la bobine réceptrice. Lorsque la bobine émettrice est directement connectée au récepteur avec un fil, le champ primaire est connu et peut être soustrait du champ mesuré (total), et donc seul le champ secondaire est enregistré. En général, deux quantités du champ EM secondaire sont mesurées, IP (en phase) et QP (quadrature ou déphasé). Le QP dans certaines limites (nombre d'induction, voir ci-dessous) est une mesure de la conductivité apparente. Voir la figure 33.

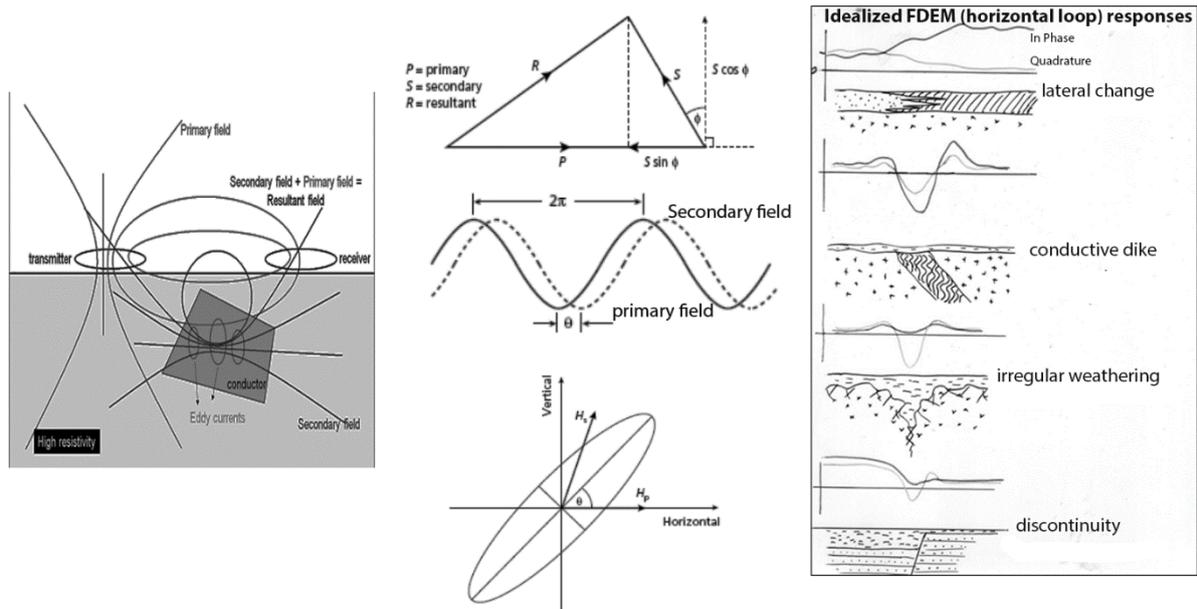


Figure 31, schematic overview FDEM

Un paramètre important en EM est la profondeur de peau : elle est définie comme la profondeur à laquelle l'amplitude d'une onde plane a diminué jusqu'à 1/e ou 37% par rapport à son amplitude initiale. Écrivez sous une forme simplifiée:

$$\delta \cong 503 \sqrt{\frac{1}{f \sigma}}$$

Où  $f$  = fréquence en Hz,  $\sigma$  = conductivité en S/m Une estimation plus réaliste de la profondeur à laquelle un conducteur donnerait lieu à une anomalie FDEM détectable est  $\approx \delta/5$  (Reynolds, 1997).

A Un autre paramètre important dans FDEM, est le nombre d'induction, qui définit si la réponse mesurée en quadrature est toujours représentative de la résistivité apparente. Ceci est défini comme:

$$\beta = R / \delta:$$

$R$  = Distance between the receiver and transmitter. In most circumstances.  $R$  = Distance entre le récepteur et l'émetteur. Dans la plupart des cas,  $\beta$  devrait être bien inférieur à  $\ll 1$ .

Si un instrument mesure également la composante IP, les limites du nombre d'induction faible sont atteintes pour des réponses IP faibles. La réponse IP (réponses élevées) pourrait être utilisée comme indication pour les objets métalliques dans le sous-sol.

Il existe de nombreux types d'instruments FDEM, chacun ayant ses propres restrictions et limitations. Ils diffèrent par la profondeur d'exploration, la résolution, le nombre d'induction et la possibilité d'inversion (modèle de couche). Avec les formules données ci-dessus, une estimation approximative de l'applicabilité d'un certain instrument pour la cible souhaitée peut être approchée. Les données mesurées peuvent être utilisées de manière plus quantitative pour indiquer des anomalies ou pour

obtenir une résistivité apparente ou dans certains cas utilisées pour des inversions (Figure 33). L'inversion peut être calculée si plusieurs distances, orientations et fréquences émetteur-récepteur sont appliquées

Dans cette section, seuls les instruments à source contrôlée (émetteur dédié) seront examinés. (Un exemple d'application de source naturelle est AMT) La plupart de ces instruments FDEM utilisent leur propre émetteur. Ces émetteurs peuvent être des émetteurs multifréquence ou monofréquence à distances fixes ou à distances discrètes

If an instrument also measures the IP component than low induction number limits are reached at low IP responses. The IP response (high responses) could be used as an indication for metal objects in the subsurface.



APEX MAXMIN, multi frequency EM, (out dated system), expl Depth upto ca 40 m, (depending earth resistivity)



EM34, geonics, 3 antenna spacings, with fixed frequency's expl depth, upto ca <10, 20, 30 m (depending earth resistivity)



GEM 2, multi frequency, fixed spacing shallow applications



Iris Promis, multi spacing, multi frequency, 3 components of the secondary EM field (modern system) Expl. Depth upto ca 100 m (depending earth resistivity)

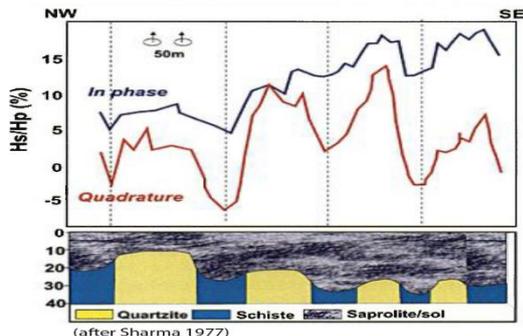


DUALEM 421, fixed frequency and 6 fix distances and orientations, Expl.Depth: upto ca 6m

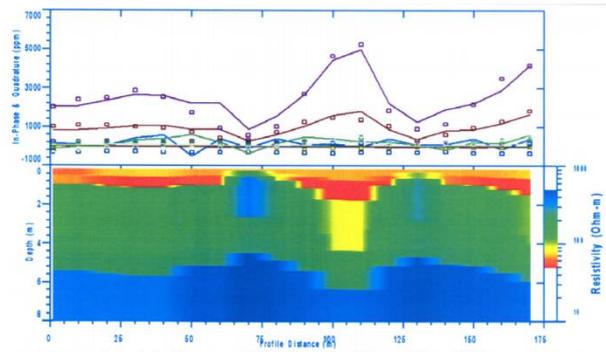


DIGHEM, airborne FDEM, Expl. Depth ca 40 - 200 m (depending earth resistivity)

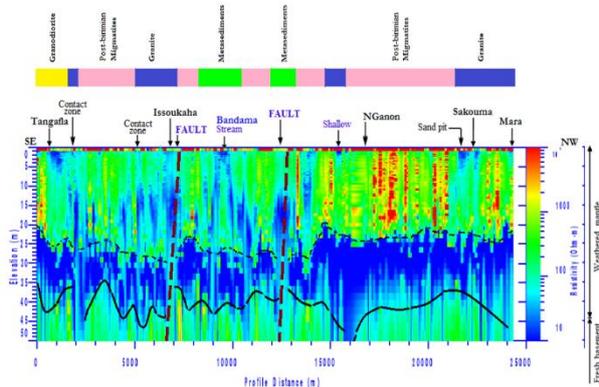
Figure 32, an overview of some FDEM instruments, with different applications, resolution and exploration depths. Note that both transmitter and receiver of the EM34 are used in vertical loop position and that the transmitter and receivers in GEM2, DUALEM 421 and airborne DIGHEM are built in plastic frame at fixed distances and orientations. En haut à gauche : Apex Max Min (système périmé), multifréquence EM, profondeur d'exploration jusqu'à environ 40 m, en fonction de la résistivité de la terre, en haut au centre : EM 34 avec 3 espacements d'antenne différents avec des fréquences fixes, profondeurs d'exploration jusqu'à 10, 20 et 40 m selon la terre la résistance. En haut à droite : GEM2 multifréquence, espacement fixe, pour les applications peu profondes. En bas à gauche : Iris Promis, multi espacement, multi fréquence, mesure 3 composantes du champ EM secondaire. Profondeur d'exploration jusqu'à 100m selon la résistance de la terre. En bas au milieu : DUALEM 421, fréquences fixes et 6 distances fixes, profondeur d'exploration jusqu'à 6 m En bas à droite : DIGHEM, FDEM aéroporté, profondeur d'exploration 40 - 200 m selon la résistivité de la terre'.



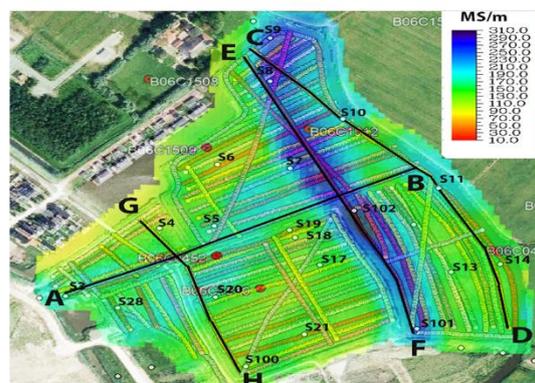
Example of horizontal loop FDEM data over weathered basement. single frequency, fixed loop (50m). Both Qp and IP of the secondary field are measured as a percentage of the primary field (after Sharma 1977)



Example of shallow multi frequency EM profile with inversion, with a GEM2 on a sandstone basement. Note the shallow depth and the inverse colour scheme. After Thomas Wilson University of West Virginia, october 2010



Example of a sequence of over 70 Iris multi frequency EM soundings (promis) on a single profile. The calculated resistivity's of the basement seem much too low. After a thesis of M. Ouedraogo, etude Nord de Cote Ivoir, 2016.



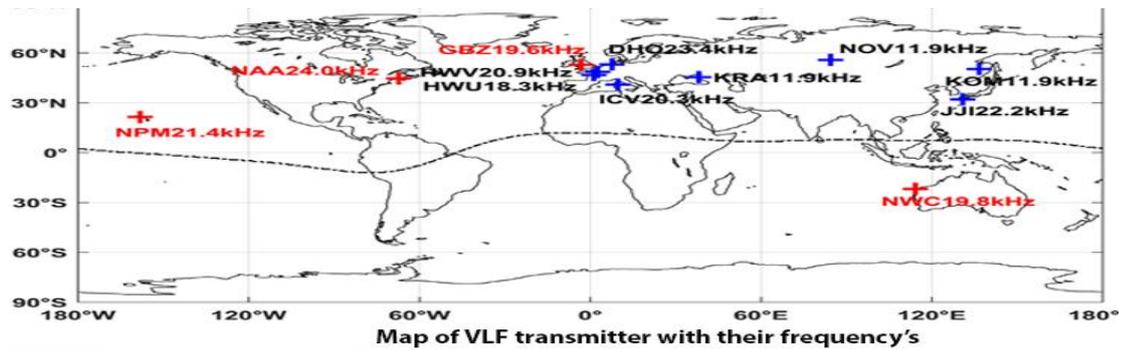
Example of DUALEM data inversion, depth slice at 4 meter

Figure 33, exemples de données FDEM et inversions de données FDEM de différents instruments. En haut à gauche : Exemple de données FDEM en boucle horizontale sur un sous-sol altéré. Monofréquence, boucle fixe (50m). IP et Qp du champ secondaire sont mesurés en pourcentage du champ principal. En haut à droite : Exemple de profil EM multifréquence peu profond avec inversion avec un GEM2 sur un socle en grès. Notez la profondeur jaunâtre et le schéma de couleurs inverses. D'après Thomas Wilson, Université de Virginie-Occidentale, octobre 2010. Ci-dessous à gauche : Exemple d'une séquence de plus de 70 sondages EM multifréquences IRIS séparés (promis) sur un seul profil. Les résistivités calculées du sous-sol semblent très faibles. Après la thèse de M. Ouedraogo, étude Nord de Côte d'Ivoire. En bas à droite : Exemple de DUALEM d'inversion de données 3D, tranche de profondeur à 4 m..

Un cas particulier de FDEM est VLF, Very Low Frequency, malgré son nom, la fréquence est encore relativement élevée pour l'exploration des eaux souterraines FDEM. Le nom est lié aux fréquences radio utilisées pour la communication radio. La fréquence de VLF varie de 15 à 25 (40) KHz et est centrée autour de 20 Hz. Dans la plupart des applications, les signaux d'un réseau mondial d'émetteurs puissants pour les communications sous-marines sont utilisés. Dans ce cas, un seul récepteur léger relativement simple et peu coûteux est nécessaire (figures 34 et 35). Un inconvénient est qu'il n'est pas toujours clair si un émetteur est utilisé et la cible (faille, dykes, contact géologique) doit être à moins de 45 degrés de l'azimut de la direction de l'émetteur. Cela signifie que cela dépend de la direction d'un émetteur utilisé si une cible peut être clairement détectée. La plage de profondeur est en relation avec la profondeur de la peau et limitée en particulier dans les zones à faible résistivité. Par exemple, à une résistivité d'environ 25 ohms, la profondeur d'exploration est d'environ 10 m. De plus, la présence de morts-terrains conducteurs supprime sérieusement la réponse des conducteurs du socle, et des variations relativement faibles de la conductivité ou de l'épaisseur des morts-terrains peuvent elles-mêmes générer des anomalies VLF importantes. Pour

cette raison, VLF est plus efficace dans les zones où la roche hôte est résistive et le mort-terrain est mince. Une épaisseur et des changements dans un mort-terrain conducteur ainsi que des changements locaux peu profonds de résistivité peuvent donner de « fausses » anomalies.

La force du signal de l'émetteur a une influence sur la qualité des mesures. En raison de la disponibilité inconnue des antennes VLF, il est également possible d'utiliser un émetteur (local) dédié comme l'émetteur GEONICSTx 27 (18,6 KHz). Ces émetteurs sont chers, nécessitent un générateur comme source d'alimentation et une antenne monofilaire de 1 000 m de long doit être correctement mise à la terre. La mise à la terre dans une terre végétale sèche (sableuse) est difficile à réaliser.



**ABEM wadi**



**Geonics EM16 R with Tx27 transmitter**

34, exemples d'instrumentation ci-dessous et emplacement des émetteurs VLF (ci-dessus)

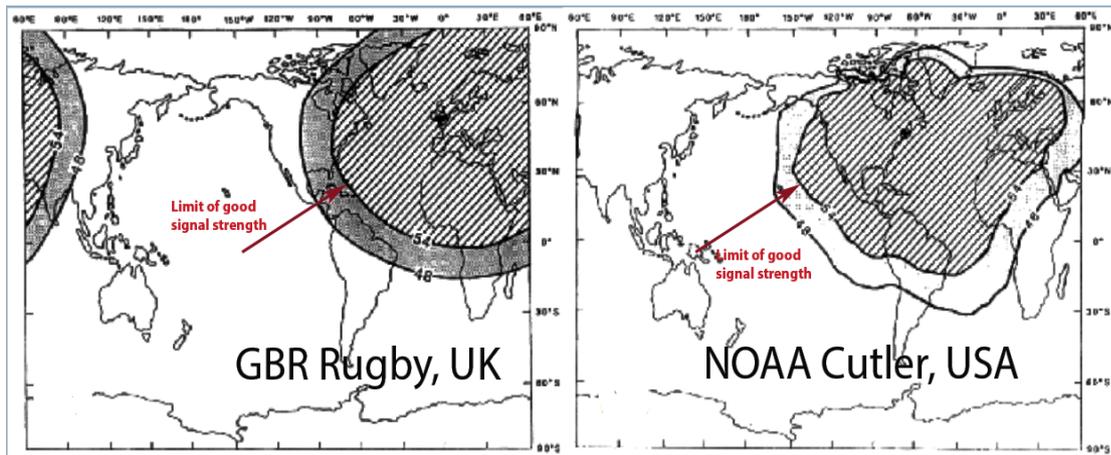


Figure 35, exemple de limitation de portée de 2 émetteurs VLF

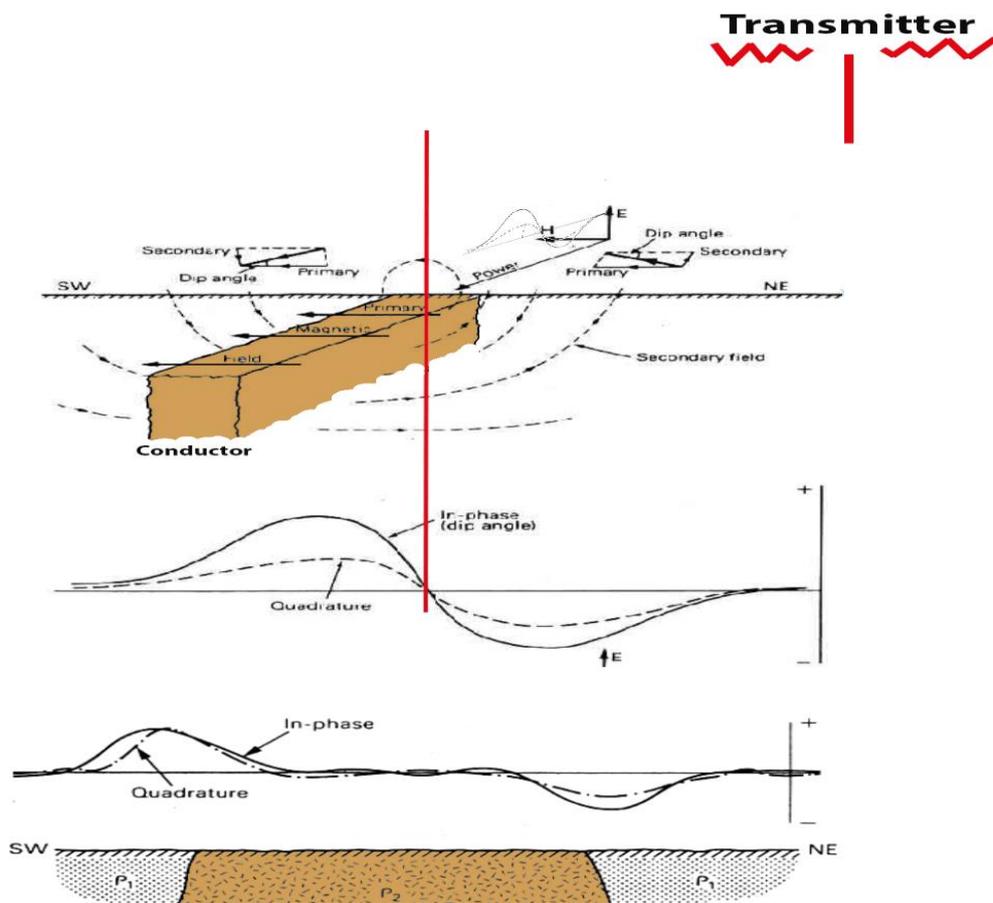


Figure 36, exemples de forme d'onde VLF due à un conducteur relativement petit (ci-dessus) et à un conducteur plus étendu (modifié d'après Wilson, J. : Field Geophysics, Wiley, 1989)

Étant donné que la source du champ électromagnétique dans les applications VLF est généralement à plus de 50 miles de distance, l'onde EM à grande longueur d'onde se rapproche d'une onde plane.

Comme la position de l'antenne de l'émetteur est fixe et ne dépasse pas la cible, l'anomalie produite sera différente de celle lorsque le récepteur et l'émetteur se déplacent. La plupart des récepteurs mesurent IP (le in Phase) et la quadrature Qp du champ total (l'effet d'un conducteur vers le champ primaire). D'autres instruments ne mesurent que l'« inclinaison du champ » ou l'angle d'inclinaison en degrés. Dans ce cas, plusieurs profils d'angle d'inclinaison parallèles sont souvent construits perpendiculairement à la cible, voir les figures 40 et 41. Une technique d'interprétation simple peut être appliquée : le conducteur est situé horizontalement au point d'inflexion marquant le passage de l'inclinaison positive à l'inclinaison négative et le maximum en intensité de champ. Une estimation de profondeur empirique peut être faite à partir de la distance entre les pics positifs et négatifs dans le profil d'angle d'inclinaison.

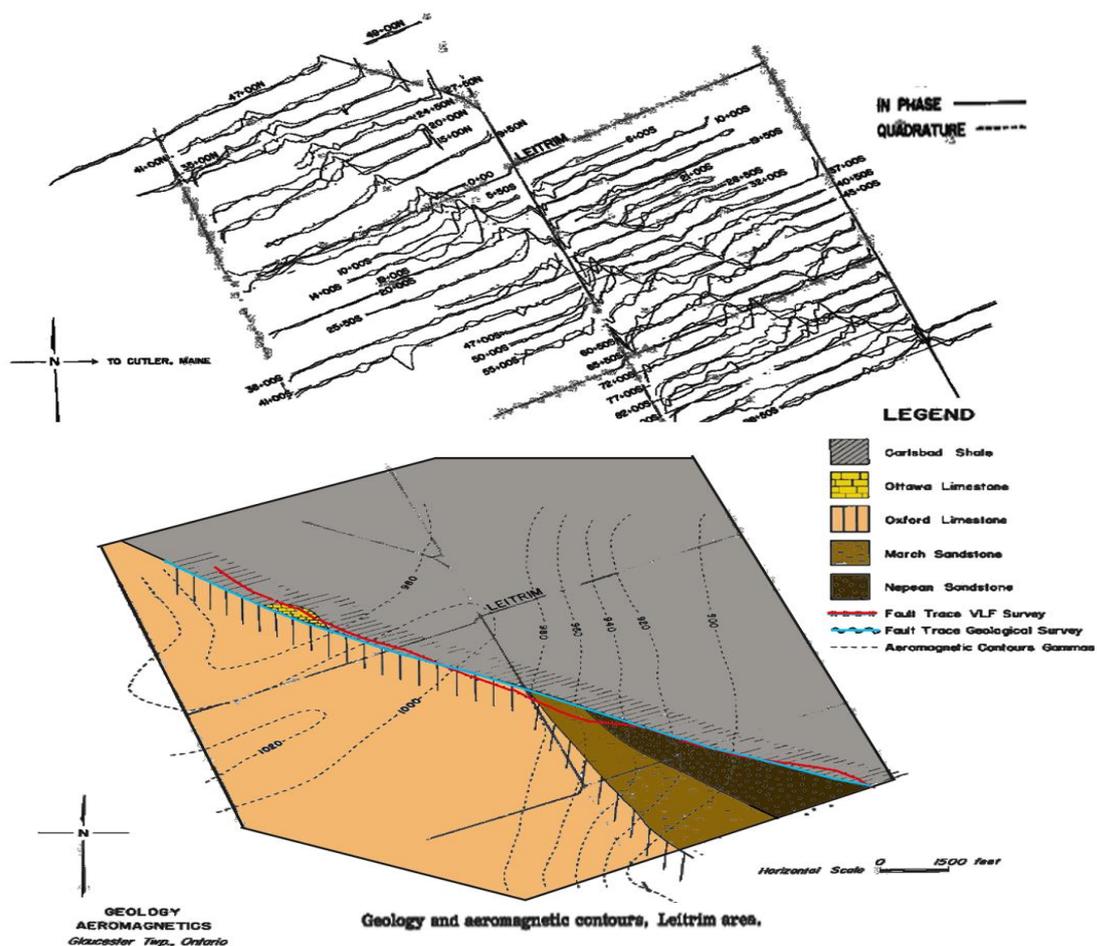


Figure 37, exemple de vue semi 2D des données VLF. Après Telfort, cartographie VLF de la structure géologique, commission géologique du Canada (1977)

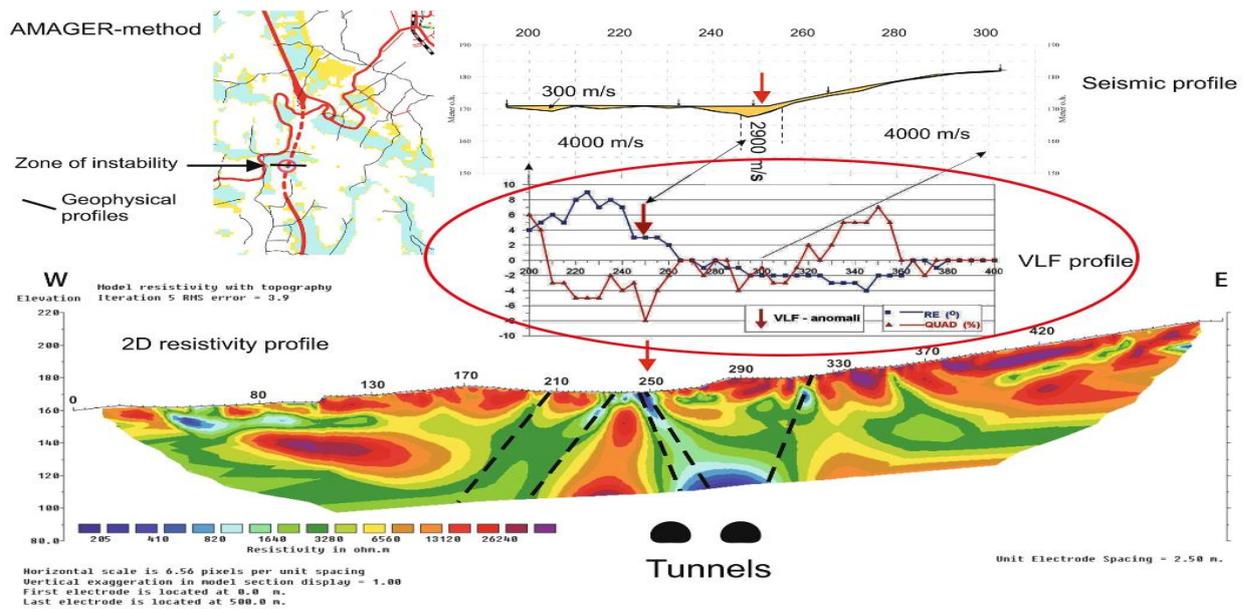


Figure 38, exemples de données VLF (Ip et QP) en combinaison d'ERT et de sismique réfraction, sur une série de seyénites pour étudier les zones faibles dans un tunnel (Vestfold County, Norvège) Après : 2016, Jan Steinar Rønning, Cartographie de la résistivité comme outil d'identification et de caractérisation des zones de faiblesse dans le substratum cristallin

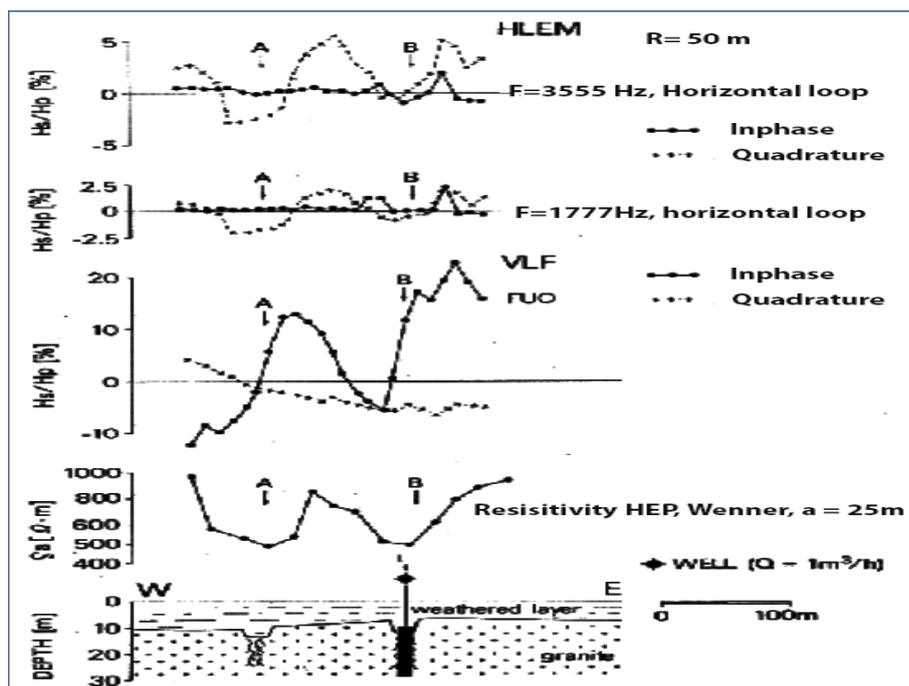


Figure 39, comparaison de FDEM, avec émetteur et récepteur horizontaux à 50 m et 2 fréquences, VLF et HEP, Wenner, a=25 m au Burkina Faso (Vogelsang, D. : Environmental Geophysics, A Practical Guide, Springer Verlag, 1995).

### Procédures de terrain.

Les procédures sur le terrain seront différentes et dépendent de l'instrument utilisé. Les instruments modernes utilisent un GPS interne. Les valeurs mesurées seront stockées avec leur point GPS. Les

instruments plus anciens ont besoin d'un GPS externe et, dans certains cas, n'enregistrent même pas les données !. Les données doivent être écrites dans cette situation. Certains instruments doivent être étalonnés (nulling) avant le début d'une série de mesures. En général, les profils 2D seront construits avec des numéros de station faisant référence à la distance entre les stations.

### **Conclusion du FDEM pour le Burkina Faso :**

Il est clair que dans le domaine FDEM, la résolution, la profondeur d'exploration et l'interprétation différeront et dépendront du type d'instrument utilisé. Le consultant doit être capable de raisonner le choix de l'instrument, en fonction de sa profondeur d'exploration (montrer au moins un calcul approximatif) et donner des exemples d'interprétation des données par rapport à la cible. Les systèmes FDEM qui ne permettent pas l'inversion doivent être combinés avec un système à courant continu préférable comme ERT ou sous certaines conditions avec des systèmes TDEM. Étant donné que certains systèmes FDEM sont relativement rapides à appliquer, ils pourraient être utilisés comme première application après une étude documentaire pour localiser des emplacements de profil spécifiques sur lesquels les systèmes CC les plus longs comme ERT peuvent être appliqués.

Dans les applications peu profondes, le FDEM est utile pour cartographier qualitativement les changements de profondeur du substratum rocheux et localiser les zones altérées plus profondes associées aux zones de failles et aux contacts géologiques. Les systèmes de récepteurs VLF sont relativement bon marché et simples à appliquer, mais la plage de profondeur est limitée, la direction des anomalies dépend de l'émetteur utilisé. Le schéma de diffusion des émetteurs est inconnu. Pour le Burkina Faso, un nombre limité d'émetteurs est (3) utile couvrant les directions E-W et N-S. L'application d'un émetteur dédié est coûteuse, nécessite une bonne antenne mise à la terre d'environ 1 km et un générateur (gardé) à distance de la zone de travail sur le terrain. Le VLF peut être utilisé par une seule personne lorsque des émetteurs VLF militaires pour la communication sous-marine sont utilisés. La plupart des autres applications FDEM nécessitent au moins 2 personnes. L'équipement est souvent fragile et les câbles et connecteurs doivent être manipulés avec soin.

### **2.5) AMT, méthode tellurique magnétique audio**

L'AMT est une méthode EM en principe dans le domaine fréquentiel. Les données sont mesurées en séries temporelles et par post-traitement converties dans le domaine fréquentiel. L'émetteur peut être soit une source naturelle, soit une source contrôlée (émetteur dédié). Dans ce paragraphe, seule l'application de source naturelle sera discutée. Dans les applications de source naturelle, le signal est l'interaction du vent solaire avec le champ magnétique terrestre. Ces fréquences sont basses, généralement inférieures à 1 Hz, les signaux de fréquence plus élevée (supérieurs à 1 Hz) sont créés par les orages mondiaux, généralement près de l'équateur. L'effet de ces champs (électro) magnétiques sur la surface de la terre est appelé « courant terrestre ». En raison de la basse fréquence, la profondeur d'exploration de l'AMT peut dépasser 500 m. La résolution est médiocre par rapport à FDEM et ERT.



Figure 40, Équipement AMT

L'EM et le champ magnétique de ce courant terrestre sont mesurés dans 3 directions avec des antennes de champ magnétique spécialement conçues, essentiellement une bobine à noyau de fer avec plus de milliers de tours de fil. Les bobines sont extrêmement sensibles au bruit du vent, de la marche ou du passage de voitures et de camions. Les bobines sont enterrées dans le sol ou sous les rochers pour éviter tout mouvement dû au vent. Les champs électriques sont mesurés avec de longues « antennes » ou dipôles – généralement des fils coaxiaux d'environ 60 à 100 mètres de long. Les extrémités des fils sont reliées à des « pots » d'électrodes potentielles : – des récipients scellés de quelques centimètres de diamètre et d'environ six pouces de hauteur, (remplis d'un électrolyte) avec un fond perméable en céramique pour la libération lente de l'électrolyte. Voir la figure 44.

L'acquisition de données (dans cet exemple avec les instruments Phoenix) se fait avec un récepteur dédié auquel les bobines et les dipôles de champ électrique sont tous connectés. Dans ce récepteur, un filtrage analogique primaire et une amplification (empilement) des signaux ont lieu. Ces données analogiques stockées dans un flash compact. Les données sont ensuite transférées sur un ordinateur portable ou un ordinateur où elles seront numérisées. Certains instruments ont un ordinateur intégré. A chaque station AMT, cinq mesures (canaux) sont enregistrées :

Champ magnétique dans deux directions horizontales ( $H_x$  et  $H_y$ ) et ( $H_z$ ) dans la direction verticale. Champ électrique dans deux directions horizontales ( $E_x$  et  $E_y$ )

Bien que les champs électriques et magnétiques soient mesurés en fonction du temps. Le traitement des données convertira les données dans le domaine fréquentiel (transformation de Fourier). L'orientation de l'antenne n'a généralement pas d'importance - x et y peuvent être n'importe quelle direction tant qu'elles sont perpendiculaires. Meilleure orientation si x est le long de la direction d'un conducteur cible. Une fois les données traitées et filtrées pour le bruit, l'inversion peut être appliquée. Si l'inversion est combinée avec des données TDEM dans une inversion jointe, les données AMT sont décalées (décalage statique) et corrigées pour les inhomogénéités proches de la surface. Ceci est essentiel pour obtenir un modèle de résistivité correct. La configuration de la disposition du terrain doit être effectuée avec soin et avec des travailleurs qualifiés ; l'acquisition des données doit commencer dans une zone où le bruit de fond attendu et l'inhomogénéité du sous-sol sont attendus, afin de juger le bruit par rapport au temps d'acquisition. Pour l'acquisition des données, un opérateur expérimenté est nécessaire ainsi que pour l'interprétation. Un logiciel spécial dédié est nécessaire pour les inversions. Après cette première mesure, des séries de sondages AMT le long d'un profil peuvent être exécutées, de préférence aux mêmes endroits où les sondages TDEM doivent être exécutés.

## Conclusion de l'AMT pour le Burkina Faso.

AMT est une application EM pour les sondages profonds avec une résolution relativement faible. Il est préférable de trouver des preuves de couches d'argile profondes ou d'eau saline. Le système doit être utilisé en plus des sondages TDEM. Les instruments sont chers et des opérateurs qualifiés sont nécessaires à la fois pour les procédures sur le terrain et l'interprétation des données. Pour l'exploration des eaux souterraines au Burkina Faso, cette méthode n'est pas très utile. La plupart des applications de l'AMT concernent les aquifères profonds (sédimentaires) et sont plus spécifiquement utilisées pour l'exploration géothermique. Dans Kajiado cependant, il a donné des résultats similaires à ERT et TDEM avec une résolution beaucoup plus faible.

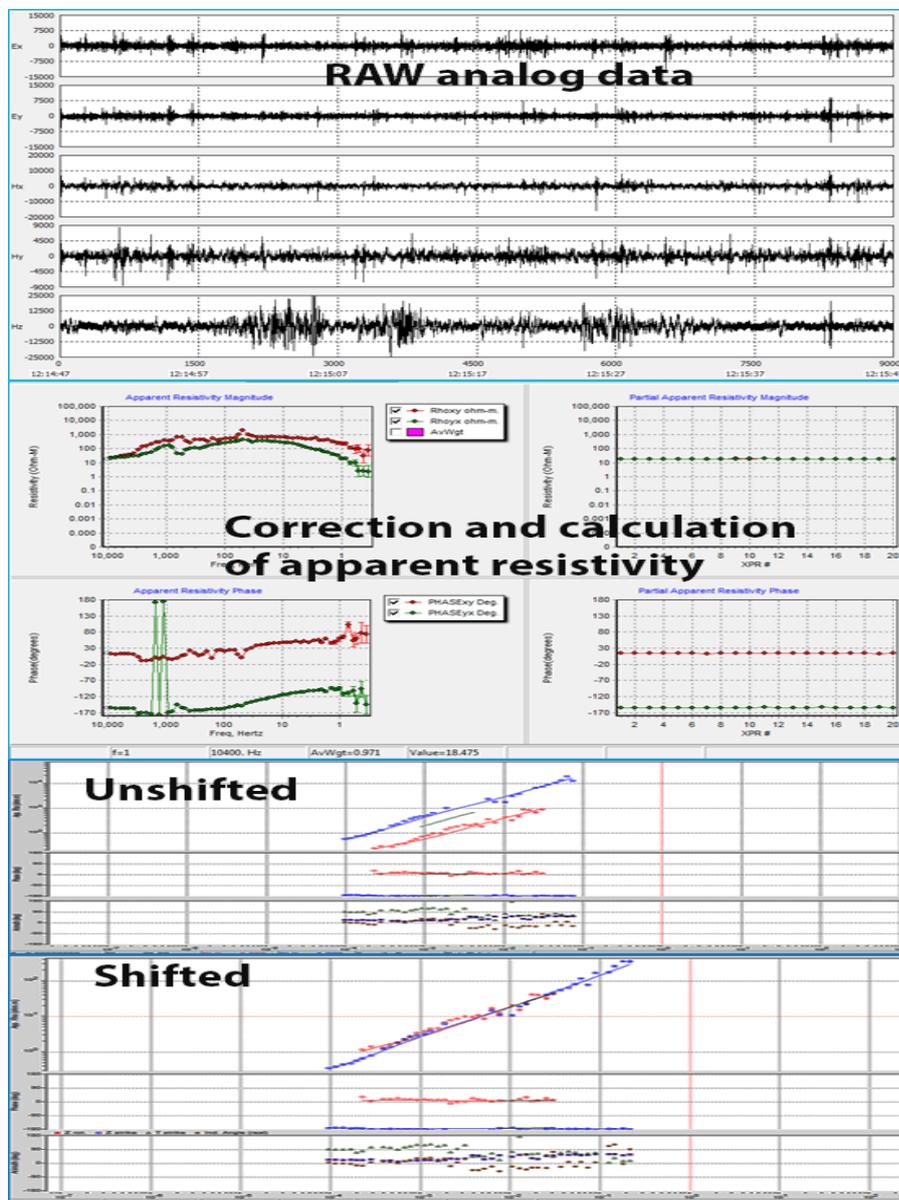


Figure 41, plusieurs étapes de traitement et d'interprétation des données

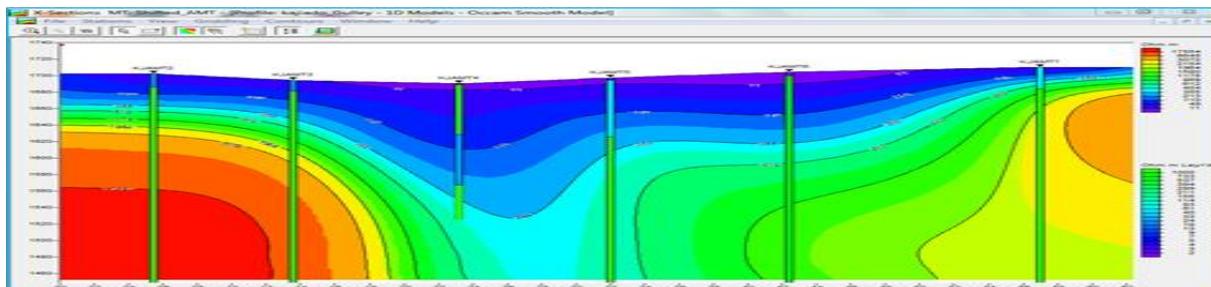


Figure 42, profil de la rivière Kajiado, inversion combinée AMT et TDEM.

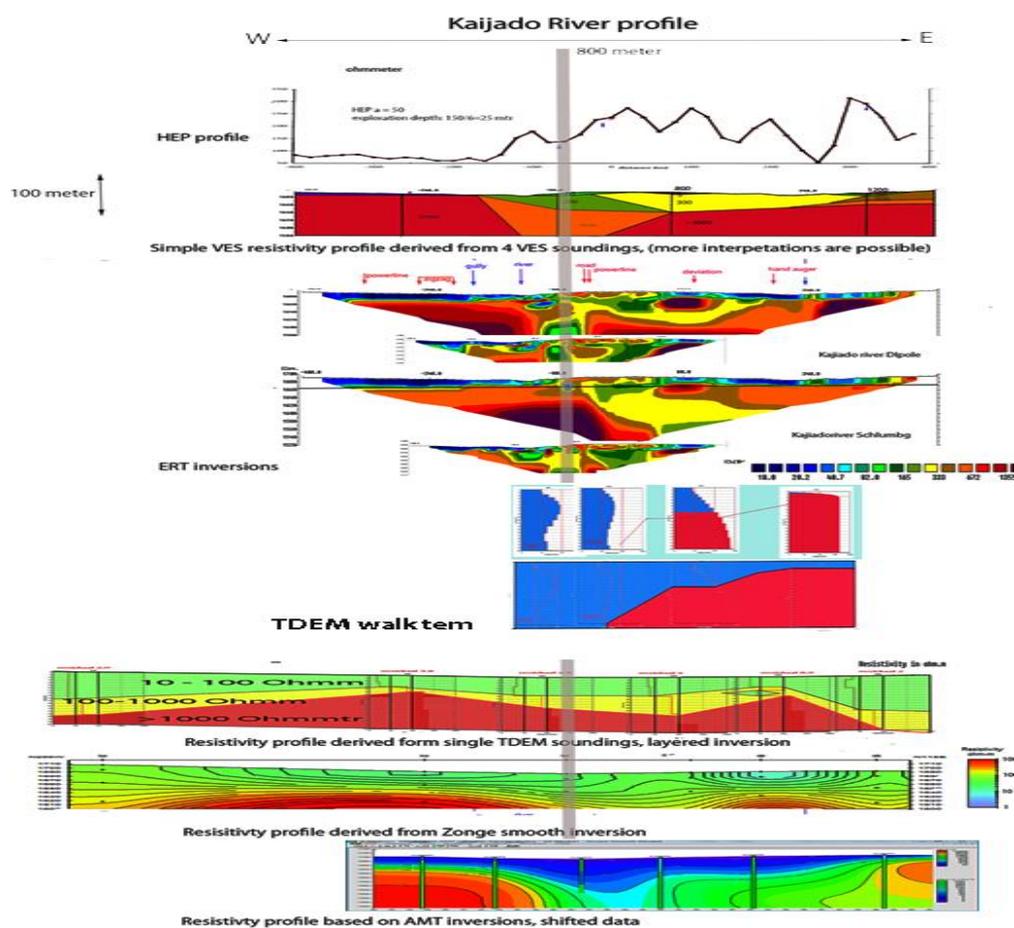


Figure 43, comparaison de toutes les méthodes utilisées à Kajiado Kenya sur le fleuve : HEP, VES, ERT TDEM WalkTEM, TDEM Zonge, AMT. La résolution la plus élevée est avec ERT ; notez que TDEM (Walktem) est basé uniquement sur 4 sondages.

## 2.6) Application du sondage par résonance magnétique



Figure 44, vue d'ensemble de l'équipement MRS dans une installation de mesure, IRIS NUMIS plus taille de la boucle d'instrumentation 150 m, 2 convertisseurs profondeur d'exploration d'environ 150 m (avec 1 convecteur la profondeur d'exploration est d'environ 100 m

Le MRS est en principe une méthode EM dans le domaine temporel, cependant la méthode ne mesure pas la résistivité apparente comme la plupart des autres méthodes discutées ci-dessus, l'application principale est la détermination de la quantité totale d'eau stockée en profondeur jusqu'à 100 à 150 m. Dans la plupart des cas, il donne des preuves du niveau de la nappe phréatique.

Avec la méthodologie MRS, les atomes d'hydrogène (H) des molécules d'eau sont alimentés par des impulsions (environ 40 ms) de courant alternatif (jusqu'à 400 A et des tensions jusqu'à 4000 volts) à la bonne fréquence (fréquence de Larmor. Ce sont des fréquences vraiment basses (0,8 – 3 KHz) et appliquées en fonction du champ magnétique terrestre local. Ces impulsions sont transmises dans une boucle posée sur le sol. En faisant varier l'intensité de l'impulsion, et en changeant le courant, des informations provenant de différentes profondeurs sont nécessaires. 100 à 150 m qui la taille correspond plus ou moins à la profondeur d'exploration. Le champ magnétique, produit en retour par les particules H, est mesuré et analysé pour différents moments d'impulsion énergisants (intensité, direction et durée) dans la même boucle (boucle d'émetteur). La tension mesurée dans la boucle est très faible (10 à 1000 nanoVolts).

En général 5 paramètres différents sont mesurés :

- L'amplitude initiale ( $E_0$ ), qui est directement proportionnelle à la quantité de protons H qui a réagi sur l'impulsion.
- T2 (temps transversal) qui est lié au temps pendant lequel le déphasage, dans la direction perpendiculaire au champ magnétique terrestre des particules H, reviendra à sa position d'origine. Cette valeur dépend de la taille des pores saturés mais aussi de la distribution de susceptibilité magnétique et n'est donc pas uniquement liée à la taille des pores.

- T1, (la constante de temps longitudinale ) qui est liée au temps de retour à l'équilibre des particules H après excitation, parallèlement au champ magnétique terrestre. T1 est acquis en utilisant 2 impulsions avec des intervalles de temps différents. T1 ne dépend que de la taille des pores saturés. Et donc, d'une certaine manière aussi liée à la perméabilité.
- Les deux Delta T (durée de l'impulsion), moment actuel (taille de la boucle), définissent l'intensité de l'impulsion (moment actuel multiplié par la durée de l'impulsion) et sont une mesure de la profondeur d'exploration lorsqu'elle est mesurée avec différentes quantités.

En raison des faibles niveaux du signal, l'empilement des données est toujours appliqué (comme d'une certaine manière avec TDEM et AMT). Cela peut prendre plusieurs heures ou plus, jusqu'à 8 voire 20 heures. Cela dépend du rapport signal sur bruit. La perméabilité et le rendement peuvent être estimés en utilisant un étalonnage avec des relations empiriques dérivées d'expériences sur le terrain. Pour l'inversion, une première étape importante est de calculer une matrice donnant la réponse théorique des couches d'eau à différentes profondeur(s). Dans quelle dimension de boucle, l'inclinaison du champ magnétique terrestre et la résistivité du sol sont incorporées. Les sondages de résistivité peuvent aider dans ce calcul. Ce calcul prendra au moins un jour sur un PC.

Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour tous les sondages d'une enquête donnée. Avec cette matrice calculée, l'inversion d'un seul sondage ne prendra que quelques secondes et est entièrement automatique en supposant que la matrice est valide dans une zone particulière. (le modèle initial est en fait la matrice calculée).

Les modèles équivalents peuvent être modifiés manuellement en modifiant les paramètres de lissage ou en améliorant les variations de teneur en eau en fonction du contexte local. L'inversion des données se traduira par la teneur en eau, qui est proportionnelle à l'amplitude de la réponse protonique, la taille des pores, qui est liée à la décroissance dans le temps de la réponse et la profondeur d'investigation est liée à la durée et l'intensité de l'impulsion, (en changeant son intensité actuelle).

La profondeur d'exploration dépend de la distribution de résistivité du sous-sol. La superposition horizontale est supposée dans la taille de la boucle. Étant donné que les données MRS contiennent une mesure de la taille des pores, il est possible de distinguer les argiles (très petite taille des pores) des sédiments perméables ou des roches fracturées. C'est pourquoi on prétend qu'il est lié à la perméabilité. Aucune information n'est obtenue sur la qualité de l'eau qui implique que l'eau souterraine saline ne peut pas être distinguée de l'eau souterraine douce. Pour ces sondages de résistivité (ERT, TDEM, VES) sont nécessaires. Les modèles de résistivité seront utiles dans le calcul de la matrice de réponse théorique. Le MRS pourrait être utile pour déterminer les perspectives d'un réservoir d'eau souterraine avant le forage.

En raison des faibles niveaux du signal, l'empilement des données est toujours appliqué (comme d'une certaine manière avec TDEM et AMT). Cela peut prendre plusieurs heures ou plus, jusqu'à 8 voire 20 heures. Cela dépend du rapport signal sur bruit. La perméabilité et le rendement peuvent être estimés en utilisant un étalonnage avec des relations empiriques dérivées d'expériences sur le terrain.

Pour l'inversion, une première étape importante est de calculer une matrice donnant la réponse théorique des couches d'eau à différentes profondeur(s). Dans quelle dimension de boucle, l'inclinaison du champ magnétique terrestre et la résistivité du sol sont incorporées. Les sondages de résistivité peuvent aider dans ce calcul. Ce calcul prendra au moins un our sur un PC. Les résultats de cette étude peuvent être utilisés pour tous les sondages d'une enquête donnée. Avec cette matrice calculée, l'inversion d'un seul sondage ne prendra que quelques secondes et est entièrement automatique en supposant que la matrice est valide dans une zone particulière. (le modèle initial est en fait la matrice calculée). Les modèles équivalents peuvent être modifiés manuellement en modifiant les paramètres de lissage ou en améliorant les variations de teneur en eau en fonction du contexte local. L'inversion des données se traduira par la teneur en eau, qui est proportionnelle à l'amplitude de la réponse protonique, la taille des pores, qui est liée à la décroissance dans le temps de la réponse et la profondeur d'investigation est liée à la durée et l'intensité de l'impulsion, (en changeant son intensité actuelle).

La profondeur d'exploration dépend de la distribution de résistivité du sous-sol. La superposition horizontale est supposée dans la taille de la boucle. Étant donné que les données MRS contiennent une mesure de la taille des pores, il est possible de distinguer les argiles (très petite taille des pores) des sédiments perméables ou des roches fracturées. C'est pourquoi on prétend qu'il est lié à la perméabilité. Aucune information n'est obtenue sur la qualité de l'eau qui implique que l'eau souterraine saline ne peut pas être distinguée de l'eau souterraine douce. Pour cela, des sondages de résistivité (ERT, TDEM, VES) sont nécessaires. Les modèles de résistivité seront utiles dans le calcul de la matrice de réponse théorique. Le MRS pourrait être utile pour déterminer les perspectives d'un réservoir d'eau souterraine avant le forage.

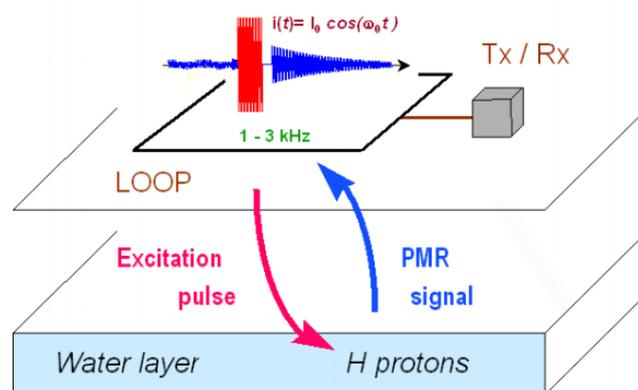
### PRINCIPLE OF THE MAGNETIC RESONANCE METHOD

**Principle:** A pulse of current at a given frequency is transmitted into a loop.

The signal produced in return by the H protons (water molecules) is measured within the same loop.

#### How to carry out a Magnetic Resonance Sounding ?

- 1- **Measure the Earth magnetic field** to know the frequency to apply
- 2- **Transmit a pulse of current** into a loop, at this frequency
- 3- **Measure the amplitude** of the water MR signal ( $\approx$  porosity)
- 4- **Measure the time constant** of the signal ( $\approx$  mean pore size)
- 5- **Change the pulse intensity** to modify the depth of investigation
- 6- **Use the inversion program** to get the porosity versus the depth



[iris-instruments.com](http://iris-instruments.com)

7

Figure 45 APRÈS : Instruments IRIS et travail de terrain pour mesurer un sondage par résonance magnétique avec l'équipement NUMIS 3e atelier de sondage par résonance magnétique J. Bernard, Madrid, Espagne, octobre 2006

La discussion de cette méthode s'appuie principalement sur les conclusions d'un article de Jean Michel Vouillamoz : moz:

Les principales limites de la SRM dans de tels contextes géologiques sont :

1. la durée d'acquisition des données qui varie entre 6 et 20 heures en raison du faible rapport signal sur bruit,
2. la mesure ID, qui ne permet pas de décrire la structure du réservoir sur une échelle correspondant à la taille de la boucle,
3. l'approximation ID dans des contextes hautement hétérogènes sera limitée
4. la perte de résolution avec la profondeur qui ne permet pas de mesurer le petit signal provenant des fractures productives en profondeur
5. L'instrumentation est encombrante, coûteuse et une expérience est nécessaire dans l'acquisition et l'interprétation des données. Le coût d'un seul sondage est très élevé et doit être soigneusement pondéré par rapport à l'utilisation d'autres méthodes ou même à un forage supplémentaire.
6. Des sondages de résistivité supplémentaires sont recommandés pour obtenir des résistivités pour le calcul de la matrice initiale
7. Dans les roches magnétiques à haute susceptibilité magnétique, la méthode n'est pas applicable.
8. La méthode MRS est sensible au bruit électromagnétique généré par les lignes électriques ou les conducteurs passifs comme les clôtures et les tuyaux.

Les avantages de la méthode MRS sont :

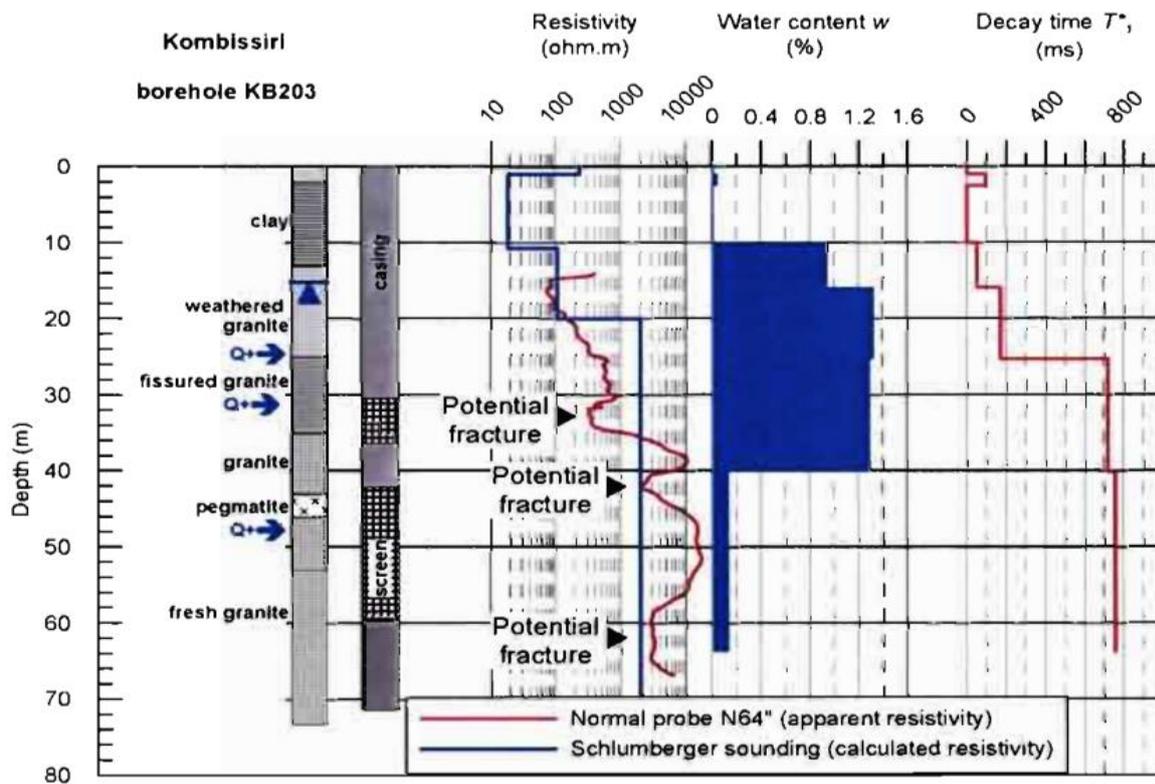
1. la géométrie (si distribuée latéralement homogène) de la partie altérée de l'aquifère est bien décrite par le MRS, la storativité et la transmissivité peuvent être raisonnablement estimées à partir des données du MRS après étalonnage en fonction de la lithologie,
2. Le MRS peut être un outil utile pour caractériser un aquifère dans un contexte cristallin, s'il est stratifié plus ou moins horizontalement.
3. Son utilisation conjointe avec le sondage électrique 1D et l'imagerie de résistivité 2D est prometteuse pour aider les hydrogéologues à la fois à la mise en œuvre du forage et à l'évaluation du réservoir.

### **Conclusion du SRM pour le Burkina Faso**

L'application du MRS est limitée, les instruments sont coûteux et encombrants, les boucles sont grandes, 100 à 150 m, les sondages peuvent prendre des heures ou plus, des opérateurs expérimentés sont nécessaires, comme pour le calcul d'inversion. Le MRS pourrait être d'une utilité limitée lorsque les emplacements des trous de forage sont fixés pour estimer les perspectives si cela l'emporte sur les coûts de forage si la cible s'inscrit dans le rayon d'influence de la configuration.



Figure 46, instrumentation of the IRIS numis light version (loop size 60 m, depth ca 50 m)



**MRS loss of resolution with depth : the deepest fracture zone is not identified by the MRS.**

Figure 47, exemple de mesure MRS au Burkina faso, photo extraite de : *SONDAGE A RESONANCE MAGNETIQUE : APPLICATION A LA CARACTERISATION DES AQUIFERES CRISTALLINS DU SOUS-SOL DU BURKINA FASO* Jean Michel Vouillamoz ,Marc Descloitre', Anatoly Legehenko,

Dans cet exemple, en raison de la perte de résolution avec la profondeur, la zone de fracture la plus profonde n'est pas identifiée par le système MRS

### 3) Conclusion

Pour le Burkina Faso, aux emplacements proposés, l'approche géophysique, avec l'application des méthodes de résistivité est généralement basée sur 2 cibles :

1. Localisation des failles, contacts géologiques et vallées enfouies liées à ces failles et contacts géologiques (FDEM, HEP, ERT (TDEM limité, pas pour les applications peu profondes))
2. Établir les changements de profondeur au sous-sol. Ceci par rapport à la recharge par la pluie, les ruisseaux et les rivières. (VES, ERT, TDEM (TDEM pas pour les applications peu profondes))

**Remarque : Les dolomites se trouvent dans le nord du Burkina Faso, dans le sud-ouest des formations sédimentaires avec du sable sont rencontrées. Ces types spécifiques de géologie nécessitent des approches, une instrumentation et une configuration de terrain différentes et ne sont pas explicitement abordés ici.**

Approche d'arpentage par étapes pour le sous-sol :

- 1 La première étape doit toujours être une étude documentaire basée sur les informations existantes (géologie, sols, modèle dendritique, topographie, forages positifs et négatifs existants, journaux de forage, données et cartes géophysiques, images photographiques satellitaires et aériennes, rapports existants, etc.)
- 2) À partir de cette étude documentaire, un modèle conceptuel peut être dérivé, les directions préférées des linéaments, la profondeur jusqu'au substrat rocheux, le type de substrat rocheux lié aux limitations de la méthode ( : le substrat rocheux est-il résistif ou potentiellement conducteur (volcanique) ?, état du sommet couche, quelle est la susceptibilité magnétique attendue ? etc.
- 3) Les emplacements préférés peuvent être indiqués sur une carte, dans un SIG ou au moins sur Google Earth, La méthodologie et l'instrumentation peuvent alors être définies (EM, DC et/ou combinaisons) et testées avec une modélisation prospective résultant en un plan d'enquête, dans lequel les protocoles d'instrumentation et de mesure, la résolution et la profondeur d'exploration sont décrits. Le choix de l'instrumentation et de la méthodologie dépendra du type de socle, de la profondeur du substrat rocheux frais et du type et de la direction des linéaments.
- 4) Le FDEM pourrait être utilisé comme méthode principale pour indiquer les défauts de localisation et les contacts géologiques. Cela peut être FDEM multifréquence, si en accord avec la profondeur d'exploration et la résolution souhaitée ou VLF, selon la direction des linéaments, le type de mort-terrain et la profondeur au sous-sol liée à la profondeur d'exploration. Les profondeurs d'exploration attendues doivent être vérifiées avec des calculs de profondeur de peau. Le HEP, s'il est appliqué avec des configurations d'électrodes basées sur des sondages VES et évalué avec une modélisation prospective, pourrait être une alternative. HEP doit être utilisé avec sens, de préférence avec plusieurs distances d'électrodes, les bons protocoles et si le type de sol permet de bons contacts d'électrode.
- 5) Des sondages supplémentaires TDEM, VES multiples le long d'un transect basés sur les profils FDEM ou HEP devraient être exécutés pour une approche plus quantitative du changement latéral de profondeur au substrat rocheux et pour construire des

profils de résistivité 2D. L'ERT est favorable à la cartographie 2D intégrée du changement latéral si la résistivité du sol supérieur et la profondeur d'exploration le permettent. Le choix final dépend de la profondeur souhaitée, de la taille de la cible, de la résistivité du sol supérieur, du type de roche, du bruit de fond.

- 6) Demandez au consultant la marque, le type, l'année de construction et le certificat d'étalonnage de l'instrument. Les instruments de résistivité doivent être vérifiés et étalonnés régulièrement.
- 7) L'autorisation doit être convenue avec les propriétaires fonciers, l'accessibilité du terrain doit être vérifiée, la période d'une saison des pluies, l'existence de clôtures et de lignes électriques doit être examinée. De préférence, cela se fait à l'avance.
- 8) L'étape suivante consiste à localiser les linéaments sur le terrain avec l'instrumentation proposée. Une bonne approche consiste à utiliser des photos aériennes en combinaison avec la méthode proposée. L'emplacement des linéaments doit être enregistré avec les coordonnées GPS.
- 9) Les résultats de l'étape 5 peuvent être comparés au concept. Les emplacements des mesures et les observations doivent être chargés dans le SIG ou Google Earth, si nécessaire le concept et le plan d'enquête peuvent être adaptés.
- 10) Après la localisation du ou des linéaments ou, de préférence, un croisement des linéaments en combinaison avec le changement d'un cours de rivière est établi, profil(s) ERT avec protocoles corrects et profondeur d'exploration (distance d'électrode), perpendiculaire à la direction du linéaments est un très bon choix si la couche supérieure permet un bon contact avec les électrodes. Dans les sols et les roches non magnétiques et les couches altérées épaisses, plusieurs sondages TDEM avec une instrumentation haute résolution peuvent également être appliqués. Comme alternative à l'ERT, dans les applications plus peu profondes avec une variation latérale limitée, un profil perpendiculaire à la direction des linéaments de plusieurs sondages VES peut être exécuté, avec la propagation parallèle à la direction des linéaments. Bien sûr si le type de sol permet un bon contact électrode.
- 11) Les résultats de 7 et 5 doivent être évalués avec le concept, des mesures supplémentaires pourraient être nécessaires (ERT, VES etc.)
- 12) Après l'étape 8, l'emplacement des forages peut être fixé, dans le cas de failles étroites, les anomalies du domaine fréquentiel sont plus précises que les profils HEP ou même ERT si dans la profondeur d'exploration.
- 13) Un ou plusieurs forages pilotes peuvent être forés de manière à pouvoir être utilisés ultérieurement comme forage de production. Le foreur doit toujours être supervisé. Une personne expérimentée doit décrire les journaux géologiques. Le type de filtre, la longueur, l'emplacement, la taille des fentes et la couche de gravier en dépendent mais aussi pour la compréhension de l'hydrogéologie.
- 14) La diagraphie du forage est conseillée pour optimiser la longueur du filtre et l'emplacement des filtres. L'exploitation forestière est fructueuse surtout si de nombreux forages sont prévus.
- 15) Les forages négatifs doivent être évalués dans le cadre du concept et peuvent conduire à une approche différente.

- 16) Après l'installation du filtre, le nettoyage du trou de forage, un test de pompage ou un test de puits de longue durée doit être effectué pour la capacité de la pompe et estimer un rendement durable.
- 17) Dans les campagnes étendues de nombreux forages, l'utilisation du MRS pourrait être utile pour évaluer la géométrie de l'aquifère et l'optimisation de l'implantation, si la taille de l'aquifère est liée au rayon d'influence du MRS
- 18) Le consultant doit rédiger un rapport complet contenant tous les éléments ci-dessus et les cartes nécessaires ainsi que les données brutes au format TXT lisible séparément et leurs coordonnées dans les données cartographiques internationales. Le résultat de l'inversion des données doit être évalué et le type de logiciel indiqué

Méthode	Profondeur d'exploration	A= electrode distance  (longueur de l'antenne de l'émetteur) /  exploration profondeur	Résolution	La main d'oeuvre	Instrumentation des coûts	1D/2D	Paramètre
VES	80 - 100m  avec procédure standard	~1/6	faible diminution avec la profondeur	Intensif, 4 personnes	faible/modéré	1D hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente et spécifique
HEB	comme VES	~1/6	Tres faible	Intensif, 4 personnes	faible/modéré	Semi 2D	Résistivité apparente
ERT	~150 m	~1/6	Haut (latéral), décroissant avec la profondeur	intensif, 2-4 personnes  (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	2D/3D	Résistivité apparente et spécifique

FDEM	Limité, dépend du type d'instrument	~ distance Émetteur Récepteur Dépend aussi de La fréquence	Bas vertical, relativement haut latéral	2 personnes	Modéré/ élevé	1D (2D)	P, QP, certains cas résistivité apparente
TDEM	> 200 m	~3	diminue avec la profondeur. Les couches peu profondes, les couches à haute résistivité sont difficiles à détecter.	faible - modéré, 1 à 3 personnes selon la taille de la boucle et l'instrumentation (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	1D (2D) hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente et spécifique
AMT	> 400 m	N / A.	bas, diminue avec la profondeur	Bas, 1-3 personnes (Instrument. compétences sont nécessaires)	haute	1D hypothèse de stratification horizontale	Résistivité apparente, avec TDEM spécifique
MRS	100 – 150 m	~1	bas, diminue avec la profondeur	Bas, 2-3 personnes (Instrument. compétences sont nécessaires)	Tres haute	1D hypothèse de stratification horizontale	Teneur en eau porosité

Tableau 4 aperçu des méthodes discutées.

### Conclusions étude du sous-sol Kajiado, Kenya

Certaines des conclusions pertinentes de l'étude du sous-sol à Kajiado Kenya sont résumées ci-dessous :

#### 5.2.2.1

- Ce n'est que lorsque l'application et l'interprétation de toutes les méthodes sont utilisées avec des compétences et que les conclusions sont basées sur de multiples sondages, profils et informations supplémentaires, que cela conduira à une augmentation des forages réussis et à une meilleure compréhension de l'hydrologie. C'est pourquoi il est urgent d'accorder plus d'attention aux rapports de consultance. Ils doivent être faciles à acquérir, les informations des rapports doivent être complètes, correctes et reproductibles de manière à ce que les données puissent être utilisées dans les programmes futurs et aider à mieux comprendre l'hydrogéologie. Ce processus continu d'acquisition et d'augmentation des connaissances est fondamental pour l'exploration durable des eaux souterraines. Il s'agissait d'une recommandation pour la situation au Kenya, mais nous pensons que cela vaut également pour le cas du Burkina Faso.
- Les instruments de différentes marques diffèrent par leurs applications et leur résolution. La justification du choix d'une certaine méthodologie, type d'instrument(s) et protocoles de mesure doit être ajoutée dans un contrat de conseil.
- La méthode ERT (tomographie à résistivité électrique 2D) a donné les meilleurs résultats notamment en résolution latérale ; c'est une méthode unique qui ne suppose pas de stratification horizontale en inversion. Il convient de garder à l'esprit qu'avec l'ERT, la profondeur d'exploration, l'extension latérale de la profondeur d'exploration et la résolution verticale et horizontale de l'ERT dépendent de la distance des électrodes et du protocole de mesure (Wenner, Schlumberger, Dipole-Dipole etc.) ;
- La profondeur d'exploration des méthodes électriques, comme VES et HEP, dépend de la distance maximale d'électrode actuelle utilisée et est - en règle générale - 1/6 de cette longueur. Cela dépend aussi de la distribution de résistivité sous la surface, cela dépend aussi du protocole utilisé. De nombreux rapports de consultants supposent à tort une profondeur d'exploration beaucoup plus profonde (la moitié de cette distance).
- Les profils HEP peuvent être trompeurs car les anomalies sont principalement l'effet des couches supérieures superficielles et ne sont donc pas une indication pour des structures plus profondes ;
- La profondeur d'exploration du TDEM avec un « écart de transmission » similaire à celui de l'ERT (AB) est beaucoup plus profonde que celle de l'ERT. Les discordances latérales au sein de la zone de mesure peuvent influencer la qualité des mesures. L'inversion des sondages TDEM suppose une stratification horizontale;
- L'instrumentation TDEM diffère par sa résolution verticale et manque d'informations dès le premier dixième de mètre. Les nouveaux développements en instrumentation (comme WalkTem) peuvent atteindre une résolution verticale beaucoup plus élevée.
- L'augmentation de la résistivité avec la profondeur (comme c'est le cas en géologie du socle) augmente le problème d'équivalence avec le TDEM par rapport à l'ERT ; Le TDEM est moins sensible dans les zones relativement hautes résistives que l'ERT.

- Les sondages TDEM simples nécessitent moins de travail que les sondages VES et (dans des conditions favorables) avec plusieurs sondages le long d'un profil comme ERT. La méthode est cependant moins simple, l'instrumentation et l'interprétation sont plus complexes;
- L'inversion (calcul de la résistivité apparente dans un modèle de couche (profondeur et résistivité spécifique) de sondages individuels (VES, TDEM,)) suppose une stratification horizontale. Cette hypothèse n'est pas valable lorsque la géologie change dans la « propagation » de la mesure. Par conséquent, des informations détaillées sur l'emplacement et la géométrie des failles ne peuvent pas être obtenues dans une géologie complexe avec un changement latéral à petite échelle (lorsque le changement latéral est dans la taille de la propagation (transmetteur)). profondeur par rapport aux autres méthodes, cet effet est le plus sévère. La direction de VES doit être parallèle aux linéaments et aux contacts géologiques.
- A L'AMT n'est utile que si les informations des couches profondes sont pertinentes (existence de couches argileuses épaisses profondes ou d'eaux souterraines salines dans les bassins sédimentaires profonds). L'inversion doit être effectuée en combinaison avec des sondages TDEM profonds si la résistivité correcte est nécessaire. La résolution de l'AMT est médiocre. Pour les sondages AMT, tant dans la mise en place de l'instrumentation, la mesure et l'interprétation, un personnel qualifié et expérimenté est nécessaire.

In addition some remarks on FDEM and MSR

- FDEM n'a pas été utilisé dans l'étude kenyane. Le FDEM peut être très utile pour les failles à localisation relativement rapide et les contacts géologiques. Un changement latéral peut être détecté, cependant la profondeur d'exploration et la distinction entre épaisseur et résistivité via l'inversion, est souvent impossible ou avec une faible résolution. Il faut prendre soin de choisir la bonne instrumentation afin d'atteindre la profondeur d'exploration et la résolution latérale souhaitées (c'est-à-dire dans le cas de zones de failles relativement minces)
- Le MSR n'a pas été utilisé dans l'étude kenyane. Cette méthode peut dans certaines conditions faire une distinction entre la résistivité et les paramètres hydrologiques (teneur en eau, porosité et taille des pores) si elle est combinée avec des méthodes de résistivité. Une relation empirique basée sur des expériences sur le terrain peut être appliquée, dans certains cas, et peut aboutir à l'estimation de la perméabilité. Les RSM supposent une stratification horizontale, l'extension latérale d'une mesure (zone d'influence) dépasse souvent la largeur des zones de failles étroites comme souvent rencontrées au Burkina Faso. Pour ce type d'aquifères, l'application du MSR est limitée. La méthode prend du temps (1 sondage peut prendre 1 jour), l'instrumentation est encombrante et coûteuse, un opérateur expérimenté et de bonnes compétences en interprétation sont nécessaires. Des sondages TDEM séparés sont nécessaires pour une comparaison des résultats avec le profil de profondeur de résistivité. Dans le même temps, l'instrumentation est encombrante et très coûteuse, des opérateurs qualifiés sont nécessaires. Un sondage peut prendre une journée entière. Le coût d'un sondage MSR est très élevé et son utilisation doit être soigneusement pesée, par rapport à l'application d'autres méthodes et même aux coûts de forage. Le MSR ne sera pas très utile pour l'implantation mais pourrait être très utile pour

comprendre le système aquifère s'il est combiné à un forage dans un contexte de recherche.

## **Annexe 6.2 rapports de liste de contrôle**

### **Introduction**

Il est de pratique courante que l'entité (institution gouvernementale / ong / secteur privé) qui est responsable et/ou finance la mise en œuvre d'un programme de forage sélectionne une société de forage par le biais d'un appel d'offres. Habituellement, une société de conseil est également sélectionnée par appel d'offres pour les études préparatoires, telles que l'étude hydrogéologique, l'étude géophysique, la supervision du forage et la supervision des essais de pompage.

Il est également possible qu'une entreprise de forage soit sélectionnée par appel d'offres pour réaliser toutes les activités mentionnées ci-dessus. Cependant, des contrats séparés sont préférables.

Dans cette annexe sont présentées des listes de contrôle qui peuvent être utilisées pour l'appel d'offres et la sélection d'une société de conseil responsable des études d'implantation axées sur la géophysique.

Tant pour l'offre que pour le rapport, il est important de pouvoir en juger.

Demandez toujours au consultant un exemple d'un rapport récent de travail qu'il a fait auparavant et si possible l'offre d'accompagnement. Cela évitera les mauvaises surprises par la suite. Bien sûr, il peut omettre les détails financiers.

Dans l'offre, le consultant doit être en mesure d'expliquer le choix de l'instrument concernant la profondeur et la résolution d'exploration en fonction de la profondeur, de la géométrie et du contraste de la cible. Il devrait être capable d'argumenter cela, de préférence avec des modèles avancés liés aux informations ou à l'expérience existantes. Par conséquent, la collecte d'informations et d'interprétations existantes devrait faire partie de la mission (étude documentaire).

Dans l'offre, il devrait déjà y avoir des spécifications d'instrumentation (marque, type), de disposition (longueur et direction) et des protocoles de mesure suggérés ainsi que la quantité et l'emplacement des mesures par rapport aux informations existantes (forages existants, mesures géophysiques existantes, images satellites, cartes géologiques, cartes topographiques, etc.).

Le mode d'interprétation des données doit être précisé (type de logiciel utilisé).

Pour le rapport, il devrait y avoir une carte claire basée sur les cartes topographiques existantes et d'autres cartes pertinentes préférables dans Qgis avec les points de données ainsi que les fichiers de forme (Qgis) et les fichiers KML qui peuvent être chargés dans Google Earth. Non seulement des points uniques, mais aussi des points de début et de fin pour les sondages VES de longueur et de direction. Points GPS pour toutes les stations de mesure le long d'un profil. Des fichiers de données RAW complets (accessibles) ainsi que des résultats de données inversés doivent être présentés. Dans le rapport, il convient d'expliquer comment les données s'intègrent dans le concept hydrogéologique et ont conduit aux conclusions pour les sites de forage favorables.

### **Liste de contrôle d'appel d'offres**

- Demander des exemples existants de rapports récents et si possible un appel d'offres
- Inclure toujours une étude documentaire sur les informations existantes/concept hydrogéologique/étude de linéament/utilisation des terres/carte des sols/carte géologique/cartes topographiques/images satellite
- Qui assume la responsabilité de l'autorisation des propriétaires fonciers
- L'accessibilité du terrain, saison des pluies, saison sèche, est le type de terre végétale connu (contact d'électrode, ERT n'est pas possible partout au Burkina Faso en raison des conditions de terre végétale)
- Emplacement des lignes électriques, urbanisation, routes (ferroviaires)
- Instrument : Marque et type d'instrument(s), Certificat d'étalonnage année de production, longueur de câble, quantité et type d'électrodes (ERT), émetteur, récepteur, fréquence, type (TDEM, FDEM), etc.
- Profondeur d'exploration, résolution par rapport à la longueur du câble, distance des électrodes, fréquence du protocole de mesure (ERT), moment émetteur/récepteur, distance (TDEM, FDEM)
- Nombre de points de données par mesure
- Nombre total de mesures
- Emplacements de mesure, longueur et direction du profil (plan d'arpentage)
- Logiciel d'interprétation
- Modèles avancés

#### **liste de contrôle des rapports**

- Toutes les données brutes doivent être présentées dans des fichiers de données originaux, au format de données accessible (txt) et dans Excel
- L'emplacement des mesures, stations sur un profil, doit être présenté dans le système de coordonnées international utilisé (WG84, lat long ou UTM), ainsi qu'au format KML.
- Direction et longueur des tracés dans les mêmes coordonnées (KML, lat long)
- Marque et type d'instrument(s), numéro(s) de série, année de construction, certificat d'étalonnage
- Combiné ou séparé : carte topographique (avec lignes électriques et clôtures), carte géologique, carte google earth, carte avec les linéaments et les lieux de mesure
- Quels protocoles de mesure sont utilisés
- Type de logiciel d'interprétation et logiciel d'inversion
- Résultats d'inversion et explication des résultats dans un contexte hydrogéologique
- Coupes transversales 2D avec résultats d'inversion et géologie avec indication des emplacements des forages
- Explication claire de la façon dont les données interprétées s'intègrent dans le concept hydrogéologique et ont conduit aux conclusions pour les sites de forage favorables