ACADÉMIE DE PARIS UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Mémoires des Sciences de la Terre

N° 2004 / 06 APPORT DE NOUVELLES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES A LA CONNAISSANCE DES AQUIFÈRES DE SOCLE

> TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE ELECTROMAGNÉTISME FRÉQUENTIEL RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE

APPLICATIONS AU BURKINA FASO

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

SOUTENUE LE 11 JUIN 2004

Présentée par : Ghislain TOÉ



UFR des Sciences de la Terre 4, place Jussieu - 75252 Paris cedex 05



THESE DE DOCTORAT



Spécialité :

SCIENCES DE LA TERRE – GÉOPHYSIQUE APPLIQUÉE

N° 2004 / 06

APPORT DE NOUVELLES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES A LA CONNAISSANCE DES AQUIFÈRES DE SOCLE

TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE ELECTROMAGNÉTISME FRÉQUENTIEL RÉSONANCE MAGNÉTIQUE PROTONIQUE

APPLICATIONS AU BURKINA FASO

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6

SOUTENUE LE 11 JUIN 2004

Présentée par : Ghislain TOÉ

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

P. ANDRIEUX	Professeur, Paris 6 (France)	Directeur de thèse
A. LEGTCHENKO	Directeur de recherche, IRD (France)	Co-directeur de thèse
G. GRANDJEAN	Ingénieur de recherche, BRGM (France)	Rapporteur
S. PISTRE	Maître de conférence, Montpellier 2 (France)	Rapporteur
G. de MARSILY	Professeur, Paris 6 (France)	Examinateur
G. COMPAORÉ	Ingénieur, SAERH (Burkina Faso)	Examinateur
P. LACHASSAGNE	Ingénieur de recherche, BRGM (France)	Examinateur
Y. ALBOUY	Directeur de recherche, IRD (France)	Invité
M. DESCLOITRES	Ingénieur de recherche, IRD (Inde)	Invité



F538664-06

AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée grâce au soutien financier de l'Institut de Recherche pour le Developpement (IRD) à travers son Département Soutien et Formation (DSF). Je tiens à en remercier ici les responsables et tous les animateurs. A l'ensemble du personnel des centres de recherche IRD de Ouagadougou et de Bondy, je dis merci, pour avoir été l'un des leurs, le temps d'une thèse.

L'encadrement dont j'ai bénéficié pour ce travail, je le dois à l'unité de recherche Geovast de l'IRD (UR 027). Je rends hommage à toute l'équipe, et en particulier à son directeur, Henri Robain, qui m'a ouvert les portes de son groupe.

Yves Albouy et Marc Descloîtres ont été, au quotidien de l'IRD, toujours disponibles. Je leur en suis reconnaissant. Merci pour la qualité de leur encadrement, et les enseignements porteurs.

Merci à Anatoly Legtchenko pour sa participation à l'encadrement de cette thèse.

Je remercie l'équipe de l'UMR-Sisyphe et celle de l'école doctorale « Géosciences et Ressources naturelles »., avec lesquelles nous avons étroitement collaboré. Merci au laboratoire de géophysique de Paris 6 et à son directeur Alain Tabbagh.

Merci au Pr. G. de Marsily et au laboratoire d'hydrogéologie de Paris 6.

Si le résultat fut concluant, c'est grâce à la fructueuse collaboration que nous avons eue avec les nombreux partenaires au Burkina. Elle fut riche et passionnée.

Aux différentes structures concernées, je dis merci :

- Ministère en charge de l'eau et de l'hydraulique au Burkina Faso
- Office National de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina (ONEA)
- Projet « Appui au plan d'action de l'ONEA »
- Office National des Puits et Forages du Burkina (ONPF)
- Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB)
- Institut de Géophysique/ Université de Lausanne
- BRGM Orléans/France

Merci pour cette contribution à la connaissance des ressources en eau en Afrique !

EPIGRAPHE

Au terme de cette étude, je voudrais, ici, pouvoir rendre hommage à tous :

Merci a tout ceux dont le nom n'est pas cité ici, et qui en ont constitué le contexte utile.

Je remercie tout ceux par qui, ce travail a connu le parcours et l'aboutissement présent :

- Les nombreux interlocuteurs à Ouagadougou, en particulier : Mahamadou Koné, Soungalo Diallo, Hassim Kaboré. K. Jurgensen, J.-C. Ki, J.-L. Compaoré.

- U. Wenmenga, et E. Saba (commission géologique du BF) pour leur soutien indéfectible.

- G. Compaoré a été exceptionnel !
- Merci à Sèye, et aux 3 mousquetaires de Jussieu : Angelbert, Denis et Harouna.
- Merci à Yann et au clan de « la folie en tête ».
- G. de Marsily, toujours disponible pour aider à la formation.
- S. Violette pour l'enthousiasme de la participation !
- R. Wyns et P. Lachassagne m'ont initié au nouveau modèle d'aquifère de socle.
- R. Groom pour la modélisation Slingram 3D : thank you Ross !
- Pierre Keating a aidé à la compréhension du traitement des données magnétiques.
- Nicole Debéglia et Alain Perrin pour la collaboration avec le BRGM.
- Avec Alain Blot, on a parlé de diffractométrie et d'autres...
- Dominique Chapellier m'a accueilli dans son laboratoire à Lausanne.
- Merci à L. Baron et aux amis Manihar, Denis et Matthieu de l'I.G.L. de Lausanne.
- Merci à Eric Marmet pour sa contribution.
- Merci à Jean Bernard (Iris Instruments), qui m'a toujours encouragé dans cette étude.

- Merci à tout le personnel de l'IRD; en particulier aux laboratoires de cartographie, aux bibliothèques et aux services informatiques des centres de Ouagadougou et de Bondy.

- Un merci spécial au cartographe du centre de Ouagadougou, M. Oulla Passari, qui m'a grandement aidé à réaliser la photo-interprétation.

- Merci infiniment à tous les amis de Bondy : Alex, Arouna, Gabriel, Max N'Guessan...

- A Justin Guigma, fidèle compagnon sur toutes les routes du Burkina pour cette thèse : merci l'ami !

- Merci aux membres du jury, juges et garants de la qualité de ce travail.
- Merci à Gaghik Hovhannissian pour son soutien.

- Il en fut un d'exceptionnel, et c'est Manu. Il reconnaîtra et se reconnaîtra.

- Merci à Sina, qui a veillé au grain.

- Sans Mme Padovani et Gilbert Juste, rien n'aurait été comme cela s'est passé : vous avez été beaucoup plus que des collègues ! Le clan des siciliens Bondynois : microcosme extraterrestre avec tant de valeurs partagées...Merci infiniment pour la famille constituée !

Au professeur Andrieux, je dis : plus de 10 ans déjà ! Merci pour tout, professeur ! A sa famille parisienne et tourangelle, merci, pour m'avoir accueilli, simplement comme un des leurs.

TABLE DES MATIERES

Avant-propos Epigraphe Table des matière

INTRODUCTION
CHAPITRE 1 : PROBLEMATIQUE : L'ETUDE DES AQUIFERES DE SOCLE APPLICATIONS AU BURKINA FASO
1.1 Problématique scientifique
CHAPITRE 2 : LES METHODES GEOPHYSIQUES CLASSIQUES APPLIQUEES A L'ETUDE DES AQUIFERES DE SOCLE
2.1 La stratégie classique d'étude des aquifères – La place de la géophysique27
2.2 Les méthodes géophysiques classiques
2.2.1 Les techniques de la télédétection
2.2.2 Les techniques géophysiques aéroportées.322.2.2.1 Le magnétisme aéroporté332.2.2.2 La radiométrie aéroportée.332.2.2.3 L'électromagnétisme aéroporté.342.2.2.4 La gravimétrie aéroportée.34
2.2.3 Les techniques géophysiques au sol34
 2.2.3.1 Le magnétisme au sol

	et « CSAMT- Audio-Magnéto-Tellurique à source contrôlée »	42
2.3.3.	4.2 Les méthodes « Radio-Magnéto-Tellurique »	
	et « VLF– résistivité »	42
2.2.3.4	4.3 Les méthodes « Radio-magnétique » et le « VLF – inclinaison »	.43
2.2.3.4	Les méthodes Slingram à champ proche et à faible nombre d'induction	
	de type Geonics EM-38, EM-31, EM-34	.43
2.2.3.4	4.5 Les méthodes Slingram à champ proche et à nombre d'induction	
	variable : le Max-Min	44
2.2.3.	4.6 Le sondage électromagnétique temporel (SEMt)	.45
2.2.3.5	Le radar géologique (ou GPR)	.46
2.2.3.6	Les méthodes sismiques	.46
2.2.4 I	es méthodes géophysiques de forage – Les diagraphies	48
2.2.4.1	Le diamétreur ou « caliper »	49
2.2.4.1 2.2.4.2	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray »	49 49
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.»	49 49 49
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques	49 49 49 50
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre	49 49 49 50
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion	49 49 49 50 51
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion Les sondes «sonic» ou acoustiques	49 49 49 50 51 52
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.». Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre etion Les sondes «sonic» ou acoustiques. Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou	49 49 49 50 51 52
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray ». La sonde « P.S.». Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques. Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre etion. Les sondes «sonic» ou acoustiques. Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité».	 49 49 49 50 51 52 52
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7 2.2.4.8	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion Les sondes «sonic» ou acoustiques Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité» Les diagraphies nucléaires – La sonde « neutron » ou sonde « porosité»	 49 49 49 50 51 52 52 53
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7 2.2.4.8 2.2.4.9	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion Les sondes «sonic» ou acoustiques Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité» Les diagraphies nucléaires – La sonde « neutron » ou sonde « porosité» Les diagraphies d'imagerie de parois	 49 49 49 50 51 52 52 53 53
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7 2.2.4.8 2.2.4.9 2.2.4.10	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.». Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques. Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion. Les sondes «sonic» ou acoustiques. Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité». Les diagraphies nucléaires – La sonde « neutron » ou sonde « porosité» Les diagraphies d'imagerie de parois. Les diagraphies du fluide : température – conductivité.	 49 49 49 50 51 52 52 53 53 53
2.2.4.1 2.2.4.2 2.2.4.3 2.2.4.4 2.2.4.5 d'induc 2.2.4.6 2.2.4.7 2.2.4.8 2.2.4.9 2.2.4.10 2.2.4.11	Le diamétreur ou « caliper » La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray » La sonde « P.S.» Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre tion Les sondes «sonic» ou acoustiques Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité» Les diagraphies nucléaires – La sonde « neutron » ou sonde « porosité» Les diagraphies d'imagerie de parois Les diagraphies d'imagerie de parois Les diagraphies du fluide : température – conductivité La mise en oeuvre des diagraphies au cours des travaux au Burkina Faso	 49 49 49 50 51 52 53 53 53

CHAPITRE 3 : LES METHODES NOUVELLES MISES EN ŒUVRE A KOMBISSIRI ET A SANON - MODELISATIONS D'AQUIFERES TYPES...... 57

3.1 La tomographie électrique à courant continu	57 57
3.1.2 Modélisation d'aquifères de socle types – Etude de faisabilité	
3.2 Sondage et tomographie électromagnétiques Slingram à nombre d'inductio et intermédiaires	n faibles 77
3.2.1 Rappels : Historique – Principe – Mise en œuvre	77
3.2.2 Modélisations de situations simples d'aquifères de socle	
3.2.2.1 Modèles 1D.	
3.2.2.2 Modèles 3D	
3.2.3 Synthèse	95
3.3 Le Sondage par Résonance Magnétique Protonique (sondage RMP)	

CHAPITRE 4 :	RESULTATS DES TRAVAUX SUR LES SITES DE KOMBISSIRI	
	ET DE SANON	105

	105
4.1.1 Chronologie	105
4.1.2 Travaux réalisés	105
4.1.2.1 Sur le site de Sanon	105
4.1.2.1 Sur le site de Kombissiri	
4.2 Le site de Kombissiri – Plate-forme 2	109
4.2.1 Photographies aériennes et images satellites	109
4.2.2 Géophysique aéroportée	112
4.2.3 Magnétisme au sol.	112
4.2.4 Electromagnétisme de reconnaissance.	
4.2.5 Forages – Analyse des échantillons – Diagraphies – Essais de pompage	
4.2.5.1 Forages d'exploitation et de contrôle	
4.2.5.2 Analyse des échantillons	
4.2.5.3 Les diagraphies	
4.2.5.4 Essais de pompage	
4.2.6 Sondages électriques	
4.2.7 Tomographie électrique – Etude méthodologique	132
4.2.8 Sondage et tomographie électromagnétique à nombres d'induction faibles et intermédiaires	158
4.2.9 Le sondage par Résonance Magnétique Protonique	165
4.2.10 Synthèse – Interprétation multi-méthode	
4.3 Le site de Kombissiri – Plate-forme 1	175
4.3.1 Photographies aériennes – Images satellites – Géophysique aéroportée	175
4.3.2 Magnétisme au sol	
4.3.3 Electromagnétisme de reconnaissance	180
4.3.4 Forages – Analyse des échantillons – Diagraphies – Essais de pompage	100
4.3.4.1 Les forages d'exploitation	
4.3.4.1 Les forages d'exploitation4.3.4.2 Analyse des échantillons	182
4.3.4.1 Les forages d'exploitation4.3.4.2 Analyse des échantillons4.3.4.3 Les diagraphies	
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation 4.3.4.2 Analyse des échantillons 4.3.4.3 Les diagraphies 4.3.4.4 Essais de pompage 	
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation	
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation	
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation	182 182 184 185 186 188 191
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation	182 182 184 185 186 188 191 198
 4.3.4.1 Les forages d'exploitation	

4.4.6 Sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP)	. 227
4.4.6.1 Le sondage RMP $S1/S2$	227
4.4.6.2 Le sondage RIVIP S8/S9	231
4.4.7 Synthese : Interpretation multi-methode	. 233
CHAPITRE 5 : SYNTHESE – DISCUSSION	. 239
5.1 Comparaison entre les trois aquifères étudiés	. 240
 5.1.1 Géométrie – Structure – Caractéristiques particulières 5.1.2 Caractéristiques hydrogéologiques 	.240 .240
5.2 Apport méthodologique : les techniques géophysiques	. 241
5.2.1 La tomographie électrique	. 241
5.2.2 Le sondage électrique	. 243
5.2.3 L'électromagnétisme fréquentiel à nombre d'induction faibles et intermédiaires	2.42
Les dispositifs Slingram de type EM 34 et MaxMin	.243
5.2.4 Le magnetisme au sol.	244
5.2.5 La geophysique aeroportee	245
5.2.0 Le solidage par Resoliance Magnetique Flotonique (RMF)	.245
	. 2 10
5.3 Apport méthodologique : la place de la géophysique dans l'implantation	246
des forages peri-urbaills à gros deblis	240
5.3.1 Quatre outils conseillés : Magnétisme, Electromagnétisme fréquentiel,	
Tomographie électrique et Sondage par Résonance Magnétique Protonique	.246
5.3.2 Méthodologie proposée	.247
5.3.3 Application aux trois sites étudiés :	. 248
5.4 Le modèle conceptuel des aquifères de socle	248
CONCLUSIONS	. 251
1 – L'hydrogéologue	251
1.1 Le modèle d'aquifère.	. 251
1.2 L'existence et le calcul des réserves	253
1.3 L'implantation optimale des forages	.253
2 - Le géophysicien	254
2.2 Les méthodes	.254
2.3 Le choix des paramètres	255
3 - Quelles perspectives ?	256
RÉFÉRENCES	.253
LISTE DES FIGURES	.260
ANNEXES	.260
ANNEXES	260 .261 .289
ANNEXES ANNEXE 1 ANNEXE 2	260 .261 .289 .271

INTRODUCTION

Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (P.N.U.E., Our planet magazine, 2003), la pénurie d'eau douce et sa qualité médiocre quand elle est accessible, sont les plus grands freins au développement en Afrique, en limitant notamment l'agriculture et l'industrie.

La FAO (2003) estime qu'en 2015, le Burkina Faso sera parmi les pays d'Afrique qui seront confrontés à de graves pénuries d'eau. Au Burkina Faso, la pénurie d'eau potable et les difficultés d'accès en ont toujours fait une denrée rare.

Les programmes d'hydraulique villageoise ont permis à la population rurale de bénéficier de forages d'eau en quantité toujours croissante depuis une vingtaine d'années, mais encore largement insuffisante par rapport aux besoins. Et les problèmes locaux de raréfaction de la ressource se posent de plus en plus fréquemment.

En zone urbaine, l'essentiel de l'approvisionnement en eau s'effectue par les apports d'eau de surface. Mais les graves pénuries actuelles font de l'eau souterraine un apport nécessaire aux besoins accrus générés par l'expansion des villes en général, et des secteurs péri-urbains en particulier (banlieues, périmètres « non lotis »). Les programmes actuels d'hydraulique urbaine connaissent un taux de succès faible pour les forages à gros débits.

Les méthodes géophysiques sont aujourd'hui les principales méthodes de prospection et de détection des aquifères souterrains.

Les premières prospections géophysiques débutèrent au Burkina Faso (alors Haute Volta) juste avant les années « soixantes ». En effet, des prospections géophysiques eurent lieu à Bobo Dioulasso en 1957, pour une reconnaissance géologique (Savadogo, 1979). En 1963, Huot avec la Compagnie Générale de Géophysique (France) réalisait des mesures de résistivité électrique grâce au dispositif Schlumberger dans la région de Houndé (Mathiez et Huot, 1966).

L'utilisation de la méthode électrique en dispositif multi-électrodes (2D) en est encore à ses débuts au Burkina Faso. Avant 2000, la seule utilisation du panneau électrique 2D en prospection hydrogéologique au Burkina Faso a été réalisée pour identifier des sites favorables à l'implantation de puits modernes, dans la zone autour du barrage de Niofila, au nord du Burkina (rapport ONEA/DANIDA, 1997). Quelques essais de tomographie 2D avaient été réalisés en 1994 par l'ORSTOM dans le cadre des études sur les filons de quartz aurifères de Bani. Les méthodes électromagnétiques sont d'utilisation courante en Afrique depuis près de 20 ans. Des tests par la méthode Slingram utilisant le système Apex MaxMin II, appliquées à la recherche d'eau au Burkina Faso ont été effectués par Palacky et al (1981) dans les régions de Tiébélé et de Mancarga, au sud du pays.

L'utilisation des méthodes géophysiques traditionnelles s'est généralisée ; elle est devenue incontournable et systématique dans la recherche d'aquifères du socle au Burkina Faso.

Les développements récents de techniques géophysiques électriques et électromagnétiques pour l'étude de structures 2D et 3D, et notamment l'introduction de nouvelles méthodes comme le Sondage à Résonance Magnétique (sondage RMP), les développements récents de la Polarisation Spontanée, ouvrent des champs nouveaux d'application qui doivent conduire à des résultats quantitatifs de qualité, notamment en contexte géologique de socle.

La présence au Burkina Faso d'équipes de recherche de l'IRD en Sciences de la Terre, notamment l'unité de recherche GEOVAST (UR027) a posé le cadre de l'environnement pratique de cette thèse.

Au Burkina Faso, GEOVAST (programme 2000 - 2003) avait une thématique de recherche intitulée: "Etude des Interactions entre l'organisation des couvertures d'altération et le fonctionnement de leurs aquifères par la variation spatiale et temporelle des paramètres géophysiques ». Il s'agissait d'appréhender la variabilité spatiale et temporelle des différents processus d'érosion, d'infiltration et de recharge des nappes, par des approches géophysiques et hydrologiques couplées.

Ce projet de recherche IRD - GEOVAST au Burkina a été mené en partenariat et grâce à la collaboration avec de nombreux partenaires nationaux :

• La Faculté des Sciences et Techniques (FAST) de l'université de Ouagadougou.

• Le groupe : Ecole inter-états d'Ingénieurs de l'Equipement Rural (*EIER*) et Ecole interétats de Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et de l'Équipement Rural (*ETSHER*).

• L'institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole (*INERA*) du Burkina Faso.

L'application des méthodes géophysiques sur des sites pertinents en tenant compte de problématiques locales a été possible grâce à des collaborations fructueuses avec les structures et organismes présents au Burkina :

- Le ministère de en charge de l'eau au Burkina Faso
- L'Office National de l'eau et de l'assainissement (ONEA)
- Le projet « Appui au plan d'action de l'ONEA »
- L'Office National des puits et forages (O.N.P.F.)
- Le Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB)
- De nombreux bureaux d'études et de consultation du Burkina

La collaboration avec les structures suivantes en Europe a permis d'enrichir ce travail :

- Institut de Géophysique / Université de Lausanne
- BRGM Orléans

C'est donc dans ce cadre global que ce sujet de recherche a été choisi et que les travaux de recherche ont été mis en œuvre. L'une de ses originalités tient au fait qu'il concerne des environnements péri-urbains et s'intéresse aux problématiques liées aux forages à moyen et gros débits

Chapitre 1

Problématique : l'étude des aquifères de socle Applications au Burkina Faso

1.1 Problématique scientifique

Ce travail s'inscrit dans la problématique générale de l'apport des méthodes géophysiques à la connaissance des aquifères de socle.

Les méthodes traditionnelles que sont le sondage électrique et la cartographie électrique, électromagnétique, et magnétique sont classiquement utilisées pour l'implantation des forages, aussi bien en hydraulique villageoise qu'en hydraulique urbaine.

Les taux de réussite dans la recherche de forte productivité sont limités. Les statistiques actuelles montrent de fortes disparités en fonction des zones géographiques et du contexte géologique. Ricolvi (1992), sur un échantillon de 7946 forages, donne un taux de 30 % de forages dont le débit est inférieur à 0.5 m^3 /h et 56 % pour les forages ayant un débit compris entre 0,5 et 5 m³/h. Quelques études statistiques (IRD, Ouagadougou) réalisées sur un échantillon de 1479 forages en contexte de socle dans plusieurs régions montrent un taux de réussite de 20,4 % pour les forages ayant un débit supérieur à 5 m³/h.

La connaissance des aquifères reste en général réduite et la pérennité de la ressource demeure souvent un mystère.

Les forages sont bien sûr le meilleur moyen de connaissance directe des aquifères, mais les informations géologiques ainsi obtenues restent ponctuelles.

Les essais de pompage, le suivi de l'exploitation et la modélisation hydrogéologique ont permis de faire des progrès significatifs dans la description, la caractérisation et la compréhension du fonctionnement des aquifères discontinus (Touchard, 1998; Lachassagne et al, 2001) et le modèle type des aquifères de socle continue d'évoluer (Wyns, 1999, 2003; Lachassagne, 2001).

Etudier théoriquement, mais surtout expérimentalement, l'apport de nouvelles techniques géophysiques à la connaissance de ces aquifères, à toutes les étapes, depuis l'implantation des forages jusqu'au suivi de l'exploitation, tel est l'objectif fixé.

Deux catégories de techniques géophysiques ont été testées.

La première, fondée sur la résistivité et la conductivité électrique concerne deux techniques à grande densité spatiale de mesure, qui permettent une exploration relativement fine, latéralement et verticalement :

- La tomographie électrique ou panneaux électriques ou dispositifs multi-électrodes à courant continu,
- les techniques électromagnétiques fréquentielles à faible nombre d'induction, de type Slingram.

La seconde catégorie concerne une méthode novatrice directement sensible à la présence d'eau, qui s'est considérablement développée en France, au cours des dernières années, le Sondage par Résonance Magnétique Protonique (sondage RMP).

Les problèmes concrets que nous souhaitons résoudre au sein de cette problématique générale sont les suivants :

- Quels sont les paramètres d'acquisition et de traitement les plus adaptées aux cibles étudiées pour chaque méthode ?
- Quelles techniques d'interprétation spécifiques faut-il proposer ou développer ?
- Comment intégrer ces nouvelles techniques dans la méthodologie classique actuellement mise en œuvre pour implanter avec le maximum de chances de succès des forages à gros débit pour l'approvisionnement des centres urbains ?
- Enfin, quel peut être l'apport de ces méthodes géophysiques nouvelles à la gestion durable de la ressource en eau de ces aquifères discontinus sous climat soudano-sahélien ?

La réponse aux problèmes posés, fondamentaux et appliqués, passe nécessairement par l'expérimentation sur des sites pilotes partiellement connus et en cours d'exploitation. C'est ainsi que les sites de Kombissiri et de Sanon ont été choisis, à proximité de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso. Il s'agit donc d'aquifères de socle granitique et métamorphique d'une zone située à basses latitudes en Afrique de l'Ouest, sous climat soudano-sahélien.

Les résultats obtenus sur ces sites permettront non seulement de répondre aux questions générales posées ci-dessus, mais ils contribueront également à une meilleure connaissance de ces aquifères, donc des ressources en eau souterraine à proximité de Ouagadougou.

1.2 Approche retenue – Organisation du mémoire

L'approche qui a été retenue est multi-site et multi-disciplinaire, de façon à ce que les résultats puissent être aussi généralisables que possible.

C'est une approche essentiellement expérimentale. Elle a pu être mise en œuvre grâce à la présence alors permanente à Ouagadougou d'une équipe géophysique de l'IRD (UR027 GEOVAST) et grâce à des collaborations extérieures locales.

Choix des sites

Après une enquête auprès des administrations, des bureaux d'étude locaux, et de l'Office national de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA), le site de Kombissiri, situé à 45 km environ au sud de Ouagadougou, a été choisi parce qu'une campagne d'hydrogéologie périurbaine y était en cours. Après la comparaison des premiers résultats sur les plates-formes 1 et 2, c'est la seconde plate-forme qui a été choisie pour les essais méthodologiques les plus complets.

Le site de Sanon, situé à 30 km au nord de la capitale a été également retenu pour deux raisons. D'une part les conditions géologiques et hydrogéologiques sont connues comme très différentes de celles de Kombissiri, et d'autre part, il a été l'objet de travaux d'étude et d'exploitation très détaillés, ce qui permet une bonne calibration des techniques géophysiques. La situation et les caractéristiques de ces sites sont décrites ci-après.

• Reconnaissance préliminaire

Les résultats des études préliminaires de reconnaissance précédentes sur les sites étudiés ont été intégrés; quelques uns ont été ré-interprétés.

Des informations complémentaires sont présentées, notamment les cartes d'aéromagnétisme et d'électromagnétisme aéroportés. Enfin une campagne de magnétisme au sol a été réalisée sur les deux plates-formes de Kombissiri.

• Trois techniques géophysiques « nouvelles »

La tomographie électrique ou dispositifs multi-électrodes à courant continu, seront mis en œuvre systématiquement, de manière à obtenir l'imagerie géophysique 2D et 3D la plus détaillée possible des structures géologiques.

La comparaison entre plusieurs dispositifs, l'étude de l'influence des hétérogénéïtés superficielles, le test des paramètres d'inversion et l'étude de la robustesse des solutions obtenues sur la plate-forme de Kombissiri 2 notamment, constituent une partie importante de l'étude méthodologique conduite sur cette technique.

Les dispositifs Slingram, de mise en œuvre légère, seront testés comme outil alternatif aux panneaux électriques pour l'investigation détaillée en hydrogéologie de socle. Six configurations indépendantes seront utilisées en chaque station ; celles-ci sont espacées de 5 m le long de profils parallèles. Ceci permet une représentation expressive des sondages géométriques électromagnétiques à faibles nombres d'induction, puis une inversion 1D, de même qu'un début d'interprétation 2D.

Les sondages par Résonance Magnétique Protonique (sondage RMP) seront mis en œuvre pour la première fois au Burkina Faso. Les résultats déjà présentés dans le mémoire de thèse de Vouillamoz (2003) ont été en partie réinterprétés dans le cadre du présent travail. C'était l'un des objectifs de notre étude méthodologique. En effet, l'estimation directe du contenu en eau du sous-sol doit être un complément déterminant à la géophysique classique, pour l'implantation des forages, la caractérisation des réservoirs et la modélisation hydrogéologique. Notre objectif aurait d'ailleurs voulu être plus ambitieux : évaluer les réponses d'amplitude du signal sur des structures de très faible transmissivité, comparer la sensibilité sur des forages à forte productivité et sur des forages improductifs, caractériser les zones potentielles de circulation des eaux souterraines par des mesures en profil vers des exutoires souterrains ; ce sont autant de questions auxquelles nous aurions souhaité répondre

• Modélisation géophysique

A partir de modèles simples de structures géologiques et hydrogéologiques susceptibles d'être rencontrées en zone de socle, il s'agit d'étudier à priori la réponse des dispositifs électriques et électromagnétiques mis en oeuvre. Cette première étape est indispensable pour vérifier la sensibilité des techniques et pour définir les paramètres des dispositifs de mesure à mettre en œuvre et à tester.

Cette étude à priori est obligatoirement complétée par des modélisations à posteriori, qui permettent de tester la robustesse des solutions obtenues et de conclure, d'abord sur les performances et les limites des techniques utilisées, et ensuite sur les structures géologiques et éventuellement hydrogéologiques, dont on croit pouvoir être sûr.

• Validation de la géophysique de surface par forages, diagraphies et mesures physiques sur échantillons

Les forages et les puits existants ont permis une première validation et un étalonnage de la géophysique de surface. Les forages d'exploitation réalisés à partir de nos travaux, dans lesquels des diagraphies de résistivité ont été enregistrées, constituent une deuxième validation et de nouveaux étalonnages.

Nous souhaitions réaliser des forages de contrôle permettant des prélèvements carottés d'échantillons pour des analyses fines de teneur en eau et de résistivité complexe sur échantillons. Nous avons pu grâce à un équipement de forage propre à l'IRD, réaliser 7 forages destructifs (à petit diamètre : 2'') de contrôle sur un profil de la plate-forme 2 de Kombissiri. Nous avons pu ainsi contrôler la géométrie des structures interprétées – épaisseur des couches et profondeur du toit du substratum – et la résistivité des formations grâce aux diagraphies. Celles-ci permettent également de caractériser la fracturation des réservoirs.

Enfin, des échantillons des formations et des roches ont été prélevés pour permettre des analyses physico-chimiques (diffractométrie), et des mesures de susceptibilité magnétique.

• Caractérisation hydrogéologique des réservoirs

L'estimation des paramètres hydrodynamiques grâce aux essais de pompage a permis une caractérisation qualitative et quantitative des aquifères ; elle était de plus indispensable pour la calibration des paramètres des sondages RMP. Nous n'avons pas pu réaliser les pompages d'essai que nous souhaitions, dans les règles scientifiques de l'art, afin d'estimer et de comparer les paramètres hydrauliques de parties spécifiques de l'aquifère.

Quelques résultats des mesures réalisées à Sanon au cours des études précédentes ont été partiellement ré-interprétés.

• Modélisation hydrogéologique

C'était l'objectif final que nous nous étions fixés pour le site principal de Kombissiri 2. Elle n'a malheureusement pas pu être abordée pour des raisons de temps, mais tous les éléments quantitatifs nouveaux apportés dans le cadre de ces travaux devraient permettre de la mettre en œuvre prochainement.

• Organisation du mémoire

Il comporte cinq chapitres.

Le premier chapitre présente la problématique et l'approche retenue, selon un exposé qui se déroule du général au particulier : la problématique scientifique, les modèles d'aquifère de socle, puis la présentation des sites étudiés au Burkina Faso.

Le chapitre suivant traite des méthodes géophysiques classiques appliquées à l'étude des aquifères de socle. Toutes les méthodes classiques sont rapidement revues, celles qui sont effectivement mises en œuvre pour cette application et les autres, de façon à comprendre ou à faire comprendre si de nouveaux développements peuvent les rendre potentiellement applicables.

Le troisième chapitre présente les trois méthodes nouvelles mises en œuvre à Kombissiri et Sanon et pour deux d'entre elles, les méthodes de résistivité et/ou de conductivité, des modélisations directes et des inversions, à partir de modèles types d'aquifères de socle plus ou moins simplifiés. Cette étude de faisabilité n'est pas faite pour le sondage RMP, car c'est une méthode récente et de nombreuses publications récentes traitent de cette approche, comme il sera décrit dans un bref historique.

Le chapitre suivant, le quatrième, est le plus important de tout point de vue; il présente les résultats des travaux de terrain, classés selon les sites, les deux plates-formes de Kombissiri, puis le site de Sanon. Au sein de chaque site, les résultats des techniques successives sont présentés pratiquement suivant le déroulement naturel des opérations sur le terrain, puis ils sont suivis d'une synthèse géologique et hydrogéologique.

Le dernier chapitre enfin est un chapitre de synthèse et de discussion. Il traite successivement de la comparaison des sites, de la méthodologie géophysique et enfin du problème général des aquifères de socle : implantation des forages à gros débits et évolution du modèle d'aquifère de socle.

1.3 Les modèles d'aquifère de socle

L'importance humaine, sociologique, économique et politique reconnue, de l'eau disponible dans les aquifères discontinus (zones de socle et zones karstiques) et les difficultés de compréhension de leur fonctionnement sont tels, qu'un grand nombre de travaux scientifiques et appliqués leur sont consacrés. Une publication spéciale de l'UNESCO, dont l'éditeur est Lloyd (1999) fait le point sur les aquifères de socle en zones arides et semiarides. Les autres contributions scientifiques sont citées ci-dessous, dans les exposés propres aux modèles.

• Le modèle traditionnel

Cité dans de nombreux ouvrages jusqu'à il y a une dizaine d'années, ce modèle a longtemps fait autorité en hydrogéologie de socle.

Le modèle conceptuel traditionnellement utilisé était de type bi-couche (CIEH, 1979), composé de deux ensembles communicants superposés : un réservoir supérieur essentiellement capacitif et un réservoir inférieur principalement conductif.

En fait, c'est la zone altérée du socle, c'est-à-dire les altérites ou arènes argilosableuses, qui constituaient le réservoir dit capacitif et la zone fissurée et fracturée qui constituait le réservoir conductif, c'est-à-dire celui qui assure la circulation. Le substratum sain constituant, quant à lui, la base imperméable de l'aquifère.

Il est bien sûr simpliste de parler de bi-couche, notamment parce que la zone fissurée et fracturée du socle ne peut être assimilée à une couche. Il existe en particulier par endroits des drains verticaux, qui assurent localement une meilleure circulation de l'eau souterraine.

• Le modèle plus récent

Le modèle récent d'aquifères de socle date des années 1990 ; il est proposé par plusieurs auteurs (Detay et al, 1989 ; Wyns et al, 1999 ; Taylor and Howard, 2000 ; Wyns et al, 2001), qui distinguent désormais, selon leurs propriétés hydrogéologiques, trois « couches » superposées.

Il s'agit de bas en haut, cette fois-ci :

(1) Le sommet du socle fracturé, peu perméable (porosité efficace de l'ordre de 10^{-2}). Les fractures, d'origine tectonique, sont en général sub-verticales et jouent le rôle de drains majeurs en profondeur.

(2) Une « couche » intermédiaire : la zone fissurée. Elle est particulièrement bien développée dans les formations granitiques où elle peut atteindre des épaisseurs de plusieurs

dizaines de mètres. Cette zone est caractérisée par des fissures essentiellement horizontales dont le nombre diminue avec la profondeur. La genèse de ces fissures horizontales est attribuée, selon de nombreux auteurs (Acworth, 1987; Davis and Turk, 1984; Wright 1992..., cités dans Lachassagne, 2001) à des phénomènes de décompression, alors que Wyns et al, également cité, propose une toute autre explication et une toute autre origine.

Ces derniers auteurs proposent une autre explication novatrice, grâce notamment à une approche nouvelle intégrant la pétrographie, les diagraphies électriques et soniques, la géotechnique dont les essais pénétrométriques et l'hydrogéologie; elle est également compatible avec la géophysique de surface, sondages et panneaux électriques. Ces fissures horizontales seraient dues à des phénomènes d'altération des micas du granite. L'augmentation de volume de ces micas – notamment les micas ferromagnésiens mafiques comme la biotite – sous l'effet de l'altération, provoquerait une véritable fissuration, selon des plans préférentiellement horizontaux. Il faut noter que c'est grâce à une approche multi-disciplinaire, en zone de socle en Inde, que cette explication s'est imposée.

J-C Maréchal et al (2003) a montré, grâce à l'étude de l'anisotropie de perméabilité hydraulique d'un aquifère de socle granitique, l'existence et l'importance de cette « couche » intermédiaire contenant de nombreuses fissures sub-horizontales liées aux processus d'altération.

(3) La couche supérieure enfin, qui correspond à la partie altérée du socle est constituée d'altérites, ou saprolites. Elle est d'épaisseur variable ; elle peut être différenciée selon la profondeur et selon le degré d'altération en deux compartiments, l'un supérieur formé d'allotérites et l'autre inférieur, d'isaltérites.

Les altérites possèdent une perméabilité généralement relativement faible, à cause de leur teneur en argile élevée, mais une forte fonction capacitive ; leur porosité est considérée de type « d'interstice » (J-C Maréchal, 2003).

Ce modèle récent a tendance à s'imposer de plus en plus dans la communauté scientifique internationale. Il a été validé dans plusieurs contextes géologiques et climatiques différents. Il sera intéressant de vérifier dans quelle mesure la signature géophysique de Kombissiri et de Sanon permet de confirmer ce nouveau modèle conceptuel.

Comme dans le modèle bi-couche traditionnel, c'est la zone altérée supérieure, qui constitue le réservoir de l'aquifère. Sa présence et son épaisseur sont un facteur essentiel de la pérennité de la ressource.

C'est en revanche la couche intermédiaire située entre les altérites et le socle qui constitue la zone la plus perméable de l'aquifère. Sa forte transmissivité en fait une cible hydrogéologique prioritaire dans la recherche d'aquifère en zone de socle.

1.4 Choix des sites expérimentaux au Burkina Faso

Les critères de choix de sites pour des études expérimentales en sciences de la terre allient en général des critères scientifiques de pertinence de l'objet d'étude à des critères pratiques d'accessibilité et de représentativité du site.

Les critères que nous avons retenus pour notre étude sont les suivants :

- La situation géographique
- L'existence de projets d'étude ou de perspectives de réalisations socioéconomiques pour le développement
- L'existence de travaux préalables et d'équipements
- L'échelle de la zone étudiée

Il est indispensable, en premier lieu pour une étude de ce type, d'introduire la géologie et le climat des zones d'étude.

1.4.1 Contexte géologique et hydrogéologique du Burkina Faso

• Géologie

La géologie du Burkina Faso est représentée à 80 % par des formations cristallines. De nombreux auteurs (Ducellier, 1963 ; Hottin et Ouédraogo, 1975 ; Savadogo, 1984) ont contribué à la description des formations géologiques du Burkina et à l'établissement de cartes géologiques.

Des travaux récents menés par le BRGM, dans le cadre de grands projets de cartographie géologique et minière au Burkina (projet « Sysmin » notamment) ont permis de préciser et de compléter la connaissance des structures géologiques. Les travaux les plus récents ne sont pas encore entièrement publiés, ni disponibles de façon complète et définitive à cette date. Ils devraient permettre en particulier de préciser l'âge de certaines formations, dont la minéralogie et la datation ont été reconsidérées, grâce aux résultats d'analyses récentes.

L'ancienne carte géologique générale du Burkina Faso, à l'échelle de 1/1.000.000^e date de 1975 (Hottin et Ouédraogo, 1976). Elle place le Burkina Faso dans le craton ouest-Africain. On y distingue trois grandes unités :

- Les roches granitiques et migmatitiques indifférenciées, les gneiss, les leptynites, les amphibolites et les méta-gabbros. Ces roches ont été datées et regroupées en « formations de l'Antécambrien ou Précambrien D ».
- Les roches plutoniques et les roches dites « volcano-sédimentaires ».
- Les roches gréseuses, calcaires, et schisteuses, datées de la période « Infracambrienne » et les sables et grès argileux datés du tertiaire (continental terminal). Ces formations constituent la couverture sédimentaire, sub-divisée géographiquement en couvertures occidentale, septentrionale et orientale, laquelle correspond au bassin voltaïen.

La nouvelle carte géologique et minière du Burkina Faso publiée en 2003 (Castaing et al, 2003) a vocation à faire autorité.

La notice explicative de cette carte présente trois groupes de formations géologiques :

- le socle paléo-protérozoïque qui comprend des terrains volcano-sédimentaires et plutoniques birimiens. Ceux-ci sont envahis par des granitoïdes batholitiques d'âge éburnéen.

- la couverture sédimentaire néo-protérozoïque, qui repose en discordance sur le socle birimien dans plusieurs zones. Elle est constituée de dépôts marins de plate-forme épicontinentale.
- les terrains cénozoïques du continental terminal. Elle est constituée de formations fluvio-lacustres avec des alternances d'argiles et de sable ou bien gréso-conglomératique.



Figure 1.1 : Carte géologique du degré de Ouagadougou (Casting et al, 2003) (Légende au verso)



Légende de la carte du degré carré de Ouagadougou

• Hydrogéologie – Aquifères fracturés – Profils d'altération

La géométrie et la nature des aquifères en zone de socle dépendent du type de roches qui composent le substratum, de la tectonique et de l'altération qu'elles ont subi depuis leur mise en place.

On distingue deux grands domaines selon la nature des formations :

- Le domaine granito-gneissique, constitué de granites et granitoïdes et des formations métamorphisées de type gneiss.
- o Le domaine schisteux affecté par du métamorphisme.

Ces deux grands domaines ont des profils d'altération spécifiques, qui ont été étudiés par de nombreux auteurs et synthétisés dans le mémoire de thèse de Compaoré (1997). Nous présentons ici les deux types de profils, adaptés à partir de la thèse de Compaoré :

a Le profil granito-gneissique

Le domaine granito-gneissique montre un profil d'altération, qui peut-être très détaillé de la manière suivante, de haut en bas :

- 1. Cuirasse à faciès nodulaire
- 2. Cuirasse à faciès massif
- 3. Carapace à faciès massif
- 4. Argiles tachetées à canaux
- 5. Litho-marge à texture conservée (zone d'altération minérale)
- 6. Arène sableuse
- 7. Socle fissuré et fracturé
- 8. Socle sain

On reconnaît dans cette description les composantes suivantes :

- La couverture formée de cuirasses et d'une carapace massive peu perméable, dont l'épaisseur totale est variable et toujours inférieure à trois ou quatre mètres.
- Une couche d'argile, de quelques mètres d'épaisseur qui constitue une protection de l'aquifère en quelque sorte.
- Le réservoir dit capacitif : zone d'altération minérale + arène sableuse.
- Le réservoir dit conductif, c'est-à-dire la partie supérieure fissurée et fracturée du socle, tient peu de place dans la description originale.
- Le substratum ou socle dit sain.

C'est une description en bon accord avec le modèle traditionnel bi-couche, dont la couverture est bien détaillée.

b Le profil schisteux

Dans ce domaine, le profil d'altération peut être différentié de la manière suivante, de haut en bas :

- 1. Sol
- 2. Cuirasses latéritiques
- 3. Argiles latéritiques
- 4. Argiles d'altération de schistes
- 5. Schiste altéré à structures conservées
- 6. Schiste fissuré avec diaclases à filons de quartz et de calcite
- 7. Schiste sain

C'est là encore une description en accord avec le modèle traditionnel. Il est important de noter deux éléments :

- la présence de la couche d'argile latéritique au dessus de l'aquifère
- la mention de filons de quartz et de calcite dans la partie fissurée du socle, susceptibles, soit de fermer les fractures sub-verticales, soit au contraire de créer des zones broyées à leur périphérie.

Nos zones d'étude portent sur des sites à substratum granitique (site de Kombissiri) et granito-gneissique (site de Sanon). C'est donc le seul contexte dont il sera question dans ce mémoire.

1.4.2 Situation géographique : les sites de Kombissiri et de Sanon

Les deux sites retenus pour cette étude comme il a été dit précédemment sont ceux de Kombissiri et de Sanon (**fig. 1.2**).

Situé à environ 45 kilomètres au sud de Ouagadougou, Kombissiri est une ville secondaire du centre-sud du Burkina Faso.

Le site de Sanon est lui situé à 30 kilomètres environ au nord de la capitale. Il est accessible en toutes saisons par une route bitumée sur environ 20 kilomètres, puis par une piste secondaire ensuite.



Figure 1.2 : Situation géographique générale des sites de Sanon et de Kombissiri

1.4.3 Le site de Kombissiri

• La ressource en eau

Kombissiri est, en matière d'exploitation, un centre secondaire d'approvisionnement d'eau potable de la ville de Kombissiri (dans l'actuelle province du Bazèga).

Ce centre d'exploitation est exploité par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement du Burkina Faso (ONEA). Le centre ONEA de Kombissiri a été créé en 1988 et bénéficiait d'un champ de captage constitué de trois forages d'exploitation alors fonctionnels. Il fait partie d'un groupe de centres régionaux exploités par l'ONEA, qui connaissent depuis une dizaine d'année une raréfaction de leurs ressources. Cette raréfaction des ressources exploitables, marquée par une chute des débits d'exploitation des forages d'eau, est accentuée par une hausse de la consommation locale.

C'est dans ce contexte de pénurie qu'à été mis en place le projet dénommé « Appui au plan d'action de l'ONEA ». A la suite de travaux bibliographiques et de reconnaissance préalables, l'équipe technique en charge du projet a choisi un site pilote situé à six kilomètres environ de la ville. Ce site a fait l'objet d'études hydrogéologiques et géophysiques dans le cadre du projet et dans le cadre de cette thèse, pendant la période de 2000 à 2003.

• Géographie et géologie

Le site d'étude est situé à environ trois kilomètres au sud de la ville de Kombissiri, dont il porte le nom. Il est situé dans le bassin versant du Nakambé.

Il est constitué de deux plates-formes d'étude détaillées. Elles sont localisées en moyenne : à la latitude 12° 04' Nord et la longitude 1° 20' Ouest. Les dimensions de la première plate-forme sont de 600 x 500 mètres et celle de la deuxième de 550 x 550 mètres.

Les premiers levés géologiques publiés pour cette zone géographique datent des années 1950.

Ducellier (1963) distinguait pour la région située au sud de Ouagadougou les granites baoulés, présentés comme des granites hétérogènes et pouvant montrer des faciès homogènes comme ceux qui affleurent dans la région de Kombissiri. Aujourd'hui, on distingue quatre types de granite, en fonction de leur texture (**fig. 1.3**).

- Les granites à tendances grano-dioritiques dans la zone de Pissi au NE du secteur. Ils apparaissent légèrement plus sombres et à grain grossier. Les affleurements montrent un caractère hétérogène lié à la présence d'enclaves sur-micacés et de nombreuses veines de pegmatites.

- Les granites à grain fin à moyen, leucocrates à mésocrates, plus homogènes que les précédents et sans orientation préférentielle des minéraux. Ces granites constituent l'essentiel des affleurements visibles de la ville de Kombissiri.

- Les granites à amphiboles, montrant une foliation surtout soulignée par la disposition planaire des biotites et des amphiboles. Ils sont relativement proches des précédents, mais sont de couleur plus rosée.

On retrouve ce faciès sur des affleurements dans la zone de Zamsé et à l'est du secteur.

- Les granites porphyroïdes, homogènes et sans orientation minérale. Ils sont composés de quartz, biotite, et de feldspaths centimétriques. Les affleurements sont localisés au NW de Nam-Yimi où les cristaux présentent un léger broyage.



Figure 1.3 : Synthèse géologique de la région de Kombissiri (d'après Ducellier, 1963 ; rapport BUMIGEB, 1999 ; Castaing et al, 2003)

• Climatologie et hydrogéologie

Les relevés pluviométriques effectués in situ par la direction de la météorologie nationale du Burkina Faso, montrent l'évolution suivante pour quarante des dernières années (de 1961 à 2001) (**fig. 1.4**) :



Figure 1.4 : Evolution de la pluviométrie à Kombissiri (1960 - 2001)

Un suivi piézométrique régulier sur les forages d'exploitation du champ de captage Kombissiri, effectué par l'ONEA, a permis de reconstituer l'évolution des variations piézométriques des forages FK1 et FU.

Nous avons réalisé un suivi piézométrique dans le cadre de nos travaux de recherche sur les forages de la plate-forme 1 et 2, pendant la période allant de novembre 2002 à avril 2003. L'intervalle des mesures n'était pas régulier mais cela a permis de reconstituer les niveaux piézométriques pendant cette période de saison sèche. Les résultats de ces relevés sont présentés sur la figure ci-dessous (**fig. 1.5**).



Figure 1.5 : Evolution piézométrique dans quatre forages du site de Kombissiri (11/2002 – 04/2003)

1.4.4 Le site de Sanon

Le site de Sanon a été étudié dans le cadre du projet « Milieux fissurés II» (BRGM – AQUATER, 1989 – 1994) et par Compaoré dans le cadre d'une thèse de doctorat en hydrogéologie (1997).

Le site expérimental de Sanon, dans le cadre du projet « Milieux Fissurés II », est très étendu (une dizaine de kilomètres carrés), compte tenu de la problématique alors étudiée. Mais notre zone d'investigation à Sanon est restreinte à une portion de la zone du dôme piézométrique et une autre portion située à l'Ouest du dôme piézométrique.

Géographie et géologie

La géologie du site de Sanon est constituée par des formations dites anté-birimiennes, c'est-à-dire développées avant l'orogenèse éburnéenne (2100 – 1800 millions d'années). Le birimien est l'équivalent stratigraphique issu de cette orogenèse en Afrique.

Ces formations géologiques comprennent des roches granito-gneissiques avec des intercalations d'amphibolites (roches vertes). Des travaux récents montrent que les granites de la zone sont composés de grains fins moyens à biotite et amphibole (ce dernier minéral est plus rare).

La zone étudiée est caractérisée par une épaisseur d'altération très importante (de l'ordre de 20 à 30 mètres) souvent saturée. La surface est recouverte par une cuirasse latéritique épaisse. On a donc une géologie typique et représentative du Burkina avec une altération saturée épaisse (fig. 1.6).



Figure 1.6 : Carte géologique simplifiée de Sanon (modifiée, d'après Compaoré, 1997)

• Climatologie - Hydrogéologie

Le climat influence directement le bilan hydrique de la zone. Dans notre cas, comme à Kombissiri, le climat est de type soudano-sahélien sur tout notre rayon d'investigation (autour de la capitale Ouagadougou).



Figure 1.7 : Evolution pluviométrique à Sanon (2001 – 2002)

Le site de Sanon présente une nappe d'eau dans les altérites; le niveau statique est peu profond (moins de dix mètres). Le site de Sanon possède des venues d'eau dans les altérites et dans le socle fracturé.

Des mesures de piézométrie ponctuelles sur quelques forages ont donné le niveau statique sur le site, au mois de novembre 2002. On retrouve des niveaux conformes à celles d'une nappe piézométrique en forme de dôme (Compaoré, 1997). Les forages **S1/S2** seraient situés dans la zone centrale, dans la partie du haut piézométrique. Les forages **S8/S9** sont dans la partie de dépression piézométrique. Le rabattement à cette période entre ces deux forages est de 6 m.



Figure 1.8 : Niveaux piézométriques mesurés à Sanon en novembre 2002.

Chapitre 2

Les méthodes géophysiques classiques appliquées à l'étude des aquifères de socle

Après un exposé introductif sur la place de la géophysique dans la stratégie actuelle d'étude des aquifères de socle, les différentes familles de méthodes géophysiques classiques au sens large (les techniques de la télédétection étant incluses), sont présentées brièvement, dans l'optique de leur application à l'étude des aquifères discontinus. Les considérations théoriques et méthodologiques sont réduites au minimum ; elles sont en effet présentées dans de nombreux traités de Géophysique Appliquée destinés aux géologues et ingénieurs d'application en particulier (Parasnis, D. S., 1997 ; Reynolds, J. M., 1997 ; etc).

2.1 La stratégie classique d'étude des aquifères – La place de la géophysique

La stratégie d'étude des aquifères de socle est fonction de l'importance des projets, donc de la taille des zones étudiées et des budgets disponibles. Plusieurs documents de l'UNESCO (Larson, 1984; Lloyd, 1999) décrivent les méthodologies types généralement mises en œuvre dans la communauté anglo-saxonne.

Pour la communauté francophone, le CIEH (1984), Savadogo (1984), Nakolendoussé (1991) et le BRGM (1992 ; 1999) ont proposé des approches méthodologiques très proches de ces dernières.

L'approche classique est fondée sur une approche multi-disciplinaire, qui s'articule en phases successives. Pour les projets importants, elles se succèdent de la manière suivante :

• Phase préliminaire : étude bibliographique, documentation

C'est l'approche initiale, fondée sur la recherche, puis l'exploitation des données existantes de toute nature (géographie physique et humaine, climatologie, géologie, hydrogéologie...). L'importance de ces informations dépend du contexte général de l'étude et des objectifs qui sont fixés.

• Reconnaissance régionale : traitement et interprétation des données de télédétection

Le terme de Télédétection est équivalent à « Remote Sensing » en anglais. Il recouvre toutes les techniques qui fournissent des informations à partir d'un avion (photographies aériennes et images radar) et à partir d'un satellite. Elles seront présentées avec les méthodes géophysiques.

Ces données fournissent des informations sur les sols, la végétation, l'hydrographie, les affleurements géologiques, mais surtout sur la géologie structurale et sur la tectonique. On recherche principalement à cartographier les linéaments, qui sont de grande importance pour l'hydrogéologie de socle.

• Reconnaissance géologique et hydrogéologique de terrain

C'est une vaste étude de terrain qui combine les observations géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques de la zone. Elle est destinée à vérifier les indices relevés à partir de la télédétection, à les détailler et à les confirmer ensuite éventuellement, à partir d'analyses d'échantillons. En hydrogéologie de terrain, on relève et on visite tous les ouvrages existants ; et on prend note de toutes les informations qualitatives et quantitatives.

A ce stade d'observation de terrain, on prend également note des contraintes de mise en œuvre des techniques géophysiques au sol.

Reconnaissance géophysique au sol et prospection de détail – Choix des sites des forages de reconnaissance et éventuellement d'exploitation

Les trois phases précédentes ont conduit à définir les zones les plus intéressantes, d'environ 500 m x 500 m, sur lesquelles les méthodes géophysiques de reconnaissance, puis de détail, sont toujours mises en œuvre.

La procédure classique (CIEH, 1979; Palacky, 1981; Savadogo, 1984; Nakolendoussé, 1991) repose sur l'utilisation combinée des méthodes électriques et électromagnétiques.

L'objectif est de rechercher, puis de caractériser les zones les plus conductrices. En fonction de la forme de ces zones conductrices et de leur relation avec les linéaments cartographiés précédemment, elles peuvent correspondre, soit à une épaisseur maximale de la zone altérée, soit à l'existence de fissures et de fractures au toit du socle, soit à l'existence de fractures tectoniques profondes.
La méthodologie proposée est la suivante :

a – Cartographie électromagnétique :

L'utilisation du MaxMin en mode HCP 50 mètres, avec une fréquence de 3520 Hz est recommandée.

La distance entre les profils est de 50 m, afin d'obtenir une résolution suffisante pour localiser des zones de prospection plus détaillée. Les stations sont en général équidistantes de 10 mètres, le long des profils de mesure.

b - Profilage de résistivité à courant continu :

Il s'agit de confirmer les anomalies précédentes avec une technique plus lourde, mais aussi plus sensible et plus simple à interpréter. On réalise des profils parallèles entre eux et perpendiculaires ou sécants à la direction d'allongement des anomalies et en général à la direction des linéaments.

Le dispositif le plus utilisé en contexte de socle au Burkina est le suivant :

Schlumberger : AB = 200 m et MN = 20 à 40 m

Les acquisitions de données s'effectuent au pas constant de 10 m le long d'un profil en général. Le nombre de profils est variable, mais il doit être suffisant pour déterminer l'extension longitudinale des anomalies conductrices, que l'on espère égale à plusieurs centaines de mètres.

c - Sondage électrique :

Il s'agit cette fois de prospection géophysique de détail, pour sélectionner et caractériser les sites les plus favorables pour les forages. Ces sondages électriques sont implantés au sein des anomalies conductrices préalablement détectées ou confirmées par les profils de résistivité. Ils ne devraient pas être implantés par les géophysiciens seuls (voir §e ci-dessous).

L'objectif est de tenter de déterminer ponctuellement l'épaisseur de la zone altérée, puis de la zone fissurée et fracturée au-dessus du socle sain à l'emplacement proposé des forages. On s'intéresse autant à l'allure de la courbe de résistivité apparente qu'à son interprétation quantitative, qui souvent est décevante, d'autant plus que la situation n'est pas tabulaire, à proximité des drains sub-verticaux retenus.

d – Prospection par émanométrie radon (BRGM, 1992)

La méthode d'émanométrie radon a été testée par le BRGM, en particulier sur plusieurs sites au Burkina dont le site de Sanon dans le cadre du projet « Milieux Fissurés II ». Elle a permis la localisation de forages à débit élevé, qui n'avaient pas été proposées à partir des méthodes traditionnelles.

De nombreux auteurs ont étudié la relation entre la concentration en radon, les propriétés physiques des roches et l'hydrogéologie (Schery et al, 1982; Morin, 1992, etc). Ils proposent de réaliser des mesures de concentration en radon le long de profils. Les « pics » de radon s'expriment sur les zones d'ouverture maximale du sous-sol. En zone de

socle, il s'agit de zones fracturées (perméabilité maximum) et d'accidents structuraux majeurs. Depuis ces premiers travaux, cette méthode s'est développée et les applications dans le monde ont confirmé son utilité pour l'étude des aquifères dans des contextes géologiques variés.

e - Choix des sites de forage de reconnaissance ou d'exploitation

De façon idéale, ce choix est fait par l'ensemble des spécialistes qui ont participé aux phases précédentes ; aucun critère ne peut être appliqué de manière automatique. Les contraintes d'exploitation sont également prises en compte.

• Réalisation des forages – Essais de pompage – Suivi piézométrique – Evaluation de la ressource

La foration est l'étape qui suit la localisation des zones et l'implantation des points de forage.

Les forages sont réalisés à gros diamètre pour l'exploitation à gros débits (suivant les normes locales en vigueur). Lorsqu'il s'agit de champ de captage ; ils sont assortis d'un piézomètre à plus petit diamètre pour l'observation et le suivi de la nappe exploitée.

Plusieurs types d'ouvrages sont adaptés à l'étude des aquifères de socle (Diluca et al, 1981; Savadogo, 1984; Detay, 1987).

Les pompages d'essai servent à l'évaluation des paramètres hydrauliques des forages et de l'aquifère de socle (CIEH, 1982 ; CIEH-BURGEAP, 1988).

• Synthèse – Suivi de l'exploitation – Modélisation – Etude critique des résultats

Les résultats de l'interprétation des essais de pompage doivent permettre l'exploitation rationnelle des forages et plus généralement, des ressources en eau des zones de socle. Le suivi de l'exploitation, grâce à un réseau de piézomètre, est nécessaire à la gestion de la ressource en eau.

La connaissance de la géométrie de l'aquifère permet à la modélisation hydrodynamique de mieux connaître le fonctionnement de l'aquifère exploité et donc de prévoir son comportement aux sollicitations de l'exploitation.

L'étude critique des résultats tout au long de l'étude et de l'exploitation du site, sous la forme en particulier de la confrontation entre les prévisions et les résultats, est indispensable, pour faire progresser les outils et la méthodologie d'investigation.

2.2 Les méthodes géophysiques classiques

2.2.1 Les techniques de la télédétection

La télédétection est l'ensemble des méthodes et techniques d'acquisition, de traitement et d'interprétation d'images de la surface de la terre, obtenues à partir de l'étude des rayonnements électromagnétiques, par avion ou par satellite.

Les rayonnements électromagnétiques étudiés sont caractérisés par leur fréquence ou leur longueur d'onde (Λ) dans l'atmosphère. Ils peuvent être classés par valeurs de longueur d'onde croissantes :

- la lumière visible (0,4 μ m < Λ < 0,7 μ m) utilisée par l'œil humain, la photographie aérienne et les satellites ;
- les rayonnements infrarouges directs et réfléchis (0,7 $\mu m < \Lambda < 30 \ \mu m)$ utilisés par les satellites ;
- les ondes « radar » (0,3 cm < Λ < 3 m).

Cette classification permet d'introduire les trois techniques généralement mises en œuvre en hydrogéologie.

2.2.1.1 Les photographies aériennes

L'utilisation des photographies aériennes pour l'étude des aquifères souterrains en zone de socle est une étape préalable quasi-systématique. C'est une méthode efficace pour la détermination des linéaments géologiques. On peut aussi avoir accès à la cartographie des affleurements géologiques et à des informations morpho-structurales sur la zone étudiée. Les photographies aériennes donnent donc des informations à la fois lithologiques et structurales.

La photo-interprétation repose sur l'analyse visuelle des images aériennes ; soit directe permettant la détection des structures 2D, soit indirecte, avec l'aide d'un stéréoscope permettant la vision 3D.

Parmi les structures 2D intéressantes pour l'hydrogéologue, on peut identifier :

- La structure du réseau hydrographique, qui donne des indications pour l'identification des fractures du socle. Elle exprime très souvent la présence de discontinuités structurales - fracture, faille, etc, à l'origine de sa mise en place. L'interprétation reste cependant délicate car les cours d'eau (réseaux) ne se superposent pas obligatoirement à la fracture.

- Des alignements de végétation, de certaines espèces végétales hydrophiles en particulier, qui correspondent à des zones humides en surface et traduisent souvent la présence de circulations souterraines d'eau.

Ensuite, la vision stéréoscopique donne accès à la troisième dimension. Pour interpréter complètement une photo aérienne à l'aide du stéréoscope, il faut donc posséder les deux photos adjacentes, afin d'obtenir une vision en 3D. Elle permet de repérer les différences d'altitude des formations du paysage et donc d'identifier les zones basses (dépressions topographiques, failles avec rejet, fractures, etc) et les zones hautes. On peut ainsi distinguer

de nombreuses structures géologiques par des différences d'altitude comme les plateaux cuirassés par exemple.

Parmi les outils de la télédétection, ce sont les photographies aériennes qui donnent les informations les plus fines et les plus précises ; on travaille en général à une échelle de l'ordre du 1/25 000 ou 1/ 50 000.

2.2.1.2 Les images satellites

Les trois types d'images satellites les plus utilisés aujourd'hui pour des applications géologiques et géophysiques sont les images LANDSAT, SPOT et ASTER, du nom des satellites spécialement lancés pour l'observation et l'étude de la surface du sol. Ce qui les différencie, c'est leur date de lancement et par conséquent leur spécifications techniques et en particulier, les longueurs d'ondes des rayonnements étudiés et leur résolution spatiale.

Les images LANDSAT MSS ne sont pratiquement plus utilisées aujourd'hui. Les images LANDSAT MS sont plutôt adaptées aux études régionales et les images ASTER et SPOT, aux études de détail, d'autant plus que ces dernières permettent la stéréographie.

2.2.1.3 Les images RADAR

L'intérêt du radar installé sur un satellite tient au fait qu'il peut traverser une certaine épaisseur de végétation ou de sol, mais ceci est peu important dans les zones arides.

L'intérêt du radar installé sur un avion, par rapport aux photographies aériennes tient au fait qu'il peut fonctionner aussi bien la nuit que le jour et qu'il n'est pas gêné par une couverture nuageuse. Il n'existe en revanche aucune couverture systématique. Des vols spéciaux peuvent être réalisés pour des projets importants de cartographie géologique. Son utilisation pour les seuls besoins des hydrogéologues est plus que rare.

2.2.2 Les techniques géophysiques aéroportées

Ces techniques ne sont pas mentionnées dans la stratégie classique de l'étude des aquifères de socle (cf. § 2.1). En effet, elles ne sont jamais mises en œuvre pour les besoins des hydrogéologues seuls, à cause de leur coût d'une part, et de la taille minimale importante des surfaces prospectées, imposées par la mise en oeuvre.

En revanche, si de telles études ont été menées à l'échelle d'un pays ou d'une région pour la cartographie géologique ou pour l'exploration pétrolière et minière, il est intéressant de tenter d'exploiter leurs résultats, de la même façon que les techniques de télédétection dans la phase de reconnaissance hydrogéologique.

C'est d'ailleurs le cas pour les zones de Kombissiri et de Sanon. C'est la raison pour laquelle, ces techniques sont brièvement présentées ci-dessous.

2.2.2.1 Le magnétisme aéroporté

C'est une technique puissante pour la cartographie géologique dans les zones de socle cristallin et métamorphique, qu'il affleure ou qu'il soit situé à plusieurs kilomètres de profondeur.

Il permet en général de différencier les formations par leur lithologie ou leur pétrographie, de déterminer leur profondeur et de mettre en évidence les accidents structuraux.

Le paramètre physique déterminant est la susceptibilité magnétique et quelquefois, le magnétisme rémanent.

Un levé réalisé avec un objectif pétrolier n'est pratiquement pas utilisable par un hydrogéologue, parce que l'altitude des vols est trop grande, donc la résolution spatiale est insuffisante, y compris après un prolongement vers le bas. De toute façon, les pétroliers et les hydrogéologues du socle ne sont généralement pas intéressés par les mêmes zones d'étude.

En revanche, les levés réalisés pour l'exploration minière sont précieux pour l'hydrogéologue.

Ces techniques sont fondées strictement sur le même principe et les mêmes phénomènes physiques que le magnétisme au sol, qui sera un peu plus détaillé ci-dessous (cf § 2.4.1).

En aéroporté, on rencontre bien entendu les mêmes difficultés qu'au sol, quant à l'application des méthodes magnétiques dans les régions équatoriales. Introduisons les, dès nant :

- les contacts ou les accidents de direction sub-méridienne, c'est-à-dire nord-sud, sont pratiquement non détectables par le magnétisme, car ils sont parallèles au champ magnétique inducteur ;

- un contact ou un corps de direction différente sera en général détecté, mais sa réponse brute sera difficile à interpréter, en raison de la quasi-horizontalité du champ inducteur ; sa réponse après transformation au pôle, plus facile à interpréter, risque d'être de qualité très médiocre ; en revanche sa réponse après transformation à l'équateur sera robuste.

Les cartes de l'anomalie résiduelle du champ magnétique total et différentes cartes transformées sont de très bons auxiliaires aux cartes tracées à partir des techniques de télédétection, pour comprendre la géologie et par conséquent l'hydrogéologie à l'échelle régionale.

2.2.2.2 La radiométrie aéroportée

Ces levés sont plus rares que les précédents, y compris pour l'exploration minière, parce qu'ils font appel à une technologie plus compliquée et qu'ils ne s'appliquent pas dans tous les environnements géologiques. Ils sont en général réalisés pour établir un inventaire du potentiel minier d'une région, où ils peuvent s'appliquer.

La radiométrie est un outil de cartographie géologique encore plus performante que l'aéromagnétisme, lorsque le socle est sub-affleurant, car les réponses sont directement liées à sa composition minéralogique. En effet la radiométrie permet de différentier les formations géologiques, en fonction de leur teneur en Potassium, Thorium et Uranium.

Une couverture sédimentaire ou quaternaire de quelques mètres d'épaisseur suffit en revanche pour rendre la radiométrie « aveugle ».

Un exemple d'application particulièrement convaincant a été réalisé au Gabon (Guillemot et al, 1990).

2.2.2.3 L'électromagnétisme aéroporté

Ces levés sont encore plus rares que les deux précédents car ils ne sont pratiquement jamais utilisés dans une phase de reconnaissance. En revanche, ils sont plus directement liés à l'hydrogéologie puisque le paramètre physique déterminant est la conductivité électrique des formations superficielles, situées en moyenne entre 0 et 50 mètres de profondeur.

Le principe et les phénomènes physiques à la base de cette technique sont les mêmes que ceux des méthodes électromagnétiques au sol, qui seront présentées ci-dessous (cf. §2.4.3). Il existe deux familles de techniques : les techniques fréquentielles et les techniques temporelles. Celles-ci atteignent aujourd'hui des profondeurs d'investigation supérieures aux premières ; elles sont cependant limitées en général à 50 ou 100 mètres, sauf exceptions ; la profondeur d'investigation est d'autant plus grande que les formations sont plus résistantes ...

L'interprétation qualitative puis quantitative des données électromagnétiques aéroportées dans un but hydrogéologique lorsqu'elles existent, est certainement d'un très grand intérêt, avant d'établir un programme de reconnaissance et d'exploration de détail au sol.

2.2.2.4 La gravimétrie aéroportée

La gravimétrie aéroportée a pour objectif, l'étude des variations spatiales du champ de gravité, à partir d'un avion ou d'un hélicoptère. Elle commence à être utilisée pour l'exploration pétrolière depuis une vingtaine d'années. Les premiers essais en exploration minière en Afrique datent de l'année 2003 (Zerbo, 2004).

Cette technique ne sera vraisemblablement jamais d'intérêt pour l'hydrogéologie de socle, même si la zone d'étude a été couverte pour des applications minières. En effet, l'ordre de grandeur des anomalies vraisemblables en hydrogéologie sera toujours au-delà de ses performances.

2.2.3 Les techniques géophysiques au sol

2.2.3.1 Le magnétisme au sol

C'est une technique intéressante pour l'étude des aquifères de socle, en raison du paramètre « susceptibilité magnétique » à la fois pour caractériser les faciès et pour cartographier les accidents et en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cette technique, fois testée lors d'études antérieures (CIEH, 1984 ; 1987) a été reléguée à tort peut-être au rang de méthode secondaire, qui sert seulement à la localisation de filons magnétiques susceptibles de faciliter la création de drains.

Susceptibilité magnétique et magnétisme rémanent

Ce sont les différences de susceptibilité magnétique (ΔK) entre deux formations géologiques en contact l'une avec l'autre, qui sont responsables des anomalies du champ magnétique total, cartographiées par le prospecteur géophysicien, en l'absence d'aimantation rémanente.

L'amplitude maximale de telles anomalies serait théoriquement obtenue au pôle et s'exprimerait pour un contact vertical, par l'équation simple suivante :

$$\Delta$$
 Bz = 0,5 . Δ K . Bz

Une différence de susceptibilité $\Delta K = 50 \times 10^{-6}$ U.SI, dans un champ local d'intensité égale à 40 000 nanoTesla (nT), conduirait donc au maximum à une anomalie de l'ordre de 1 nT, ce qui est l'absolue limite de détectabilité, compte tenu des hétérogénéités locales.

Rappelons quelques valeurs théoriques (U.SI) pour les susceptibilités généralement rencontrées dans les formations de socle (Parasnis, 1997).

Granite sans magnétite :	10 - 100	x 10 ⁻⁶
Granite avec magnétite :	20 - 50 000	x 10 ⁻⁶
Basalte :	1500 - 25 000	x 10 ⁻⁶
Pegmatite :	3 000 - 75 000	x 10 ⁻⁶
Gabbro :	4 000 - 90 000	x 10 ⁻⁶

La détection d'intrusions de type basique est un objectif classique pour le magnétisme, mais la cartographie de contacts entre des unités géologiques de nature légèrement différente est possible, de même que l'étude de la topographie du toit d'un socle homogène.

Aux anomalies liées à l'aimantation induite, donc à la susceptibilité magnétique, s'ajoutent vectoriellement les anomalies liées au magnétisme rémanent. L'amplitude de ces dernières peuvent être 10 à 100 fois supérieure à celle de l'aimantation induite ; la direction et le sens de cette magnétisation rémanente peuvent être quelconques par rapport à ceux du champ induit, si bien que l'anomalie totale résiduelle est difficilement prévisible.

• Mise en œuvre

- ▶ La mesure est rapide et le rendement journalier peut être grand (> 10 km / jour).
- Correction des variations temporelles sur des mesures au sol : il s'agit de s'affranchir des fluctuations temporelles grâce au choix de l'un des deux procédés suivants :
- utilisation d'un magnétomètre en station de base fixe, en plus du magnétomètre de mesure.
- adoption d'un protocole de mesure comportant un retour régulier du magnétomètre de mesure à une station de base donnée (retour à la base).

• Traitements et interprétation

La carte du champ total résiduel, transformée au pôle ou à l'équateur, a l'avantage de gommer l'effet lié à la latitude ; elle est donc plus facile à interpréter qualitativement, que la carte brute.

La carte du gradient vertical calculé (nT/m) est utilisée pour faciliter l'interprétation structurale des données de champ magnétique. Elle améliore la définition des anomalies et peut permettre d'identifier plus facilement les contacts entre les corps magnétiques.

La carte du signal analytique est utilisée pour déterminer les limites des structures.

• Intérêts et limites

Les spécificités de la magnétométrie dans les zones de basses latitudes (proches de l'équateur) sont :

De manière générale, un corps magnétique à l'équateur peut produire une anomalie négative d'amplitude plus faible que celle de l'anomalie positive qu'il produirait s'il était situé au pôle. Il y a donc inversion des anomalies magnétiques dans les zones situées aux basses latitudes, proches de l'équateur.

L'anomalie produite par une structure magnétique de direction Est-ouest est plus marquée que celle produite par une structure nord - sud qui est souvent imperceptible.

2.2.3.2 La gravimétrie au sol

C'est une méthode traditionnelle de prospection, qui peut-être appliquée à toutes les échelles, depuis le Génie Civil, jusqu'à la Géodésie et la Physique du Globe, comme la méthode magnétique d'ailleurs.

Elle est peu ou pas du tout appliquée à l'étude des aquifères de socle, en raison de la faible pertinence du paramètre « densité » pour de tels objectifs et parce que sa mise en œuvre conduirait de toute façon à des rendements particulièrement faibles, donc à des coûts prohibitifs.

2.2.3.3 Les méthodes électriques à courant continu

Elles sont parmi les méthodes géophysiques actives les plus utilisées en hydrogéologie ; en Afrique elles sont mises en œuvre depuis plus de 40 ans, comme il a été dit dans l'introduction. Elles sont très bien connues à la fois du point de vue théorique et du point de vue pratique. Les équations de base et les phénomènes physiques seront rappelés lors de la présentation de la tomographie électrique, ou panneaux électriques (§ 3.1). On se contente cidessous d'en rappeler quelques traits principaux, importants pour comprendre les applications passées et l'intérêt des nouvelles méthodologies.

• La résistivité électrique des formations géologiques

En hydrogéologie, les formations géologiques sont conductrices pour deux raisons : (1) parce qu'elles sont poreuses, que les pores sont interconnectés et qu'ils contiennent une eau plus ou moins minéralisée et (2) parce qu'elles contiennent un pourcentage d'argile sous différentes formes.

Ceci à plusieurs conséquences, notamment :

- la nature de la matrice a peu ou pas d'incidence sur la valeur de la résistivité des formations ;

- la porosité est un facteur-clé ; c'est la porosité connectée qui intervient dans la loi d'Archie, pour les formations «propres», c'est-à-dire les formations ne contenant pas d'argile ; la minéralisation et la température du fluide sont également importantes ;

- il est pratiquement impossible avec les mesures à courant continu seules, de séparer la part du fluide minéralisé de la part de l'argilosité, dans la valeur de la résistivité des formations.

• La résistivité « complexe »

C'est une notion qui a été introduite en géophysique appliquée depuis plusieurs décennies, notamment en exploration minière (Van Voorhis and al, 1973 ; Wynn and Zonge, 1975 ; Zonge and Wynn, 1975). Elle décrit l'existence d'un phénomène de polarisation, qui s'ajoute au phénomène classique de conduction ; ce peut être une polarisation intrinsèque à la formation, c'est vrai pour l'argile par exemple ou une polarisation liée au contact entre deux formations de nature ou de composition différente.

Elle joue actuellement un rôle relativement faible en hydrogéologie ; on peut imaginer que dans le futur, elle pourra aider à séparer l'effet des argiles, de l'effet du fluide conducteur.

• Les trois techniques de mise en œuvre des méthodes à courant continu

Traditionnellement, on distingue trois types de mise en œuvre, qui couvrent chacun un domaine d'application relativement particulier : (1) le sondage électrique, (2) le profilage électrique ou la cartographie et (3) la tomographie ou le panneau électrique.

a – Le sondage électrique :

C'est la technique qui permet l'étude la plus détaillée des structures dites « tabulaires », ou 1D.

Elle permet de déterminer, en une station de mesure sélectionnée, la stratification, par l'intermédiaire de la distribution des résistivités avec la profondeur à la station étudiée. Sa résolution verticale est relativement limitée, elle dépend du rapport entre les résistivités des couches successives et de leurs épaisseurs respectives. La détection et la caractérisation des couches minces sont difficiles; cette limite est reconnue sous le nom des principes d'équivalence et de suppression.

Les dispositifs de mesure : tout dispositif de mesure est quadripôlaire. Lorsqu'une électrode est située à l'infini, théoriquement, on peut parler de tripôle ou de Pôle-bipôle ou de Pôle-dipôle. Si deux électrodes sont à l'infini, on parle généralement de Pôle-pôle. La différence entre un bipôle et un dipôle, d'injection ou de mesure, est liée au rapport entre sa dimension et la distance émetteur-récepteur ; lorsque ce rapport est inférieur à 1/5 et à plus forte raison, inférieure à 1/10, on parle de dipôle, car les termes du second ordre peuvent être négligés dans l'expression du coefficient géométrique.

Le dispositif Schlumberger est généralement préféré pour le sondage électrique parce que la pratique des « embrayages » permet, dans une certaine mesure, la correction des àcoups de prise de potentiel. En fait, tout dispositif avec « embrayage » est recommandé, même s'il ne correspond pas à l'approximation de type Schlumberger. Les dispositifs utilisant des bipôles ou des dipôles de mesure ne permettant pas les embrayages sont à éviter lorsque les conditions superficielles sont hétérogènes. Le dispositif Pôle-dipôle ou demi-Schlumberger avec embrayage, peut être plus intéressant que le dispositif Schlumberger classique, si la place dont on dispose pour étendre le dispositif est limitée. Il permet de doubler la profondeur d'investigation pour une dimension fixée du dispositif actif, l'électrode à l'infini étant considérée comme non active et étant située en un lieu quelconque suffisamment éloigné.

L'inversion 1D: La comparaison des résultats d'une inversion classique à partir d'un modèle à nombre minimal de couches et d'une inversion à partir d'un modèle multicouche est recommandée. Elle permet de tirer le meilleur profit des équivalences et de mieux séparer les contributions individuelles aux conductances longitudinales et aux résistances transversales cumulées.

Intérêts et limites : Il y a trois difficultés majeures dans l'application des SE à l'étude d'aquifères de socle :

- (1) La présence d'argile conductrice en surface, qui réduit le pouvoir de résolution en profondeur;
- (2) Une relative progressivité des valeurs de résistivité depuis la base de la zone altérée saturée jusqu'au socle sain, en passant par le socle fissuré et fracturé, qui limite également le pouvoir de résolution ;
- (3) La non tabularité des structures à proximité des drains verticaux intéressants pour les hydrogéologues, à cause des conditions de surface, mais surtout à cause des conditions en profondeur, qui conduisent à des situations de type 2D et/ou 3D.

b – Le profilage et la cartographie

Ce sont des outils de reconnaissance traditionnellement utilisés pour l'étude des structures 2D et 3D, notamment pour les aquifères de socle. Les dispositifs de mesure quadripolaires sont généralement utilisés, en particulier le dispositif Schlumberger (avec ou sans répétition), en raison de sa résolution latérale et verticale maximales. Un profil électrique correspond à un sous-ensemble particulièrement réduit du panneau électrique, présenté rapidement ci-dessous (§ c) et étudié en détails ultérieurement. Il fournit une information « intégrée » horizontalement et verticalement quelquefois difficile à interpréter.

Intérêts et limites : Une superficie importante peut être couverte relativement rapidement avec un pas d'échantillonnage spatial relativement fin.

En revanche, il n'est pas extrêmement facile de séparer les informations en fonction de la profondeur ; seule la longueur d'onde spatiale des anomalies permet cette discrimination dans une certaine mesure : des variations spatiales brutales ne peuvent en effet, jamais correspondre à des événements profonds.

Ceci a pour conséquence, la nécessité de choisir le pas d'échantillonnage spatial en fonction du bruit géologique de surface et non en fonction de la profondeur de la cible.

c – La tomographie électrique, ou le panneau électrique ou les dispositifs multi - électrodes :

Cette technique relativement nouvelle est appliquée à l'hydrogéologie depuis une quinzaine d'années environ. Elle est réservée à l'étude détaillée des structures 2D et 3D de profondeur limitée (< 50 m en général), cette limite étant liée seulement à la logistique.

Elle consiste à mettre en œuvre un très grand nombre de quadripôles de dimensions différentes et de positions différentes, le long d'un ou de plusieurs profils. Ce très grand nombre de mesures indépendantes réalisées sur une superficie donnée permet une différentiation maximale des formations géologiques, latéralement et verticalement.

Ses caractéristiques, ses performances et ses limites sont étudiées en détail dans les chapitres 4 et 5.

2.2.3.4 Les méthodes électromagnétiques inductives

Certaines d'entre elles sont utilisées depuis plusieurs années avec succès en Afrique pour l'étude des aquifères de socle, dans le domaine fréquentiel ; plus récemment dans le domaine temporel.

Elles tendent à devenir soit un substitut, soit un complément aux méthodes électriques à courant continu. Elles ont en effet en commun avec celles-ci la sensibilité à la résistivité électrique, lorsque à la réception on mesure un champ électrique, mais à son inverse, la conductivité électrique, lorsqu'on mesure un champ magnétique.

Sensibilité à la conductivité électrique des formations géologiques

Conductivité et résistivité sont définies comme l'inverse l'une de l'autre.

Les relations entre la conductivité et la nature de la matrice, la porosité, la minéralisation et la température du fluide et la teneur en argile des formations sont donc strictement identiques à celles décrites précédemment pour la résistivité. Les problèmes que l'on peut résoudre avec ces méthodes sont donc à priori les mêmes que ceux décrits précédemment.

Il y a cependant deux différences importantes avec les méthodes électriques.

(1) En électromagnétisme, lorsque la grandeur mesurée est le champ magnétique ou l'une de ses composantes, elle est proportionnelle à la conductivité σ , à une certaine puissance ($\sigma^{1/2}$, σ ou $\sigma^{3/2}$), alors qu'en électrique, la grandeur mesurée, le champ électrique ou une différence de potentiel, est proportionnelle à ρ . Ceci a deux conséquences :

- a) En électromagnétisme, la valeur de lagrandeur mesurée est d'autant plus élevée que la formation est conductrice ; en électrique, elle est d'autant plus élevée que la formation est résistante.
- b) En électromagnétisme, un « bruit » de mesure qui tend à augmenter la valeur du champ mesuré tend à «créer» un conducteur. Il n'est pas rare de « cartographier » un « faux » substratum très conducteur en électromagnétisme, lorsque le rapport signal / bruit devient très faible pour les fréquences faibles ou les temps longs. En sondage électrique, le « bruit de mesure » tend à créer un « faux » substratum résistant, lorsque le rapport signal / bruit devient très faible, pour les dispositifs de grandes dimensions.

119

(2) La diversité des techniques et des dispositifs mis en œuvre en électromagnétisme est considérable, alors qu'en électrique elle se borne à un nombre limité de combinaisons spatiales de quatre électrodes.

• Présentation et classification des différentes techniques électromagnétiques inductives

a Domaine fréquentiel - Domaine temporel

On différencie d'abord les techniques fréquentielles, des techniques temporelles. Même s'il est théoriquement possible de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel et réciproquement, par la transformée de Fourier et son inverse, il reste, que du point de vue théorique, du point de vue de la mise en œuvre et de la sensibilité au signal et au bruit, ces deux types de techniques se différencient par des capacités, des limites et des domaines d'applications spécifiques.

b Champ lointain et grand nombre d'induction – Champ proche et faible nombre d'induction

La comparaison entre les équations à la base des méthodes électriques et celles à la base des méthodes électromagnétiques permet de comprendre la complexité et la richesse de ces dernières et d'introduire une classification intéressante pour le géophysicien.

Une seule équation simple suffit à lier l'émetteur et le récepteur au sein d'un milieu homogène dans les méthodes à courant continu. En effet, le champ électrique créé à la distance R, d'une électrode ponctuelle dans laquelle circule un courant continu I, au sein d'un milieu homogène de résistivité ρ , à pour expression :

$$\mathbf{E} = \boldsymbol{\rho} \cdot (\mathbf{I}/4 \ \pi \ \mathbf{R}^2) \cdot \mathbf{u}_{\mathbf{R}}$$

où $\mathbf{u}_{\mathbf{R}}$ est le vecteur unitaire porté par le rayon vecteur considéré.

En révanche, dans les méthodes électromagnétiques, les trois composantes du champ crée par un dipôle magnétique de moment M au sein de ce même milieu, caractérisé par sa conductivité ($\sigma = 1/\rho$), sa perméabilité magnétique μ , et sa permittivité diélectrique ε , a pour expression :

Dans le domaine fréquentiel :

$$\mathbf{B}_{\mathbf{R}} = \mathbf{B}_{\mathbf{R}}^{\mathbf{0}} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{R}} \quad (1+i\mathbf{k}\mathbf{R})$$
$$\mathbf{B}_{\theta} = \mathbf{B}_{\mathbf{R}}^{\mathbf{0}} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{R}} \quad (1+i\mathbf{k}\mathbf{R}-i\mathbf{k}^{2}\mathbf{R}^{2})$$
$$\mathbf{E}_{\phi} = \mathbf{E}_{\phi} e^{-i\mathbf{k}\mathbf{R}} \quad (1+i\mathbf{k}\mathbf{R})$$

où, $B_R^0, B_\theta^0, E_\phi^0$, sont les composantes du champ primaire, c'est-à-dire dans l'air.

R est la distance entre l'émetteur et le récepteur

k est le nombre d'onde dans le domaine fréquentiel, dans l'approximation quasi-statique classique pour les méthodes purement inductives, tel que :

k = (i
$$\mu \omega \sigma$$
)^{1/2} = $\frac{(1+i)}{\sqrt{2}} (\mu \omega \sigma)^{\frac{1}{2}}$

 $kR = (i \mu \omega \sigma)^{1/2}$. R est le nombre d'induction dans le domaine fréquentiel

Dans le domaine temporel :

$$B_{R} = B_{R}^{0} [erfc(\xi R) - 2 \xi R e^{-\xi^{2}} / \sqrt{\Pi}]$$

$$B_{\theta} = B_{\theta}^{0} [erfc(\xi R) - (2 \xi R e^{-\xi^{2} R^{2}} / \sqrt{\Pi}) - (4 \xi^{3} R^{3} e^{-\xi^{2} R^{2}} / \sqrt{\Pi})]$$

$$E_{\phi} = E_{\phi}^{0} [2 \xi^{5} R^{5} e^{-\xi^{2} R^{2}} / \sqrt{\Pi}]$$

Où : erfc est la fonction erreur complémentaire, telle que

 $\operatorname{erfc}(\mathbf{x}) = (2 / \sqrt{\Pi}) \int_{\mathbf{x}}^{+\infty} e^{-u^2} du$

 ξ est le nombre d'onde dans le domaine temporel, tel que :

L'étude des variations de ces composantes en fonction de la fréquence du signal ou du temps, de la distance émetteur-récepteur et des caractéristiques physiques des formations (σ , μ , ω), permet de classer les techniques électromagnétiques en trois domaines, au sein desquels les propriétés et les sensibilités sont particulières. On distingue ainsi :

b1 – Les techniques à grand nombre d'induction (kR, $\xi R >> 1$), donc à champ lointain relativement, ou à hautes fréquences ou aux temps courts, relativement :

Dans l'expression des champs, le terme exponentiel (e^{ikR}) est prépondérant. L'atténuation des champs en fonction de la distance à l'émetteur, y compris en fonction de la profondeur, est exponentielle ; c'est la caractéristique de l'effet de peau (*skin effect*).

La profondeur d'investigation de ces techniques est fonction de la fréquence, donc de la période ou du temps de réception après la coupure du courant.

Les méthodes de type magnétotellurique au sens large en sont de bons exemples.

b2 – Les techniques à faible nombre d'induction (kR, $\xi R \ll 1$), donc à champ proche relativement, ou à basses fréquences ou aux temps longs, relativement :

Dans l'expression des champs, le terme géométrique (kR) est prépondérant. L'atténuation des champs en fonction de la distance est due à la géométrie, c'est-à-dire à la distance émetteur-récepteur; l'atténuation due à l'effet de peau est négligeable pour les distances concernées; elle n'interviendrait que pour les distances bien supérieures aux dimensions des dispositifs mis en œuvre.

La profondeur d'investigation de ces techniques est fonction de la distance émetteurrécepteur. Les méthodes Slingram classiques de type Geonics® EM-38, EM-31, EM-34, en sont de bons exemples ; le MaxMin est également un bon exemple, pour les fréquences les plus basses et dans l'étude des formations peu conductrices.

b3 – Les techniques à nombre d'induction intermédiaire ($0, 1 \le kR, \xi R \le 10$) :

L'effet de peau et l'effet géométrique doivent être pris en compte simultanément : aucun terme ne peut être négligé dans les expressions des champs.

La profondeur d'investigation de ces techniques est fonction à la fois de la distance émetteur-récepteur et de la fréquence. C'est ainsi que l'on peut réaliser des « sondages électromagnétiques », en faisant varier soit la distance, soit la fréquence, soit les deux paramètres.

Pour tous les dispositifs pour lesquels la distance émetteur-récepteur est finie ou relativement faible (Slingram classique, MaxMin, Melis, CSAMT), on peut couvrir de manière continue les trois domaines qui ne sont séparés ici que pour les besoins de la présentation et de la classification, lorsque l'on étudie des formations de conductivité très différente juxtaposées, puisque kR, (ou ξ R) est proportionnelle à $\sqrt{\sigma}$.

Les méthodes classiquement utilisées en hydrogéologie sont brièvement présentées et discutées ci-dessous, dans leur application actuelle ou potentielle à l'étude des aquifères de socle.

2.2.3.4.1 Les méthodes « AMT – Audio-Magnéto-Tellurique » et « CSAMT– Audio-Magnéto-Tellurique à source contrôlée »

Ce sont des méthodes fréquentielles à grand nombre d'induction, puisque l'émetteur naturel est considéré comme situé à l'infini pour l'AMT et que la source contrôlée est elle aussi à très grande distance du récepteur pour la CSAMT. Les fréquences dites « audio » sont comprises entre 1 Hz et 10 000 Hz, ce qui conduit à des profondeurs d'investigation importantes, qui peuvent atteindre 1 000 m ou plus. Lorsque l'ensemble du spectre est couvert, soit 4 décades et lorsque les stations réceptrices sont adjacentes le long d'un profil, on réalise une tomographie électromagnétique. Si les stations réceptrices sont éloignées, on réalise des sondages magnétotelluriques individuels.

Ces méthodes sont effectivement mises en œuvre en hydrogéologie à moyennes et grandes profondeurs ; elles ne concernent pas les aquifères de socle dont la profondeur maximale est inférieure à 100 m.

2.2.3.4.2 Les méthodes « Radio-Magnéto-Tellurique » et « VLF- résistivité »

Elles appartiennent à la même famille que les précédentes. Ce sont des méthodes fréquentielles à grand nombre d'induction, pour lesquelles la résistivité apparente se calcule à partir de la mesure d'une composante du champ électrique à la surface du sol et de la composante associée du champ magnétique, selon l'équation introduite par Cagniard (1953). A partir d'un seul émetteur, c'est-à-dire d'une seule fréquence, on peut réaliser des profils ou une cartographie et étudier les structures 2D et 3D ; c'est essentiellement le champ électrique

qui contient l'information « résistivité », il est donc important de mesurer la composante perpendiculaire aux accidents à cartographier. Il y a une bonne sensibilité à la fois au résistant et au conducteur.

A partir de plusieurs émetteurs de fréquences différentes, on peut réaliser des « sondages » sur les structures sub-tabulaires et mieux définir les structures 2D et 3D.

Les émetteurs « Radio », dont le VLF est un cas particulier, sont situés à des distances de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres ; leurs fréquences sont de l'ordre de 10 00 à 30 000 Hz en VLF et de 500 KHz à 100 MHz pour les émetteurs de radiodiffusion et de télévision. Les profondeurs d'investigation sont donc relativement bien adaptées à l'étude des aquifères de socle lorsque l'épaisseur de la couverture ne dépasse pas 20 à 30 m.

Le VLF-résistivité a été utilisé en Afrique. Il est pratiquement abandonné aujourd'hui parce que les émetteurs deviennent peu fiables et parce que les techniques Slingram présentées ci-dessous (§ 2.4.4.3) lui sont préférées.

Il n'existe pratiquement pas de récepteurs Radio-magnétotelluriques commerciaux ; l'utilisation de ces techniques ne s'est donc pas généralisée. L'université de Neuchâtel (Bosch et al, 1999 ; Bosch et Mueller, 1999), qui a construit des récepteurs spécialisés a obtenu des résultats remarquables.

2.2.3.4.3 Les méthodes « Radio-magnétique » et le « VLF – inclinaison »

Elles appartiennent strictement à la même famille que les précédentes – méthodes fréquentielles à grand nombre d'induction –, puisque ce sont les mêmes émetteurs qui sont utilisés. En revanche, seules les composantes magnétiques horizontale et verticale sont mesurées, alors que la composante électrique horizontale ne l'est pas.

Par conséquent, seules les structures 2D et 3D peuvent être étudiées, puisque la composante magnétique verticale est nulle à l'aplomb des structures tabulaires. Celle-ci en effet est générée, soit par les courants secondaires induits dans les corps confinés conducteurs, soit par la canalisation des courants primaires liés à la distribution non tabulaire des résistivités. Une variante récente en VLF, consiste à mesurer le gradient vertical de la composante verticale, ce qui permet une résolution latérale supérieure à la technique classique.

Ces techniques ont un grand intérêt logistique ; elles sont particulièrement rapides de mise en œuvre et permettent un pas d'échantillonnage très fin avec des rendements élevés, puisqu'aucun contact avec le sol n'est nécessaire. Elles sont d'une grande sensibilité aux conducteurs confinés, donc à la circulation d'eau dans les drains ; en revanche la sensibilité aux accidents résistants est faible, car ils ne peuvent être détectés que par la déflection éventuelle des lignes de courant.

L'université de Neuchâtel, qui a développé les équipements spécialisés pour ces techniques a obtenu des résultats de grande qualité en Afrique et en Europe dans les zones karstiques (Turberg, 1994; Bosch and Gurk, 2000; Szalai et al, 2002). Leur utilisation n'est cependant pas généralisée, faute d'équipements commerciaux.

2.2.3.4.4 Les méthodes Slingram à champ proche et à faible nombre d'induction de type Geonics EM-38, EM-31, EM-34

A l'opposé des précédentes, celles-ci appartiennent à la famille des méthodes fréquentielles à faible nombre d'induction.

La distance émetteur-récepteur est faible, de 1m pour l'EM-38 destiné à la pédologie, à 3,69 m pour l'EM-31, puis à 10, 20 et 40 m pour l'EM-34. Les fréquences sont également faibles de façon à respecter l'approximation (kR, ξ R <<1) pour toute formation géologique de résistivité supérieure à 1 ohm.m.

Ces techniques et ces équipements ont été créés initialement comme des outils de profilage ou de cartographie rapide des formations géologiques superficielles. Les phénomènes physiques et les équations de base correspondant à ce type d'application sont présentés de manière très pédagogique dans les Notes Techniques et les Manuels de Geonics (Mc Neill, 1980 ; 1984 ; 1985 – TN–).

A la suite de plusieurs années d'expérience, ces équipements se sont en fait montrés plus performants qu'il n'avait été envisagé initialement. L'utilisation des six combinaisons offertes par l'EM-34 (3 distances x 2 positions) en font non seulement un outil de reconnaissance, mais potentiellement un outil d'étude détaillée.

C'est dans cette perspective qu'il a été testé sur les aquifères de Kombissiri, par comparaison avec la tomographie électrique à courant continu, afin de déterminer s'il pouvait se substituer en partie à celle-ci, pour l'implantation optimale des forages à gros débits et/ou pour le calcul des réserves et la modélisation.

Les dispositifs Slingram à faible nombre d'induction ont donc été testés, comme outils de sondage électromagnétique géométrique pour l'étude des structures sub-tabulaires et comme outil de détection et de cartographie fine des accidents, des fractures et des drains subverticaux caractéristiques des aquifères de socle. Les éléments de théorie propres à cette utilisation sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre 4).

2.2.3.4.5 Les méthodes Slingram à champ proche et à nombre d'induction variable : le Max-Min

Ces méthodes appartiennent à la famille des méthodes fréquentielles dont le nombre d'induction est soit faible, soit élevé, soit intermédiaire, selon la résistivité des terrains étudiés d'une part et selon la distance émetteur-récepteur et la fréquence choisies d'autre part.

Les équipements APEX MaxMin sont nés comme des outils d'exploration minière pour la recherche de minéralisations massives conductrices. Le dispositif est de type Slingram constitué d'une boucle émettrice et d'une boucle réceptrice. La distance entre les boucles est standardisée, de façon à permettre la meilleure compensation du champ primaire, elle vaut : 25, 50, 100 ou 200 m. L'équipement mis en œuvre au Burkina Faso comportait 7 fréquences, dont les valeurs se déduisent l'une de l'autre par un rapport 2 ; la fréquence minimale vaut 222 Hz, la fréquence maximale vaut 14 208 Hz. Aujourd'hui, la mise en œuvre la plus courante est de type HCP (Horizontal Coplanar Coil), c'est à dire de type « Dipôles Verticaux ».

La multiplicité des distances et des fréquences conduit à 28 combinaisons possibles, ce qui justifie le terme de « nombre d'induction variable ».

A titre d'exemple, pour une distance émetteur-récepteur de 100 m, dans un terrain homogène dont la résistivité est égale à 10 ohm.m ($\sigma = 0.1$ S/m) :

- le nombre d'induction minimal est voisin de 1 : $kR = (1 + i) \times 0.94$

Il est égal en effet à : $(1 + i) [(4 \times 3, 14 \times 10^{-7} \times 2 \times 3, 14 \times 222 \times 0, 1) / 2]^{1/2}] \times 100 =$

$$(1 + i) \ge 0.94.$$

- le nombre d'induction maximal est voisin de 5, 3 : $kR = (1 + i) \times 5, 3$.

L'excursion du point de vue des nombres d'induction est largement augmentée si l'on fait varier les trois paramètres σ , ω et R. Ceci explique la richesse, mais également la complexité des réponses généralement obtenues avec le MaxMin.

Cet équipement a été introduit en hydrogéologie au Burkina Faso pour réaliser des profils et des sondages électromagnétiques, comme il a été dit précédemment, par Palacky (1981). Il est couramment utilisé comme outil de reconnaissance avec une distance et une fréquence généralement fixées et égales à 100 m et 1776 ou 3552 Hz, respectivement.

2.2.3.4.6 Le sondage électromagnétique temporel (SEMt)

Dans la littérature anglo-saxonne, on parle généralement de sondage « TDEM – Time Domain Electromagnetism ».

Il s'agit cette fois d'une méthode temporelle à nombre d'induction intermédiaire, généralement mise en œuvre sous la forme de sondage, c'est-à-dire destinée essentiellement à l'étude de structures sub-tabulaires ou 1D. Lorsque de tels dispositifs sont utilisés le long d'un profil, avec un pas d'échantillonnage relativement fin, on réalise une tomographie électromagnétique dans le domaine temporel ; il existe peu de programmes d'inversion 2D de tels panneaux électromagnétiques (Sorensen, 2003).

La théorie et la pratique de ces méthodes sont particulièrement bien présentées dans les Notes Techniques de la société Geonics (1980) et dans deux ouvrages (Kaufman and Keller, 1995) et (Kaufman and Hoekstra, 2000). En français, elles sont très bien présentées dans la thèse de Descloitres (1998).

Le sondage électromagnétique temporel est couramment utilisé en hydrogéologie, à la place ou en complément du sondage électrique, y compris pour l'étude des aquifères de socle (Vouillamoz, 2002).

Intérêts et limites :

C'est une technique de sondage isolé qui peut utilement remplacer le sondage électrique pour des profondeurs faibles et moyennes (de 25 à 300 m de profondeur d'investigation par exemple). Il est plus rapide de mise en œuvre que ce dernier sur un terrain dégagé et le dispositif est de plus faible dimension pour la même profondeur d'investigation, ce qui en fait une bonne technique de reconnaissance. Sa moindre sensibilité aux couches minces résistantes néanmoins peut-être un handicap et peut justifier la réalisation conjointe de sondages électriques en quelques stations, de façon a assurer l'interprétation géologique et hydrogéologique. L'inversion jointe (SE + SEMt) est particulièrement efficace pour résoudre certains problèmes d'équivalence (Albouy et al, 2001). Dans la perspective d'une étude fine de la couche anisotrope du modèle tri-couche, il vaudrait la peine de tester l'approche conjointe sondage électrique + sondage EMt dans des zones favorables.

La sensibilité du SEMt aux « bruits » de l'environnement peut constituer une limite dans son application.

La tomographie électromagnétique temporelle n'est pas en mesure aujourd'hui de remplacer la tomographie électrique à courant continu pour l'étude des aquifères de socle pour trois raisons au minimum :

- les difficultés de mise en œuvre,

- la moindre sensibilité aux résistants peu épais et/ou de faibles dimensions,

- l'inexistence de programmes d'inversion 2D du type de ceux mis en œuvre actuellement en courant continu et la difficulté actuelle d'optimiser les algorithmes de calcul direct des réponses des structures 2D et 3D.

2.2.3.5 Le radar géologique (ou GPR)

La technique du radar au sol comme outil géophysique est fondée sur l'étude de la propagation dans les formations géologiques, des ondes électromagnétiques à hautes et très hautes fréquences (50 MHz à 1 GHz). Il ne faut pas le confondre avec l'imagerie radar présentée ci-dessus (2.2.1.3).

Ce sont les paramètres physiques (permittivité diélectrique ε et conductivité électrique σ des formations) qui gouvernent les lois de la propagation. En simplifiant, on peut considérer que la vitesse de propagation et les lois de réflexion et de la réfraction dépendent de ε , alors que l'atténuation de l'énergie est fonction de σ .

La technique du radar est extrêmement proche de la sismique-réflexion ; elle consiste à étudier les ondes réfléchies sur les interfaces entre les formations géologiques de nature différente. L'interface est caractérisée par le contraste entre les impédances électromagnétiques des deux formations en contact, c'est-à-dire par le rapport entre les valeurs de leur permittivité diélectrique relative.

L'application de cette technique à l'étude des aquifères de socle est, à priori, à proscrire. En effet, l'atténuation des ondes électromagnétiques est extrêmement rapide avec la profondeur, en particulier dès qu'il existe des formations conductrices en surface, telles que des argiles d'altération.

Peut-être faudrait-il néanmoins nuancer cette conclusion, dans la mesure ou le radar a été appliqué de manière très efficace en Afrique, en pédologie (Ritz et al, 1996).

2.2.3.6 Les méthodes sismiques

Ces méthodes sont largement utilisées en géophysique appliquée, sous deux formes de manière classique.

La sismique réflexion

Elle est particulièrement efficace pour des études stratigraphiques fines à des profondeurs supérieures à 150 ou 200 m. Elle est fondée comme son nom l'indique sur l'étude des ondes élastiques et/ou acoustiques, réfléchies à l'interface entre deux formations géologiques. L'interface est caractérisée par le contraste entre les deux impédances acoustiques.

La sismique réflexion à haute résolution, voire à très haute résolution, devrait théoriquement permettre d'étudier les premiers mètres. Elles sont actuellement en développement et il est démontré qu'elles peuvent être efficaces dans des situations particulièrement favorables. Son application à l'étude des aquifères de socle est à priori à proscrire par ce que l'étude d'une zone altérée de surface ne sera jamais favorable et de plus pour des raisons de mise en œuvre, de rendement et donc de coût.

La sismique réfraction

Elle est fondée sur le phénomène de réfraction totale, qui se produit au toit d'une formation dont la vitesse de propagation de l'onde est supérieure à celle de la formation susjacente, pour un rai sismique qui attaque cette interface avec l'angle critique i_c .

Compte tenu du principe d'Huygens et des lois de Descartes,

L'angle critique à l'interface entre deux milieux, i et i+1, est tel que

 $\sin i_c = V_i / V_{i+1} \quad \text{avec } V_{i+1} > V_i;$

Cette onde réfractée totalement se propage à l'interface avec la vitesse du second milieu, $V_{i\!+\!1}$;

Elle donne naissance à une onde qui émerge dans le milieu i avec un angle d'émergence égale à l'angle critique i_c.

La sismique réfraction est très utilisée pour l'étude des formations superficielles, en particulier pour l'étude du toit du socle sous la zone altérée; elle permet à la fois de déterminer la topographie du socle et les variations latérales éventuelles de sa nature et de ses qualités.

La sismique réfraction a rarement été utilisée (et elle ne le sera vraisemblablement jamais comme un outil classique d'étude des aquifères discontinus en général.

En revanche, du point de vue méthodologique, il serait tentant de tester ses performances et sa complémentarité avec le sondage électrique et la tomographie électrique pour deux applications particulières :

- la détermination du niveau statique; on peut penser qu'à Sanon, le dôme piézométrique pourrait être déterminé par la méthode réfraction, alors qu'il ne peut l'être à partir des méthodes électriques;
- la détection de drains sub-verticaux avec une bonne précision sur la localisation des épontes si une anomalie de vitesse du substratum est décelée.

2.2.4 Les méthodes géophysiques de forage – Les diagraphies –

Les diagraphies seules son traitées dans les pages qui suivent parce qu'elles sont très utilisées en hydrogéologie et qu'elles l'ont été au cours de nos travaux au Burkina Faso. Leurs caractéristiques principales sont (1) une grande résolution verticale, de l'ordre centimétrique et (2) un faible rayon d'investigation autour du forage, de l'ordre du centimètre au décamètre.

Pour mémoire, rappelons qu'il existe des méthodes et des outils de géophysique de forage, fondés sur les mêmes principes physiques que les techniques de surface étudiées précédemment et que les diagraphies. Le rayon d'investigation autour du forage de ces méthodes de géophysique de fortage peut atteindre plusieurs mètres, des dizaines de mètres, voire des centaines de mètres dans l'industrie pétrolière. Elles ne sont pas traitées ici.

L'application des diagraphies à l'hydrogéologie est l'objet d'un ouvrage spécial de langue française (Chapellier, 1987). Le tableau ci-dessous en est extrait:

Domaines d'application des diverses diagraphies (d'après Chapellier, 1987)		
Lithologie, corrélations stratigraphiques des aquifères et des roches associées.	Caliper (diamétreur), log électrique, gamma ray sonique, densité, neutron : en trou ouvert ; log nucléaire; en trou tubé et ouvert.	
Porosité primaire et inter-granulaire	Neutron, densité, sonique: en trou ouvert; neutron, densité : en trou tubé	
Porosité secondaire, fractures	Sonique, Caliper, micro-dispositifs électriques, en trou ouvert	
Argilosité, imperméabilité	P.S. et gamma ray : en trou ouvert; gamma ray: en trou tubé	
Perméabilité	Pas de mesure directe : peut être déduite de la mesure de la porosité et de la mesure de la résistivité.	
Direction, vitesse, mouvement de fluides.	Température et résistivité du fluide, flowmeter (débitmètre): en trou ouvert.	
Caractéristiques physiques et chimiques de l'eau de remplissage	P.S., résistivité et température du fluide : en trou ouvert	
Choix de la zone à crépiner	Tous les logs donnant des renseignements sur la lithologie, les caractéristiques de la zone à eau, les corrélations, l'épaisseur de l'aquifère	

Cet ouvrage couvre le sujet de l'application des diagraphies à l'hydrogéologie de manière exhaustive.

En résumé, il y a trois domaines d'application spécifiques, qui correspondent à trois objectifs :

1 - La séparation des interfaces, l'aide au suivi géologique des forages et l'étude des corrélations et des variations latérales entre forages proches.

2 - La mesure des propriétés physiques des différentes formations géologiques traversées pour l'aide à l'interprétation des méthodes géophysiques de surface et à leur étalonnage et c'est celui que nous décrirons en détail.

3 - Le domaine de l'hydrogéologie proprement dit : étude du fluide, équipement du forage et corrélations spatiales, donc meilleure connaissance du réservoir.

Les principaux outils géophysiques les plus appropriés, mais d'utilisation inégale, sont présentés successivement ci-dessous :

2.2.4.1 Le diamétreur ou « caliper »

C'est un outil purement mécanique constitué de 2, 3 ou 4 bras, qui permet d'enregistrer les variations de diamètre tout au long du forage. De conception, de réalisation et de mise en œuvre particulièrement simples, il devrait être mis en oeuvre dans tous les forages.

Il participe de manière indirecte, à la fois aux trois objectifs, géologique, géophysique et hydrogéologique.

2.2.4.2 La sonde « gamma naturel », ou « gamma ray »

Elle «mesure» l'importance du rayonnement gamma naturel émis par les formations géologiques. On sait qu' elle est sensible en particulier à la présence dans les formations géologiques de trois éléments principaux : l'uranium, le thorium et le potassium.

Elle renseigne donc sur la composition minéralogique des formations, les conditions de dépôt et les éventuelles transformations au cours du temps. Son pouvoir de résolution verticale est de l'ordre du centimètre et la signature de chaque formation géologique est extrêmement fine et fidèle. C'est donc à la fois, un outil de discrimination verticale, d'identification et de repérage des formations dans chaque forage et un outil de corrélation spatiale entre forages proches.

Elle permet en particulier de séparer les formations argileuses – riches en éléments radioactifs - des éléments détritiques généralement pauvres. Une interprétation quantitative en terme de teneur en argile est possible.

Il s'agit donc d'un outil indispensable à l'hydrogéologue, qui compte tenu de sa simplicité et de son coût, devrait être mis en œuvre aussi systématiquement que le diamétreur.

2.2.4.3 La sonde « P.S.»

P.S. signifie Potentiel Spontané ou Polarisation Spontanée. C'est un phénomène qui est lié à la circulation naturelle, ou spontanée, des charges électriques dans le sous-sol. Il a été exploité d'abord pour l'exploration minière. Aujourd'hui, ses applications sont de plus en plus importantes dans les domaines de l'hydrogéologie et de l'environnement

En hydrogéologie, il est sensible au mouvement des fluides minéralisés d'une part, mais aussi et surtout dans les forages, aux échanges d'ions entre l'eau d'imbibition des formations et le fluide utilisé pour la foration. Il est donc indispensable qu'il y ait une différence de minéralisation entre ces deux fluides pour que le signal P.S. existe L'argile faisant office de barrière semi-perméable pour les ions, elle joue un rôle important dans la signature PS d'un forage ; elle permet de définir ce que l'on appelle la « ligne des argiles ».

La mesure du signal PS est simple. On enregistre la différence de potentiel (ddp) entre une électrode fixe à la surface du sol non loin de la tête du forage et une électrode mobile à l'extrémité du cable. Elle demande cependant de sérieuses précautions de mise en oeuvre et un bon contrôle de qualité, en raison de l'existence de nombreux signaux électriques parasites naturels ou artificiels.

C'est un outil primordial en exploration pétrolière. Il est peu utilisé en hydrogéologie de socle, car on attend généralement peu de différence de nature entre les fluides d'imbibition et le fluide de forage. En revanche, chaque fois que l'on suspecte des venues d'eau de nature et en particulier de minéralisation différente dans un même forage, il peut être d'un grand intérêt. Une interprétation quantitative est théoriquement possible, c'est à dire que la teneur en sel des venues d'eau peut théoriquement être déterminée, par rapport à celle du fluide deforage.

2.2.4.4 Les sondes de résistivité – Les «logs» électriques

Elles sont fondées strictement sur le même principe physique, que les mesures de surface à courant continu (§ 2.2.3.3), bien que ce soit un courant alternatif de fréquence basse qui soit systématiquement utilisé (F de l'ordre de 200 hertz).

Il existe une grande variété de dispositifs, comme en géophysique de surface. Classés par degré de complexité croissante, ce sont les suivants :

- La sonde mono-électrode : elle mesure en fait les variations de résistance électrique entre une électrode de surface fixe (électrode B, fig 1.9) et une électrode mobile à l'extrémité du câble (mono-électrode M). C'est un excellent outil de discrimination verticale, particulièrement simple et peu onéreux ; on ne pratique pas en général d'interprétation quantitative.



Figure 1.9 : Dispositif de mesure des sondes «normales» (d'après Chapellier, 1987)

- Les sondes « normales » R ₁₆ ", R ₃₂" et R ₆₄" : ce sont des dispositifs quadripolaires avec deux électrodes à l'infini (B et N, fig 1.9), donc des dispositifs pôle pôle. Trois outils différents, correspondant à 3 distances émetteur / récepteur différentes exprimées en pouces (16, 32 et 64), donc à 3 rayons d'investigation différents, sont généralement mis en œuvre. On représente les variations de résistivité apparente le long du forage pour chacun d'eux (attention l'angle solide dans lequel le courant se distribue est de 4π et non de 2π comme pour les dispositifs de surface !).

Les graphes de résistivité apparente ainsi obtenus présentent une bonne discrimination verticale :ils permettent de mettre en évidence les variations lithologiques fines, ainsi que la présence de fractures ouvertes sèches (résistantes) ou colmatées d'argile (conductrices) ou des venues d'eau (conductrices). La comparaison entre les résultats des 3 outils permet de tirer des conclusions sur l'extension latérale des formations ou sur les pendages. Il faut une certaine prudence et une certaine expérience dans la lecture de ces graphes, car les résistivités apparentes conduisent, comme dans les méthodes géophysiques de surface, à des images déformées de la distribution des résistivités vraies.

L'interprétation qualitative de ces graphes fournit néanmoins une quantité d'information importante au géologue, à l'hydrogéologue et au géophysicien. Elle peut être considérée comme suffisante dans la très grande majorité des études d'aquifères de socle.

Des «corrections» peuvent être appliquées aux valeurs brutes mesurées, liées au diamètre du forage et à la résistivité du fluide de forage (corrections « d'effet de trou »). Elles sont souvent pratiquées encore aujourd'hui à l'aide des abaques Schlumberger publiés en 1947.

Des « corrections » plus élaborées peuvent être appliquées par la suite, qui tiennent compte de l'épaisseur limitée des formations (Gorbatchev, 1995) ; elles visent à calculer les résistivités vraies des formations. Elles constituent un premier pas vers une tentative d'inversion.

Une interprétation quantitative complète qui permet de calculer les résistivités vraies des bancs d'épaisseur limitée, à partir d'un modèle tabulaire, est possible aujourd'hui, à l'aide des programmes développés pour le sondage électrique, étendus aux diagraphies. Ils n'ont été utilisés qu'à titre expérimental dans cette étude.

- Les sondes « latérale» et « inverse» : Il s'agit cette fois-ci de dispositifs pôle dipôle. Seule une électrode est située à la surface du sol (respectivement B ou M), les 3 autres, mobiles sont situées à l'extrémité du câble. Compte tenu du principe de réciprocité, ces deux dispositifs sont strictement équivalents du point de vue théorique, c'est à dire qu'ils conduisent aux mêmes valeurs de résistivité apparente et aux mêmes graphes, quelle que soit la complexité des structures. On choisit l'une ou l'autre pour des raisons de qualité de la mesure. La résolution verticale est supérieure à celle des sondes « normales ». L'inversion, à partir d'un modèle tabulaire est également possible, à l'aide des programmes développés pour tout dispositif quadripolaire.

Ces sondes quadripolaires ont été développées pour l'industrie pétrolière. Elles sont désormais remplacées par des outils à 7 ou 9 électrodes ou plus, décrits ci-dessous.

- Les sondes «latérologs » : Développés initialement pour l'industrie pétrolière, elles commencent désormais à être appliquées en hydrogéologie.

Il s'agit de dispositifs multi-électrodes focalisants très bien adaptées à l'étude des bancs minces et des fractures fines.

2.2.4.5 Les sondes de conductivité – Les logs électromagnétiques à faible nombre d'induction

Classiquement dans la zone non saturée, les logs de résistivité ne peuvent pas être mis en œuvre, comme il a été dit ci-dessus. Les sondes à induction ont été développées dans l'industrie pétrolière pour réaliser des diagraphies dans les puits forés avec des boues à huile (non conductrices). Aujourd'hui leur utilisation se généralise, y compris dans les puits forés à l'eau, à condition qu'elle ne soit pas extrêmement conductrice puis désormais, en hydrogéologie et en génie civil, voire en pédologie, pour l'étude des zones non saturées. Elles n'ont pas été mises en œuvre au Burkina Faso.

Note : Les sondes à induction peuvent être combinées avec des sondes de susceptibilité magnétique.

2.2.4.6 Les sondes «sonic» ou acoustiques

Le paramètre physique mesuré est la vitesse de propagation des ondes ultrasonores ou acoustiques dans les formations géologiques. L'outil consiste en un mini dispositif de sismique réfraction, tel que décrit en géophysique de surface (§ 2.2.3.6).

Ces sondes permettent, comme les sondes de résistivité, de différentier et de caractériser chacune des formations, à l'aide de ce nouveau paramètre physique. Il est sensible, dans une certaine mesure, à la nature de la matrice, mais aussi et surtout à son degré d'altération, donc à la teneur en argile et à sa porosité. Il permet enfin de mettre en évidence le degré de fracturation et la présence de fractures ouvertes ou fermées. Potentiellement, c'est donc un outil qui pourrait rendre de grands services en hydrogéologie de socle.

Ces diagraphies seront introduites dans les études d'aquifères de socle vraisemblablement, lorsque les méthodes des sismique réflexion à haute résolution seront elle-mêmes généralisées en hydrogéologie. Elles commencent à l'être avec succès, sous la forme de la sismique dite « hybride » (réflexion + réfraction) dans l'hydrogéologie karstique (Frei, 2002).

2.2.4.7 Les diagraphies nucléaires – La sonde gamma / gamma ou sonde «densité»

Elles ont été développées pour l'industrie pétrolière, puis adaptées pour le Génie civil. Elles ont peu ou pas d'intérêt pour l'hydrogéologie de socle, de la même façon que la gravimétrie de surface, comme il a été dit ci-dessus, n'est pas utilisée en hydrogéologie.

Rappelons néanmoins qu'elles sont fondées sur le phénomène d'absorption des rayonnements gammas par les formations géologiques. Elles sont constituées d'une source de rayons gammas et d'un ou deux récepteurs situés à quelques centimètres ou dizaines de centimètres de celui-ci. L'absorption des rayons gammas est fonction de la densité électronique des constituants principaux des formations géologiques, donc de la densité des formations elles-mêmes.

Classiquement, elles permettent de différentier les formations géologiques par la nature de leur matrice - calcaire, dolomitique ou gréseuse – par leur teneur en argile; elles sont sensibles également à la porosité du fait de la faible densité de l'eau et de l'air, par rapport à la matrice. Elles peuvent s'appliquer dans les formations de socle cristallin ou métamorphique.

Outre le peu d'intérêt du paramètre densité en hydrogéologie, les contraintes de stockage et de mise en œuvre de ces sondes sont très grandes, du fait de la présence d'une source radioactive.

2.2.4.8 Les diagraphies nucléaires – La sonde « neutron » ou sonde « porosité»

Comme les précédentes, elles sont très utilisées en exploration pétrolière ; en revanche elles le sont de moins en moins en Génie civil, en raison des contraintes liées à la présence de la source naturelle de neutrons.

Elles sont fondées sur l'absorption des neutrons par les atomes d'hydrogène – les protons – qui ont pratiquement la même masse. Elles permettent donc de mesurer le volume d'eau – ou d'hydrocarbure en exploration pétrolière – dans les formations géologiques, ce qui donne accès après quelques corrections à la porosité.

Ce pourrait être un outil de première importance pour l'hydrogéologie de socle : en lui-même et pour l'étalonnage du Sondage par Résonance Magnétique Protonique décrit ci-après (§3.3). Les difficultés de stockage des outils et de leur mise en œuvre font qu'il n'en est rien.

Deux solutions pourraient être envisagées pour disposer de diagraphies de porosité :

(1) le remplacement de la source naturelle de neutrons par une source artificielle – le canon à neutrons –, ce qui a déjà été testé, mais non généralisé

(2) faire appel à un autre phénomène physique et développer des sondes de «permittivité diélectrique».

2.2.4.9 Les diagraphies d'imagerie de parois

Ce n'est pas la mesure d'un paramètre physique proprement dit qui importe avec ces outils ; c'est l'obtention d'une image très fine des parois des forages. Ces images sont d'un grand intérêt pour l'hydrogéologue car elle lui fournit des informations précieuses sur la géologie et sur la fracturation.

Il existe deux types d'outils :

- la télévision en lumière visible : elle nécessite des forages secs ou une eau particulièrement claire ; on obtient des photographies «vraies», développées, des parois ;

- la télévision ultrasonique ; elle peut être mise en œuvre quelle que soit la nature et la qualité du fluide de forage ; on obtient une « fausse » image fondée sur les contrastes de réflectivité ultrasonique des parois ; qualitativement, elle peut-être extrêmement proche de la précédente ;

2.2.4.10 Les diagraphies du fluide : température – conductivité

Ces diagraphies sont d'une grande importance pour l'hydrogéologue puisqu'elles permettent la mise en évidence directe des venues de fluide et leur caractérisation à l'aide de deux paramètres physiques clés, en eux-mêmes et comme aide éventuelle au géophysicien.

2.2.4.11 La mise en oeuvre des diagraphies au cours des travaux au Burkina Faso

Dans nos applications au Burkina Faso, nous avons utilisé à la fois une multi-sonde diagraphique construite par l'Institut de Géophysique de Lausanne et une sonde électrique mise au point spécialement par l'IRD. Les résultats obtenus sont d'un grand intérêt, comme il sera montré ultérieurement.

La multi-sonde de Lausanne comprend à la fois des outils de diagraphies électriques «classiques » (normales N 16'', N 32'', N 64'') et des outils de mesure de la température et de la résistivité du fluide présent dans le forage.

En résumé, les outils de la multi-sonde étaient les suivants :

- sonde de température du fluide
- sonde de résistivité du fluide
- sonde mono-électrode (single point)
- sonde de polarisation spontanée
- normales
- latérales.

Quant à la sonde IRD, il s'agit d'un outil artisanal innovant (pour lequel un brevet industriel a été obtenu pour l'UR Géovast), puisqu'il permet de réaliser des logs électriques dans la zone non saturée, c'est-à-dire, en l'absence d'eau. Les électrodes sont en fait des cylindres métalliques semi-ouverts maintenus en contact avec les parois du forage grâce à un ressort.

Chapitre 3

Les méthodes nouvelles mises en œuvre à Kombissiri et à Sanon Modélisations d'aquifères types

Les trois méthodes dites nouvelles, mises en œuvre à Kombissiri et à Sanon et traitées dans ce chapitre, appartiennent en fait à deux catégories différentes.

Les deux premières appartiennent à deux familles de méthodes classiques déjà décrites dans le chapitre précédent : (1) les méthodes électriques à courant continu (§ 2.2.3.3) et (2) les méthodes électromagnétiques Slingram à champ proche et à faible nombre d'induction (§ 2.2.3.4.4). Dans chacune de ces familles, de nouvelles techniques de mise en œuvre et d'interprétation ont été développées récemment ; c'est en ce sens que l'on peut parler de nouveauté. Elles permettent de réaliser ce qui est appelé aujourd'hui, des tomographies électrique et électromagnétique.

La troisième en revanche n'a pas été présentée précédemment. Pour le géophysicien classique, elle est nouvelle à la fois du point de vue de la date de son développement, du phénomène physique et de sa qualité d'outil de recherche directe de l'eau. Ils'agit du Sondage par Résonance Magnétique Protonique, dit «sondage RMP».

3.1 La tomographie électrique à courant continu

Ce nouveau type de mise en oeuvre des méthodes électriques, datant des années 1990, a été rendu possible grâce au développement des équipements d'acquisition de données et des programmes de traitement et d'inversion adaptés. Il permet de répondre à la demande d'études détaillées du proche sous-sol. Il est bien adapté aux profondeurs d'intérêt de la prospection des aquifères de socle.

3.1.1 Rappels : Historique – Principe – Mise en œuvre

• Du sondage électrique à la tomographie

Le sondage électrique, depuis plusieurs décennies, constitue un outil performant, mais il est d'application limitée en raison de la forte contrainte de tabularité. Il a le mérite de fournir des interprétations quantitatives, grâce aux programmes d'inversion. Les applications à l'exploration minière ont conduit à l'introduction des dispositifs dits abusivement « Dipôle-dipôle », constitués de 8 à 10 électrodes équidistantes, permettant de mieux étudier les variations latérales et verticales de la résistivité. Ce sont d'abord des outils d'imagerie grâce au tracé des « pseudo-coupes », qui ont souvent conduit à des erreurs d'interprétation.

Parallèlement, les cartographies Wenner avec les trois types de dispositifs (α , β et γ) se sont développées (Barker, 1978).

L'expérience acquise et les développements technologiques ont conduit à proposer les dispositifs multi-électrodes mis en œuvre aujourd'hui. Considérés comme des outils d'imagerie d'utilisation délicate au début, ils sont devenus des outils de tomographie très efficaces et très appréciés, du fait de la grande sensibilité du courant continu et du fait surtout, développement de programmes d'inversion efficaces. Les applications en pédologie et en hydrogéologie se sont multipliées au cours des années récentes (Robain et al, 1996; Vouillamoz et al, 2002).

La différence entre les images des réponses des interfaces sub-verticales et celles des réponses des interfaces horizontales classiques en sondage électrique, doit conduire les spécialistes du sondage électrique à une vraie reconversion.

• Principe – Phénomène physique

Le phénomène physique est le même qu'en sondage électrique, mais l'existence d'interfaces non parallèles à la surface du sol modifie profondément la distribution du courant dans le sous-sol et par conséquent le champ électrique à la surface du sol.

Alors que la discontinuité de la composante du champ électrique normale à toute interface entre deux milieux de résistivité différente joue un rôle non apparent en sondage électrique, c'est elle qui permet de bien comprendre la réponse des structures 2D et 3D.

L'analogie électrostatique, légitime puisque les équations de base liant les charges électriques ou le courant d'une part et le champ et le potentiel d'autre part, sont les mêmes qu'en courant continu, est de ce point de vue très démonstrative. Toute discontinuité de la composante normale du champ électrique en courant continu est équivalente à la création de charges statiques sur l'interface. Le champ coulombien créé par ces charges est le champ anomalique détecté et mesuré, ou champ secondaire, qui s'ajoute au champ primaire classique correspondant à l'environnement tabulaire (Kaufman, 1992). La densité surfacique de charges, donc l'amplitude de l'anomalie sont d'autant plus grandes, comme le montreront les équations ci-dessous (§ 3.1.3), que le champ primaire est plus grand, c'est-à-dire à proximité des électrodes d'émission, et que le contraste des résistivités est lui aussi plus grand, bien que le comportement asymptotique soit pratiquement atteint dès que le contraste est supérieur à 10, ou inférieur à 1 / 10.

Le formalisme de l'électrostatique n'est jamais utilisé pour la modélisation des structures compliquées, mais c'est une aide efficace à la compréhension des phénomènes physiques et de la sensibilité des dispositifs. Il est ainsi facile d'admettre que l'on puisse cartographier avec précision le sommet des parois latérales d'un graben étroit et non la position de sa base, quel que soit le dispositif d'ailleurs.

• Equations de base

Au sein d'un milieu de résistivité ρ (x, y, z), donc de conductivité σ (x, y, z), trois équations gouvernent la distribution du courant et du potentiel. Ce sont, avec les conventions classiques (les symboles en gras correspondant à des vecteurs) :

$$\mathbf{i} = \sigma \mathbf{E} \quad \text{ou} \, \mathbf{E} = \rho \, \mathbf{i} \tag{3.1}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{3.2}$$

$$\nabla .i = \frac{\partial q}{\partial t} + \delta(x) . \delta(y) . \delta(z)$$
(3.3)

Où q représente la densité de charge ponctuelle, le terme source en particulier.

Elles se combinent pour conduire à l'équation générale suivante :

$$-\nabla \left[\sigma(x, y, z) \cdot \nabla(x, y, z)\right] = \frac{\partial q}{\partial t} \,\delta(x_s) \cdot \delta(y_s) \cdot \delta(z_s) \tag{3.5}$$

Où :
$$x_s$$
, $y_s z_s$ sont les coordonnées du point source

qui se transforme dans les équations de Laplace et de Poisson bien connues, au sein d'un milieu homogène pour lequel σ est constant.

A l'interface entre deux milieux de conductivité différente, il existe deux conditions de continuité :

- le potentiel V (x, y, z) est continu ;
- la composante normale de la densité de courant $i_n(x, y, z)$ est continue.

Cette seconde condition implique la discontinuité de la composante normale du champ électrique, comme il a été dit ci-dessus.

La densité de charge surfacique équivalente à la discontinuité de E_n à l'interface entre deux milieux 1 et 2, peut être calculée à partir de l'équation suivante :

$$Z(p) = 2 \varepsilon_0 \left[(\rho 2/\rho 1) - 1 \right] / \left[(\rho 2/\rho 1) + 1 \right] E_{np}$$
(3.4)

Les quatre équations de base et les deux conditions de continuité, plus les conditions à l'infini suffisent à poser et à résoudre tous les problèmes de modélisation 1D, 2D et 3D.

• Modélisation

La réponse d'un demi-espace homogène à l'injection d'un courant I par l'intermédiaire d'une électrode ponctuelle située à sa surface est particulièrement simple :

$$V(r) = \rho I / 2 \pi r$$
 (3.6)

Par application des principes de superposition et de réciprocité, la réponse de tout dispositif multi-électrode peut être calculée; ce sont elles qui permettent de définir les coefficients géométriques de tout dispositif. Elle permet également d'avoir un premier accès à la définition de la sensibilité des dispositifs par l'intermédiaire de la densité de courant ou de la dérivée de Frechet (Loke, 1996).

La réponse d'un demi-espace tabulaire s'obtient à partir du calcul numérique d'une intégrale contenant la fonction de Bessel d'ordre 0 (J_0) ou d'ordre 1 (J_1), suivant le dispositif et une fonction caractérisant la structure K (λ , e_i , ρ_i), où λ est la variable d'intégration.

 $V(\mathbf{r}) = (\rho_1 I / 2 \pi \mathbf{r}) (1 + 2 r \int_0^\infty K(\lambda) J_0(\lambda \mathbf{r}) d\lambda)$ (3.7)

Le calcul de la réponse de structures 2D quelconques fait appel à deux types de méthodes classiques :

(1) la méthode des moments ou des équations intégrales

(2) la méthode des différences finies ou des éléments finis (Loke and Barker, 1995, 1996a et b).

Le programme Res2Dmod (Loke, 1995, 1996) utilisé dans notre étude de modélisation électrique, met en œuvre les techniques du deuxième type. Nous avons systématiquement choisi la méthode des différences finies, parce qu'elle est la plus performante en l'absence de relief.

Des exemples de modélisations appliquées à des modèles types d'aquifères de socle seront présentés ci-dessous (§ 3.1.2).

• Réalisation d'un profil tomographique ou panneau électrique

On choisit un profil dont la direction est perpendiculaire à la direction géologique principale attendue après les analyses préliminaires (hypothèse 2D) et on implante un grand nombre d'électrodes équidistantes. Il faut choisir la distance inter-électrode et la longueur maximale du dispositif. Ce choix résulte d'un compromis entre la résolution souhaitée en surface, la logistique et le temps d'exécution. Ces choix dépendent également du dispositif retenu.

Choix du dispositif :

Calculer la réponse du modèle supposé pour différents dispositifs est une bonne façon de sélectionner le dispositif le plus approprié.

L'expérience acquise permet à priori de classer les dispositifs en fonction de critères de sensibilité, mais aussi de facilité de mesures et de logistique.

D'abord, le dispositif Pôle-pôle : il est théoriquement le dispositif optimal puisqu'il permet de connaître la réponse impulsionnelle du terrain. Cependant, Il présente deux inconvénients majeurs :

- la nécessité de placer deux électrodes à l'infini, ce qui peut être impossible du point de vue de la logistique ou de la sécurité (zones boisées, pastorales, habitées) ;

 le bruit de mesure peut être élevé du fait que le bipôle de mesure peut avoir une dimension de plusieurs centaines de mètres ; cet inconvénient majeur, d'autant plus important que la profondeur d'investigation est grande conduit généralement à ne pas retenir ce dispositif.

Ensuite, le dispositif Pôle-dipôle, ou demi-Schlumberger : il pallie presque les deux inconvénients mentionnés ci-dessus :

- une seule électrode est située à l'infini.
- le niveau de bruit est minimal car le dipôle de mesure est de dimension minimale, mais le niveau de signal peut être faible également ;
- les deux dispositifs avant et arrière étant indépendants, il est souhaitable de les mettre en œuvre successivement systématiquement. En effet, cela multiplie par 2, le nombre de données indépendantes.

Ensuite, le demi-Wenner, « Avant » et « Arrière » successivement : ils présentent une résolution inférieure au précédent et une couverture spatiale moins dense.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est un des meilleurs dispositifs, lorsqu'aucune électrode ne peut être placée à l'infini. Le maximum d'embrayages doit être favorisé.

L'association Wenner alpha + Wenner bêta est une bonne alternative au précédent, si l'amplitude du signal s'avérait trop faible avec un dipôle de mesure de type Schlumberger.

Note : En réalité, cette référence aux dispositifs classiques définis pour le sondage électrique n'est pas utile. Il est préférable de se poser la question en termes de qualité d'échantillonnage.

<u>Note</u>: Le problème de la convention de représentation des données brutes sera examiné ultérieurement, dans le chapitre 4 « Résultats ».

• Traitement

Il s'agit surtout d'un contrôle rigoureux de la qualité des mesures et des résultats. L'élimination des valeurs aberrantes est toujours souhaitable avant de procéder à l'inversion.

Les programmes de correction des à-coups de prise développés par Bobatchev (X2IPI, 2002) sont certainement d'un grand intérêt lorsque des hétérogénéités superficielles de dimensions inférieures à la distance inter-électrodes sont présentes. Ils n'ont pas été testés au cours de cette étude.

• Inversion

Plusieurs programmes sont proposés pour réaliser des inversions 2D (RESIXIP2D®, Interpex, 1994 ; Res2Dinv®, Geotomography software, 1996 ; et SensInv2D®, 2002).

Seul Res2Dinv (version 3.51i, 2003), développé par Loke (1996) a été testé dans cette étude. L'un de ces avantages est sa rapidité d'exécution.

Les deux types d'inversion proposés : option « inversion lisse » ou « inversion robuste », seront présentés et discutés dans le chapitre 4, lors de leur application aux données expérimentales.

• Interprétation

L'interprétation qualitative des données de résistivité apparente n'est pas conseillée car les pseudos-coupes sont toujours des images très déformées de la réalité géologique.

L'interprétation proprement dite devrait être faite par un géologue/géophysicien. Il faut en effet faire appel au raisonnement et aux connaissances géologiques alliés à une bonne connaissance de la géophysique. Il faut en particulier faire attention à l'influence des effets perturbateurs sur la section obtenue : effets de surface (cuirasse résistante par exemple), aux effets de bords.

L'interprétation consiste d'abord à commenter les coupes qui résultent des inversions, où les valeurs de résistivité sont dites « vraies » ou « interprétées » et où l'axe des ordonnées est gradué en profondeurs « vraies », en intégrant toutes les informations que l'on possède (les données de bibliographie jusqu'aux observations de terrain). Le choix de l'échelle des couleurs est important ; le choix automatique est rarement le plus adapté ; la perception de la situation géologique peut être profondément différente selon ce choix.

De plus la solution n'est pas unique ; elle peut être très dépendante du modèle initial et des paramètres choisis lors de l'inversion, il est donc indispensable de tester la robustesse des principaux traits présents sur une coupe, par différents calculs directs et ou inverses, 1D ou 2D, avant de tirer les conclusions géologiques ou hydrogéologiques.

3.1.2 Modélisation d'aquifères de socle types - Etude de faisabilité

• Le modèle d'aquifère et les dispositifs de mesure

Le modèle a été construit à partir des résultats des travaux de reconnaissance et de contrôle obtenus sur les deux sites de Kombissiri et de Sanon et à partir des premiers résultats géophysiques. Il est destiné à illustrer les capacités et les limites de la tomographie et des sondages électriques et les précautions à prendre, lors de leur interprétation.

Le modèle initial proposé (Modèle 1) est représenté, **figure 3.1.1** ; pour simplifier la discussion, on considère qu'il est orienté Ouest-Est.

Il comporte :

(1) L'aquifère proprement dit, qui est constitué de couches horizontales représentant successivement avec la profondeur :

- les argiles
- les arènes
- le socle fissuré
- le socle sain

Une intercalation conductrice horizontale a été introduite pour simuler des arrivées d'eau importantes en profondeur; les résistivités ont été choisies à partir des diagraphies de Kombissiri. Trois drains verticaux schématiques – conducteurs - sont représentés; ils seront à volonté supprimés ou non, afin d'étudier la sensibilité des dispositifs, à leur présence.



Figure 3.1.1 : Modèle initial d'aquifère de socle (Modèle 1)

NOTE : Dans ce chapitre et danx ceux qui suivent, le terme de «drain vertical» apparaît plusieurs fois. C'est souvent un abus de langage; il faudrait la plupart du temps, lui substituer le terme de «conducteur vertical». En effet il est généralement fait référence à une hypothèse ou à un modèle liés à la résistivité, plutôt qu'à une situation hydrogéologique assurée.

- (2) La couverture comprend deux compartiments : l'un classique, situé à l'ouest où les argiles sont affleurantes et l'autre à l'Est, où il existe une couverture latéritique d'une épaisseur moyenne voisine de 8 m ; cette épaisseur varie soit à cause de son toit, soit à cause de son mur ; ce choix a été fait à la suite de l'étude du site de Sanon.
- (3) A la surface de cet ensemble peuvent être placées à volonté, des hétérogénéités superficielles, qui simulent un bruit géologique classique dans une zone de socle; elles sont une représentation schématique et légèrement accentuée des conditions superficielles rencontrées sur le profil 1 de Kombissiri 2.

Le dispositif de mesure initial est composé d'électrodes espacées de 4 m, comme celui qui a été utilisé sur le terrain. Le dispositif actif le plus long comporte 48 électrodes, soit une distance active maximale de 192 m. Lesdeux axes sont gradués en mètres.

Afin de mieux évaluer les limites liées à la profondeur d'investigation des quadripôles et de simuler les à-coups de prise, les réponses de dispositifs homothétiques, avec des espacements de 8 m, puis de 12 m ont été calculées. Le modèle initial a alors été prolongé vers l'Est avec mise en place de deux drains supplémentaires, plus larges que les précédents (modèle 2); il est représenté sur la **figure 3.1.2**.



Figure 3.1.2 : Modèle d'aquifère de socle (Modèle 2)

Les modèles tabulaires représentatifs des stations d'abscisse, X = 80, X = 256 et X = 352 sont schématisés ci-dessous (figure 3.1.2.3).



Figure 3.1.3 : Schéma des modèles ponctuels aux points 80, 256 et 352 m

• Modélisation – Représentation des pseudo-coupes de résistivités apparentes

Le programme **Res2DMod**[®] a été utilisé pour la modélisation, avec les paramètres retenus pour les études expérimentales des aquifères ; ces paramètres sont présentés et discutés dans le chapitre 4 « Résultats ».
Le mode de représentation « X2IPI » discuté également dans le chapitre 4, a été choisi pour quatre des dispositifs principaux.

Bien qu'il ait été dit précédemment, que l'interprétation qualitative des pseudo coupes de résistivités apparentes n'était pas conseillée, ce sont elles qui sont présentées et commentées dans un premier temps. Cela permet :

- d'une part de mettre en évidence «les déformations» de ces images, par comparaison avec le modèle géologique simple connu ;

- d'autre part d'illustrer visiuellement l'incidence des hétérogénéités superficielles et des drains profonds, superposée à la réponse de l'aquifère tabulaire ; l'échelle des couleurs a été choisie automatiquement ; elle est indépendante, pour chaque pseudo-coupe présentée. ;

- enfin de comparer entre elles les images brutes obtenues avec et sans tel ou tel élémént, ce qui fournit un premier élément de réponse, quant à la sensibilité des dispositifs audit élément.

> Modèles 1A (avec drains) et 1B (sans drains) (figure 3.1.4) :

Seuls les résultats concernant les dispositifs présentant la meilleure sensibilité aux conducteurs verticaux (les dispositifs Wenner β et Pôle-dipôle) sont représentés. On peut en tirer deux conclusions :

- (1) On ne remarque aucune différence entre les modèles A et B, sur la moitié Est du profil ; toutes les hétérogénéités apparentes sont liées aux conditions superficielles et aux variations d'épaisseur de la latérite ; la profondeur d'investigation des dispositifs permet à peine d'atteindre le sommet des couches conductrices, le drain ne peut être détecté ;

- (2) On note une très légère différence entre les modèles A et B en profondeur sur la moitié Ouest du profil, la profondeur d'investigation des dispositifs est relativement adaptée ; l'absence d'hétérogénéités de surface est également favorable ; seul le dispositif Pôle-dipôle permet de soupçonner qu'il peut exister un conducteur en profondeur.

Cette analyse qualitative devrait être confirmée par les résultats de l'inversion.

Modèles 2A (avec drains) et 2B (sans drains) (figure 3.1.5 a et b) :

Les résultats des quatre dispositifs classiques sont présentés : Pôle-pôle, Wenner α , Wenner β et Pôle-dipôle AMN. Trois conclusions peuvent être tirées :

- (1) La constatation majeure est la difficulté qu'il y a, à première vue, à séparer l'effet des hétérogénéités superficielles sur le conducteur tabulaire, de celui des drains. Il semble exister un conducteur enraciné sur le modèle 2A, à l'aplomb de la station 760, avec les dispositifs Wenner et Pôle-dipôle.

- (2) Le caractère haché de la base de la latérite et du conducteur sous-jacent résulte de l'effet des hétérogénéités superficielles et des variations de profondeur de son toit. Ces perturbations « verticales » se propagent jusqu'aux pseudo-profondeurs maximales pour le Pôle-dipôle.

- (3) Seul le Pôle-pôle permet d'atteindre avec confiance le toit du socle fissuré.



Figure 3.1.4 : Résultats de la modélisation directe

- I : Modèle 1A (Avec drains) (Wenner Bêta)
- II : Modèle 1B (Sans drains) (Wenner Bêta)
- III : Modèle 1A (Avec drains) (Pôle-dipôle)
- IV : Modèle 1B (Sans drains) (Pôle-dipôle)



Figure 3.1.5 a (Avec drains) : Résultats de la modélisation directe multi-dispositifs A : Pôle-pôle ; B : Wenner Alpha ; C : Wenner Bêta ; D : Pôle-dipôle Avant



Figure 3.1.5 b (sans drains) : Résultats de la modélisation directe multi-dispositifs A : Pôle-pôle ; B : Wenner α ; C : Wenner β ; D : Pôle-dipôle

• Inversion – Vérification de la tabularité de la structure profonde et de l'existence des drains

Le programme Res2Dinv a été utilisé pour réaliser les inversions à partir des résultats des modélisations, avec les options et les paramètres retenus pour l'inversion des données expérimentales qui sont résumés dans le chapitre 4.

Un essai a été fait en ajoutant 10 % de bruit aléatoire et en choisissant une maille de taille différente à la modélisation et à l'inversion, sans modification des résultats.

Réponse d'un aquifère tabulaire, sans drains, avec hétérogénéités superficielles

Modèle 1B (sans drains) (figure 3.1.6) : Les résultats des inversions pour les quatre dispositifs classiques (Pôle-pôle, Wenner α , Wenner β , et Pôle-dipôle avant) sont présentés pour le modèle sans drains, avec les hétérogénéités superficielles. La difficulté principale est liée à l'existence de l'épaisse couche latéritique à l'Est. Quatre conclusions peuvent être tirées :

- (1) On constate que le Pôle-pôle seul met en évidence une continuité possible de l'aquifère sous la latérite. Le seul problème pour les autres dispositifs est lié à la profondeur d'investigation ;

- (2) L'effet de bord lié à la limite de la cuirasse est bien sûr insuffisamment corrigé pour tous les dispositifs ;

- (3) Le toit du socle fissuré est cartographié à l'ouest par tous les dispositifs.

- (4) Les effets des hétérogénéités de surface sont bien corrigés par l'inversion pour tous les dispositifs ; en revanche, il reste des ondulations en profondeur liées aux variations d'épaisseur de la cuirasse.



Figure 3.1.6 : Résultats d'inversion multi-dipositifs du modèle 1B **A** : Pôle-pôle ; **B** : Wenner α ; **C** : Wenner β ; **D** : Pôle-dipôle

➢ Modèle 2B (sans drains) (figure 3.1.7) :

Trois conclusions principales se dégagent :

(1) Le dispositif Pôle-pôle introduit une variation latérale de résistivité du conducteur qui conduit à son épaississement et donc à un approfondissement du socle vers l'Est ; aucune contrainte de continuité latérale n'étant imposée, la loi d'équivalence s'applique.

(2) Les trois autres dispositifs donnent des images de bonne qualité.

(3) On note des ondulations en profondeur, c'est-à-dire des surcreusements locaux, qui ne sont pas placés aux mêmes endroits pour tous les dispositifs et qui sont sans doute liées aux variations d'épaisseur de la cuirasse résistante.



Figure 3.1.7 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 2B **A** : Pôle-pôle ; **B** : Wenner α ; **C** : Wenner β ; **D** : Pôle-dipôle



• Sensibilité aux drains, en présence d'hétérogénéités superficielles

Figure 3.1.8 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 1A
A : Pôle-pôle ; B : Wenner α ; C : Wenner β ; D : Pôle-dipôle

Commentaires :

- (1) Aucun drain n'est visible sous la cuirasse ;

 (2) Le Wenner α très légèrement et le dispositif AMN plus nettement peuvent laisser penser qu'il existe un drain sous les argiles, à l'ouest ; l'absence de drain pour Wenner β pourrait être lié au code des couleurs.



Figure 3.1.9 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 2A
A : Pôle-pôle ; B : Wenner α ; C : Wenner β ; D : Pôle-dipôle

Commentaires :

Tous les dispositifs, sauf le Pôle-pôle montrent bien la présence de poches conductrices particulières, par comparaison avec les situations sans drains notamment.

• Synthèse – Recommandations

Trois conclusions principales se dégagent de cette étude des réponses d'un modèle d'aquifère théorique.

(1) Des variations importantes et relativement brusques des conditions de surface impriment toujours leurs marques dans les images dites profondes, après inversion. C'est vrai lorsqu'une cuirasse ou des lambeaux de cuirasse démantelés sont présents ; c'est vrai aussi pour des changements de conditions superficielles moins spectaculaires.

Il faut donc être particulièrement vigilant lorsqu'on interprète des éléments profonds des coupes obtenues après inversion. Il faut impérativement vérifier leur indépendance des variations des conditions de surface, par l'examen détaillée des corrélations ou des anticorrélations verticales et au besoin par des modélisations directes simplifiées. Il faut pour conclure, vérifier la robustesse des traits sur lesquels reposeront les interprétations géologiques et hydrogéologiques.

(2) Des variations lentes des conditions de surface peuvent elles aussi conduire à des conséquences importantes sur les horizons profonds, telles que des variations lentes de la profondeur du socle, en raison de la loi d'équivalence classique, lorsqu'un terrain conducteur est situé entre deux horizons résistants.

(3) La mise en évidence de drains sub-verticaux.

Les sondages électriques

Le sondage électrique ne s'applique, en toute rigueur, qu'à l'étude des structures tabulaires. Il est intéressant de profiter d'un programme de modélisation 2D pour illustrer les déformations subies par les sondages électriques en présence d'hétérogénéités superficielles (marqués par les à-coups de prise), de contacts sub-verticaux proches de la surface (la limite d'une cuirasse de plusieurs mètres d'épaisseur) et de structures sub-verticales en profondeur (les drains).

Quelques uns de ces résultats sont illustrés sur les **figures 3.1.10** à **3.1.13**. Les enseignements que l'on en tire sont une confirmation des règles déjà connues, mais l'aspect quantitatif est un complément intéressant.



Figure 3.1.10 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 80 mètres



Figure 3.1.11 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 192 mètres



Figure 3.1.12 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 256 mètres



Figure 3.1.13 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 288 mètres

- (1) Les à-coups de prise liés à la position des dipôles de mesure par rapport à des hétérogénéités superficielles peuvent être très importants avec les dispositifs Schlumberger, donc avec les Pôles-dipôles également. Ils peuvent atteindre une décade sur l'axe de résistivité ou plus. Ils devraient affecter les deux demis dispositifs d'une façon voisine. Si l'on peut diagnostiquer clairement le problème, il n'est pas si simple de décider du sens et de l'ampleur de la correction. Avec tous les autres dispositifs pour lesquels il n'y a pas d'embrayages, le diagnostic n'est pas possible et les corrections non plus par conséquent. L'interprétation 1D sera toujours erronée, avec en général, l'introduction de couches horizontales fictives.
- (2) La déformation de sondages réalisés à proximité de la limite d'une cuirasse épaisse est tellement importante que le non respect de l'hypothèse de tabularité est claire et qu'une inversion de type 1D ne peut pas être tentée, quel que soit le dispositif.
- (3) Les drains tels qu'ils ont été modélisés, ne conduisent pratiquement à aucune déformation des sondages électriques, quel que soit le dispositif, si bien qu'une interprétation 1D conduira en général à une image acceptable de la structure tabulaire moyenne autour du drain. Néanmoins, il paraît évident que si le drain devenait beaucoup plus important en largeur et que sa tête devenait très proche de la surface du sol, la déformation de sondage serait plus importante.

3.2 Sondage et tomographie électromagnétiques Slingram à nombre d'induction faibles et intermédiaires

Compte tenu du succès du sondage électrique et de la tomographie électrique à courant continu pour la cartographie fine des premiers mètres du sous sol, il était tentant de tester expérimentalement la sensibilité et les limites des dispositifs Slingram classiques sur les mêmes profils, compte tenu des différences de mise en oeuvre entre les deux familles de méthodes et en particulier de l'absence d'électrodes dans le cas de l'électromagnétisme. C'est ce qui a été fait sur les plates-formes de Kombissiri.

3.2.1 Rappels : Historique – Principe – Mise en oeuvre

• Du conductivimètre électromagnétique à l'étude des structures 1D, 2D et 3D

Le domaine d'application des premiers dispositifs Slingram à faibles nombres d'induction n'a cessé de s'élargir depuis leur création.

Très vite, on a souhaité transformer une carte de conductivité apparente en une carte d'épaisseur du terrain superficiel. Il a suffit de mesurer deux valeurs de conductivités apparentes indépendantes et de faire une hypothèse sur le rapport entre les résistivités des deux formations concernées. Il était alors tentant de tester l'intérêt d'un sondage géométrique constitué de 6 valeurs de conductivités apparentes à l'aide de l'EM-34 de Geonics pour l'étude des structures sub-tabulaires.

Parallèlement, l'obtention de valeurs de conductivité apparentes négatives en présence de structures non tabulaires a conduit à proposer l'utilisation de ces équipements pour la détection de contacts ou d'accidents sub-verticaux, d'où l'intérêt de leur application à l'étude des aquifères discontinus.

• Principe – Phénomène physique

Au phénomène de conduction, à la base des méthodes électriques à courant continu et à l'analogie électrostatique, il faut ajouter les phénomènes d'induction lorsqu'on traite des méthodes électromagnétiques.

Faibles nombres d'induction

Lorsqu'il s'agit des méthodes Slingram à faible nombre d'induction au sens strict, mises en œuvre par exemple avec les équipements Geonics EM-31, 34 et 38 dans leur domaine propre, le phénomène d'induction est mis à profit seulement pour le couplage entre l'émetteur et le terrain et entre le récepteur et le terrain. En revanche, il est considéré comme négligeable dans le terrain lui-même.

La distribution du courant dans le sol en fonction de la distribution des résistivités, obéit à des lois très proches de celles du courant continu : on parle de « canalisation du courant » (current chanelling) liée à l'existence de formations de résistivité différentes.

Au sein d'un demi-espace homogène, à la surface duquel est situé le dispositif, le phénomène physique peut-être décrit de la manière suivante, fig. 3.2.1.



Fig. 3.2.1 – Principe des méthodes Slingram à faibles nombres d'induction (d'après Chouteau – 1995)

- le champ primaire créé par l'émetteur (Bp) est en phase avec le courant qui circule dans la bobine; ses lignes de force sont celles d'un champ dipôlaire;
- les courants secondaires induits (Is) par la variation sinusoïdale du flux magnétique au sein du demi-espace circulent dans des plans horizontaux ; les filets de courant circulaires peuvent être considérés comme des images de la boucle émettrice ; ces courants sont en quadrature de phase par rapport au courant primaire ; leur intensité est d'autant élevée que la conductivité du milieu est grande, elle décroît rapidement avec la profondeur.
- le champ magnétique secondaire créé par ces courants secondaires (Bs) est d'intensité très faible par rapport au champ primaire, il est également en quadrature avec ce dernier, ce qui lui permet d'être mesuré avec une relative précision; son amplitude est proportionnelle à celle des courants induits, et proportionnelle à la conductivité vraie du milieu.

Au sein d'un demi-espace tabulaire dont les interfaces sont situées dans la zone de sensibilité du dispositif, c'est-à-dire à des profondeurs maximales de l'ordre de grandeur de la distance émetteur-récepteur, on mesure une conductivité apparente, comme en sondage électrique. Si on dispose de 6 dispositifs différents caractérisés par 6 profondeurs d'investigation différentes, par exemple les 3 dispositifs EM-34 en position HCP et VCP, on peut réaliser un sondage électromagnétique géométrique à faible nombre d'induction fournissant 6 valeurs indépendantes de conductivité apparente.

Le phénomène physique est particulièrement simple et il est confirmé par les équations dans ce domaine asymptotique fournies ci-dessous ; le champ secondaire total mesuré est la somme des contributions de chaque terrain pris séparément ; il n'y a pas d'interactions entre les couches. La conductivité apparente pour tout dispositif est égale à une somme pondérée des différentes conductivités vraies.

En présence de structures 2D ou 3D, les lignes de courant sont profondément modifiées par l'existence d'interfaces de résistivité non horizontales ; on parle de canalisation du courant. Ces déformations des lignes de courant se manifestent par des variations importantes de l'amplitude de la composante verticale du champ secondaire mesurée à la surface du sol, au point que des inversions du champ sont possibles, qui conduisent par l'application automatique de la formule de conversion à des valeurs négatives de la conductivité apparente. Cette application est voisine de celle du VLF-Inclinaison, mais elle met en œuvre une source proche.

Nombres d'induction intermédiaires

Lorsqu'il s'agit d'utiliser l'équipement Apex MaxMin pour les mêmes applications que les équipements Geonics, les résultats sont les mêmes, tant que l'on s'adresse aux basses fréquences c'est-à-dire, tant que l'on reste dans le domaine des faibles nombres d'induction. Pour une même distance émetteur-récepteur, lorsque la fréquence croît, on doit prendre en compte l'induction entre les filets de courant dans les formations géologiques, donc l'effet de peau et le champ secondaire induit dans les cibles conductrices confinées, l'effet « Vortex », qui s'ajoute au champ secondaire représentatif de la canalisation du courant dans le demiespace environnant.

• Equations de base

Le problème général des méthodes électromagnétiques

Ce sont les 4 équations de Maxwell classiques, qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques.

Traitons des dispositifs HCP seulement ; le terme source pour le dipôle magnétique vertical est :

$$M = M_0 e^{-i\omega t} z_0$$
 (3.2.1)

✓ A - Au sein d'un milieu conducteur homogène, l'expression de la composante verticale mesurée au récepteur situé à une distance r de l'émetteur est :

Hz =
$$\frac{M}{4\pi r^3} e^{ikr} (1 - ikr - k^2 r^2)$$
 (3.2.2)

✓ B - A la surface d'un demi-espace tabulaire constituée de n couches, son expression est :

$$H_{z} = \frac{M}{4\pi r^{3}} \int_{0}^{\infty} \left(2\frac{x_{3}}{x} + \frac{x_{1}}{R_{n}^{*}}\right) J_{0}(x) dx = H_{z}^{(0)} h_{z} \qquad (3.2.3)$$

Où : $h_{z} = \int_{0}^{\infty} \left(2\frac{x^{3}}{x} + \frac{x_{1}}{R_{n}^{*}}\right) J_{0}(x) dx$
 $R_{n}^{*} = \operatorname{coth} \left\{ x_{1}\left(\frac{H_{1}}{R}\right) + \operatorname{coth}^{-1}\frac{x_{1}}{x_{2}} \operatorname{coth} \left[x_{2}\frac{H_{2}}{R} + \operatorname{coth}^{-1}\frac{x_{2}}{x_{3}} \operatorname{coth} \left(x_{3}\frac{H_{3}}{R} \dots\right)\right] \right\}$
 $X_{i} = \sqrt{x^{2} - ki^{2}r^{2}}$
 $H_{z}^{(0)} = \frac{M}{4\pi r^{3}}$

✓ ✓ C-Etude des structures 3D

Les sources étant toujours 3D, l'étude des structures 2D ne présente pas d'intérêt particulier. Les équations différentielles du premier et du second ordre dérivées des équations de Maxwell sont écrites dans un repère cartésien.

Leur résolution se fera de manière numérique par les méthodes classiques, comme en courant continu, après discrétisation du milieu.

> Cas particulier des faibles nombres d'induction

Lorsque cette condition est strictement vérifiée, la composante verticale du champ magnétique total mesurée au récepteur est constituée d'une composante en phase et d'une composante en quadrature avec le courant qui circule dans l'émetteur.

La composante en phase correspond au champ primaire, qui est le même que le champ dans l'air. Son amplitude est par conséquent connue lorsque la géométrie et le moment de l'émetteur sont connus ; la différence de potentiel qu'il induit dans le récepteur est compensée.

La composante en quadrature en revanche correspond strictement au champ secondaire induit dans le sous sol, c'est elle qui porte l'information « conductivité ».

✓ A - A la surface d'un demi-espace homogène, l'expression de la composante verticale du champ secondaire, c'est-à-dire de la composante en quadrature du champ total, ou de sa composante « imaginaire » est :

$$H_{z'} = M\left(\frac{\mu\omega}{4\pi r}\right)\sigma \tag{3.2.4}$$

C'est elle qui permet de calculer la conductivité vraie d'un demi-espace homogène, puis par la suite, les conductivités apparentes, quelle que soit la complexité des structures.

✓ B - A la surface d'un demi-espace tabulaire, son expression est la suivante :

$$H_z^{s} = \left(\frac{M}{16\pi r}\right) \sum_{i} k.i^2 . Q_i^{E}$$

$$O\dot{u}: k.i^2 = u \omega$$
(3.2.5)

Et Q_i^Z ne dépend que des épaisseurs des différentes couches et de r

A titre d'exemple pour 3 terrains :

$$Q_{1}^{Z} = 1 - \frac{r}{\sqrt{4H_{1}^{2} + r^{2}}}$$

$$Q_{2}^{Z} = \left(\frac{r}{\sqrt{4H_{1}^{2} + r^{2}}}\right) - \left(\frac{r}{\sqrt{4(H_{1} + H_{2})^{2} + r^{2}}}\right)$$

$$Q_{3}^{Z} = \frac{r}{\sqrt{4(H_{1} + H_{2})^{2} + r^{2}}}$$

✓ C - Etude des structures 3D

Les expressions asymptotiques des équations différentielles seules sont prises en compte. Elles ne concernent que les composantes en quadrature des champs.

• Les nombres d'induction intermédiaires

Les expressions complètes du champ doivent être prises en compte. En raison de l'effet de peau d'une part et en raison des courants induits dans les structures conductrices confinées d'autre part – effet Vortex – le champ secondaire, c'est-à-dire le champ créé par les courants induits dans l'ensemble des structures géologiques étudiées, comporte une composante en phase avec le champ primaire, défini précédemment comme le champ dans

l'air, et une composante en quadrature. Les équipements mesurent, en général, d'une part l'anomalie exprimée en % de la composante en phase – cette mesure est possible puisque le champ primaire est compensé – et d'autre part, le rapport entre la composante en quadrature et le champ primaire – rapport à partir duquel on calcule généralement la conductivité apparente à partir de la formule du demi-espace homogène.

• Modélisations

> Cas particulier des faibles nombres d'induction

✓ A – Etude des structures sub-tabulaires – 1D

Les expressions asymptotiques ont été présentées ci-dessus pour le dispositif HCP : les calculs analytiques sont simples et robustes.

Deux logiciels ont été testés : **Emdirya**, de l'IRD et **Selma** (**LFMVD** et **LFMHD**) de l'université d'Aarhus (Danemark). Pour chacun de ces logiciels, les résultats sont fiables pour la configuration HCP (ou MVD). Pour la configuration VCP (ou MHD) en revanche, des différences importantes entre les deux logiciels et avec les résultats obtenus en utilisant les équations complètes ont été notées ; Nous n'avons pas retenu les résultats issues des équations avec des hypothèses d'approximations.

✓ B – Etude des structures 3D

Il n'existe aucun logiciel utilisant les expressions asymptotiques.

Les nombres d'induction intermédiaires

✓ A – Etude des structures sub-tabulaires – 1D :

Les équations générales des potentiels et des champs s'expriment par des transformées de Hankel (§ 3.2.3.1B). Ces intégrales ne peuvent être calculées que numériquement.

Tous les logiciels testés utilisent pour les nombres d'induction intermédiaires, le calcul par convolution à l'aide des filtres établis par Anderson (1979).

Trois logiciels principaux ont été testés systématiquement : **Pcloop** de Geonics®, **Emdirus** de l'IRD et **Selma** d'Aarhus. Le premier a finalement été abandonné.

Plusieurs tests ont été réalisés à l'aide de **Emdirus** et **Selma** avec les seules configurations EM 34, sur des modèles à trois terrains et sur l'influence de l'altitude des dispositifs au-dessus du sol.

Pour cette gamme de nombres d'induction très proches du domaine asymptotique les différences entre les résultats des deux logiciels sont toujours inférieures à 2 %.

L'influence de la hauteur des dipôles au dessus du sol est plus sévère bien entendu pour les dispositifs de petites dimensions HCP 10 et VCP 10. D'une manière générale, la composante en phase croit lorsque le dispositif s'élève au dessus du sol pour les deux configurations. La composante en quadrature croit également pour VCP alors qu'elle décroît pour HCP.

✓ B – Etude des structures – 3D :

Le logiciel utilisé pour ces modélisations est **Emigma®**, développé par la société PetRosEikon (2000) du Canada. Il propose trois algorithmes différents pour la modélisation des structures 3D et couvrent théoriquement toutes les méthodes électromagnétiques fréquentielles et temporelles.

Les trois algorithmes sont fondés sur la méthode des équations intégrales (Hohmann, 1975), qui est particulièrement adaptée au phénomène physique de la canalisation du courant plutôt qu'à l'induction. Seule la cible est discrétisée sous la forme de prismes parallélépipédiques en général elle est située dans un environnement tabulaire, dont la réponse est calculée analytiquement ou semi-analytiquement. Le programme calcule les densités de courant au sein de chaque maille à l'intérieur de la cible.

Les trois options sont :

• Localized Non Linear approximation (LN) :

C'est l'option de base. La spécificité de ce logiciel par rapport aux précédents fondés sur les équations intégrales est dans la méthode de calcul des densités de courant au sein des mailles. Elles sont calculées ici par une transformation semi-analytique à partir des champs incidents et non sous la forme de fonctions spécifiques qui inter-agissent l'une avec l'autre.

La transformation est représentée par une matrice 3 x 3; les calculs sont extrêmement rapides ; le gain de temps est d'autant plus important que le nombre de mailles est plus grand

Cet algorithme au sens strict est limité au phénomène physique de la canalisation de courant et non à l'effet « Vortex ».

• Inductive Localised Non Linear approximation (ILN) :

C'est une extension de l'algorithme précédent, qui permet de prendre en compte le phénomène inductif.

La transformation semi-analytique qui permet de calculer les densités de courant à l'intérieur de chaque maille est représentée par une matrice 12 x 12. Elle concerne un groupe de points situés autour du point sélectionné dans la maille considérée.

• VHPLATE

Il s'agit d'étudier la réponse de plaque mince ; celle-ci est discrétisée sous la forme de $21 \times 21 = 442$ mailles minces. L'algorithme est le même que les précédents ; il est fondé sur les équations intégrales.

Le choix du nombre et de la taille des mailles est l'un des points les plus importants lors de l'utilisation de ce logiciel. Il sera traité en partie lors de la présentation des résultats de modélisation ci-dessous.

• Réalisation de sondages, de profils et de cartes électromagnétiques

Les dispositifs Slingram sont toujours mis en œuvre le long de profils perpendiculaires à la direction géologique principale en général. La distance entre les stations le long des profils, qui définit le pas d'échantillonnage spatial, est choisie en fonction des hétérogénéités superficielles et des dimensions des cibles. Un espacement de 5 à 10 mètres avec l'EM-34 ou le MaxMin est classique en prospection.

Réaliser un profil de sondages avec le maximum de valeurs mesurées pour chaque sondage, consiste à répéter le même profil avec le même pas d'échantillonnage spatial, avec les 6 configurations : HCP et VCP – 10, 20 et 40 –. C'est une opération qui a été testée sur le site de Kombissiri, afin d'évaluer les performances intrinsèques de cette technique, de les comparer à celles des panneaux électriques et d'estimer la place qu'elle pouvait occuper dans l'étude des aquifères de socle.

Un ensemble de profils parallèles ou disposés selon une maille plus ou moins régulière permet de tracer une carte.

• Traitement

Il n'existe pas d'autres traitements, que le contrôle de la qualité des données et l'élimination éventuelle des valeurs aberrantes.

• Inversion

Il n'existe que des programmes d'inversion 1D aujourd'hui. Les algorithmes du calcul direct sont fondés, soit sur les expressions asymptotiques des faibles nombres d'induction, soit sur les expressions complètes.

L'inversion est fondée en général sur l'approche de Marquardt. Ces inversions s'appliquent à chaque sondage pris individuellement ; il n'existe pas actuellement de procédés automatiques permettant d'inverser un profil de sondages réalisés avec les 6 configurations de l'EM-34 par exemple. Ceci est une limite opérationnelle sérieuse.

Nous avons utilisé le logiciel à la fois le logiciel **Emdirus** (2003) et le logiciel **Emigma** (V7.5, 2002).

Le fait qu'il n'existe pas de programmes d'inversion 2D et / ou 3D est aujourd'hui un handicap sérieux par rapport aux panneaux électriques. Il nous est tout de même apparu utile et intéressant de comparer les pseudos-coupes de résistivité apparente obtenues avec chacune des deux techniques, le long de profils tests.

• Interprétation

Une première interprétation qualitative se fait classiquement à partir des « images » construites à partir des valeurs brutes de résistivité ou de conductivité apparente ; sondages géométriques, profils et pseudos-coupes éventuellement.

Une tentative d'interprétation quantitative peut être faite, à partir des résultats des inversions 1D d'une part, dans les zones où l'hypothèse de tabularité est respectée et à partir de modélisations directes 3D à proximité d'accidents ou de cibles confinées.

3.2.2 Modélisations de situations simples d'aquifères de socle

3.2.2.1 Modèles 1D

• Les logiciels

Quatre logiciels principaux ont été utilisés successivement : **Emdirus** de l'IRD (France), **PCLoop** de Geonics® (Canada), **Selma** de Aarhus University (Danemark), puis l'option 1D d'**Emigma** de PetRosEikon® (Canada). C'est désormais ce dernier que nous utilisons de manière routinière. Il est fondé sur l'expression complète des champs, il permet donc le calcul des réponses du type EM-34 et du type MaxMin.

Emigma est un logiciel performant, qui permet, en plus de la modélisation, l'inversion 1D Slingram à partir de plusieurs configurations mises en oeuvre simultanément, station par station, le long d'un profil. Il conduit au tracé automatique de coupes interprétées.

• Rappel - Influence de la hauteur du dispositif au-dessus du sol

On sait que les valeurs lues pour chacune des configurations sont fonction de la hauteur des boucles au-dessus du sol. Nous avons quantifié cette dépendance pour l'EM-34 de Geonics® au-dessus d'un demi-espace homogène. Les résultats sont représentés sur la **figure 3.2.2**.



Figure 3.2.2 : Résultats de la modélisation de l'influence quantitative de la hauteur de mesure

• Influence d'une cuirasse latéritique

Afin de simuler un bruit géologique semblable à celui étudié en courant continu, on compare les réponses de l'EM-34 de deux situations simplifiées :

- un modèle bi-couche : 21 m à 20 ohm.m au-dessus d'un substratum à 200 ohm.m,
- la même situation surmontée d'une cuirasse de 10 m d'épaisseur à 200 ohm.m.

Les réponses sont représentées sur la **figure 3.2.3**, sous la forme conventionnelle choisie pour représenter les résultats de sondages géométriques Slingram. Elle montre qu'à l'aide des 6 configurations, les deux situations sont bien caractérisées et que la conductance totale audessus du substratum peut être déterminée, aussi bien en l'absence qu'en présence de la cuirasse.



Figure 3.2.3 : Réponse de modèle simple avec cuirasse (AC) et sans cuirasse (SC)

3.2.2.2 Modèles 3D

• Le logiciel

Le seul logiciel mis en œuvre est **Emigma**[®]. Il est fondé, comme précédemment écrit (chap. 2), sur la méthode des équations intégrales, avec trois variantes :

- LN, bien adapté au phénomène de la canalisation de courant
- ILN, qui prend mieux en compte le phénomène inductif, en plus de la canalisation du courant
- VHPLATE, qui ne concerne que les plaques minces.

Ce logiciel est supposé permettre le calcul des réponses de toutes les méthodes électromagnétiques, fréquentielles et temporelles et de toutes les configurations. C'est la première fois où il est mis en œuvre de manière routinière dans notre équipe, la période de test a été relativement longue; il reste encore des difficultés à résoudre, notamment l'influence des surfaces de contact entre des prismes adjacents de résistivités très différentes.

C'est la raison pour laquelle seuls les résultats de situations simples sont présentées ci-dessous ; celles dont les réponses ont été bien établies et confirmées ; les « aquifères » simulés sont donc particulièrement simplifiés.

Méthode de calcul

C'est l'option LN qui a été systématiquement choisie, puisque notre domaine principal d'application est celui des faibles nombres d'induction.

> Taille de la cible – Discrétisation

Afin de simuler au mieux des situations 2,5 D, l'extension de la cible a été choisie égale à 500 m perpendiculairement au profil étudié.

La taille de la maille élémentaire, donc le nombre total de mailles permettant de décrire la cible sont deux paramètres critiques concernant la validité des réponses calculées. Sachant qu'une maille aussi cubique que possible est souhaitable et compte tenu du rapport de dimension entre l'allongement des cibles et leur épaisseur, nous avons en général, choisi un nombre de mailles compris entre 100 et 1000, comme le recommandent les auteurs.

C'est l'absence d'oscillations et la répétitivité pour deux nombres de maille dans un rapport 2, qui a été le critère d'acceptation. Les réponses d'un très grand nombre de structures différentes ont été calculées ; seules quelques unes sont présentées ci-dessous.

• Modèles simples d'inclusions conductrices

> Inclusions conductrices d'une largeur égale à 100 m

A partir des premiers résultats du panneau électrique sur le profil 1 de Kombissiri 2, les réponses de quatre modèles simples ont été calculées. Elles sont représentées, sous la forme conventionnelle de six profils, dans un système de coordonnées semi-logarithmique, avec une échelle verticale graduée en conductivité apparente, avec les valeurs croissantes vers le bas, de 1 à 100 mS/m; cette convention de représentation sera justifiée lors de la présentation des résultats expérimentaux.

Il s'agit d'une inclusion conductrice ($\rho = 5$ ohm.m), située dans un terrain de 30 ohm.m, sous une couverture résistante ($\rho = 100$ ohm.m) de 3 m d'épaisseur ; le substratum résistant ($\rho = 200$ ohm.m) est situé à 20 m de profondeur.

- les deux premières inclusions sont des parallélépipèdes d'épaisseur 5 m , puis 10 m, dont le toit est situé à 4 m de profondeur (**fig. 3.2.4**) ;
- les deux secondes présentent un appendice supplémentaire des 5 m d'épaisseur situé soit au-dessus, soit au dessous du parallélépipède principal; le second simule un « drain » (fig. 3.2.4).

~



Figure 3.2.4 : Réponse des modèles simples A1 et A2



Figure 3.2.5 : Réponses des modèles A4 et A5

On note une très bonne sensibilité aux variations de la profondeur du toit et/ou du mur de l'inclusion conductrice, donc à l'existence éventuelle d'un drain vertical.

Les configurations VCP conduisent toujours à des profils simples, dont l'interprétation quantitative est relativement facile.

Les configurations HCP avec un espacement important, relativement à la profondeur de la cible conduisent à des réponses plus compliquées, donc également plus discriminantes. La configuration HCP 40 montre une grande sensibilité à l'existence de contacts verticaux entre deux milieux de résistivités très contrastées. Elle se manifeste, paradoxalement à première vue, par une diminution importante de la conductivité apparente, qui constitue un bon indice de détection. Le résultat de cette simulation a été répété plusieurs fois sous des conditions de calcul différentes, pour qu'elle soit bien assurée, de plus elle correspond qualitativement et quantitativement aux effets observés sur le terrain.

La dissymétrie des réponses de la **figure 3.2.5** est remarquable et très positive en ce qui concerne la détection des drains.

Réponses du MaxMin à ces mêmes inclusions

Les réponses du MaxMin pour une distance émetteur-récepteur de 40 m et pour les 5 fréquences les plus faibles, de 222 à 3552 Hz, pour le modèle A4 et A5 (**fig. 3.2.6** et **3.2.7**) ont une grande similarité avec celles de la configuration HCP 40. L'amplitude des anomalies est d'ailleurs plus importante pour les fréquences les plus élevées. Il est donc recommandé de mettre en œuvre le MaxMin dans des conditions voisines de celles de l'EM-34, c'est-à-dire, pour des nombres d'induction qui peuvent varier de 1 et 8 par exemple.



Figure 3.2.6 : Réponse du modèle A4 en dispositif MaxMin



Figure 3.2.7 : Réponses du modèle A5 en dispositif MaxMin

• Modèle plus complexe incluant une variation latérale de conductivité

La dissymétrie de la réponse (**fig. 3.2.8**) montre bien la sensibilité à la variation latérale de résistivité, donc à épaisseur constante, à la variation latérale de la conductance de l'inclusion.



Figure 3.2.8 : Réponse du modèle C3

• Détection de drains profonds

Les réponses de deux drains étroits conducteurs, de 30 m de largeur, relativement profonds, 20 m d'une part et 20 m au-dessous d'une cuirasse de 8 m d'épaisseur d'autre part sont représentées (**fig. 3.2.9**). Ces drains ne seront pratiquement pas détectés.

On remarque cependant que la cuirasse ne constitue pas une perturbation au sondage.



Figure 3.2.9 : Réponse d'un modèle présentant des drains profonds

3.2.3 Synthèse

Les résultats de ces premières modélisations 3D, bien qu'insuffisants, nous permettent de mieux comprendre et de mieux interpréter les résultats expérimentaux obtenus.

Ils confirment qu'un changement de signe de la composante imaginaire est possible non seulement en raison du phénomène d'induction, comme on le sait en exploration minière avec le MaxMin, mais aussi pour les faibles nombres d'induction dans des situations non tabulaires, en raison de la canalisation du courant.

Ils valident par conséquent les valeurs négatives de conductivité apparente dans la configuration HCP; ils confirment que cette configuration est un bon détecteur de non tabularité et en particulier de la proximité d'un corps conducteur. Ils mettent en garde en revanche contre une interprétation trop rapide des « rides résistantes étroites » qui sont souvent l'annonce de la proximité d'un conducteur, voire même la réponse d'un conducteur étroit. Une bonne façon de lever l'ambiguïté est de mettre en œuvre la configuration VCP en complément sur le même profil.

3.3 Le Sondage par Résonance Magnétique Protonique (sondage RMP)

L'application des sondages RMP à l'étude et à la prospection des aquifères du Burkina Faso était l'un des objectifs de notre étude méthodologique, à cause de son caractère novateur, et parce qu'un outil directement sensible à la teneur en eau semblait être le complément idéal à l'approche géophysique classique, très indirecte.

L'implication très étroite de l'IRD (UR027 Geovast) dans deux thèses, celle de Vouillamoz (2003) et celle-ci (Toé, 2004), a permis de faire converger les besoins, les objectifs et les réalisations, dans le domaine de l'étude des sondages RMP.

Le principe de la méthode, sa mise en œuvre et l'exploitation des résultats sont présentés de manière détaillée dans de nombreux articles (Weichman et al, 2000; Valla et Legtchenko, 2002; Legtchenko et Valla, 2002; Legtchenko et al, 2002; 2004) ainsi que dans la thèse de Vouillamoz. Les résultats de Kombissiri et de Sanon sont également présentés dans la thèse de Vouillamoz (2003) et dans les résumés étendus du second Congrès sur la RMP (2003).

Un exposé synthétique est présenté ci-dessous.

• Bref historique

L'ancêtre de la RMP s'appelle la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) et ce phénomène physique a été découvert à la fin des années 1940.

Depuis lors, l'utilisation de sondes diagraphiques appliquant le principe de la RMN a été développée par les industriels pour des applications de prospection d'hydrocarbure. C'est Varian (1962) qui, le premier, a pensé à se servir du principe de la RMN pour la détection des protons contenus dans les molécules d'hydrocarbures ou d'eau souterraine. Dans les années 1980, un outil basé sur ce principe a vu le jour, en ex-URSS, sous le nom de HYDROSCOPE (Semenov, 1987).

Depuis 1996, des chercheurs du BRGM et de IRIS-instruments (France) ont développé et construit un appareil utilisant la RMN pour l'étude du contenu en eau du proche sous-sol à partir de la surface : le NUMIS était né, et la méthode renommée alors sondage par la Résonance Magnétique Protonique (RMP).

La RMP est une méthode qui a beaucoup évolué depuis 4 ans. Une version plus moderne du *Numis* a vu le jour en 2001 : le *Numis* ^{plus}. Il met en œuvre la mesure d'un nouveau paramètre : la constante de temps de décroissance T_1^* .

Les études menées par le BRGM et IRIS-instruments, ont permis la mesure efficace du paramètre T_1^* , ainsi que la validation des résultats obtenus, grâce à ce paramètre nouveau, dans différents contextes géologiques dans le monde, en collaboration avec l'IRD (UR027 Geovast)

• Principe – Phénomène physique

Le sondage RMP est fondé sur l'excitation des protons des molécules d'hydrogène contenues dans l'eau par un champ magnétique oscillant à la fréquence dite de Larmor, puis sur leur relaxation lorsqu'elles retournent à leur état d'équilibre dans le champ magnétique terrestre.

Le proton est caractérisé par sa charge électrique, sa masse, son moment cinétique intrinsèque, appelé « spin s », puisqu'il est en mouvement de rotation sur lui-même et son moment magnétique associé, tel que : $\mu = \pm \gamma \cdot h / 2$

Où : γ est le rapport gyromagnétique du noyau d'hydrogène

h est la constante de Planck

En l'absence de champ magnétique externe, la phase des moments magnétiques des protons des molécules d'eau seraient aléatoire ; que fait la somme des moments magnétiques d'une population de protons très petite.

Précession dans le champ magnétique terrestre statique B₀: chaque proton tend à s'orienter de façon telle que son moment magnétique soit parallèle ou anti-parallèle à B₀ (**figure 3.1**); mais en raison de son spin, il est soumis à un mouvement de rotation (dit de précession) autour de B₀, avec une vitesse angulaire telle que :

 ω_0 = γ . B_0

Dans la population de protons, la direction parallèle est favorisée, si bien que le moment magnétique résultant a une composante portée par B_0 , alors que sa composante transversale est nulle, car les mouvements de précession des protons ne sont pas en phase.

Résonance lors de l'excitation par un champ magnétique oscillant à la fréquence de Larmor, de direction différente de B_0 : il y a échange d'énergie entre les protons parallèles et anti-parallèles, le moment magnétique résultant est dévié par rapport à sa direction initiale parallèle à l'axe Oz; une composante transversale apparaît M_{x-y} et la valeur de la composante longitudinale M_y a varié.

Relaxation à la fin de l'excitation : la population de protons revient à l'état d'équilibre. La composante longitudinale M, revient à son état initial avec une constante de temps T_1^* . La composante transversale M _{x, y} s'annule avec une constante de temps T_2^* lorsque le champ terrestre B₀ est homogène dans le volume de matière concerné et avec une

constante T_2^* lorsque B_0 n'est pas homogène. Classiquement (avant l'année 2000), la RMP ne donnait accès qu'à T_2^* , très sensible à l'hétérogénéité du champ magnétique local.

La mesure de T_1^* : si deux impulsions de phase opposée sont émises successivement, avec un intervalle de temps de l'ordre de τ et si l'on néglige la relaxation pendant la durée des impulsions, la composante transversale du moment magnétique revient à son état d'équilibre avec la constante de temps T_1^* , intrinsèque, indépendante des hétérogénéités du champ magnétique statique local et caractéristique de la perméabilité du volume étudié. Ce nouveau procédé de mesure a été proposé récemment.



Figure 3.3.1 : Action de B₀ sur le moment magnétique μ
(a) dans un repère fixe ; (b) dans un repère tournant
(c) relaxation moment résultant μ
(D'après Vouillamoz, 2003)

• Les équations de base

Les équations décrivant le retour du moment M à l'équilibre à la fin de l'excitation sont les suivantes, selon Legtchenko et Valla (2002d), lorsque la durée de l'excitation τ est faible devant T_1^* et T_2^* .

$$M_{z}(t) = M_{0} \cdot [1 - (1 - \cos(\frac{1}{2} \cdot \gamma) \cdot \int_{-\tau}^{0} B_{1} \perp dt) \cdot e^{-t/Tt}]$$
(3.3.1)

$$M_{x'y'}(t) = M_0 \cdot \sin(\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \int_{-\tau}^{0} B_1 \perp \cdot dt) \cdot e^{-t/T2}$$
 (3.3.2)

Où : M₀ est le moment magnétique des protons

 $B_{1\perp}$ est la composante du champ magnétique de la boucle perpendiculaire au champ géomagnétique

 T_1 est la constante de temps de décroissance longitudinale (le long de l'axe z) T_2 est la constante de temps de décroissance transversale (dans le plan x-y)

 τ est la durée de la pulsation, avec $\tau \ll T_1, T_2$

Le signal de relaxation classique peut être décrit à partir de l'équation suivante :

$$\begin{split} E(t) &= \int_{I'} E_0(p,q) \cdot \cos(\omega_0(p) \cdot t + \phi_0(p)) \cdot e^{-t/T2^*(p)} \cdot dV(p) + N(t) \quad (3.3.3) \\ O\dot{u}: & p \text{ est le} \\ & E_0(p,q) \text{ est l'amplitude initiale} \\ & T_2^* \text{ est le temps de relaxation} \\ & \omega_0(p) \text{ est la pulsation} \\ & \phi_0(p) \text{ est la phase du signal correspondant à la contribution du volume dV(p)} \\ & N(t) \text{ est la mesure de bruit} \end{split}$$

Le signal de relaxation est représenté sur la figure 3. 3.2, suivante :



Figure 3.3.2 : Signal RMP (d'après Vouillamoz, 2003)

Il s'agit d'un signal oscillant à la fréquence de Larmor ($N_L = 2\pi \cdot \omega_L$) qui, en première approximation, est constante, de déphasage Φ par rapport au signal émis et d'amplitude initiale E_0 ; cette amplitude décroît ensuite exponentiellement avec le temps, avec une constante de temps T_2^* .

Ces trois grandeurs (E_0 , Φ et T_2^*) dépendent, en simplifiant :

- de la puissance de l'impulsion excitatrice (q) émise pendant le temps τ ;

- de l'environnement de la station de mesure, c'est-à-dire à la fois du champ géomagnétique local et de la résistivité des formations ;

- du nombre de protons sollicités, donc du volume d'eau dans le volume affecté par la boucle ; c'est la partie principale du signal enregistré ; elle est contenue dans E_0 ;

- de la nature et de la forme des pores qui contiennent l'eau et c'est la seconde partie du signal, qui est liée à la perméabilité ; elle est contenue dans T_2^* et T_1^* .

Lorsque deux impulsions de phase opposée sont émises successivement, l'équation du retour à l'équilibre de M_{xy} est la suivante :

$$M_{(x-y)}^{2}(\tau_{d}) = -M_{0} \cdot \sin \theta_{1} \left[1 - e^{-\tau / T_{1}} \right]$$
(3.3.4)

L'équation du signal mesuré devient alors :

$$E_{0-2} = \int_{V} \omega_0 (1 - e^{-\tau / T_1}) \cdot M_0 \cdot w(p) \ b_1 \perp^{R_x}(p) \cdot \sin \left[\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot b_1 \perp^{T_x}(p) \cdot q\right] \cdot dV(p) \quad (3.3.5)$$

• Réalisation d'un sondage RMP

Sur le site sélectionné, la succession des opérations est la suivante :

• Mesures préalables :

- mesure du champ magnétique local (grâce à un magnétomètre portablé) pour vérifier son homogénéité spatiale et pour calculer la fréquence de Larmor.
- mesure du bruit EM ambiant dans la zone d'étude pour optimiser le choix de dispositif de mesure.

• Installation de l'équipement Numis^{plus}:

- mise en place de la boucle d'émission/réception, carrée ou en « huit», dont les dimensions sont de l'ordre de 1,5 à 2 fois la profondeur d'investigation souhaitée.
- installation du récepteur et des accessoires de l'équipement dans un endroit protégé et judicieux.

Le sondage RMP est complètement piloté par l'ordinateur et il consiste en l'opération suivante :

Pour chaque valeur de l'impulsion on fait :

- enregistrement du bruit électromagnétique dans la bande passante utile avant l'émission du signal d'excitation,
- émission d'une série d'impulsions d'excitation de puissance croissante ; pour chaque impulsion ou couple d'impulsions lorsqu'on souhaite mesurer T₁*;
- enregistrement numérique des signaux émis et reçus accumulation de signaux, afin d'améliorer le rapport signal / bruit.

La variation de la puissance des impulsions d'excitation permet d'augmenter la profondeur d'investigation; c'est ainsi que l'on réalise un sondage, au sens classique de la géophysique. Dans ce sens, les valeurs d'impulsion pourront être considérées comme la pseudo profondeur.

• Traitement – Grandeurs calculées à l'issue du traitement

Le signal enregistré pour chaque couple d'impulsions d'excitation, est traité : amplification, filtrage, accumulation, etc.

On effectue notamment une analyse spectrale des données brutes pour chaque moment enregistré. On peut ainsi filtrer les effets parasites éventuels.

A l'issue du traitement, on calcule pour chaque impulsion et chaque couple d'impulsions :

- les amplitudes initiales $E_{01}(q)$ et $E_{02}(q)$.
- les constantes de décroissance T₂* et T₁*.
- le déphasage et la fréquence de Larmor.

On peut ainsi tracer les courbes des variations de chacune de ces grandeurs en fonction de la puissance des impulsions d'excitation q. C'est ainsi que l'on obtient les courbes dites brutes ou expérimentales du sondage RMP.

• Inversion des données – Grandeurs calculées à l'issue de l'inversion

L'objectif du sondage est de déterminer la répartition de la teneur en eau et de la perméabilité en fonction de la profondeur, pour le site étudié. Pour atteindre cet objectif, il est indispensable de procéder à l'inversion des données brutes acquises.

Cette inversion nécessite le calcul préalable d'une matrice générée à partir des résultats de l'interprétation d'un sondage électrique in situ. Cette matrice doit être la même pour tout le levé d'une même zone investiguée par sondage RMP. Elle représente la réponse théorique de fines couches d'eau à différentes profondeurs pour la section géo-électrique prédéfinie.

On pourra ensuite procéder à l'inversion classique des données brutes, à partir des équations du problème direct, en minimisant les écarts entre la réponse expérimentale et la réponse d'un modèle tabulaire formé de couches horizontales et infinies caractérisées chacune par sa teneur en eau et ses constantes de décroissance T_2^* et T_1^* .

La procédure que nous avons mise en œuvre sur nos sites est la suivante :

- élimination des valeurs expérimentales aberrantes ;
- proposition d'un modèle à 40 couches dont les paramètres de départ sont identiques pour tous les sondages d'une même région et proches des valeurs moyennes apparentes mesurées;
- inversion automatique avec les paramètres par défaut ;
- exploration de la sensibilité aux paramètres de régularisation portant sur T₂* et T₁*.
- Sélection des paramètres les plus probables et retouches éventuelles du modèle obtenu en remplaçant les variations brusques entre deux couches successives par des variations plus graduelles et en testant des valeurs minimales pour chacun des paramètres, w et T₁*, de façon à ne pas surestimer les qualités des aquifères;
- modélisation directe à partir des modèles retouchés, examen visuel des écarts entre les données expérimentales et la réponse des modèles ; tests de la robustesse des valeurs extrémales ;
- choix du modèle final.

Equivalence et suppression : la solution de l'inversion n'est pas unique. Comme dans de très nombreuses techniques géophysiques, il existe des solutions dites équivalentes. L'équivalence porte sur le produit w_i . Δz_i .

• Interprétation – Caractérisation des réservoirs – Détermination des grandeurs hydrogéologiques

- La géométrie :

Le toit de l'aquifère correspond en principe à l'apparition d'une teneur en eau mesurable et réaliste pour le contexte hydrogéologique considéré.

Le mur de l'aquifère devrait correspondre en principe à une chute importante de la teneur en eau ou de la perméabilité, donc de T_1^* ; en fait, en raison de la diminution de résolution de la méthode et du rapport signal / bruit avec la profondeur d'investigation la mise en évidence du mur pourrait être quelquefois difficile.

En raison des lois d'équivalence, l'incertitude sur la position du mur de l'aquifère à partir de w seule est toujours importante ; cette détermination doit se faire à partir de l'ensemble des paramètres résultant de l'inversion.

Il arrive, par exemple, que l'on détecte des aquifères de type bi-couche avec une zone imperméable entre les deux, ceci doit également être confirmé par l'ensemble des paramètres.

- Le coefficient d'emmagasinement (S_{RMP})

Pour une nappe captive, le volume d'eau disponible lors d'un pompage se mesure par le coefficient d'emmagasinement S ; en simplifiant à partir des formules de Marsily (1986), les hydrogéologues l'expriment sous la forme suivante :

 $S = [\rho . g . n . (b_1 + a/n)] . e \qquad (3.3.6)$

 $O\dot{u}$: a et b_1 sont les coefficients de compressibilité respectivement de l'eau et du milieu poreux.

 ρ est la masse volumique du fluide g est l'accélération de la pesanteur n est la porosité totale

S est proportionnel au volume d'eau présent, par le produit (n. e).

Le produit (w_i . Δz_i) calculé pour chaque couche i, à partir du sondage RMP, lui aussi proportionnel au volume d'eau contenue dans celle-ci, peut donc être considéré comme proportionnel à son coefficient S_i.

La somme sur l'ensemble de l'aquifère Σ (w_i . Δz_i) peut ainsi être considérée comme étant proportionnelle au coefficient d'emmagasinement total d'un aquifère captif.

101

Ceci a été confirmé expérimentalement par Vouillamoz (2003). Un coefficient d'étalonnage C_1 a été défini expérimentalement pour les granites du Burkina Faso, à partir des forages de Kombissiri et de Sanon précisément,

soit
$$C_1 = 4, 3 \cdot 10^{-3}$$

Nous utiliserons cette relation pour calculer les coefficients d'emmagasinement Si_{RMP} , à partir des produits ($w_i \cdot \Delta z_i$), soit :

$$Si_{RMP} = (w_i \cdot \Delta z_i) \times 4.3 \cdot 10^{-3}$$
 (3.3.7)

Note : L'introduction automatique de ce coefficient n'est pas en soi, une limitation à l'utilisation du sondage RMP dans une zone vierge pour laquelle, aucun coefficient d'étalonnage n'a été déterminé à priori. En effet, la comparaison des valeurs brutes des sommes $\Sigma(w_i \, \Delta z_i)$ entre plusieurs sites, suffit à les classer en terme d'intérêt potentiel, donc à sélectionner les implantations potentiellement les plus intéressantes pour les forages de reconnaissance ou d'exploitation.

- La porosité efficace (n_{eRMP} exprimée en %)

Pour une nappe libre, le volume d'eau disponible lors d'un pompage, selon les hydrogéologues, s'exprime, en simplifiant, par la porosité efficace n_e .

Pour chaque couche i, la teneur en eau w_i peut être considérée comme proportionnelle à n_e , selon les résultats expérimentaux de Vouillamoz. Une valeur de porosité moyenne peut être calculée pour un aquifère dont on connaît l'épaisseur Δz_i , à partir de :

$$n_{eRMP} = \frac{\sum_{i} (wi . \Delta zi)}{\sum_{i} \Delta zi}$$
(3.3.8)

Un coefficient d'étalonnage a également été calculé à partir des paramètres hydrauliques des forages du Burkina Faso par Vouillamoz ; il vaut :

$$C_2 = 2, 8 \cdot 10^{-1}$$

Ce coefficient sera si nécessaire, utilisé automatiquement, à l'issue des inversions, pour caractériser les aquifères des sites de Kombissiri et de Sanon, sans que cela nuise à la généralisation de l'application de la méthode, dans une zone géographique vierge, sans étalonnage, puisque l'objectif est toujours comparatif, avant d'être absolu.

- La perméabilité :

Les travaux de Kenyon (1997) ont montré que pour un aquifère à granulométrie homogène, on peut appliquer une relation du type :

$$k_{RMP} = C'. T_1^{a}. w^{b}$$
 (3.3.9)

Où : a et b sont des coefficients expérimentaux à déterminer.

Selon Seevers (1966) et Legtchenko et al (2004), les valeurs a = 2 et b = 1 s'appliquent bien aux sites et aux échantillons qu'ils ont étudiés. C'est la formule utilisée par Vouillamoz pour l'ensemble de ses travaux ; c'est donc celle que nous conserverons pour le Burkina Faso :

$$k_{RMP} = C'. T_1^2. w$$
 (3.3.10)

Cette formulation est d'autant plus intéressante lorsqu'on étudie la transmissivité d'un aquifère, qui devient de ce fait, insensible à la loi d'équivalence.

<u>-La transmissivité :</u>

Elle est définie par les hydrogéologues, comme étant égale au produit : T = k .e (elle s'exprime en m²/s).

En considérant l'équation précédente (3.18), on peut écrire, pour chaque couche i :

$$T_{iRMP} = \Delta z_i \cdot k_{iRMP} = \Delta z_i \cdot C' \cdot T_{1i}^2 \cdot w_i = C' \cdot T_{1i}^2 \cdot w_i \cdot \Delta z_i \quad (3.3.11)$$

Par conséquent, pour l'ensemble de l'aquifère, on peut calculer une transmissivité cumulée T, telle que :

$$T = \frac{\sum_{i} (C' \cdot T^{2}_{1_{i}} \cdot w_{i} \cdot \Delta z_{i})}{\sum_{i} z_{i}}$$
(3.3.12)

Cette transmissivité cumulée calculée est insensible aux équivalences, lorsque l'épaisseur totale de l'aquifère est connue.

• Interprétation hydrogéologique synthétique

La première interprétation est faite à partir de l'examen simultané de toutes les courbes résultant de l'inversion et des calculs.

On note ainsi les caractéristiques suivantes :

- Les éventuels éléments particuliers confirmés de chacune des courbes.

- Les corrélations ou anti-corrélations entre les différents paramètres, notamment celles entre T_2^* et w, qui ne sont pas déterminées de manière indépendante.

- Les « interfaces vraisemblables », qui correspondent en particulier aux premiers changements de pente de w (le toit de l'aquifère?) et de T_1^* (l'augmentation de la perméabilité?) et à tous les changements de pente de la courbe de la transmissivité, qui est en principe non affectée par les équivalences.

Ces informations sont ensuite intégrées dans l'ensemble des connaissances concernant le site et la station de mesure, notamment celles des techniques géophysiques complémentaires et des forages voisins lorsqu'ils existent, pour aboutir au modèle final retenu.

Chapitre 4

Résultats des travaux sur les sites de Kombissiri et de Sanon

L'approche retenue pour l'étude des aquifères est multi-disciplinaire et pluri-site. C'est une approche expérimentale avec un objectif à la fois méthodologique et applicatif. Les travaux se sont déroulés sur trois campagnes.

La logique finalement retenue pour l'exposé des résultats est centrée autour du site. Les trois zones d'étude sur les deux sites seront traitées successivement. Les travaux réalisés sur chaque site, seront exposés pratiquement en suivant le déroulement naturel des opérations depuis la reconnaissance, jusqu'à la caractérisation de l'aquifère et la synthèse.

4.1 Le programme des travaux réalisés

t

Les travaux de terrain entrepris dans le cadre spécifique de cette thèse ont débuté en 2001, sur les deux sites expérimentaux au Burkina Faso.

Au préalable, une importante phase d'échanges, de rencontres, de discussions et de collecte d'informations et de données a eu lieu à Ouagadougou.

4.1.1 Chronologie

Les travaux de terrain ont été réalisés principalement au cours de trois grandes campagnes de mesure :

- de juin à septembre 2001
- de février à juin 2002

- de novembre 2002 à janvier 2003

Des mesures ont été réalisées, hors de ces campagnes, pendant des missions ponctuelles et des relevés pluviométriques et piézométriques ont été effectués de façon continue, sur des périodes données, par des équipes locales.

4.1.2 Travaux réalisés

4.1.2.1 Sur le site de Sanon

Les travaux ont débuté sur le site de Sanon en juin 2001, par la tomographie électrique Wenner. Les trois panneaux Wenner Alpha ont été réalisés dès le début de cette première campagne.

Une tentative de cartographie de reconnaissance EM-34 au cours de cette première campagne a dû être abandonnée pour des raisons liées à l'équipement.

Les sondages RMP ont été réalisés au cours de la 3^{ème} campagne, ainsi que les deux sondages électriques.



La situation globale des travaux est présentée sur la figure 4.1.1, pour le site de Sanon.

Figure 4.1.1 : Situation générale des travaux géophysiques à Sanon

4.1.2.1 Sur le site de Kombissiri

• Les campagnes de terrain

> 1^{ère} campagne :

Les panneaux électriques Wenner Alpha et Bêta ont été réalisés à la suite de ceux de Sanon, c'est-à-dire lors de la première mission de terrain, en 2001. Au total, plus de vingt cinq panneaux ont été réalisés de façon exploratoire au cours de cette première mission.

Une cartographie géologique sommaire a été effectuée en même temps que la découverte du site et des ouvrages existants dans toute la zone.

➢ 2^{ème} campagne :

Les cartes magnétiques et la cartographie de reconnaissance EM-34 ont été réalisées en mars 2002.

Le suivi géologique des forages de gros diamètre, la récolte des échantillons et les diagraphies ont eu lieu entre les mois de mars et de mai de la seconde mission. Les analyses sur échantillons ont été réalisées dans les laboratoires spécialisés de l'IRD à Bondy.

La première campagne de foration IRD s'est déroulée en Mai et Juin 2002.

Les essais de pompage dans les forages par une entreprise de la place ont également eu lieu en Juin 2002.

Au cours de cette campagne, tous les travaux de géologie et d'hydrogéologie de terrain indispensables à l'interprétation ont été réalisés.

Les 4 panneaux électriques Pôle-dipôle et les reprises des panneaux Wenner enfin, ont été effectués à la fin de la seconde campagne.

> 3^{ème} campagne :

Tous les profils EM-34 avec les 6 configurations, soit 9 profils ont été réalisés au cours de cette campagne, en 12 jours de travail. La qualité était la priorité absolue et de nombreuses stations ont été systématiquement répétées. Les contrôles de dérive nécessaire de l'équipement ont été effectués tout au long des travaux.

Les sondages électriques l'ont été également lors de cette campagne.

Les mesures de sondages RMP ont été effectuées entre novembre 2002 et janvier 2003 ; certains sondages ont été systématiquement répétés.

La situation globale des travaux sur le site de Kombissiri est présentée sur la figure 4.1.2.



Figure 4.1.2 : Situation générale des travaux géophysiques à Kombissiri

4.2 Le site de Kombissiri – Plate-forme 2

La présentation des résultats suit, dans une certaine mesure, le déroulement naturel des opérations, depuis la reconnaissance jusqu'au détail et à la caractérisation de l'aquifère.

La réalisation des forages et leur exploitation sont présentés avant les trois méthodes géophysiques nouvelles car ils ont été utilisés pour leur contrôle, leur étalonnage et leur validation.

Les travaux méthodologiques concernant les tomographies électriques et électromagnétiques ont été réalisés sur cette plate-forme et en particulier sur le profil 1.

4.2.1 Photographies aériennes et images satellites

Les photographies aériennes et les images satellites de la région de Ouagadougou ont été acquises à l'Institut Géographique du Burkina et à l'IRD (centre de Montpellier et de Bondy): trois photographies à l'échelle 1/50.000 et six au 1/20.000. Elles couvrent l'ensemble des zones d'étude et permettent d'établir des esquisses de cartes de fracturation. Elles ont été interprétées en collaboration étroite avec les services spécialisés de cartographie du centre IRD de Ouagadougou et Bondy.

Les images satellites ASTER de la région de Ouagadougou, notamment, ont été traitées avec l'aide du laboratoire de cartographie de l'IRD de Bondy et des services spécialisés de l'UR GEOVAST. La réalisation de compositions colorées dans les trois canaux principaux des images ASTER a permis de faire ressortir des linéaments susceptibles d'être interprétés comme des structures géologiques.

Les **figures 4.2.1** et **4.2.2** présentent les résultats de l'interprétation sous la forme de diagrammes polaire et de carte. Ils concernent la région étudiée et son extension jusqu'aux limites des photographies aériennes et des images satellites.

On note :

Le réseau hydrographique localement relativement dense de la région de Kombissiri ; la zone des plates-formes est une zone exutoire du bassin versant.

Un linéament majeur de grande extension orienté NE-SW, qui sépare les deux platesformes, dans l'axe d'allongement de la retenue d'eau de Kombissiri.

La direction dominante des fractures interprétées sur les photographies aériennes, qui est NE-SW ; elle correspond à la direction de fracturation tectonique du birimien (Savadogo, 1984).

Les images satellites, à plus petite échelle, permettent de confirmer ces directions majeures. On distingue mieux le bassin versant du Massili, dans lequel est construite la ville de Ouagadougou.

Des fractures multi-kilométriques à l'échelle d'un ou plusieurs bassins versants sont mises en évidence. Le réseau hydrographique apparaît bien et on distingue les éléments structuraux liés à des phénomènes et à des épisodes tectoniques successifs.

L'interprétation des photographies aériennes a été réalisée en collaboration avec le service de cartographie du centre IRD de Ouagadougou. La carte qui en résulte est présentée en annexe.



Figure 4.2.1 : Diagramme polaire des directions de fracturation à Kombissiri



Figure 4.2.2 : Carte interprétative des linéaments de la région de Kombissiri (échelle = 1/25 000^e, carte établie à partir d'image ASTER)

4.2.2 Géophysique aéroportée

Des levés aéromagnétiques, électromagnétiques, et radiométriques ont été réalisés entre les années 1979 et 2003 dans le cadre de l'inventaire minier du Burkina Faso ; la partie occidentale du pays a été couverte avant l'année 2000, dans le cadre du projet Sysmin.

Nous disposons, grâce notamment à la bienveillance du Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB), de quelques cartes des données anciennes traitées, mais compte tenu des difficultés de géo-référencement pour ces anciens levés, la zone de Kombissiri n'a pas encore pu être individualisée.

L'espacement entre lignes de vol était variable selon les levés, de 200 à 500 m. Nous sommes convaincus que les anomalies magnétiques et électromagnétiques d'une largeur de l'ordre de 200 m et de 500 m de longueur devraient apparaître sur les cartes aéroportées. Ces informations devraient donc être systématiquement ajoutées à celles de la télédétection afin de mieux sélectionner les zones qui seront reconnues à l'aide des méthodes géophysiques mises en œuvre au sol.

4.2.3 Magnétisme au sol

La carte a été levée à l'aide d'un magnétomètre à précession protonique de type OMNI de EDA®; la précision instrumentale des lectures sur les magnétomètres est de 0,1 nanoTesla (nT). Les capteurs étaient situés à 2,3 mètres de hauteur au-dessus du sol. Le pas de mesure était de 10 mètres sur chaque profil des grilles des deux plates-formes; l'espacement entre profils étant de 50 mètres.

Il faut noter que la direction des profils n'est pas optimale par rapport à la direction générale de l'anomalie principale.

Une station de base fixe qui enregistrait le champ total toutes les 20 secondes a été mise en place, de façon à effectuer les corrections des variations temporelles du champ, les variations diurnes et les variations « rapides ».

Carte du champ total et cartes transformées

Les données magnétiques ont été traitées à l'aide de trois logiciels successivement : CGS (Canada), Geosoft® (Canada) et IBIS (BRGM, France). Les résultats sont comparables.

La carte du champ total résiduel après soustraction du champ moyen est représentée **figure 4.2.3**. Les caractéristiques du champ magnétique local dans la région de Kombissiri sont les suivantes :

$I = 1, 23 \circ D = -3, 78 \circ F = 33 300 nT$

Ces caractéristiques sont celles d'un champ situé dans une zone très proche de l'équateur, c'est-à-dire qu'il s'agit presque d'une carte réduite à l'équateur.

La carte du champ total après réduction au pôle (fig. 4.2.4) : il est à noter que le résultat est de bonne qualité, malgré la latitude de la zone étudiée ; ceci est dû au fait que les algorithmes de transformation sont aujourd'hui très robustes, que l'azimuth moyen de l'anomalie principale est voisin de 135° N et que son amplitude est relativement très élevée.

La carte du champ total résiduel après réduction à l'équateur n'est pas montrée ; elle est quasi superposable à la carte non transformée, compte tenu de la latitude magnétique moyenne de la zone (I = 1, 23 °).



Figure 4.2.3 : Carte du champ magnétique total (Kombissiri 2)





• Interprétation quantitative 2D et 2,5 D

Le profil 1, globalement perpendiculaire à l'anomalie principale, a été interprété à l'aide d'un programme d'inversion (Magmod 3.0) dans l'hypothèse 2D, puis dans l'hypothèse 2.5 D (Emigma 7.5), avec un rapport d'allongement égal à 5, sans aimantation rémanente Les valeurs obtenues pour la profondeur du toit et l'extension latérale sont les valeurs minimales compatibles avec les données. L'azimuth et le pendage sont obtenus sans ambiguïté et avec précision dans l'hypothèse d'une aimantation induite seule. La profondeur de l'enracinement en revanche n'est pas contrainte, mais c'est une information peu importante pour l'hydrogéologie.

La valeur de susceptibilité magnétique interprétée est la valeur maximale compatible avec les données. Elle classe ce filon parmi les matériaux ferrimagnétiques classiques du socle. Les résultats sont présentés sur la **figure 4.2.5**.



Figure 4.2.5 : Inversion 2,5 D à l'aide de modèle du profil 1 (Kombissiri 2)

• Tentative d'interprétation quantitative 3D

Les résultats sont présentés sur la figure 4.2.6.

Cette première interprétation 3D est en fait une transformation dans le domaine spectral, à partir d'un modèle à 2 terrains de susceptibilité constante. Elle été obtenue grâce à l'obligeance du BRGM, que nous remercions.

Cette hypothèse n'est pas réaliste, mais elle permet de localiser la position des corps anomaliques de manière relativement précise, ce qui est important du point de vue hydrogéologique, bien que le pendage ne soit pas explicitement pris en compte.





• Synthèse

Toutes ces cartes et coupes montrent clairement l'existence de deux systèmes intrusifs quasi perpendiculaires, avec leur intersection proche du centre de la zone étudiée, ce qui est un élément a priori favorable pour la fracturation, donc pour l'alimentation de l'aquifère.

La géométrie de ces intrusions n'est pas définie avec certitude, en particulier le pendage, du fait de l'absence d'information sur l'aimantation rémanente. Si celle-ci est négligée, l'intrusion principale tendrait vers la direction sud-ouest.

4.2.4 Electromagnétisme de reconnaissance

• La carte Slingram HCP 40

Cette carte (**fig. 4.2.7**), tracée au début de la campagne de mesure comme outil de reconnaissance, met bien en évidence l'existence d'un sillon conducteur de direction NW-SE, parallèle à l'anomalie magnétique principale et légèrement décalée vers le sud-ouest. Il semble fermé vers le nord-ouest et ouvert vers le sud-est. L'extrême sud-est semble même la partie la plus conductrice.

La limite sud-ouest du sillon est nette et bien définie, alors qu'au nord-ouest, elle apparaît compliquée et très indentée, avec divers appendices perpendiculaires à la direction générale.

Les « appendices » qui apparaissent sur la carte EM-34 sont liés au comportement particulier de la configuration HCP 40, qui génère des valeurs très faibles, voire négatives, de la conductivité apparente, à proximité des limites sub-verticales des formations conductrices.

A priori, on ne doit pas interpréter les rides résistantes apparentes, comme des structures résistantes réelles (« barrières » hydrogéologiques possibles) ; il est indispensable de réaliser des mesures de détail complémentaires avant de conclure.



Figure 4.2.7: Carte de reconnaissance EM-34 (HCP 40), Kombissiri 2

• La carte MaxMin – Partie Imaginaire – HLEM 60 (HCP)

Elle est en très bon accord avec la précédente. Du fait de la fréquence supérieure, le phénomène inductif est prépondérant et l'axe de la zone anomalique est entièrement négatif, c'est-à-dire que s'il était converti en conductivité apparente, elles seraient également négatives.



Figure 4.2.8 : Carte de reconnaissance MaxMin (HLEM 40 m), Kombissiri 2

• Synthèse

L'existence d'un sillon conducteur d'une largeur d'environ 200 m est clairement démontrée ; il est en bon accord avec l'information magnétique. Selon la stratégie classique, la suite logique des opérations consiste à réaliser des sondages électriques dans les zones a priori les plus favorables ? Choisir précisément les sites des sondages électriques est difficile du fait de la complexité des réponses des configurations HCP. Ce choix doit être fait avec l'hydrogéologue, qui introduira les notions d'alimentation et de circulation probable des eaux souterraines.

L'intérêt d'une méthode de détail quantitative apparaît relativement clairement.

4.2.5 Forages – Analyse des échantillons – Diagraphies – Essais de pompage

Avant de présenter la mise en œuvre et les résultats des méthodes de détail, nous présentons les résultats des forages et de leur exploitation.

4.2.5.1 Forages d'exploitation et de contrôle

Deux campagnes de foration ont été entreprises sur le site de Kombissiri.

La première a été effectuée par une entreprise locale sur cinq points de forages à gros diamètre, préalablement choisis par le staff du projet en charge, sur chacune des deux platesformes de Kombissiri. Cette foration a été exécutée dans le cadre du projet ONEA.

La seconde a été réalisée par l'IRD sur des cibles situées uniquement sur le profil électrique 1 de cette plate-forme 2, au titre de contrôle et d'étalonnage de la géophysique. Elle entre dans le cadre de nos travaux de thèse.

Le matériel et les équipements de forage sont présentés dans l'annexe 1.

• Objectifs des campagnes de foration

Pour la première campagne, il s'agissait de réaliser des forages de gros diamètre dans le but d'obtenir des débits suffisants pour l'alimentation en eau potable de la population de la ville de Kombissiri. Ces forages ont fait l'objet d'essais de pompage, auxquels nous avons participé, afin d'évaluer leur productivité.

Pour la deuxième campagne, effectuée par une équipe de l'IRD, il s'agissait de réaliser des forages de petit diamètre, afin de vérifier les images géophysiques du sous-sol par la reconnaissance des formations géologiques, l'analyse des échantillons de forage et par des diagraphies électriques.

Les apports de ces deux campagnes de foration pour notre étude étaient donc :

- la détermination directe de la géologie détaillée du site,
- la détermination de paramètres physico-chimiques caractéristiques des formations.
- l'évaluation de la productivité des aquifères du site.

• Choix des sites de forage

La localisation de l'ensemble des travaux réalisés sur chacune des deux plates-formes est représentée sur la **figure 4.1.2** ci-dessus.

Les sites de forage de gros diamètre (diamètre minimum = 8'' ¼ après alésage) ont été choisis par le projet ONEA chargé de l'étude hydrogéologique.

Le site du forage KB0202 (alors renommé P1K1) sur la plate-forme 2, a été choisi a partir des reconnaissances électriques et électromagnétiques précédant nos travaux.

Le forage P1K2 (KB0205) a été implanté à partir d'une anomalie détectée sur le panneau électrique du profil 1 réalisé par notre équipe ; son diamètre moyen est de 6''¹/₂. Ce forage est destiné à servir de piézomètre pour le suivi du forage principal P1K1 (KB0202).

Les sites de forage de petit diamètre ont été choisis par l'IRD, de façon à vérifier l'image électrique obtenue sur le profil 1. Cinq forages ont ainsi été implantés sur le profil 1 de la plate-forme 2, qui s'ajoutent aux deux précédemment mentionnés ; leurs abscisses le long du profil sont les suivantes :

A – 198 m	PIKJ		
X = 222 m	P1K6	X = 246 m	P1K1
X = 314 m	P1K7	X = 276 m	P1K2
X = 340 m	P1K4		
X = 382 m	P1K8		

V = 100

DIKE

Les positions sont superposées aux résultats du panneau en dispositif AMN (profil 1) et discutés ultérieurement.



Figure 4.2.9 : Localisation des points de forage sur le profil 1 (dispositif AMN)

Réalisation des forages et prélèvements d'échantillons

La foration des trous de gros diamètre a été menée jusqu'à la profondeur minimale de 60 m ; l'arrêt a été décidé lorsque l'hydrogéologue n'observait plus de fractures dans le socle considéré comme sain.

La foration des trous de petit diamètre a été limitée en profondeur par les performances réduites de l'équipement disponible, si bien que nous n'avons pas pu atteindre complètement nos objectifs.

L'échantillonnage géologique des forages du profil 1 a été réalisé par l'équipe de l'IRD : les prélèvements ont été effectués avec un pas régulier de 0,5 mètre à proximité de la surface, puis de 1 mètre en profondeur.

Plusieurs centaines d'échantillons de 1 à 2 kg ont ainsi été récoltés et mis en sachet pour analyse ultérieure.

• Description des échantillons – Etablissement des coupes lithologiques – Equipement des forages de gros diamètre

1

La description pétrographique des échantillons a été réalisée après observation macroscopique des prélèvements, puis analyse à la loupe des minéraux. Une classification lithologique des formations a ainsi permis d'établir des coupes de chaque forage.

L'équipement d'un forage consiste à placer les tubes et les crépines, en vue de son exploitation ultérieure.

La figure 4.2.10 synthétise les résultats obtenus pour les forages de gros diamètre.



Figure 4.2.10 : Forages de gros diamètre et équipement, de la plate-forme Kombissiri 2

Les différences entre P1K1 et P1K2 sont relativement faibles selon l'interprétation des foreurs : le toit du socle sain serait atteint entre 45 et 55 m avec une profondeur supérieure d'environ 5 m seulement en P1K2.

C'est un modèle bi-couche qui a été retenu pour l'aquifère. Au-dessus, les limites sont nettes entre les argiles de surface et les arènes vers 10 m de profondeur et entre celles-ci et le socle fracturé, vers 25 m.

4.2.5.2 Analyse des échantillons

A – Diffractométrie de rayons X

La diffractométrie de rayons X est une méthode classique en géologie pour l'analyse et la caractérisation de minéraux de roches.

Il s'agit d'une technique analytique non destructive pour l'identification et la détermination quantitative des composés cristallins, appelés "phases", présents dans les échantillons solides et les poudres. L'étude de rais spécifiques caractéristiques de chaque minéral diffracté permet de déterminer chacune des phases présentes. L'identification est obtenue en comparant le diffractogramme de rayons X d'un échantillon de composition inconnue avec ceux de matériaux de référence.

• Objectifs

L'objectif de ces analyses aux rayons X sur quelques échantillons de forage du site de Kombissiri est d'abord de caractériser la lithologie par sa composition minéralogique et donc de les distinguer les uns des autres éventuellement.

Nous allons nous limiter pour cela à la catégorisation des types de minéraux argileux. Cette catégorisation est basée sur la différenciation définie par les différentes longueurs d'ondes présentes sur le spectre. L'argile constitue l'élément minéral qui influence le plus les mesures électriques. Mais cette caractérisation n'est pas quantitative et ne permet pas d'évaluer l'influence du contenu argileux sur la résistivité.

Nous ajouterons aussi un autre minéral essentiel des roches granitiques, à savoir le quartz.

• Bref rappel du principe de la diffractométrie

On étudie la diffraction des rayons X.

Lorsque des rayons X interagissent avec la matière possédant une certaine organisation minérale, il se produit un phénomène de diffusion cohérente et élastique.

L'onde diffractée, qui résulte de l'interférence des ondes diffusées par chaque atome, dépend de la structure cristallographique. La direction du faisceau diffracté est donnée par la loi de Bragg : $2.d_{h,k,l} \sin\theta = n.\lambda$

Avec λ : longueur d'onde du rayonnement diffracté

- n : l'ordre de diffraction
- d : la distance inter-réticulaire du plan cristallographique correspondant.

• Matériels et méthodes

Les échantillons sont broyés et la poudre obtenue est placée dans un porteéchantillons. L'ensemble est placé dans un diffractomètre à rayons X et analysé à l'IRD (US 094). Le diffractomètre utilisé est de marque Siemens D500.

Le tableau suivant résume les conditions d'analyses.

Diffractomètre : Siemens D500	Caractéristiques
Anti-cathode (faisceau incident)	CuKα
Conditions d'analyses	40 KV, 30 mA
Step time	0,02 °
Pas de temps	2s / 0,02°

• Résultats et discussion

Un exemple de diffractogramme est présenté dans l'annexe 2.

L'interprétation consiste à relever les pics caractéristiques de chaque minéral. On obtient ainsi, pour chaque échantillon, l'inventaire des principaux minéraux présents. C'est une caractérisation qualitative.

La couche argileuse à 5 mètres de profondeur semble uniforme du point de vue de sa composition minéralogique sur tout le profil 1 de la plate-forme 2 (P1K1 à P1K8). Elle est d'ailleurs également uniforme avec celle de la plate-forme 1.

Les roches du socle sont, en moyenne, identiques également sur tous les forages considérés des deux plates-formes, sauf pour ce qui est des inclusions spéciales sur la plate-forme 1.

B – Mesure de la susceptibilité magnétique des échantillons

• Objectifs

Le but de cette étude est de tenter de caractériser la lithologie du sous-sol par le paramètre susceptibilité magnétique. Cette caractérisation se fera par l'étude des variations latérales et verticales de χ , en corrélation avec la nature des roches.

• Matériels et méthodes

Le prélèvement des échantillons de forage a été effectué à Kombissiri durant l'année 2002. Seuls quelques uns d'entre eux ont pu être acheminés en France et analysés au laboratoire de géomagnétisme de Saint-Maur (France). 16 échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse en laboratoire. Les mesures de susceptibilité ont ensuite été effectuées avec un appareil de type MS2 de marque Bartington®.

On rapporte ensuite les mesures de susceptibilité à la masse pour obtenir des valeurs de susceptibilité spécifique massique $(/m^3/Kg)$.

• Résultats et discussion

La **figure 4.2.11** représente la distribution de la susceptibilité magnétique sur le profil 1, à 5 m de profondeur.



Figure 4.2.11 : Distribution de la susceptibilité sur le profil 1 (à 5 m de profondeur)

En résumé, les valeurs de susceptibilité sont relativement dispersées. Elles confirment néanmoins la différence attendue entre les altérites, faiblement à moyennement magnétiques.

Les argiles montrent des valeurs variant de 8 à 76 sur les deux plates-formes. Elles peuvent contenir des minéraux magnétiques, notamment des oxydes de fer qui leur donnent souvent une couleur dans les tons rougeâtres oxydés. Ces particules magnétiques étant orientées dans toutes les directions par les processus d'altération, elles peuvent provoquer des hausses locales notables dans les valeurs de la susceptibilité.

Les valeurs de susceptibilité du socle sont du même ordre de grandeur sur les deux plates-formes de Kombissiri. La plupart des échantillons de roches de couleur sombre sont magnétiques, ce qui confirme leur contenu en éléments magnétiques. Les roches de type granitoïdes contiennent proportionnellement beaucoup de minéraux fortement magnétiques et leur réponse est élevée. Les échantillons de roches « roses » leucocrates sont eux aussi magnétiques, ce qui paraît de prime abord surprenant; des analyses complémentaires pour déterminer la nature même des minéraux magnétiques (magnétite, maghémite, goethite...) pourrait apporter des informations complémentaires utiles.

4.2.5.3 Les diagraphies

• Objectifs

Le premier objectif classique des diagraphies électriques, est de déterminer les résistivités vraies des formations géologiques rencontrées dans le forage et par conséquent d'améliorer la connaissance de la lithologie. Les mesures in situ à l'aide des sondes spécialisées conduisent à des valeurs de résistivités apparentes, qui doivent être corrigées des effets du forage ; idéalement, elles devraient être également « inversées » à partir de modèles 1D ou 3D. Les résistivités apparentes corrigées permettent néanmoins de localiser les interfaces entre les formations et de caractériser chacune d'elles par une valeur de résistivité,

fiable à quelques %. On obtient ainsi une « signature électrique », que l'on peut d'abord comparer aux résultats de l'interprétation quantitative des mesures de surface et à partir de laquelle on peut ensuite tenter de définir une typologie des formations rencontrées et en particulier des aquifères.

Le deuxième objectif des diagraphies électriques appliquées à l'étude des aquifères de socle est d'établir des corrélations spatiales entre les forages proches et de détecter les fractures au sein du socle et notamment celles qui donnent lieu à des venues d'eau. Ces fractures qui donnent lieu à des venues d'eau se caractérisent par des valeurs plus faibles de la résistivité apparente par rapport à l'environnement, c'est-à-dire, par des intercalations conductrices. Il est important de corréler ces dernières avec les venues d'eau détectées lors de la foration mécanique. Ces deux informations combinées permettent l'équipement optimum des forages, c'est-à-dire le positionnement optimum des crépines.

• Matériels et méthodes

Nous avons utilisé à la fois une multi-sonde diagraphique construite par l'Institut de Géophysique de Lausanne et une sonde diagraphique construite par l'équipe locale de l'IRD (UR027 Geovast).

La multi-sonde comprend à la fois des outils de diagraphies « classiques » et des outils qui caractérisent le fluide présent dans les forages.

En résumé, les outils de la multi- sonde sont les suivantes :

- sonde de température du fluide
- sonde de résistivité du fluide
- sondes électriques « normales » : N 16'', N 32'', N 64''
- sonde mono-électrode (single point)
- sonde de polarisation spontanée
- latérale

Parmi ces fonctions, nous avons utilisé les sondes électriques « normales » et les sondes de température et de résistivité du fluide.

Rappelons que les mesures des sondes « normales » doivent être corrigées de « l'effet de trou », en particulier dans le cas de fort contraste entre les résistivité du fluide et celle de l'encaissant. En effet, lors de la mesure de résistivité par injection de courant, les lignes de courant ont tendance à se concentrer dans les zones conductrices constituées par le trou de forage, rempli de fluide. Pour réaliser cette correction, on a utilisé des abaques Schlumberger de 1947.

• Résultats et commentaires

Sur Kombissiri 2, les signatures électriques des deux forages proches sont relativement comparables (fig. 4.2.12).



Figure 4.2.12 : Diagraphies : venues d'eau observées et fractures interprétées

On note une croissance relativement régulière des valeurs de résistivité apparente avec la profondeur, depuis des valeurs de l'ordre de 5 ohm.m, jusqu'à 1 000 à 2 000 ohm.m.

Dans la partie inférieure, c'est-à-dire dans le socle, on note une bonne corrélation entre les intercalations conductrices et les venues d'eau. Les résistivités moyennes en P1K2 sont bien inférieures à celles de P1K1 entre 30 et 55 m de profondeur, ce qui est en bon accord avec l'hypothèse, implicite à ce stade, d'un drain centré en P1K2.

4.2.5.4 Essais de pompage

Ils ont été réalisés dans le cadre du projet « Appui au plan d'action de l'ONEA ». Un essai de courte durée sur le piézomètre P1K2 a été réalisé spécifiquement pour les besoins de notre étude.

Nous avons participé à la réalisation de ces pompages d'essais, sur le terrain : 1 essai de longue durée et 2 essais de courte durée ont été réalisés.

• Résultats des essais – Interprétation

> Les résultats

Les résultats bruts ont été interprétés séparément, par l'équipe en charge du projet, puis par Vouillamoz (2003), puis par nous même. Les méthodes appliquées dérivent toutes de la solution analytique de Theis ; la technique simplifiée de Jacob, fondée sur une représentation des données dans un système de coordonnées semi-logarithmique a également été utilisée.

La comparaison des résultats de ces interprétations indépendantes montre que l'incertitude sur les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement déterminées à partir des mêmes données d'essais de pompage est grande ; elle est de l'ordre de 100 % ou supérieure (tableau 4.1 et 4.2).

Un exemple de données brutes est présenté en annexe 3. La qualité des données issues de ces essais de pompages est généralement bonne.

FORAGES	Vouillamoz (2003)			Projet ONEA				
	$T (x 10^{-4}) m^2 / s)$	Incer titude	S (x 10 ⁻⁴)	Incer titude	T (x 10 ⁻⁴ m ² /s)	Incer titude	S (x 10 ⁻⁴)	Incer titude
KB0202 = P1K1	6	70 %	3,8	30%	8			

 Tableau
 4.1 : Interprétation des essais de longue durée

FORAGES	Projet ONEA				Interprétation TOE		
	$\frac{T}{(x \ 10^{-4} \text{m}^2/\text{s})}$	Incertitude	B *	C*	$\frac{T}{(x \ 10^{-4} \ m^2/s)}$	B *	C*
KB0202 = P1K1			0,74	0,074	1,5 -10	0,66	0,082
$\mathbf{KB0205} = \mathbf{P1K2}$	3,2				1 - 8	1,56	0,17

* coefficients dans l'équation de perte de charge de Jacob, tels que $s = BQ + C Q^2$

Tableau 4.2 : Interprétation des essais de courte durée

Il y a une bonne concordance entre les valeurs indépendantes des coefficients B et C ; Les valeurs de transmissivité calculées à partir des essais de courte durée sont systématiquement plus faibles que celle déterminées à partir des essais de longue durée. Ce sont ces dernières qui seront retenues.

Ce sont finalement les valeurs interprétées par Vouillamoz qui seront retenues pour la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, puisque ce sont celles qui seront utilisées pour la calibration de la RMP.

> Les commentaires

Transmissivité : T serait de l'ordre de 3 à $6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Coefficient d'emmagasinement : Les valeurs sont très faibles, elles sont dans la gamme de celles des nappes captives : 4×10^{-4}

4.2.6 Sondages électriques

Les données des sondages électriques sont de bonne qualité (figure 4.2.13) ; les àcoups de prise sont de faible amplitude et faciles à corriger.

Les courbes de sondage obtenues sont conformes à la réponse attendue d'un aquifère de socle. La conductance totale au-dessus du socle sain est la même pour les deux sondages puisque leurs branches finales ascendantes finales sont superposées. En revanche, les argiles superficielles en P1K1 sont sub-affleurantes, alors qu'il existe une couverture résistante légèrement plus épaisse en SE 5.





Résultats des inversions

Les résultats d'une inversion non contrainte à partir de modèles initiaux voisins pour les deux sondages sont comparés (**figure 4.2.14**) : un modèle à nombre minimal de couches (6 terrains) d'une part et un modèle multi-couche (17 - 28 terrains) d'autre part.



Figure 4.2.14 : Interprétation multi-couche des 2 SE Schlumberger (Kombissiri 2)

La solution fournie par le modèle à nombre minimal de couches, pour chacun des deux sondages, conduit à une coupe particulièrement simple où la seule information nette est pratiquement la profondeur du mur des argiles conductrices de surface. Au dessous de cet horizon, il est impossible de différentier les arènes, la zone fracturée et le socle sain. En fait, ce modèle ne laisse pratiquement aucune place pour les arènes et le socle fracturé puisque des valeurs de résistivité supérieures à 2 000 ohm.m apparaissent dès 13 m de profondeur. C'est l'un des handicaps de ces modèles trop simples.

Les solutions obtenues à partir du modèle multicouche en revanche, font apparaître une zone intermédiaire entre les argiles superficielles conductrices et des valeurs de résistivité supérieures à 2 000 ohm.m. Le socle sain, interprété à partir de ces modèles, pourrait être rencontré à des profondeurs voisines de 37 m, ce qui conduirait à un aquifère potentiel de l'ordre de 30 m d'épaisseur. Si l'on se fonde sur le seul critère de l'épaisseur et de la résistivité moyenne de cette couche intermédiaire, c'est le site de Kombissiri 2 qui serait potentiellement le plus intéressant.

> Contrôle à l'aide des forages P1K1 et P1K2 et des diagraphies

Aucun forage n'a finalement été réalisé sur le site SE5. Le résultat de l'inversion du sondage électrique ne peut donc être contrôlé. Seul le panneau 6, qui le relie au forage P1K1, peut nous permettre de le caractériser.

Les coupes géologiques des deux forages P1K1 et P1K2 ont été présentées précédemment (fig. 4.2.10). Les coupes de ces forages espacés de 30 m, sont très proches du point de vue lithologie, notamment pour ce qui est des interfaces argile/arènes/socle fissuré. La profondeur du toit du socle sain est estimée à 45 m à P1K1 et à 52 m à P1K2; il_est identifié comme étant une formation granitoïde appelée granodiorite.

Ces sites ont été choisis pour leur intérêt hydrogéologique, on sait par conséquent qu'ils ne correspondent pas à une situation tabulaire, ce qui rend plus incertaine l'exploitation du sondage électrique.

Les diagraphies dans ces deux forages ont également été présentées précédemment. (fig. 4.2.12). Leurs signatures électriques sont très comparables.

On note :

- Une croissance régulière de la résistivité apparente de 5 ohm.m vers 4 m de profondeur, jusqu'à 100 ohm.m vers 27 m ; elle justifie pleinement l'interprétation multi-couche de tout sondage électrique et elle confirme la quasi-impossibilité de détecter l'interface entre les arènes et le socle fissuré à partir de mesures de surface.

- Des valeurs supérieures à 800 ohm.m sont atteintes dès 33 m à P1K1 et 35 m à P1K2. Or cet accroissement brutal de la résistivité, de 200 à 800 ohm.m se situe au milieu du socle fissuré selon la description lithologique, si bien que dans la partie inférieure du socle dit fissuré, la résistivité atteint des valeurs de 1 800 ohm.m à P1K2 et 4 000 ohm.m à P1K1.

- Des intercalations conductrices au sein du socle fissuré. Elles ont peu d'intérêt pour le contrôle du sondage électrique car elles ne sont pas détectables depuis la surface ; en revanche ce sont elles qui sont importantes pour l'alimentation de l'aquifère et à ce titre, elles seront étudiées en détail lors de la synthèse.

- Le premier apport à l'étude de ce site fourni par les diagraphies est une valeur moyenne de résistivité variant de 200 à 3000 ohm.m pour le socle fissuré, ce qui est relativement supérieur à ce qui était attendu et qui va plutôt dans le sens de fractures horizontales au milieu d'un socle massif plutôt que dans celui d'un socle fracturé en moyenne.

Pour conclure, l'exploitation la plus riche de ces deux sondages électriques isolés est fournie par l'inversion multi-couche. Les deux sites P1K1 et SE5 paraissent raisonnablement similaires. Une interprétation hydrogéologique possible, à partir des résultats de ces inversions multi-couches, serait de positionner un réservoir potentiel situé entre 12 et 25 m de

profondeur, ce qui est en bon accord avec les résultats des forages et des diagraphies pour P1K1.

4.2.7 Tomographie électrique – Etude méthodologique

La plate-forme de Kombissiri 2 a été sélectionnée pour l'étude méthodologique la plus complète des panneaux électriques, dès l'examen des premiers résultats, qui ont montré une réponse bien caractérisée. Le profil 1 a fait l'objet des tests les plus détaillés. Les résultats obtenus ont été appliqués aux autres profils de la plate-forme 2, ainsi qu'à la plate-forme 1 de Kombissiri et au site de Sanon. Quelques tests sur ces deux derniers sites ont permis de vérifier les résultats méthodologiques obtenus sur le profil 1 de Kombissiri 2.

• Acquisition des données - Contrôle de la qualité - Archivage

Les panneaux électriques Wenner ont été réalisés au cours de la campagne 2001 (juin à septembre) et les panneaux Pôle-dipôle pendant les mois d'avril à juin 2002. Les difficultés principales ont été dues à la météorologie, notamment en raison de la saison des pluies.

La qualité des mesures est très bonne pour les profils 1 à 6. En revanche, elle est nettement moins bonne pour les profils 10 à 14. La qualité a toujours été vérifiée sur le terrain à partir du facteur de qualité, qui représente l'écart-type des mesures répétées, exprimé en %. De plus, pour les profils principaux c'est-à-dire les profils 1 et 6, les mesures ont été répétées sous la forme de deux séries d'acquisition indépendantes.

• Représentation des données brutes

Les résultats bruts sont représentés de manière classique sous la forme de pseudosections, soit avec les conventions du programme Res2Dinv®, soit avec celles du programme X2IPI® (Bobatchev, 2000).

Ces conventions sont les mêmes, du point de vue de la géométrie, pour les dispositifs symétriques (Pôle-pôle, Wenner Alpha, Wenner Bêta, Schlumberger et Dipôle-dipôle). La valeur de la résistivité apparente est placée sur l'axe de symétrie des dispositifs, à une pseudoprofondeur liée à la distance émetteur/récepteur.

Pour le Pôle-dipôle, la convention diffère entre les deux programmes : alors que dans Res2Dinv, la valeur est reportée sur l'axe de pseudo symétrie de ce dispositif non symétrique, dans X2IPI, elle est représentée à l'aplomb du centre du dipôle de mesure. Ce dernier choix à l'avantage de représenter les valeurs de la résistivité apparente au même point, pour un dipôle de mesure donné, pour les dispositifs « Avant », « Arrière » et « Avant + Arrière » = Schlumberger. Dans le logiciel Res2Dinv®, elles sont représentées en trois points différents, pour le même dipôle de mesure. Quelle que soit la convention, on obtient une image plus ou moins déformée de la réalité géologique, mais il y a plus de cohérence dans la représentation de X2IPI®.

Trois sections brutes obtenues sur le profil 1 sont représentées sur la **figure 4.2.15**. La même échelle des résistivités apparentes est utilisée pour tous les dispositifs ; en revanche, les échelles verticales ne doivent pas être comparées. Le choix de l'échelle des couleurs n'est pas neutre. Il est intéressant dans un premier temps de conserver une échelle semblable pour toute une zone d'étude, de façon à faciliter les comparaisons. En revanche, il est très important, lors de la présentation de résultats propres à un profil et à un dispositif, de choisir des échelles spécifiques.



On remarque une très bonne similarité entre toutes les images brutes, on est donc assuré de la robustesse de l'interprétation géologique qui en découlera.

Figure 4.2.15 : Exemples de pseudo-coupes brutes A : Wenner α ; B : Wenner β ; C : Pôle-dipôle Avant

• Test des paramètres de modélisation et d'inversion

Le programme Res2Dinv, propose un ensemble de paramètres par défaut et permet une inversion automatique à partir de ces paramètres. Il propose également 6 groupes d'options, qui permettent de tester, puis d'imposer des paramètres spécifiques ; ces groupes sont les suivants :

- méthodes d'inversion
- discrétisation du modèle
- fonction « sensibilité »
- paramètres d'inversion
- maillage pour la modélisation directe
- suivi de l'inversion

La méthode de modélisation directe retenue est celle des différences finies, puisqu'elle est la plus précise, lorsque la topographie peut être négligée, ce qui est notre cas.

Le temps de calcul ne posant plus de problème, nous avons choisi systématiquement les options de calcul qui conduisent à la précision maximale, notamment celui du calcul de la matrice du Jacobien à chaque itération.

Les tests ont porté sur :

- la discrétisation du modèle
- les méthodes d'inversion
- les paramètres d'inversion

Il s'agit de tests empiriques non complets ; ils sont limités au problème posé, c'est-àdire à l'étude des mesures acquises à Kombissiri et à Sanon. L'évaluation de la qualité des résultats n'est pas quantitative ; elle est liée à la vraisemblance géologique, la répétitivité, la robustesse et enfin au contrôle par les autres techniques géophysiques, les forages et leur exploitation.

> Discrétisation du modèle

Après de nombreux essais, le modèle initial unique que nous avons retenu est le suivant :

- épaisseur de la première couche : 1 m
- épaisseur croissante avec la profondeur, des couches successives : rapport : 1,1
- largeur de la maille égale à la demi-distance entre les électrodes, soit 2 m
- maillage jusqu'aux limites latérales des profils
- profondeur maximale = 1 ou 1,25 x pseudo-profondeur de chaque dispositif

- résistivité initiale du demi-espace homogène, égale ou proche de la valeur moyenne des résistivités apparentes mesurées sur le profil à inverser.

Nombre d'itérations

Afin d'établir des comparaisons valables entre les différents paramètres et les différents dispositifs et après de nombreux essais, nous avons toujours choisi le même nombre d'itérations maximal, égal à 5, pour tous les tests et pour les résultats retenus.

D'une manière générale, la convergence est relativement rapide. Après trois itérations, la somme des carrés des écarts résiduels est généralement inférieure à 15 % ; et on constate que tous les éléments structuraux importants sont mis en place dès la troisième itération.

Après cinq itérations, la valeur de la somme des écarts résiduels est en général plus faible, les contours des objets deviennent souvent plus irréguliers, les contrastes de résistivité entre les structures adjacents augmentent et il arrive que quelques objets plus fins apparaissent (**figure 4.2.16**). On a l'impression de « sur-interpréter » ; les inversions présentées ont été obtenues avec l'option « standard » (voir ci-dessous : Les méthodes d'inversion : standard/robuste).



Figure 4.2.16 : Exemple d'évolution d'une section avec le nombre d'itérations

Préférant sur-interpréter plutôt que sous-interpréter, parce que l'on veut s'assurer que l'on ne gommera aucne information potentiellement intéressante, les pseudo-coupes présentées correspondent en général à cinq itérations

Une autre évaluation de la qualité du processus d'inversion, après trois, quatre et cinq itérations est présentée ci-dessous, par comparaison entre les résistivités obtenues après inversion et les résistivités mesurées directement in situ, à partir des diagraphies.

> Les méthodes d'inversion : inversion lisse standard / inversion robuste ?

L'option « lisse - standard » est fondée sur l'équation de Gauss-Newton modifiée, telle que présentée ci-dessous, où le lissage ne s'applique qu'aux changements des paramètres des modèles, Δq (de Groot-Hedlin and Constable, 1990 ; Sasaki, 1992).

$$(\mathbf{J}^{\mathrm{T}} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}) \Delta \mathbf{q}_{\mathrm{K}} = \mathbf{J}^{\mathrm{T}} \mathbf{g}$$

 où J: matrice du Jacobien des dérivées partielles F = α_x C_x^T C_x + α_y C_y^T C_y α_z C_z^T C_z où C_x, C_y, C_z = matrices de lissage spatial et α_x, α_y, α_z = pondérations relatives Δq: vecteur du changement des paramètres du modèle g: vecteur de la différence entre valeurs observées et celles du modèle q: vecteur des n paramètres du modèle tel que q = col (q₁, q₂, ...q_n) λ: le coefficient d'amortissement de Marguardt

Cette option, qui correspond à une inversion de type norme L_2 , nous paraît bien adaptée au problème des aquifères de socle où les transitions sont en général progressives.

Une autre option, plus lisse encore est proposée par Res2Dinv. La contrainte de lissage s'applique aux valeurs des modèles eux-mêmes q, et pas seulement à leurs changements Δq .

Elle est fondée sur l'équation ci-dessous ; elle n'a pas été testée.

$$(\mathbf{J}^{\mathrm{T}} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^{\mathrm{T}} \mathbf{g} - \lambda \mathbf{F} \mathbf{q}$$

L'option « inversion robuste » (Oldenburg, 1994a) est telle que le même poids est donné, aux changements des valeurs des paramètres du modèle et aux écarts entre valeurs expérimentales et valeurs calculées. L'équation correspondante est la suivante :

$$(\mathbf{J}^{\mathrm{T}} \mathbf{J} + \lambda \mathbf{F}_{\mathrm{R}}) \,\Delta \mathbf{q}_{\mathrm{k}} = \mathbf{J}^{\mathrm{T}} \,\mathbf{R}_{\mathrm{d}} \,\mathbf{g} - \lambda \mathbf{F}_{\mathrm{R}} \,\mathbf{q}_{\mathrm{k}}$$

Elle correspond à une inversion de type norme $L_{1;}$ elle tend à créer des modèles comportant des « blocs » de résistivité constante, ce qui dans certaines situations géologiques peut être plus réaliste que des transitions lisses.

Sur la **figure 4.2.17** sont représentés les résultats comparés d'une inversion lisse standard et d'une inversion robuste, tous autres paramètres étant égaux par ailleurs, pour les dispositifs les plus sensibles aux variations latérales, c'est-à-dire, le Pôle-dipôle et le Wenner Bêta.


Figure 4.2.17 : Résultats d'inversion des dispositifs WB et AMN
A : WB, inversion standard ; B : WB, inversion robuste
C : AMN, inversion standard ; D : AMN, inversion robuste

Les conclusions sont les mêmes pour les deux dispositifs ; elles s'appliquent aussi au dispositif Wenner α , dont les résultats ne sont pas représentés :

- les mêmes unités conductrices et résistantes sont individualisées sur les deux sections « standard » et « robuste ».

- les interfaces horizontales et verticales sont extrêmement lissées sur les sections «robustes», ce qui atténue considérablement la résolution de l'image et également la profondeur des conducteurs étroits.

- la plage des valeurs des résistivités est plus étroite pour les inversions « robustes », ce qui est bien illustré sur les coupes, par le fait que des structures ne sont plus visibles sur ces sections si l'on utilise la même échelle de couleurs que sur la section « standard » (une échelle spécifique aux sections robustes ferait réapparaître certaines d'entre elles).

Notre recommandation, comme pour le choix du nombre d'itérations, nous conduit vers la sur-interprétation, plutôt que vers la sous-interprétation. Nous recommandons par conséquent l'option « standard ».

Les paramètres d'inversion

o Le coefficient d'amortissement λ

Différents essais ont été réalisés. Aucune différence significative n'a été perçue par rapport au paramètre proposé par défaut, soit $\lambda = 0,16$ pour la première itération, puis une diminution régulière pour les itérations suivantes.

o Le paramètre v/h

Ce paramètre permet de privilégier la recherche de structures plutôt horizontales (v/h faible) ou plutôt verticales (v/h élevé).

Les tests ont été systématiquement limités à quatre valeurs pour le rapport v/h : 0,5 - 1 - 1,5 - 2. Ils ont été réalisés à la fois avec l'option standard et robuste, avec le coefficient d'amortissement par défaut.

Les résultats sont illustrés sur la **figure 4.2.18** pour les deux dispositifs AMN et WB. Ils sont conformes à notre attente : les interfaces horizontales sont privilégiées lorsque v/h = 0,5 alors que v/h = 2 privilégient les interfaces verticales.

Notre recommandation nous conduit toujours vers la sur-interprétation dans l'étape initiale. L'objectif principal du panneau étant la recherche des structures non horizontales, nous recommandons l'utilisation d'un facteur v/h ≥ 2 pour les dispositifs originellement les plus sensibles aux variations latérales, c'est-à-dire Wenner Bêta et Pôle-dipôle. En revanche pour le Wenner Alpha; s'il est utilisé pour définir au mieux la structure tabulaire moyenne locale, nous recommandons v/h de l'ordre de 0,5.



Figure 4.2.18 : Test du paramètre v/h sur le profil 1 **A** : Wenner β , v/h = 0,5 ; **A'** : Wenner β , v/h = 2 **B** : Pôle-dipôle, v/h = 0,5 ; **B'** : Pôle-dipôle, v/h = 2

Comparaison entre les dispositifs

Avant de contrôler les résultats des panneaux par les forages et les diagraphies, nous avons effectué une comparaison des performances des différents dispositifs utilisés, après inversion avec les paramètres recommandés.

Les coupes finalement retenues résultant de l'inversion jugée optimale pour chacun des dispositifs sont représentées sur les **figures 4.2.19**.



Figure 4.2.19 : Sections inversées optimales du profil 1 A : Wenner α ; B : Wenner β C = Pêle disêle Assert = D = Pêle disêle Assert

C : Pôle-dipôle Avant ; D : Pôle-dipôle Arrière

Les conclusions que l'on peut tirer de leur comparaison sont les suivantes :

1 – La même «image électrique» générale est pratiquement fournie par tous les dispositifs.

Ces images donnent les mêmes informations pour :

- la cartographie des formations très superficielles,
- les variations latérales des couches intermédiaires,
- la morphologie du toit du résistant profond,
- et la localisation de structures verticales conductrices.

Elles conduiront toutes à la même interprétation géologique et hydrogéologique. Mais leur fiabilité sera différente, conformément à leurs spécificités, qui ont déjà été mises en évidence lors de l'étude théorique initiale.

2 – Le dispositif Wenner Alpha (**figure 4.2.19 A**) est malgré tout le moins bien adapté à ce type d'investigation, pour deux raisons : (1) sa profondeur d'investigation limitée et (2) sa forte tendance au lissage horizontal. L'existence du «drain vertical» à l'aplomb de la station 272 est nettement moins assurée qu'avec les autres dispositifs ; en revanche à l'aplomb de la station 376 m, il est particulièrement net, sans que l'on comprenne pourquoi.

3 – Le dispositif Wenner Bêta (**figure 4.2.19 B**), est plus adapté que le Wenner Alpha. L'existence de « drains verticaux » est nettement plus assurée. L'image qu'il fournit jusqu'à 20 mètres de profondeur est extrêmement voisine de celles obtenues par chacun des deux Pôles-dipôles.

4 – Le dispositif Pôle-dipôle (**figure 4.2.19** C) présente un atout majeur ; sa profondeur d'investigation est plus de deux fois supérieure à celle des deux précédents pour un même nombre d'électrodes disposées à la surface du sol, puisqu'il s'agit d'un demi-dispositif.

La topographie du toit du résistant profond est donc nettement mieux assurée. L'existence de deux « drains verticaux » ne semble faire aucun doute. Peut-on affirmer que ces drains s'enracinent jusqu'à 50 mètres ou plus ? Il faut être prudent car on sait que toute structure étroite a tendance à se prolonger jusqu'aux plus grandes profondeurs avec ces dispositifs. Sur les sections brutes représentées à partir des résistivités apparentes, ce prolongement est naturellement très bien marqué ; il ne disparaît jamais totalement après inversion, en raison de la faible sensibilité intrinsèque de tous les dispositifs, à l'extension verticale de structures étroites.

On remarque une bonne similarité d'ensemble entre les coupes obtenues à partir des Pôles-dipôles indépendants « Avant » et « Arrière » : les structures sont cependant nettement plus marquées avec le dispositif « Arrière ».

Les algorithmes de filtrage des « à-coups de prise » (filtrage par la médiane, notamment avec X2IPI®) n'ont pas été appliqués. A posteriori, la bonne qualité des coupes inversées obtenues tend à prouver qu'ils ne s'imposaient pas, malgré les conditions superficielles relativement hétérogènes.

• Inversions jointes

Le programme Res2Dinv permet l'inversion jointe de différents dispositifs. Il ne permet pas d'introduire une pondération particulière permettant de privilégier l'un plutôt que l'autre.

La pondération s'effectue donc automatiquement en fonction des sensibilités spécifiques de chaque dispositif. Dans cet exemple particulier où les images sont très voisines,

on constate seulement une confirmation des résultats individuels précédents (figure 4.2.20 et 4.2.21).

Lorsque les dispositifs Wenner Alpha et Bêta sont mis en œuvre successivement sur le même profil, nous recommandons de présenter les résultats de manière synthétique, sous la forme de la coupe résultant de l'inversion jointe, plutôt que de représenter les deux coupes indépendantes.

De la même façon, lorsque les Pôles-dipôles avant et arrière sont mis en oeuvre successivement sur le même profil, nous recommandons, en principe, de présenter les résultats de manière synthétique à partir de leur inversion jointe, après avoir examiné chacun des résultats individuellement. L'inversion jointe est beaucoup plus riche que l'inversion du dispositif Schlumberger qui résulterait de l'addition des deux demi-dispositifs.



Figure 4.2.20 : Inversion de dispositifs Wenner α et β du profil 1 (Kombissiri 2) **A** : Wenner α ; **B** : Wenner β ; **C** : Wenner $\alpha+\beta$



Figure 4.2.21 : Inversion de dispositifs Pôle-dipôle du profil 1 (Kombissiri 2) A : AMN ; B : MNB ; C : AMN+MNB

• Contrôle de la topographie du socle et de l'existence de drains verticaux à partir des forages

Sur le profil 1, comme il a été dit précédemment, cinq forages spécifiques de petit diamètre ($\Phi = 2$ '') ont été réalisés, ainsi que les diagraphies électriques correspondantes, qui s'ajoutent aux deux forages profonds (P1K1 et P1K2), afin de contrôler directement les résultats de l'inversion des panneaux électriques.

Les forages de contrôle (P1K4 à P1K8) ont été réalisés par notre équipe, avec une sondeuse IRD; le programme initial envisagé n'a malheureusement pas pu être réalisé complètement. Ils ont été implantés, en complément des forages profonds, par ordre de priorité de vérification, de manière à contrôler chaque élément de l'image obtenue :

- les épontes du drain principal : P1K1 et P1K2 entre les stations 240 et 300 m ;

- la remontée du socle : P1K4 et P1K7 entre les stations 300 et 350 ;
- les interfaces plus ou moins horizontales : P1K5 et P1K6 entre les stations 180 et 225 ;
- le drain secondaire : P1K8 à la station 384.

La coupe présentée ci-dessus résultant de l'inversion jointe des deux dispositifs Pôledipôle montre une topographie complexe du toit du résistant profond :

- trois compartiments, pour lesquels le mur des formations conductrices est situé entre 12 et 30 mètres de profondeur ; le compartiment le plus haut du socle étant situé à l'extrémité NE du profil 1.

- deux drains verticaux, situés à l'aplomb des stations 276 et 384, séparant ces compartiments.

La coupe réalisée à partir du suivi géologique des forages de contrôle (**fig. 4.2.22**), est la meilleure confirmation de la validité des résultats des panneaux dans la partie centrale du profil.

La morphologie de la topographie du socle et en particulier l'existence de drains verticaux, particulièrement importants pour l'hydrogéologie, mis en évidence par tous les dispositifs, est parfaitement confirmée.

On peut néanmoins se poser la question de la précision sur la position des épontes apportée par le géophysicien, à l'aide du Pôle-dipôle notamment. Est-elle suffisante pour implanter un forage vertical avec le maximum de chance de succès du point de vue de l'hydrogéologue ? Ne vaudrait-il pas mieux réaliser un forage oblique expéditif de type minier pour localiser les zones les plus productives, puis implanter le forage vertical d'exploitation à partir de cette information directe déjà obtenue ?



Figure 4.2.22 : Coupe géologique établie à partir des log de forage du profil 1 (Kombissiri 2)

145

• Contrôle des résistivités « vraies » et des épaisseurs de chacune des couches de l'aquifère à partir des diagraphies ?

Comparaison entre des pseudo-diagraphies obtenues au croisement de quatre panneaux indépendants :

La **figure 4.2.23** représente les pseudo-diagraphies extraites des coupes finalement retenues à l'issue des 5 itérations sur la verticale commune aux panneaux 1, 4, 5 et 6. Il y a un bon accord qualitatif entre les résultats obtenus et un accord quantitatif satisfaisant en terme de conservation de la conductance totale. Ce résultat confirme la qualité des résultats et d'une certaine manière la robustesse des inversions.



Figure 4.2.23 : Pseudo-diagraphies extraites des panneaux au point P1K1 (Kombissiri 2)

Comparaison entre les pseudo-diagraphies extraites des panneaux et les diagraphies des forages P1K1 et P1K2 :

L'étude des diagraphies réalisées sur ces deux forages profonds a clairement montré la progressivité de l'augmentation des résistivités avec la profondeur, depuis le mur des argiles superficielles, jusqu'au toit du socle sain.

S'il est difficile de situer les interfaces entre les couches successives à partir des diagraphies, il est encore beaucoup plus difficile de le faire à partir des mesures électriques de surface, sondage électrique ou panneau. Ceci justifie d'ailleurs l'inversion multi-couche des sondages électriques et le choix de l'option « solutions lisses » pour l'inversion des panneaux.

La figure 4.2.24 permet de comparer les pseudo-diagraphies extraites des coupes résultant de l'inversion « lisse » des panneaux le long de la verticale 246, avec les diagraphies

réalisées dans le forage P1K1 situé à cette même abscisse. Les pseudo-diagraphies ont été représentées à chaque étape du processus itératif de l'inversion pour le panneau Wenner et pour le panneau Pôle-dipôle « Avant ».

Cette comparaison entre les diagraphies et les résultats de l'interprétation quantitative des panneaux est une première, à notre connaissance. Elle «s'est imposée» à nous, comme très pertinente sur le terrain au Burkina Faso, dès que nous avons disposé des deux types de données simultanémént.



Figure 4.2.24 : Comparaison diagraphie et inversions de panneaux au point P1K1

On constate :

- Une adéquation satisfaisante entre la morphologie générale des variations des résistivités avec la profondeur déduites de la diagraphie et des pseudo-diagraphies.

- Une augmentation générale des contrastes de résistivité entre le conducteur superficiel et les résistants profonds au cours du processus itératif ; paradoxalement l'accord apparaît souvent de meilleure qualité après l'itération 3, par comparaison avec l'itération 5. Ceci est compatible avec le processus de minimisation des écarts à partir d'un modèle initial qui est un demiespace homogène et avec la relative insensibilité du coefficient d'interface :

$$(1 - \rho_m / \rho_n) / (1 + \rho_m / \rho_n)$$

à l'augmentation du contraste, qui s'exprime par le rapport ρ_m / ρ_n .

- Une diminution de l'épaisseur de la couche conductrice au cours du processus itératif, qui va de paire avec la diminution de la valeur de résistivité, ce qui est en accord avec la loi de conservation de la conductance et la loi d'équivalence classique.

- L'accord est quantitativement plus satisfaisant entre pseudo-diagraphies et diagraphie réelle dans les 15 premiers mètres, parce que la situation est relativement tabulaire si bien que l'inversion 2D du panneau est stable latéralement.

- L'accord est moins satisfaisant en profondeur en revanche, pour le Pôle-dipôle MNB notamment ; mais il faut noter que le forage P1K1 est situé à l'interface verticale entre deux milieux et que par conséquent l'inversion 2D du panneau est peu stable latéralement. Les résultats de l'inversion robuste sont d'ailleurs plus proches de la diagraphie car elle «lisse » latéralement. Le résultat de l'inversion correspondant au Pôle-dipôle AMN est d'ailleurs la plus proche, du fait que le dispositif demi-Schlumberger est situé à l'aplomb d'une situation 1D.

Les mêmes tests et les mêmes comparaisons ont été réalisés à partir des diagraphies du forage P1K2 ; les résultats sont les mêmes, du point de vue méthodologique.

Confirmation des variations latérales de la «qualité» des altérites dans les 15 premiers mètres le long du profil – Extraction de sondages électriques

L'examen des coupes finales retenues après l'inversion des panneaux des différents dispositifs (**figure 4.2.23**), montre clairement des variations latérales de résistivité entre la partie centrale la plus conductrice et les parties latérales.

> Comparaison avec les diagraphies des forages peu profonds P1K4 à P1K8

A l'intérieur même de l'anomalie principale (figure 4.2.25) :

- dans les forages P1K1, P1K2, P1K6 et P1K8. Les résistivités mesurées entre 5 et 10 mètres de profondeur sont comprises entre 6 et 12 ohm.m.

- dans les forages P1K4, P1K5, P1K7 les résistivités sont comprises entre 12 et 20 ohm.m, voire 50 ohm.m.



Figure 4.2.25 : Comparaison diagraphie et inversions sur les forages à petit diamètre (Kombissiri 2)

Comparaison des pseudo-diagraphies avec les résultats d'inversion 1D de Sondages électriques extraits des panneaux

Les premiers sondages électriques extraits des panneaux sont les sondages Pôledipôle avant et Pôle-dipôle Arrière correspondant à la série des forages P1K1 à P1K8, afin d'évaluer l'incidence de la non tabularité. Le sondage électrique Schlumberger P1K1 est comparé aux sondages extraits les plus proches (**figure 4.2.26**).



Figure 4.2.26 : Comparaison du SE P1K1 avec les sondages proches extraits de AMN

Les différences entre les sondages « Avant » et « Arrière » sont en général assez marquées. Il faut donc être très prudent sur la confiance à apporter aux valeurs absolues qui résultent des inversions 1D, aussi bien pour les résistivités, que pour les épaisseurs et pour les conductances totales.

Plusieurs sondages Wenner Alpha ont également été extraits du panneau brut, afin d'évaluer leur capacité de lissage des conditions superficielles et de tenter de confirmer que les altérites sont de plus en plus conductrices au fur et à mesure que l'on se dirige vers le centre de l'anomalie. Les sondages et les résultats de leur interprétation sont représentés sur la **figure 4.2.27**.



Figure 4.2.27 : Représentation (A) et interprétation (B) des sondages extraits du Wenner a

• Synthèse – Résultats du panneau électrique du profil 1

Les coupes obtenues après inversion à partir de la combinaison Wenner Alpha + Bêta d'une part et de celle des deux Pôles-dipôles d'autre part, donnent une image robuste du profil 1, qui peut-être interprétée par le géologue et l'hydrogéologue. La coupe Wenner Alpha + Bêta est représentée de nouveau ci-dessous, pour faciliter comparaison avec celle des profils 2 et 3, qui lui sont parallèles (**fig. 4.2.28**).



Figure 4.2.28 : Coupe inversée du profil 1 (Kombissiri 2), dispositif conjoint Wenner $\alpha+\beta$

• Les panneaux électriques des profils 2 et 3

Les coupes obtenues pour les profils 1, 2 et 3, à partir de la combinaison commune Wenner alpha + Bêta, après une inversion réalisée avec les paramètres retenus, sont représentées ci-dessous (**fig. 4.2.29**).



Figure 4.2.29 : Inversion conjointe en dispositif Wenner Alpha + Bêta A : Profil 2 ; B : Profil 3 (Kombissiri 2)

L'image géologique et hydrogéologique qui découle de ces coupes est caractérisée par les trois éléments principaux suivants :

- une topographie du toit du socle relativement complexe, avec des accidents verticaux nets et des décrochements ; une fermeture vers le NE (profils 1, 2 et 3) et une fermeture vers le SW (profil 2) ;

- l'existence de deux drains sub-verticaux ; le principal au centre des profils 1 et 2 au voisinage des stations 280 sur chacun d'eux, qui correspond à la station 403 sur le profil 3 ; un second vers le SW, au voisinage des stations 388 sur les profils 2 et 3 ;

- une variation latérale importante de la « qualité » des altérites avec une partie centrale nettement plus conductrice que sur les bords ; cette différence de nature est assurée puisque ces formations conductrices de nature différente sont sub-affleurantes sur le profil 1, au centre (entre les stations 224 et 264) et au SW (entre les stations 416 et 448).

• Les panneaux électriques des profils 4 et 5

Les profils 4 et 5, d'orientation différente des trois précédents permettent également de confirmer les trois éléments majeurs : la remontée du socle vers le NE, l'existence du drain vertical et la variation latérale de la nature des altérites entre le centre et les bords. Celle-ci est d'autant plus assurée, que ces formations différentes sont sub-affleurantes en deux endroits distincts sur le profil 4 (**figure 4.2.30**).



Figure 4.2.30 : Inversions conjointes en dispositif Wenner α+β, A : Profils 4 ; B : Profil 5 (Kombissiri 2)

• Les panneaux électriques du profil 6

Ce profil est orienté NW-SE; l'hypothèse d'une structure 2D allongée perpendiculairement au panneau s'applique difficilement.

Les coupes Wenner Alpha et Wenner Bêta résultant de l'inversion sont voisines et complémentaires (figure 4.2.31).

A partir de ces seules coupes et des deux sondages électriques.



Figure 4.2.31 : Panneaux électriques multi-dispositifs du profil 6 (Kombissiri 2) A : Wenner α ; B : Wenner β ; C : Wenner $\alpha + \beta$

On note, sur ces sections, un plongement du substratum au sud-est de la station 320 ; ce qui est en bon accord avec les premières informations obtenues avec l'électromagnétisme de reconnaissance.

• Les cartes de résistivité – Image 3D de l'aquifère

L'interprétation des panneaux électriques réalisés sur les différents profils permet une cartographie des résistivités « vraies » ou « interprétées ». L'intérêt de cette cartographie de résistivité électrique à partir de panneaux est dans son aspect multi-profondeurs correspondant justement à une tomographie.

Les **figures 4.2.32** et **4.2.33** présentent les cartes obtenues à partir des dispositifs Wenner Alpha.



Figure 4.2.32 : Carte des résistivités issues des panneaux Wenner Alpha (Kombissiri 2) A : profondeur = 0,5 m ; B : profondeur = 10, 7 m



Figure 4.2.33 : Carte des résistivités issues des panneaux (Kombissiri 2) A : profondeur = 20 m ; B : profondeur = 26,3 m

Le sillon conducteur détecté par l'électromagnétisme de reconnaissance est maintenant bien caractérisé par les panneaux électriques. Son extension latérale est précisée le long des profils ; on pourra calculer une surface pour une valeur d'iso-résistivité choisie. Son épaisseur moyenne l'est également, on note l'approfondissement à l'extrême sud-est. Les variations spatiales de la couverture superficielle et surtout des altérites sont bien cartographiées.

4.2.8 Sondage et tomographie électromagnétique à nombres d'induction faibles et intermédiaires

• Objectif

L'objectif que nous nous étions fixé était de comparer les performances des dispositifs Slingram mis en œuvre avec les 6 configurations classiques de l'EM-34 de Geonics, à celles de la tomographie électrique à courant continu.

Les trois profils principaux de la plate-forme 2 de Kombissiri ont ainsi été étudiés avec ces dispositifs.

• Acquisition des données – Contrôle de la qualité – Archivage

Le pas d'échantillonnage spatial sur chacun des profils est de 10 m, pour les 6 configurations : HCP 10 - 20 - 40 et VCP 10 - 20 - 40.

La qualité des mesures a été contrôlée en temps réel ; les mesures ont été faites avec le plus grand soin et répétées à chaque fois qu'un contrôle est apparu nécessaire. Les mesures avec la configuration VCP sont plus sujettes « aux bruits» de tous ordres, que celles en HCP.

• Représentation classique des données brutes – Profils 1, 2 et 3

La plupart du temps, les profils de conductivités apparentes sont représentés dans un système de coordonnées bi-arithmétiques ; l'axe des ordonnées étant indifféremment gradué en conductivité ou en résistivité apparente. Nous avons choisi de représenter les conductivités, qui sont les valeurs effectivement mesurées ; elle sont croissantes vers le bas pour permettre une comparaison facile avec les mesures en courant continu. (**fig. 4.2.34**).

Compte tenu du phénomène physique mis en jeu, où ce sont les rapports de résistivité qui interviennent et non les différences, une échelle logarithmique devrait être utilisée pour l'axe des ordonnées. L'intérêt de l'échelle logarithmique, en accord avec le phénomène physique, est clair lorsque les valeurs mesurées couvrent plus d'une décade, car elle traite de la même façon, les valeurs faibles et les valeurs élevées de conductivité

Elle présente, malgré tout, deux inconvénients :

- elle accentue l'importance du bruit de mesure lorsque les valeurs de conductivité apparente mesurées sont inférieures à quelques milliSiemens/mètre ;

- elle ne permet pas de représenter les valeurs négatives de la conductivité apparente.

Malgré ces difficultés, qui sont bien illustrées sur les trois profils sur lesquels de nombreuses valeurs négatives ont été mesurées, c'est cette convention que nous avons retenue et que nous recommandons.



Figure 4.2.34 : Représentation conventionnelle des conductivités apparentes sur le profil 1 (Echelle bi-arithmétique)

Dans la mesure où il s'agit d'une représentation graphique destinée à illustrer des réponses et non d'un outil d'interprétation quantitative, nous proposons la solution « expéditive » suivante (**fig. 4.2.35**). Celle-ci qui reste moins « belle » que la représentation classique dans les situations très résistantes et/ou non tabulaires :

- échelle logarithmique graduée en conductivité à gauche et en résistivité à droite ;

- conductivité croissante vers le bas ;

- valeur minimale de la valeur absolue de la conductivité égale à 1 mS/m, soit une résistivité égale à 1000 ohm.m; toutes les valeurs de conductivité inférieures à ce seuil ($\rho > 1000$ ohm.m), y compris les valeurs négatives, sont considérées comme du « bruit de mesure »; et elle sont remplacées par cette valeur minimale. Rappelons qu'il s'agit d'une convention de représentation et que les valeurs réelles, négatives en particulier, sont conservées pour une interprétation quantitative éventuelle ultérieure.

Une convention moins expéditive, consiste à conserver les valeurs négatives inférieures à -1 mS/m et à les représenter sur un axe logarithmique gradué en valeurs négatives, au-dessus des valeurs positives.

Les résultats des représentations des mesures du profil 1 (fig. 4.2.35), puis des profils 2 et 3 (fig. 4.2.36) sont présentés ci-dessous.



Figure 4.2.35 : Représentation des conductivités apparentes sur le profil 1 (Echelle mono-logarithmique)



Figure 4.2.36 : Représentation des conductivités apparentes sur les profils 2 et 3 (Echelle mono-logarithmique)

La similarité entre les trois profils est remarquable.

Les profils VCP sont particulièrement simples à interpréter qualitativement. Les anomalies conductrices correspondant à la partie centrale du sillon sont clairement mises en évidence.

Les profils HCP 20 et 40, en particulier, montrent très bien la position des limites latérales des conducteurs principaux, après une correction liée aux dimensions des dispositifs.

Ces résultats sont en parfaite cohérence avec ceux de la tomographie électrique.

Représentation des données brutes sous la forme de sondages

Nous proposons de représenter les résultats de sondages électromagnétiques géométriques individuels dans un système conventionnel de coordonnées bi-logarithmiques, (comme pour le sondage électrique) avec la convention dérivée des informations fournies par le constructeur concernant la « profondeur d'investigation ». Les abscisses sont choisies telles que :

L = 0,75 x D pour la configuration VCP

 $L = 1,5 \times D$ pour la configuration HCP

Où : D est la distance émetteur/récepteur.

Les 6 points classiques de l'EM-34 ont ainsi pour abscisses :

7,5 - 15 - 30 pour VCP (respectivement VCP 10 - VCP 20 - VCP 40)

15 - 30 - 60 pour HCP (respectivement HCP 10 - HCP 20 - HCP 40)

Il s'agit d'une convention de représentation, que nous utilisons dans ce mémoire, et que nous recommandons ; il y a deux « embrayages » pour L = 15 et 30.

La même convention peut s'appliquer à l'EM-31, à l'EM-38 et au MaxMin à faibles nombres d'induction. Les valeurs négatives sont éliminées puisqu'elles sont incompatibles avec l'hypothèse tabulaire; les valeurs positives aberrantes incompatibles avec cette hypothèse le sont également.

L'intérêt de cette représentation est de familiariser le géophysicien avec la notion de sondage électromagnétique géométrique au même titre que celle du sondage électrique à courant continu. Elle permet d'illustrer le nombre de terrains des structures tabulaires, les valeurs et les contrastes de résistivité et les variations de la conductance totale au-dessus d'un socle résistant (**fig. 4.2.37**).



Figure 4.2.37 : Représentation de sondages géométriques. Exemple des profils 1 (Kombissiri 2)

• Inversion 1D – Profils 1, 2 et 3

La première tentative a été faite à l'aide du programme **Eminvus** de l'IRD ; à partir de modèles à 3 terrains. C'était une procédure laborieuse, sans possibilités de représentation automatique des résultats.

Le programme **Emigma**® a ensuite été utilisé pour l'inversion 1D. Les résultats sont représentés sur la **figure 4.2.38**. Les coupes ainsi obtenues paraissent relativement hachées, mais elles sont en concordance remarquable avec les résultats de la tomographie électrique.



Figure 4.2.38 : Résultats de l'inversion des profils 1, 2 et 3 (Kombissiri 2)

Malgré un code de couleurs imposé et indépendant pour chaque profil, et malgré une qualité de l'image particulièrement faible (due au scannages d'impressions), la topographie du toit des formations résistantes et notamment l'existence du drain au sud-ouest sont confirmées, de même que les variations latérales des résistivités des altérites.

• Autres types de représentation des données brutes

> Pseudo-coupes

Si on ne dispose pas du programme d'inversion **Emigma®**, une pseudo-coupe des valeurs brutes peut être tracée, avec la même échelle conventionnelle de pseudo-profondeurs que celle utilisée pour le sondage géométrique. On obtient ainsi une image qualitative relativement « déformée », qui joue le même rôle que les pseudo-coupes des résistivités apparentes de la tomographie électrique, c'est à dire que son interprétation qualitative peut se révéler dangereuse.

> Les cartes d'isovaleurs de conductivité apparente

Les cartes classiques d'isovaleurs de conductivité apparente pour chacune des configurations ; à partir des trois profils ne sont pas présentées, bien qu'elles soient très démonstratives. Il faut se souvenir que dans la représentation de ces cartes, la progression des isovaleurs doit elle aussi être le plus proche possible d'une échelle logarithmique. Dans la mesure où une échelle peut être imposée manuellement, le problème des valeurs négatives est moins difficile à résoudre. C'est ce qui a été fait pour la représentation des cartes de reconnaissance précédentes (§4.2.4).

• Interprétation 2D

Celle-ci ne peut se faire actuellement que pour la mise en place des limites des conducteurs à partir des réponses HCP 20 et HCP 40, en prenant comme guide, les résultats des modélisations présentées précédemment (chap. 3 ; § 3.2).

L'absence de programmes d'inversion 2D est actuellement un handicap pour l'exploitation complète de ces données électromagnétiques.

• Synthèse

Les résultats qualitatifs et quantitatifs obtenus sur ces trois profils à l'aide des 6 configurations sont extrêmement encourageants.

Les coupes obtenues à partir des inversions 1D automatiques donnent des images d'une tranche de terrain d'environ 50 m d'épaisseur, très semblables à celles obtenues à partir de la tomographie électrique à courant continu. Certes, elles ne sont pas d'aussi bonne qualité ; elles n'ont ni la même résolution, ni la même robustesse, mais l'information qu'elles contiennent peut répondre à bien des questions qui se posent au géologue et à l'hydrogéologue.

La mise en œuvre des 6 configurations représente certes un travail relativement long pour deux opérateurs, mais la flexibilité de cette mise en œuvre par rapport à celle de la tomographie est un atout certain : changer la position d'un profil ou le prolonger sont des opérations très rapide à réaliser, ce qui n'est pas le cas des mesures en courant continu.

4.2.9 Le sondage par Résonance Magnétique Protonique

Un seul sondage a été réalisé sur cette plate-forme, centré sur les forages P1K1 et P1K2.

• Acquisition – Qualité des données brutes

Les résultats expérimentaux sont représentés partiellement sur la **figure 4.2.39**. Sur cette figure sont représentées également les courbes théoriques résultant des inversions retenues. Cette présentation classique permet d'évaluer la qualité de la solution retenue.

Une boucle carrée de 150 x 150 mètres a été installée, centrée sur les forages.

La durée d'une acquisition est de l'ordre d'un jour et demi par sondage dans cette zone. L'acquisition a été répétée une fois sur la plate-forme 1.

La qualité des données est acceptable comme l'attestent les courbes de décroissance.

La variabilité spatiale de l'induction magnétique mesurée aux quatre coins de la boucle est importante, comme il était attendu après la prospection magnétique au sol ; cette implantation a néanmoins été conservée pour permettre les calibrations à partir des forages.

Les variations temporelles de la fréquence moyenne de Larmor (F) au cours de l'enregistrement des deux sondages sont également importantes. Elles atteignent \pm 0,2 %; elles sont relativement régulières en fonction de q : F = (1410,0 ± 3) Hz.

La phase varie avec q de manière régulière également.

• Résultats des inversions - Caractérisation des aquifères

Les résultats des inversions et des calculs des paramètres hydrodynamiques sont représentés sur la **figure 4.2.40**.

Un modèle à 40 couches a été choisi de façon à obtenir une solution de type Occam, qui convient bien à la situation d'un aquifère de socle, pour lequel les variations avec la profondeur sont relativement lisses.

Après une première inversion avec les paramètres par défaut, plusieurs essais ont été réalisés avec différentes valeurs pour les paramètres de régularisation pour T_2^* et T_1^* ; ils ont porté sur T_1^* en particulier, qui a une influence forte sur la transmissivité et la perméabilité.



Figure 4.2.39 : Données brutes du sondages RMP P1K1/P1K2



Figure 4.2.40 : Résultats d'inversion du sondage P1K1/P1K2

• Commentaires – Interprétation qualitative

On note que la courbe de T_2^* est lisse et bien caractérisée dans les 60 premiers mètres de profondeur (p), ce qui est favorable pour la qualité de la détermination de la teneur en eau. On remarque que T_1 atteint sa valeur maximale vers 35 m de manière progressive, puis qu'elle chute vers 70 m, ce qui fait que la transmissivité atteint une valeur asymptotique.

Les interfaces :

En appliquant la procédure quasi automatique proposée, sans crainte de sur-interpréter, 4 interfaces possibles sont représentées par des lignes horizontales en traits pleins ou en pointillés (**fig. 4.2.40**). Elles correspondent, soit à une augmentation nette de l'un des paramètres (p = 6 m), soit à un changement de pente de la transmissivité (p = 16 et 30 m); la nette diminution de w vers 70 m pourrait être interprétée comme le toit du socle sain.

• Interprétation quantitative – Les caractéristiques de l'aquifère

Le réservoir serait situé entre 6 m et 30 m.

La position de son toit est déterminée sans ambiguïté par une augmentation significative de la teneur en eau. Pour son mur, en revanche, la solution retenue par le traitement automatique montre une chute de w de 18 à 20 m, mais on sait que cette solution n'est pas unique du fait des équivalences. La transmissivité, non affectée par les équivalences, ne montrant qu'une très faible variation entre 18 et 30 m, on est tenté de déplacer le mur de l'aquifère, c'est-à-dire le toit du socle fracturé, jusqu'au changement de pente significatif de la transmissivité, soit 30 m, ce qui réduirait la valeur de la teneur en eau maximale voisine de 4 % sur le graphique ; elle deviendrait voisine de 2,7 %.

A partir de l'hypothèse d'un mur situé à 30 m, les grandeurs caractéristiques calculées pour l'aquifère sont les suivantes :

Teneur en eau moyenne :	2 %
Transmissivité :	$0,8 \ge 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

La perméabilité du réservoir est relativement importante. Sa valeur maximale lue sur le graphique, est de l'ordre de 5 x 10^{-6} m/s.

Le socle fracturé serait situé entre 21 ou 30 m et 70 m.

En réalité, sa limite inférieure n'est pas réellement déterminée par le sondage RMP, par perte de sensibilité en profondeur.

A partir de l'hypothèse 30 m / 70 m, les caractéristiques calculées seraient les suivantes, pour le seul socle fracturé :

Teneur en eau moyenne :	0,7 %
Contribution à la transmissivité :	$1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité moyenne :	3 x 10 ⁻⁶ m/s

> Pour l'ensemble de l'aquifère :

Avec ces hypothèses, les paramètres calculés pour l'ensemble de l'aquifère seraient les suivants :

Teneur en eau moyenne :	1,2 %
Transmissivité :	$1,9 \ge 10^{-4} \text{ m}^2$

• Complémentarité avec le sondage électrique et les panneaux

Comme précédemment écrit, du fait de la progressivité des variations des résistivités vraies avec la profondeur, les méthodes électriques ne permettent pas de positionner les interfaces avec une grande précision.

Le niveau statique n'est pas déterminé par le SE ; le sondage RMP le situe vers 6 m.

Le mur des argiles serait situé vers 11 à 12 m selon le sondage électrique.

Le mur de l'aquifère, si l'on se fixe un seuil compris entre 60 et 100 ohm.m pour le passage au socle fracturé, serait situé vers 20 m (SE P1K1); le sondage RMP propose un interface situé entre 16 et 30 m.

Le toit du socle sain, si l'on se fixe un seuil de l'ordre de 600 à 1000 ohm.m serait situé vers 25 ou 29 m (SE P1K1); le sondage RMP le détermine mal mais le propose vraisemblablement plus profond.

La complémentarité SE + RMP conduit à un modèle relativement contraint jusqu'au toit du socle fracturé, que l'on doit maintenant comparer aux résultats des forages.

• Comparaison avec les forages P1K1 (KB0202) et P1K2 (KB0205) et avec les essais de pompage

La géométrie des aquifères :

Les niveaux principaux relevés au cours des forages et représentés sur les coupes lithologiques (fig. 4.2.5.) seraient les suivants :

- NS : 7,35 m
- Mur des argiles : 11 et 12 m
- Toit du socle fracturé : 25 et 26 m
- Toit du socle sain : 45 et 52 m.

> Le contenu en eau :

Il n'est fourni que par la RMP

Les résultats fournis par la RMP seule et par la RMP + les méthodes électriques sont en accord satisfaisant avec ces résultats, jusqu'au toit du socle fracturé. En revanche le toit du socle sain n'est pas déterminé.

• Teneur en eau – Coefficient d'emmagasinement ou porosité efficace – Transmissivité – Perméabilité

Les résultats de la comparaison avec les essais de pompage sont les suivants :

Paramètres	RMP	Pompage
Transmissivité (m ² /s)	1,9 x 10 ⁻⁴	$6 - 8 \times 10^{-4}$
Teneur en eau moyenne	1,2 %	
Coefficient emmagasinement	$5,2 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-4}$

La valeur de T_{RMP} est 3 à 4 fois inférieure à $T_{POMPAGE}$.

S_{RMP} est 6 à 7 fois supérieur à S_{POMPAGE} ; ce sont des valeurs particulièrement faibles.

4.2.10 Synthèse – Interprétation multi-méthode

L'apport de l'ensemble des méthodes géophysiques et en particulier des trois méthodes nouvelles conduit aux résultats suivants.

• Le socle sain et le socle fracturé

La cartographie du toit du socle, ses variations de nature lithologique dont la présence d'intrusions basiques, les accidents qui l'affectent, l'existence de drains, une grande partie de ces informations sont obtenues avec plus ou moins de précision à l'aide des techniques géophysiques non destructives, le magnétisme au sol et l'électromagnétisme « profond », qui sont des méthodes de reconnaissance à grande densité spatiale ; la tomographie à courant continu et l'électromagnétisme multi-paramètre qui sont des techniques de détail mises en œuvre sur des profils sélectionnés et dans une moindre mesure, le sondage électrique qui fournit une information ponctuelle.

Sur la plate-forme 2, un croisement de deux dykes magnétiques semble exister : le principal dyke, de direction NW-SE avec un pendage vers le sud-ouest, qui la traverse ; l'autre de direction NE-SW visible au nord-est de la plate-forme

Un sillon conducteur parallèle au dyke, est clairement mis en évidence par l'électromagnétisme profond ; légèrement décalé vers le sud-ouest par rapport au dyke. Il semble fermé vers le nord-ouest et ouvert vers le sud-est où une zone plus conductrice apparaît. Sa bordure sud-ouest est nette et relativement simple ; celle du nord-est et compliquée et présente des indentations. Cet approfondissement vers le sud-est est confirmé par le panneau électrique 6.

L'existence du sillon conducteur fermé au nord, à l'ouest et au sud-ouest, mais ouvert vers le sud-est, est confirmée par la carte « profonde » (26,3 m de profondeur) des résistivités vraies, ou interprétées, tracée à partir des panneaux. Une esquisse de topographie détaillée du toit du socle est fournie par la tomographie électrique et l'électromagnétisme multiparamètres. Cette topographie est particulièrement visible sur la partie nord-ouest des profils 1 à 5 ; et sur la partie sud-est du profil 6.

L'existence d'un drain vertical au sud-ouest de l'anomalie conductrice principale est le résultat marquant ; il est cartographié par toutes les techniques et tous les dispositifs, mais de la manière la plus nette par le Wenner β , le Pôle-dipôle. Il est confirmé par les forages de contrôle. Un second drain pourrait exister au sud-ouest, selon la tomographie électrique, mais il est moins assuré.

L'ordre de grandeur de la profondeur du toit du socle fracturé, et dans une moindre mesure, celle du toit du socle sain est fournie par la conjonction des méthodes géophysiques.

Le sondage électrique localement et le panneau électrique Pôle-dipôle le long des

profils fournissent ces informations, à partir des inversions multicouches et des inversions lisses de type Occam.

Attributs	SE	Panneau	Forages	Diagraphie	RMP
Toit du socle fracturé P1K1	25 m	30 m	25 – 26 m	vers 70 Ώ.m	30 m
Toit du socle fracturé au SW de PIK1		18 m			
	-		16 m	-	-
Toit du socle fracturé en SE 5	25 m		-	-	-
Toit du socle sain en P1K1	30 à 37 m	-	45 m	vers 800	70 m ?
				Ω.m	
Toit du socle sain en SE 5	45 m	-	-	-	-

Les profondeurs comparées (en mètre) et/ou les valeurs de résistivité fournies (en ohm.m) sont présentées dans le tableau suivant :

• Le socle altéré, les altérites et les argiles superficielles

Le sondage électrique, ponctuellement, puis la tomographie électrique et l'électromagnétisme multi-paramètres, le long des profils permettent de caractériser cet ensemble. Sa partie inférieure constitue « le réservoir ».

Son épaisseur est définie à partir du toit du socle fracturé tel que présenté ci-dessus, c'est-à-dire avec une précision moyenne. Elle serait au maximum de l'ordre de 20 à 25 m selon la géophysique, ce qui est malgré tout, en bon accord avec les forages et les diagraphies.

Le sondage RMP par le biais de la teneur en eau et de la transmissivité donne lui aussi une information sur la profondeur de la base du réservoir ; à l'aplomb de P1K1/P1K2, on obtient 30 m.

Les variations latérales de la « qualité » des altérites semblent être une caractéristique particulière du site de Kombissiri 2. Il existe une zone centrale fortement conductrice au sein du sillon généralement conducteur. Il est bien marqué sur les panneaux électriques, mais on pourrait tenter d'estomper ses limites en appliquant les lois d'équivalence. En revanche, la réponse de l'électromagnétisme est sans ambiguïté ; il y a des limites franches bien mises en évidence sur les profils 1, 2 et 3. La base de ce conducteur se moule sur l'existence du drain selon la tomographie. Il est sub-affleurant en général ; il affleure à l'extrémité nord-ouest du profil 6.

Comment expliquer cette caractéristique et quelle est sa relation avec la géométrie et la qualité du réservoir ?

• La couverture superficielle

Elle est de nature et d'épaisseur relativement variable, si l'on en croit la carte tracée à partir de la tomographie pour une profondeur de l'ordre de 0,50 m, le long du profil 1 en particulier.
Elle est la moins épaisse et la plus conductrice dans la partie centrale, c'est-à-dire audessus du cœur d'argile précédemment décrit. Des hétérogénéités relativement résistantes (de 30 à 1000 ohm.m), qui correspondent à des matériaux sablo-argileux indurés ; leur épaisseur maximale est de l'ordre de 3 m. Elles ne semblent pas constituer une gêne à l'utilisation du Pôle-dipôle en tomographie électrique car leur influence paraît bien prise en compte lors de l'inversion ; néanmoins, on doit toujours vérifier qu'aucun « fantôme » (correspondant à des reflets des conditions de surface) n'apparaît sur les horizons profonds.

• L'aquifère

L'ensemble des méthodes géophysiques dont les résultats ont été présentés ci-dessus, conduit à une connaissance relativement précise de l'aquifère potentiel avant tout forage : sa géométrie (épaisseur maximale moyenne et extension latérale), les variations latérales de la nature du réservoir et ses potentialités en relation avec l'existence d'un drain.

La seule méthode géophysique, qui permette, avant forage, de transformer ces potentialités en quasi certitude et de le caractériser, c'est-à-dire de donner un ordre de grandeur de la teneur en eau est le sondage RMP.

> Teneur en eau et coefficient d'emmagasinement

Le seul sondage RMP réalisé sur la plate-forme à l'aplomb des forages P1K1 et P1K2, c'est-à-dire à priori sur la zone la plus favorable de cette plate-forme, a conduit à des valeurs relativement modestes, qui ont contribué à l'étalonnage de la méthode, ce qui montre bien qu'elles sont en accord avec les essais de pompage :

w moyen des altérites : 2 % S moyen : 4×10^{-4}

Calcul des réserves

L'interprétation des sondages RMP, seule, (et en bon accord avec le forage), permet d'obtenir une épaisseur équivalente d'eau.

L'épaisseur équivalente d'eau dans les altérites (de la boucle P1K1/P1K2) serait de : $(30 - 6) \ge 2\% = 0, 48$ m, soit environ : 0, 5 m.

A partir de l'électromagnétisme et de la tomographie électrique, on pourrait se fixer une surface minimale pour le réservoir limité à la plate-forme 2 de l'ordre de : $350 \text{ m} \times 600 \text{ m} = 0, 2 \text{ km}^2$

Ceci conduirait à un volume de l'ordre de : 0, 5 x 0, 2 x 10⁶ = 10^{5} m³

> Transmissivité, pérennité de la ressource

Rappelons que le sondage RMP fournit une valeur de transmissivité égale à 2×10^{-4} m²/s et les essais de pompage une valeur égale à 6×10^{-4} m²/s.

La seule méthode géophysique utilisée qui apporte des compléments importants au forage concernant les circulations et la caractérisation du socle fracturé est la diagraphie électrique.

En P1K1, les intercalations conductrices au sein du socle fracturé sont relativement peu nombreuses, leur épaisseur est de l'ordre de 2 à 3 m, le contraste de résistivité avec l'encaissant est élevé. En P1K2, elles sont relativement plus nombreuses, mais d'amplitude légèrement plus faible. Compte tenu de la faible distance entre les deux forages, il est tentant de corréler les intervalles conducteurs principaux et de faire l'hypothèse de circulations d'eau quasi horizontales entre les deux ouvrages.

Ces intercalations conductrices sont en bon accord avec les nombreuses venues d'eau qui ont été notées lors de la foration, entre 25 et 45 m de profondeur en P1K1 et entre 20 m et 40 m en P1K2.

Par conséquent, ce site et ces forages en particulier paraissent correspondre aux conditions idéales de circulation et par conséquent d'alimentation en eau.

4.3 Le site de Kombissiri – Plate-forme 1

4.3.1 Photographies aériennes – Images satellites – Géophysique aéroportée

La plate-forme 1 était englobée dans les résultats et les commentaires présentés précédemment pour la plate-forme 2.

4.3.2 Magnétisme au sol

Les données ont été acquises dans les mêmes conditions que pour la plate-forme précédente. Les résultats sont présentés ci-dessous.

• Carte du champ total et cartes transformées

Deux cartes sont présentées : la carte du champ total (**fig. 4.3.1**) et la carte après réduction au pôle (**fig. 4.3.2**).

La carte magnétique de champ total sur cette plate-forme montre globalement deux zones : un domaine magnétique au sud, caractérisé par une anomalie résiduelle de l'ordre de l'ordre de + 20 a + 100 nT et un domaine moins magnétique au nord avec une anomalie résiduelle de l'ordre de - 20 a - 100 nT.

La direction générale est véritablement est-ouest, ce qui est favorable puisqu'on est situé au voisinage de l'équateur magnétique, mais ce qui peut être également une exagération due à l'effet de latitude.



Figure 4.3.1 : Carte du champ magnétique total



Figure 4.3.2 : Carte du champ magnétique réduit au pôle (Kombissiri 1)

La zone d'étude semble comme la précédente plate-forme, à l'intersection entre des accidents plus ou moins perpendiculaires.

• Tentative d'interprétation quantitative 2,5 D

Deux profils ont été étudiés par modélisation. Les résultats sont représentés sur les figures 4.3.3 et 4.3.4.



Figure 4.3.3 : Résultats de la modélisation 2,5 D d'un profil T1 (direction N-S) (à l'aide d'un modèle tabulaire de dimension finie)



Figure 4.3.4 : Résultats de la modélisation 2,5 D d'un profil T2 (direction N-S) (à l'aide d'un modèle tabulaire de dimension finie)

• Tentative d'interprétation quantitative 3D

1331.0-Z1 (km) Ň 1331.2 1 0.9 -0.8 1331.1 -0,7 -0.6 1331 0.5 -0.4 1330.9 0.3 0.2 0.1 1330.8-1329.7 682.4 682.5 683.6 682.7 682.8 682.9 683

Les résultats sont représentés sur la figure 4.3.5.



Cette carte, résultant d'une transformation dans le domaine fréquentiel, montre bien les corps anomaliques principaux ; leur position cependant doit être considérée avec précaution car l'information sur le « pendage » est mal prise en compte.

Synthèse

Les cartes magnétiques donnent des informations très riches sur la géologie du socle. Elles sont incomplètement exploitées, mais sont intéressantes pour l'hydrogéologue. La taille de la zone étudiée est trop faible pour que l'on puisse bien comprendre l'organisation des corps et des contacts. D'où l'intérêt d'élargir la zone prospectée par magnétométrie ; ceci aurait peut-être permis de mettre en évidence des portions de zones potentiellement plus intéressantes pour l'hydrogéologue.

4.3.3 Electromagnétisme de reconnaissance

• La carte de reconnaissance HCP 40

Cette carte (**fig. 4.3.6**) tracée au début de la campagne de mesure comme outil de reconnaissance, met bien en évidence l'existence d'un sillon conducteur de direction E-W. Sa fermeture vers l'ouest paraît nette ; sa limite nord, elle aussi, paraît nette. La limite sud au contraire apparaît compliquée et indentée, donc difficile à interpréter, en raison du comportement particulier de la configuration HCP 40. Il faut être très prudent en interprétant les rides étroites apparemment résistantes puisqu'on sait qu'elles correspondent en fait à un effet de bord à proximité d'un corps conducteur.

Une information importante et non exploitée, est l'existence d'un début de conducteur E-W très marqué à l'extrême sud-ouest de la carte.



Figure 4.3.6 : Carte de reconnaissance EM-34 (HCP 40)

• La carte MaxMin – HLEM 60 m – 3520 Hz

Cette carte (**fig. 4.3.7**) a été réalisée lors des travaux de reconnaissance préliminaire, à l'initiative du projet « Appui au plan d'action de l'ONEA ». A cette fréquence et à cette distance, on est situé dans le domaine des nombres d'induction intermédiaires ; l'effet inductif ne peut être négligé.

Les deux principaux traits marquants sur cette carte sont :

- une direction d'alignement plutôt N-S ;
- deux anomalies conductrices locales le long du profil d'ordonnée y = 1331000 ;

Elles étaient visibles, mais moins nettes sur la carte précédente HCP 40; elles sont malheureusement situées pratiquement en dehors des profils 20 et 30 étudiés en détail par les tomographies électrique et électromagnétique.



Figure 4.3.7 : Cartes de reconnaissance MaxMin (HLEM 60 m – 3520 Hz)

• Synthèse

L'information électromagnétique est cohérente avec celle du magnétisme et complémentaire. La partie sud-est de la plate-forme paraît potentiellement la plus intéressante du point de vue hydrogéologique. Ces deux cartes réalisées avec la configuration HCP néanmoins sont difficiles à interpréter dans le détail, en raison des comportements spécifiques de cette configuration en présence de contacts verticaux et notamment à proximité des bords des corps conducteurs. Une carte VCP 40 serait une aide à la compréhension de celles présentées ci-dessus.

4.3.4 Forages – Analyse des échantillons – Diagraphies – Essais de pompage

4.3.4.1 Les forages d'exploitation

~

Sur cette plate-forme, comme sur la plate-forme 2, les sites de forage de gros diamètre ont été choisis dans le cadre du projet ONEA chargé de l'étude hydrogéologique de Kombissiri.

Les trois forages KB0201, KB0203, KB0204 ont été implantés sur des anomalies détectées par les études électriques et électromagnétiques précédentes.

Le premier forage KB0201, s'est d'ailleurs révélé non productif, ce qui pour notre étude méthodologique est une donnée de grande importance. Ce forage n'a pas été équipé. Les deux autres forages de gros diamètre, productifs, ont été équipés de tubes PVC crépinés, selon les règles de l'art, par une entreprise spécialisée.

La figure 4.3.8 synthétise les résultats obtenus.



Figure 4.3.8 : Forages et équipement, plate-forme de Kombissiri 1

Les différences entre ces trois forages sont importantes pratiquement de tous les points de vue, malgré la proximité de KB0203 et KB0204 : du point de vue de l'épaisseur des argiles de surface, de l'épaisseur de la zone fracturée du socle et de la nature du socle. Seule l'épaisseur des arènes paraît comparable d'un forage à l'autre.

Les trois traits les plus caractéristiques semblent être :

- (1) l'épaisseur très importante de la zone fracturée dans le forage KB0201, mais le forage n'est pas productif (débit insuffisant à la foration et absence totale de débit après 24 h).

- (2) la faiblesse de l'épaisseur des argiles.

- (3) la nature du socle avec des passées d'amphibolites et de pegmatites en KB0203.

4.3.4.2 Analyse des échantillons

A - Diffractométrie de rayons X

Résultats et discussion

La couche argileuse à 5 mètres de profondeur semble uniforme du point de vue de sa composition minéralogique, comme il a été dit précédemment, sur les deux plates-formes ;

Les roches du socle sont identiques en moyenne également sur les deux plates-formes Néanmoins, pour le forage KB0203, la pegmatite rose se distingue par la présence de calcite magnésienne, sans doute due à l'altération des feldspaths, alors que l'amphibolite est curieusement sans chlorite et ne se distingue pas des autres échantillons.

B - Mesure de la susceptibilité magnétique des échantillons

Résultats et discussion

La **figure 4.3.9** représente la distribution de la susceptibilité magnétique dans le forage KB0203 pour la tranche de profondeur : 35 - 53 mètres.





Les valeurs de susceptibilité sont relativement dispersées et les conclusions que l'on en tire sont intégrées dans l'approche globale déjà présentée pour les analyses sur la plateforme de Kombissiri 2.

4.3.4.3 Les diagraphies

• Résultats et commentaires

Les signatures électriques des trois forages sont relativement différenciées (fig. 4.3.10).



Figure 4.3.10 : Diagraphies : venues d'eau observées et fractures interprétées

Seule la sonde de l'Université de Lausanne a été utilisée, les altérites ne sont donc pas caractérisées par les diagraphies.

D'une façon générale, on note une croissance relativement régulière avec la profondeur, des résistivités apparentes, depuis 100 ohm.m, vers 15 à 20 m, jusqu'à 2000, voire 10 000 ohm.m.

Le forage KB0201, qui est improductif, se distingue des deux autres de deux façons :

- d'une part, en moyenne, les valeurs de résistivité y sont plus faibles dans le socle fracturé et sain;
- d'autre part, il y a très peu de contrastes au sein du socle ; on ne note pas d'intercalations conductrices importantes, ce qui est tout à fait compatibles avec l'absence de venues d'eau.

Il est ainsi confirmé que la diagraphie électrique est un bon outil à posteriori de caractérisation des aquifères de socle.

Ces résultats seront réexaminés en détail lors de la discussion des résultats des méthodes électriques à courant continu, sondages électriques et tomographie.

4.3.4.4 Essais de pompage

Ils ont été réalisés dans le cadre du projet « Appui au plan d'action de l'ONEA » ; nous avons participé aux essais de pompage sur le terrain et nous avons effectué une interprétation des résultats de ces essais.

Les travaux réalisés peuvent être résumés ainsi : 2 essais de longue durée et 2 essais de courte durée.

• Résultats des essais - Interprétation

La comparaison des résultats des interprétations indépendantes, comme sur la plateforme 1, montre que l'incertitude sur les valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement déterminées à partir des mêmes données d'essais de pompage est grande ; elle est de l'ordre de 100 % ou supérieure (tableau 4.3.1 et 4.3.2).

FORAGES		Vouillamoz (2003)				Projet ONEA			
			Incer titude	S (x 10 ⁻⁴)	Incer titude		Incer titude	S (x 10 ⁻⁴)	Incer titude
PF 1	KB0203	3	200 %	6,8	80%	9,3		1,2	
	KB0204					7		1,8	

Tableau 4.3.1 : Interprétation des essais de longue durée

FORAGES	Projet ONEA				Interprétation TOE		
	$\frac{T}{(x \ 10^4 m^2/s)}$	Incertitude	B*	C*	$\frac{T}{(x \ 10^{-4} \ m^2/s)}$	B*	C*
KB0203	4,8		0,68	0,072	2,9	0,705	0,066
KB0204	1,8		0,35	0,022	1,9	0,41	0,011

* coefficients dans l'équation de perte de charge de Jacob, tels que $s = BQ + C Q^2$

Tableau 4.3.2 : Interprétation des essais de courte durée

Il y a une bonne concordance entre les valeurs indépendantes des coefficients B et C ; Ce sont les valeurs de transmissivité déterminées à partir des essais de longue durée qui seront retenues.

Ce sont finalement les valeurs interprétées par Vouillamoz (2003) qui seront retenues pour la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement, puisque ce sont celles qui seront utilisées pour la calibration de la RMP, mais il faut se souvenir que les valeurs interprétées par l'ONEA sont 2 à 3 fois supérieures pour T et près de 5 fois inférieures pour S.

• Commentaires

Transmissivité : T serait de l'ordre de 3 à $9 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$.

Coefficient d'emmagasinement : Les valeurs sont très faibles, elles sont de l'ordre de 2 à 7×10^{-4} ; elles sont dans la gamme de ceux des nappes captives.

4.3.5 Sondages électriques

Les sondages électriques « KB0201 » et « KB0203 » – Contrôle à partir des forages et des diagraphies

Données brutes – Résultats des inversions

Les données brutes et les résultats de leur inversion à partir d'un modèle à nombre limité de couches et d'un modèle multi-couche sont représentés et comparés (**figure 4.3.11**).

A l'examen des courbes brutes des sondages électriques et après application automatique du critère classique fondé sur la résistivité apparente pour les grands dispositifs, c'est-à-dire sur la conductance totale au-dessus du socle sain, le site KB0201 pourrait être considéré potentiellement le plus intéressant parmi les deux. C'est d'ailleurs vraisemblablement ce qui a conduit à l'implantation du premier forage sur ce site.

L'inversion à partir d'un modèle à nombre limité de couches (6 terrains) corrige en partie cette conclusion hâtive. Il apparaît bien que les argiles de surface en KB0201 sont beaucoup plus épaisses qu'en KB0203 et que par conséquent elle contribue de manière importante à la valeur élevée de la conductance totale. Néanmoins, comme sur la plate-forme de Kombissiri 2, la part des arènes et du socle fracturé entre les argiles de surface et le socle sain apparaît peu à partir de ce modèle simple. Le toit du socle sain semble plus profond en KB0203, ce qui pourrait être considéré comme un critère plus favorable du point de vue de l'hydrogéologue.

Les inversions à partir du modèle multi-couche donnent une image plus proche de la réalité (cela sera démontré ci-dessous) à partir des résultats des forages et des diagraphies. La contribution des argiles de surface en KB0201 est encore mieux individualisée, mais il semble que le socle sain pourrait être notablement plus profond en KB0201 qu'en KB0203. Ceci pourrait conduire à l'hypothèse de l'existence d'un aquifère plus épais en KB0201, ce qui est en contradiction avec la conclusion du paragraphe précédent.



Figure 4.3.11 : Les sondages électriques de Kombissiri 1 A : SE « KB0201 » et « KB0203 » bruts ; B : résultats des inversions

> Contrôle à l'aide des forages et des diagraphies

Les lithologies comparées des trois forages ont été représentées précédemment (fig. 4.3.8). L'examen et l'analyse de ces données directes permettent de noter :

- des variations d'épaisseur importante des argiles supérieures, d'un forage à l'autre (18 m en KB0201, 6 m en KB0203 et 15 m en KB0204), leur nature, donc leur résistivité diffèrent également (jaunâtre, sableuse);

- une épaisseur des arènes relativement comparable pour les trois forages, (6 à 8 m);

- l'épaisseur du granite fracturé est maximale en KB0201 (36 m) contre 12 m en KB0203 et 23 m en KB0204 ; par conséquent, c'est en KB0201 que la profondeur du socle sain est maximale (54 m) ; ceci confirme les résultats de l'inversion multi-couche.

Il est important de remarquer les différences entre les sondages KB0203 et KB0204 qui sont situés à moins de 80 m l'un de l'autre. Ces sondages sont différents tant du point de vue des argiles de surface, que de la profondeur du socle sain (voire même de sa nature) ; ceci illustre bien la difficulté des problèmes à résoudre.

En résumé, l'inversion multi-couche conduit à une interprétation qualitative en bon accord avec les résultats des forages.

Les résultats comparés des diagraphies ont été représentés précédemment (fig. 4.3.10).

Aucune mesure n'a été réalisée dans les 15 premiers mètres, si bien que les argiles de surface ne peuvent être caractérisées, mais les résultats des sondages électriques sont clairs de ce point de vue.

En KB0201, la résistivité croit régulièrement de 100 ohm.m vers 30 m de profondeur, jusqu à 1 000 ohm.m vers 60 m, sans accidents notables (« pics» et « creux »); ce sont des valeurs de résistivité en progression croissante avec la profondeur, classiques pour un socle fracturé, qui passe insensiblement à un socle sain.

En KB0203 et KB0204, les résistivités croissent également régulièrement de 100 ohm.m à 1 000 ohm.m jusqu'à 26 m et 36 m respectivement, puis elles atteignent des valeurs de 2000 à 10 000 ohm.m dans le socle dit sain, avec de nombreuses intercalations plus conductrices.

Ces résultats sont en bon accord avec la lithologie relevée dans les forages et avec l'inversion des sondages électriques à partir d'un modèle multi-couche. On constate que :

- l'entrée dans le socle sain pour les trois forages correspond à des valeurs de résistivité supérieures à 800 ohm.m ; c'est un seuil inférieur à celui rencontré à Kombissiri 2.

- les résistivités moyennes des arènes puis du socle fissuré croissent régulièrement avec la profondeur ; elles sont comprises pour les trois forages, entre 100 et 500, voire 700 ohm.m, ce qui, cette fois-ci encore, est inférieur à ce qui a été rencontré à Kombissiri 2.

> Synthèse

Les diagraphies permettent bien, à posteriori, de différencier le forage sec (KB0201) des forages productifs (KB0203 et KB0204). L'inversion multi-couche, dans ce cas particulier, permet également, à priori, de différencier KB0201 et KB0203 : les résistivités «vraies » ou « interprétées » entre 10 et 40 m de profondeur sont beaucoup plus élevées en KB0203. Les positions respectives des pseudo-diagraphies résultant de l'inversion 1D des deux sondages électriques sont les mêmes que celles des diagraphies réalisées dans les deux forages.

4.3.6 Tomographie électrique

Quelques uns des tests méthodologiques réalisés sur la plate-forme 2, ont été répétés sur la plate-forme 1. Les conclusions précédentes sont généralement confirmées. Les mêmes paramètres ont été retenus pour l'inversion des panneaux.

Deux exemples de contrôle sont présentés pour illustrer les difficultés, mais aussi la cohérence et la robustesse des résultats obtenus sur cette plate-forme également.

• Comparaison entre le sondage Schlumberger KB0201 et les sondages Pôle-dipôle « avant » et « arrière » extraits des panneaux



Figure 4.3.12 : Comparaison SE « KB0201 » et quelques sondages extraits du panneau

• Comparaison entre les pseudo-diagraphies obtenues au croisement des panneaux



Figure 4.3.13 : Comparaison entre les pseudo-diagraphies des profils 30, 31, 32

• Les résultats des panneaux électriques 30, 31, 32, 33 et 34

Ils ont été réalisés après ceux de Kombissiri 2 présentés précédemment. L'acquisition, les contrôles de qualité, l'archivage et les représentations des données brutes ont été réalisés de la même manière. Quelques tests sur les paramètres d'inversion semblables à ceux décrits précédemment ont été réalisés ; ils ont conduit aux mêmes enseignements et aux mêmes choix pour les inversions finales. Des tests de robustesse ont également été effectués.

Résultats des inversions

Sur le panneau 30 (**figure 4.3.14**), les différents dispositifs cette fois encore, conduisent à des images relativement voisines. L'image générale est beaucoup plus simple que celle de la plate-forme 2.

On note une « fermeture » relativement nette au nord-ouest et un léger plongement des formations vers le sud-est, jusqu'à la station 320. On note peu de variations latérales de faciès. La topographie du résistant profond parait calme, avec peut-être un « surcreusement » ou un

« drain » entre les stations 256 et 320. Ce surcreusement n'est pas très bien assuré car il n'y a pas une totale cohérence entre les résultats des quatre dispositifs.



Figure 4.3.14 : Résultats de l'inversion des dispositifs du profil 30 (Kombissiri 1)
A : Wenner Alpha ; B : Wenner Bêta
B : Pôle-dipôle Avant ; D : Pôle-dipôle Arrière

Les panneaux 31 et 32 (**figure 4.3.15**), parallèles au précédent, et situés à 50 mètres de part et d'autre, confirment cette image : fermeture nette au nord-ouest sur le profil 31 et plongement vers le sud-est jusqu'à la station 320. Un surcreusement au nord-ouest de 320 est probable.

Les panneaux 33 et 34 non représentés mettent en évidence la fermeture vers le nord et le plongement vers le sud ; aucun surcreusement notable n'apparaît.



Figure 4.3.15 : Résultats de l'inversion des panneaux 31et 32 (Kombissiri 1) A : Profil 31 (Wenner α); B : Profil 32 (Wenner α)

> KB0203 est-il un point haut par rapport à KB0201 et les résistivités du socle fracturé sont-elles plus élevées en KB0203 ?

Il est difficile de l'affirmer ; en effet, les profils s'arrêtent juste au niveau du forage KB0203 ; la tendance est tout de même plutôt favorable.

• Les panneaux électriques 21, 20, 22 (fig. 4.3.16)

L'image est celle d'une situation calme. La fermeture à l'ouest est nette sur le profil 22 avec un point bas vraisemblable entre les stations 64 et 156. Le forage KB0204 semble bien placé par rapport à un drain potentiel.

Le profil 20 montre l'aspect d'une cuvette avec un point bas à l'est de la station 256, mais à l'ouest du forage KB0203.

Le profil 21 confirme l'aspect d'une cuvette centrée entre les stations 128 et 256.

Il est intéressant de noter que les argiles sont sub-affleurantes tout autour des forages KB0203 et KB0204.



Figure 4.3.16 : Panneaux Wenner α + β des profils 20, 21, 22 (Kombissiri 1) **A :** Profil 20 ; **B :** Profil 21 ; **C :** Profil 22

• Les cartes de résistivité – Image 3D

L'interprétation des panneaux électriques dans les différentes positions réalisées sur le terrain permet de réaliser une cartographie des résistivités « vraies » ou « interprétées ».

L'intérêt de cette cartographie de résistivité électrique à partir de panneaux est dans son aspect multi-profondeurs (correspondant à celles existant dans le panneau effectué). Il faut cependant être prudent car ces panneaux étant interprétés séparément, il s'agit de l'assemblage de plusieurs solutions individuelles du problème inverse.

Les cartes ont été réalisées à partir des dispositifs Wenner Alpha (fig. 4.3.17 et 4.3.18).



Figure 4.3.17 : Carte multi-profondeurs des résistivités issues des panneaux Wenner α A : profondeur = 0,5 m ; B : profondeur = 10, 6 m



Figure 4.3.18 : Carte multi-profondeurs des résistivités issues des panneaux Wenner α A : profondeur = 20 m ; B : profondeur = 26, 3 m

Synthèse

Ces informations quantitatives sont un complément de qualité aux cartes de reconnaissance initiale.

La géométrie du sillon conducteur au sud-est de la zone étudiée est relativement bien déterminée, latéralement et verticalement.

La fermeture à l'ouest et au nord-ouest est claire. L'existence d'un surcreusement en forme de croissant, situé légèrement à l'ouest des forages KB0203 et KB0204 semble relativement assuré.

4.3.6 Sondage et tomographie électromagnétiques à nombres d'induction faibles et intermédiaires

Dans le but de tester sur un nouveau site, les performances de cette téchnique par rapport à la tomographie électrique à courant continu, six profils ont été étudiés en détail, avec le plus grand soin.

• Les profils 30, 31 et 32 – Interprétation qualitative

La **figure 4.3.19** représente les résultats bruts sous la forme proposée pour les profils 30 et 32. L'intérêt de l'échelle logarithmique est d'autant plus clair qu'il n'y a pas de difficultés puisqu'il n'y a pas de valeurs négatives.

On note une très bonne similarité entre les deux profils. Pour chacun d'eux, les résultats des configurations VCP sont quasi superposés ; ils montrent un gradient général du nord-ouest vers le sud-est, celui-ci étant le plus conducteur ; superposées à ce gradient on note des ondulations, donc la présence de rides alternativement plus résistantes et plus conductrices. Ces tendances sont confirmées par les résultats des configurations HCP ; cette fois encore HCP40 amplifie les traits qui sont à peine marqués avec les autres configurations ; on note trois pics anomaliques importants de conductivité apparente faible, qui sont des indices de l'existence de limites de corps conducteurs et non la réponse de rides résistantes.



Figure 4.3.19 : Représentation des données brutes des profils 30 et 32

> Les profils 31, 30 et 32 – Inversion automatique 1D

Les résultats des inversions automatiques à l'aide du logiciel Emigma® sont représentés sur la **figure 4.3.20**. Cette fois encore, la cohérence spatiale est remarquable ; la similarité entre les profils et avec les résultats de la tomographie électrique est, elle aussi, remarquable.

La situation est beaucoup plus simple que celle de la plate-forme 2. On ne note pas l'équivalent du drain cartographié sur les profils 1, 2 et 3 de cette dernière. En moyenne, l'épaisseur des altérites est plus faible et elles sont moins conductrices que celles du « cœur » conducteur de la plate-forme 2.

On note :

- la fermeture au nord-ouest et un approfondissement général vers le sud-est ;
- des épaississements locaux des altérites qui pourraient faire penser à des mini-drains. Il faut être prudent cependant car la robustesse de ces résultats n'a pas véritablement été testée.



Figure 4.3.20 : Résultats d'inversion 1D des 3 profils 31, 30 et 32 (Kombissiri 1) **A** : Profil 31 ; **B** : Profil 30 ; **C** : Profil 32

> Les profils 20, 21 et 22 – Interprétation qualitative

La **figure 4.3.21** représente les résultats bruts sous la forme proposée pour les profils 20 et 22.

La situation est très proche de la précédente. Les ordres de grandeur des conductivités apparentes sont les mêmes. On note de grandes ondulations avec les trois configurations VCP pour les deux profils.

Sur le profil 20, les deux pics « apparemment résistants » sur HCP 40 correspondent vraisemblablement à des indices de la présence latérale de conducteurs plutôt qu'à des rides résistantes.

Sur le profil 22, dans la partie ouest (entre les stations 225 et 380), les argiles superficielles sont les plus conductrices selon VCP 10, VCP 20 et HCP 10; en revanche le substratum résistant est moins profond selon HCP 20 et HCP 40.



Figure 4.3.21 : Représentation des données brutes sur les profils 20 et 22

Profils 21, 20 et 22 – Inversion 1D

Les résultats des inversions automatiques à l'aide d'**Emigma**® sont représentés sur la **figure 4.3.22**. La cohérence spatiale et la similarité avec les résultats de la tomographie électrique sont tout aussi remarquables que précédemment.

La fermeture du sillon conducteur vers l'ouest est nette sur les profils 20 et 22. Le profil 21 apparaît plus compliqué. Un môle résistant apparaît nettement à l'est ; on peut aussi supposer l'existence d'un autre môle résistant au centre, ce qui conduirait à l'existence de deux sillons

étroits de part et d'autre de ce dernier ; le sillon qui semble le plus évident sur les profils est celui situé à l'ouest.

> Synthèse

Les résultats quantitatifs obtenus à partir des 6 profils sont presque de même qualité que ceux obtenus à partir de la tomographie électrique. Ils mettent clairement en évidence les fermetures du sillon conducteur et le surcreusement sous la forme d'un croissant à l'ouest des forages KB0203 et KB0204.



Figure 4.3.23 : Résultats de l'inversion 1D des profils 21, 20, 22

4.3.8 Sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP)

Un seul sondage RMP a également été réalisé sur la plate-forme 1, centré sur les forages KB0203 et KB0204. Malheureusement, il n'a pas été possible de réaliser des mesures au-dessus du forage sec KB0201, encore moins de réaliser des mesures le long d'un profil.

La procédure mise en œuvre est la même que celle décrite pour la plate-forme 2. Une boucle carrée de 150 x 150 mètres a été installée, centrée sur les forages.

Les résultats expérimentaux sont représentés partiellement sur la **figure 4.3.24**. Sur cette figure sont représentées également les courbes théoriques résultant des inversions retenues, ce qui permet d'évaluer la qualité de la solution retenue.

La durée d'une acquisition est de l'ordre d'un jour et demi par sondage dans cette zone. L'acquisition a été répétée une fois sur cette plate-forme.

La qualité est relativement plus faible, que celle de la plate-forme 2, comme l'attestent les courbes de décroissance : des signaux parasites d'une fréquence voisine de 50 Hz et de 8 Hz sont visibles superposés au signal utile.

Les variations temporelles de la fréquence moyenne de Larmor (F) au cours du sondage atteignent \pm 0,3 %; elles sont relativement régulières en fonction de q : F = (1408,5 \pm 4) Hz.

La phase varie avec q de manière régulière, de manière plus importante que pour la plate-forme 2.



Figure 4.3.24 : Données brutes du sondage RMP KB0203/KB0204



Figure 4.2.25 : Résultats des inversions du sondage RMP KB0203/KB0204

• Résultats des inversions – Caractérisation des aquifères

Les résultats des inversions et des calculs des paramètres hydrodynamiques sont représentés sur la figure 4.3.25.

> Commentaires – Interprétation qualitative :

La courbe de T_2^* montre des pics qui peuvent avoir une certaine influence sur la détermination de w.

On remarque que les deux courbes w et T_1^* chutent, pour atteindre des valeurs voisines de 0 au dessous de 50 m de profondeur (comme pour la plate-forme de Kombissiri 2 vers 70 m). Par conséquent, les valeurs de transmissivité atteignent une valeur asymptotique réaliste.

Les interfaces :

Les interfaces horizontales correspondent soit à une augmentation nette, soit à une diminution nette de w ou de T_1^* (profondeur = 11 m, 19 m et 50 m), soit à un changement de pente de la transmissivité (profondeur = 29 m).

• Interprétation quantitative - Les caractéristiques de l'aquifère :

Le réservoir : Il serait situé entre 11 m et 29 m. Les valeurs estimées pour les différents paramètres seraient les suivantes :

Teneur en eau moyenne :	1,3 %
Transmissivité :	$0,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité de la partie inférieure :	0,3 x 10 ⁻⁵ m/s

Le socle fracturé serait situé entre 29 et 50 m.

Teneur en eau moyenne :	1,5 %
Contribution de la Transmissivité :	$1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité moyenne :	0,8 x 10 ⁻⁵ m/s

Pour l'ensemble de l'aquifère :

Teneur en eau moyenne :	1,3 %
Transmissivité :	$1,8 \ge 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
• Complémentarité avec le sondage et les panneaux électriques

Comme précédemment écrit, les méthodes électriques ne permettent pas de positionner les interfaces horizontales avec une grande précision, du fait de la progressivité des variations des résistivités vraies avec la profondeur.

Le niveau statique n'est pas déterminé par le SE ; l'interprétation du sondage RMP permet de situer le NS vers 11 m de profondeur.

Le mur des argiles serait situé vers 5 m si on leur fixe une résistivité inférieure à 8 ohm.m ; il pourrait atteindre 10 m, si on multiplie cette valeur par un facteur 2.

Le mur de l'aquifère, si l'on se fixe un passage de 400 à 900 ohm.m serait situé vers 15 m (SE KB0203); l'interprétation du sondage RMP permet de placer un interface vers 29 m.

Le toit du socle sain, si l'on se fixe un passage de 1000 à 3000 ohm.m serait situé vers 47 m (SE KB0203) ; le sondage RMP le détermine éventuellement vers 50 m.

La complémentarité SE + RMP conduit à un modèle relativement contraint, en particulier sur la cote du socle sain, malgré une différence de l'ordre de 50 à 100 % sur la position du mur du réservoir. Il s'agit maintenant de le comparer aux résultats des forages.

• Comparaison avec les forages KB0203 et KB0204 et avec les essais de pompage

➢ Géométrie :

Les niveaux principaux relevés au cours des deux forages voisins et représentés sur les coupes lithologiques seraient les suivants :

- NS
- Mur des argiles : 7 m et 15 m
- Toit du socle fracturé : 22 m et 25 m
- Toit du socle sain : 38 et 40 m

Les résultats fournis par la RMP seule et par la RMP + les méthodes électriques sont en bon accord avec ces résultats, avec une incertitude comprise entre 20 et 50 %.

> Le contenu :

Teneur en eau – Coefficient d'emmagasinement ou porosité efficace – Transmissivité – Perméabilité

Les résultats de la comparaison avec les essais de pompage sont les suivants :

Paramètres	RMP	Pompage
Transmissivité (m ² /s)	1,8 x 10 ⁻⁴	$3 - 10 \times 10^{-4}$
Teneur en eau moyenne	1,2 %	
Coefficient emmagasinement	$5,2 \times 10^{-3}$	$2 - 7 \times 10^{-4}$

La valeur de T_{RMP} est 3 à 4 fois inférieure à $T_{POMPAGE}$.

Pour le coefficient d'emmagasinement, S_{RMP} est 7 à 8 fois supérieur à $S_{POMPAGE}$; ce sont des valeurs particulièrement faibles.

4.3.9 Synthèse : Apport à la connaissance de l'aquifère

• Le socle sain et le socle fracturé

La plate-forme 1 de Kombissiri montre également une structure magnétique importante, globalement orientée E-W.

Un compartiment conducteur situé pratiquement au sud-est de la plate-forme, est mis en évidence par l'électromagnétisme profond (cf. carte EM-34 HCP 40). Il apparaît clairement fermé au nord et à l'ouest ; sa bordure nord est nette, ses bordures ouest et sud apparaissent relativement irrégulières avec des indentations résistantes de direction sud-nord ; une ouverture apparaît vers le nord-est, mais elle est mal définie, faute de mesures.

Une anomalie conductrice importante se dessine à l'extrême sud-ouest de la carte électromagnétique, qui n'a pas été étudiée et qui mériterait sans doute des contrôles sur le terrain, avant d'être abandonnée.

L'extrémité nord-ouest du sillon conducteur est bien délimitée par la carte de grande profondeur (20 m et 26,3 m) des résistivités vraies, ou interprétées, tracée à partir des panneaux ; sa bordure sud n'est pas cartographiée, faute de mesures. Sur chaque profil, une esquisse de la topographie détaillée du toit du socle est fournie à la fois par la tomographie électrique et l'électromagnétisme multi-paramètres. Un pendage général du mur du conducteur du nord-ouest vers le sud-est est le trait marquant qui résulte de l'interprétation des profils 30 à 32 ; ce pendage est encore plus net à partir de l'électromagnétisme qu'à partir des panneaux électriques. Quant aux profils 20 à 22, ils sont à cheval sur la bordure ouest et ils montrent clairement l'approfondissement relativement brutal du socle vers l'est.

L'ordre de grandeur de la profondeur du toit du socle sain, ainsi que celle du toit du socle fracturé est fournie par les méthodes géophysiques. Le sondage électrique localement et le panneau électrique en dispositif Pôle-dipôle le long des profils fournissent ces informations, à partir des inversions multicouches et des inversions lisses de type Occam. Si l'on se fixe des seuils raisonnables, de 100 à 200 ohm.m pour l'entrée dans le socle fracturé et de 800 à 1500 ohm.m pour l'entrée dans le socle sain, les profondeurs estimées (en m) et leur comparaison avec les résultats des forages et des diagraphies (résistivités exprimées en Ω .m) seraient les suivantes :

	SE	Panneaux	Forage	Diagraphie	RMP
Voisinage de KB0201					
Toit du socle fracturé :	20 m	17-25 m	18 m	vers 100 Ω.m	-
Toit du socle sain	44 -54 m	-	54 m	vers 1000 Ω.m	-
Voisinage de KB0203/KB0204		17-25 m			
Toit du socle fracturé	15 m	-	22 - 25 m	> 100 Ώ.m	29 m
Toit du socle sain	47 m		38 – 40 m	>1000 Ώ.m	50 m

• Le socle altéré, les altérites et les argiles superficielles

Le sondage électrique, ponctuellement, puis la tomographie électrique et l'électromagnétisme multi-paramètres, le long des profils permettent de caractériser cet ensemble aquifère. Sa partie inférieure constitue « le réservoir ».

Son épaisseur est définie à partir du toit du socle fracturé tel que présenté ci-dessus, c'est-à-dire avec une précision moyenne. Elle serait au maximum de l'ordre de 20 à 25 m selon la géophysique, ce qui est malgré tout, en bon accord avec les forages et les diagraphies. Le niveau statique n'est pas déterminé par les méthodes géophysiques conventionnelles ; il l'est par la RMP ; il est voisin de 11 m.

Le sondage RMP par le biais de la teneur en eau et de la transmissivité donne lui aussi une information sur la profondeur de la base du réservoir; à l'aplomb de KB0203, on obtiendrait 50 m, ce qui est un accord satisfaisant avec le forage :

Contrairement au site à la plate-forme 2, cet ensemble présente des résistivités relativement homogènes sur toute la plate-forme 1 ; les résistivités moyennes sont toujours supérieures à 15 ohm.m selon la tomographie électrique.

• La couverture superficielle

La couverture est relativement hétérogène, au nord-ouest en particulier. Des hétérogénéïtés résistantes d'épaisseur de 1 jusqu'à 5 à 6 mètres sont visibles sur tous les profils. Vers le sud-est, les argiles sont sub-affleurantes; elles ne sont jamais aussi conductrices que sur le cœur de la plate-forme 2.

• L'aquifère

L'intérêt majeur de cette plate-forme, sur le plan méthodologique, est le fait que le forage KB0201 ne soit pas productif, alors que les deux forages situés au sud-est le sont.

Etait-ce prévisible à partir de la géophysique ? Quelles sont les différences majeures entre KB0201 et l'ensemble KB0203/KB0204 ?

Selon le magnétisme et l'électromagnétisme KB0201 est très proche des limites du contact entre les deux corps magnétiques et à proximité de la fermeture nord-ouest du sillon

conducteur. On note un pendage général vers le sud-est avec les deux outils de tomographie. Selon le sondage électrique et le panneau 30 en électrique et en électromagnétisme, l'épaisseur des altérites est faible ; en revanche selon le sondage électrique seul, l'épaisseur du socle fracturé serait importante. Tout cela est assez cohérent du point de vue géophysique. La question posée est la suivante : un géophysicien/géologue/hydrogéologue implanterait-il un forage dans cette position structurale, même poussé par une valeur raisonnable de la conductance totale et par un sondage électrique dont la branche ascendante « monte » peu rapidement.

L'environnement des deux forages situés au sud-ouest est fondamentalement différent, comme il apparaît clairement sur les coupes et sur les cartes ; il apparaît moins défavorable.

Le sondage RMP est la seule méthode géophysique qui aurait vraisemblablement pu permettre de confirmer quantitativement les différences de potentiel entre KB0201 et les sites du sud-est ; malheureusement cela n'a pas pu être testé a posteriori.

Les diagraphies comme on l'a dit permettent également de différencier KB0201 de tous les autres forages : les résistivités croissent régulièrement de 200 ohm.m jusqu'à 800 ou 1000 ohm.m, sans jamais atteindre des valeurs très élevées voisines de 2000 à 5000 ohm.m comme dans les autres forages et sans passées conductrices notables. Ceci est également compatible avec un socle relativement bien fracturé, sans venues d'eau.

Au total, c'est l'intérêt de l'approche multi-méthode alliée au raisonnement géologique et hydrogéologique qui est démontré dans cet exemple.

Quelle est la qualité de l'aquifère du sud-est ?

o Teneur en eau - Coefficient d'emmagasinement - Réserves - Transmissivité

Selon la RMP et les essais de pompage, il est de qualité voisine de celui du site de Kombissiri 2, en dépit de situations géologiques apparemment très différentes : pas de drain apparent, des altérites relativement peu épaisses mais moins « conductrices » que sur la plate-forme 1.

Pour simplifier, et bien que la superficie utile de la plate-forme 1 semble légèrement inférieure à celle de la plate-forme 2, mais avec une extension vraisemblable vers le sud-est, on peut conclure en estimant que les deux plates-formes sont équivalentes du point de vue des réserves et des paramètres hydrodynamiques, en dépit de signatures géophysiques classiques relativement différentes :

w moyen des altérites : 2 % S moyen : 4 x 10^{-4} Epaisseur d'eau équivalente : 0,5 m Réserves calculées sur une superficie de 0,2 km² = 10^{5} m³

Transmissivité moyenne : 2 à 6 x 10^{-4} m²/s

• Alimentation, pérennité :

A priori, à partir de la seule géophysique, la situation semble moins favorable puisqu'on n'a pas cartographié un drain de manière aussi nette ; en revanche les diagraphies en terme de venues d'eau paraissent tout aussi favorables. On serait tenter de considérer ces deux plates-formes comme équivalentes, avant une nouvelle visite sur le terrain.

4.4 Le site de Sanon

Sur ce site, nos travaux ont consisté en une tentative d'interprétation d'images satellites ASTER, puis à l'interprétation de sondages électriques, de trois panneaux Wenner Alpha et de deux sondages RMP.

Il n'y a eu ni magnétisme au sol, ni diagraphies sur ce site.

Le plan de position est représenté sur la figure 4.4.1.

Certains résultats déjà présentés par Compaoré (1997), concernant les analyses d'échantillons, les puits et forages et les essais de pompage, indispensables à la validation des résultats géophysiques sont présentés, de même qu'une carte résultant des travaux de reconnaissance préalable.



Figure 4.4.1 : Localisation des ouvrages existants et travaux géophysiques réalisés à Sanon

4.4.1 Photographies aériennes – Images satellites

C'est une zone marquée par la présence d'épaisses cuirasses latéritiques sous forme de collines et de recouvrements Des cours d'eau traversent le site qui est un lieu de drainage important.

Nous avons réalisée une étude d'images satellites ASTER sur la zone de Sanon et quelques fractures ont été interprétées sur ce site ; mais leur nombre peu important ne permet pas de conclure sur des directions préférentielles de fracturation à cette échelle. La situation est la même à l'échelle globale de l'image sélectionnée. Peu de fractures ont été interprétées pour être représentatives ; la plupart d'entre elles sont cependant de direction NW– SE.

Ces mêmes images ont été traitées de manière plus poussée lors du projet « Milieux fissurés II », pour des applications telles que l'étude de la végétation et de l'occupation des sols.

4.4.2 Reconnaissance par sondages électriques

Trente quatre sondages électriques ont été réalisés dans le cadre du projet « Milieux fissurés II ». Une carte de résistivité apparente pour des grandes longueurs de ligne a été établie (**fig. 4.4.2**).

Elle montre un sillon conducteur, avec des résistivités apparentes décroissantes vers l'ouest, donc des conductances totales au-dessus du socle sain, croissantes vers l'ouest.

Le pas d'échantillonnage spatial de cette carte est bien sûr beaucoup plus grand que celui d'une carte électromagnétique classique. Elle met donc en évidence seulement une information de type régional ; elle ne permet pas de cartographier des accidents locaux et d'éventuels drains verticaux.



Figure 4.4.2 : Carte de résistivités apparentes à partir de SE 4.4.3 Forages – Analyse des échantillons – Essais de pompage

4.4.3.1 Les puits et les forages

De nombreux puits et forages ont été forés à la fois pendant la phase d'exécution du projet « Milieux fissurés II» et au cours de la thèse de Compaoré (1997). La position des principaux ouvrages est représentée sur le plan des travaux géophysiques.

A partir de ces puits et forages, on obtient des informations ponctuelles précises, concernant les altérites et le socle :

Les deux coupes lithologiques établies à partir des forages S1 et S8, sur lesquels nous avons réalisé deux sondages électriques, sont représentées sur la **figure 4.4.3**.



Figure 4.4.3 : Coupes lithologiques des forages S1 et S8 à Sanon

Les différences d'épaisseur des argiles de surface, donc les différences de profondeur du toit du socle sain entre les deux forages sont importantes. L'épaisseur du socle fracturé est relativement faible.

Deux coupes géologiques simplifiées (figure 4.4.4) montrent les variations latérales de nature du socle et sa topographie, relativement importante : une coupe N-S (de S14 à S12) et une coupe E-W (de S8 à S13). Du nord au sud, on note un contact roche vertes/migmatites et gneiss. D'ouest en est, on note un contact granite/migmatite et gneiss et un contact migmatites/roches vertes. Ces contacts géologiques, qui peuvent être le lieu de circulation d'eau souterraine, sont des traits importants pour l'hydrogéologue.



Figure 4.4.4 : Coupes géologiques simplifiées: N - S et E – W (d'après Compaoré, 1997)

Une esquisse de la cartographie du toit du socle a été établie à partir des forages (**fig. 4.4.5**). Elle est certes incorrecte puisque les failles n'apparaissent pas ; L'interpolation qui a permis d'établir les courbes de niveau est également incorrecte puisqu'elle s'applique à des structures hétérogènes de substratum cristallin. Mais elle est destinée à montrer l'existence de points hauts et de points bas et de gradients.



Figure 4.4.5 : Esquisse de la topographie du toit du socle sain à Sanon (à partir des forages)

4.4.3.2 Analyse des échantillons

• Granulométrie, teneur moyenne en argile et perméabilité :

Compaoré (1997) a réalisé des mesures en laboratoire sur des échantillons du site.

Puits	Zone	Tranche de profondeurTeneur moyenndes prélèvements (m)en argile (Perméabilité moyenne (m/s)
Pt1	Ouest du dôme	1 à 8	42,6	4×10^{-5}
Pt2	Dôme piézométrique	6 à 8	29	2,4 x 10 ⁻⁵
Pt3	Est du dôme	0,5 à 10	33,5	

Les résultats sont résumés dans le tableau présenté ci-dessous :

Les valeurs moyennes obtenues sur les échantillons des différentes zones sont comparables du point de vue de la perméabilité sur cette tranche de profondeur. La teneur en argile de Pt1 est légèrement supérieure à celle de Pt2 et Pt3.

• Porosités et capacité d'emmagasinement :

Les résultats présentés proviennent de ceux du projet « milieux fissurés II » et de la thèse de Compaoré.

Zone	Porosité totale moyenne (%)	Porosité efficace moyenne (%)	Rappel : Porosité totale selon BRGM-AQUATER, 1991 à partir de deux échantillons (porosimètre à mercure)
Dôme piézométrique	30 à 40	2	21 et 19
Hors dôme piézométrique	30 à 35	1,8	

4.4.3.3 Les essais de pompage

Ils ont été réalisés dans une dizaine de forages et interprétés lors du projet, puis par Compaoré, puis par Vouillamoz (2003) pour les forages inclus dans les boucles de mesure des sondages RMP.

Les résultats des interprétations des essais, limités aux forages utiles pour la validation de la géophysique sont présentés ci-dessous.

• Les résultats

Ils sont présentés dans le tableau suivant :

Forages	Compartiment testé	T Transmissivité (10 ⁻⁴ m ² /s)		S Coefficient d'emmagasinnement (10 ⁻²)		
		Compaoré (1997)	Vouillamoz (2003)	Compaoré (1997)	Vouillamoz (2003)	
Dôme	Altérite (30m)	2 - 3	2,5	Variable 0,2 - 2,8	2	
S1 - S2	Altérite + Socle (60 m)	3 - 4,5	3,5	0,3 -1,4	0,4	
Hors dôme	Altérite (20m)	0,01 - 0, 05	0,05	1,3 – 2,6	1,5	
S8 - S9	Altérite + Socle (50 m)	0,2-0,8	0,4	0,7-8(!)	1	

• Commentaires

Les paramètres hydrodynamiques présentés expriment des caractéristiques spécifiques pour chacune des deux zones étudiées à Sanon.

Transmissivité : La différence entre les deux zones est claire ; la zone du dôme conduit à des valeurs voisines de celles de Kombissiri.

Coefficient d'emmagasinement : Les deux zones se comportent d'une manière relativement voisine ; ce sont des gammes de valeurs qui correspondent à une nappe libre.

4.4.3.4 Bilan hydrique, précipitations, recharge

Cette évaluation de la recharge de la nappe aquifère de Sanon a été réalisée par une estimation du bilan hydrique et du bilan chimique. Elle est fournie ici

L'estimation du bilan hydrique a été faite par un procédé direct d'évaluation de la variation de stock (BRGM-AQUATER, 1991 ; CEFIGRE-Université d'Avignon, 1990).

La recharge calculée pour l'année 1993 à Sanon, à partir de précipitations totalisant 516 mm, conduit à une valeur de recharge égale à 50 mm environ.

4.4.4 Sondages électriques

• Les sondages électriques « S1/S2 » et « S8/S9 » – Comparaison avec les forages

> Les données brutes et les résultats de leur inversion :

Ils sont représentés sur la figure 4.4.6.

Un examen qualitatif rapide des deux sondages électriques Schlumberger conduirait à des conclusions opposées à celles des forages, puisque la conductance totale au-dessus du socle sain est deux fois plus élevée en S8 qu'en S1 (respectivement 1600 et 750 mS), alors que la profondeur du toit du socle fracturé, y est près de deux fois plus faible (respectivement 25 m et 48 m). C'est la raison pour laquelle sur la carte de reconnaissance géophysique établie initialement (BRGM, 1988) ; le voisinage du forage S8 apparaît comme la zone anomalique la plus conductrice qui, selon l'approche traditionnelle, serait d'intérêt potentiel maximal.

Des profils ou des cartes électromagnétiques à grande profondeur d'investigation, s'ils étaient mis en œuvre sur ce site, confirmeraient cette situation.

Cette fois encore, ce sont les conditions de surface qui sont responsables de cette apparente contradiction et notamment la présence d'argiles supérieures plus conductrices au nord-ouest qu'au sud-est.

Une interprétation quantitative fine des sondages électriques (par inversion multicouche), permet de séparer en partie les effets de surface des effets profonds qui intéressent les hydrogéologues.

Interface	SE / S8	Forage / S8	SE / S1	Forage / S1
Mur des argiles	26	22 ou 26	22	30 ou 40
Toit du socle fracturé	34	35	30 ou 36	48
Toit du socle sain	68	47	60	56 ou ++

La comparaison des positions des interfaces entre les sondages électriques et les forages, n'est pas très favorable ; elle est acceptable en S8 ; elle ne l'est pas en S1.

> Intérêt des conductances cumulées et de la conductance totale

La conductance totale est représentative des argiles superficielles beaucoup plus que de la profondeur du toit du socle ou de l'épaisseur des arènes et du socle fracturé. Elle est particulièrement sensible aux variations spatiales de la résistivité et de l'épaisseur des argiles supérieures.

La **figure 4.4.7** présente les conductances cumulées des deux sondages électriques réalisés sur le site de Sanon. On remarque que la différence principale entre les deux sondages est limitée aux 25 mètres superficiels ; en profondeur, les contributions des arènes et du socle fracturé sont voisines.

,

1

.



Figure 4.4.6 : Sondages électriques de Sanon : A : données ; B : interprétations



Figure 4.4.7 : Conductances cumulées des SE à Sanon

> Sondages électriques Wenner extraits des panneaux

Ils sont destinés à illustrer les problèmes de profondeur d'investigation et dans une certaine mesure, le problème d'équivalence pour les sondages du profil 3.

- 1 sondage Wenner alpha extrait du profil 2, à l'aplomb du forage S1-S2.
 Pour a_{max} = 68 m (3 a = 204 m), l'influence de la cuirasse est encore prépondérante, on n'atteint pas les altérites.
- 3 sondages extraits du profil 3. Avec le même dispositif, on a traversé la partie supérieure argileuse des altérites, on est déjà sensible aux arènes et au socle fracturé.
- le sondage Schlumberger à l'aplomb du forage S1-S2. Il faut atteindre AB/2 = 100 m pour traverser la cuirasse, les argiles conductrices, les arènes et le socle fracturé pour atteindre le socle sain.

4.4.5 Tomographie électrique

Il n'y a pas eu d'étude méthodologique spécifique proprement dite sur les données de Sanon. Elles ont été traitées et interprétées avec les mêmes paramètres que celles de Kombissiri.

Une bonne illustration de l'évolution des résultats de l'inversion au cours du processus itératif est présentée sur la **figure 4.4.8**. Il s'agit d'une situation pratiquement tabulaire où la loi d'équivalence s'applique de manière exemplaire.



Figure 4.4.8 : Evolution des résultats de l'inversion au cours du processus itératif

• Les panneaux électriques : Profil 1, Profil 2 et Profil 3

Ils ont été réalisés au tout début des travaux de terrain. Seul le dispositif Wenner Alpha a été mis en œuvre.

Résultats des inversions

Ils sont présentés sur la figure 4.4.9.

La différence entre les trois images géophysiques est importante. Après étude, il s'avère que ce sont les conditions de surface qui sont responsables de ces différences et notamment l'existence d'épais lambeaux de cuirasse au nord et au sud du site.

Aucune information concernant l'aquifère ne peut être fournie sur le profil 2, ni sur la partie nord et sud du profil 1. La cause est à la fois l'existence d'un recouvrement résistant et aussi la profondeur d'investigation trop faible du dispositif Wenner.

Le profil 3 montre une grande homogénéïté latérale et une situation quasi-tabulaire, avec un surcreusement peut-être dans sa partie centrale.

> Synthèse

La première information obtenue à partir de ces trois profils de reconnaissance détaillée est relativement paradoxale ; ce sont les différences importantes entre les trois profils et la variabilité spatiale le long du profil 2, en contradiction apparente, avec l'homogénéité reconnue des altérites par forages et par les analyses de laboratoire (Compaoré, 1997). Lorsqu'il a été établi que ces différences sont liées aux conditions de surface, l'enseignement que l'on en tire est qu'il faut être prudent et ne pas émettre des conclusions trop rapides à partir des images des panneaux électriques, même après inversion.

Le profil 3 situé dans l'axe du sillon conducteur donne l'image d'une situation relativement homogène, avec un surcreusement possible du socle dans la partie centrale, mal assurée, en raison des limites du dispositif Wenner alpha.

Cette situation homogène est paradoxalement un handicap pour l'inversion, car il ne s'agit plus d'une inversion 2D, mais d'une inversion 1D pour laquelle les lois d'équivalence classiques s'appliquent, sans contraintes latérales. Sur le profil 3 et dans la partie centrale du profil on obtient ainsi une ébauche du substratum à 100 ohm.m dès 20 à 23 m de profondeur, alors que le toit du socle fracturé est situé à 48 m au forage S1.

X

Dispositif : WENNER α



Figure 4.4.9 : Résultats des inversions des panneaux Wenner α, sur le site de Sanon **A :** Profil 1 ; **B :** Profil 2 ; **C :** Profil 3

4.4.6 Sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP)

Deux sondages RMP ont été réalisés, chacun centré sur un forage.

4.4.6.1 Le sondage RMP S1/S2

• Acquisition – Qualité des données brutes

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la figure 4.4.10.

2



Figure 4.4.10 : Données brutes du sondage RMP S1/S2



Figure 4.4.11 : Résultats d'inversion des données du sondage S1/S2

• Résultats des inversions - Caractérisation des aquifères

Les résultats des inversions et des calculs des paramètres hydrogéologiques sont représentés sur la **figure 4.4.11**.

o Commentaires

La courbe T₂* présente deux pics. On ignore le premier pic.

• Les interfaces

A partir de l'examen de l'ensemble des courbes, 5 interfaces principales sont positionnées : 8 m pour le toit de l'aquifère en raison de l'augmentation de w ; 11 m, 13 m et 29 m pour le changement de pente de la transmissivité ; la légère diminution de w vers 60 m pourrait être interprétée comme le toit du socle sain, en fait elle correspond à la limite d'investigation de la méthode.

• Les caractéristiques de l'aquifère :

Le réservoir serait situé entre 8 m et 29 m.

Les valeurs estimées seraient les suivantes :

Teneur en eau moyenne :	5 %
Transmissivité :	4 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Perméabilité de la partie supérieure :	0,7 x 10 ⁻⁴ m/s
Perméabilité de la partie inférieure :	0,05 x 10 ⁻⁴ m/s

Le socle fracturé serait situé entre 29 et 60 m.

Teneur en eau moyenne :	2,9 %
Contribution à la transmissivité :	4 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Perméabilité moyenne :	0,15 x 10 ⁻⁴ m/s

> Pour l'ensemble de l'aquifère :

Teneur en eau moyenne :	4 %
Transmissivité :	$8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

4.4.6.2 Le sondage RMP S8/S9

• Acquisition – Qualité des données brutes

L'ensemble des courbes y compris celle de T_2^* est de très bonne qualité. Les données brutes sont présentées sur la **figure 4.4.12**.

• Résultats d'inversion

Les résultats des inversions et des calculs des paramètres hydrogéologiques sont représentés sur la **figure 4.4.13**.

1

~



Figure 4.4.12 : Données brutes du sondage RMP S8/S9



Figure 4.4.13 : Résultats d'inversion du sondage S8/S9

• Les interfaces

A partir de l'examen simultané des 5 courbes, 6 interfaces principales sont positionnées : 7 m et 18 m en raison de l'augmentation de w et de T_1^* respectivement, 30 m en raison du changement de pente de T_1^* , 20 et 50 m en raison du changement de pente de la transmissivité ; la limite vers 60 m est de même nature que pour S1/S2

- Les caractéristiques de l'aquifère :
- Le réservoir serait situé entre 7 et 30 m.

Les valeurs estimées pour les différents paramètres seraient les suivantes :

Teneur en eau moyenne : Transmissivité :	2,8 % 0,45 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Perméabilité maximale:	0,04 x 10 ⁻⁴ m/s
Le socle fracturé serait situé	entre 30 et 65 m.
Teneur en eau moyenne : Transmissivité :	1,4 x 10 ⁻⁴ 0,55 x 10 ⁻⁴ m ² /s
Perméabilité moyenne :	0,02 x 10 ⁻⁴ m/s

> Pour l'ensemble de l'aquifère :

Teneur en eau moyenne :	1,9 %
Transmissivité :	$1 \ge 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

C - Compléments apportés par les sondages électriques

Il y a une certaine cohérence entre les sondages électriques et les résultats de la RMP. Le mur du réservoir, c'est-à-dire le toit du socle fracturé est proposé par la RMP à 30 m pour S1 et S8 alors que les sondages électriques proposent : 30, 34 ou 36 m, (cf. tableau précédent).

D - Comparaison avec les forages et avec les essais de pompage

Géométrie :

Il y a un accord acceptable pour S8. Les différences sont importantes pour S1.

Teneur en eau – Coefficient d'emmagasinement ou porosité efficace – Transmissivité

	RM	ИР	Pom	page
Paramètres	S 8	S1	S8	S1
Transmissivité (m²/s)	1 x 10 ⁻⁴	8 x 10 ⁻⁴	0,4 x 10 ⁻⁴	3,5 x 10 ⁻⁴
Teneur en eau moyenne	1,9 %	4 %		-
Porosité efficace	0,5 %	1,1 %	1 x 10 ⁻²	0,4 x 10 ⁻²

Les résultats obtenus par les deux méthodes sont résumés dans le tableau suivant :

Le sondage S1 apparaît de bien meilleure qualité que S8 : d'un facteur 2, en terme de réserve et d'un facteur voisin de 10 en terme de transmissivité.

4.4.7 Synthèse : interprétation multi-méthode

L'absence de données magnétiques et électromagnétiques sur le site de Sanon constitue une lacune importante pour la connaissance du site. Mais l'apport des techniques mises en œuvre permet tout de même de tirer quelques conclusions méthodologiques.

• Le socle sain et le socle fracturé

L'absence de données géophysiques de reconnaissance à grande densité spatiale (méthode magnétique et électromagnétique) fait qu'il est impossible de cartographier les variations de nature du socle, ni les accidents mis en évidence par les forages.

La carte des résistivités apparentes établie à partir de 34 sondages électriques (BRGM-AQUATER, 1988) lors de la reconnaissance notamment, donne une image plus influencée par les conditions superficielles que par le socle.

Seul le panneau électrique, qui a une densité spatiale adaptée fournit une information sur le toit du socle fracturé. Avec le dispositif Wenner, on note seulement un surcreusement au centre du profil. De plus, la profondeur obtenue apparaît trop faible par rapport au résultat du forage S1, en raison des problèmes d'équivalence et de l'absence de contraintes latérales.

Les sondages RMP qui fournissent une estimation de profondeur pour le mur du réservoir, donc pour le toit du socle fracturé, proposent la même valeur (30 m) pour les deux stations S1 et S8, alors que la profondeur fournie par les forages varie du simple au double.

Pour conclure, aucun élément n'est apporté concernant la cartographie du socle ; en particulier, aucun accident ni aucun drain n'est mis en évidence.

• Le socle altéré, les altérites et les argiles superficielles

Le profil 3 montre l'image d'une situation très homogène pour toute la série située audessus du socle fracturé, ce qui est en accord avec les conclusions des travaux précédents.

En revanche, si l'on compare la description lithologique des forages S1 et S8 et les résistivités « vraies » ou « interprétées » obtenues à partir des sondages électriques, on note de grandes différences :

- au point S1, l'ensemble silt + argile + sable + gravier + argile sableuse et silteuse qui a une épaisseur de 40 m présente une conductance de l'ordre de 480 Siemens, soit une résistivité moyenne de l'ordre de 85 ohm.m.

- au point S8, l'ensemble argile + silt +argile sableuse + gravier, qui a une épaisseur de 20 m, présente une conductance totale de 1650 milliSiemens, soit une résistivité moyenne de 12 ohm.m.

• La couverture superficielle

Les variations spatiales de la couverture superficielle et leur influence sur les panneaux électriques sont l'un des traits majeurs du site de Sanon.

Ces caractéristiques influencent des résultats des mesures de tomographie électrique. D'une part, elles conduisent à une déformation majeure des pseudo-coupes géophysiques brutes, mais des coupes inversées dans une certaine mesure. D'autre part, elles conduisent à des variations importantes de la profondeur d'investigation des quadripôles de dimensions fixées. Ce bruit géologique doit être pris en compte lors de l'application de la tomographie électrique.

• L'aquifère

Le panneau électrique du profil 3 et les sondages RMP permettent de caractériser l'aquifère de Sanon et de le différencier nettement de ceux de Kombissiri.

Les valeurs moyennes de la teneur en eau sont élevées (2 et 4 %), celles du coefficient d'emmagasinement également.

L'absence de diagraphies en revanche ne permet pas de donner des informations sur les arrivées d'eau.

Chapitre 5

Synthèse – Discussion

Les zones de socle représentent 80 % de la géologie du Burkina et les formations granitiques, et granito-gneissiques y sont nombreuses, plus importantes que les schistes par exemple. C'est d'ailleurs dans les socles granitiques que les aquifères sont les moins connus, surtout en termes de productivité et de pérennité de la ressource, mais aussi concernant les signatures physiques caractéristiques. La connaissance des aquifères discontinus de socle sous les basses latitudes, en climat soudano-sahélien en Afrique, tel est l'objectif de cette étude.

D'où l'importance des applications expérimentales mises en œuvre sur un contexte géologique essentiellement granitique (le site de Kombissiri) et granito-gneissique associé à des roches vertes (le site de Sanon).

Pour cela, nous avons mis en œuvre et étudié le fonctionnement de plusieurs outils géophysiques non destructifs, directement appliqués à la recherche d'eau; et cela pour aboutir à la caractérisation des aquifères de Sanon et de Kombissiri.

L'approche que nous avons utilisée est pluri-disciplinaire : elle a principalement mis en œuvre des méthodes non destructives (télédétection, géophysique de surface et de forage), mais aussi des procédés destructifs, des forages, pour la validation et la connaissance directe. De plus, l'estimation de la productivité des forages et les analyses physico-chimiques nous a permis à la fois d'étalonner les méthodes et de caractériser les sites étudiés.

L'étude réalisée dans le cadre de cette thèse a permis de comprendre la structure et le fonctionnement des aquifères de deux types de contextes hydrogéologiques de socle en Afrique. Elle a également permis de progresser dans la connaissance des outils géophysiques

et de faire des recommandations. Elle apporte enfin une contribution supplémentaire à la connaissance des aquifères de socle.

5.1 Comparaison entre les trois aquifères étudiés

5.1.1 Géométrie – Structure – Caractéristiques particulières

Les aquifères étudiés possèdent chacun une structure et des caractéristiques propres.

- La plate-forme 2 de Kombissiri : C'est un sillon relativement étroit fermé au nord-ouest, vraisemblablement ouvert au sud-est. Suivant l'axe du sillon, on remarque un approfondissement général vers le sud-est. Perpendiculairement à cet axe, on note des décrochements verticaux et l'existence d'un drain, sinon de deux drains.

L'une de ces caractéristiques particulières est l'existence d'un cœur très conducteur sub-affleurant, d'une épaisseur de l'ordre de 10 m.

- La plate-forme 1 de Kombissiri : L'aquifère apparaît comme un compartiment de forme générale plus ou moins rectangulaire fermé au nord et à l'ouest, dont on ne connaît pas les limites de fermetures (ni à l'est, ni au sud).

On note un léger pendage général vers le sud-est. On note quelques surcreusements et une sorte de forme de bassin.

Les altérites semblent relativement homogènes et moins conductrices que dans le cœur de la plate-forme 2. Leur épaisseur est relativement faible (20 m).

- Le site de Sanon : Aucune limite latérale n'a véritablement été cartographiée, ni par la géophysique, ni à partir des forages.

La géophysique que nous avons mise en oeuvre n'a mis en évidence ni accidents du socle, ni des variations de nature des roches ; en revanche, les forages ont permis de conclure que de tels éléments existent. Les altérites sont épaisses en général ; elles semblent homogènes, bien que les différences de nature, d'épaisseur et de résistivité entre les formations superficielles des forages S1 et S8 paraissent importantes.

5.1.2 Caractéristiques hydrogéologiques

Du fait de la bonne corrélation entre les résultats des essais de pompage et ceux des sondages RMP, la planche synthétique de comparaison des résultats RMP est une bonne illustration de la comparaison des qualités des trois aquifères.



Figure 5.1 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques issues des sondages RMP extraites des figures précédentes

5.2 Apport méthodologique : les techniques géophysiques

La complémentarité entre les sites de Kombissiri et de Sanon, l'existence de forages d'étalonnage et de données d'exploitation, permettent de tirer des enseignements sur l'utilisation des méthodes mises en œuvre. Ces enseignements pourraient être pris en compte lors d'études similaires ultérieures.

Mais cette étude expérimentale demeure limitée et il est clair que des travaux ultérieurs devraient permettre d'affiner, de modifier ces conclusions liées à un environnement particulier.

5.2.1 La tomographie électrique

C'est la seule technique qui permette de donner une image 2D, puis 3D si plusieurs profils sont réalisés, de l'aquifère et de son environnement. La sensibilité du courant continu aux résistants et aux conducteurs lui confère un pouvoir de résolution intrinsèque, supérieur à celui de l'électromagnétisme.

Certes, la solution de l'inversion d'un panneau n'est pas unique, et les lois d'équivalence connues en sondage électrique subsistent, mais la finesse de l'échantillonnage spatial, latéralement et verticalement et le caractère de continuité imposé permet d'accorder une grande confiance dans les variations spatiales cartographiées après inversion. D'une manière générale, le risque est sans doute de sur-interpréter plutôt que de sous-interpréter.

Le choix du dispositif :

La seule question qui se pose est le choix entre des quadripôles symétriques et des demi-dispositifs, c'est-à-dire le choix d'une électrode d'émission située à l'infini ou non. Ce choix est en quelque sorte imposée par le terrain, la logistique et dans une certaine mesure la sécurité.

En théorie, le demi-dispositif a deux avantages décisifs :

- il conduit à une profondeur d'investigation presque deux fois supérieure à celle du quadripôle symétrique équivalent pour une même distance entre les électrodes actives ; c'est un gain inestimable, lorsque l'espace disponible pour installer le panneau est physiquement limité,

- le nombre de combinaisons indépendantes à partir d'un Pôle-dipôle est deux fois supérieur à celui d'un quadripôle symétrique, pour un nombre d'électrodes actives donné, ce qui se traduit par la réalisation successive des deux configurations : « avant »et « arrière » ; l'inversion conjointe étant théoriquement supérieure à l'inversion individuelle de chacun d'eux et bien sûr supérieur à l'inversion du dispositif Wenner Schlumberger qui correspond à la somme des deux. En réalité, cet avantage théorique n'a pas été véritablement testé systématiquement au cours de cette étude, ni sur les modèles, ni sur les données expérimentales ; il se pourrait que l'algorithme d'inversion soit pénalisé par des zones de sensibilité trop éloignées les unes des autres entre les dispositifs avant et arrière.

En pratique, si l'espace disponible pour installer le dispositif n'est pas limité, il peut être préférable d'installer le complément d'électrode égal à la demi-longueur du dispositif maximal pour obtenir la même profondeur d'investigation avec un quadripôle qu'avec un demi-dispositif, plutôt que d'utiliser une électrode d'émission à l'infini ; il n'est pas sûr, en effet, que la supériorité de la sensibilité du demi-dispositif soit telle que certains éléments de la structure puissent être manqués par le quadripôle symétrique équivalent.

Ce choix de l'électrode à l'infini étant fait et quel qu'il soit, le problème du choix entre Wenner et Schlumberger ne se pose pas vraiment. Cette référence aux dispositifs-types, nés à l'origine de la prospection électrique, n'est pas nécessaire. Le seul problème posé est celui du choix entre le temps d'exécution des mesures et la qualité de l'échantillonnage spatial. Pour faire référence à une notion qui date également de l'origine de la prospection électrique, on doit choisir de pratiquer le maximum d' «embrayages»; comme le propose Loke dans le manuel de **Res2Dinv®**, on peut mettre en œuvre des dispositifs électriques à « haute résolution »avec des « embrayages » : « High resolution electrical surveys with overlapping data levels ».

Les paramètres d'inversion :

Notre étude a été minimale et la simplicité des situations géologiques est telle que les résultats obtenus confirment des choix de « bon sens », sans conduire à des recommandations d'une grande efficacité. Bien des options des programmes de Res2Dinv et des programmes développés par Bobatchev et al (2000), n'ont pas été testées. Parmi les premières, on pourrait citer l'introduction de contraintes géométriques ou de valeurs de résistivité imposées par les diagraphies ; parmi les secondes il faut citer la correction des à coups de prise par l'utilisation des filtres spatiaux fondés sur la médiane.

Les pièges :

Il y a quelques pièges à éviter dans l'interprétation des panneaux. Le plus important est certainement de prendre pour des effets profonds, des «fantômes» d'effets superficiels; ceci peut se vérifier, en partie, en réalisant des modélisations directes bien sélectionnées. Un deuxième écueil est l'existence d'effets de bord et notamment d'effets 3D éventuels qui ne peuvent être évalués que sur le terrain. Une bonne cartographie de terrain (relevé des conditions de surface) lors de la mesure est donc utile.

5.2.2 Le sondage électrique

Pour les mêmes raisons que ci-dessus, liées à la qualité de l'échantillonnage spatial, nous recommandons le dispositif Schlumberger avec embrayages, plutôt que le dispositif Wenner.

Nous recommandons également l'inversion « multi-couches » avec une progression imposée des épaisseurs, avec pour modèle de départ, un demi-espace homogène où la seule variable est la résistivité des couches, ou une inversion de type Occam. Ce choix a l'avantage de créer des conditions initiales d'inversion identiques pour tous les sondages d'une zone d'étude, ce qui permet de mieux étudier les variations relatives, d'un sondage à l'autre. Il a aussi l'intérêt d'être mieux adapté au problème des aquifères de socle et de permettre d'étudier les variations de la conductance avec la profondeur et de calculer les conductances cumulées, ce qui évite le piège de la conductance totale seule.

5.2.3 L'électromagnétisme fréquentiel à nombre d'induction faibles et intermédiaires – Les dispositifs Slingram de type EM 34 et MaxMin

• Etude de détail le long de profils :

C'est l'une des premières fois, pour une étude d'aquifère de socle en Afrique subsaharienne, qu'une coupe pseudo-1D a été tracée à partir des 6 configurations de l'EM-34.

Les mesures ont été faites avec un soin tout particulier en vue d'une exploitation quantitative des données. Les capacités du logiciel **Emigma**® ont permis cette exploitation efficace.

Les résultats sont très positifs. Les coupes pseudo-1D et la capacité de détection des contacts verticaux des configurations HCP font de cette technique, même en l'absence de programme d'inversion 2D, un outil d'imagerie et de caractérisation efficace.

La moindre sensibilité de l'électromagnétisme purement magnétique aux résistants, par comparaison au courant continu, reste vraie, mais elle n'a pas conduit dans nos applications à manquer des traits majeurs, importants pour la géologie ou l'hydrogéologie.

La comparaison entre la tomographie électrique et la tomographie électromagnétique mise en œuvre doit porter maintenant sur des critères de coût, de logistique et de facilité de mise en œuvre. L'intérêt majeur de la tomographie électromagnétique est sa facilité de mise en œuvre qui fait qu'il est très facile d'allonger un profil ou de le déplacer, en temps réel, en fonction des résultats. Cette faculté de pouvoir faire évoluer le programme de mesure (initialement établi) en temps réel est certainement intéressante car il peut être pénalisant de s'en tenir à l'étude de la surface imposée initialement si des éléments favorables apparaissent sur les bords de ladite surface. C'est le cas pour Kombissiri 1.

• Etude de reconnaissance :

L'intérêt de ces techniques par rapport au profilage ou à la cartographie à courant continu est démontré. En plus de l'intérêt logistique, le très grand avantage de l'électromagnétisme est la possibilité d'un échantillonnage spatial très fin, éventuellement isotrope. Dans une zone d'étude où il y a des hétérogénéités superficielles importantes, une grande densité spatiale ajoutée à une moindre sensibilité à la présence de surfaces de discontinuité proches de la surface du sol est un atout majeur pour un outil de reconnaissance en profondeur.

Pour la reconnaissance, la recommandation est la suivante :

- cartographie HCP 40,
- en cas de difficultés d'interprétation dues à la présence d'anomalies résistantes étroites, VCP 40 sur certains profils,
- si nécessaire, pour lever l'ambiguïté entre un conducteur profond et un conducteur superficiel, VCP 10.

• Quel outil EM ? L'EM-34 ou le MaxMin ?

La seule limite de l'EM-34 aujourd'hui est sa profondeur maximale d'investigation, de l'ordre de 60 m.

Il est recommandé de tester l'utilisation du MaxMin, éventuellement à la place de l'EM-34 pour des raisons de disponibilité et pour pallier l'insuffisance de celui-ci pour des profondeurs plus importantes.

Il est recommandé de tester l'utilisation du MaxMin dans des configurations voisines de celles de l'EM-34, tout en acceptant des nombres d'induction égaux à 4 ou 8 fois ceux de ce dernier. Cette application doit être testée en mode HCP classique et VCP qui l'est beaucoup moins, car cet équipement créé pour l'exploration minière n'a pas les mêmes performances que l'EM-34 en matière de stabilité et de compensation du champ primaire.

5.2.4 Le magnétisme au sol

Il s'agit d'une méthode classique, mise en œuvre quelquefois pour l'étude des aquifères de socle, lorsque le géologue s'attend à la présence d'intrusions basiques.

Notre recommandation est de l'utiliser de manière systématique ou quasi systématique pour toute étude de socle cristallin y compris granitique, et métamorphique. En effet, les
variations latérales de nature du socle et la présence d'accidents font que très souvent on peut cartographier des variations spatiales de faible amplitude, significatives.

La grande densité spatiale, la facilité de mise en œuvre et la sensibilité à la composition minéralogique des formations en font un outil précieux de la cartographie géologique en zone de socle. Une carte magnétique avec une précision de mesure de 0,1 nT, sans anomalies, serait certainement un indice peu favorable du point de vue hydrogéologique. Une carte du site de Sanon aurait été de ce point de vue, intéressant.

Il est recommandé d'augmenter les dimensions de la zone à couvrir de 10 à 20 % de chaque côté pour des raisons liées au traitement et à l'interprétation des données ; on ne peut pas interpréter une anomalie si on ne connaît pas « la ligne de base ».

L'intérêt de la carte magnétique en vue de la mise en œuvre du sondagé par RMP est un atout supplémentaire.

5.2.5 La géophysique aéroportée

Démontrer l'intérêt de cette approche est l'objet d'une thèse en soi. Des travaux récents existent, et qui montrent l'intérêt de l'aéroporté pour des applications hydrogéologiques.

5.2.6 Le sondage par Résonance Magnétique Protonique (RMP)

Pour la première fois au Burkina Faso, le sondage RMP a été mis en œuvre avec succès. L'objectif souhaité initialement a été rempli en partie.

La différentiation des sites de Sanon et de Kombissiri, la comparaison des résultats avec les forages et les essais de pompage et l'intégration de ces résultats dans l'étude générale de caractérisation des aquifères de Vouillamoz (2003), confirment l'intérêt de ce nouvel outil pour les études hydrogéologiques des aquifères de socle, y compris dans les zones de faibles latitudes, en Afrique.

Malgré les difficultés propres à ces zones d'étude (basses latitudes magnétiques, inhomogénéités spatiales et variations temporelles importantes du champ magnétique) et celles propres à l'objectif (étude d'un milieu fracturé et recherche de drains sub-verticaux, présence d'argiles superficielles), le sondage RMP est la seule méthode géophysique qui permette avant forage, de prédire la présence d'eau en quantité suffisante et de caractériser à priori le réservoir potentiel.

Bien que notre travail d'interprétation des données brutes ait été relativement réduit et peu profond, il semble qu'un géophysicien ayant une bonne expérience des autres méthodes de sondage, puisse après une courte période de formation devenir autonome dans l'utilisation de ce nouvel outil géophysique.

Par similarité avec le sondage électrique et en raison des lois d'équivalence, nous pensons que l'interprétation multi-couche, à partir d'un demi-espace homogène est une approche fructueuse.

Il est dommage que nous n'ayons pas pu tester la méthode sur le forage «sec » de Kombissiri 1 (KB0201) et que nous n'ayons pas pu réaliser un série de sondages adjacents sur le profil 1 de Kombissiri 2, pour comparer leurs résultats à ceux des autres méthodes et des forages de contrôle.

5.2.7 Les diagraphies électriques

Elles peuvent être mises en œuvre pour des coûts modiques et ce sont de précieux outils pour l'aide à l'équipement des forages et surtout pour l'aide à la compréhension et peutêtre à la modélisation des aquifères.

5.3 Apport méthodologique : la place de la géophysique dans l'implantation des forages péri-urbains à gros débits

5.3.1 Quatre outils conseillés : Magnétisme, Electromagnétisme fréquentiel, Tomographie électrique et Sondage par Résonance Magnétique Protonique

Le magnétisme est une méthode de reconnaissance qui permet une cartographie fine du socle cristallin et métamorphique, quelle que soit sa profondeur et dans une certaine mesure, quelle que soit sa nature.

L'EM fréquentiel est une méthode de reconnaissance mais aussi d'investigation semidétaillée et détaillée. Notre étude montre qu'elle est intrinsèquement moins performante que le courant continu dans la détection des structures en zone de socle, mais sa grande facilité de mise en œuvre lui confère un avantage décisif pour l'exploration de semi-détail, qui permet d'étendre la zone d'étude, dès que des indices favorables apparaissent aux limites des zones prédéfinies.

L'apport de la tomographie et du sondage RMP, comme outils d'investigation détaillée a été démontré tout au long du mémoire

Remarque : L'émanométrie Radon est une méthode datant de la fin des années 1990. Elle permet de mesurer la concentration en radon à l'aplomb des accidents fracturés du socle. Les zones de perméabilité maximum se marquent par des hausses de concentration radon (BRGM, 1988). Nous n'avons pas testé cette méthode au cours de nos travaux. Elle a déjà été testée avec un certain succès à Sanon par le BRGM, et sa complémentarité avec la géophysique paraît réelle. Si ces conclusions sont confirmées par les hydrogéologues, cet outil pourrait être utilement incorporé dans la méthodologie d'implantation des forages péri-urbains et en hydrogéologie villageoise, si ce n'est déjà fait.

5.3.2 Méthodologie proposée

La méthodologie géophysique que nous proposons, à l'issue de cette étude, pour l'implantation des forages à gros débits en zone de socle tient compte de tous les facteurs qui déterminent la productivité des forages, mais aussi des facteurs qui influencent la géométrie et la mise en place des fractures et des circulations d'eau.

Elle s'articule comme suit :

- <u>A – Cartographie de reconnaissance géophysique multi-méthode :</u>

- magnétométrie : elle aura pour objet de réaliser une cartographie du toit du socle et pas seulement de détecter les corps intrusifs magnétiques (de type filon basique par exemple).
- électromagnétisme Slingram EM-34 ou Maxmin : détecter les zones conductrices en profondeur d'une part, et mettre en évidence les hétérogénéïtés superficielles de surface d'autre part.

- <u>B – Sondages électriques :</u>

Ils doivent être effectués de manière à tester plusieurs points de la zone conductrice sélectionnée. L'interprétation multi-couche réalisée devrait nous permettre de choisir le dispositif de tomographie le plus approprié.

• C1 : Tomographie électrique : dispositifs multi-électrodes :

Mis en œuvre de façon à mettre en évidence les anomalies conductrices verticales (les drains ?) en profondeur, mais aussi de façon à garantir des dimensions importantes quant à l'extension latérale.

• C2 : La tomographie électromagnétique :

Elle pourrait peut-être constituer une alternative acceptable à la tomographie électrique dans certaines situations, sinon dans toutes.

- <u>C – Sondages RMP :</u>

C'est l'étape de confirmation ultime de la présence d'eau et la phase d'estimation de la qualité du réservoir. On peut estimer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, après calibration de l'outil avec des données de forage proche. Mais même sans calibration préalable, le choix d'une zone entre plusieurs est possible à partir de comparaisons relatives.

<u>Remarque</u> : Si l'intérêt de l'émanométrie radon est confirmé en zone de socle, elle pourrait s'intégrer utilement dans la méthodologie proposée. Elle serait mise en œuvre après la

cartographie électromagnétique, en particulier pour différencier les sous zones potentiellement les plus intéressantes au sein des zones conductrices retenues. Sa mise en œuvre relativement légère et rapide couplée à la complémentarité des phénomènes physicochimiques mis en jeu sont deux avantages réels.

5.3.3 Application aux trois sites étudiés :

Quelles implantations nouvelles de forage proposerait-on à Kombissiri et à Sanon ? Même si nous avons déjà quelques propositions à formuler, nous préférons que ce choix soit fait au cours de discussions avec un hydrogéologue qui connaît la région, dans la mesure du possible. Des compléments ponctuels de mesures géophysiques pourraient être nécessaire.

5.4 Le modèle conceptuel des aquifères de socle

Le problème posé n'est pas seulement celui du nombre de couches du modèle d'aquifère de socle ; il est celui de la nature des fractures et de leur rôle dans la circulation et l'alimentation de l'aquifère ; et de l'importance de l'existence d'accidents tectoniques majeurs pour assurer la pérennité de la ressource locale.

De ce point de vue, le forage « sec » KB0201, est un élément important dans la compréhension du fonctionnement de ces aquifères, quelle que soit sa signature géophysique.

Aucune des méthodes géophysiques de surface ne permet d'aider l'hydrogéologue à confirmer le modèle tri-couche, sauf le sondage RMP dans de très bonnes conditions de mesure.

En effet, l'inversion multi-couche (ou de type Occam) des sondages et de la tomographie électrique et électromagnétique, est certainement la technique la plus adaptée à l'interprétation de situation géologiques comme ceux des aquifères de socle. Mais elle ne permet ni de placer des interfaces nettes (par définition), ni de déterminer des valeurs de résistivité vraie uniques. La notion de variation de la conductance avec la profondeur reste intéressante, mais il se trouve qu'aucune inflexion de cette courbe n'est réellement visible au passage entre les altérites et le socle fracturé. Sauf peut-être à introduire un très fort coefficient d'amplification. Cette notion de variation de la conductance avec la profondeur en revanche, a la capacité à séparer l'effet des argiles superficielles de celui des altérites et des arènes. Ceci a son importance pour la comparaison entre les différents sondages et ce qui est bien supérieur à la notion de conductance totale souvent proposée.

Théoriquement, on pourrait imaginer que la mise en oeuvre conjointe et l'inversion conjointe d'un sondage à courant continu et d'un sondage électromagnétique temporel puisse valider l'existence d'un milieu anisotrope horizontal, donc des circulations horizontales de fluide. C'est un test qui mérite d'être tenté dans des conditions très favorables, c'est-à-dire à des profondeurs relativement faibles et dans un environnement non bruité.

Le sondage RMP qui est sensible à la fois et de manière relativement indépendante à la teneur en eau, c'est-à-dire à porosité et à la taille des pores ou des conduits, c'est-à-dire à la

perméabilité, peut apporter des éléments relativement fiables sur la position des interfaces et sur les caractéristiques relatives des formations, sinon dans l'absolu, peut-être relativement pour déterminer les points les plus favorables dans une zone d'étude donnée. La différence de comportement entre P1K1 (la plate-forme 1) et KB0203 (plate-forme 2) est de ce point de vue significatif.

Seule parmi les méthodes géophysiques, la diagraphie électrique peut aider dans une certaine mesure, à confirmer la pertinence du modèle tri-couche. La similarité / dissimilarité des signatures électriques et les corrélations spatiales éventuelles entre forages plus ou moins proches sont des arguments qui permettent de privilégier l'existence de fractures horizontales dans la partie fissurée du substratum.

Les éléments nouveaux apportés aux hydrogéologues par nos travaux sont les suivants :

- L'existence de corps intrusifs ou de contacts entre des unités de socle de nature différente;
- La géométrie 3D relativement détaillée des deux aquifères de Kombissiri
- L'image « particulière » de l'aquifère de Kombissiri 2, qui semble montrer des variations latérales importantes dans la qualité des altérites et notamment un « cœur » très conducteur
- La topographie chahutée du socle sur la plate-forme 1 de Kombissiri.
- Les diagraphies dans chacun des forages, sur chacun des sites.
- Les diagraphies entre les forages proches sur les deux sites de Kombissiri
- La mise en évidence de connections horizontales dans la partie fissurée, qui sont responsables de l'augmentation de la productivité instantanée (débit spécifique).

CONCLUSIONS

Ce travail s'adresse à la fois à l'hydrogéologue et au géophysicien. Dans quelle mesure a-t-on répondu à leur attente et quels éléments nouveaux leur a-t-on apportés ?

Avant de répondre à ces deux séries de questions, on peut dire que la quantité de données nouvelles acquises au cours de ces travaux à Kombissiri et à Sanon est en soi une contribution importante à l'amélioration des connaissances et à une meilleure exploitation des aquifères de socle de l'Afrique, sous les basses latitudes, en climat soudano-sahélien.

1 – L'hydrogéologue se pose au moins trois questions sur les aquifères de socle :

Ces questions, de la plus générale à la plus particulière, sont les suivantes :

- comment fonctionnent ces aquifères, leur structure est-elle conforme au modèle-type ?
- quelles en sont les réserves ?
- comment implanter au mieux les forages d'exploitation ?

Les réponses fournies pour les deux plates-formes de Kombissiri et pour le site de Sanon sont les suivantes :

1.1- Le modèle d'aquifère :

1. a – La plate-forme de Kombissiri 2 : Elle a été étudiée avec le maximum de détails. Les résultats obtenus sont en bonne cohérence avec le modèle classique proposé aujourd'hui, à deux titres :

- L'importance de la tectonique (et de la fracturation) et l'existence d'accidents profonds mis en évidence par la présence de drains sub-verticaux et probablement de croisements d'accidents. En effet, un large fossé de direction NW-SE de plus de 200 m de large et de 600 m de longueur au minimum est cartographié à la fois par les méthodes électromagnétiques et par les panneaux exceptionnellement longs et nombreux. Le long des profils transversaux, le socle apparaît formé de blocs d'altitudes différentes, séparés par des accidents et deux drains sont mis en évidence. La carte magnétique permet de cartographier clairement un corps magnétique qui borde le fossé ; d'autres éléments magnétiques semblent s'aligner suivant une direction approximativement perpendiculaire.

- La mise en évidence par la géophysique des différents compartiments du sous-sol à permis de corroborer la structure et les caractéristiques du nouveau modèle des aquifères de socle. Le réservoir d'altérites qui contient les volumes d'eau les plus importants.

La partie fissurée et fracturée qui suggère des circulations horizontales de fluides. En effet, Les diagraphies électriques réalisées dans les deux forages proches montrent des venues d'eau importantes dans la partie supérieure du socle qui semblent pouvoir être corrélées de manière quasi-horizontale.

Le substratum résistant, profond, et peu transmissif.

Selon les sondages RMP, la base des altérites et la partie supérieure de la couche intermédiaire présenteraient des perméabilités du même ordre de grandeur.

En revanche, trois résultats sont relativement paradoxaux :

- L'extension relativement limitée dans la direction NE-SW, du fossé. L'absence de cartographie complète de la structure ne facilite pas la compréhension du fonctionnement de l'aquifère à l'échelle des bassins versants. En effet, les limites apparentes au Nord et au Sud n'ont pas été caractérisées en détail, alors que la structure pourrait jouer un rôle majeur en hydrogéologie à une échelle plus grande.

- La nature particulièrement argileuse des altérites à moyenne profondeur. En surface, ces altérites affleurent dans la partie centrale de la zone la plus intéressante de l'aquifère sur le site de Kombissiri 2 et une variation notable de la qualité des ces altérites latéralement.

- La qualité très modeste des forages implantés dans la zone considérée comme la plus favorable de cet aquifère « modèle », aussi bien du point de vue de la teneur en eau que de la transmissivité, comme cela est démontré par le sondage RMP et les essais de pompage.

1.b – La plate-forme de Kombissiri 1 est elle aussi en bon accord avec le modèle classique :

- L'existence d'accidents de direction E-W, NW-SE et peut-être N-S est mis en évidence par les cartes magnétiques et électromagnétiques. L'existence de drains verticaux est moins sûre et moins nette, mais les panneaux Pôle-dipôle et les profils électromagnétiques ne couvrent qu'une faible partie de la zone intéressante vers le Sud-Est.

- Les diagraphies dans les deux forages proches au Sud-Est sont compatibles avec des circulations horizontales dans la partie supérieure du socle. Mais, comme à Kombissiri 2, la partie inférieure des altérites semble montrer des perméabilités du même ordre, voire supérieure à la couche intermédiaire.

La zone la plus favorable de cette plate-forme est située au sud-est, ce qui est compatible avec la fermeture du fossé au nord-est et avec l'existence du forage non productif à proximité de cette fermeture. Cette zone favorable coïncide encore avec celle où affleurent des altérites très argileuses. Un corridor incurvé légèrement à l'ouest des forages productifs actuels a été cartographié ; il semble se poursuivre vers un exutoire de surface constitué par le barrage à l'est de la plate-forme 1. Cette structure semble être une zone de drainage importante et pourrait donc être bien alimentée.

Sur cette plate-forme également, pour les forages implantés, l'épaisseur du réservoir et la qualité de l'aquifère sont modestes.

1.c – Le site de Sanon, où moins de données nouvelles ont été acquises.

L'existence de zones de contacts entre des unités géologiques de socle de nature différente, de blocs d'altitudes différentes et d'accidents tectoniques a été dans une certaine mesure prouvée par les forages (cf topographie du socle) et par l'émanométrie radon (BRGM, 1988) ; on peut supposer que ces éléments auraient pu être confirmés par les nouvelles techniques géophysiques.

Deux résultats intéressants du point de vue du modèle sont les suivants : 🧭

- une grande homogénéité apparente des altérites, assurée sur l'un des profils et vraisemblable sur les autres, tous centrés sur la zone centrale du dôme, il est vrai ;
- dans ce cas particulier, et à la différence de Kombissiri, les argiles très conductrices n'affleurent pas dans la zone, où le forage le plus intéressant a été implanté sur une cuirasse latéritique.

1.2 - L'existence et le calcul des réserves :

L'extension latérale de la zone la plus intéressante a été bien délimitée à Kombissiri 2. Elle l'est seulement au Nord et à l'Ouest à Kombissiri 1, parce que la carte électromagnétique Slingram et les panneaux n'ont pas été étendus suffisamment vers le sud-est. Aucune limite n'est cartographiée à Sanon, faute de couverture suffisante ; de plus la carte tracée à partir des SE réalisés lors des études précédentes, ne semble pas pouvoir répondre à cette question, du fait des hétérogéneïtés superficielles (lambeaux de cuirasses) et de la faible densité spatiale des mesures.

L'épaisseur des altérites n'est définie qu'avec une précision limitée, en raison des problèmes d'équivalence par les SE et par les panneaux ; elle est en général sous-estimée ; en revanche, l'estimation peut devenir plus précise lorsque les méthodes électriques sont combinées au sondage RMP. Il en est de même pour la détermination du niveau statique : le sondage RMP est bien supérieur aux méthodes électriques pour cet objectif. Celles-ci en revanche, permettent d'extrapoler les informations ponctuelles fournies par le sondage RMP, à toute la zone qu'elles couvrent.

Il est important également de noter que les méthodes électriques seules, si elles ne permettent pas de déterminer avec précision l'épaisseur des altérites, permettent de comparer les sites entre eux : Sanon apparaît clairement à partir des méthodes électriques seules, comme le site où les altérites sont d'épaisseur maximale.

La teneur en eau, la porosité efficace, le coefficient d'emmagasinement, éléments-clés du calcul des réserves, sont bien approchées à partir des sondages RMP, avec des incertitudes importantes il est vrai, mais celles-ci sont du même ordre de grandeur que celles relatives aux essais de pompage. On a pu estimer l'ordre de grandeur des réserves de chaque site à partir des sondages RMP. La comparaison entre les sites différents conduit à des résultats fiables eux aussi : Sanon apparaît bien supérieur à Kombissiri du point de vue des réserves. En revanche, l'étude de leurs variations au sein d'une même zone n'a pu être testée qu'une seule fois, à Sanon, faute de temps ; elle s'avère fiable à Sanon.

1.3 - L'implantation optimale des forages :

Bien qu'on ne puisse pas tirer de conclusions définitives à partir de cette étude limitée, nous proposons d'intégrer systématiquement les trois techniques nouvelles, sous certaines conditions, dans la méthodologie d'implantation des forages à gros débits. Une méthodologie-type est proposée dans le chapitre 5. Certes, le coût et la durée de cette phase d'investigation en seront augmentés, mais le taux de succès devrait l'être également. Ceci devrait faciliter son adoption du point de vue du calcul économique.

L'une des conclusions importantes de cette étude, est l'intérêt de l'intégration des résultats des différentes méthodes géophysiques et du dialogue entre le géophysicien, le géologue et l'hydrogéologue. (On suppose que l'intégration de la prospection radon (cf Ricolvi et al –BRGM–, 1989) serait également souhaitable, mais ce point n'a pas été étudié dans ce travail). Il nous semble que le temps passé à l'interprétation et à l'intégration des données en vue du choix des zones d'études détaillées, puis de l'implantation finale doit être allongé par rapport aux pratiques classiques. S'il est impossible, pour des raisons économiques et pratiques, que les différentes spécialistes se rencontrent pour synthétiser les résultats, un carnet-type de suivi des différentes opérations pourrait être proposé comme partie intégrante de la méthodologie d'implantation, pour être transmis d'un atelier au suivant.

L'implantation précise d'un forage à partir des seuls panneaux électriques reste encore un problème à résoudre. Faut-il par exemple placer le point sur l'éponte d'une fracture verticale détectée sur le panneau ou bien en son centre ? Il est évident que les autres critères (nature des terrains, etc) interviennent beaucoup à ce stade. Cette incertitude reste vraie d'ailleurs par rapport à un accident géologique reconnu sur le terrain.

Ne serait-il pas judicieux d'effectuer des forages de reconnaissance inclinés expéditifs de type minier pour déterminer la géométrie et les caractéristiques hydrogéologiques in situ des formations, avant d'entreprendre des forages d'exploitation verticaux ?

2 – Le géophysicien se pose au moins deux types de questions :

- Quelles méthodes mettre en œuvre sur le terrain ?
- Quels programmes et quels paramètres pour l'application et l'interprétation de chacune d'elles ?

2.1 – Les méthodes :

Nous proposons l'étude systématique des résultats des levés de géophysique aéroportée lorsqu'ils existent, magnétisme, électromagnétisme et radiométrie, au stade de la bibliographie et de la reconnaissance. Des travaux méthodologiques sont actuellement en cours, qui devraient confirmer cet intérêt et développer des outils nouveaux (BRGM, 2004).

Le coût d'un levé aéromagnétique à faible altitude de vol est tel aujourd'hui d'ailleurs, que l'on pourrait se poser la question de l'intérêt de levés spécifiques pour des reconnaissances hydrogéologiques à caractère régional.

Un levé magnétique au sol systématique dans la zone retenue après la phase de reconnaissance est proposé. Rapidement et à coût modique, une information à haute résolution peut être obtenue ; liée à la tectonique, aux variations de nature et à la topographie du socle et aux zones de contact. Les nouveaux outils d'imagerie et d'inversion permettent à cette méthode d'être utilisée de manière beaucoup plus efficace, qu'autrefois. Ce levé sera également important pour une mise en œuvre ultérieure du sondage RMP.

L'électromagnétisme fréquentiel reste l'outil de reconnaissance le plus efficace pour la reconnaissance des anomalies conductrices à grande et à courte longueur d'onde spatiale. Ceci est valable pour les zones de socle, avec des terrains très résistants.

La première carte avec la profondeur maximale souhaitée (HCP 40 m), mais avec une grande densité de stations (espacement de 10 m le long d'un profil ; les profils sont distants de 50 m) est établie avec un dispositif HCP en dépit des difficultés d'interprétation, du fait de sa grande profondeur d'investigation et de sa sensibilité aux contacts verticaux. Quelques profils complémentaires VCP 40 et HCP 10 pourront être ajoutés, pour lever les ambiguïtés et notamment vérifier le caractère superficiel ou profond des anomalies.

Cette technique permet la localisation des zones à étudier en détail ultérieurement. Elle doit permettre également de définir l'extension spatiale des zones à prendre en compte pour le calcul des réserves et pour la modélisation hydrologique.

Elle permet aussi de cartographier en détail les drains verticaux, mais le panneau électrique restera nécessaire pour celui qui veut obtenir l'image la plus détaillée souhaitée par l'hydrogéologue. Le choix entre un profil électromagnétique multi-paramètre et le panneau électrique pour les profils que l'on souhaite étudier avec détails se fera en fonction des critères de façilité de mise en œuvre, de flexibilité et de calcul économique.

Le sondage électrique isolé ne joue pas un rôle essentiel, dans l'étude détaillée, car l'information fournie est trop ponctuelle. Il peut permettre en revanche de définir avec confiance, les dimensions des dispositifs à mettre en œuvre dans le panneau électrique, puis ensuite, de tester la robustesse des interprétations des panneaux. L'inversion multi-couche des sondages électriques est toujours conseillée.

Pour conclure, la tomographie électrique, reste la technique qui permet de fournir l'image la plus détaillée 2D et/ou 3D des zones d'implantation potentielle des forages.

Le sondage RMP est indispensable dans une zone vierge, dès que son coût est inférieur à un forage de reconnaissance suivi des essais de pompage. Il est nécessaire pour la cartographie extensive d'aquifères et vraisemblablement pour une modélisation hydrogéologique fine.

Les diagraphies électriques enfin, permettent de localiser les fractures le long des parois de forages. Elles permettent de mieux positionner les crépines pour l'équipement optimal des forages. Elles permettent de caractériser ponctuellement en profondeur, un aquifère. Cette technique géophysique en forage est peu utilisée en hydrogéologie de socle. Sa généralisation, grâce à son faible coût (diagraphies expéditives), contribuera efficacement à une meilleure connaissance des aquifères au fur et à mesure de la succession des études.

2.2 – Le choix des paramètres d'acquisition de traitement et d'interprétation pour chacune des méthodes :

Les conclusions obtenues et les recommandations pour chacune des trois méthodes sont présentées tout au long du mémoire et résumées dans le chapitre 5.

3 Quelles perspectives ?

Toute étude d'implantation, puis de prévisions d'exploitation doit être confrontée à la réalité, au fur et à mesure de ladite exploitation. C'est la seule façon de faire progresser la méthodologie et de développer les nouveaux outils.

Le suivi de l'exploitation et la confrontation avec les prévisions, sont donc des étapes indispensables pour l'étude des trois sites expérimentaux et dans toute étude hydrogéologique du même type.

L'étude de trois sites à proximité de Ouagadougou est insuffisante pour fonder une nouvelle méthodologie. Il est recommandé de poursuivre des études de ce type dans d'autres environnements.

Les sondages RMP ont été mis en oeuvre pour la première fois au Burkina Faso en contexte géologique de socle. L'influence du « bruit » sur les mesures RMP peut être très perturbatrice pour l'acquisition, surtout compte tenu de la faiblesse des signaux mesurés.

Nous proposons donc l'établissement de stations fixes de mesure de bruit électromagnétique au Burkina Faso, par exemple, à l'échelle d'une ou plusieurs années, dans le cadre d'observatoires géophysiques. La compréhension de ces phénomènes de variabilité du bruit permettrait d'effectuer des mesures fiables et d'améliorer le rendement en connaissant de façon plus précise les périodes de mesures des sondages RMP possibles et/ou optimum. Cela permettrait de faire des sondages RMP des outils puissants de cartographie extensive des aquifères en zone de socle au Burkina.

La réalisation de sondages RMP en profils semble une voie d'investigation pour comprendre le fonctionnement des aquifères. Ces deux profils étant situés, l'un perpendiculairement à une fracture détectée et l'autre le long de la fracture, dans le sens d'écoulement de l'eau de surface vers l'exutoire. Couplée à des mesures de panneaux électriques pour préciser la géométrie de l'aquifère, de diagraphies et des pompages d'essai. L'interprétation 2D des sondages RMP se développe en Europe de l'Ouest en particulier (Warsa et Yaramanci, 2003) et cela fait de la RMP une technique porteuse d'espoir pour une approche plus précise du contenu en eau du sous-sol.

L'intégration des résultats de toutes les mesures géophysiques, et le dialogue et la concertation avec les géologues, les hydrogéologues et les foreurs, pourraient permettre de mieux comprendre les aquifères de socle et leur fonctionnement et d'augmenter le taux de succès des forages implantés.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACWORTH, R. I., 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Quaterly Journal of Engineering Geology*, **20**, p. 265 – 272.

ALBOUY, Y., ANDRIEUX, P., RAKOTONDRASOA, G., RITZ M., DESCLOITRES, M., JOIN, J.L., RASOLOMANANA, E., 2001. Mapping coastal aquifers by joint inversion of DC and TEM soundings. – Three case histories. *Ground water*, **39** (1), p. 87-97.

ANDERSON, W. L., 1979. Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*, **44**, p. 1287-1305.

ANDERSON, W. L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modelling. *Geophysics*, 54, p. 263-266.

BARKER, R. D., 1992. A simple algorithm for electrical imaging of the sub-surface. *First break*, 10, p. 53 - 62.

BOBATCHEV, A., 1999 - 2003. X2IPI, version 4.3, 2003.

BOSCH, F.P., SZALAI, S., TURBERG, P. and MULLER, I., 1999. Continuously recording radio-frequency electromagnetic (RF-EM) method (15-300 kHz) without ground contact: A powerful tool for groundwater vulnerability mapping in fissured rocks. - *Proceed. of the 5th meeting of the EEGS*, Budapest 6 - 9 September 1999, Hungary, Environmental and Engineering Geophysical Society European section, p. Em4.

BOSCH, F. and M. GURK, 2000. Comparison of RF-EM, RMT and SP measurements on a karstic terrain in the Jura mountains (Switzerland). In A. Hoerdt, J. Stoll (eds) : Protokoll über das Kolloquium : Elektromagnetische Tiefenforschung, in Altenberg/ Bergisches Land vom 20-24, April 2000, Deutsche Geophysikalische Gesellschaft 18, p. 51-59.

BRGM/Aquater, 1986. La recharge naturelle des aquifères de sous climats Sahélien et Soudanien. *BRGM/Aquater*, 86 BFA 177 eau, 157 p.

BRGM/Aquater, 1988. La recharge naturelle des aquifères exploités dans le socle cristallin (phase II). *BRGM/Aquater*. 88 BFA 182 3E, 17 p et les Annexes.

BRGM/Aquater, 1991. Exploitation des eaux souterraines en socle cristallin et valorisation agricole – Pilote expérimental en milieu rural pour les zones soudano-sahéliennes et sahéliennes. *BRGM/Aquater*, R 33 576, Annexe II, 53p et les Annexes.

BRGM/Aquater, 1992. Document-guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débit en zone de socle cristallin. *BRGM/Aquater*, R.3591 4S/ EAU, 69p et les Annexes.

CAGNIARD, L., 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, **18**, p 605-635.

C. CASTAING, M. BILLA, J.P. MILESI, D. THIEBLEMONT, J. LE METOUR, E. EGAL, M. DONZEAU et C. GUEROT, A. COCHERIE, P. CHEVREMONT, M. TEGYEY, Y. YTARD, B. ZIDA, I. OUEDRAOGO, S. KOTE, B. E. KABORE, C. OUEDRAOGO, J.C. KI, C. ZUNINO, 2003. Notice explicative de la carte géologique et minière à 1/1.000.00 du Burkina Faso.

C. CASTAING, M. BILLA, J.P. MILESI, D. TGHIEBLEMONT, J. LE METOUR, E. EGAL, M. DONZEAU et C. GUEROT, A. COCHERIE, P. CHEVREMONT, M. TEGYEYEY, Y. YTARD, B. ZIDA, I. OUEDRAOGO, S. KOTE, B. E. KABORE, C. OUEDRAOGO, J.C. KI, C. ZUNINO, 2003. Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1.000.00.

CEFIGRE-Université d'Avignon, 1990. Synthèse des connaissances sur l'hydrogéologie de l'Afrique de l'Ouest - socle cristallin et cristallophyllien - sédimentaire ancien. *Ministère de la Coopération et du développement*, 147 p.

CHAPELLIER D., (1987): Diagraphies appliquées à l'hydrologie. Technique et Documentation (Lavoisier), 176 p.

CIEH, 1979. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'ouest. *Géohydraulique*, série hydrologie, **2**, 193 p.

CIEH, 1984. Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifères discontinus. *Rapport BURGEAP R. 543/E. 1219*, Paris. 164 p.

COMPAORE, G., 1997. Evaluation de la fonction capacitive des altérites. *Thèse de doctorat*, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 178 p.

DANIELSEN, JE., AUKEN, E., JORGENSEN, F., SONDERGAARD, V. and SORENSEN, KI., 2003. The application of the transient, electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *Journal of Applied Geophysics*, **53** (4), p. 181-198.

DAVIS, S. N, and TURK, L. J, 1984. Optimum depth of wells in crystalline rocks. *Ground* water, **2** (2), p. 6 - 11.

DESCLOITRES, M., 1998. Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : applications à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap vert) et du piton de la Fournaise (La Réunion). *Thèse de doctorat*, Université Paris 6, 238 p.

DEY A. and MORRISSON H. F., 1979a. Resistivity modelling for arbitrary shaped twodimensional structures. *Geophysical prospecting*, **27**, p. 1020-1036.

DETAY M., POYET P., EMSELLEM Y., BERNARDI A., AUBRAC G., 1989. Influence du développement du réservoir capacitif d'altérites et de son état de saturation sur les caractéristiques hydrodynamiques des forages. *C.R. Acad. Sciences Paris*, **309**, série II, p. 429-436.

DETAY, M., 1997. La gestion active des aquifères. Dunod, Paris, 440 p.

DILUCA, C., MULLER W., 1981. Evaluation hydrogéologique des projets d'hydraulique en terrains cristallins du bouclier Ouest-Africain. Coopération technique projet n°82.20.60.0.

DROUART E., VOUILLAMOZ J- M., 1999. Alimentation en eau potable des populations menacées. Hermann (France), 556 p.

DUCELLIER, J., 1963. Contribution à l'étude des formations cristallines et métamorphiques du centre et du nord de la Haute Volta. *Mémoire BRGM*, Fr., n°10, 320 p.

FORKASIEWICZ J., 1972. Interprétation des données de pompage d'essai pour l'évaluation des paramètres de l'aquifère. BRGM, Orléans, 50 p.

GORBACHEV Y.I., 1995 : Well Logging, Fundamentals of Methods, John Wiley & Sons, p. 39-52.

GUILLEMOT, D., 1988. Le lever aérogéophysique du socle Gabonais. Chronique de la recherche minière. Centre d'Etudes Géologiques et Minières, Orléans, BRGM, Paris. p. 13-24.

HOHMANN, G. W, 1975. Three-dimensional inducted polarization and electromagnetic modelling. *Geophysics*, **40**, p. 309-324.

HOTTIN et OUEDRAOGO, 1975. Notice de la carte géologique du Burkina Faso. 1/1.000.000^e. Edition BRGM.

KAUFMAN, A. A., 1992. Geophysical field theory and method ; Part A. Gravitational, electric and magnetic field. *Academic press*. 577 p.

KAUFMAN and KELLER, 1995. Frequency and transient soundings. *Methods in geochemistry and geophysics*, 16, Elsevier, p.

KAUFMAN A. A., and HOEKSTRA, P. 2001. Electromagnetics soundings. *Methods in geochemistry and Geophysics*, **34**, Elsevier, 534 p.

KENYON, W. E., 1997. Petrophysical principles of applications of NMR Logging. The Log analyst March - April : p. 21-43.

LACHASSAGNE, P., RAMPNOUX, N., 1998. Coupling radon emanometry and geophysics for high flowrate borehole implementation in hardrock aquifers under humid tropical climate. Münchner Geol. Hefte.

LACHASSAGNE, P., GOLAZ, C., THIERY, D., AHMED, S., MARECHAL, J.C., TOUCHARD, F., WYNS, R., 2001. A methodology for the mathematical modelling of hard-rock aquifers at catchment scale, based on the geological structure and the hydrogeological functioning of the aquifer. In Seiler and Wohnlich (eds), new approaches characterizing groundwater flow, vol 1, p. 367-370.

LACHASSAGNE, P., BERARD, P., BRUEL.T., CHERY, L., COUTAND T., DESPRATS, J.F., Le STRAPS, P, WYNS, R. ,2001. Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers. Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Ground Water*, **39** (4), p. 568-581.

LACHASSAGNE, P., WYNS, R., 2002. Structure et fonctionnement des aquifères de socle : résultats récents acquis en margeride (Lozère), in Eau souterraine, *Agence de l'Eau Adour-Garonne*, p. 24-26.

LARSSON, I., 1984. Ground Water in hard rocks. Studies and reports in hydrology, project 8.6, International Hydrological Programme, UNESCO, 228 p.

LLOYD, J. W., 1999. Water Resources of hard rocks aquifers in arid and semi-arid zones. Studies and reports in hydrogeology N° 58, UNESCO, Paris, 284 p.

LEGCHENKO, A., and VALLA P., 2002. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, p. 3-19.

LEGCHENKO, A., BALTASSAT, J-M, BEAUCE, A., and BERNARD, J., 2002. - Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists, *Journal of Applied Geophysics*, **50**, p. 21-46.

LEGCHENKO, A. et VALLA, P., 2002d. A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements, *Journal of Applied Geophysics*, **50** (1-2), p. 3-19.

LEGCHENKO, A., BALTASSAT, J-M., BOBACHEV, A., MARTIN, C., ROBAIN, H., and VOUILLAMOZ, J-M., 2004. Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *Journal of Ground Water*, **42** (3), p. 363-373.

LOKE, M. H. and BARKER, R. D., 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, p. 1682-1690.

LOKE, M. H.and BARKER, R.D., 1996 a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, p. 131-152.

LOKE, M. H. and BARKER, R. D., 1996 b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, **44**, p. 499-523.

LOKE, M. H., 1995 - 2002. Res2Dmod, version 3.01.

LOKE, 1996 - 2003. Res2Dinv, version 3.51i.

MC NEILL, J. D., 1980a. Electrical conductivity of soils and rocks. Geonics limited.

MC NEILL, J. D., 1980b. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics limited, TN-6, 15 p.

MARQUARDT, D., 1963. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**, p. 431-441.

MARSILY, G. de, 1986. Quantitative hydrogeology. Academic press.

MATHIEZ, J-P. et HUOT, G, 1966. Prospection géophysique et recherche d'eau souterraine. Exemple d'applications en Afrique occidentale.

MORIN, J-P., 1992. Le radon traceur du transport des fluides dans le sol : simulation, modélisation et applications géophysiques. *Thèse de doctorat*, Université Clermont-Ferrand, 265 p.

NAKOLENDOUSSE S., 1991. Méthodes d'évaluation de la productivité des sites aquifères au Burkina Faso. Géologie–Géophysique–Télédétection. *Thèse de l'U.J.F.*, Grenoble, 256 p.

OLDENBURG, D. W. and Li, Y., 1999. Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys. *Geophysics*, **64**, p. 403-416.

ONEA/DANIDA, 1997. Etude géophysique autour du barrage de Goinré, Ouahigouya. Rapport provisoire ONEA/DANIDA. Rapport d'implantation de puits.

PALACKY, G. J., RITSEMA, I. L. and DE JONG, S. J., 1981, Electromagnetic prospecting for groundwater in pre-Cambrian terrains in the republic of Upper Volta: Geophys. Prosp., Eur. *Assn. Geosci. Eng.*, **29**, p. 932-955.

PARASNIS, D. S., 1997. Principles of applied geophysics. 4th ed. Chapmann et hall, 402 p.

PETROS EIKON Inc, 2000. The world's leading electromagnetic interpretation platform. V6.2-V7.5. PetRos Eikon Inc.

P.N.U.E., 2003. Our planet Magazine.

DE GROOT-HEDLIN, C. and CONSTABLE, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, p. 1613-1624.

RICOLVI M., 1992. Document-guide pour l'implantation et la mise en exploitation des forages à gros débits en zone de socle cristallin. Document BRGM R3591 4s /eau.

RITZ, M., ROBAIN, H, PERVAGO, E., ALBOUY, Y., DESCLOITRES, M., MARIKO, A., 1999. Improvement to resistivity pseudo-sections modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects : application to a soil system in south Cameroon. *Geophysical Prospecting*, **47**, p. 85-101.

REYNOLDS, J.M, 1997. Zero-phasing seismic data without wells in offshore West Africa. Reducing incertainty and variability of the wavelet. Geophysics, SEG, Tulsa

SASAKI, Y., 1992, Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, **40**, p. 453-464.

SAVADOGO A. N., 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute Volta. Etude du bassin versant de la Sissili. *Thèse de l'U.S.M*, Grenoble.

SAVADOGO A. N., 1979. La géophysique appliquée à la recherche d'eau dans les formations cristallines en Haute Volta. Bulletin de liaison du CIEH.

SCHERY, S. D., GAEDDERT, D. H. and WILKENING, M. H., 1982. Measurements of the effect of cyclic of atmospheric pressure variation. *Geophysical Research Letters*, **9**, p. 835-838.

SEEVERS, D. O., 1966. A nuclear magnetic method for determining the permeability of sandstone. Annual logging Symposium Transactions.

SEIDEL, J.L., MONNIN, M., BONEVILLE, A. DELORME, H. LENAT, J.F, and SEGOVIA, N., 1988. Radon in soil measurements related to the activity of piton de la fournaise volcano. *Nucl. Tracks radit. Meas*, **15**, p. 567-570.

SEMENOV, A. G., SCHIROV, M. D., LEGCHENKO, A. V., 1987. On the technology of subterranean water exploration founded on application of nuclear magnetic resonance tomography Hydroscope IXth Ampere summer school, Abstracts, Novosibirsk, September 20-26, p. 214.

SZALAI, S., SZARKA, L., PRACSER, E., BOSCH, F., MULLER, I. and TURBERG, P., 2002 : Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null-arrays. *Geophysics*, **67**, p. 1769-1778.

TAYLOR AND HOWARD, 2000. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology cod deeply weathread crystalline rock : evidence from Uganda. *Hydrogeology journal*, **8** (3), p. 279–294.

TOUCHARD F., 1998. Caractérisation hydrogéologique d'un aquifère en socle fracturé : site de Ploëmeur (Morbihan). *Mémoires de géosciences*, Rennes.

TURBERG, P., 1993. Apport de la cartographie radiomagnetotellurique à l'hydrogéologie des milieux fractures. *Thèse de Doctorat*, Université de Neuchâtel, 132 p.

TURBERG, P., MUELLER, I. AND FLURY, F., 19943. Hydrological investigation of porous environments by radio magnetotellurique-resistivity (RMT-R 12-240 kHz). *Journal of Applied Geophysics*, **31**, p. 133-143.

VALLA P., and LEGCHENKO A., 2002 - One-dimensional modelling for proton magnetic resonance sounding measurements over an electrically conductive medium. *Journal of Applied Geophysics*, **50**, p. 217-229.

VAN VOORHIS, G. D. NELSON, P. H. and DRAKE, T. L., 1973. Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization. *Geophysics*, **38**, p. 49-60.

VARIAN, R. H., 1962. Ground liquid prospecting method and apparantus, US Patent 3019383.

VOUILLAMOZ, J-M, DESCLOITRES M., BERNARD J., FOURCASSIER P., ROMAGNY L., 2002. Application of integrated magnetic resonance sounding and resistivity method for borehole implementation. A case study in Cambodia. *Journal of Applied Geophysics*, **50** (1-2), p. 67-81.

VOUILLAMOZ, J-M., 2003. La caractérisation des aquifères par une méthode non invasive: les sondages par résonance magnétique protonique. *Thèse doctorat*, Université Paris 11, 309 p.

WEICHMAN, P.B., LAVELY, E.M., RITZWOLLER, M.H., 2000. "Theory of surface nuclear magnetic resonance with applications to geophysical imaging problems". *Phys. Rev. E* 62, p. 1290-1312.

WRIGHT, E. P., BURGESS W. G., 1992. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. *Geological Society Special Publication*, **66**, 257 p.

WYNN, J. C. and ZONGE, K. L., 1975. Electromagnetic coupling, its intrinsic value, its removal, and the cultural coupling problem. *Geophysics*, p. 831-850.

WYNS, R., GOURRY J.C., BALTASSAT .J.M., LEBERT, F. 1999. Caractérisation, multiparamètres des horizons de subsurface (0-100m) en contexte de socle altéré, in GEOFCAN 1997 - *Colloque géophysique des sols et des formations superficelles* -1er - Orstom - Bondy -France -11-12/09/1997, Actes du colloque, p. 139-142.

WYNS, R. 2001. Recent advances in Geology of Weathered Basement Rocks; Implications for Hydrogeology., in National Geophysical Research Institute - Hyderabad – Inde.

ZERBO, L., 2004. Publication interne

ZONGE, K. L. and WYNN, J.C., 1975. Recent advances and applications in complex resistivity measurements. *Geophysics*, p. 851-864.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Carte géologique du degré de Ouagadougou (Casting et al, 2003) Figure 1.2 : Situation géographique générale des sites de Sanon et de Kombissiri Figure 1.3 : Synthèse géologique de la région de Kombissiri Figure 1.4 : Evolution de la pluviométrie à Kombissiri (1960 - 2001) Figure 1.5 : Evolution piézométrique dans quatre forages du site de Kombissiri Figure 1.6 : Carte géologique simplifiée de Sanon (modifiée, d'après Compaoré, 1997) **Figure 1.7 :** Evolution pluviométrique à Sanon (2001 – 2002) Figure 1.8 : Niveaux piézométriques mesurés à Sanon en novembre 2002. Figure 1.9 : Dispositif de mesure des sondes «normales» (d'après Chapellier, 1987) Figure 3.1.1 : Modèle initial d'aquifère de socle Figure 3.1.2 : Modèle d'aquifère de socle Figure 3.1.3 : Schéma des modèles ponctuels aux points 80, 256 et 352 m Figure 3.1.4 : Résultats de la modélisation directe Figure 3.1.5 a (Avec drains) : Résultats de la modélisation directe multi-dispositifs Figure 3.1.5 b (sans drains) : Résultats de la modélisation directe multi-dispositifs Figure 3.1.6 : Résultats d'inversion multi-dipositifs du modèle 1B Figure 3.1.7 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 2B Figure 3.1.8 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 1A Figure 3.1.9 : Résultats d'inversion multi-dispositifs du modèle 2A Figure 3.1.10 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 80 mètres Figure 3.1.11 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 192 mètres Figure 3.1.12 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 256 mètres Figure 3.1.13 : Sondage extrait du modèle, à l'aplomb du point X = 288 mètres Figure 3.2.1 : Principe des méthodes Slingram à faibles nombres d'induction Figure 3.2.2 : Résultats de la modélisation de l'influence quantitative de la hauteur de mesure Figure 3.2.3 : Réponse de modèle simple avec cuirasse (AC) et sans cuirasse (SC) Figure 3.2.4 : Réponse des modèles simples A1 et A2 Figure 3.2.5 : Réponses des modèles A4 et A5 Figure 3.2.6 : Réponse du modèle A4 en dispositif MaxMin Figure 3.2.7 : Réponses du modèle A5 en dispositif MaxMin Figure 3.2.8 : Réponse du modèle C3 Figure 3.2.9 : Réponse d'un modèle présentant des drains profonds **Figure 3.3.1** : Action de B_0 sur le moment magnétique μ Figure 3.3.2 : Signal RMP (d'après Vouillamoz, 2003) Figure 4.1.1 : Situation générale des travaux géophysiques à Sanon Figure 4.1.2 : Situation générale des travaux géophysiques à Kombissiri Figure 4.2.1 : Diagramme polaire des directions de fracturation à Kombissiri Figure 4.2.2 : Carte interprétative des linéaments de la région de Kombissiri Figure 4.2.3 : Carte du champ magnétique total (Kombissiri 2) Figure 4.2.4 : Carte du champ magnétique réduit au pôle (Kombissiri 2) Figure 4.2.5 : Inversion 2,5 D à l'aide de modèle du profil 1 (Kombissiri 2) Figure 4.2.6 : Inversion 3D sans contraintes (Kombissiri 2) Figure 4.2.7: Carte de reconnaissance EM-34 (HCP 40), Kombissiri 2 Figure 4.2.8 : Carte de reconnaissance MaxMin (HLEM 40 m), Kombissiri 2 Figure 4.2.9 : Localisation des points de forage sur le profil 1 (dispositif AMN)

Figure 4.2.10 : Forages de gros diamètre et équipement, de la plate-forme Kombissiri 2 Figure 4.2.11 : Distribution de la susceptibilité sur le profil 1 (à 5 m de profondeur) Figure 4.2.12 : Diagraphies : venues d'eau observées et fractures interprétées Figure 4.2.13 : Les deux sondages électriques Schlumberger à Kombissiri 2 Figure 4.2.14 : Interprétation multi-couche des 2 SE Schlumberger (Kombissiri 2) Figure 4.2.15 : Exemples de pseudo-coupes brutes Figure 4.2.16 : Exemple d'évolution d'une section avec le nombre d'itérations Figure 4.2.17 : Résultats d'inversion des dispositifs WB et AMN Figure 4.2.18 : Test du paramètre v/h sur le profil 1 Figure 4.2.19 : Sections inversées optimales du profil 1 **Figure 4.2.20 :** Inversion de dispositifs Wenner α et β du profil 1 (Kombissiri 2) Figure 4.2.21 : Inversion de dispositifs Pôle-dipôle du profil 1 (Kombissiri 2) Figure 4.2.22 : Coupe géologique établie à partir des log de forage du profil 1 (Kombissiri 2) Figure 4.2.23 : Pseudo-diagraphies extraites des panneaux au point P1K1 (Kombissiri 2) Figure 4.2.24 : Comparaison diagraphie et inversions de panneaux au point P1K1 Figure 4.2.25 : Comparaison diagraphie et inversions sur les forages à petit diamètre Figure 4.2.26 : Comparaison du SE P1K1 avec les sondages proches extraits de AMN Figure 4.2.27 : Représentation (A) et interprétation (B) des sondages extraits du Wenner a Figure 4.2.28 : Coupe inversée du profil 1 (Kombissiri 2), dispositif conjoint Wenner $\alpha+\beta$ Figure 4.2.29 : Inversion conjointe en dispositif Wenner Alpha + Bêta **Figure 4.2.30** : Inversions conjointes en dispositif Wenner $\alpha + \beta$, Figure 4.2.31 : Panneaux électriques multi-dispositifs du profil 6 (Kombissiri 2) Figure 4.2.32 : Carte des résistivités issues des panneaux Wenner Alpha (Kombissiri 2) Figure 4.2.33 : Carte des résistivités issues des panneaux (Kombissiri 2) Figure 4.2.34 : Représentation conventionnelle des conductivités apparentes sur le profil 1 Figure 4.2.35 : Représentation des conductivités apparentes sur le profil 1 Figure 4.2.36 : Représentation des conductivités apparentes sur les profils 2 et 3 Figure 4.2.37 : Représentation de sondages géométriques. Exemple des profils 1 Figure 4.2.38 : Résultats de l'inversion des profils 1, 2 et 3 (Kombissiri 2) Figure 4.2.39 : Données brutes du sondage RMP P1K1/P1K2 Figure 4.2.40 : Résultats d'inversion du sondage P1K1/P1K2 Figure 4.3.1 : Carte du champ magnétique total Figure 4.3.2 : Carte du champ magnétique réduit au pôle (Kombissiri 1) Figure 4.3.3 : Résultats de la modélisation 2,5 D d'un profil T1 (direction N-S) Figure 4.3.4 : Résultats de la modélisation 2,5 D d'un profil T2 (direction N-S) Figure 4.3.5 : « Inversion » à partir d'un modèle bi-couche Figure 4.3.6 : Carte de reconnaissance EM-34 (HCP 40) **Figure 4.3.7** : Cartes de reconnaissance MaxMin (HLEM 60 m – 3520 Hz) Figure 4.3.8 : Forages et équipement, plate-forme de Kombissiri 1 Figure 4.3.9 : Distribution de la susceptibilité magnétique dans le forage KB0203 Figure 4.3.10 : Diagraphies : venues d'eau observées et fractures interprétées Figure 4.3.11 : Les sondages électriques de Kombissiri 1 Figure 4.3.12 : Comparaison SE « KB0201 » et quelques sondages extraits du panneau Figure 4.3.13 : Comparaison entre les pseudo-diagraphies des profils 30, 31, 32 Figure 4.3.14 : Résultats de l'inversion des dispositifs du profil 30 (Kombissiri 1) Figure 4.3.15 : Résultats de l'inversion des panneaux 31et 32 (Kombissiri 1) **Figure 4.3.16 :** Panneaux Wenner $\alpha+\beta$ des profils 20, 21, 22 (Kombissiri 1) Figure 4.3.17 : Carte multi-profondeurs des résistivités issues des panneaux Wenner a Figure 4.3.18 : Carte multi-profondeurs des résistivités issues des panneaux Wenner a

Figure 4.3.19 : Représentation des données brutes des profils 30 et 32 Figure 4.3.20 : Résultats d'inversion 1D des 3 profils 31, 30 et 32 (Kombissiri 1) Figure 4.3.21 : Représentation des données brutes sur les profils 20 et 22 Figure 4.3.23 : Résultats de l'inversion 1D des profils 21, 20, 22 Figure 4.3.24 : Données brutes du sondage RMP KB0203/KB0204 Figure 4.2.25 : Résultats des inversions du sondage RMP KB0203/KB0204 Figure 4.4.1 : Localisation des ouvrages existants et travaux géophysiques réalisés à Sanon Figure 4.4.2 : Carte de résistivités apparentes à partir de SE Figure 4.4.3 : Coupes lithologiques des forages S1 et S8 à Sanon Figure 4.4.4 : Coupes géologiques simplifiées: N - S et E – W (d'après Compaoré, 1997) Figure 4.4.5 : Esquisse de la topographie du toit du socle sain à Sanon (à partir des forages) Figure 4.4.6 : Sondages électriques de Sanon : A : données ; B : interprétations / Figure 4.4.7 : Conductances cumulées des SE à Sanon Figure 4.4.8 : Evolution des résultats de l'inversion au cours du processus itératif Figure 4.4.9 : Résultats des inversions des panneaux Wenner α , sur le site de Sanon Figure 4.4.10 : Données brutes du sondage RMP S1/S2 Figure 4.4.11 : Résultats d'inversion des données du sondage S1/S2 Figure 4.4.12 : Données brutes du sondage RMP S8/S9

Figure 4.4.13 : Résultats d'inversion du sondage S8/S9

ANNEXES

.

ANNEXE 1 : MATERIEL ET EQUIPEMENT DE FORAGE

A.1 Description du matériel de foration

Atelier de forage à gros diamètre

La composition de l'atelier de forage est la suivante :

- Une sondeuse équipée d'un système mixte de rotary et de roto-percussion avec accessoires.

- Un compresseur pour la fourniture d'air comprimé (17 à 21 bars de pression utile).

- Un camion citerne (chargé d'eau et de carburant).

- Un camion d'accompagnement.

- Un véhicule de liaison.

Les outils utilisés sont :

- Un trilame et un tricône sont utilisés pour les zones d'altération molles.

- Un marteau fond de trou est utilisé pour les zones plus dures et les formations compactes.

Le diamètre des trous de forage d'exploitation réalisés à Kombissiri

Les diamètres réalisés sont variables, en fonction de la lithologie du sous-sol et de l'outil utilisé pour forer.

Dans les altérites : on utilise le trilame pour la foration (d=9 ''7/8) et le tricône pour l'alésage (d=12'').

Dans le socle : on utilise le marteau fond de trou (MFT) pour la foration (d = 6''1/2) et pour l'alésage (d = 8''1/4).

Atelier de forage à petit diamètre

La composition de l'atelier est la suivante :

- Une foreuse équipée d'un système mixte de rotation et de marteau fond de trou avec les accessoires (tiges, taillants...).

- Un compresseur capable de fournir de l'air comprimé (6 à 8 bars de pression utile).

- Un véhicule d'accompagnement.

Le diamètre des trous de forage de vérification

Le diamètre obtenu est de deux pouces environ.

A.2 Equipement des forages

L'équipement d'un forage est l'opération qui consiste à introduire dans le trou un ouvrage de captage adapté à son utilisation ultérieure.

Pour un forage d'exploitation destiné à l'alimentation en eau potable, l'équipement se réalise en plusieurs étapes qui sont :

a) L'agencement de tubes PVC dans le trou de forage. Le type d'agencement des tubages est fonction du plan de captage établi par l'hydrogéologue. En d'autres termes, la position des crépines dans le forage est définie pour la lithologie et l'hydrogéologie de chaque forage.

Quelques règles générales qui guident le positionnement des crépines :

- les crépines sont placées au droit des principales venues d'eau détectées.
- les crépines sont situées hors des altérites.

Au fond du trou de forage et vissé au PVC, se trouve à un tube dit de décantation (ou sabot). Il mesure entre 1 et 3 mètres de long et il sert à l'accumulation de débris.

b) La mise en place du gravier filtre, tout au long de la colonne du forage située entre le PVC et la paroi du trou. La hauteur de cette colonne est calculée pour atteindre une hauteur de 2 à 5 mètres au-dessus des crépines.

c) La mise en place d'argile compactonite (coellon) au-dessus du gravier pour éviter l'infiltration des eaux d'altération dans le forage.

d) Comblement de l'espace vide entre les parois du trou et le PVC par du « toutvenant ».

2

ANNEXE 2 : EXEMPLE DE DIFFRACTOGRAMME



ANNEXE 3 : EXEMPLE DE POMPAGE D'ESSAI EN P1K1



P1K1: courbes de Descente et de Remontée. (Pompage longue durée de 72h)

Flabattement S. (m)
S. résiduel (m)



RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail de thèse est d'évaluer l'apport de trois techniques géophysiques récentes à l'étude des aquifères de socle : le panneau électrique à courant continu (dispositif multi - électrode), les méthodes électromagnétiques fréquentielles à faible nombre d'induction et le Sondage par Résonance Magnétique protonique (SRM).

Deux sites à proximité de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso, ont été sélectionnés :

- parce qu'ils représentent des contextes géologiques et hydrogéologiques représentatifs des zones à substratum cristallin au Burkina.

- parce qu'ils ont déjà fait l'objet d'études préalables détaillées, et que, par conséquent les résultats géophysiques pourront être contrôlés et étalonnés par les informations directes recueillies à partir des forages.

Ce mémoire comporte trois grandes parties :

La première partie expose la problématique scientifique et l'approche retenue : l'approche est essentiellement expérimentale et multi – disciplinaire. L'état de l'art et des connaissances actuel sur le sujet est exposé, à la fois du point de vue hydrogéologique et du point de vue géophysique.

Les résultats théoriques, mais surtout expérimentaux sont présentés dans la seconde partie :

D'abord, les résultats des techniques de télédétection, de géophysique aéroportée et du magnétisme au sol, puis les informations directes obtenues à partir des forages et des analyses d'échantillons. Enfin, la présentation des résultats de l'application des trois techniques géophysiques récentes et de leur comparaison à l'information directe : 6 sondages électriques d'étalonnage, plus de 20 panneaux électriques permettant de comparer les performances de quatre dispositifs quadripolaires les plus classiques et 4. Sondages par Résonance Magnétique.

La troisième partie est constituée par la discussion et par la synthèse des résultats obtenus. Elle conduit à six conclusions principales :

- Le panneau électrique est la technique qui fournit l'image 2D, voire 3D, avec la résolution la plus fine : il est très supérieur à l'addition de quelques sondages électriques isolés. y compris lorsque ces derniers sont interprétés à partir d'un modèle multi - couche. Il contribue à une implantation optimale des forages de reconnaissance et d'exploitation, puis plus tard, à une meilleure estimation des réserves (grâce à la définition de la géométrie de l'aquifère) et à la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère (par l'introduction de contraintes précises lors de la modélisation hydrogéologique).
- La cartographie électromagnétique multi paramètre reste la technique géophysique de reconnaissance la plus rapide et la plus efficace, notamment pour le positionnement ultérieur des panneaux. Le magnétisme au sol est un outil de reconnaissance d'un très grand intérêt, à la fois pour son apport à la connaissance de la tectonique, pour la cartographie du socle et en vue de la mise en œuvre des SRM.
- Les diagraphies électriques dans les forages sont indispensables pour mieux comprendre le fonctionnement des aquifères.
- Le SRM constitue la seule méthode géophysique non invasive permettant potentiellement de prédire la teneur en eau et la transmissivité d'un aquifère, avant foration : il apparaît par conséquent indispensable, avant l'implantation des forages d'exploitation.
- Bien qu'il soit prématuré de conclure de manière définitive, après une étude ne portant que sur deux sites, il est malgré tout recommandé d'envisager l'introduction systématique de ces 3 outils géophysiques dans la stratégie d'investigation des aquifères de socle, et plus généralement dans l'étude de tout aquifère discontinu. Il est donc proposé de poursuivre des investigations systématiques de ce type sur de nouveaux sites, à l'aide de ces outils et à partir des enseignements tirés de notre étude. Ces enseignements ont conduit notamment à des recommandations méthodologiques pour chacune des techniques mises en œuvre. Compte tenu des résultats obtenus précédemment par la prospection par émanométrie radon sur le site de Sanon, il est également recommandé de tester le couplage systématique de cet outil avec les futures investigations purement géophysiques. Il est confirmé que la mise en commun de toutes les informations qualitatives et quantitatives obtenues depuis le stade de la reconnaissance est indispensable à l'implantation optimale de forages à gros débits.
- Des sites étudiés, le site de Sanon est confirmé comme étant le plus productif, à la fois par le volume des réserves et par les débits obtenus. Le site de Kombissiri 2 apparaît comme le plus proche de l'aquifère de socle granitique type, du fait de l'existence claire de drains verticaux. En revanche, la morphologie de la zone potentiellement la plus intéressante et les variations latérales de la nature des altérites de surface introduisent une complexité difficilement compatible avec le modèle relativement simple de l'aquifère- type généralement proposé. Ces résultats doivent contribuer à l'évolution du modèle type de l'aquifère de socle.

MOTS CLEFS : Burkina Faso, aquifère de socle, forage, essai de pompage, diagraphie électrique, panneau électrique, tomographie électrique, électromagnétisme, sondage par résonance magnétique protonique.