

Programme des Nations Unies pour le Développement

RECHERCHE ET MISE EN VALEUR
DES EAUX SOUTERRAINES

MALI

Conclusions et recommandations du projet

Préparé pour le Gouvernement malien
par l'Organisation des Nations Unies,
agent d'exécution du
Programme des Nations Unies pour le développement

Novembre 1982

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION.....	1
1. Origine du projet.....	1
2. Objectifs et structures.....	3
3. Moyens.....	4
4. Evaluation et contrôles.....	5
I. GENERALITES.....	7
1. Zones d'intervention.....	7
2. Unités hydrogéologiques.....	9
3. Méthodes et techniques utilisées.....	13
4. Ressources en eau traditionnelles et besoins.....	18
II. RESULTATS.....	23
1. Hydrogéologie.....	23
2. Géophysique.....	45
3. Forages.....	54
4. Aspects logistiques - gestion et entretien du matériel	63
5. Moyens d'exhaure.....	67
6. Formation du personnel national.....	73
III. RECOMMANDATIONS.....	75
1. Poursuite et extension des opérations.....	75
2. Technique et matériels à utiliser pour la prospection et le forage d'eau.....	80
3. Action sanitaire, éducatrice et de développement en milieu rural.....	83
4. Cadre institutionnel.....	84

FIGURES

- Figure 1: Zones d'intervention
- Figure 2: Limites administratives de la région du projet
- Figure 3: Cadre géomorphologique
- Figure 4: Principaux types d'anomalies dans les pompages d'essai
- Figure 5: Exemples d'implantation géophysique sur linéament injecté de dolérite
- Figure 6: Exemples d'implantation géophysique sur contact lithologique
- Figure 7: Hydraulique villageoise - Satisfaction actuelle des besoins en points d'eau

APPENDICES

- 1. Projet MLI 67/507 - Budget et résultats statistiques
- 2. Projet MLI 74/001 - Budget et résultats statistiques
- 3. Projet MLI 76/004 - Budget et résultats statistiques
- 4. Personnel international et bourses
- 5. Personnel de la contrepartie gouvernementale
- 6. Matériels UNICEF et PNUD
- 7. Caractéristiques techniques des matériels utilisés
- 8. Rapports et notes techniques

ANNEXES

- 1. Données récapitulatives des travaux de forage par localité
- 2. Caractéristiques techniques et hydrogéologiques des forages
- 3. Données récapitulatives des prospections géophysiques par village
- 4. Liste des installations de pompes
- 5. Pompages d'essai
- 6. Mesures sur les puits témoins
- 7. Analyses chimiques
- 8. Mesures de conductivité
- 9. Analyses isotopiques.

PLANCHES H.T.

- 1. Carte des travaux de forage
- 2. Carte des travaux de prospection géophysique
- 3. Carte des débits exploitables par village
- 4. Carte des installations de pompes
- 5. Carte lithologique
- 6. Carte piézométrique

I N T R O D U C T I O N

1 - ORIGINE DU PROJET

Le Mali s'étend sur 1.200.000 km² dans des zones à climats Sud-saharien, sahélien et soudanien qui se distinguent par leur régime pluviométrique. Au Nord du 17e parallèle, sur environ 56 % de la superficie du pays, la zone saharienne pratiquement désertique ne reçoit que des pluies rares et irrégulières; au centre, entre les 14e et 17e parallèles, la zone sahélienne sur 25 % du territoire bénéficie de 200 à 700 mm de pluie par an; au Sud, la zone de savane arborée est beaucoup plus arrosée car elle reçoit jusqu'à 1500 mm de pluie annuellement aux frontières de la Guinée et de la côte d'Ivoire. Ces précipitations sont concentrées, sous forme de tornades souvent violentes, de juin à septembre au Nord et de mai à octobre dans le Sud-Ouest, le reste de l'année représentant une période pratiquement sèche. Par ailleurs, le Mali est drainé par les deux fleuves les plus importants de l'Afrique de l'Ouest, le Niger et le Sénégal, le premier traversant tout le pays d'Ouest en Est et le second ne faisant que le border à sa frontière Ouest.

A l'écart de ces deux grands fleuves et de leurs rares affluents pérennes, les seules ressources permanentes en eau disponibles pour l'alimentation, l'élevage et l'agriculture sont représentées par les eaux souterraines utilisées de tout temps par exploitation de puits traditionnels creusés à la main qui ne pénètrent généralement que dans la frange supérieure de la nappe phréatique; ces ouvrages sont donc extrêmement sensibles aux variations saisonnières et annuelles de la pluviométrie pouvant, pour un grand nombre d'entre eux, s'assécher ou, tout au moins, ne fournir que des débits très faibles en fin de saison sèche.

La répartition de plus de 5 millions d'habitants dans près de 10.000 localités rurales, dont une grande majorité de moins de 750 habitants, ne justifie pas en général la réalisation de systèmes d'adduction relativement élaborés; pratiquement aucune agglomération ne dispose donc d'une alimentation en eau saine et très peu d'entre elles d'une ressource adéquate et suffisante en permanence avec toutes les conséquences que cet état de chose entraînent dans le domaine sanitaire. Sans considérer le développement des richesses pastorales et sur la base d'une consommation journalière de 40 litres par habitant et par jour, y compris les besoins du cheptel villageois, le pays devrait donc disposer de plus 30.000 points d'eau modernes équipés de pompes manuelles.

Au nombre des projets approuvés lors de la réunion des Chefs d'Etat des pays Sahéliens à Ouagadougou en juillet 1973 pour lutter contre les effets de la sécheresse enregistrée depuis 1968, et qui s'est d'ailleurs poursuivie jusqu'en 1982, a figuré pour le Mali une "Opération Puits" pour la construction de 429 ouvrages de grand diamètre creusés à la main. Devant l'impossibilité d'exécuter, dans la plupart des cas, des puits productifs sans travaux de reconnaissance préalables, le Gouvernement a demandé au PNUD d'intensifier, à partir de mars 1974 et pour une durée de 34 mois, les opérations du projet MLI 67/507 alors en cours pour le "Renforcement des Services Gouvernementaux chargés de découvrir et de mettre en valeur les Eaux Souterraines". Au cours des activités de ce nouveau projet MLI 74/001, il est apparu que, grâce à l'utilisation des méthodes de reconnaissance mises au point précédemment et à un nouveau matériel de forage dit au "marteau-fond-trou", la cadence d'exécution des forages productifs était largement supérieure à celle de leur transformation en puits par creusement manuel. L'utilisation immédiate de ces ouvrages s'est donc imposée dès la fin de 1975 d'une manière impérative mais elle a nécessité l'installation et surtout l'entretien de moyens d'exhaure appropriés. Pour résoudre ce problème, le FISE a financé en 1976 pour 594.000 dollars un projet de mise en place et d'entretien de 400 petites pompes manuelles ou à pied dont la capacité était suffisante compte-tenu du diamètre des ouvrages (de 10 à 20 cm), des débits disponibles et des besoins essentiels à assurer pour les quatre cinquièmes des régions les plus peuplées du Mali.

En raison des résultats encourageants alors obtenus (exécution de 266 forages totalisant 10.920 m, installation et entretien de 122 pompes) et de l'importance des besoins exprimés par les populations rurales, le Gouvernement a décidé d'augmenter d'une manière considérable, à partir de 1977, les moyens en personnel et en matériel dont il disposait en faisant appel à un effort accru des coopérations bilatérales et internationales, en particulier du PNUD et du FISE qui ont été chargés d'exécuter une troisième phase d'une durée de six ans et d'un budget initial de \$ 7.463.000 augmenté par la suite à près de 10,5 millions de dollars.

Par ailleurs, le Fonds d'Equipement des Nations Unies finançait pour 898.000 dollars une série d'essais de moyens d'exhaure, y compris dix pompes à énergie solaire, car il s'était avéré à l'usage qu'aucune pompe disponible sur le marché international ne présentait des garanties de fiabilité suffisantes.

2 - OBJECTIFS ET STRUCTURES

Les objectifs étaient clairement définis dans le document de projet. A long terme, ils consistaient "A lancer, dans un certain nombre de zones sélectionnées, des opérations visant au développement économique et social et à l'amélioration de l'état sanitaire des populations rurales. Le projet devrait en effet permettre de disposer de points d'eau permanents et salubres pour les petites agglomérations, les écoles et les dispensaires et mettre en évidence la possibilité d'exploiter les nappes souterraines par forages en petit diamètre équipés de moyens d'exhaure pour l'alimentation en eau des centres ruraux et pour l'élevage".

Dans l'immédiat et au cours d'une période de 72 mois, on prévoyait:

- "d'amorcer un programme d'animation rurale et d'éducation sanitaire au niveau de certaines communautés rurales de préférence dans celles déjà pourvues de centres de développement, de dispensaires ou d'écoles,

- d'accroître les moyens en matériel et en personnel de la Division des Eaux Souterraines en particulier d'augmenter le nombre de machines de forage fonctionnant dans le cadre de la Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Energie,

- d'exécuter environ deux mille forages à des emplacements choisis suivant des critères socio-économiques qui devaient être définis d'une manière précise par le Comité National de l'Eau,

- de mettre en place des pompes sur le plus grand nombre possible de forages productifs et d'en assurer l'entretien, étant entendu que cet entretien devra progressivement être pris en charge par les populations elles-mêmes,

- de suivre l'incidence de l'utilisation d'une eau salubre sur l'état sanitaire des populations,

- de faire porter un effort tout particulier sur la formation technique du personnel national de manière à réduire l'effectif du personnel international en tenant compte de la nécessité de maintenir le rythme et le rendement des travaux à un niveau acceptable,

- de former des volontaires locaux pour assurer l'entretien des points d'eau et pour donner une éducation sanitaire pour une meilleure utilisation de l'eau".

Le Projet a été rattaché à la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Ministère du Développement Industriel et du Tourisme. Il a été administré par un Conseiller Technique Principal nommé par le Département de la Coopération Technique pour le Développement après accord du Gouvernement et par le chef de la Division des Eaux Souterraines pour la Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Energie désigné comme Directeur National par le Gouvernement. L'ensemble des activités a été supervisé par les services pertinents de l'Agence participante et chargée de l'exécution qui a assumé la responsabilité de la gestion administrative, notamment en ce qui concerne le recrutement des experts, les achats de matériel et les contrôles financiers.

En dehors de la Direction du projet et de l'atelier de réparations mécaniques installés à Bamako, les activités sur le terrain pour ce qui concerne les forages, l'installation et l'entretien des pompes ont été rapidement décentralisées autour de trois bases secondaires situées à Dilly, Kolokani et Banamba représentant approximativement les centres de gravité des principales zones d'intervention du Projet.

3 - MOYENS

Pour atteindre ces objectifs, le Projet disposait initialement d'une durée de 72 mois à partir de janvier 1977 et d'un budget total de \$ 7.463.568 dont \$ 5.810.845 financés par le PNUD sous forme de personnel, matériel et frais de fonctionnement et \$ 1.526.252 par le FISE essentiellement en matériels. Par la suite, les contributions des Organisations Internationales ont été respectivement portées à \$ 7.999.704, dont un sous-contrat de \$ 196.625 pour le creusement des puits à main, et à \$ 2.539.870. En fait, les travaux sur le terrain n'ont duré que 66 mois, soit jusqu'en juin 1982.

Jusqu'en 1979, le personnel international comprenait, en plus du Conseiller Technique Principal, un hydrogéologue, un géophysicien, trois foreurs, trois mécaniciens, un responsable du matériel et un expert associé; certains de ces experts ont progressivement été remplacés par des cadres nationaux dont la formation s'était avérée satisfaisante de telle sorte que, depuis cette date, la totalité des travaux a été assurée par des équipes maliennes; l'hydrogéologue, le géophysicien, l'expert associé, le mécanicien et le responsable du matériel restés en poste jusqu'en juin 1982 n'ont joué

qu'un rôle d'encadrement, de conseil et de programmation mais ont cependant été secondés par deux volontaires des Nations Unies.

Le personnel national groupait en fin de projet: un Directeur - 3 hydrogéologues - 2 ingénieurs géophysiciens - 1 ingénieur mécanicien - 4 chefs de chantiers de forage dont 2 techniciens géologues - 1 technicien supérieur spécialiste en moyen d'exhaure - deux techniciens du développement communautaire - 3 chefs de base d'entretien des pompes - 16 mécaniciens, menuisiers, maçons et soudeurs - 1 magasinier - 1 dessinateur - 1 comptable - 2 dactylographes - 41 chauffeurs et ouvriers spécialisés permanents et enfin tout le personnel occasionnel nécessaire au bon fonctionnement des chantiers.

Le calendrier de fourniture du matériel prévoyait la mise à la disposition du projet d'une troisième unité de forage (UNICEF) en 1977 puis d'une quatrième (PNUD) et d'une cinquième (UNICEF) en 1979. En raison de l'augmentation considérable des coûts à partir de 1977, il n'a été possible de procéder à l'acquisition que d'une seule unité (UNICEF) en 1979, la seconde ne devant être livrée qu'en septembre 1982. C'est ainsi que le programme de travail représentait initialement 225 mois de fonctionnement d'unité de forage, alors qu'il n'a été possible d'en n'exécuter que 131. L'essentiel du matériel comprenait 3 machines de forage avec tout leur équipement de fondet 3 compresseurs montés sur camion, 10 camions d'accompagnement et de ravitaillement et 32 véhicules légers. Le DTCD a accordé de grandes facilités d'acquisitions locales de pièces de rechange qui ont permis de réduire au maximum les arrêts techniques des chantiers.

4 - EVALUATIONS ET CONTROLES

Le projet a fait l'objet de deux missions d'évaluation et de deux contrôles financiers.

Mission d'évaluation de décembre 1979 - (PNUD-UNICEF-DTCD)

Les conclusions se traduisaient par 25 recommandations visant à :

- Renforcer les effectifs du personnel national
- Renforcer la formation du personnel national
- Prolonger l'affectation des experts
- Suggérer des sources de financement pour couvrir le déficit budgétaire du projet (\$ 2.000.000)

- Appuyer la création d'un Fonds National de l'Eau
- Préparer une réévaluation du projet en temps opportun après que les autorités maliennes aient choisi le moyen d'exhaure le plus approprié
- Revoir les critères d'établissement du programme de forages

Mission d'évaluation d'octobre 1981 (PNUD - DTCD)

L'analyse du suivi des recommandations de la première mission a montré que le programme fixé avait été respecté dans son ensemble sauf sur deux points importants :

- la coordination des activités du projet avec le Ministère de la Santé,
- la création du Fonds National de l'Eau,

Cette analyse avait servi de base à sept nouvelles recommandations dont les principales portaient sur :

- la poursuite des opérations jusqu'en juin 1985 avec un budget de \$ 6.588.700 venant en complément des \$ 1.321.000 déjà inscrits au CIP pour le premier semestre 1982
- l'étude d'un projet UNICEF - OMS d'entretien et de valorisation des équipements mis sur place,
- la fabrication locale de pompes India,
- l'accélération de la formation des mécaniciens nationaux,
- la création du Fonds National de l'Eau,
- la prise en charge par les populations de l'entretien des moyens d'exhaure.

Ces recommandations ont également dans l'ensemble été suivies sauf pour celles qui sortent de la compétence du projet :

- le budget de la phase suivante a été réduit à \$ 3.972.000
- aucune requête n'a été présentée par le Gouvernement à l'OMS
- le Fonds national de l'eau n'est toujours pas opérationnel.

Missions de contrôle financier

Ce contrôle a été assuré à deux reprises en avril 1981 par une mission d'audit externe et en juin 1982 par une mission d'audit interne.

I. GENERALITES

1- ZONES D'INTERVENTION

Les études et les activités de forage, d'installation et d'entretien de pompes ont concerné une zone principale d'intervention en milieu rural, la région du projet s.s. mais aussi, sur requête de l'Administration, plusieurs projets de développement régionaux et locaux ainsi que la création de points d'eau pour des agglomérations réparties dans différentes provinces du Mali.

1.1 - La Région du projet

Elle s'étend sur la zone sahélienne située au Nord de Bamako entre une ligne passant par les localités de Koula et Nossombougou au Sud jusqu'à la frontière mauritanienne au Nord. Elle s'inscrit entre les longitudes 6°45' et 8°30'W et les latitudes 13°00 et 15°30'N et couvre une superficie d'environ 43000 km². Sur le plan administratif, elle inclue la totalité du cercle de Kolokani et, pour partie, les cercles de Nara, Banamba et Koulikoro. Elle se scinde en deux ensembles géomorphologiques aux caractéristiques bien différenciées:

- Le secteur Sud est le domaine des plateaux gréseux mandingues dont l'altitude décroît du Sud-Ouest vers le Nord-Est de 600 m près de Kati à 350 m près de Mourdiah. Ces plateaux, en grande partie couverts de formations latéritiques, sont assez fortement dégradés par un réseau hydrographique dense qui est drainé par le Niger au Sud et le Baoulé à l'Ouest. La pluviométrie qui avoisine 1000 mm sur la bordure sud décroît progressivement pour atteindre 600 mm près de Mourdiah. Elle a permis le développement d'une savane arborée.

- Le secteur Nord correspond à la plaine de Nara, largement ensablée, dont les altitudes sont comprises entre 250 et 300 m. Le réseau hydrographique, dont la vallée du Serpent a été l'élément majeur, est aujourd'hui désorganisé par les systèmes dunaires et presque complètement fossilisé. La pluviométrie se réduit à moins de 400 mm au Nord de Nara où l'influence désertique devient sensible. La végétation est très clairsemée et comporte essentiellement des épineux.

Les travaux de forage exécutés dans la région du projet pour l'alimentation en eau des villages représentent 84 % du nombre total des forages réalisés..

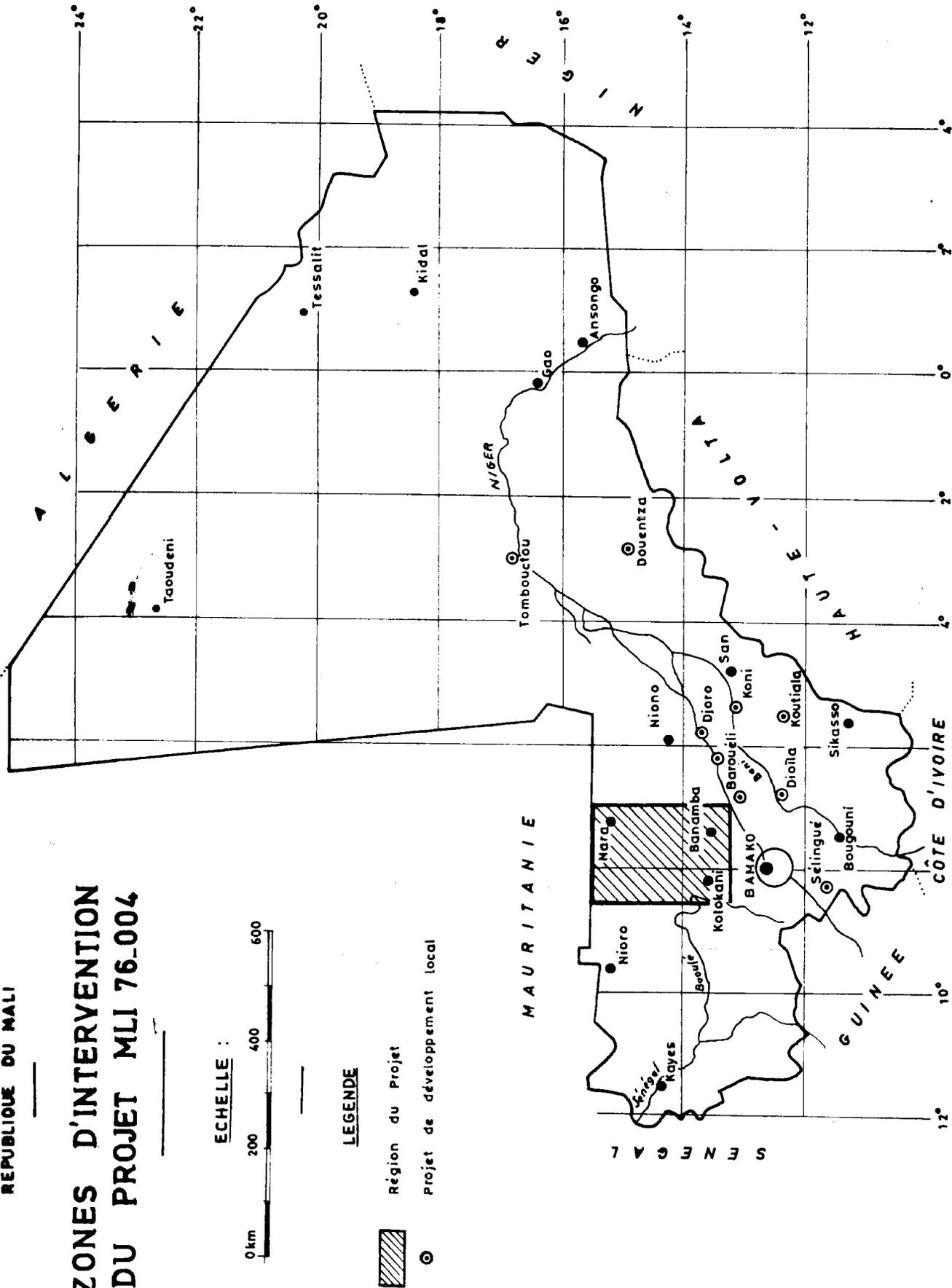
REPUBLIQUE DU MALI

ZONES D'INTERVENTION DU PROJET MLI 76-004



LEGENDE

-  Région du Projet
-  Projet de développement local



1.2 - Hors région du Projet

Sur demande de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie, des points d'eau ont été créés pour assurer d'une manière urgente l'alimentation en eau d'agglomérations aux ressources précaires et pour permettre la mise en oeuvre de projets de développement d'importance régionale ou locale, dont certains en collaboration avec des agences des Nations Unies.

- Alimentation en eau d'agglomérations : Tombouctou, Barouéli, Dioila, Douentza, Ségou.
- Zone de développement de Sélingué : réinstallation des villages de Kondjiguila, Benko, Siékorolé, Kangaré, Bambala, Faraba, Togan.
- Aménagement de parcs forestiers : Baoulé, Monts Mandingues, Faya
- Développement agricole et élevage : Périmètre de Dilly - Ombevi, Périmètre maraîcher de Kati, piste de transhumance Nara-Kati, parc à bétail de Kati (F.A.O).
- Infrastructure routière : piste Didiéni-Goumbou (UNSO)
- Développement industriel : Koutiala (CMDT, HUICOMA), Banankoro (Somalibo - CRES), Fana (CMDT)
- Développement communautaire : San, Sansanding, Tamani, Dioro, Tiby (UNICEF).

Enfin, un certain nombre de forages ont été exécutés dans le district de Bamako notamment pour des écoles techniques et d'agriculture et une clinique.

2 - UNITES HYDROGEOLOGIQUES

2.1 - Région du projet

Les principales unités hydrogéologiques sont: les grès infra-cambriens, les schistes cambriens, les formations de recouvrement, les intrusions doléritiques du Permien et la série détritique du Continental Intercalaire. Les ressources en eau exploitables par forage sont localisées dans des aquifères de type fissuré, semi-continu ou discontinu, dans le substratum gréseux et schisteux ou de type généralisé dans le Continental intercalaire. Les intrusions doléritiques sont imperméables et accentuent les discontinuités dans les aquifères du substratum.

Les formations de recouvrement renferment des nappes intergranulaires locales qui possèdent une fonction hydrogéologique importante vis-à-vis des aquifères sous-jacents en plus de leur rôle dans l'alimentation en eau traditionnelle des villageois.

2.1.1 - Grès infra-cambriens

Ils forment l'ossature des plateaux mandingues dont l'extension déborde largement les limites de la région du projet. Ils constituent une puissante série sédimentaire monotone dont l'épaisseur croît du Sud vers le Nord du fait du léger pendage général affectant leur disposition sub-tabulaire, pour atteindre une épaisseur estimée à 800-1000 m en bordure du fossé de Nara.

Cette formation a été subdivisée en cinq groupes lithologiques dont les limites approximatives sont indiquées sur la carte géologique hors-texte (planche 5). Les faciès gréseux prédominent et sont de granulométrie et de minéralogie variées: grès fins à grossiers, siliceux, arkosiques, micacés, glauconieux. Les quartzites et grès quartzeux sont fréquents. Ils se présentent sous forme de grosses assises mal stratifiées ou d'ensembles régulièrement lités avec des bancs d'épaisseur métrique à décimétrique parfois se débitant en plaquettes.

Les séquences pélitiques composées de schistes feuilletés, de shales gréseux finement lités, plus rarement d'argilites se rencontrent dans les différents groupes de l'Infra-cambrien; elles sont toutefois plus fréquentes et plus épaisses dans les groupes supérieurs.

La structure sub-tabulaire des plateaux est découpée par des réseaux de linéaments correspondant à des failles et fractures dont l'extension longitudinale peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres. Le réseau majeur est d'orientation WSW-ENE à W-E; il est recoupé par des familles de linéaments d'extension plus réduite orientés NW-SE à NE-SW.

2.1.2 - Schistes cambriens

La série cambrienne couvre le secteur Nord de la région du projet entre le front des plateaux mandingues et la frontière mauritanienne puis le fossé de Nara au Nord-Est où elle s'est accumulée sur près d'un millier de mètres. Elle est formée essentiellement de roches pélitiques: argilites, schistes microfeuilletés, silstones et shales gréseux. Dans sa partie supérieure, sont intercalés des bancs de grès, des niveaux de jaspe ainsi que des calcaires gréseux et dolomitiques.

La zone axiale du fossé de Nara est orientée sensiblement WSW-ENE. Les failles bordières du fossé ainsi que les linéaments majeurs ont la même orientation. Des réseaux de linéaments secondaires, moins denses que dans les grès infra-cambriens, leur sont associés.

2.1.3 - Intrusions doléritiques du Permien

Elles sont omniprésentes et recourent indifféremment les séries infra-cambrienne et cambrienne. Les modes de gisement sont variés: dykes, sills, stocks, batholites complexes englobant des compartiments de roches sédimentaires métamorphisées, laccolites interstratifiés dans les séquences schisteuses. Certains massifs intrusifs atteignent des superficies de quelques centaines de kilomètres carrés. Les dykes sub-verticaux qui injectent le réseau de linéaments majeurs se suivent sur plusieurs dizaines de kilomètres. Leur largeur moyenne est de l'ordre de 40 mètres mais elle peut atteindre 300 mètres.

En raison de la plus grande proximité du socle et de la nature des séquences lithologiques encaissantes, les massifs intrusifs dans les grès infra-cambriens sont plutôt du type batholite alors que dans les schistes cambriens les laccolites sont prédominants.

2.1.4 - Continental Intercalaire

Ces formations détritiques d'âge mésozoïque affleurent à l'Est de Goumbou. Elles se sont accumulées dans la zone axiale du fossé de Nara et reposent sur un substratum constitué par les schistes cambriens. Elles renferment, de même que celles du Continental terminal, la seule nappe généralisée d'importance en zone sahélienne. Dans les environs de Nara, les faciès argilo-silteux prédominent avec des intercalations sableuses; la proportion d'horizons sableux croît vers la zone axiale du fossé; ceux-ci deviennent prédominants vers l'Ouest et des niveaux de graviers y sont intercalés.

2.1.5 - Formations de recouvrement

Dans le secteur des plateaux mandingues, elles sont essentiellement latéritiques. Suivant leur position géomorphologique, elles peuvent être en place ou en partie colluvionnées. Les surfaces d'aplanissement anciennes sont couronnées par des cuirasses massives reposant sur une épaisse semelle d'argiles latéritiques à granules ferrugineux. Sur les versants et dans les zones basses, les phases d'érosion et d'altération successives ont entraîné la formation de cuirasses brêchiques ou pisolithiques interstratifiées dans des

argiles latéritiques comportant une fraction sableuse d'importance variable issue du remaniement de la frange altérée du substratum gréseux.

Dans la plaine de Nara, le recouvrement est essentiellement sableux et de faible épaisseur sauf à l'aplomb des cordons dunaires. Les latérites se réduisent à un mince horizon gravillonnaire, plus ou moins cimenté, épousant le substratum.

2.2 - Hors-région du projet

Les forages y sont localisés dans quatre unités hydrogéologiques qui n'ont pas fait l'objet d'études de détail en raison de données trop fragmentaires et dispersées pour permettre une analyse statistique. On peut rappeler cependant leurs principales caractéristiques :

- Le socle précambrien, dans le périmètre d'aménagement de Sélingué est formé de roches granitoïdes et métamorphiques recouvertes par d'épaisses formations d'altération: arènes, argiles et latérites. Les eaux exploitables par forage sont localisées dans les zones fissurées du socle et dans les arènes grenues. Des débits jusqu'à $12 \text{ m}^3/\text{h}$ ont été obtenus, les zones perméables étant associés aux arènes; le socle, peu fissuré, s'est avéré le plus souvent improductif et un certain nombre de forages au débit insuffisant ont dû être abandonnés.

- Les grès infra-cambriens, dans la région de Bamako et au Sud de la vallée du Niger, présentent des caractéristiques hydrogéologiques comparables à celles des plateaux mandingues inclus dans la région du projet, et souvent même plus favorables avec des débits d'essai dépassant fréquemment $25 \text{ m}^3/\text{h}$ (Banankoro, Barouéli, Koutiala) et pouvant atteindre $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Koutiala). Les grès, qui correspondent à la partie inférieure de la série infra-cambrienne, sont souvent grossiers ou hétérogranulaires et fortement fissurés du fait de la proximité du socle. Les franges altérées sont épaisses et perméables et des réserves importantes leur sont associées. Dans certaines zones, l'aquifère est sub-généralisé et presque tous les forages sont productifs quoique avec des débits variant largement (Barouéli). Localement des phénomènes d'artésianisme ont été constatés (Koutiala).

- Le Continental Terminal et les alluvions quaternaires sont représentés dans la cuvette nigérienne par des formations détritiques peu ou non consolidées rencontrées dans les forages de Tombouctou, Dioro, Tamani, Sansanding, Ségou, et peu différenciables. Les alluvions quaternaires sont formées de dépôts sableux intercalés de sables argileux et de limons sableux. La fraction fine est prédominante et leur épaisseur semble assez réduite, d'une dizaine à une vingtaine de mètres. Les faciès du Continental Terminal sont généralement plus grossiers avec quelques intercalations de niveaux argileux. La perméabilité des horizons sableux est souvent élevée et conduit à des débits de forage de plusieurs dizaines de m³/h (Tombouctou: 50 m³/h, Dioro: 30 m³/h, Diré: 120 m³/h). Cet aquifère généralisé, qui dispose de réserves importantes et de bonnes conditions de réalimentation, est propice à une exploitation intensive des eaux souterraines.

3 - METHODES ET TECHNIQUES UTILISEES

Les méthodes d'implantation et les techniques de forage mises en oeuvre ont été identifiées dans le cadre du projet MLI 67/507 et expérimentées avec succès, mais à petite échelle, par le projet MLI 74/001. Cependant, le passage d'une phase de reconnaissance à une phase de développement intensif a nécessité un affinement progressif des méthodes utilisées afin de satisfaire à l'objectif principal fixé qui était d'exécuter le plus grand nombre de forages productifs possible au coût économique le plus bas, c'est-à-dire en réduisant au maximum le pourcentage de forages secs ou abandonnés pour débit insuffisant.

3.1 - Implantation des forages

Les méthodes hydrogéologiques classiques de recherche de sites de forages en terrains fissurés ont été utilisées en combinaison avec des projections géophysiques. L'originalité du projet n'est pas d'avoir appliqué conjointement ces deux types d'approche mais de les avoir imbriqués étroitement à l'avancement des travaux. Les résultats de chaque forage ont été immédiatement confrontés aux hypothèses hydrogéologiques et géophysiques qui avaient défini son implantation, celles-ci faisant l'objet d'une réinterprétation systématique dont il était tenu compte pour les implantations ultérieures. L'amélioration des résultats obtenus par cette procédure est manifeste puisqu'elle a permis d'augmenter le taux de réussite en forages productifs de

près de 25 % entre le début et la fin du projet. Cela n'a été rendu possible que par la constitution d'une puis de deux équipes géophysiques en contact bi-journalier avec les hydrogéologues et les foreurs sur les chantiers. Des campagnes de prospection géophysique déconnectées dans le temps des phases de forage n'auraient très probablement pas amélioré les résultats d'une manière aussi significative.

La procédure suivie pour l'implantation des forages peut donc être résumée comme suit :

Sur la base d'une liste de villages prioritaires fournie par l'Administration, un programme d'études hydrogéologiques et de prospections géophysiques est établi en début de chaque campagne. Les implantations de forage doivent satisfaire à deux contraintes: elles doivent se situer dans le village ou à sa proximité immédiate et être proposées même dans le cas de conditions hydrogéologiques défavorables.

a) Etude hydrogéologique

Elle comporte une enquête sur le terrain avec l'établissement de fiches de villages résumant les données administratives ainsi qu'une estimation des ressources et des besoins en eau et de fiches de points d'eau rassemblant les caractéristiques des points d'eau traditionnels: profondeur des niveaux d'eau, fluctuations saisonnières et interannuelles, salinité, nature des horizons aquifères etc... Les conditions hydrogéologiques et géomorphologiques locales sont évaluées. Cette étude est complétée par l'interprétation des photographies aériennes à l'échelle du 1:50.000 avec recherche de toutes les discontinuités structurales; une ou plusieurs implantations de forage sont alors proposées.

b) Prospection géophysique

A partir du canevas hydrogéologique, un programme d'étude géophysique est établi. Il utilise les méthodes électriques, sismique et magnétique qui peuvent être combinées suivant les conditions géologiques locales.

- Les méthodes électriques ont été systématiquement utilisées car elles sont bien adaptées aux problèmes à résoudre et sont aisées à mettre en oeuvre. Le profilage électrique, surtout par trainé simple, avec des longueurs de ligne d'envoi AB de 200 à 300 m et des lignes de réception MN de 10 à 15 m permet de localiser sur le terrain les discontinuités du substratum identifiées par l'hydrogéologue sur les photographies aériennes.

Les sondages électriques, avec une longueur de ligne AB/2 au plus égale à 500 m, exécutés sur les points favorables du profil électrique permettent d'identifier les niveaux perméables et de fournir au foreur une séquence probable des terrains à traverser ainsi que la profondeur optimale à atteindre.

- La méthode magnétique n'a été utilisée qu'à partir d'avril 1981 lorsque les magnétomètres à protons ont été livrés au projet. Cette méthode est indispensable dans les zones où les intrusions doléritiques sont fréquentes. L'interprétation des profils magnétiques avec un point de mesure tous les 20 m et un écartement réduit à 10 m ou 5 m au droit des anomalies permet de localiser avec une précision suffisante les limites des intrusions doléritiques et de situer au mieux les forages sur les épontes fracturées encaissantes.

- Les bases de sismique-réfraction ont surtout été exécutées pour la localisation précise des discontinuités dans le substratum schisteux de la plaine de Nara au début du projet. Par la suite, cette méthode a été plus rarement utilisée car elle est assez lourde et lente en regard de l'importance du programme de villages à étudier. De plus, l'interprétation quantitative des sismogrammes est souvent rendue délicate par les fortes variations d'épaisseur et de faciès du recouvrement ainsi que de la frange altérée du substratum. La sismique peut cependant être très utile dans les zones à lithologie relativement homogène et à faciès indurés: quartzites, grès compacts, silstones.

3.2 - Exécution des forages

La presque totalité des forages ont été réalisés par la technique du marteau fond-de-trou en utilisant l'air comprimé comme fluide. Cette technique s'est avérée parfaitement adaptée aux besoins du projet, forages de petit diamètre et de profondeur limitée, ainsi qu'aux conditions hydrogéologiques rencontrées. La méthode de rotary à la boue n'a été utilisée que dans de rares cas d'horizons bouillants ou fluants dans le recouvrement et, hors de la région du projet, pour les forages dans la frange altérée du socle et dans le Continental Intercalaire et Terminal.

En phase de reconnaissance, les trous sont forés en 4 ½" jusqu'à la profondeur finale. Dans le cas où le débit lors de la foration est supérieur à 1 m³/h, l'ouvrage est converti en forage productif. Il est alors alésé en 6 ½" ou en 8 ½" jusqu'à une quinzaine de mètres sous le niveau statique et équipé d'un tubage plein, métallique ou en PVC, de diamètre 5" ou 6". En cas d'éboulement dans les terrains de recouvrement, un tubage provisoire est placé jusqu'au toit du substratum; ce cas s'est d'ailleurs rarement produit. Dans les zones à couverture sableuse vive, un avant-trou est foré et tubé en 8" sur quelques mètres.

Lorsque les conditions hydrogéologiques sont connues, la phase d'alésage est supprimée et le trou est foré directement en 6 ½" jusqu'à la profondeur d'installation du tubage, en moyenne une trentaine de mètres, tubé et poursuivi en 4 ½" jusqu'à la profondeur finale.

La bonne tenue des formations aquifères gréseuses ou schisteuses a permis d'éviter la pose de crépines. Un certain nombre de forages en ont cependant été équipés lorsque les conditions hydrogéologiques le requièrent: venues d'eau peu profondes, fracturation trop importante et pour les forages de débit supérieur à 20 m³/h qui peuvent être utilisés pour un réseau d'adduction d'eau.

Les principales difficultés de forage rencontrées sont liées à la perforation des bancs de roches très dures ou abrasives, dolérites et surtout quartzites. L'avancement y est très lent et l'usure des taillants rapide, qu'ils soient à boutons ou à plaquettes.

3.3 - Estimation du débit des forages

Tous les forages productifs ont fait l'objet d'un programme d'essais destiné à vérifier leur capacité d'exploitation et à déterminer les caractéristiques hydrogéologiques locales des zones aquifères. Le programme d'essais a été plus ou moins complet suivant l'importance du débit lors de la foration et du type de moyens d'exhaure qui peut être mis en place.

Essais de production

Ce genre d'essai est systématiquement réalisé sur tous les forages productifs. Il consiste en un pompage de courte durée, de 1 à 3 heures, exécuté à l'air lift par l'atelier de forage en utilisant le train de tiges muni du marteau comme tube d'air et la colonne de tubage comme tube d'eau, le marteau étant placé à la base du tubage. Cet essai est parfois doublé avec le marteau descendu au fond du trou afin d'obtenir un ordre de grandeur du débit instantané maximum. Le niveau dynamique est mesuré à l'arrêt du pompage. Un forage proche a souvent été utilisé comme piézomètre pour suivre les phases de descente et de remontée.

Les pompages d'essai proprement dit ont été exécutés par une équipe spécialement constituée. Quelques essais ont été faits avec un groupe électro-pompe submersible de $12 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacité. La plupart d'entre eux ont toutefois été réalisés à l'air-lift, méthode qui permet de couvrir un éventail de débits beaucoup plus large de 2 à $100 \text{ m}^3/\text{h}$, avec le même compresseur en modifiant les diamètres et l'immersion des tubes d'eau et d'air.

Essais par paliers

Ils sont destinés à évaluer les pertes de charge. Ils consistent en trois paliers de débits croissants (ou décroissants) d'une heure chacun enchainés ou séparés par des périodes d'arrêt de durées équivalentes à celles du pompage.

Essais à débit constant

Ils ont concerné les forages débitant plus de $5 \text{ m}^3/\text{h}$ lors des essais de production. La durée du pompage varie de 12 à 72 heures suivant l'évolution des niveaux durant la phase de descente et l'apparition de phénomènes perturbateurs. Des observations sur un ou plusieurs piézomètres ont accompagné les mesures sur le forage testé. Ces essais apportent une meilleure estimation du débit d'exploitation à long terme en plus de la détermination des caractéristiques hydrauliques. Ils permettent aussi d'identifier des phénomènes de limites très fréquents dans ce type d'aquifère.

Essais cycliques

Beaucoup de forages devant être exploités en régime discontinu, en particulier avec des pompes solaires, des pompages répétés à raison de 12 heures par jour pendant 4 à 6 jours ont été menés sur certains ouvrages afin de vérifier les méthodes classiques d'interprétation pour les aquifères fissurés.

4 - RESSOURCES EN EAU TRADITIONNELLES ET BESOINS

A la suite des périodes de sécheresse récurrentes qui ont affecté le Sahel durant la dernière décennie, le déficit des ressources en eau, déjà chronique auparavant, s'est accentué conduisant périodiquement à des situations dramatiques sur le plan humain et économique. Cette tendance a encore été accélérée par un taux élevé d'accroissement de la population, de l'ordre de 2,5 % par an, que n'ont pas compensé les mouvements migratoires à l'intérieur et hors de la région du projet. Dans certains secteurs, de nombreux villages et hameaux ont été partiellement ou complètement abandonnés, les villageois se regroupant dans d'autres localités moins démunies sur le plan des ressources en eau ou s'implantant dans de nouveaux sites plus favorables

Les enquêtes menées sur le terrain au niveau des villages avec le recensement systématique des points d'eau traditionnels ont permis de dégager, sinon une estimation précise des ressources disponibles, du moins un ordre de grandeur représentatif qui confirme le caractère aigü de la pénurie d'eau dans cette région du Mali, même à hauteur des besoins élémentaires.

L'urgence de remédier à cette situation était flagrante afin de protéger une économie déjà précaire et d'enrayer des mouvements de population de plus grande ampleur.

4.1 - Ressources en eau

4.1.1 - Nature des ressources

La quasi totalité des ressources en eau traditionnelles est fournie par les nappes superficielles localisées dans les formations de recouvrement et dans la frange altérée du substratum. On peut distinguer deux types de ressources suivant leur importance et leur degré de pérennité:

a) Ressources principales

Elles proviennent des puits villageois, environ 6000 dans la région du projet, en général non revêtus et ne disposant ni de margelle ni de couvercle. Leur diamètre varie de 0,80 m à 1,60 m et leur profondeur de 10 à 25 m. L'épaisseur de la lame d'eau vers le milieu de la saison sèche est de quelques dizaines de centimètres et de nombreux puits se tarissent, parfois 3 à 4 mois seulement après la fin de l'hivernage. Leur utilisation peut cependant être prolongée pendant quelques semaines par des curages et des surcreusements successifs.

Les moyens d'exhaure sont rudimentaires et consistent généralement en un récipient souple en caoutchouc de fabrication locale, le dalou, muni d'une corde. Pour les puits les plus profonds, une poulie ou un treuil monté sur chevalet est parfois utilisé. Plus des deux tiers des puits ont un débit inférieur à $1 \text{ m}^3/\text{jour}$ et seulement 3 % des ouvrages ont un débit supérieur à $5 \text{ m}^3/\text{jour}$.

L'absence de margelle et de couvercle, la permanence de bourbiers et de purin autour des puits ainsi que le mode de puisage entraînent une pollution généralisée des points d'eau.

L'Opération Puits, le Plan International et d'autres Organismes ont réalisé près de 150 puits modernes cimentés dans la région du projet, principalement dans les cercles de Banamba et de Nara. Ces ouvrages, dont la profondeur varie de 20 à 35 m mais pouvant atteindre 65 m (village de Dandougou - Arrdt. de Sébété), ont un diamètre de 1,80 m et sont entièrement revêtus au niveau des formations de recouvrement et de la frange altérée du substratum. La plupart sont semi-permanents et doivent faire l'objet de surcreusements périodiques; de plus, leur eau est polluée dans plus de 50 % des cas.

b) Ressources complémentaires

Elles sont fournies par des puisards creusés dans le lit des marigots et par des mares. Les puisards sont des ouvrages rudimentaires de faible profondeur s'effondrant fréquemment. Ces ressources sont précaires et leur importance est fonction des hauteurs de pluies tombées durant l'hivernage. Elles deviennent négligeables à partir du mois de janvier.

4.1.2 - Volume des ressources en eau

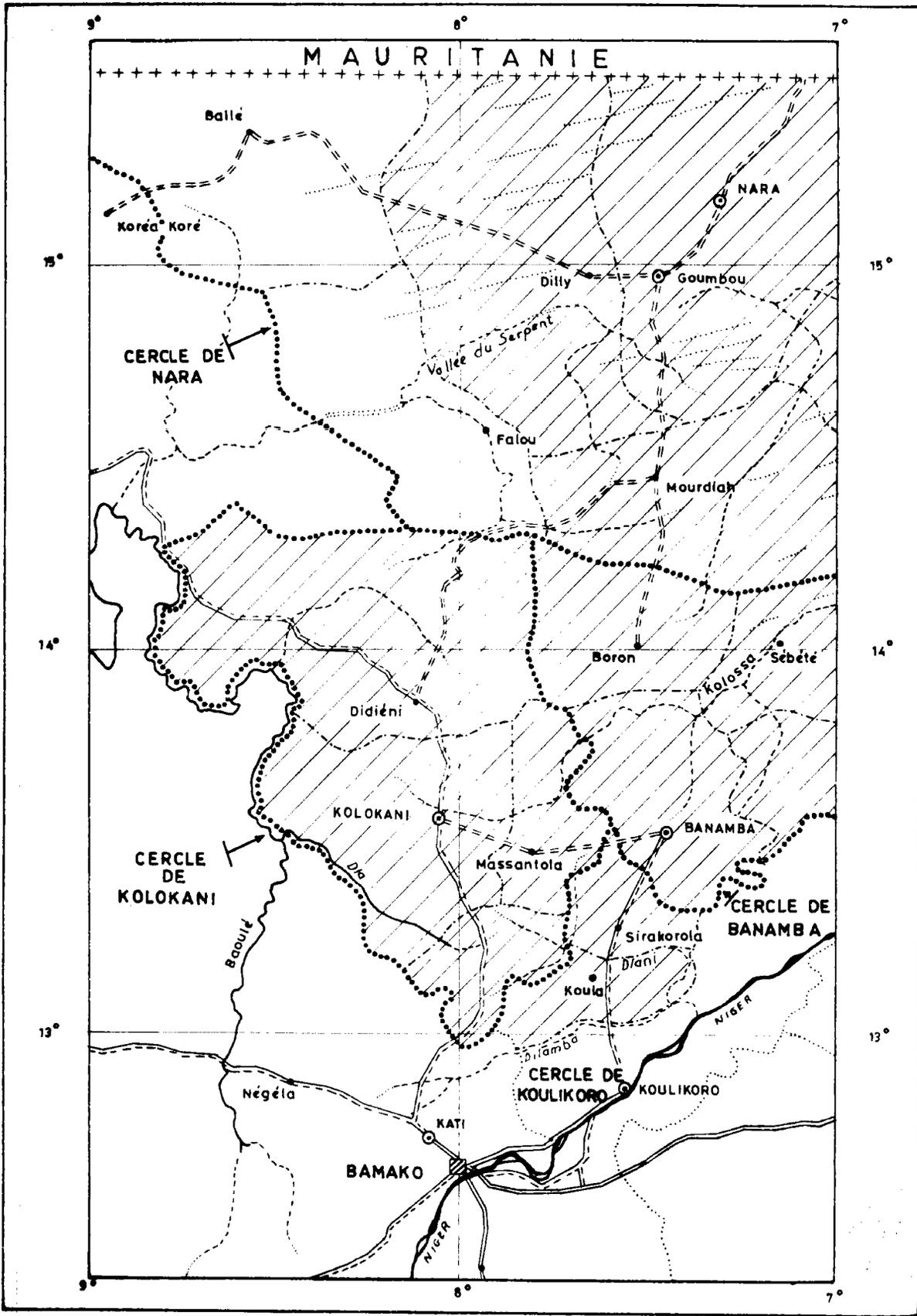
Il a été estimé sur la base d'une enquête systématique dans quatre arrondissements tests représentatifs des différentes conditions pluviométriques, hydrogéologiques et d'habitat dans les secteurs Nord et Sud de la région du projet.

Les chiffres donnés dans le tableau ci-dessous correspondent à une situation moyenne des ressources vers le milieu de la saison sèche en 1981, l'hivernage 1980 étant toutefois déficitaire sur le plan pluviométrique.

REGION DU PROJET LIMITES ADMINISTRATIVES



- Chef-lieu de Cercle
- Chef-lieu d'Arrondissement
------Limite de Cercle
- Limite d'Arrondissement



Zone	Arrondissement	Population (hbt)	Puits productifs (Nb)	Ressources journalières (m ³)	Ressour/jour par habitant (litres)
SUD	Koula	19778	431	446	22,6
"	Massantola	21446	482	500	23,3
"	Boron	21092	441	481	22,8
NORD	Dilly	27863	320	394	14,0

Dans le secteur Sud, à peine plus de la moitié des besoins minimum (40 l/j/habitant) sont satisfaits, et le tiers seulement dans le secteur Nord.

De plus, les fluctuations saisonnières des ressources sont fortes. Dans l'arrondissement de Boron, deux enquêtes successives menées au milieu et en fin de la saison sèche ont montré que plus de la moitié des puits se tarissaient avant le début de l'hivernage et que le débit moyen des puits restant utilisables décroît de 40 % (de 1,2 m³/jour à 0,7 m³/j). Quant aux ressources par habitant, si elles représentent 75 % de la norme minimale au début de la saison sèche, elles ne couvrent plus que 20 % des besoins en mai-juin.

Pour la région du projet, l'évaluation des ressources en eau globales des populations rurales, a été obtenue par extrapolation des données des arrondissements tests, les agglomérations de plus de 5000 habitants étant exclues. Elles sont estimées à 6570 m³/jour pour une population rurale en 1981 d'environ 314.000 habitants répartie dans 679 villages et petites agglomérations dont 5.615 m³/jour pour le secteur Sud (530 villages et 246.000 habitants) et 955 m³/jour pour le secteur Nord (149 villages et 68.000 habitants).

4.2 - Besoins en eau

L'estimation des besoins a été faite pour 1981 sur la base des listes officielles de villages établies par l'Administration et des chiffres de population issus du recensement de décembre 1976 majorés avec un taux annuel d'accroissement de 2,5 %. La norme retenue pour les besoins en eau minimum est de 40 l/jour/habitant suivant les recommandations de la "Décennie de l'eau potable et de l'assainissement".

Les besoins ont été calculés par arrondissement puis par secteur. Cependant, comme un certain nombre de villages sont en situation excédentaire, les chiffres globaux au niveau de l'arrondissement masquent une partie du déficit réel des villages en situation de pénurie; les chiffres de ressources et de besoins ont donc été ventilés en villages excédentaires et villages déficitaires.

Secteur du projet	Valeurs globales (m3/j)		Village excédentaires (m3/j)		Villages déficitaires (m3/j)		
	Besoins	Ressources	Besoins	Ressources	Besoins	Ressources	Déficit
Secteur Sud	9848	5615	1078	1919	8770	3696	5074
Secteur Nord	2717	955	54	125	2663	830	1833
Total	12565	6570	1132	2044	11433	4526	6907

Le taux moyen de couverture des besoins par les ressources est de 52 % et, si on ne considère que les villages en situation de pénurie, il se réduit à 40 % . La résorption de ce déficit dans des délais raisonnables ne peut être envisagée qu'en mobilisant par forage les eaux souterraines des nappes du substratum, l'exécution de puits modernes en grand diamètre ne pouvant servir que d'appoint du fait de leur durée d'exécution.

Deux phases de développement ont été considérées :

à court terme : couverture des besoins quantitatifs non satisfaits de tous les villages déficitaires et satisfaction des besoins en eau potable dans tous les villages de la région du Projet. Le calcul du nombre de points d'eau est fait sur la base d'un débit de $8 \text{ m}^3/\text{jour}$ par forage productif équipé et de 10 l/j/hbt pour les besoins en eau potable des villages en situation excédentaire.

à moyen terme : création de points d'eau additionnels en vue de couvrir tous les besoins en eau fondamentaux par des forages à raison d'un forage par 200 habitants et avec au moins 2 forages par village, les ressources en eau traditionnelles étant utilisées comme appoint pour le développement économique local.

Besoins en forages	Phase 1	Phase 2	Total
Secteur Sud	722	889	1611
Secteur Nord	236	206	442
Total	958	1095	2053

II - R E S U L T A T S

Les nombreux forages exécutés dans la région du projet ont permis de définir les principales caractéristiques hydrogéologiques des grès infra-cambriens et des schistes cambriens ainsi que les critères à prendre en compte pour l'implantation optimale des ouvrages d'exploitation. Les inventaires des ressources en eau traditionnelles des villages ont aussi apporté des informations complémentaires sur les nappes superficielles localisées dans les formations de recouvrement.

1 - HYDROGEOLOGIE

1.1 - Aquifère des grès infra-cambriens

1.1.1 - Nature et extension des zones aquifères

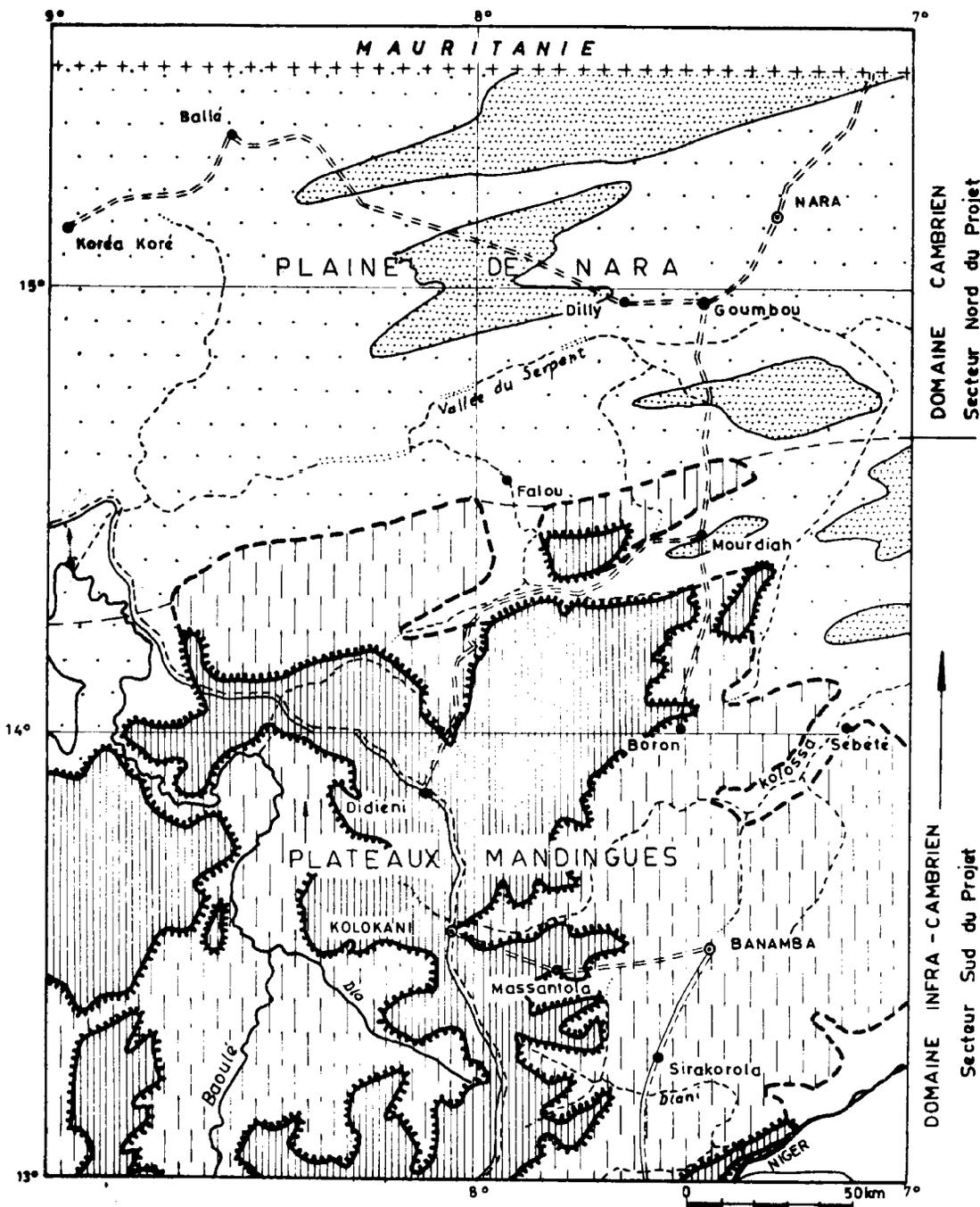
La perméabilité primaire de la série infra-cambrienne est très réduite en raison de la cimentation et de la recristallisation des grès et de la fréquence des intercalations schisteuses. Les réseaux de linéaments, failles et fractures, parfois très denses, les intrusions de dolérites et les longues phases d'altération latéritique ont cependant favorisé le développement d'une perméabilité secondaire et l'apparition de zones aquifères. Leur principale caractéristique est une forte hétérogénéité verticale et latérale avec une stratification des niveaux perméables et une discontinuité spatiale.

Les zones aquifères se présentent comme un système bi-couche avec :

- une partie supérieure, localisée dans la frange altérée du substratum, caractérisée par une perméabilité de type intergranulaire et une porosité élevée qui hydrauliquement s'intègre aux formations de recouvrement pour contenir une nappe superficielle,

- une partie inférieure où les perméabilités d'origine fissurale prédominent qui constitue le réservoir de ce qui, par simplification, a été

CADRE GEOMORPHOLOGIQUE DE LA REGION DU PROJET



LEGENDE

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Dunes orientées Recouvrement sableux et limono-sableux Bordure de la zone mandingue (cote ± 300m) | <ul style="list-style-type: none"> Formation latéritiques anciennes sur plateaux Recouvrement argilo-latéritique sur glacis Falaise limitant la plate-forme ancienne (cote ± 400m) |
|--|--|

a) Nappe superficielle

Elle est d'importance variable suivant le contexte géomorphologique local et la nature lithologique du bedrock. Dans les fonds de vallée et sur les grès, elle est bien développée et dispose de réserves importantes du fait d'une porosité interstitielle élevée. Au contraire, sur les schistes et les dolérites, la zone d'altération souvent très épaisse est de nature argileuse, la porosité utile et la perméabilité devenant faibles. Une étude statistique portant sur 120 forages du cercle de Banamba donne une épaisseur moyenne de la frange altérée de 11,5 m et des valeurs extrêmes de 2 et 26 m. En général, les perméabilités sont trop faibles pour assurer un débit significatif dans un forage de petit diamètre.

b) Nappe du substratum

Les zones fissurées actives peuvent être localisées ou semi-généralisées. Dans un plan vertical, elles peuvent être distribuées irrégulièrement avec la profondeur, entraînant ainsi une stratification des venues d'eau ou être réparties d'une manière plus homogène.

Les zones aquifères localisées sont dépendantes des réseaux de linéaments injectés ou non de dolérite. Leur largeur varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le système de fissures subverticales se combine avec des discontinuités horizontales associées au litage et aux joints de stratification.

Les zones aquifères semi-généralisées, qui peuvent s'étendre sur plusieurs km² et même dans les cas les plus favorables sur quelques dizaines de km², apparaissent lorsque certaines conditions sont présentes: forte densité de linéaments, fissuration dans la masse de bancs de grès compétents encadrés par des séquences schisteuses tendres, alternance gréso-schisteuse en petits lits et larges auréoles de fracturation en bordure des massifs doléritiques intrusifs et dans les épontes des sills interstratifiés.

Quelle que soit leur origine, les discontinuités ouvertes auxquelles la perméabilité de la zone aquifère est attachée décroissent rapidement avec la profondeur par suite du compactage des couches ou de leur obturation par la cristallisation de minéraux secondaires et par le colmatage d'argiles résiduelles. Cette diminution de la perméabilité avec la profondeur apparaît clairement dans la distribution des venues d'eau principales recoupées par les forages (980 données):

Profondeurs des venues d'eau (m)	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	> 100
Pourcentage	6 %	44 %	34 %	14 %	2 %	(0,3%)

Près de 80 % des venues d'eau assurant un débit mesurable à l'air lift, c'est-à-dire au minimum quelques centaines de litres/heure, sont localisées entre 20 et 60 m de profondeur. Au-dessous de 80 m, elles sont rares et, au-delà de 100 m elles deviennent exceptionnelles et de faible importance même si quelques venues d'eau plus profondes ne sont pas exclues. La profondeur moyenne est proche de 40 m; elle est légèrement plus élevée dans la zone Nord-Est (Boron, Sébété) où elle atteint 45 m et plus faible sur la bordure Sud (Sirakorola, Nossombougou) où elle est d'environ 37 m.

Les grès infra-cambriens ne sont donc aquifères que sur une épaisseur limitée n'excédant pas, en général, les 100 premiers mètres sous la surface et les débits exploitables sont principalement rencontrés dans la tranche des 50 premiers mètres.

1.1.2 - Piézométrie

a) Surface piézométrique

Etant donné la nature discontinue, au mieux semi-continue, de l'aquifère, la carte de la surface piézométrique basée sur les niveaux statiques mesurés dans les forages (planche hors texte N° 6) ne représente qu'une image très schématique de la réalité. Elle permet cependant de faire quelques constatations d'ordre général:

- les cotes piézométriques varient entre les altitudes 260 m dans les secteur N-E et 430 m dans la partie haute des plateaux mandingues près de Kolokani. Cette plage de variation au sein d'une même formation est considérable et caractérise à priori un milieu de faible perméabilité générale. De forts gradients hydrauliques apparaissent aussi à l'échelle locale ce qui confirme le caractère discontinu des zones aquifères.

- l'allure générale de la surface piézométrique est étroitement dépendante de la topographie avec des zones hautes calées sous les collines et les surfaces tabulaires résiduelles et des zones basses localisées dans les fonds de vallée. Les lignes de diffluence de la surface piézométrique sont

d'ailleurs voisines des lignes de partage du réseau hydrographique. Les accidents structuraux majeurs et les intrusions doléritiques influencent aussi la morphologie de la surface piézométrique ce qui est conforme à leur fonction hydrogéologique, couloirs de circulation préférentielle ou maillage d'écrans imperméables.

b) Profondeurs des niveaux statiques

La répartition des niveaux statiques dans les forages productifs est la suivante :

Profondeur des N.S. Nombre de forages	0 - 10 (m)	10 - 15 (m)	15 - 20 (m)	20 - 25 (m)	25 - 30 (m)	> 30 (m)	Profond. moyenne (m)
Zone de Kolokani - Didiéni (altitudes 360 - 460 m)	37	89	84	32	4	2	15,0
Zone de Banamba - Boron (altitudes 280 - 400 m)	11	29	19	15	9	14	20,5
Total domaine infra-cambrien	48 14%	118 34%	103 30%	47 14%	13 4%	16 4%	16,5

En dépit des fortes variations topographiques dans chaque zone géographique, les niveaux statiques dans près des trois quarts des forages productifs sont situés à une profondeur comprise entre 10 et 25 m. Les niveaux à une profondeur de moins de 10 m sont rares et correspondent en général à des zones basses et larges de confluence de vallées. Cette distribution relativement homogène des profondeurs des niveaux statiques, quelle que soit l'altitude des forages, confirme l'absence de transfert souterrain à grande échelle dans le domaine infra-cambrien.

La zone de Sébété et la partie amont du bassin de la Vallée du Serpent pourraient cependant faire exception. Les niveaux d'eau s'abaissent progressivement et le dessin des courbes isopièzes suggère une zone de circulation préférentielle vers le NE, peut-être en direction de l'aquifère du Continental Intercalaire du fossé de Nara, bien que les perméabilités rencontrées dans cet secteur soient peu élevées et la discontinuité des zones aquifères probable.

1.1.3 - Caractéristiques hydrauliques - Pompages d'essai

a) Comportement hydraulique

Des pompages d'essai à débit constant de moyenne durée ont été exécutés sur 48 forages répartis dans le secteur Sud du projet avec des débits variant de 3 à 52 m³/h.

En dépit de l'origine fissurale dominante de la perméabilité, l'allure des courbes de descente et de remontée sur les forages d'essai et les piézomètres ressort des méthodes d'interprétation classiques en milieu homogène. Cependant une évolution transitoire régulière durant la durée de l'essai n'a été observée que sur 20 essais. Tous les autres essais montrent des phénomènes anormaux inhérents à la nature discontinue des zones aquifères de l'Infra-cambrien et à la complexité des échanges hydrauliques qui s'y produisent. Les principaux types d'anomalies rencontrées sont :

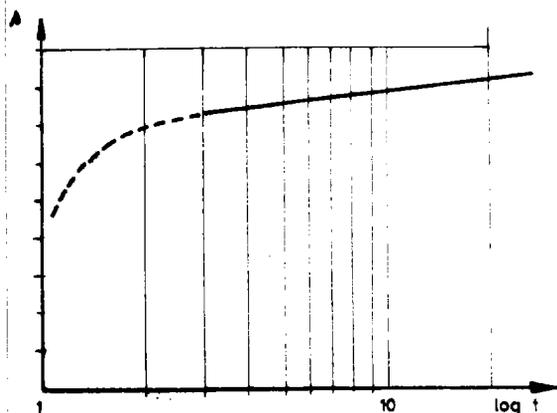
- des rabattements initiaux élevés durant les premières minutes de pompage qui peuvent représenter jusqu'à 80 % du rabattement final et dont l'origine semble devoir être recherchée principalement dans les pertes de charge anormales et les différences de charge hydraulique entre les horizons aquifères recoupés par le forage,
- des phénomènes d'écran imperméable simple ou multiple qui se manifestent par des accroissements rapides et successifs des rabattements,
- des phénomènes de drainance entraînant une stabilisation des niveaux, dans certains cas quelques heures seulement après le début du pompage. Ils correspondent à des transferts entre la nappe superficielle et la nappe du substratum ou entre les différents horizons aquifères du substratum. Des anomalies de type intermédiaire sont aussi rencontrées avec effacement progressif des "écrans imperméables" qui ne correspondent, dans ce cas, qu'à une zone de rupture de perméabilité entre un milieu macrofissuré et un milieu microfissuré ou à une reprise de l'évolution transitoire après une pseudo-stabilisation.

b) Transmissivités

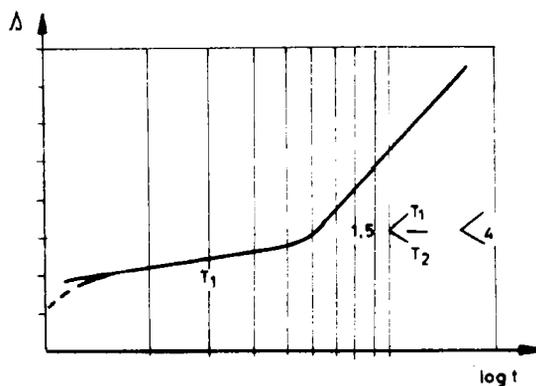
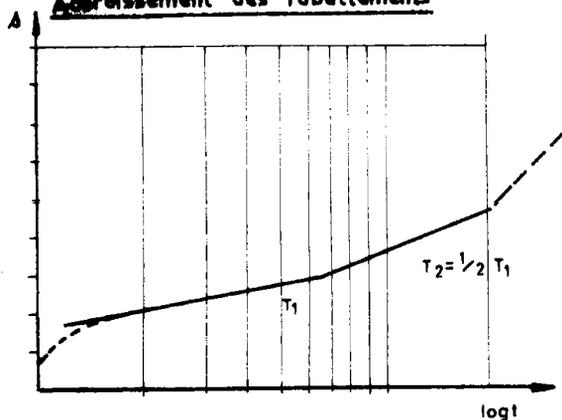
Les transmissivités déterminées lors des essais à débit constant varient entre $2,2 \times 10^{-5}$ et $3,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$ avec un peu plus de 50 % des forages ayant des transmissivités comprises entre 1×10^{-4} et $1 \times 10^{-3,2} \text{ m}^2/\text{sec}$.

AQUIFERE INFRACAMBRIEN
 PRINCIPAUX TYPES d'ANOMALIES RENCONTREES
 dans les ESSAIS de POMPAGE

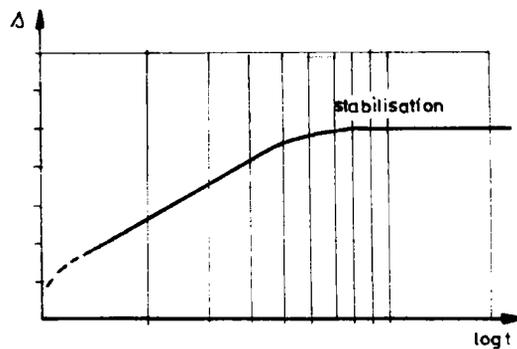
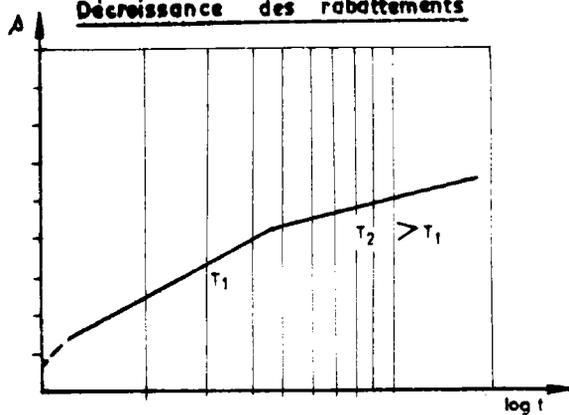
Rebtements énormes en début de pompage



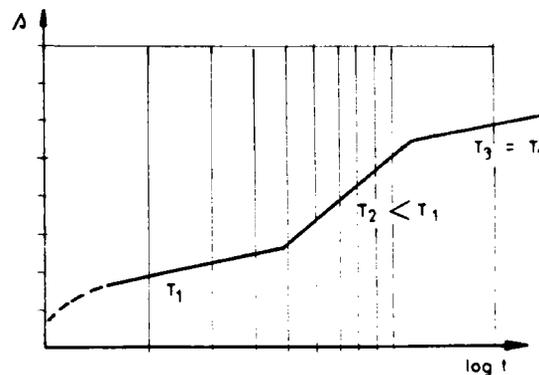
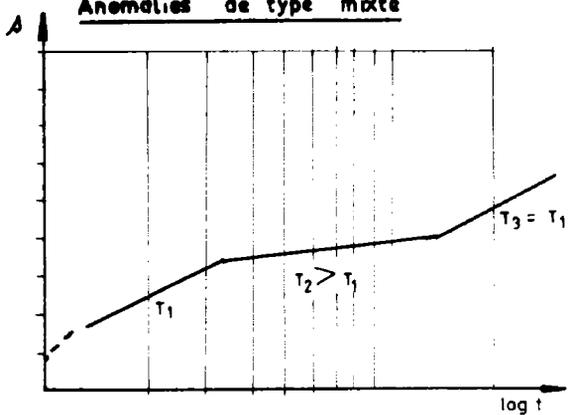
Accroissement des rabattements



Décroissance des rabattements



Anomalies de type mixte



Echelle des Transmissivités (m ² /sec)	10 ⁻²	10 ⁻³	5x10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Nombre de forages	2	8	4	22	8	6
Pourcentage	4%	16%	8%	44%	16%	12%
Tranche de débit d'essai	≥ 20 m ³ /h	10 à 20 m ³ /h	5 à 10 m ³ /h		2 à 5 m ³ /h	

Les fortes variations de transmissivité reflètent l'hétérogénéité des niveaux aquifères avec une densité de fissuration pouvant être localement très élevée.

c) Coefficients d'emmagasinement

Leurs valeurs sont comprises entre 10⁻⁴ et 3 X 10⁻⁶; elles caractérisent un mode de gisement semi-captif ce qui correspond bien au schéma d'un système bi-couche et de venues d'eau stratifiées séparées par des couches semi-perméables. Sur un seul forage „Tioribougou F5 bis, la valeur de S₁ = 9,4 X 10⁻³ paraît correspondre à des conditions locales semi-libres.

1.1.4 - Débits des forages

a) Forages productifs

L'éventail des débits des 449 forages productifs dans la série gréseuse infra-cambrienne est largement ouvert entre, 1 m³/h (débit minimum retenu) et 52 m³/h. Les essais ont montré que cette limite supérieure pouvait être largement dépassée pour atteindre localement plus de 100 m³/h. Cependant, le débit moyen des forages productifs reste assez faible: 4,7 m³/h.

Distribution des débits

Tranche de débit (m ³ /h)	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 20	> 20
Nombre de forages	204	129	79	27	10
Pourcentage	45 %	29 %	19 %	6 %	2 %

45 % des forages ont un débit inférieur à $3 \text{ m}^3/\text{h}$ et l'utilisation de pompe manuelle ou à pied de type classique pour leur exploitation est bien adaptée. En revanche pour 55 % des forages, un tel moyen d'exhaure entraînerait une sous-exploitation de l'ouvrage ce qui serait dommageable sur le plan du développement économique.

Une étude statistique des débits en fonction de la séquence lithologique traversée par les forages ne donnent pas de différence significative entre les séquences gréseuses, gréso-schisteuse ou en bordure des dykes doléritiques. Seuls, les forages recoupant la dolérite ne présentent que des débits faibles. Ce sont donc essentiellement les conditions locales de fracturation et le mode de stratification dans les séries gréseuses et gréso-schisteuses qui contrôlent la magnitude des débits.

b) Forages abandonnés

Si l'on considère la proportion des forages productifs et des forages abandonnés, c'est-à-dire dont le débit est inférieur à $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ exceptionnellement) et qui correspondent à des transmissivités de l'ordre de $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ou inférieures, deux caractéristiques apparaissent :

- les conditions structurales d'implantation sont importantes; le pourcentage des forages productifs est beaucoup plus élevé en cas de fracturation semi-généralisée que pour une fracturation localisée associée à des linéaments. Dans ce cas cependant, la présence de dyke doléritique est un élément favorable. En revanche, le pourcentage des forages abandonnés est très élevé au sein des massifs doléritiques confirmant ainsi leur caractère globalement imperméable.

Répartition des forages productifs en fonction des éléments structuraux

Eléments structuraux	Linéament simple	Linéament avec dyke	Fracturat. sémi-généralisée	Massif doléritique	Total
Nombre de forages	193	172	320	65	750
Forages productifs	97	92	249	11	449
Forages abandonnés	96	80	71	54	301
% forages productifs	50 %	54 %	78 %	17 %	60 %

- le type de séquence lithologique influe aussi fortement sur les taux de réussite. Dans les séquences grés-schisteuses, même si les débits instantanés ne sont pas plus élevés que dans les séries gréseuses, le taux de réussite est meilleur, la présence de dolérite sous forme d'intrusions localisées ou en bordure des massifs intrusifs est aussi un élément favorable.

Lithologie	Grès/Grès quartzite	Grès/ schiste	Grès Dolérite	Dolérite	Total
Nombre de forages	278	280	127	65	750
Forages productifs	156	208	74	11	449
Forages abandonnés	122	72	53	54	301
% Forages productifs	56 %	74 %	59 %	17 %	60 %

1.1.5 - Chimie des eaux

Les eaux de l'Infra-cambrien sont en général très peu chargées en sels. La conductivité moyenne est de l'ordre de 300 micromhos/cm, soit un résidu sec d'environ 0,2 g/l. Les variations de salinité sont essentiellement dues à la lithologie des zones aquifères, les autres facteurs (densité de fracturation, profondeur de l'eau, nature et épaisseur du recouvrement) étant secondaires. Les plages de variation des résistivités en fonction des principaux faciès sont les suivantes :

- quartzites et grès quartzites : de 30 à 200 micromhos/cm
- grès de granulométrie variée : de 50 à 300 micromhos/cm
- grès à passées argileuses : de 100 à 800 micromhos/cm
- grès pelitiques, schistes gréseux, pelites: de 500 à 800 micromhos/cm
- dolérite : de 400 à 700 micromhos/cm

Dans quelques rares forages, des conductivités anormalement élevées ont été rencontrées: Sébété - F5(3250 micromhos/cm), M'Péla (1500 micromhos/cm); elles sont probablement dues à des éléments en trace dispersés dans certains niveaux schisteux. Le pH des eaux est toujours acide avec une valeur moyenne de 6,2 et leur température varie entre 28 et 30°C.

Leur faciès chimique est bicarbonaté calcique et magnésien avec des teneurs en chlorures et en sulfates très faibles, particulièrement dans les formations gréseuses. La silice est souvent présente avec des teneurs pouvant excéder 20 ppm.

1.1.6 - Age des eaux - Recharge

Les analyses isotopiques exécutées par l'AIEA portant sur 20 forages équipés de pompes manuelles, ont donné des informations hydrogéologiques complémentaires. Une majorité (60 %) des échantillons contiennent des teneurs significatives de Tritium, entre 5 et 41 UT. Cela confirme l'existence d'une recharge actuelle de la nappe du substratum. Les teneurs les plus fortes sont généralement rencontrées dans les forages qui ont fait l'objet de pompages d'eau de longue durée ou qui sont intensément exploités (Tioribougou-marché: 37 UT - Kolokani-marché: 41 UT, Banamba F15: 37 UT). Le recyclage des eaux d'infiltration récentes est donc favorisé par le développement de l'exploitation. Cependant, ce taux de renouvellement élevé implique aussi des réserves relativement limitées. Parmi les échantillons qui ont des concentrations en tritium faibles ou nulles, deux cas peuvent se présenter:

- teneurs en C^{14} élevées (plus de 80 %): les eaux sans être "actuelles" sont cependant relativement récentes,

- teneurs en C^{14} de 30 à 40 %: les eaux sont beaucoup plus anciennes (Manta 34,2 %, Massantola 39,2 %). Toutefois, cela n'implique pas l'absence d'une recharge de la nappe par infiltration mais seulement que les volumes d'eau actuellement pompés sont prélevés sur les réserves et que les eaux d'infiltration n'ont pas encore atteint, les niveaux aquifères recoupés par les forages.

En effet, l'existence d'une recharge saisonnière quasi généralisée par infiltration directe ou indirecte est attestée par les fluctuations des niveaux statiques constatées sur tous les forages où des mesures périodiques ont été faites même si, dans plusieurs cas, les variations dans la nappe du substratum sont amorties par la nappe superficielle et par la stratification des niveaux aquifères. Les phénomènes de drainance observés durant certains essais ainsi que la baisse des niveaux enregistrée sur des puits traditionnels situés à proximité du forage d'essai confirment l'existence de ces transferts verticaux.

1.1.7 - Ressources exploitables

Les données hydrogéologiques actuellement disponibles, si elles permettent une étude qualitative sont encore trop limitées dans le temps pour avancer un bilan quantitatif de l'aquifère infra-cambrien. De plus, l'hétérogénéité de l'aquifère rend assez aléatoire l'évaluation des potentiels d'exploitation locaux sur la base des bilans hydrologiques régionaux établis d'une manière classique à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Le programme d'études et de mesures amorcé à la fin de ce projet et qui sera développé par le projet MLI 82/005 devrait apporter les données hydrogéologiques nécessaires pour définir en première estimation le potentiel d'exploitation à long terme des grès de l'Infra-cambrien.

Les résultats obtenus laissent cependant présager des ressources exploitables importantes, quoique irrégulièrement distribuées, et qui devraient être largement suffisantes pour satisfaire les besoins à long terme de la zone d'étude dans le cadre d'une exploitation de type dispersé pour l'alimentation en eau et le petit maraîchage. Cette conclusion s'appuie sur plusieurs observations convergentes:

- L'existence d'une recharge annuelle quasi généralisée même dans le cas d'années pluviométriques déficitaires (1980 et 1981) comme en témoignent les fluctuations piézométriques et les analyses isotopiques.

- Les ressources renouvelables à l'échelle locale sont très supérieures aux volumes actuellement exploités, les pompages actuels n'ayant eu pratiquement aucun effet sur les fluctuations saisonnières naturelles.

- Les réserves stockées dans l'Infra-cambrien, sont importantes en raison de l'épaisseur et de la porosité de la frange altérée et d'une fissuration dense dans le substratum conduisant à une semi continuité des zones aquifères. De plus, les mécanismes hydrauliques identifiés avec les transferts entre la nappe superficielle et la nappe du substratum assurent un volant de réserve important pour l'exploitation par forages du milieu fissuré aux dépens, il est vrai, de la nappe superficielle et des puits traditionnels mais aussi en réduisant l'évapotranspiration qui est le facteur principal de sortie du bilan.

1.1.8 - Recapitulation des travaux de forage dans l'Infra-cambrien
(région du projet)

1°) Volume des travaux

- Nombre de localités	:	209	
- Nombre de localités avec au moins 1 forage productif:		191	(91 %)
- Nombre de forages	:	750	
- Nombre de forages productifs	:	449	(60 %)
- Mètres linéaires forés	:	41882 m	
- Mètres linéaires forés productifs	:	27970 m	(60 %)
- Débit exploitable cumulé des forages productifs	:	2073 m ³ /h	

2°) Caractéristiques des forages

a) <u>Forages productifs</u>	moyenne	minimum	maximum
- Profondeur totale	: 62,2 m	25 m	121 m
- Profondeur du niveau statique	: 16,5 m	5,9 m	38,3 m
- Profondeur des venues d'eau	: 42 m	13 m	102 m
- Longueur tubage	: 26 m	6 m	49 m
- Débit	: 4,7 m ³ /h	0,8 m ³ /h	52 m ³ /h

b) Forages négatifs

(secs, débit inférieur à 1 m³/h ou abandonnés sur difficulté de forage)

- Profondeur moyenne : 46,2 m

1.2 - Aquifère des schistes cambriens

1.2.1 - Nature et extension des zones aquifères

Cette série essentiellement pélitique constitue un ensemble intrinsèquement imperméable où, tout comme pour les grès infra-cambriens, les zones aquifères sont associées au développement local d'une perméabilité secondaire de nature fissurale dans le substratum et interstitielle dans les zones d'altération, ces deux types de perméabilité décroissant rapidement avec la profondeur. Les formations de recouvrement peu épaisses et à dominante sableuse et la frange altérée du substratum ne sont en général pas aquifères.

Le substratum est affecté par deux types de discontinuité :

- des discontinuités linéaires, subverticales, constituées par des réseaux de fractures et de failles souvent injectées de dykes doléritiques. La largeur des bandes fissurées associées à ces linéaments est souvent très étroite, parfois de quelques mètres seulement.

- des discontinuités ayant une certaine extension spatiale et qui sont liées à la mise en place des massifs doléritiques en particulier des laccolites et des sills qui se sont interstratifiés dans les séries sédimentaires.

D'une manière générale, les zones aquifères dans le Cambrien sont très discontinues du fait de la faible compétence des couches de schistes et d'argilites qui ont entraîné un amortissement rapide des tensions induites par les accidents structuraux. La présence de dolérites est cependant un élément favorable dans la mesure où leur mise en place a été accompagnée par une augmentation de la fissuration due au rebroussement local des couches encaissantes et à leur induration par métamorphisme de contact qui a permis leur fragmentation.

Localement des convergences de linéaments où des faisceaux d'accidents parallèles peuvent s'accompagner d'une fusion des zones fissurées et conduire à une zone aquifère d'une certaine extension mais qui reste toutefois limitée.

- Les venues d'eau rencontrées dans les forages productifs varient entre 10 et 70 m de profondeur, avec près de 70 % des valeurs localisées à une profondeur de moins de 40 m. Au-dessous de 60 m, elles sont exceptionnelles et de faible débit. Dans la majorité des forages, ces venues d'eau sont relativement ponctuelles et sont distribuées irrégulièrement avec la profondeur. Elles correspondent à une stratification des zones fissurées séparées par des couches microdiaclasses peu perméables.

1.2.2 - Piézométrie

La profondeur de l'eau mesurée dans les forages varie entre 4 m (Demba Diawara) et 24 m (Siramané) avec une profondeur moyenne de l'ordre de 17 m. Les profondeurs les plus faibles sont rencontrées à l'aplomb des massifs doléritiques et en bordure des grandes mares temporaires.

Des niveaux statiques anormalement profonds ont été rencontrés en bordure de la piste de Falou à N'Galabougou (55 m) et à Siranfara (63 m) qui pourraient s'expliquer dans le premier cas par une zone aquifère isolée en bordure d'un laccolite et dans le second cas par un raccordement avec la nappe généralisée du Continental Intercalaire.

Les cotes piézométriques sont comprises entre les altitudes 235 et 265 m, les cotes les plus basses, au-dessous de 240 m, étant localisées dans la zone de la Vallée du Serpent, entre N'Tomikoro et Safintara.

Le compartimentage de l'aquifère cambrien par les intrusions doléritiques et les grandes plages de substratum sain ou micro-diaclasé peu perméable s'opposent à l'existence d'une surface piézométrique généralisée.

Les fluctuations saisonnières, mesurées sur un petit nombre de points d'observation et pour des périodes réduites apparaissent comme relativement faibles, de l'ordre de 1 à 2 m, mais les mesures ont été faites durant des années à pluviométrie déficitaire. L'évolution des niveaux suite au développement des pompages sur les forages productifs est aussi difficile à estimer en raison du nombre limité d'observations et de leur fiabilité souvent douteuse. Il apparaît cependant qu'à de rares exceptions locales près les volumes prélevés dans les zones aquifères entre 1977 et 1982, estimés à environ 400.000 m^3 , n'ont pas entraîné une baisse sensible des niveaux.

1.2.3 Caractéristiques hydrauliques

a) Transmissivités

Des pompages d'essai à débit constant ont été exécutés sur 10 forages avec des durées variant entre 12 et 48 heures et des débits compris entre 3,9 et $20,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Les coefficients de transmissivité calculés sur les phases de descente et de remontée s'établissent entre $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Dilly campement Modibo) et $5,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Dali F1/F2). La plupart des essais (8 sur les 10 exécutés) montrent des anomalies dans l'évolution transitoire qui apparaissent aussi bien dans les phases de descente que de remontée. Elles sont de deux types :

- une ou plusieurs augmentations brusques de rabattements,
- rabattements initiaux très élevés en regard du rabattement final.

Les anomalies du premier type correspondent à des effets d'écran imperméable qui se manifestent sur le forage d'essai après des durées de pompage de 1 à 3 heures. La position approximative des écrans calculée par la théorie des images est comprise entre quelques mètres et une vingtaine de mètres. Cela confirme l'étroitesse des zones aquifères associées à certains linéaments. A contrario, l'absence d'anomalie de rabattement sur d'autres forages après un pompage de 48 heures, indique que localement les zones fracturées peuvent avoir un certain développement latéral. Les rabattements initiaux très élevés observés dans certains essais avec des baisses de niveau durant les 20 premières minutes (Mamaribougou Torobé, Dilly campement Modibo) pourraient s'expliquer par la stratification des zones perméables avec des charges hydrauliques variables, généralement décroissantes avec la profondeur.

b) Coefficients d'emmagasinement

Un seul coefficient d'emmagasinement a pu être déterminé à partir des observations sur un piézomètre. La valeur calculée, $S = 3,7 \times 10^{-5}$, correspond à une nappe semi-captive. L'allure des courbes de descente $s = f(\log t)$ sur la plupart des autres essais avec une concavité tournée vers le bas durant les premières minutes de l'essai dénote des conditions captives ou semi-captives. Seuls, les essais de Keybane et de Demba Diawara, où les venues d'eau sont relativement peu profondes, présentent une évolution de type semi-libre avec une évolution lente des rabattements durant les premières minutes de pompage précédant la phase transitoire régulière.

1.2.4 - Débits des forages

De nombreux forages ont dû être abandonnés en raison de leur débit insuffisant où même parce qu'ils étaient secs. Les forages productifs représentent 36 % du nombre total de forages. Leur débit moyen est de $5,4 \text{ m}^3/\text{h}$. La distribution des forages en fonction du débit est la suivante :

Débit m^3/h	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 20	20
Nombre de forages	29	25	17	8	2
Pourcentage	35 %	30 %	22 %	10 %	3 %

Les débits spécifiques varient entre $0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ et $6,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$ lors des essais de production de courte durée. Cependant, dans le cas d'une exploitation en vraie grandeur, les débits spécifiques doivent être nettement plus faibles en raison des phénomènes de paroi étanche qui risquent d'apparaître.

La répartition des forages productifs en fonction des conditions géophysiques fait apparaître l'importance des bordures des intrusions doléritiques:

- Bordures d'intrusion doléritique d'extension limitée

Nombre de forages	:	132
Nombre de forages productifs	:	65
Taux de réussite	:	48,5 %

- Zones fracturées au sein du substratum schisteux

Nombre de forages	:	41
Nombre de forages productifs	:	13
Taux de réussite	:	32,5 %

- Zone de massif doléritique

Nombre de forages	:	49
Nombre de forages productifs	:	3
Taux de réussite	:	1,5 %

1.2.5 - Chimie des eaux

La salinité est en général inférieure à 1 g/l. Dans le secteur de Dilly, les résidus secs équivalents aux conductivités mesurées sur 33 forages productifs varient entre 0,3 g/l (Dilly Modibo) et 4,6 g/l (Tanganagaba), avec 60 % des valeurs inférieures à 0,6 g/l et 16 % comprises entre 0,6 et 1 g/l. Des eaux saumâtres ont été rencontrées dans trois forages situés dans les environs de Nara avec des salinités atteignant 17 g/l.

Les eaux sont toujours basiques avec des pH variant entre 7,4 et 8. Leur température est comprise entre 28 et 32°C.

Les faciès chimiques sont fonction de la valeur du résidu sec. Les eaux peu chargées ont un faciès bicarbonaté calcique avec parfois des teneurs en magnésium et en sodium assez élevées, le potassium restant toujours faible. Les sulfates sont présents avec des teneurs croissantes avec la salinité. Les eaux contiennent fréquemment des nitrates avec des concentrations pouvant

atteindre 320 ppm (Tanganagaba). La silice a été identifiée dans plusieurs échantillons avec des teneurs variant entre 18 et 42 ppm.

Les eaux à résidu sec élevé, supérieur à 2 g/l, ont un faciès sulfaté sodique avec des teneurs en chlorures importantes. L'origine de ces très fortes salinités doit probablement être recherchée dans le lessivage de concrétions ou de dépôts salins qui se forment dans les lacs asséchés des régions désertiques.

1.2.6 - Composition isotopique

Deux campagnes de prélèvements ont été faites en collaboration avec l'A.I.E.A, la première entre mars et mai 1980 sur 32 forages et la seconde en mars 1982 sur 13 forages et puits traditionnels en exploitation. Le fait marquant est la présence de tritium dans 85 % des échantillons avec des teneurs variant entre 5 et 46 UT. Ces données confirment l'existence d'une recharge actuelle et le mélange avec des eaux plus anciennes quoique relativement récentes comme en témoigne les teneurs élevées en C^{14} . Les teneurs souvent élevées en tritium sont aussi l'indice de réserves dans les zones fissurées relativement faibles puisque les eaux pompées sont en grande partie des eaux actuelles ou subactuelles.

L'étude des isotopes stables apporte une autre information intéressante. Les dispersions des valeurs δD (-18 ‰, -49 ‰) et $\delta O18$ ($-2,3$ ‰, $-6,9$ ‰) indiquent que l'infiltration n'est pas uniquement liée aux orages de forte intensité qui sont caractérisés par des teneurs en isotopes stables très négatives mais aussi par les averses du début et de la fin de l'hivernage.

1.2.7 - Ressources exploitables

De même que pour l'aquifère des grès infra-cambriens, l'établissement d'un bilan hydraulique et l'estimation même approximative du potentiel des ressources exploitables ne peuvent pas être valablement établis sur la base des mesures hydrogéologiques actuellement disponibles. Une approche classique du bilan hydrologique pour la zone de Nioro-Nara (PNUD, 1974) en utilisant la pluviométrie moyenne mensuelle et des valeurs d'ETP calculées par la formule de Turc avait conduit à une lame d'eau infiltrée de l'ordre de 40 mm par an soit environ 8 % de la pluviométrie annuelle moyenne avec une forte variabilité interannuelle, cette recharge étant complétée par une infiltration indirecte du ruissellement superficiel concentrée dans certaines zones préférentielles

Etant donné la faible densité de fissuration des schistes cambriens donc de l'existence de réserves limitées, les ressources exploitables à long terme sont donc essentiellement liées au potentiel d'infiltration locale.

Alors qu'en régime naturel les eaux infiltrées sont en grande partie reprises par évapotranspiration, en régime d'exploitation une fraction de cette recharge est récupérée soit quasi directement (cas des forages à teneur en tritium élevée) soit indirectement en remplacement des eaux prélevées dans les zones fissurées du substratum (forages avec valeurs intermédiaires de tritium). Le développement de l'exploitation conditionne donc l'accroissement de la fraction utilisable du potentiel de recharge en la soustrayant à l'évaporation par suite du rabattement des niveaux induit par les pompages et par l'amorce d'une circulation au sein de l'aquifère qui, en régime naturel, est très réduite.

1.2.8 - Récapitulation des travaux de forage dans le cambrien

Les travaux de forage dans le secteur de Dilly-Nara se sont déroulés durant la première phase du projet, entre 1977 et 1979 pour la majeure partie. De nombreux forages exécutés étaient des forages de reconnaissance afin de préciser les conditions hydrogéologiques dans les schistes cambriens qui avaient été seulement esquissées par les études antérieures.

a) Volume des travaux exécutés

- Nombre de localités : 45 dont 43 villages et 2 projets (Projet OMBEVI, piste Didiéni - Goumbou)
- Nombre de localités avec au moins 1 forage productif: 36 (84 %)
- Nombre total de forages : 222
- Nombre de forages productifs : 81 (36 %)
- Mètres linéaires forés : 10010 m
- Mètres linéaires forés productifs : 4275 m (43 %)
- Longueur de tubage mise en place : 1560 m
- Débit exploitable cumulé des forages productifs : 406 m³/h

b) Caractéristiques des forages

<u>Forages productifs</u>	moyenne	minimum	maximum
- Profondeur totale	: 54 m	17 m	102 m
- Profondeur du niveau statique	: 16,8 m	4,2 m	63,8 m
- Profondeur des venues d'eau	: 35,6 m	9 m	73 m
- Longueur tubage	: 20,4 m	6 m	50 m
- Débit	: 5,4 m ³ /h	0,8 m ³ /h	24 m ³ /h

Forages négatifs (sec, débit insuffisant, ou abandonnés sur difficulté de forage)

- Profondeur moyenne	: 42,6 m
- Profondeur moyenne dans les schistes	: 54,4 m
- Profondeur moyenne dans les dolérites	: 32,1 m

1.3 - Formations de recouvrement

1.3.1 - Nature et extension des zones aquifères

Les formations latéritiques constituent, avec la frange altérée du substratum infra-cambrien, un aquifère superficiel. Leur épaisseur, variable suivant leur position géomorphologique, peut atteindre une vingtaine de mètres sur substratum gréseux. Sur les schistes et les dolérites, elles sont de nature plus argileuses et leur épaisseur peut dépasser 30 mètres. L'épaisseur moyenne traversée dans les forages dans le secteur Sud de la région du projet est de 13 m.

Le milieu aquifère est de type intergranulaire avec une porosité importante, quoique très variable pour sa fraction utile, et des perméabilités faibles. La différenciation verticale des profils latéritiques entraîne des variations des caractéristiques hydrauliques avec la profondeur. Dans la zone supérieure aérée, les perméabilités verticales sont nettement plus élevées que les perméabilités horizontales (densité des racines, fissuration des zones cuirassées, terriers d'insectes...) et les porosités sont aussi fortes comme en témoignent les résistivités de plusieurs centaines d'ohm.m, jusqu'à 2000 ohm.m, mesurées par la géophysique.

Dans la zone de battement de la nappe, perméabilité et porosité utile sont plus faibles du fait de la prédominance argileuse et dépendent de l'importance de la fraction sableuse.

Dans la zone saturée située à la base des profils latéritiques et surtout dans la frange altérée du substratum si celui-ci est gréseux, la porosité et la perméabilité croissent sans atteindre pour cette dernière des valeurs suffisantes pour permettre une exploitation par des forages de petit diamètre. Les faibles débits moyens journaliers des 431 puits traditionnels inventoriés dans l'arrondissement de Koula le confirme :

Débit en m ³ /jour	0,1 -	0,3 -	0,5 -	1,0 -	3,0 -	5,0 -	10,0 -
	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0	15,0
Nombre de puits	92	82	187	42	17	7	4
Pourcentage	21%	19%	43%	10%	4%	2%	1%

1.3.2 - Piézométrie

D'une manière générale, les niveaux d'eau dans les puits traditionnels sont proches, en moyenne annuelle, des niveaux piézométriques de la nappe du substratum mesurés dans les forages. C'est l'indication d'une bonne relation hydraulique entre la nappe superficielle et la nappe de fissures sous-jacente. Localement on peut cependant rencontrer une nappe superficielle perchée (Mariboubonzi) ou au contraire des niveaux phréatiques plus profonds que les niveaux piézométriques mesurés dans les forages, le caractère semi-captif local de la nappe du substratum étant prononcé (Banamba, Dyongoy).

Les fluctuations saisonnières sont importantes, en moyenne de 5 m sur la période d'observation juin 1980 - juin 1982, et très variables d'un site à l'autre puisqu'elles peuvent atteindre localement une vingtaine de mètres (Boron, Kondo). La montée des niveaux d'eau suit le rythme des précipitations avec un maximum en fin d'hivernage. Comme cette réponse est plus lente et plus limitée dans la nappe du substratum, un gradient hydraulique verticale est créé en début de saison sèche qui se résorbera progressivement entre octobre et juin par suite des transferts de la nappe superficielle vers la nappe du substratum. Les fluctuations inter-annuelles sont aussi perceptibles durant la période d'observation. Les moyennes des profondeurs des niveaux sur le réseau de puits traditionnels mesurés en 1980 et 1981 dans le secteur de Banamba sont respectivement de 11,5 m pour des précipitations de 538 mm et de 10,3 m pour des précipitations de 657 mm.

1.3.3 - Qualité des eaux

Du point de vue chimique, les eaux sont de bonne qualité avec une conductivité moyenne de 300 micromhos/cm et une forte proportion d'eau à moins de 100 micromhos/cm. Cela s'explique par la nature déjà très évoluée des profils latéritiques, les ions solubles ayant été lessivés lors des processus d'altération. Les variations de salinité sont essentiellement dues à la lithologie de la frange altérée du substratum, avec un accroissement de salinité des grès vers les schistes et dolérites. Les quelques salinités anormales (Kiban: 2500 micromhos - Monzonna 1700 micromhos) paraissent liées à une pollution superficielle, d'autres puits dans les mêmes villages ayant une salinité moyenne. En fait, la pollution est surtout bactériologique et se marque peu au niveau chimique. Elle est quasi généralisée dans les puits villageois du fait de leur mode de construction et de l'absence d'aire de protection.

Des mesures de conductivité exécutées périodiquement sur des puits d'observation montrent des variations parfois importantes. Il semble que les variations soient d'autant plus fortes que la nappe est peu profonde, la salinité étant minimum à la fin de l'hivernage grâce aux eaux infiltrées et maximum durant la saison sèche par suite de la pollution cumulée et de l'évaporation.

La température moyenne est de 29° et peut atteindre 31°C. Le pH des eaux est toujours acide, voisin de 6.

1.3.4 - Ressources exploitables

L'exploitation actuelle des formations de recouvrement latéritiques dans le secteur des plateaux mandingues a été estimée à une moyenne journalière à $5615 \text{ m}^3/\text{j}$ soit environ 2 millions de m^3/an à partir de quelques 5200 puits traditionnels. Ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur très approximatifs et masquent une grande disparité dans le temps et l'espace. La baisse des niveaux d'eau dans les puits depuis une dizaine d'années ne reflète pas une surexploitation au sens strict mais une diminution de la recharge consécutive à une longue série d'années déficitaires, la moyenne pluviométrique de la période 1970-1980 étant de 612 mm à Banamba alors que la moyenne sur la période 1936-1969 est de 800 mm.

Cette situation caractérise bien la nature des ressources exploitables de la nappe superficielle; elles sont variables dans le temps, abondantes en année excédentaire et déficitaires en année sèche. Lors d'une séquence d'années sèches ce déficit devient catastrophique à cause du cumul des déficits annuels. Le surcreusement des puits traditionnels pour suivre la baisse des niveaux, n'est qu'un palliatif insuffisant, mais le seul à la portée des villageois, le nombre des puits profonds modernes étant trop réduit et leur rythme de construction trop lent. Le développement par les forages des nappes du substratum va se faire aussi au détriment des ressources exploitables de la nappe superficielle celle-ci lui servant en quelque sorte de réservoir tampon pour amortir les déficits d'alimentation saisonniers et interannuels. Cependant les ressources exploitables du système aquifère nappe superficielle/nappe du substratum seront globalement augmentées, la baisse des niveaux réduisant l'évapotranspiration qui est le principal facteur de sortie du bilan hydrologique.

2 - GÉOPHYSIQUE

2.1 - Volume des travaux

Les résultats obtenus lors des projets PNUD antérieurs avaient mis en évidence l'importance des prospections géophysiques pour l'implantation de forages dans les conditions hydrogéologiques spécifiques de la zone d'étude; le plan d'opération du projet MLI 76/004 prévoyait donc l'utilisation systématique de la géophysique dès le début des activités et pendant toute sa durée.

Dans une première phase, d'octobre 1977 à octobre 1980, une seule équipe a opéré avec principalement la mise en oeuvre des méthodes sismiques et électriques. Les prospections ont été concentrées sur les localités où les forages sur implantations hydrogéologiques étaient négatifs ou pour lesquelles n'existait aucun indice de surface.

A partir de novembre 1980, une deuxième équipe a été rendue opérationnelle et les méthodes électriques et magnétiques ont été privilégiées étant plus performantes et mieux adaptées aux conditions hydrogéologiques des grès infra-cambriens. Les rendements ont alors fortement augmenté et plus de 90 % des sites de forages étaient positionnés par la géophysique. En fin de projet, des implantations étaient encore disponibles pour des travaux de forage ultérieurs dans 86 villages.

Année	Localités Nb.	Prof Résistivité		S.E. Nb.	Base sismique		Prof Magnétique	
		Nb.	Longueur (m)		Nb.	Longueur (m)	Nb.	Longueur (m)
1977	7	45	14970	7	10	595	-	-
1978	27	107	40820	105	80	6165	-	-
1979	28	111	50040	217	147	11360	10	4120
1980	53	192	99285	284	87	6225	8	3550
1981	94	328	144640	589	19	1265	121	68885
1982 Janv-Juin	71	188	80800	438	-	-	296	176720
Total	280	971	430555	1640	343	25610	435	253275

2.2 - Amélioration des résultats par la géophysique

Les taux moyens de réussite en fonction du mode d'implantation géophysique ou hydrogéologique des forages font apparaître un avantage significatif en faveur de la géophysique que ce soit pour l'aquifère des schistes cambriens ou pour celui des grès infra-cambriens.

Aquifère des grès infra-cambriens

Mode d'implantation	Géophysique	Hydrogéologique	Forages abandonnés sur difficultés techn.
Nombre de forages	446	270	34
Nombre de forage +	294	145	-
Taux de réussite	66%	54%	-

Aquifère des schistes cambriens

Mode d'implantation	Géophysique	Hydrogéologique	Forages abandonnés sur difficultés techn.
Nombre de forages	143	65	14
Nombre de forages +	60	21	-
Taux de réussite	42%	33%	-

Ces résultats moyens pour la durée du projet masquent en fait une amélioration continue du taux de réussite grâce à la combinaison des méthodes géophysiques les mieux adaptées aux conditions locales.

Période	Méthodes géophysiques utilisées	Taux de réussite
1977/80	Profils électriques et sismiques	57%
1980/81	Profils électriques - sondages électriques	66%
1981/82	Profils électriques et magnétiques - sondages électriques	70%

Cette augmentation du taux de réussite des forages sur implantation géophysique s'explique aisément par la méthode de travail utilisée qui combine interprétation et réinterprétation des données au fur et à mesure de l'avancement des travaux. L'hydrogéologue ne dispose que d'un nombre de critères limité pour localiser un forage, ces critères étant de plus des indications de surface repercutant plus ou moins distinctement des anomalies dans le substratum à travers les formations de recouvrement. Le géophysicien dispose en revanche d'un ensemble de paramètres quantitatifs, aussi bien dans le plan vertical qu'horizontal, qui lui permettent de définir avec précision l'anomalie dans le substratum, sa géométrie et ses caractéristiques, ainsi que la structure et la nature lithologique des épontes. La confrontation systématique des épures d'interprétation et des résultats des forages permet alors de dégager progressivement des cas types d'implantation en fonction des conditions hydrogéologiques locales.

2.3 - Cas-type d'implantation

Les zones aquifères dans le substratum gréseux ou schisteux correspondent à des zones fracturées ou altérées qui se comportent comme des anomalies physiques au sein d'un milieu encaissant relativement homogène:

- en prospection électrique, elles constituent du fait de leur porosité, des compartiments conducteurs localisés dans un milieu électriquement plus résistant,

- en prospection sismique, elles représentent, en raison de la fracturation, des compartiments à faible vitesse de propagation des ondes dans un milieu compact ou la vitesse des ondes sismiques est élevée,

- en prospection magnétique, les intrusions de roches doléritiques au sein d'une série sédimentaire entraînent une variation du champ magnétique total mesuré à l'aide d'un magnétomètre à protons.

Dans le domaine des schistes cambriens, les zones aquifères sont généralement associées à une fracturation très localisée associée à des linéaments structuraux injectés ou non de dolérite ou au contact schistes/massif doléritique. Les zones productives n'excèdent pas en général quelques mètres de largeur, légèrement plus si le linéament est injecté de dolérite, et l'implantation des forages nécessite le positionnement très précis de cette zone au niveau du substratum que seules les bases sismiques peuvent assurer. Les méthodes électriques (profils et sondages) et magnétique permettent de localiser approximativement l'anomalie qui sera étudiée en détail par la sismique.

Dans le domaine des grès infra-cambriens le mode de gisement des eaux souterraines est plus varié. Les principaux cas-types sont les suivants :

a) Fracturation localisée

- linéament sans intrusion doléritique,
- linéament avec intrusion doléritique,
- contact entre unités lithologiques différentes :
 - schistes/grès
 - compartiment sédimentaire dans un massif doléritique

b) Fracturation semi-généralisée

- fracturation dans les grès
- fracturation dans les schistes et les séries schisto-gréseuses
- fracturation liée à la mise en place de sill doléritique

Cette classification en quelques cas types, si elle permet de définir un certain nombre de critères d'implantation, ne doit pas cependant faire oublier que l'hétérogénéité des aquifères gréseux et schisteux est telle que chaque village requière une interprétation spécifique.

2.4 - Exemples d'implantation

On les a limités à quatre villages, deux dans les schistes cambriens et deux dans les grès infra-cambriens. Les 3 premiers exemples représentent des types de fracturation localisée, le dernier exemple présente un cas de fracturation semi-généralisée.

2.4.1 - Schistes cambriens

- DEMBA TCHARKITARA (fig. 4a) - Cas d'un dyke étroit.

Le village se situe dans une zone ensablée à végétation clairsemée ou aucun linéament n'est décelable sur photographie aérienne. Un profil de résistivités a permis d'identifier une anomalie conductrice au sein du substratum schisteux dont les limites ont été précisées par une base sismique. Sur les 3 forages exécutés, deux sont implantés sur les épontes de l'anomalie, le troisième sur un des bords intérieurs de l'anomalie. Un seul des forages a donné un débit exploitable. Il est situé sur une des épontes et capte une zone fissurée sur une hauteur d'une quinzaine de mètres sous le niveau statique; cette zone est exactement localisée au contact schiste-intrusion doléritique. Le forage implanté à l'intérieur de l'anomalie a rencontré la dolérite altérée directement sous le recouvrement puis la dolérite saine. Le forage exécuté sur l'autre éponte a atteint, en raison du pendage du dyke, la dolérite à trop faible profondeur sous le niveau statique et l'épaisseur réduite de la zone fracturée n'a pu fournir qu'un débit insuffisant.

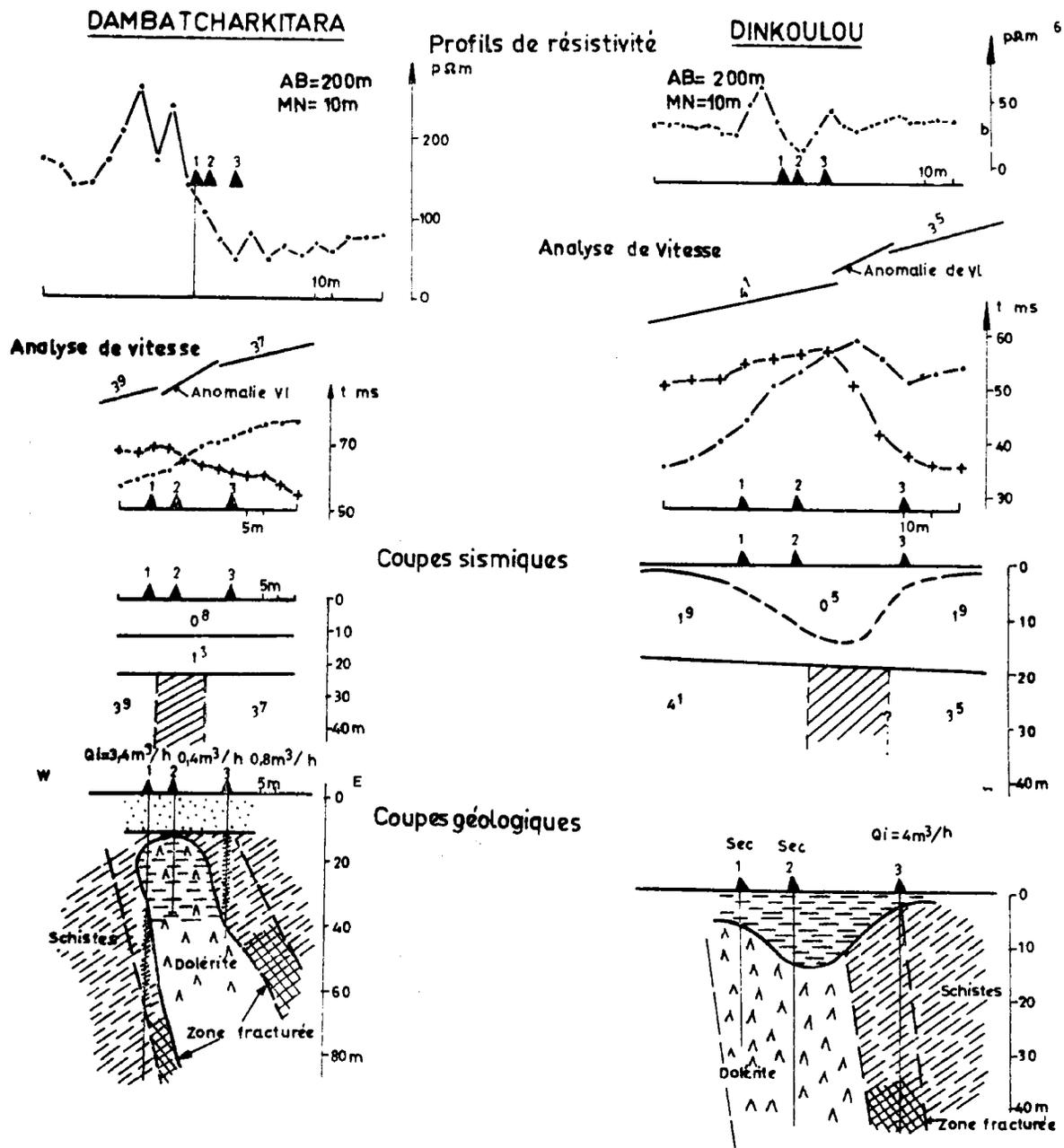
Ce cas de dyke incliné est le plus fréquent. L'anomalie électrique permet de découvrir la structure la plus favorable l'anomalie sismique permet de la définir avec précision au toit du substratum. Cependant, la difficulté d'apprécier le pendage du dyke doléritique avec ces méthodes conduit à un certain taux d'échec, une zone de schistes fracturés suffisamment épaisse devant être recoupée avant d'atteindre la dolérite pour obtenir un débit exploitable.

- DINKOULOU (Fig. 4b) - Cas d'un dyke large

Le linéament observé sur photographie aérienne n'est pas repérable avec précision sur le terrain. Une anomalie conductrice bien contrastée est associée à une anomalie de vitesse et à des retards sismiques caractéristiques de la présence d'un noyau d'argile d'altération. La structure correspond à un dyke large (environ 50 m) incliné, qui a entraîné la fracturation des schistes au contact du flanc Est comme le montre le forage positif F3. Le compartiment sismique lent se localise dans ce cas sur le contact schistes-dolérite, c'est-à-dire sur la zone fracturée, alors que le minimum de l'anomalie électrique se trouve au droit de la dolérite du fait de l'épaisseur des argiles d'altération.

Ces deux exemples font ressortir la difficulté d'implantation des forages lorsque les zones fracturées sont injectées de dolérite.

EXEMPLES D'IMPLANTATION GEOPHYSIQUE SUR LINEAMENT INJECTE DE DOLERITE



2.4.2 - Grès infra-cambriens

- DOUBABOUGOU (fig. 5a) - Contact grès-schistes.

La zone de contact géologique entre grès et schistes a été découverte par prospection électrique sans aucun indice sur la photographie aérienne permettant d'orienter les investigations. Aucune anomalie magnétique n'apparaît sur les zones de contact fissurées ce qui implique l'absence d'intrusion doléritique.

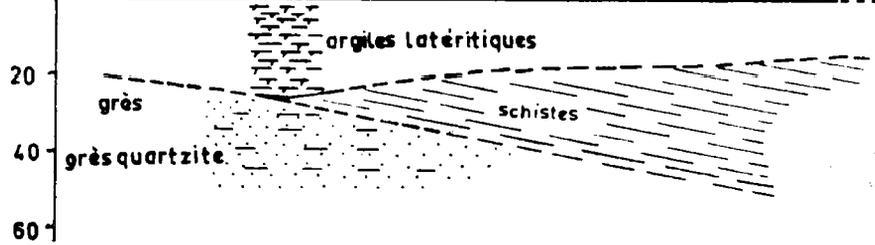
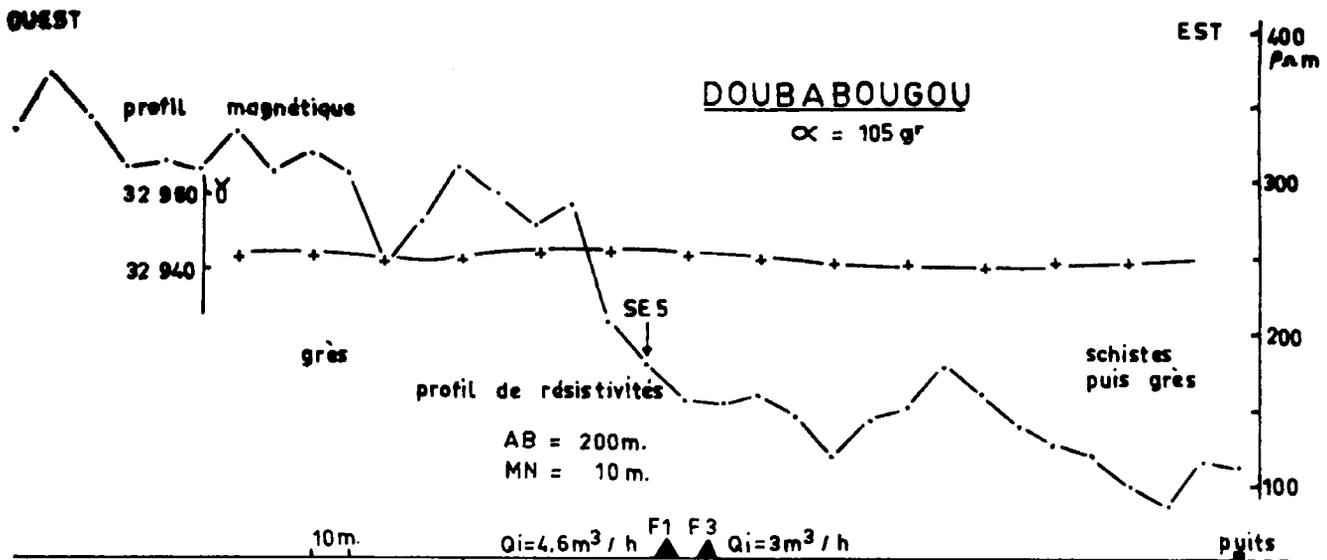
L'anomalie électrique correspond à un contact entre deux compartiments de résistivités différentes, d'une part des grès et grès quartzites résistants (plusieurs centaines d'ohm-m) et d'autre part des schistes relativement conducteurs (une centaine d'ohm-m). La zone de passage des grès aux schistes est étalée et correspond à la disposition en biseau du contact : (variation latérale de faciès ou pendage). Les venues d'eau dans les forages F2 et F3 sont relativement peu profondes, entre 26 et 32 m, dans des grès fins fissurés. Cette zone favorable est localisée par une fissuration et une altération différentielle.

Le contact grès-schistes dans d'autres cas est plus net et subvertical et correspond à une faille (Sosso).

- SAGABALA (fig. 5b) - Fracturation semi-généralisée

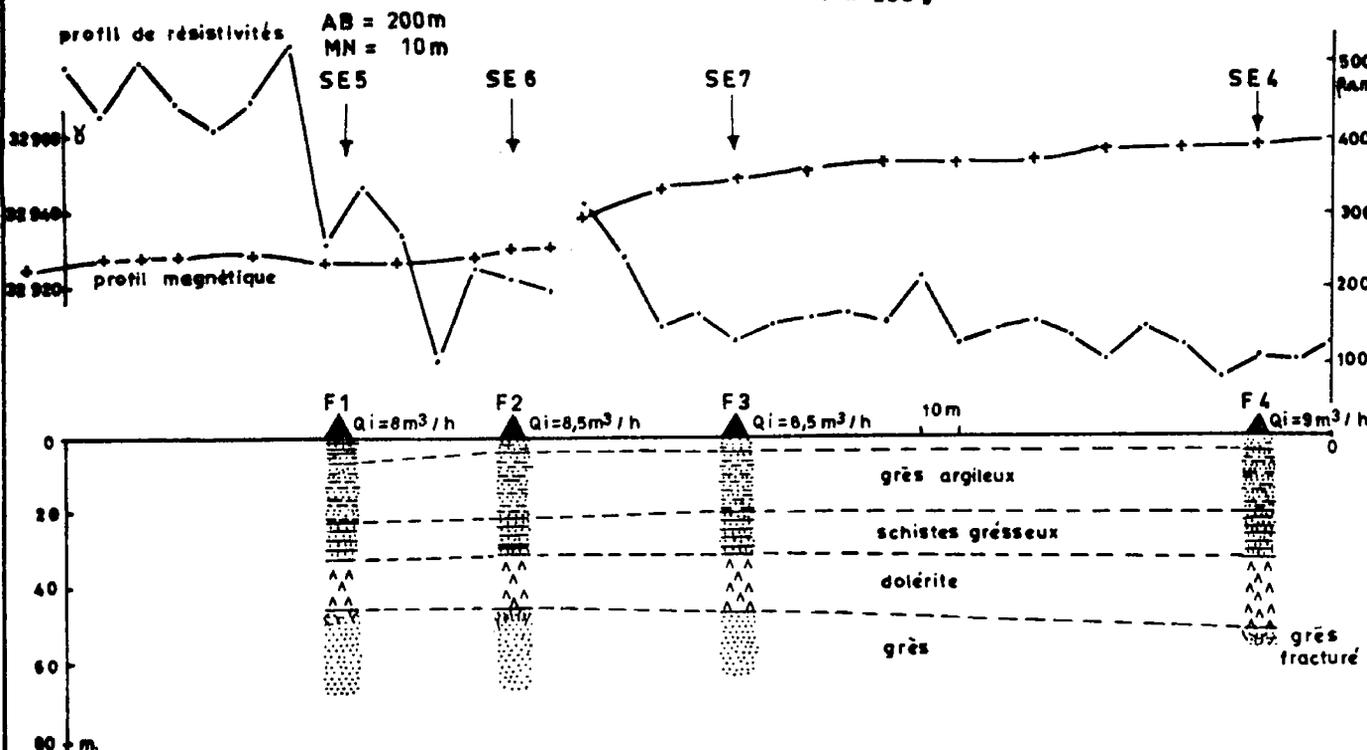
Le village est établi sur le flanc d'une petite colline bordée à l'Ouest par une dépression et un marigot. A hauteur de la colline, les profils magnétiques de forme ondulée et les S.E. effectués révèlent la présence quasi certaine de la dolérite; par contre, celle-ci paraît avoir disparu le long du marigot et au pied de la colline au vu des diagrammes de S.E. faiblement ascendants et des profils magnétiques presque plats. Les 4 forages implantés à ce niveau ont d'abord recoupé des grès argileux et des schistes gréseux fracturés et un peu aquifères puis de la dolérite sous forme de sill - son épaisseur étant comprise entre 12 et 18 mètres - et enfin des grès pyriteux et fissurés. La venue d'eau principale est située au mur de la dolérite, entre 48 et 50 mètres de profondeur, dans un banc de grès quartzite très fracturé et peu épais (2 mètres). Les débits, identiques pour les 4 forages, sont de l'ordre de $9 \text{ m}^3/\text{h}$. L'absence, normale dans le cas d'un sill doléritique horizontal et peu épais, d'anomalie électrique et magnétique significative sur les profils géophysiques, ou d'horizon résistant épais sur les diagrammes de S.E., a conduit le foreur à traverser la dolérite. Sans information géophysique, ce dernier eut normalement arrêté le forage après quelques mètres dans la dolérite, forage alors improductif.

EXEMPLES D'IMPLANTATION GEOPHYSIQUE
SUR CONTACT LITHOLOGIQUE



SUD NORD

SAGABALA
 $\alpha = 235 \text{ gr}$



La mise en place des sills doléritiques suffisamment épais (plusieurs mètres) s'accompagne presque toujours d'une fracturation semi-généralisée plus productrice au mur qu'au toit où les phénomènes d'altération ont tendance à réduire la perméabilité.

2.5 - Rendement - Prix de revient

Une équipe de géophysique consacre en moyenne trois journées de travail par village. Les conditions hydrogéologiques étant très variables, dans certains villages favorables à fracturation semi-généralisée deux journées de prospection s'avèrent suffisantes alors qu'au contraire, dans les zones de batholites doléritiques ou à occurrence de quartzites, la prospection peut se prolonger pendant une semaine en étendant progressivement le domaine d'investigation pour atteindre les bordures de la zone défavorable. Pour certains villages aux conditions hydrogéologiques particulièrement défavorables, les études ont été faites en deux phases séparées par l'exécution d'un ou deux forages de reconnaissance permettant d'étalonner les paramètres géophysiques.

Prix de revient 1982 (en régie directe - 2 équipes)

Amortissement du matériel

- Véhicules	13.000 \$
- Equipement géophysique.....	6.500 \$

Frais de fonctionnement

- Salaire personnel national et frais de déplacement.....	21.300 \$
- Divers consommable.....	6.300 \$
- Carburants	20.000 \$

Supervision

- Consultant (2 mois/an).....	20.000 \$
-------------------------------	-----------

Total année..... 87.100 \$

Prix de revient par village (100 villages/an)..... 870 \$

Prix de revient par implantation(52 implantations/village) 435 \$

Soit l'équivalent d'un peu moins de 4 mètres de forage.

3 - FORAGES

La liste des localités dans lesquelles des forages ont été exécutés est donnée dans l'annexe 1. Les caractéristiques techniques et hydrogéologiques des forages sont indiquées dans l'annexe 2. La planche hors texte n° 1 montre la position des villages.

3.1 - Récapitulation des travaux exécutés

Zone aquifère	Localités		Forages		Mètres forés		Débit exploit. m ³ /h
	Nombre	+	Nombre	+	Nombre	+	
INFRA-CAMBRIEN	209	191	750	449	41882	27970	2073
CAMBRIEN	45	36	222	81	10010	4275	406
Sous total Région du projet	254	227	972	530	51892	32245	2479
SOCLE	9	8	40	22	2045	1082	79
INFRA-CAMBRIEN	37	34	131	75	7590	4670	738
CONTINENTAL INT. ET TERMINAL	7	7	16	12	833	559	204
Sous total - Hors Région du Projet	53	49	187	109	10468	6311	1021
Total Travaux	307	276	1159	639	62360	38556	3500

+ : concerne les forages productifs

Les taux de réussite moyen est de 55 % pour les forages, 62 % pour les mètres forés productifs et de 90 % pour les localités (au moins un forage productif) :

Le débit moyen d'un forage productif est de 5,5 m³/h (4,7 m³/h dans la région du projet et 9,4 m³/h hors région du projet).

La profondeur moyenne des forages est de 54 m (60 m pour les forages productifs).

A titre de comparaison on peut signaler que 300 forages, dont 66 productifs, avaient été exécutés avant 1977 dans le cadre des activités des projets MLI 67/507 et 74/001.

3.2 - Travaux exécutés par atelier

L'augmentation des rendements des ateliers de forage est très nette à partir de 1979, aussi bien en ce qui concerne le nombre de forages que les mètres linéaires forés, grâce au passage à deux postes de travail durant la totalité de la campagne 1980/81 et pour partie durant les campagnes 1979/80 et 1981/82.

L'amélioration du taux de réussite est aussi manifeste puisqu'il passage de 38 % en 1977/78 à 70 % en 1981/82. Elle reflète l'affinement progressif des méthodes d'implantation et du rôle déterminant de la prospection géophysique telle qu'elle a été mise en oeuvre.

3.3 - Débit des forages productifs

Le débit cumulé des forages productifs est de 3500 m³/h dont 2479 m³/h disponibles pour la région du projet et 1021 m³/h pour les forages situés hors de cette région. Les débits ponctuels sont très variables de 1 m³/h à plus de 50 m³/h. Pour les forages qui n'ont pas fait l'objet de pompage d'essai, les débits correspondent à des essais de production de courte durée. Pour un certain nombre de ces forages, le débit réellement exploitable à long terme pourrait être plus faible en particulier dans l'aquifère des schistes cambriens où les ressources apparaissent localement limitées. Dans d'assez nombreux villages, des doublets de forages productifs distants de 10 mètres ou moins, ne pourront être équipés en fonction de leur capacité optimale du fait des interférences.

La plupart des forages devant être exploités en régime discontinu, que ce soit par des pompes manuelles ou des pompes solaires et éoliennes, les débits mentionnés sont en général, représentatifs de la capacité des pompes à installer. Les tableaux indiquant la répartition des forages productifs par tranche de débit donnent des indications sur les différents types de pompe qui pourraient être installées afin d'exploiter au mieux de forages :

- débit de 1 à 3 m³/h : pompe manuelle ou à pied
- " de 3 à 20 m³/h : pompe à énergie solaire
- " de plus de 20 m³/h : pompe à énergie thermique (en l'état actuel des techniques)

FORAGES EXECUTES

Année Atelier de Forage	1977		1978		1979		1980		1981		1982 (1/1 - 15/7)		Total
	Nb. Forage +	%	Nb. Forage +	%									
FAILING	10		-		-		-		-		-		10
ATLAS COPCO 1	104		45		89		130		104		55		527
ATLAS COPCO 2	-		-		16		154		73		57		300
FORACO	40		48		36		112		43		43		322
Total	154		93		141		396		220		155		1159

FORAGES PRODUCTIFS ET TAUX DE REUSSITE

Année Atelier de Forage	1977		1978		1979		1980		1981		1982 - a		Total
	Nb. Forage +	%											
FAILING	9	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9 (90)
ATLAS COPCO 1	27	26%	17	38	43	48	72	56	74	71	40	73	273 52
ATLAS COPCO 2	-	-	-	-	14	88	73	47	48	66	39	68	174 54
FORACO	24	60%	17	35	23	64	57	51	32	74	30	70	183 57
Total	60	39%	34	37%	80	57%	202	51%	154	70%	109	70%	639 55%

METRES LINEAIRES FORES

Année Atelier de Forage	1977		1978		1979		1980		1981		1982 (1/1 - 15/7)		Total
	Mètres forés +	%											
FAILING	345		-		-		-		-		-		345
ATLAS COPCO 1	3722		2389		4999		6462		5820		3525		26947
ATLAS COPCO 2	-		-		1037		8385		4554		4120		18096
FORACO	2397		2341		2304		5366		2163		2431		17002
Total	6464		4730		8340		20213		12537		10076		62360

METRES FORES PRODUCTIFS ET POURCENTAGE

Année	1977		1978		1979		1980		1981		1982 (a)		Total
	Mètres forés +	%											
Atelier de Forage	311	90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	311 (90)
ATLAS COPCO 1	1080	29	1131	47	2756	55	4117	64	4497	77	2621	74	16202
ATLAS COPCO 2	-	-	-	-	944	91	4688	56	3149	69	2980	72	11761
FORACO	1397	58	926	40	1543	67	2967	55	1771	82	1678	69	10282
Total	2788	43%	2057	44%	5243	63%	11772	58%	9417	75%	7279	72%	38556

DEBITS CUMULES DES FORAGES PRODUCTIFS (en m³/h)

Année Atelier de forage	1978	1978	1979	1980	1981	1982 1/1-15/7	Total
FAILING	90	-	-	-	-	-	90
ATLAS COPCO 1	105	76	187	275	362	144	1149
ATLAS COPCO 2	-	-	74	541	127	96	838
FORACO	108	83	186	298	320	428	1423
Total	303	159	447	1114	809	668	3500

DISTRIBUTION DES DEBITS DES FORAGES PRODUCTIFS PAR AQUIFERE

Région du Projet

Aquifère	Débit m ³ /h	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 20	≥ 20	Débit moyen
INFRA-CAMBRIEN	Nb. For	204	129	79	27	10	4,7
	%	45%	29%	18%	6%	2%	
CAMBRIEN	Nb. For	29	25	17	8	2	5,4
	%	35%	30%	22%	10%	3%	
Total/moyenne	Nb. For	233	154	96	35	12	4,8
Région du Projet	%	44%	29%	19%	7%	2%	

Hors-région du Projet

Aquifère	Débit m ³ /h	1 - 3	3 - 6	6 - 10	10 - 20	≥ 20	Débit moyen
SOCLE	Nb.	12	6	2	2	-	-
	%	55%	27%	9%	9%	-	
INFRA-CAMBRIEN	Nb.	15	18	12	11	10	9,2
	%	22%	28%	18%	17%	15%	
Continental Inter- calaire et Terminal	Nb.	1	1	-	6	4	-
	%	8%	8%	-	50%	34%	

3.4 - Travaux prévus et exécutés

3.4.1 - Résultats globaux

Le plan d'opération prévoyait trois ateliers de forage en 1977 et cinq en 1979. Le projet a en fait opéré avec 2 ateliers jusqu'en juin 1979 puis avec trois ateliers à partir d'octobre 1979 jusqu'à la fin du projet.

- Nombre de machines X mois : Prévu : 225

Réalisé: 131

	Nombre total		Nombre/machine/mois	
	Prévu	Réalisé	Prévu	Réalisé
Mètres forés	de 76.000 à 100.000	62.360	de 337 à 444	476
Forages	2.000	1.159	8,9	8,85
Forages productifs	1.000	639	4,5	4,88
Mètres forés productifs	-	38.556	-	294

Bien que n'ayant disposé que des 56 % des moyens matériels estimés nécessaires initialement pour l'exécution du programme prévu, le projet a cependant réalisé 82 % du nombre minimum de mètres de forage et 64 % du nombre de forages productifs.

Les rendements moyens obtenus ont été sensiblement supérieurs aux prévisions: 108 % des longueurs maximum forées et du nombre de forages productifs par unité de forage et par mois.

3.4.2 - Résultats par atelier de forage

- Les deux sondeuses ATLAS COPCO ont enregistré les meilleurs résultats tant pour le métrage foré que pour le nombre de forages exécutés par unité de forage et par mois.

- La relative médiocrité des rendements obtenus avec la sondeuse mixte Foraco est à imputer à deux causes principales: exécution d'ouvrages pour lesquels la méthode du rotary à la boue était obligatoire, méthode nettement plus lente que celle du marteau fond-de-trou uniquement utilisée par les autres ateliers et décision de consacrer en grande partie cette machine à des demandes urgentes émanant d'agglomérations parfois situées à de grandes distances des zones d'intervention du Projet.

- La sondeuse Failing n'a pas été transformée en machine combinée rotary/marteau fond-de-trou et n'a pu être utilisée que pendant trois mois.

- La seconde sondeuse combinée n'a pas été fournie.

Atlas Copco I - Nombre de machines X mois : Prévu : 54

Réalisé: 51

	Nombre total		Nombre/machine/mois	
	Prévu	Réalisé	Prévu	Réalisé
Mètres forés	de 25.000 à 30.000	26.947	de 463 à 555	529
Forages	500	527	9,3	10,3
Forages productifs	250	273	4,6	5,3

Atlas Copco II - Nombre de machines X mois : Prévu : 42

Réalisé: 26

	Nombre total		Nombre/machine/mois	
	Prévu	Réalisé	Prévu	Réalisé
Mètres forés	de 17.000 à 23.000	18.096	de 405 à 548	696
Forages	500	300	11,9	11,5
Forages productifs	250	174	6,0	6,7

Foraco : Nombre de machines X mois : Prévu : 54

Réalisé: 51

	Nombre total		Nombre/machine/mois	
	Prévu	Réalisé	Prévu	Réalisé
Mètres forés	de 16.000 à 23.000	17.002	de 296 à 426	333
Forages	de 500 à 600	322	de 9,3 à 13	6,3
Forages productifs	de 250 à 300	183	de 4,6 à 6,5	3,6

Failing: Nombre de machines X mois : Prévu : 45

(non transformée en machine combinée) Réalisé: 3

	Nombre total		Nombre/machine/mois	
	Prévu	Réalisé	Prévu	Réalisé
Mètres forés	de 8.000 à 11.000	345	de 177 à 243	115
Forages	210	10	46	3,3
Forages productifs	105	9	23	3

3.5 - Prix de revient

L'analyse des dépenses enregistrées entre le début de janvier 1977 et la fin de juin 1982 permet de calculer les prix de revient et leur évolution, du mètre de forage, de l'ouvrage productif et des débits nouveaux mis à la disposition des populations.

Les dépenses ont été actualisées au coût de 1982 en adoptant une inflation annuelle de 13 %. La totalité des matériels étant de provenance européenne, les dépenses ont de plus été ajustées sur un taux de FM 500 pour un dollar des E.U; elles comportent les postes suivants :

- Personnel international: le coût retenu est celui supporté par l'Agence d'exécution pour la totalité du personnel expatrié.

- Personnel national: salaires et indemnités des fonctionnaires et employés temporaires mis à la disposition du projet par le Gouvernement ou recrutés localement.

- Matériel consommable: outils de forage, pièces de rechange, pneumatiques et tubages, compte-tenu des stocks en fin d'année (environ \$ 700.000 fin juin 1982 en stock et en cours de livraison).

- Matériel durable: véhicules, engins et matériels non consommables d'atelier, de chantier et de bureau à l'exception des pompes d'exhaure. Les durées d'amortissement admises sont de cinq ans pour les véhicules légers et le petit matériel et de huit ans pour les camions et engins; l'amortissement est calculé linéaire sans intérêt sur la durée de vie du matériel.

Les dépenses imputées aux forages concernent l'ensemble des activités et des équipes du projet: photo interprétation, prospection par géophysique, forages, pompages d'essai et entretien du matériel y compris celui des moyens d'exhaure, à l'exclusion de la fourniture des pompes.

L'examen du tableau suivant permet de tirer un certain nombre de conclusions :

- Le fait d'utiliser les unités de forage à deux postes par jour, comme en 1980 et 1982, diminue de plus de 30 % le prix de revient du mètre foré; en revanche, les arrêts de chantier, causés en 1978 par l'incompétence du responsable de l'atelier de réparations mécaniques et en 1981 du fait de contraintes budgétaires qui ont interdit l'acquisition des pièces de rechange nécessaires en temps voulu, ont été déterminants dans l'augmentation des coûts.

PRIX DE REVIENT (US \$)

	1977	1978	1979	1980	1981	1 semestre 1982
Personnel international	442.291	490.705	572.129	651.097	446.659	317.500
Personnel national	41.000	47.000	104.000	180.000	178.000	80.000
Matériel consommable	50.173	407.397	325.982	460.846	429.000	338.000
Fonctionnement	91.649	30.973	158.544	759.108	518.288	281.666
Matériel durable (amort. 8 ans)	850.000	656.000	656.000	1.363.000	1.190.000	1.290.000
Matériel durable (amort. 5 ans)	308.000	360.000	431.250	706.000	674.800	563.840
Amortissement matériel durable	167.850	165.500	168.250	311.450	283.710	137.009
Total dépenses annuelles	795.963	1.141.575	1.328.905	2.362.500	1.852.657	1.054.175
Dépenses actualisées 1982	1.464.668	1.858.047	1.917.473	3.016.000	2.093.502	1.054.175
Taux moyen de change du \$	492	420	425	418	533	593
Dépenses ajustées (1 \$ = 500 FM)	1.441.233	1.560.759	1.629.852	2.521.407	2.231.673	1.250.252
Nombre de mètres forés	6.464	4.730	8.340	20.123	12.537	10.076
Coût ajusté du mètre (\$)	223	330	195	125	178	124
% personnel	61	47	50	35	33	34
% fonctionnement	18	39	27	52	52	54
% amortissement	21	14	13	13	15	12
Nombre de forages	154	93	141	396	220	155
Coût ajusté du forage (\$)	9.359	16.782	11.559	6.367	10.144	8.066
Nombre de forages productifs	60	34	80	202	154	109
% forages productifs	39	36	57	51	70	70
Coût ajusté du forage productif	24.016	45.905	20.375	12.480	14.491	11.470
Débites reconnus (m3/h)	303	159	447	1.114	809	668
Investissement par m3/h	4.755	9.818	3.647	2.263	2.759	1.872
Débit moyen par forage (m3/h)	5,1	4,68	5,6	5,5	5,6	6,95

Le prix de revient du mètre foré s'établit à \$ 190 dans le cas de chantiers conduits à un poste par jour et à \$ 125 dans le cas de deux postes, le dollar étant compté à 500 FM.

- Le prix du forage productif, pour un taux de réussite de 65 %, ne devrait pas dépasser \$ 12.500 dans des régions présentant des conditions naturelles comparables.

- Le montant de l'investissement théorique nécessaire pour mettre à la disposition des populations rurales un débit de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ est de l'ordre de \$ 1.300 soit de \$ 6,5 par habitant à raison de 40 litres d'eau par habitant et par jour et pour un pompage continu de 8 heures par jour. En fait, les moyens d'exhaure actuellement disponibles, dont le débit n'excède pas $1 \text{ m}^3/\text{h}$, imposent un investissement réel nettement supérieur.

- L'incidence du coût du personnel a régulièrement diminué jusqu'en 1980 en raison du remplacement d'une partie du personnel expatrié par du personnel national sans que les rendements obtenus n'aient été diminués.

- L'ensemble des frais de fonctionnement, personnel exclus, par unité de forage à deux postes (soit: matériel consommable, frais divers, pièces détachées, outils de forage, carburants) représente une dépense de l'ordre de \$ 350.000, comprenant \$ 95.000 pour les matériels consommables, \$ 90.000 pour les carburants et lubrifiants et \$ 165.000 pour les pièces de rechange et dépenses diverses.

4 - ASPECT LOGISTIQUE - GESTION ET ENTRETIEN DU MATERIEL

4.1 - Equipement

L'ensemble des travaux dépendant directement du bon fonctionnement du matériel de forage et de transport, une attention toute particulière a été apportée aux contraintes imposées par la livraison en temps voulu sur les chantiers des carburants, lubrifiants, tubages, pièces de rechange et outils de forage nécessaires compte-tenu des délais de livraison, souvent très importants, des matériels importés. Cet élément prend toute son importance quand on considère le parc de véhicules et d'engins mis à la disposition du Projet:

- Trois unités de forage : 12 Land Rover (dont une affectée à l'hydro-géologue responsable (travail à 2 postes par jour)

3 machines de forage, 3 compresseurs,
6 groupes électrogènes dont trois pour les campements

6 camions porteurs (sondeuses et compresseurs et 3 camions d'accompagnement

180 fûts de 200 litres pour le stockage du carburant.

- Deux équipés de géophysique : 4 Land Rover
2 camions d'accompagnement
2 groupes électrogènes
- Trois équipes d'entretien des pompes : 3 Land Rover
6 mobylettes
- Une équipe de pompages d'essai : 1 camion porteur
1 compresseur
2 Land Rover
- Deux techniciens du Développement Communautaire : 2 mobylettes
- Hydrogéologue et géophysicien : 2 Land Rover
- Atelier de réparations mécaniques: 4 camions de ravitaillement des chantiers
2 véhicules de liaison
7 Land Rovers (dont 3 de secours)
- Direction : 2 véhicules de liaison
3 Land Rover

Par ailleurs, la connaissance des consommations moyennes en carburants et lubrifiants de chaque équipe de terrain est indispensable à l'établissement des prévisions budgétaires, les chiffres ci-dessous correspondent à des chantiers situés dans un rayon de moins de 400 km de Bamako.

- Unité de forage : Essence : 2,35 l/ml de forage, soit environ 13.000 l/an
Gas-oil : 10,60 l/ml de forage, soit environ 60.000 l/an
- Equipe de géophysique : Essence : 8.500 l/an
Gas-oil : 2.000 l/an
- Equipe d'entretien des pompes: (200 pompes): Essence : 10.000 l/an
Gas-oil : 2.500 l/an
- Equipe de pompages d'essai : Essence : 2.200 l/an
Gas-oil : 11.600 l/an

- Hydrogéologue : Chantier de forage : 1.500 l/an
Superviseur : 4.500 l/an
- Consommation totale (non compris entretien des pompes)
 - Essence : 7 l/ml de forage
 - Gas-oil : 12,15 l/ml de forage
- Lubrifiants (par unité de forage) : Huile moteur essence : 360 l/an
Huile moteur Diesel : 1000 l/an
Huile compresseur : 650 l/an
Huile marteau fond-de-trou: 650 l/an

4.2 - Logistique

L'organisation suivante a été mise en application :

- Communication radiophonique en début et en fin de journée avec tous les chantiers, y compris les bases d'entretien des pompes de façon à ce que la Direction soit informée sans retard de l'avancement des travaux et d'éventuels incidents.
- Ravitaillement en carburants par citernes souples de 5.000 l pour le gas-oil et 2.000 l pour l'essence à partir de Bamako; stockage sur les chantiers dans des fûts de 200 litres.
- Entretien courant des matériels de chantier par les équipes de terrain avec une visite mensuelle de vérification par les mécaniciens de l'atelier de réparations mécaniques qui effectuent également sur place les réglages nécessaires.
- En cas de panne importante, repli du matériel vers l'atelier de réparations de Bamako où il est possible d'assurer la réparation complète de tous les moteurs sauf les rectifications des vilebrequins, des blocs moteurs et des pompes à injection. La fréquence moyenne est d'une révision des compresseurs et des moteurs de camion par an et la réparation complète des moteurs des compresseurs tous les deux ans.

4.3 - Organisation des chantiers

Chantier de forage

Chaque machine est en principe affectée à un arrondissement déterminé dans le chef lieu duquel est située la base principale; lorsque les emplacements de forage sont situés à plus de 50 km de cette base, une base secondaire mobile est constituée à partir de laquelle les équipes se rendent chaque jour sur les chantiers; toutefois, la sondeuse FORACO a été réservée à la solution des problèmes urgents posés en dehors de la région du projet.

Chantier de géophysique

En raison de la plus grande mobilité du matériel, des bases mobiles seulement sont installées.

Equipes d'entretien des pompes

Trois bases fixes à Dilly, Kolokani et Banamba situées chacune au centre de gravité des trois zones d'opération.

Equipe de pompage d'essai

Elle se déplace avec l'ensemble du matériel de pompage d'un emplacement au suivant.

4.4 - Acquisition des matériels

Elles sont effectuées par deux processus différents: commandes prévisionnelles correspondant à une consommation annuelle moyenne de pièces de rechange ou de tubages et à une durée de vie raisonnable du matériel roulant avec des délais de livraison compris entre 9 et 12 mois et commandes locales pour des besoins urgents imprévisibles tout particulièrement pour des pièces de rechange. Les grandes facilités accordées pour ces achats locaux ont d'ailleurs permis de limiter à un minimum le nombre de journées d'arrêts techniques des chantiers de forage donc d'obtenir un prix de revient du mètre de forage largement inférieur à ceux pratiqués dans la région par les entreprises privées.

Les locaux et le personnel mis à la disposition par le Gouvernement pour la gestion de ce matériel ont été satisfaisants.

5 - MOYENS D'EXHAURE

5.1 - Politique Gouvernementale

Elle s'est dégagée progressivement des observations faites sur le terrain en cours de travaux; elle a pris définitivement forme en janvier 1982 et est strictement appliquée depuis cette date; ses grands principes sont les suivants :

- Les besoins essentiels des populations rurales ont été fixés à 40 litres d'eau par habitant et par jour, y compris l'abreuvement du cheptel villageois inséparable de la population. Les pompes actuellement disponibles sur le marché international fournissant un débit maximum de $1 \text{ m}^3/\text{h}$, il est nécessaire d'exécuter et d'équiper un forage pour 200 habitants environ; par mesure de sécurité et pour prévenir les conséquences des défaillances mécaniques des pompes, il est cependant prévu deux forages par village de moins de 200 habitants.

- Les populations doivent prendre financièrement et techniquement en charge l'entretien des installations de pompage mises à leur disposition.

- L'Etat ne fournit gratuitement qu'une pompe par agglomération, les suivantes devant être acquises par les communautés rurales.

- La fabrication locale de moyens d'exhaure, du type India MK II, doit être favorisée au maximum.

5.2 - Essais des moyens d'exhaure

Ils ont pu être entrepris et poursuivis grâce à deux sources de financement importantes, l'UNICEF (\$ 594.000) et le FENU (\$ 898.000); c'est ainsi que les premières pompes ont été installées dès 1977 et leur fonctionnement a été suivi jusqu'à la fin des opérations; dix pompes à énergie solaire étaient en cours d'installation en juin 1982.

Le matériel essayé provenait des fabricants suivants :

- Briau (France)
- Sofretes - Mengin (France)
- India (Inde)
- Déplechin (Belgique)
- Bodin (Belgique)
- Monarch (Canada)
- Monolift (Grande Bretagne)

Les données statistiques obtenues ne sont utilisables que pour les types de pompes installées depuis plusieurs années, chaque pompe ayant fait l'objet d'une fiche sur laquelle sont consignées toutes les réparations effectuées :

- Les pompes Vergnet (Sofretes) présentent des avantages certains du fait de la simplicité de leur mécanique et de la possibilité de les mettre en place sans moyen de levage; elles peuvent donc être entretenues sans difficulté par les réparateurs villageois. En revanche, tout au moins dans les régions sableuses, l'usure des pièces du corps de pompe est très rapide.

- Les pompes Briau peuvent fonctionner pendant deux ans sans panne importante mais, n'étant pas démontables par les populations, elles nécessitent d'importantes charges récurrentes annuelles (71.000 FM). Le Gouvernement a décidé de ne retenir que les modèles fournissant un débit supérieur à $2 \text{ m}^3/\text{h}$.

- Les pompes India présentent l'avantage d'un prix d'achat relativement faible et surtout celui de pouvoir être fabriquées localement.

- Les autres types de pompes sont en place depuis une période trop courte pour qu'il soit possible de tirer une conclusion des essais en cours et plus particulièrement pour ce qui concerne les pompes Depléchin, Monarch et Monolift utilisées sur des forages dans lesquels le niveau dynamique est situé à plus de 45 mètres.

En plus de ces pompes à motricité humaine, le FENU a financé 10 pompes à énergie solaire d'une puissance totale de 13 KW. La mise en route de ces installations est prévue pour le début du mois de février 1983; sans attendre cette date et pour valoriser au maximum les investissements consentis, les dispositions suivantes ont déjà été adoptées en accord avec les responsables locaux et avec l'assistance de deux techniciens du développement communautaire:

- affectation de toute l'eau non utilisée pour les besoins domestiques à des actions de développement: maraîchage, construction, etc.

- prélèvement, par un comité de gestion villageois, d'une partie des suppléments de revenus ainsi obtenus et paiement à ces comités de gestion par les éleveurs transhumants et sédentaires d'une redevance pour l'abreuvement des troupeaux; les sommes recueillies seront consacrées à l'entretien des installations et à l'acquisition de pièces de rechange.

Les estimations effectuées d'après les rendements obtenus autour des pompes manuelles déjà installées et les prix de commercialisation des produits agricoles ont en effet montré qu'un revenu brut de 110.000 FM par an et par are était courant, l'irrigation de cette surface demandant environ 900 litres d'eau par jour dans les régions sahéliennes.

5.3 - Utilisation et entretien des pompes

Dans le courant de l'année 1982, deux enquêtes ont été menées, l'une sur la consommation journalière d'eau des forages (10 villages) et l'autre sur la potabilité des eaux des forages (55) et des puits (98).

5.3.1 - Consommation journalière

L'étude a été réalisée dans 5 agglomérations situées dans le cercle de Nara et dans 5 situées dans celui de Kolokani.

Cercle de Nara

Village	Nombre d'utilisateurs	Nombre de pompes	Volume pompé l/jour	Consommation l/hbt/jour
Fogoti	300	2	18.000	60
Makana	175	1	7.870	45
Tougouné	98	1	5.590	57
Sorokoni	150	1	7.500	50
Dara	200	1	11.000	55

Cercle de Kolokani

Village	Nombre d'utilisateurs	Nombre de pompes	Volume/pompe l/jour	Consommation l/hbt/jour
Kéna	420	1	12.600	30
Bamabougou	158	1	5.330	33,7
N'Galabougou	210	2	7.350	35
Niamabougou	300	1	6.900	23
Tiénéguebougou	150	2	4.350	29,2

On constate donc une consommation plus élevée (50 l/jour/habitant) dans le Cercle de Nara où la quantité du cheptel est plus importante et les conditions climatiques plus rudes qu'à Kolokani (30 l/jour/habitant). On a d'ailleurs admis, pour l'ensemble des zones d'interventions du projet, un forage pour 200 habitants équipé d'une pompe manuelle ou à pied fournissant un débit de 800 litres/heure pendant une durée de pompage de 8 à 12 heures par jour.

5.3.2 - Entretien des pompes

Sur les 639 forages productifs exécutés, 321 ont été équipés avec des pompes : 200 Vergnet

28 Briau

1 Duba

2 Bodin

1 Monarch

78 India

1 Monolift

2 solaires

dont 60 dans le cercle de Nara (Base de Dilly)

151 dans celui de Kolokani (Base de Kolokani)

26 dans celui de Koulikoro)
51 dans celui de Banamba) (Base de Banamba

33 divers (Bamako)

dans 224 agglomérations

A titre d'exemple, on peut effectuer le calcul de l'entretien pour les pompes Vergnet dont les premières ont été installées en 1976 donc pour lesquelles les coûts sont les plus représentatifs. On peut en effet signaler que sur les 80 pompes India en place depuis octobre 1981, deux seulement ont nécessité une réparation avant juin 1982.

Il a été possible de définir, pour chacune des bases, une relation entre le nombre des réparations en fonction du temps écoulé depuis la date d'installation de la pompe et le nombre d'utilisateurs.

On a ainsi trouvé que ce type de pompe nécessitait :

- 1 réparation importante par an et par tranche de 250 habitants
à Kolokani

- 1,8	"	"	"	"	"	à Banamba
- 2	"	"	"	"	"	à Dilly

Cette augmentation du Sud vers le Nord correspond étroitement à une aggravation des conditions d'utilisation.

Un changement de pièces coûtant en moyenne 11.972 FM, il faut donc prévoir par tranche de 250 habitants :

11.972 FM	de pièces de rechange	par an	à Kolokani	et par pompe
21.540 FM	"	"	"	à Banamba
32.325 FM	"	"	"	à Dilly

A ces dépenses, s'ajoutent les frais de personnel, de location des bâtiments, d'amortissement et de fonctionnement des véhicules établis à 17.740 FM par pompe et par an.

Jusqu'en janvier 1982, ces charges étaient assurées sur le budget du Projet de même que les frais d'installation (34.950 FM) et la fourniture (600.000 FM) des pompes. Depuis cette date, la totalité de ces dépenses incombe aux communautés rurales, étant entendu que, pour chaque village, la première pompe est fournie gratuitement. L'application de cette nouvelle politique n'a été possible que grâce à la formation de réparateurs villageois poursuivie depuis 1979 de telle sorte qu'à l'heure actuelle plus des deux tiers des villages possédant une pompe Vergnet sont en mesure d'en assurer techniquement l'entretien complet.

Cette décision a produit un effet positif immédiat qui s'est traduit par une diminution spectaculaire du nombre des interventions des équipes d'entretien qui est passé de 3,80 par pompe en 1981 à 0,6 en 1982.

5.3.3 - Organisation matérielle

Pour atteindre ces objectifs, le projet a mis en place trois équipes d'entretien et de formation basées à Dilly, à Kolokani et à Banamba. Chacune d'entre elles rayonne sur une superficie d'environ 10.000 km² et dispose de bâtiments à usage de logement, de bureau et de magasin, d'un véhicule tout-terrains et de deux mobylettes. Le personnel d'une base est constitué par un responsable, un chauffeur, un installateur et un gardien, celle de Kolokani dispose en plus d'un maçon et d'un magasinier et celle de Banamba d'un maçon.

La tâche de ce personnel consiste à :

- installer les pompes fournies par les Organisations Internationales ou acquises par les communautés rurales,
- assurer la formation des réparateurs villageois,
- conseiller les communautés rurales pour l'aménagement des points d'eau,

- gérer le stock de pièces de rechange et en assurer la vente,
- effectuer les réparations importantes qui dépassent la compétence des villageois.

5.4 - Aspect sanitaire

Une série d'analyses bactériologiques effectuées en 1976 dans le cercle de Kolokani avait montré que, sur les échantillons d'eau prélevée dans des puits traditionnels, les moins pollués présentaient plus de 10^7 coliformes par litre alors que les normes les moins rigoureuses estiment qu'une eau doit être considérée comme impropre à la consommation à partir de 10^3 coliformes par litre.

Dans le cadre des activités du projet, une étude similaire a été effectuée en 1982 par le personnel de l'Ecole de Médecine avec le matériel d'analyse mis à sa disposition par le projet; elle a porté sur les eaux de 55 forages, de 98 puits et de 22 récipients servant à transporter et stocker l'eau tirée des forages.

Vingt huit forages étaient aménagés avec dalle en ciment, enceinte de protection et abreuvoir à distance et les 27 autres ne comportaient qu'un aménagement sommaire consistant en une dalle en béton de 1 m^2 servant de socle à la pompe, quatre puits seulement étaient aménagés.

Les résultats des analyses bactériologiques ont indiqué que :

- un seul forage fournissait une eau indiscutablement polluée ($1,89.10^5$ coliformes par litre) et 50 une eau totalement absente de pollution fécale,
- vingt-quatre puits seulement fournissaient une eau pure (dont deux aménagés),
- la moitié des récipients contenaient une eau contaminée bien que provenant de forages exempts de toute pollution.

L'ensemble de ces observations permet d'affirmer que :

- l'eau des puits, aménagés ou non, est polluée dans la majorité des cas,
- l'aménagement complet des forages n'est pas indispensable à la salubrité de l'eau pompée,
- un effort important doit être entrepris dans le domaine de l'éducation sanitaire des populations rurales afin d'éviter la pollution de l'eau des forages pendant son transport et son stockage; cet effort avait d'ailleurs été recommandé par la mission d'évaluation du PNUD de décembre 1979.

5.5 - Fabrication locale des moyens d'exhaure

En vue de résoudre le problème de l'acquisition des pièces de rechange et du coût des pompes, la mission d'évaluation d'octobre 1981 avait recommandé d'entreprendre la fabrication locale de la pompe India Mark II non protégée par un brevet. Des contacts ont donc été pris avec l'Entreprise malienne de maintenance de Sikasso dont le fonctionnement était en partie assuré par l'ONUDI en vue d'aboutir, en 1987, à une production annuelle de 1200 pompes correspondant approximativement aux besoins du pays.

A cet effet, le matériel de l'atelier de Sikasso devait être complété et les Organisations Internationales devaient assurer l'encadrement et la formation du personnel national. Les financements suivants ont été ou sont sur le point d'être obtenus: FENU : \$ 1.040.000, Coopération Helvétique: \$ 235.000, PNUD-ONUDI: \$ 537.000.

Un prototype a été mis en place en janvier 1982 et donne pleinement satisfaction; vingt autres exemplaires doivent être fournis avant la fin de 1982.

De plus, la possibilité de construire un nouveau type de pompe constitué par la fontaine INDIA et le corps Sahéla (mis au point par le projet) et pouvant fournir un débit supérieur à $2 \text{ m}^3/\text{h}$ est actuellement à l'étude.

6 - FORMATION DU PERSONNEL NATIONAL

Elle a été essentiellement assurée en cours de travaux sur le terrain par le personnel international. Les résultats obtenus peuvent être illustrés par l'évolution, depuis 1977, de la part des dépenses totales du projet à imputer au personnel expatrié: foreurs, mécaniciens, hydrogéologues, géophysicien, chef du matériel et Conseiller Technique Principal.

Les coûts suivants ont été actualisés en 1982 en tenant compte d'un taux d'inflation de 13 % par an et ajustés sur un taux de change de 1 dollar pour 500 FM pour que les résultats annuels puissent être comparés entre eux :

	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Nbre Experts inter.	10	10	9	7	5	5
Coût Pers. expat. (\$)	818.238	671.476	703.718	696.673	538.365	303.40
Dépenses totales (\$)	1.441.233	1.560.759	1.629.852	2.521.407	2.231.673	1.250.25
% du coût du Pers.	56,8	43	43	27,6	24,1	24,2
Nbre de mètres forés	6.464	4.730	8.340	20.123	12.537	10.07
Coût du mètre foré	223	330	195	125	178	12

A cette diminution constante du coût du personnel international a correspondu une baisse du prix de revient du mètre de forage qui est passé de \$ 223 en 1977 à \$ 124 en 1982; il apparait donc que les rendements obtenus par le personnel national ont été sensiblement équivalents à ceux du personnel international qu'il a remplacé.

Par ailleurs, l'expert chargé de l'entretien des pompes a quitté son poste en janvier 1980 après avoir formé une équipe; depuis 1980, deux puis trois équipes d'entretien sont placées sous la responsabilité d'un ingénieur national.

Enfin, les rôles du géophysicien et de l'hydrogéologue sont de plus en plus limités à l'organisation générale des travaux puis à l'interprétation et à la synthèse des résultats obtenus sur le terrain par les équipes nationales; on peut également ajouter qu'à partir d'octobre 1982, le poste d'expert géophysicien sera supprimé et remplacé par des missions de consultant dans la mesure où cette nouvelle formule n'entraîne pas de diminution inacceptable du taux de réussite des forages.

III - R E C O M M A N D A T I O N S

1 - POURSUIITE ET EXTENSION DES OPERATIONS

Les inventaires des besoins et des ressources en eaux souterraines qu'il a été possible de dresser dans les zones d'intervention du projet en utilisant les résultats des travaux de reconnaissance et d'exploitation devront être précisés au cours des années à venir; il s'agit en effet plus spécialement de mieux définir l'importance des ressources renouvelables en interprétant l'incidence des prélèvements par pompage et des variations climatiques sur l'évolution des nappes. L'influence des exploitations par les pompes à énergie solaire en cours d'installation devra donc être soigneusement contrôlée et le réseau de points d'observation actuellement en place devra être étendu.

Malgré la difficulté d'interprétation de ces phénomènes pour des nappes discontinues et circulant en milieu fissuré, il sera possible de proposer aux planificateurs des données de base leur permettant d'établir un programme de développement à long terme utilisant, dans la mesure où les contraintes économiques et humaines le permettent, la totalité des ressources disponibles. Il est en effet apparu que, si le fait de fournir de l'eau aux agglomérations en quantité et en qualité suffisantes pour subvenir à leurs besoins essentiels représentait déjà une amélioration considérable de leurs conditions de vie, il ne suffisait que d'un faible investissement supplémentaire, accompagné toutefois d'une infrastructure technique poussée, pour permettre la création de nombreuses activités annexes d'une importance déterminante pour le développement économique des populations rurales.

Les méthodes de travail mises au point depuis la reconnaissance jusqu'à l'estimation des ressources en eau dans les régions où les travaux du projet ont été concentrés devraient être appliquées à l'ensemble du pays et à tous les projets analogues, compte-tenu d'éventuelles adaptations aux conditions naturelles des autres régions. Les études techniques et scientifiques approfondies correspondantes devront être exécutées tout naturellement en parallèle avec la poursuite et l'extension des infrastructures d'hydraulique villageoise (puits et forages) car la fourniture immédiate d'eau est bien entendu considérée comme prioritaire.

1.1 - Programme d'hydraulique villageoise

Les résultats du dernier recensement de la population effectué en 1976, compte-tenu d'un taux d'accroissement de la population de 2,5 % par an, indiquent que les agglomérations rurales de moins de 2000 habitants sont au nombre de 9851 et groupent approximativement 5.155.000 habitants.

Suivant les normes adoptées par le Gouvernement, soit une pompe pour 200 habitants et au moins deux pompes par localité, le nombre de points d'eau à l'abri de la pollution nécessaires pour satisfaire les besoins élémentaires des populations rurales s'élève à plus 30.000 dont moins de 2.000 sont actuellement exécutés. Ce programme considérable représente un investissement total, non compris l'acquisition des moyens d'exhaure, de plus de 150 milliards de francs maliens. Le tableau ci-joint résume ces résultats pour les 46 cercles administratifs du pays.

Pour ce qui concerne plus spécialement les zones d'intervention du projet couvrant les cercles de Nara, de Kolokani, de Banamba et de Koulikoro, on constate que les travaux réalisés ne représentent que 20,5 % des besoins; pour les deux autres projets les plus importants, soit Mali Aqua Viva et Helvetas, les besoins ne sont respectivement satisfaits qu'à 18 % et à 13 %; pour les autres régions, ce taux s'avère pratiquement nul.

Le Gouvernement s'était fixé comme objectif, dans le cadre des activités de la Décennie de l'Eau Potable et de l'Assainissement, d'assurer l'approvisionnement de la moitié de la population rurale avant 1990, le programme restant à exécuter chaque année représente donc plus de 17000 points d'eau nouveaux; à raison de 60 forages productifs par an et par machine en moyenne, le parc de matériel devrait donc comporter 28 unités de forage nécessitant un budget annuel de fonctionnement en régie directe de près de 17 milliards de francs maliens et un investissement global supplémentaire de plus de 10 milliards de francs maliens. Il apparaît donc peu probable que ce programme puisse être réalisé uniquement avec les ressources intérieures tant en ce qui concerne les possibilités économiques du pays que le personnel technique nécessaire.

Région	Cercle	Projet	Nombre local. 200 habt.	Nombre habitants	Nombre points d'eau néces.	Nbre pts. d'eau exist	Nombre points d'eau à exécuter	Coût \$ (1\$=500F)
Kayes	Kayes	Sahel Occid.	318	155.000	981	76	905	9.955.000
	Bafoulabé	"	183	95.000	502	14	483	5.368.000
	Kéniéba	"	185	89.000	543	10	533	4.763.000
	Diéma	-	123	58.000	375	-	375	4.125.000
	Kita	-	299	152.000	1.002	-	1.002	11.022.000
	Nioro	PNUD	174	91.000	591	16	575	6.325.000
	Yélimané	Sahel Occid.	74	41.000	266	36	230	2.530.000
Total			1.356	680.000	4.260	152	4.108	45.188.000
Koulikoro	Koulikoro	PNUD	239	83.000	640	47	593	6.523.000
	Banamba	"	182	71.000	493	103	490	5.390.000
	Dioila	"	327	163.000	1.033	6	1.027	11.297.000
	Kangaba	"	53	34.000	199	2	197	2.167.000
	Kati	"	457	240.000	1.531	2	1.529	16.819.000
	Kolokani	"	267	118.000	738	284	454	4.994.000
	Nara	PNUD/Sahel	267	120.000	769	107	662	7.282.000
Total			1.792	829.000	5.403	551	4.852	53.372.000
Sikasso	Sikasso	PNUD/M.A.V.	471	273.000	1.432	6	1.426	15.686.000
	Bougouni	Helvetas/PNUD	452	200.000	1.181	117	1.064	11.704.000
	Kadiolo	-	114	83.000	440	-	440	4.840.000
	Kolondiéba	Helvetas	141	113.000	475	73	402	4.422.000
	Koutiala	PNUD/M.A.V.	229	179.000	858	133	725	7.975.000
	Yanfolila	Helvetas/PNUD	160	96.000	537	98	439	4.829.000
	Yorosso	M.A.V./PNUD	87	60.000	392	91	311	3.421.000
Total			1.654	1.004.000	5.315	508	4.807	52.877.000
Ségou	Ségou	PNUD/M.A.V.	497	225.000	1.523	4	1.519	16.709.000
	Ségou	"	227	100.000	525	25	500	5.500.000
	Bla	"	195	111.000	643	113	530	5.830.000
	Macina	M.A.V.	237	117.000	717	4	713	7.843.000
	Niono	M.A.V./PNUD	198	96.000	604	8	596	6.556.000
	San	"	394	161.000	1.063	174	889	9.779.000
	Tominian	M.A.V.	361	120.000	808	175	633	6.963.000
Total			2.109	930.000	5.883	553	5.330	58.630.000

Région	Cercle	Projet	Nombre local. 200 habt.	Nombre habitants	Nombre points d'eau néces.	Nbre pts. d'eau exist	Nombre points d'eau à exécuter	Coût \$ (1\$=500F)
Mopti	Mopti	PNUD/M.A.V.	237	150.000	795	11	784	8.624.0
	Bandiagara	Caritas/M.A.V	406	160.000	1.109	125	984	10.824.0
	Bankas	PNUD	264	146.000	846	2	844	9.284.0
	Djenné	M.A.V.	157	112.000	544	7	537	5.907.0
	Douentza	PNUD	205	132.000	778	4	774	8.519.0
	Koro	"	295	167.000	972	1	971	10.681.0
	Tenenkou	-	203	72.000	571	-	571	6.281.0
	Youvarou	-	119	83.000	377	-	377	4.147.0
Total			1.931	1.022.000	5.992	150	5.844	64.262.0
Tombouctou	Tombouctou	PNUD/GTZ	52	50.000	123	4	119	1.309.0
	Diré	PNUD	106	75.000	403	4	399	4.389.0
	Goundam	-	128	89.000	464	-	464	5.104.0
	G.Rharous	-	113	85.000	455	-	455	5.005.0
	Niafouké	-	168	129.000	780	-	780	8.580.0
	Total			667	428.000	2.225	8	2.217
Gao	Gao	JICA/Hollande	73	71.000	324	18	306	3.366.0
	Ansongo	"	64	53.000	283	6	277	3.097.0
	Bourem	-	71	59.000	311	-	311	3.421.0
	Kidal	-	35	26.000	133	-	133	1.463.0
	Menaka	Hollande	97	45.000	301	3	298	3.278.0
Total			340	254.000	1.352	27	1.325	14.575.0
Total général			9.851	5.155.000	30.430	1.949	28.481	318.291.0

1.2 - Inventaire des ressources en eaux souterraines

Cet inventaire apparaît comme un préalable indispensable à toute planification de développement économique à long terme. Il devra aboutir à une bonne connaissance des débits ponctuels exploitables et des ressources renouvelables dans chacune des régions naturelles du pays; il convient donc d'une part de définir avec le plus de précision possible les caractéristiques hydrauliques de chaque aquifère et d'autre part, grâce à la mise en place d'un réseau général de surveillance, de suivre l'évolution des nappes sous l'influence des exploitations et des variations de la pluviométrie.

Cet objectif devrait être inclus dans le programme de travail de tous les nouveaux projets d'hydraulique villageoise, les renseignements recueillis étant centralisés et interprétés par une section spécialisée de la Division des Eaux Souterraines. Pour ce qui concerne les projets en cours d'exécution, il est prévu d'amorcer ces études générales dès le début de 1983.

Pour les projets en cours, autre que le Projet du PNUD, il serait souhaitable que l'équipe d'essai actuellement formée procède à une série de pompages sur un certain nombre de forages déjà exécutés et sélectionne des points d'eau qui seront utilisés comme puits témoins. Les emplacements des ouvrages qui seront choisis et leur densité dépendraient des conditions naturelles de chacune des unités hydrogéologiques concernées.

2 - TECHNIQUES ET MATERIELS A UTILISER POUR LA PROSPECTION ET LE FORAGE D'EAU

2.1 - Recherche des sites de forage par méthodes hydrogéologiques et géophysiques

L'expérience acquise par le projet correspond à des conditions hydrogéologiques largement représentées au Mali: zones aquifères discontinues au sein de formations indurées, gréseuses et schisteuses, entrecoupées de nombreuses intrusions doléritiques. Dans un tel contexte, l'utilisation systématique des prospections géophysiques en complément des méthodes hydrogéologiques classiques basées sur l'analyse des photographies aériennes et la recherche d'indices de surface, se justifie sur le plan économique par l'amélioration du taux de réussite en forages productifs, l'abaissement du prix de revient du mètre foré productif intégrant le coût supplémentaire des prospections étant largement significatif. Il convient toutefois que les études

hydrogéologiques et géophysiques soient étroitement imbriquées entre elles et avec l'avancement des forages afin de permettre des réinterprétations successives des modèles d'implantation. Les méthodes électriques, profils et sondages, et magnétique sont généralement les mieux adaptées pour des conditions hydrogéologiques comparables à celles de la région du projet par leur facilité de mise en oeuvre, leur rendement et le bon contraste des anomalies géophysiques. Elles ont aussi l'avantage, après une phase d'étalonnage de cas-types, de permettre des implantations de forage sur la base d'une interprétation semi-quantitative par un hydrogéologue. La prospection par sismique réfraction ne devrait être utilisée que lorsque les méthodes électriques et magnétiques n'ont pas décelé d'anomalies significatives car c'est une méthode relativement lente et son interprétation requière un géophysicien confirmé.

Pour les unités hydrogéologiques qui correspondent à des aquifères semi-généralisés ou généralisés, les prospections géophysiques ne sont pas indispensables pour l'implantation des forages. Elles seront cependant utiles à l'étude des conditions aux limites, à la définition des caractéristiques régionales des réservoirs et à des études ponctuelles dans les secteurs où les travaux de forages ont été négatifs. Cependant, même dans ces unités hydrogéologiques, l'utilisation systématique de la géophysique ne peut qu'améliorer les résultats, en particulier pour la recherche des zones les plus perméables et donc des débits de forages plus élevés et en fournissant des indications précieuses pour les foreurs: profondeur optimale à atteindre, séquence lithologique à traverser et difficultés de forages prévisibles.

En conclusion, le recours aux prospections géophysiques pour l'implantation des forages doit être décidé sur la base d'une étude de rentabilité, prix du mètre linéaire productif et prix moyen du m³ disponible.

2.2 - Matériels à utiliser pour le forage d'eau

Le développement de l'hydraulique villageoise au Mali mettra essentiellement à contribution les ressources en eaux souterraines contenues dans les aquifères de type fissuré: socle et séries métamorphiques du Précambrien, grès infra-cambriens et schistes cambriens, dont l'exploitation nécessite des ouvrages de petit diamètre et de profondeur généralement inférieure à la centaine de mètres; le degré de discontinuité impose par ailleurs une exploitation de mode disséminé.

La technique du marteau fond-de-trou, avec des ateliers de forage légers et mobiles capable de rendements élevés dans les terrains mi-durs à durs et pour lesquels les temps de transfert et d'aménagement des sites sont réduits au minimum, est particulièrement bien adaptée à ce type de forage. L'équipement des ouvrages avec des tubages PVC est préférable en raison de l'agressivité des eaux et de leur facilité de mise en place. La pose d'éléments crépinés n'est en général pas nécessaire, la stabilité des terrains aquifères étant bonne et la fraction fine pouvant être mobilisée lors de la mise en exploitation de l'ouvrage étant négligeable dans les terrains fissurés. Les forages productifs ne sont donc équipés que d'une colonne de tubage ple d'une longueur suffisante pour assurer la protection des pompes et masquer complètement les formations de recouvrement et la frange altérée du substratum; la partie inférieure du trou, où sont localisées les venues d'eau principales, étant laissée nue.

Des foreuses mixtes rotary/marteau/fond-de-trou sont cependant nécessaires dans les zones à recouvrement argileux ou sableux épais ou instable. Ces formations doivent être traversées en utilisant le rotary à la boue, la partie inférieure du trou dans le substratum fissuré étant forée au marteau. Ces foreuses combinées permettent aussi l'exécution de forages d'exploitation dans les aquifères généralisées peu ou non consolidés: Continental Intercalaire, Continental Terminal et alluvions de la cuvette nigérienne. L'utilisation de la méthode rotary est aussi nécessaire pour la réalisation d'ouvrages de gros diamètre dans les aquifères de type fissuré lorsque des débits importants ont été identifiés.

Le matériel de forage des projets pour le développement de l'hydraulique villageoise doit donc être constitué essentiellement par des foreuses équipées pour le marteau fond-de-trou et de quelques foreuses mixtes pour permettre l'exécution des forages dans des conditions hydrogéologiques particulières.

3 - ACTION SANITAIRE ET EDUCATIVE ET DE DEVELOPPEMENT EN MILIEU RURAL

Une action de sensibilisation auprès des populations rurales a été entreprise dès le début des opérations afin d'abord de faire accepter l'utilisation des pompes puis de faire admettre le principe d'en prendre en charge l'entretien et enfin de transporter et stocker l'eau dans des conditions préservant sa potabilité. Depuis 1980, des essais de valorisation des investissements ont été tentés en suscitant ou en favorisant des activités domestiques ou de production mais ces essais n'ont que très partiellement abouti en raison du faible débit des moyens d'exhaure utilisés qui ne laissait que des débits négligeables disponibles.

L'ensemble de ces actions ont été poursuivies par les équipes d'entretien des pompes secondées, début avril 1982, par deux techniciens du Développement Communautaire mis à la disposition du Projet et basés à Kolokani.

L'impact des points d'eau équipés paraît incontestable: insistance des communautés qui ont déjà une pompe à en avoir d'autres et des communautés qui n'en ont pas à en acquérir une; mais l'impact sanitaire reste généralement faible car l'eau des puits traditionnels, en majorité polluée, continue à être utilisée surtout pendant la saison pluvieuse. Toutefois, l'intervention du projet devait être limitée à la réalisation des forages, à l'installation des pompes et à la formation des réparateurs villageois, toutes les activités situées en aval devant être prises en charge par le Gouvernement en collaboration avec l'UNICEF et l'OMS. Le cercle de Kolokani bénéficie donc d'un projet triennal de développement financé par l'UNICEF, le Gouvernement et les populations dont un des objectifs est la réalisation d'un programme d'action comprenant l'aménagement des pourtours des pompes dans une centaine de villages. Ce projet ne couvre cependant pas la totalité des agglomérations dotées de pompes et, du fait de l'importance des investissements consentis, il paraît indispensable d'assurer les eaux souterraines contre la pollution et de rentabiliser l'eau fournie en suscitant des activités domestiques. Toutefois, la Direction de l'Hydraulique n'a ni vocation ni moyens pour promouvoir et réaliser ces actions; il faudrait donc envisager la mise en place d'un programme spécifique tendant à :

- valoriser au maximum les équipements déjà réalisés et, en particulier, régler le problème de l'aménagement complet des points d'eau actuellement limité à une dalle de béton de 1,5 mètres de diamètre,

- poursuivre à grande échelle les contrôles de salubrité de l'eau et les actions de valorisation forcément limitées entreprises dans le cadre du projet et, avec la participation étroite des populations, réaliser des micro-plans de développement villageois,

- mettre au point une méthode d'évaluation et de suivi de l'impact des actions précédentes.

Dans l'immédiat cependant et en attendant le fonctionnement du Fonds National de l'eau, les cercles de Kolokani, de Banamba et de Nara se sont dotés d'un Comité Consultatif de l'eau dont le rôle est de proposer les programmes de travaux et les activités de développement autour des points d'eau. A l'échelle de l'agglomération rurale, le projet a obtenu dans un grand nombre de villages la création d'un Comité de Gestion chargé de constituer et de gérer un fonds destiné à l'entretien des moyens d'exhaure; ces comités joueront pleinement leur rôle en 1983 dès la mise en place des pompes à énergie solaire dont les débits importants permettront d'apporter à la communauté des revenus non négligeables provenant de la vente de l'eau aux transhumants et de la commercialisation de produits agricoles; le consultant agro-économiste qui a été associé à la mission d'évaluation de 1979 avait estimé, d'après les réalisations déjà en place, ce revenu à environ dix millions de francs maliens par hectare recevant en moyenne 90 m^3 d'eau par jour.

4 - CADRE INSTITUTIONNEL

Le principal agent dans le domaine de l'eau souterraine est la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Ministère de l'Hydraulique et des Mines ses trois grandes fonctions sont l'inventaire des ressources et des besoins, la planification et l'exécution de travaux.

Aucune des structures existantes ne mène les inventaires à l'échelle nationale; on note que les différents projets n'ont pas des méthodes identiques de collecte des données; il conviendrait donc d'uniformiser ces méthodes car ces renseignements se trouvent à la base de la planification et de la programmation futures, tant financière que physique.

La planification est actuellement assurée par le chef de la Division des Eaux Souterraines. Basée sur un inventaire plus complet, elle devrait être confiée à une équipe renforcée. La planification devra considérer et institutionnaliser la décentralisation des activités de forage, d'équipement et d'entretien.

L'exécution représente la fonction la mieux exercée actuellement; elle est réalisée à travers le fonctionnement des différents projets d'aide extérieure; mais ces projets manquent d'uniformisation dans les méthodes, de gestion, d'interprétation des résultats et d'équipement; il est donc éminemment souhaitable de créer une structure qui puisse procéder à l'harmonisation désirée. Toutefois, cette structure nouvelle ne pourra voir le jour que lorsque le Fonds National de l'eau en cours de création bénéficiera d'un financement assuré et raisonnable. Sa fonction serait très large car elle devrait couvrir le domaine de la connaissance, de l'exploitation et de la protection des eaux souterraines; elle devrait en plus, du fait de sa connaissance des ressources et des besoins, proposer, aux services Gouvernementaux de planification, les orientations et objectifs de l'utilisation des eaux souterraines.

APPENDICE 1

PROJET MLI 67/507
BUDGET ET RESULTATS STATISTIQUES

Durée : 64 mois (Novembre 1968 - Février 1974)

<u>Budget</u> (US\$)	Initial	Final
Personnel	394.800	680.197
Bourses d'étude	20.000	10.333
Matériel	293.300	307.021
Divers	23.700	48.004
	<hr/>	<hr/>
Total	731.800	1.045.555

Travaux

Nombre de forages	:	34
Métrage foré	:	2.412 m
Nombre de forages productifs	:	12
Débit reconnu	:	243 m ³ /h
% forages productifs	:	35,3

====00000000====

PROJET MLI 74/001

BUDGET ET RESULTATS STATISTIQUES

Durée : 34 mois (mars 1974 - Décembre 1976)

<u>Budget</u> (US\$)	Initial	Final
Personnel	473.400	759.131
Sous-contrat	5.000	-
Formation	16.000	-
Matériel	443.500	729.444
Divers	72.000	203.533
	<hr/>	<hr/>
Total	1.009.900	1.692.158

Travaux

Nombre de forages	:	266
Métrage foré	:	10.920 m
Nombre de forages productifs	:	54
Débits reconnus	:	910 m ³ /h
% forages productifs	:	20,3
Nombre de mois x sondeuse	:	72
Nombre de forages/mois/sondeuses:		3,7
Métrage/mois/sondeuse	:	151,7 m

==00000000==

PROJET MLI 76/004
BUDGET ET RESULTATS STATISTIQUES

Durée : 66 mois (Janvier 1977 - Juillet 1982)

	<u>Budget initial</u>	<u>Budget final</u>
Personnel	3.239.685	2.999.729
Sous-contrats	-	196.625
Formation	21.660	20.234
Matériel consommable	811.000	1.725.249
Matériel durable	880.000	1.118.751
Fonctionnement et divers	858.500	1.339.116
Total	\$ 5.810.845	\$ 7.999.704

CONTRIBUTION DU FISE (\$) au 30 juin 1982

Matériel consommable	427.000	723.690
Matériel durable	1.099.250	1.816.180
Total	\$ 1.526.250	\$ 2.539.870

CONTRIBUTION DU GOUVERNEMENT (FM.)

	<u>Contribution prévue</u>	<u>Contribution finale</u>
Personnel	260.800.000	173.000.000
Matériel consommable	211.000.000	122.000.000
Matériel durable	79.000.000	
Divers	116.000.000	79.000.000
Total FM.	666.800.000	FM. 374.000.000

Travaux

Nombre de forages	:	1.159
Métrage foré	:	62.360 m
Nombre de forages productifs	:	639
Débits reconnus	:	3.500 m ³ /h
% forages productifs	:	62
Nombre de mois x sondeuses	:	131
Nombre de forages/mois/sondeuse:		8,85
Nombre de mètres/mois/sondeuse :		476 m

==00000000==

APPENDICE 4

PERSONNEL INTERNATIONAL ET BOURSES

Personnel International

Conseiller Rechnique Principal	L. MOULLARD	(Fr)	01-01-77 - 30-06-82
Hydrogéologues	Ph. CHAPEROT	(Fr)	01-01-77 - 31-03-77
	P. DESMIDT	(Fr)	01-09-77 - 26-09-78
	A. GUERRE	(Fr)	04-10-80 - 30-06-82
Géophysiciens	M. BRO	(Fr)	01-01-77 - 11-09-77
	Ch. HUBERT	(Fr)	05-10-77 - 04-07-80
	A. BOUVIER	(Fr)	10-10-80 - 30-06-82
Foreurs	P. MAJEAN	(Fr)	01-01-77 - 10-05-80
	W. HEIJSTEK	(Net)	01-01-77 - 30-06-77
	G. BOUSQUET	(Fr)	02-09-78 - 20-07-80
	R. NEYRAT	(Fr)	08-02-77 - 31-12-79
Chef du matériel	P. KAMEL	(Mar)	01-01-77 - 30-06-82
Mécaniciens	J.Y. FLOCH	(Fr)	01-01-77 - 31-12-78
	J. LOPEZ	(Fr)	01-01-77 - 31-12-77
	J. LIBERT	(Bel)	01-01-77 - 14-01-80
	M. GUEGUEN	(Fr)	06-05-78 - 30-06-82
	J. ANDRIEUX	(Fr)	25-07-79 - 24-07-80
	Y. MARREC	(Fr)	29-12-80 - 18-04-81
Volontaires des Nations Unies	P. TWAGIRAMUNGU	(Bur)	26-05-79 - 30-06-82
	E. FEHER	(Hun)	18-09-79 - 30-06-82
Experts associés	J. THOREAU	(Bel)	01-01-77 - 30-06-78
	J.C. CEUPPENS	(Bel)	07-03-80 - 30-06-82
Consultants	A. EGHBAL	(Ira)	20-01-80 - 19-04-80
	R. de BAKER	(Bel)	12-12-79 - 19-12-79
	B. GILBERT	(Fr)	25-11-79 - 19-12-79
	J. ZASLAVSKY	(Fr)	01-10-81 - 03-11-81
	G. TAYLOR	(USA)	06-10-81 - 17-10-81
	R. MENARD	(Can)	13-06-81 - 12-07-81
<u>Bourses d'Etudes</u>			
Mécanique	M. KOUYATE	(Mli)	14-10-79 - 16-04-80(Fr)
	M. SOW	(MLi)	01-01-80 - 28-02-80(Fr)

PERSONNEL DE LA CONTREPARTIE GOUVERNEMENTALE

Tous les agents ont été formés ou ont reçu une formation complémentaire dans le cadre du projet.

a) Personnel d'encadrement

S. TRAORE	Directeur National	Janv. 1977 - Juin 1982
K. DEMBELE	Hydrogéologue	Oct. 1977 - Juin 1982
S. DIAWARA	"	Oct. 1977 - Juin 1982
B. TRAORE	"	Oct. 1977 - Juin 1982
S. TOGOLA	"	Oct. 1977 - Juin 1979
M. DIENG	"	Janv. 1977 - Juin 1977
A. GUINDO	"	Janv. 1979 - Juin 1977
T. DIAKITE	Géophysicien	Janv. 1977 - Juin 1982
A. BALDE	"	Janv. 1977 - Sept 1978
I. COULIBALY	"	Oct. 1979 - Juin 1980
I. KONATE	"	Déc. 1980 - Juin 1982
S. SAMAKE	Ingénieur mécanicien	Janv. 1981 - Juin 1982
K. YAYA	Hydraulicien	Janv. 1982 - Juin 1982
S. SYLLA	Technicien supérieur	Janv. 1977 - Juin 1982
I. DOUCOURE	Foreur	Janv. 1977 - Juin 1982
D. DIALLO	"	Janv. 1977 - Juin 1982
A. DIARRA	"	Oct. 1979 - Juin 1982
Y. NIAFO	"	Oct. 1980 - Juin 1982
A. BAMADIO	Chef de base pompes	Janv. 1977 - Juin 1982
I. TRAORE	"	Janv. 1977 - Juin 1982
M. NIAFO	"	Oct. 1979 - Juin 1982
Y. SANOGO	Développement Communautaire	Avril 1982 - Juin 1982
M. DRAME	"	Avril 1982 - Juin 1982

b) Personnel technique et administratif

- 4 techniciens foreurs
- 3 techniciens
- 1 magasinier
- 16 mécaniciens, menuisiers, maçons, soudeurs
- 41 chauffeurs et ouvriers spécialisés
- 1 comptable
- 2 dactylographes
- 1 dessinateur
- 17 manoeuvres

c) Stagiaires

21 étudiants de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs et de l'Ecole Centrale pour l'Industrie et le Commerce et l'Administration ont effectués des stages de terrain de 1 à 3 mois avec les différentes équipes du projet: hydrogéologie, géophysique, pompage d'essai et forages.

MATERIEL P N U D

(Sans frais de transport)

Véhicules

2 camions Berliet (1 GBC, 1 GBD)	\$ 139.828
17 Land-Rovers	171.210
6 véhicules de liaison	76.716

Produits et Outils de forages

Taillants, marteaux fond-de-trou, boue de forage	213.628
--	---------

Tubages

Tubes PVC et métalliques Ø 5½, 6½, 7½	252.457
---------------------------------------	---------

Groupes électrogènes

14 alternateurs Lister	73.085
------------------------	--------

Matériels divers

Matériels de campement, de bureau, d'atelier et de chantier	320.560
---	---------

Pneumatiques

49.798

Pièces de rechange

982.989

MATERIELS TRANSFERES DES PROJETS MLI 67/507 ET 74/001

Matériel de forage

1 sondeuse Failing 1500 montée sur camion Ford (hors d'usage)
1 sondeuses Aquadrill 441 avec compresseur Atlas Copco PRH 425 montés sur camions Mercedes LA 911 et 1924
1 camion Berliet GBC
12 Land Rovers
1 Voiture de liaison

MATERIEL UNICEF
 (avec frais de transport)

Véhicules

28 Land Rovers

6 Camions Mercedes (3 LA 911, 2 LAK 2624, 1 LA 1924)

2 Unimogs

3 Camions Berliet (1 GBC, 2 GBH) \$ 668.000

Produits et outils de forage

Taillants, marteaux fond-de-trou 293.040

Tubages 181.520

Pompes (260) 181.600

Matériels divers 69.410

Pneumatiques 104.850

Pièces de rechange 142.950

Unités de forage

Aquadrill 661 409.800

Failing 1250 (non livrée) 488.700 898.500

Total : 2.539.870

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES MATERIELS UTILISES

Forage

- Sondeuse FORACO SM-70 mixte rotary/marteau-fond-de-trou avec compresseur Atlas Copco ZRH 700 Dd de $20 \text{ m}^3/\text{mn}$ à 12 bars.
- Sondeuse Atlas Copco - Aquadrill 441 avec compresseur Atlas Copco ZRH 425 Dd de $12 \text{ m}^3/\text{mn}$ à 12 bars.
- Sondeuse Atlas Copco - Aquadrill 661 avec compresseur Atlas Copco ZRS 350 Dd de $20 \text{ m}^3/\text{mn}$ à 12 bars.

Géophysique

- Ensembles potentiométriques AE 631 SERCEL avec convertisseur de 200 W
- Ensemble de sismique refraction ABEM TRIO 535 à 12 traces
- Magnétomètres à protons SCINTREX MP2.

Essai de pompage

- Compresseur Holman Rotair 25P de $7 \text{ m}^3/\text{mn}$ à 7 bars
- Pompe électrique submersible Grundfoss de $12 \text{ m}^3/\text{h}$

Groupes électrogènes

- Lister ST2 et ST3 (8KVA - 12KVA)

Véhicules

- Camions Mercedes LA 911, 1924 et LAK 2624
- Unimog
- Camions Berliet GBC et GBD
- Camions Magirus Deutz 232 D 26 AK
- Land Rovers 109 à essence

RAPPORTS ET NOTES TECHNIQUES PREPAREES PAR LE PROJET

- Reconnaissance géophysique par méthodes électrique et sismique sur le tracé de la route Didiéni-Goumbou, 1978.
- Etude géophysique à Missira - Sirakémé (cercle de Kolokani) et dans l'arrondissement de Dilly (cercle de Nara), 1978.
- Etude géophysique par méthodes électriques et sismique à Douentza (région de Mopti), 1979.
- Etude géophysique par méthodes électrique et sismique du ranch de Nioro, 1979.
- Reconnaissance géophysique dans la région Sud de la Vallée du Serpent (Périmètre expérimental de l'OMBEVI), 1979.
- Prospection géophysique dans les cercles de Banamba, Koulikoro et Kolokani, 1981.
- Prospection par méthodes électriques et magnétiques, 1982.
- Rapports mensuels d'avancement - Campagne 1980/81 et 1981/82.
- Recherche des aquifères de fracture dans les séries schisto-gréseuses au Mali à l'aide des techniques géophysiques, 1980.
- Recapitulation des travaux de forages et de géophysique - 1/01/77 au 30/06/81.
- Pompages d'essai en milieu fracturé, 1979.
- Stratégie de mise en valeur des ressources en eau dans le Sahel, 1979.
- Note sur les pompages d'essais par air-lift, 1980.
- Ressources et besoins en eau dans la région du projet, 1981.
- Etude hydrogéologique du cercle de Banamba, 1982.
- Rapport technique du projet, 1982.
- Rapport de la mission d'évaluation du PNUD - Décembre 1979.
- Rapport de la mission d'évaluation du PNUD - Octobre 1980.

CONSULTANTS

- GILBERT B. - Aspects sanitaires et appropriation des pompes par les usagers, 1979.
- DE BAKER R. - Incidences socio-économiques de l'hydraulique villageoise, 1979.
- TAYLOR G. - Evaluation des méthodes utilisées par le projet MLI 76/004 pour la recherche et l'exploitation des eaux souterraines, 1980.
- TAYLOR G. - Evaluation des types de pompes utilisées par le projet MLI 76/004, 1980.
- ZASLAVSKY J. - Rapport de la mission d'évaluation socio-économique, 1981.
- MENARD R. - Administration et législation des eaux, 1981.