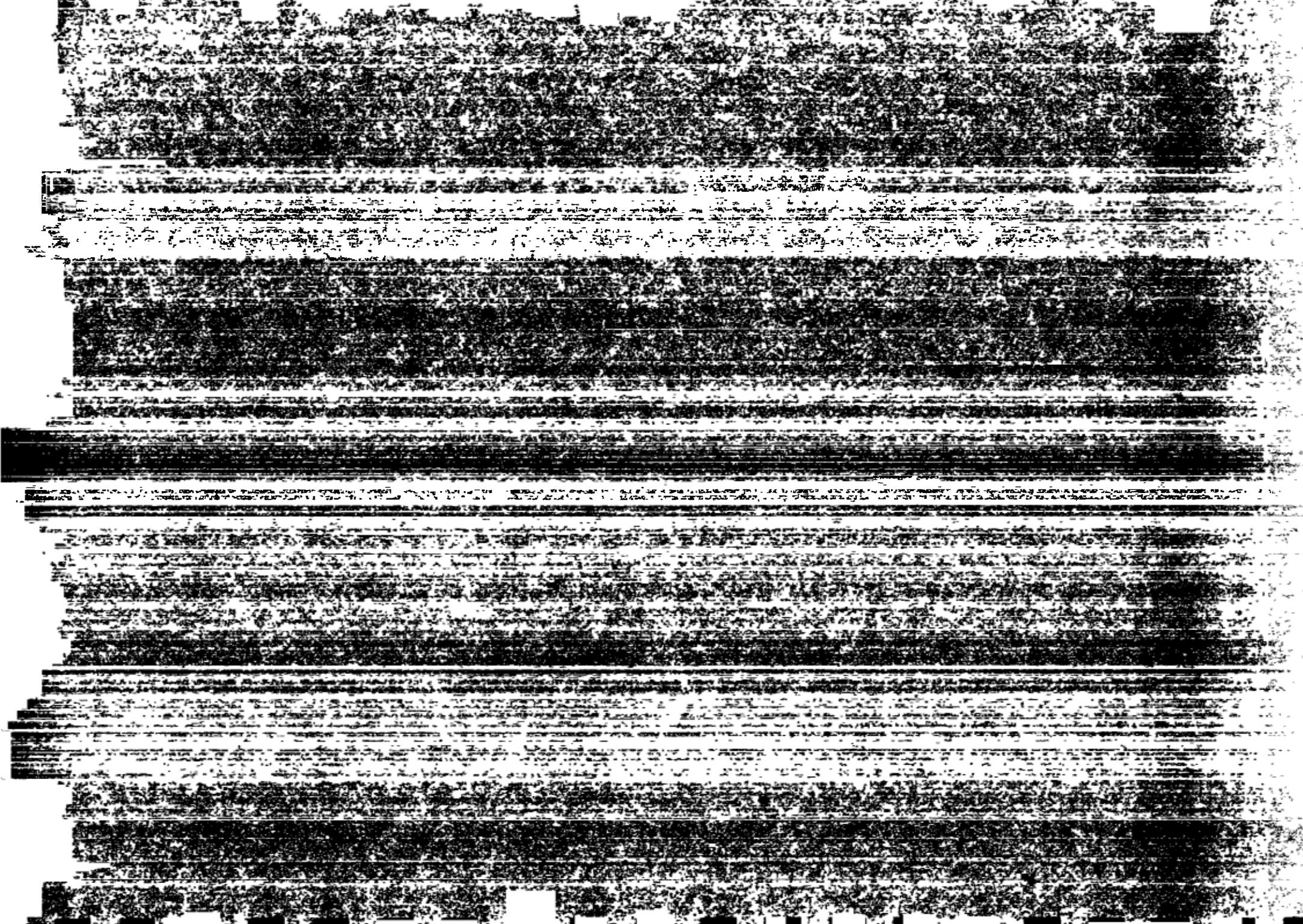


824 ML90

824-ML-9027



REPUBLIQUE DU MALI

MINISTRE DE L'INDUSTRIE
DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ENERGIE
DIRECTION NATIONALE DE
L'HYDRAULIQUE ET DE L'ENERGIE

PROGRAMME
DES NATIONS UNIES
POUR LE DEVELOPPEMENT



BARCODE 9027
824 ML90

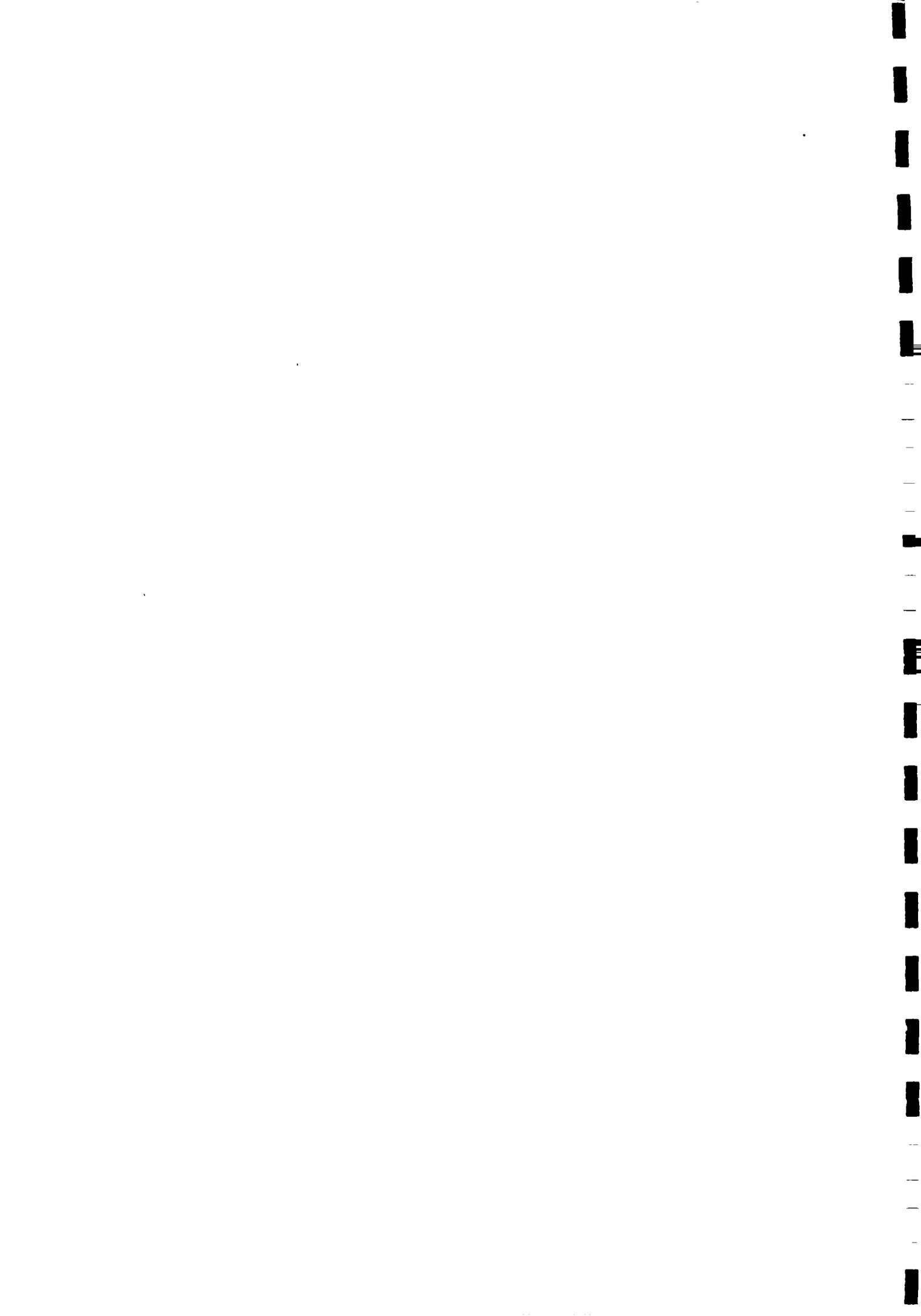
SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

Préparé par le Département de la Coopération
Technique pour le Développement (DCTD)

Projet MLI / 84 / 005

Exploitation, évaluation et gestion des ressources en eau souterraine

- Septembre 1990 -



NOTES ET AVERTISSEMENTS

1 - Les abréviations utilisées dans le texte sont généralement expliquées dans le texte même. Ne sont données ici que les plus courantes :

- AIEA	:	Agence Internationale de l'Energie Atomique (ONU)
- BRGM	:	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France)
- DCTD	:	Département de la Coopération Technique pour le Développement (Nations Unies)
- DNM	:	Direction Nationale de la Météorologie
- DNHE	:	Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie
- EMAMA	:	Entreprise Malienne de Maintenance
- ETP ou ETR	:	Evapotranspiration
- IGN	:	Institut Géographique National
- JICA	:	Projet de l'Assistance Japonaise (Gao)
- KBK	:	Projet Kita, Bafoulabé, Kéniéba
- PIRT	:	Projet d'Inventaire des Ressources Terrestres (Ministère de l'Agriculture)
- PMH	:	Pompe à motricité humaine
- PNUD	:	Programme des Nations Unies pour le Développement
- SIGMA	:	Système Informatique de Gestion des Ressources en Eau du Mali

2 - UNITES EMPLOYEES

- a	:	an
- cm	:	centimètre
- F.CFA	:	Franc CFA
- g	:	gramme
- h	:	heure
- ha	:	hectare
- hab	:	habitant
- j	:	jour
- kg	:	kilogramme
- km	:	kilomètre
- l	:	litre
- m	:	mètre
- mg	:	milligramme
- s	:	seconde
- t	:	tonne
- UBT	:	Unité de Bétail Tropical (= 250 kg de poids vif)
- °C	:	degré Celsius
- µ	:	micro
- UT	:	unité de Tritium

3 - Le rapport est présenté en 2 parties : la première contient le texte du rapport proprement dit, la seconde les Annexes citées dans le texte.

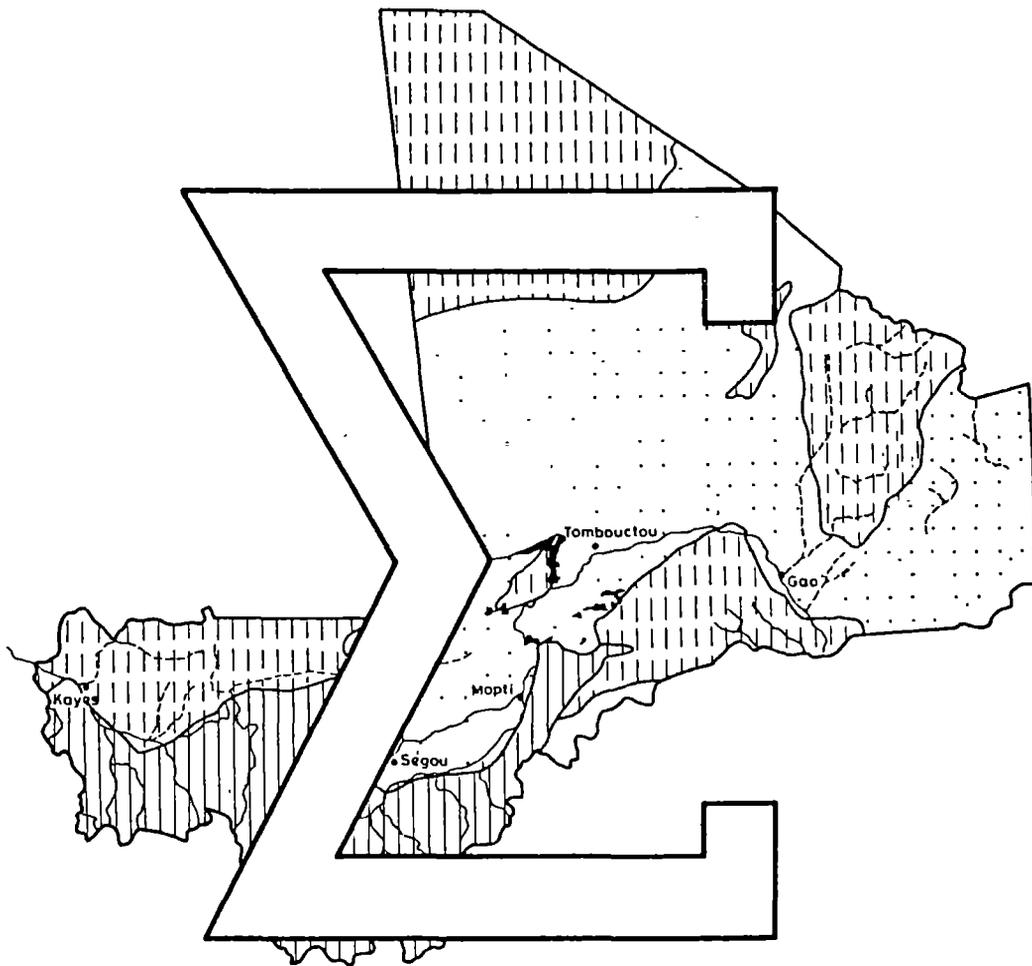
4 - Chaque chapitre est séparé par une page de garde et la table des matières correspondante sur fond bleu pour faciliter la recherche.

- 5 - Le premier chiffre de la numérotation des sous-chapitres se réfère toujours au chapitre correspondant. La numérotation des pages a été reprise à 1 dans chaque chapitre avec indication du numéro de chapitre dans le coin supérieur droit de la page.
- 6 - Les références bibliographiques sont citées dans le texte entre crochets []. Celles du projet MLI/84/005 sont données dans l'Annexe 1 tandis que celles hors projet sont détaillées à la dernière page du chapitre où elles sont citées.
- 7 - Les documents cartographiques et les appellations utilisées dans le rapport n'impliquent, de la part de l'Organisation des Nations Unies, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.
- 8 - Les cartes en couleurs illustrant le rapport, issues pour la plupart de la banque SIGMA, ont été généralement établies sur un découpage par secteur, unité ou système aquifères sauf pour quelques données présentées sur un découpage administratif par Arrondissement et pour certains traitements combinés pour lesquels on a adopté une représentation par 1/4 de degré carré donnant une image plus cohérente des éléments traités sauf pour les aquifères généralisés de l'est et du nord du Mali où la subdivision par secteur hydrogéologique a été conservée car les données n'y sont pas suffisamment denses.
- 9 - Quelques cartes de synthèse présentées dans le rapport ne couvrent pas la moitié nord du pays parce que les données sur cette zone, essentiellement désertique et peu peuplée, sont peu significatives ou insuffisantes pour être représentatives. Ceci a permis d'utiliser une plus grande échelle et donc de rendre ces cartes, ainsi tronquées, plus lisibles sur la partie la plus peuplée du Mali.
- 10 - Les statistiques ont été effectuées sur les données de la Banque SIGMA arrêtées, en ce qui concerne les forages, puits, pompes, essais, analyses chimiques et isotopiques, au 31 Décembre 1988. Les données 1989 et 1990 bien qu'étant introduites au fur et à mesure de leur collecte, n'ont pas été traitées sauf cas particulier où l'apport de ces données pouvaient compléter utilement la synthèse.
- 11 - La présentation du rapport en recto/verso, en écriture condensée et avec marges étroites a été adoptée pour réduire autant que possible le nombre de pages et le volume du rapport.

PLAN DE LA SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

		Nb.total de pages	avec tableaux	et figures
<u>CHAPITRE 1</u>	INTRODUCTION	8	-	1
<u>CHAPITRE 2</u>	CADRE PHYSIQUE	27	9	10
<u>CHAPITRE 3</u>	SYSTEMES AQUIFERES	39	12	11
<u>CHAPITRE 4</u>	CARACTERISTIQUES PIEZOMETRIQUES	34	2	14
<u>CHAPITRE 5</u>	CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES	26	5	9
<u>CHAPITRE 6</u>	CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES	43	22	16
<u>CHAPITRE 7</u>	BILAN DES AQUIFERES	36	13	9
<u>CHAPITRE 8</u>	EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	30	3	14
<u>CHAPITRE 9</u>	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	13	2	-
<u>ANNEXE 1</u>	BIBLIOGRAPHIE	10	-	-
<u>ANNEXE 2</u>	BANQUE DE DONNEES SIGMA	17	6	3
<u>ANNEXE 3</u>	DONNEES STATISTIQUES	8	8	-
		291	82	87

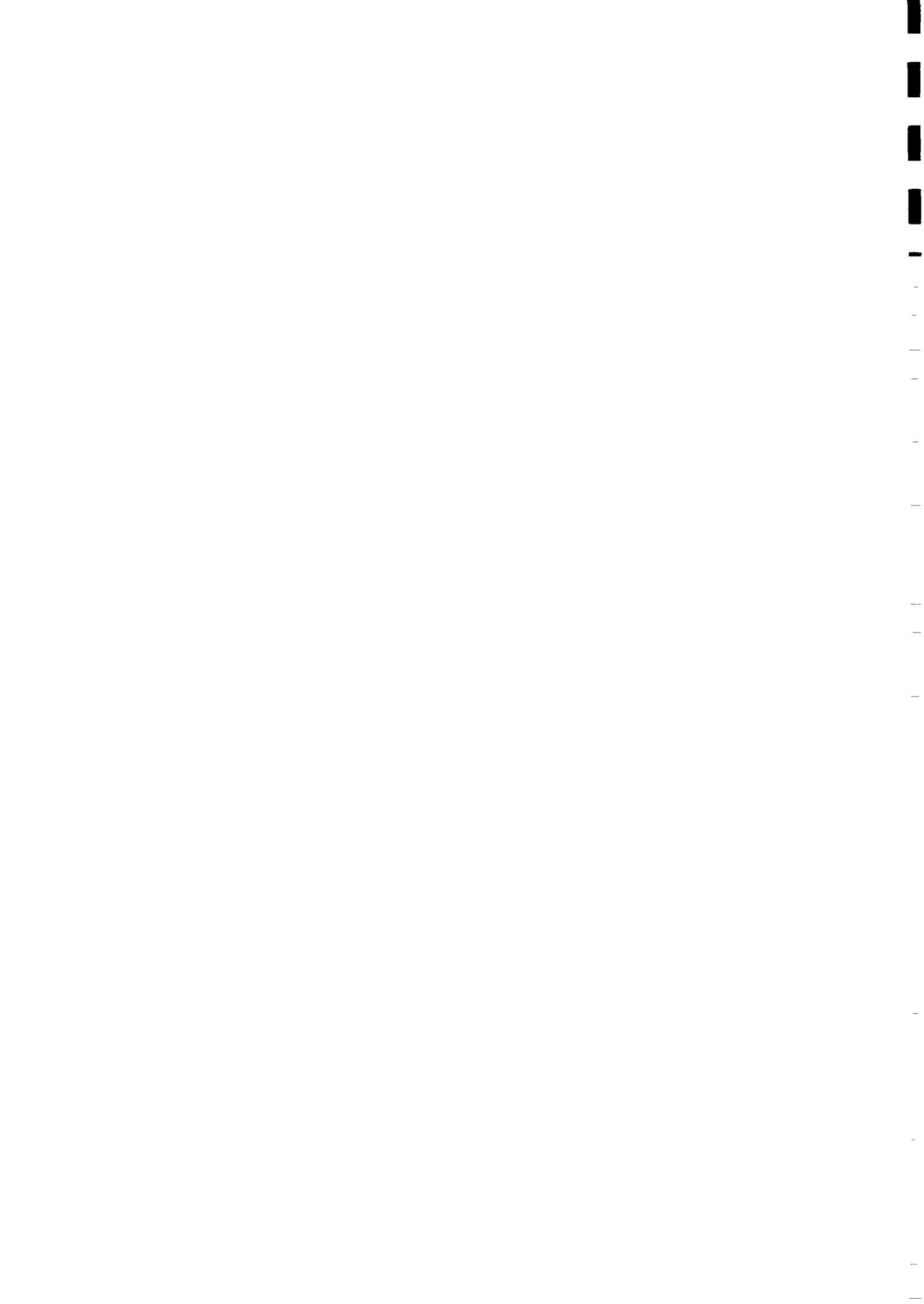




SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 1

INTRODUCTION



CHAPITRE 1

TABLE DES MATIERES

TEXTE

1.1. DEFINITION ET OBJECTIFS.....	1
1.2. HISTORIQUE.....	1
1.3. CONTRAINTES ET LIMITES.....	3
1.4. METHODOLOGIE.....	4
1.5. BANQUE DE DONNEES SIGMA.....	5
1.6. PLAN DE LA SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE.....	7

FIGURE

Fig.1.1 Structure de la banque SIGMA.....	6
---	---



CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1. DEFINITION ET OBJECTIFS

La masse de données recueillies dans le cadre des nombreux projets d'hydraulique qui ont été réalisés au Mali depuis un vingtaine d'années et la mise en évidence de ressources en eau souterraine exploitables en quantité suffisante et de bonne qualité chimique sur la presque totalité du territoire malien ou, en tous cas, dans les régions où vivent 90 % de la population, rendaient possible et nécessaire l'élaboration d'une synthèse prenant en compte toutes les données hydrogéologiques disponibles.

Pour obtenir cette vue d'ensemble fiable des ressources en eau souterraine du Mali, il a fallu procéder à une critique sévère de ces données afin de les rendre cohérentes entre elles et homogènes. Les données fournies par les projets se rapportent en effet à des zones d'intervention d'extension très variable et de limites souvent arbitraires. Aussi, elles ne prennent pas en compte le plus souvent les conditions aux limites et les caractéristiques hydrogéologiques des zones adjacentes. Par ailleurs, de très nombreuses données rassemblées par les projets durant leurs campagnes de forages sont longtemps restées à l'état brut car la finalité de ces campagnes était de mettre à la disposition des populations rurales des points d'eau modernes. En outre, la compilation de ces dossiers a montré que les données fournies ne répondaient pas toujours aux normes fixées par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie.

La synthèse hydrogéologique s'est donc attachée à valoriser les données existantes en les uniformisant de manière à fixer l'état des connaissances actuelles, à établir une première estimation des ressources en eau souterraine exploitables et leur localisation dans l'espace, par secteur aquifère et par circonscription administrative, et à déterminer les conditions de leur exploitation.

La synthèse hydrogéologique a également servi de base à l'élaboration du volet "Eaux Souterraines" du Schéma Directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali préparé par le projet PNUD/DNHE/DCTD/MLI/84/005, et diffusé en Mars 1990.

1.2. HISTORIQUE

Les premières études hydrogéologiques régionales ont été réalisées au Mali par le Service Hydraulique de l'Afrique Occidentale Française (AOF) dans les régions de Tombouctou et de Gao. Un inventaire des points d'eau pastoraux complété par quelques forages de reconnaissance et des levés géologiques avait mis en évidence des ressources en eau dans les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire accumulées dans les vastes bassins sédimentaires de ces régions.

Ces aquifères généralisés, de même type que ceux identifiés dans la zone nord-saharienne et au Niger, étaient alors considérés comme les seuls ayant des ressources en eau mobilisables pour la réalisation de projets de développement agro-pastoraux à moyen et long terme. Les formations primaires et précambriennes couvrant l'ouest et le sud du Mali étaient par contre considérées comme stériles ou inexploitables, hormis les ressources contenues dans les formations superficielles d'altérites, ressources estimées d'ailleurs très limitées.

Ces études se concrétisèrent par la présentation d'une première carte hydrogéologique du Mali en 1957 (J. ROURE) qui montrait l'extension des aquifères généralisés dans les régions centrales et orientales du Mali ainsi qu'une esquisse de leur surface piézométrique (altitude de la nappe) et la mention de la qualité des eaux. Dans les autres régions du Mali, seul un inventaire partiel des points d'eau villageois et des puits coloniaux était mentionné suggérant ainsi que les ressources en eau souterraine dans ces régions n'étaient exploitables que localement et ne constituaient pas des systèmes aquifères suffisamment importants pour envisager une quelconque mise en valeur des eaux souterraines.

Ce jugement sommaire a dû être remis en cause à la suite des travaux réalisés pour lutter contre les effets de la sécheresse qui affecte le Sahel à partir des années 1969-1970. Il a fallu impérativement mener des études hydrogéologiques et des travaux de reconnaissance puis de développement dans les régions ouest du Mali où le déficit chronique de la réalimentation des nappes superficielles avait provoqué le tarissement de plus en plus précoce des points d'eau traditionnels utilisés jusqu'alors sans problèmes par les populations rurales. Ce tarissement s'est produit d'abord en zone sahélienne, puis, la sécheresse persistant, en zone soudano-sahélienne.

Entre 1972 et 1975, les projets PNUD/DNHE/DCTD/MLI/67/507 puis MLI/74/001 sont les premiers à effectuer des recherches méthodiques visant à localiser et à évaluer les zones favorables dans les aquifères fissurés. L'utilisation systématique et, par suite, la mise au point progressive de méthodes d'interprétation photogéologique, de prospection géophysique de détail et de techniques de forage de mieux en mieux adaptées à ce type d'aquifère ont permis, contre toute attente, de prouver l'existence de ressources en eau souterraine exploitables par forage, d'abord dans les formations schisteuses du Cambrien, puis dans les formations gréso-schisteuses de l'Infracambrien et enfin dans les roches cristallines du socle.

C'est ainsi qu'à partir de 1976 a pu se développer ce qu'on appelle communément "l'hydraulique villageoise", développée surtout dans les régions ouest et sud du Mali, consistant en la création de forages équipés de pompes à motricité humaine. En contrepartie, la toute première priorité accordée alors à l'hydraulique villageoise du fait de l'urgence des besoins en eau des populations rurales et du bétail a eu pour effet, jusqu'en 1982, d'une part de limiter les études hydrogéologiques à l'implantation des ouvrages, donc sur des zones très localisées, d'autre part de ne viser que l'obtention d'un débit minimal de 1 m³/h exploitable par pompe à motricité humaine. Ainsi, la plupart des forages productifs ont été arrêtés dès que le débit de soufflage mesuré au cours de la foration atteignait 1 m³/h sans tester d'éventuelles venues d'eau plus profondes. Aucun essai de pompage normalisé n'était effectué.

Ce n'est qu'à partir de 1982 que, sur la pression de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE), les projets d'hydraulique villageoise et pastorale incluent dans leur programme un pompage d'essai de courte durée sur tous les forages productifs en vue de déterminer leur capacité réelle d'exploitation et d'estimer les caractéristiques hydrauliques locales des aquifères fissurés. Les rapports de fin de projet comportent aussi une première interprétation des données des forages réalisés dans leur zone d'intervention en s'appuyant sur une analyse statistique.

C'est aussi à partir de 1982 que la DNHE estime qu'une évaluation actualisée des ressources en eau souterraine des différents aquifères et des conditions de leur exploitation sur l'ensemble du Mali est devenue nécessaire; cette évaluation est confiée aux projets PNUD/DCTD/MLI/82/005, puis MLI/84/005. qui entreprennent les actions suivantes destinées à rassembler les informations indispensables à l'élaboration d'une synthèse hydrogéologique :

- mise en place progressive d'un réseau national de suivi piézométrique,
- pompages d'essai de longue durée devant servir de référence pour les secteurs d'aquifères fissurés,
- inventaire exhaustif des points d'eau villageois et enquêtes socio-économiques sommaires,
- travaux de reconnaissance complémentaires par forages et prospections géophysiques dans les zones à faible densité de données,
- création d'une banque de données sur les ressources en eau du Mali rassemblant, sous forme informatisée, la totalité des informations disponibles,
- mise en place d'un logiciel de gestion de cette banque pouvant effectuer tous les traitements statistiques désirés et l'édition d'annuaires et de répertoires actualisés.

1.3. CONTRAINTES ET LIMITES

Du fait que la plupart des données utilisées proviennent de projets d'hydraulique villageoise plutôt que d'études spécifiques ou générales, la préparation de la synthèse hydrogéologique a dû faire face à plusieurs contraintes liées à l'origine et à la qualité des données, à leur valeur intrinsèque et à leur représentativité à l'échelle des aquifères, liées enfin à leur densité et à leur répartition.

a) Origine et qualité des données

Les spécifications techniques imposées pour la réalisation des forages ont varié jusqu'à une époque récente suivant les bailleurs de fonds. Généralement, l'acquisition systématique des données hydrogéologiques de base n'était prise en compte qu'accessoirement. C'est ainsi que les données de nombreux forages, surtout parmi ceux exécutés avant 1985, sont incomplètes, de qualité douteuse ou médiocre, même pour des paramètres de base aussi importants que la profondeur des niveaux d'eau ou le débit des ouvrages. La DNHE a réussi à remédier à cette situation en imposant aux projets des spécifications techniques précises à l'appui de formulaires standardisés que les projets devaient lui remettre à la fin de chaque campagne de travaux. Ainsi, à partir de 1985, un archivage complet et homogène a pu être réalisé qui a permis de saisir les données hydrogéologiques utiles dans des fichiers informatiques, actualisés périodiquement depuis.

b) Représentativité des données

Ainsi qu'on l'a signalé plus haut, la recherche d'un débit maximum de 1 m³/h a conduit la majorité des projets d'hydraulique villageoise à arrêter les forages avant d'avoir exploré la totalité des possibilités de l'aquifère ce qui limite d'autant l'analyse hydrogéologique. En outre, la plupart des essais de production exécutés sur les forages sont souvent de trop courte durée pour calculer avec précision les paramètres hydrauliques des aquifères et les conditions aux limites qui déterminent leur exploitation à long terme, notamment celle des aquifères fissurés.

c) Densité et répartition géographique des données

La densité des données varie suivant les régions et les aquifères. Dans les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali sur lesquels ont opéré de nombreux projets d'hydraulique villageoise, elle est suffisante pour permettre d'évaluer correctement les conditions hydrogéologiques et leur degré de variabilité. Par contre, dans les aquifères généralisés du centre et de l'est du Mali, les données de forages sont moins nombreuses et irrégulièrement réparties; la connaissance de ces réservoirs souterrains reste limitée, mais cette limitation est en partie compensée par un plus faible degré de variabilité. C'est surtout dans les régions désertiques du nord et de l'est du Mali que les données hydrogéologiques font le plus défaut, notamment dans les secteurs ouest et est de l'Azaouad, dans le Tanezrouft et à l'extrémité nord du Mali.

A ces contraintes spécifiques, s'ajoutent des contraintes d'ordre plus général concernant le fonctionnement hydraulique des milieux fissurés, les mécanismes de transfert dans la zone dénoyée et surtout le rôle de l'évaporation, car ces phénomènes restent encore du domaine de la recherche expérimentale et des hypothèses.

La synthèse hydrogéologique doit donc être considérée comme un récapitulatif des connaissances actuelles sur les données de base nécessaires à l'élaboration d'une politique de développement des ressources en eau souterraine à l'échelle régionale tandis que la réalisation de projets à l'échelle locale nécessitera encore des études complémentaires plus ou moins poussées selon les secteurs et les objectifs des projets.

Outre l'apport de ces études locales, il sera nécessaire d'effectuer des études plus générales, régionales ou thématiques, destinées à combler les insuffisances et les lacunes mises en évidence par la synthèse et à vérifier les hypothèses, notamment en ce qui concerne les paramètres hydrauliques et les mécanismes de vidange-recharge des nappes.

1.4. METHODOLOGIE

Dans la présentation des chapitres qui suivent, les mesures et les observations ainsi que les données statistiques qui en découlent, sont présentées séparément des hypothèses d'interprétation auxquelles elles conduisent. Ainsi, une réinterprétation ultérieure sera possible lorsque de nouvelles informations auront été obtenues.

Les zones d'intervention des projets d'hydraulique étant généralement établies sur des limites administratives, les données ont dû être redistribuées sur la base d'un découpage hydrogéologique naturel afin d'assurer leur cohérence vis-à-vis des aquifères et des subdivisions hydrogéologiques auxquels elles se rapportent.

Les interprétations présentées dans cette synthèse tentent de dégager les meilleures hypothèses sur le fonctionnement hydraulique des aquifères en y intégrant notamment toutes les données issues des différentes techniques d'investigation : géologie, tectonique, piézométrie, pompages d'essai, analyses hydrochimiques et isotopiques, analyse des données hydrologiques et climatiques. On a été ainsi conduit à avancer des hypothèses parfois différentes de celles adoptées par les projets d'hydraulique souvent parce que celles-ci étaient basées sur des données incomplètes et d'extension limitée dans le temps et dans l'espace. Lorsque plusieurs hypothèses sont envisageables, une argumentation critique basée sur les observations et les mesures est proposée laissant ouverte la conclusion.

La préparation de la synthèse hydrogéologique s'est faite en fonction du programme d'activités du projet MLI/84/005 avec les étapes suivantes :

- collecte, vérification et homogénéisation des données,
- saisie informatique et constitution des fichiers de la banque SIGMA,
- acquisition de données complémentaires au moyen de travaux de reconnaissance et d'études spécifiques dans les zones les moins connues,
- édition de répertoires et d'annuaires sur les données de base,
- préparation de rapports techniques spécifiques sur les principaux paramètres hydrogéologiques détaillant les données disponibles et leur interprétation.

La synthèse hydrogéologique reprend les principaux éléments et conclusions de ces rapports techniques dont la liste est fournie en Annexe 1.

1.5. BANQUE DE DONNEES SIGMA

La banque de données SIGMA (Système Informatique de Gestion des ressources en eau du Mali) a été créée et constituée par le projet PNUD/DCTD/MLI/84/005 au sein de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie. Elle représente un outil indispensable et une aide précieuse à la gestion des ressources en eau du pays. Elle a permis la réalisation des deux objectifs principaux de ce projet : la Synthèse Hydrogéologique et le Schéma Directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali.

L'informatisation des données s'est faite en deux phases :

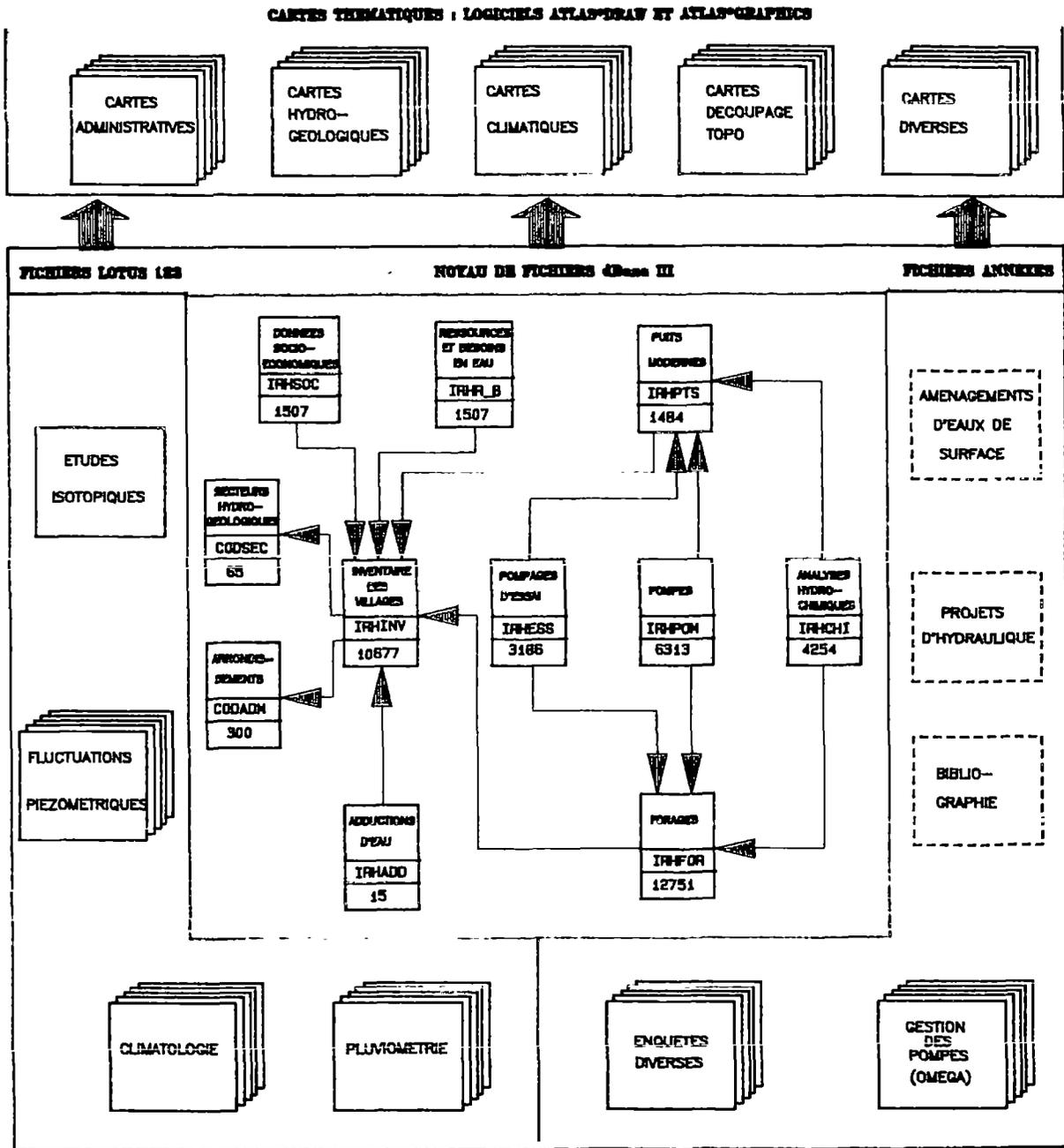
- de 1983 à 1986, seules les données de forages ont été collectées, vérifiées, standardisées et informatisées sur un équipement Apple IIE à l'aide du logiciel Visifile. Cette phase préliminaire avait au départ pour but de répertorier tous les forages exécutés par les différents projets financés par le PNUD. La saisie des données de forage a été progressivement étendue aux autres projets d'hydraulique pour assurer la sauvegarde et l'archivage des informations ;
- à partir de 1986, la banque SIGMA est constituée sous sa forme actuelle avec pour objectif de devenir un véritable outil de gestion et de planification des ressources en eau tout en améliorant et en renforçant son rôle d'archives techniques de la DNHE.

La banque SIGMA a été ainsi développée sur micro-ordinateur compatible IBM-XT à partir des logiciels dBase III et LOTUS 123. Le choix de cet environnement informatique répond à l'évolution prévisible des matériels et de leur utilisation avec des logiciels standards. Il répond en outre aux besoins spécifiques d'étude et de gestion des ressources en eau grâce aux possibilités de programmation de dBase III.

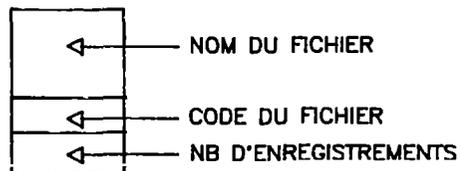
La structure de SIGMA est représentée schématiquement par l'organigramme de la figure 1.1 avec l'identification de tous les fichiers et leurs interconnexions. Elle est constituée par un noyau central de fichiers dBase articulés autour du fichier "VILLAGE" qui est l'unité administrative de base. SIGMA est complété par une série de fichiers satellites informatisés sur LOTUS 123. Ceux-ci contiennent les données à représenter ou à analyser sous forme graphique et cartographique notamment les historiques piézométriques et pluviométriques. De même, tous les fichiers peuvent être traités statistiquement avec calcul des moyennes, des maxima, des minima, des distributions et des écarts-type. Les données ainsi obtenues forment des fichiers reproductibles, utilisables également sous forme de graphiques et de cartes thématiques par l'intermédiaire des logiciels ATLAS*DRAW et ATLAS*GRAPHICS.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

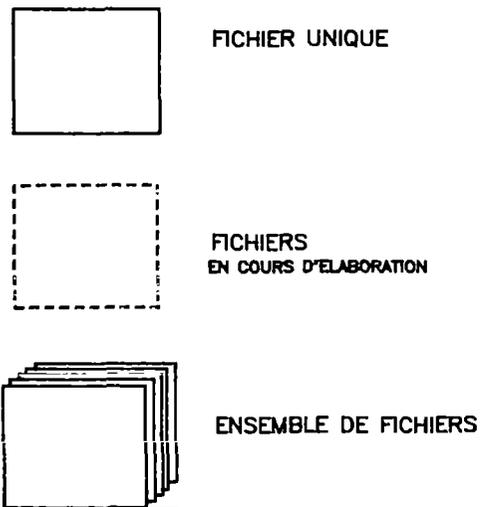
Figure 1.1 STRUCTURE DE LA BANQUE SIGMA



FICHIERS DU NOYAU



AUTRES FICHIERS



L'ensemble des fichiers constituant la Banque de données est gérée par le logiciel SIGMA créé par le projet. Il se présente comme une succession de menus déroulants dans lesquels l'utilisateur effectue son choix selon ses besoins, et d'écrans-masque servant à saisir et à éditer les données suivant le format désiré. A ce titre, SIGMA présente l'avantage d'être un logiciel convivial.

Les fichiers de SIGMA sont gérés par tout un ensemble de programmes superposés à la base de données et établis par l'Unité d'Informatique de la DNHE, au fur et à mesure, en fonction des besoins de consultation, d'édition, de modification, de rajout, de traitement statistique, de sélection de données, etc...

Le nombre d'enregistrements indiqué pour chaque fichier correspond à l'état de SIGMA au 31/12/1988 et les données statistiques sur les aquifères mentionnées dans cette synthèse ont été calculées sur les données disponibles à cette date. SIGMA a cependant été régulièrement actualisé au cours de 1989, mais les nouvelles informations n'ont été prises en compte dans la synthèse que pour les zones où les données antérieures au 31/12/88 étaient trop peu nombreuses nécessitant de faire appel à toutes les données disponibles.

Toutes les données de base ont été publiées sous forme de répertoires spécifiques par fichier (*voir liste en Annexe 1*) mis à la disposition de tous les utilisateurs intéressés. Par ailleurs, la Banque SIGMA est régulièrement sollicitée par les responsables de projets d'hydraulique en cours ou programmés qui peuvent obtenir les données et les statistiques dont ils ont besoin dans le cadre de leurs activités.

1.6. PLAN DE LA SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE

Outre ce chapitre d'introduction, la synthèse hydrogéologique comporte 8 autres chapitres qui détaillent respectivement :

- le cadre physiographique décrivant les contextes physique, géomorphologique et géologique du Mali, les conditions climatiques et l'état des connaissances sur le régime des eaux de surface (*chapitre 2*),
- les systèmes aquifères identifiés au Mali, décrits sur un plan général, avec leur classification, leurs caractéristiques principales et un aperçu sur les données de base permettant de montrer l'état d'avancement des connaissances sur chacun d'eux (*chapitre 3*),
- les caractéristiques intrinsèques détaillées des différents aquifères : leur piézométrie (*chapitre 4*), leurs paramètres hydrodynamiques (*chapitre 5*) et leurs caractéristiques physico-chimiques et isotopiques (*chapitre 6*),
- le bilan des aquifères qui permet de donner une évaluation de l'amplitude de leur renouvellement et de leurs réserves, et par suite, des ressources disponibles et exploitables (*chapitre 7*),
- les modes d'exploitation des eaux souterraines : les ouvrages de captage, les moyens d'exhaure, l'utilisation actuelle, les coûts de l'eau souterraine et les contraintes liées à son exploitation (*chapitre 8*),

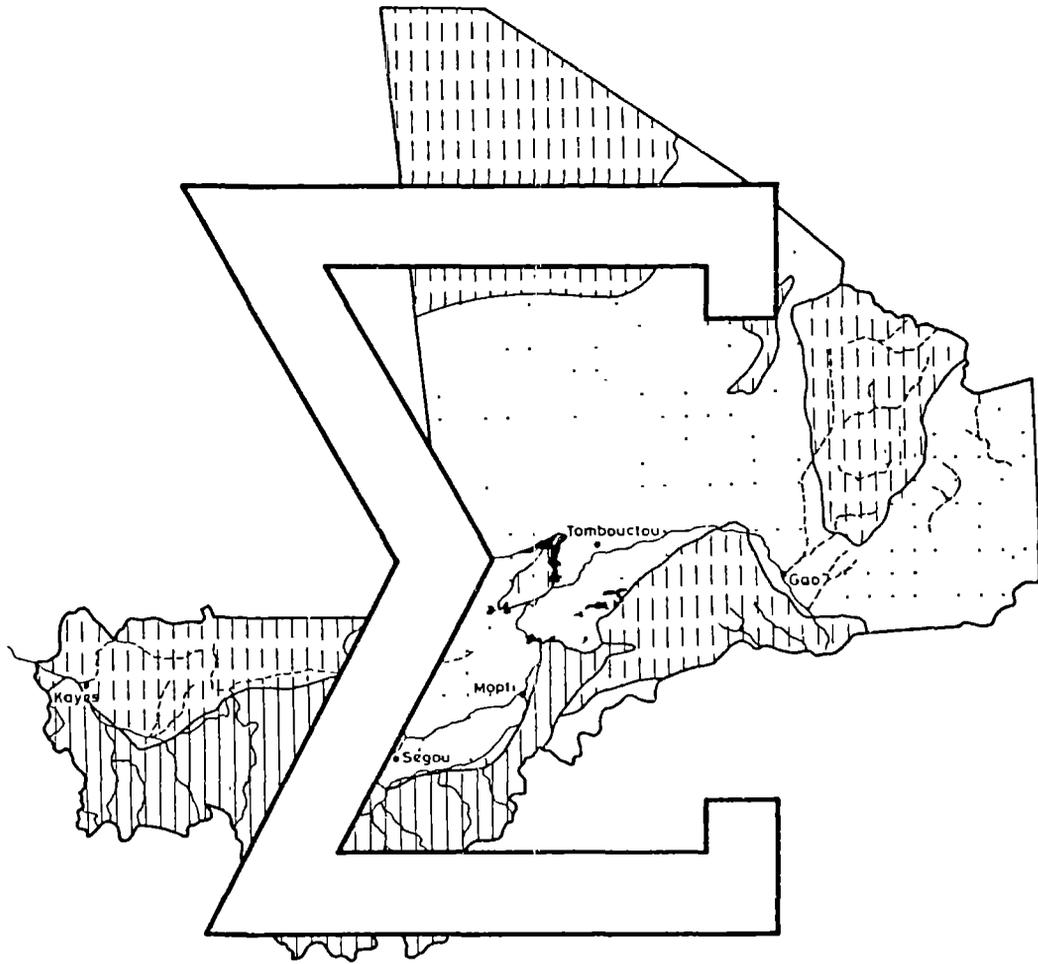
- enfin, les conclusions et recommandations sur l'état des connaissances et son amélioration possible et souhaitable, sur le suivi des ressources et de leur mise en valeur, sur les méthodologies d'étude, de reconnaissance et d'exploitation, sur les aspects légaux, institutionnels et financiers, et enfin pour une stratégie de valorisation des ressources en eau souterraine (*chapitre 9*).

Le rapport est illustré d'un grand nombre de tableaux, de cartes et de graphiques réalisés essentiellement à partir de la banque de données SIGMA et des différents logiciels de traitement : LOTUS 123, ATLAS*DRAW et ATLAS*GRAPHICS.

L'absence, sur la place, de moyens de production cartographique polychrome en grandes dimensions et les fonds limités n'ont pas permis d'éditer la carte hydrogéologique du Mali au 1.500.000e comme la carte géologique éditée par la Direction Nationale des Mines et de la Géologie en 1980, mais par contre les données de base existent et une carte et sa notice ont déjà été élaborées par le projet MLI/84/005 au 1/2.500.000 [HDG/NTL/8] en tirage héliographique.

Par ailleurs, les données hydrogéologiques (géologie, piézométrie, hydrochimie, localisation et données des forages) ont été représentées également par carte de 1° carré au 1/400.000, couvrant la moitié peuplée du Mali en 53 feuilles dont un modèle en couleurs est donné au chapitre 8. Dans les régions sahéliennes et désertiques du nord et de l'est, les données ont été représentées au 1/1.000.000. Tous ces documents cartographiques seront rassemblés ultérieurement en un atlas de cartes d'ordinateur en couleurs accompagné d'une notice explicative lorsque toutes les feuilles auront été digitalisées.

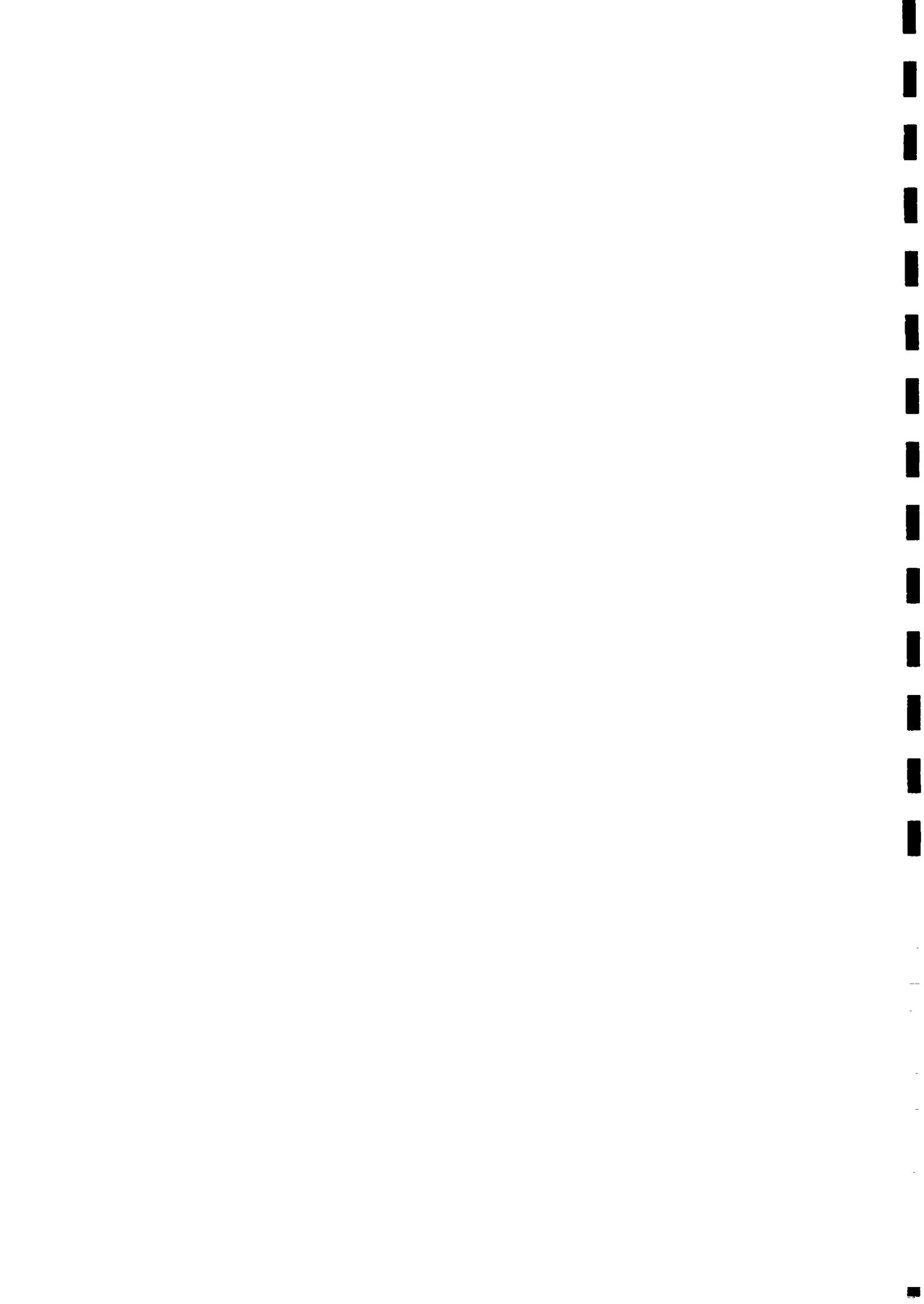
La présente synthèse ne fournit donc que des cartes à petite échelle, en format A4, certaines tronquées de la moitié nord du pays lorsque les données sur ces régions désertiques et peu peuplées n'étaient pas suffisantes pour donner une image correcte de la réalité. Ceci a permis en outre de rendre plus "lisible" la partie cartographiée en utilisant une plus grande échelle.



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 2

CADRE PHYSIQUE



CHAPITRE 2

TABLE DES MATIERES

TEXTE

2.1. GENERALITES.....	1
2.2. RELIEF.....	1
2.3. CLIMATOLOGIE.....	3
2.3.1. Zones climatiques.....	3
2.3.2. Pluviométrie.....	4
2.3.3. Température.....	7
2.3.4. Autres paramètres climatiques.....	9
2.4. GEOLOGIE.....	10
2.4.1. Socle birrimien (Précambrien C).....	10
2.4.2. Infracambrien (Précambrien A).....	12
2.4.3. Cambrien.....	14
2.4.4. Primaire de Taoudenni.....	14
2.4.5. Intrusions doléritiques.....	15
2.4.6. Continental intercalaire.....	15
2.4.7. Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	16
2.4.8. Continental terminal.....	17
2.4.9. Formations de recouvrement.....	17
2.4.10. Schéma structural.....	18
2.5. HYDROLOGIE.....	20
2.5.1. Réseau hydrographique.....	20
2.5.2. Données hydrométriques.....	21
2.5.3. Composantes de l'écoulement de surface.....	23
2.5.4. Le delta intérieur.....	25
BIBLIOGRAPHIE.....	27

FIGURES

Fig.2.1. Relief et hydrographie.....	2
Fig.2.2. Pluviométrie moyenne en période humide et en période sèche.....	5
Fig.2.3. Historiques pluviométriques aux stations représentatives des zones climatiques.....	5
Fig.2.4. Données climatiques moyennes annuelles : a) température, b) humidité relative, c) ETP Penman, d) évaporation bac classe A	8
Fig.2.5. Ensembles lithostratigraphiques.....	11
Fig.2.6. Schéma structural.....	19
Fig.2.7. Réseau hydrographique des régions ouest et sud du Mali.....	22
Fig.2.8. Hydrogrammes de référence des fleuves Sénégal à Kayes et Niger à Koulikoro.....	22
Fig.2.9. Composantes de l'écoulement du fleuve Sénégal à Galougo.....	24
Fig.2.10. Variations de la composante "Ecoulement de base" du Sénégal à Galougo.....	24

TABLEAUX

Tab.2.1.	Précipitations mensuelles et annuelles moyennes aux stations représentatives des différentes zones climatiques, en mm.....	4
Tab.2.2.	Exemple de variations locales des pluies annuelles, en mm.....	6
Tab.2.3.	Variabilité interannuelle des précipitations, en mm.....	6
Tab.2.4.	Températures moyennes mensuelles aux stations représentatives des zones climatiques, en °C.....	7
Tab.2.5.	Humidité moyenne mensuelle en zones sahélienne et soudanienne, en %.....	9
Tab.2.6.	Evapotranspiration moyenne mensuelle et annuelle Penman, en mm..	9
Tab.2.7.	Evaporation sur bac classe A, en mm.....	10
Tab.2.8.	Débits unitaires moyens aux stations hydrométriques principales selon trois périodes de référence, en l/s/km ²	23
Tab.2.9.	Valeurs moyennes des composantes de l'écoulement, en m ³ /s.....	25

CHAPITRE 2

CADRE PHYSIQUE

2.1. GENERALITES

Le Mali est un pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest qui couvre une superficie de 1.240.000 km² et s'étend entre les latitudes 10°30' et 25°00'N et les longitudes 12°00'O et 4°00'E, le méridien de Greenwich passant sur la ville de Gao. Il est situé entièrement en zone tropicale nord avec un climat caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche de 6 à 9 mois et d'une courte saison humide au cours de laquelle se produit la presque totalité des précipitations. Son relief, peu contrasté, est constitué de plateaux et de plaines avec des systèmes dunaires bien développés dans les régions nord et est. Les cours d'eau permanents n'existent que dans les régions ouest et sud du pays et concernent en partie les bassins en amont des fleuves Sénégal et Niger. Le delta intérieur du Niger qui s'étend en zone sahélienne entre Ké Macina et Tombouctou, constitue un des traits spécifiques de l'hydrographie du Mali.

2.2. RELIEF

L'ouest et le sud du Mali sont occupés par des plateaux gréseux recouverts de cuirasses ferrugineuses, inclinés vers le nord et étagés principalement entre 300 et 400 m d'altitude (*figure 2.1.*). Un premier ensemble, le plus important, est constitué par le plateau mandingue et s'étend au nord du fleuve Niger depuis Koulikoro jusqu'à la frontière du Sénégal. Sa bordure sud, plus élevée, culmine à près de 800 m. Le réseau hydrographique y a morcelé le relief en une succession de plateaux séparés par des plaines et des petits bassins où se sont profondément encaissés les affluents en amont du fleuve Sénégal. Le plateau mandingue se termine à l'ouest par la falaise de Tambaoura qui domine la plaine de la Falémé. Un second ensemble de plateaux s'allonge au sud du cours supérieur du Niger et du Bani jusqu'à la frontière avec le Burkina Faso où il est relayé par le plateau de Banfora. Ces plateaux forment un vaste entablement topographique relevé sur ses bordures et dont la partie centrale, d'altitude plus faible, a été largement érodée par le Bani et ses principaux affluents. Alors qu'à l'ouest l'altitude ne dépasse pas 500 m, elle croît progressivement vers l'Est jusqu'au plateau dogon où elle atteint 791 m au point culminant de la falaise de Bandiagara, à 500 m au-dessus de la plaine du Gondo - Senomango, et se prolonge vers l'est par un chapelet de buttes résiduelles dans la zone de Hombori où se situe le point culminant du Mali à 1.155 m d'altitude.

Un vaste ensemble de plaines en partie ensablées, d'altitudes comprises entre 260 et 320 m, s'étend au nord du plateau mandingue, dans la zone de Nioro et Nara. Il est relayé, à l'ouest de Nioro, par le plateau basaltique du Kaarta qui est disséqué par un chevelu hydrographique très dense et domine les plaines et les glacis d'érosion de la vallée du Sénégal, celle-ci constituant la zone topographique la plus basse du Mali avec une altitude de 25 m à Bakel.

La région centrale du Mali, ceinturée au Sud par les plateaux gréseux soudano-sahéliens, est occupée par une vaste plaine alluviale appelée communément delta intérieur du Niger dont la partie occidentale correspond au delta fossile qui était fonctionnel à l'Holocène, et la partie orientale au delta vif actuel. Le fleuve s'y ramifie en de nombreux bras séparés par des alignements dunaires et des levées sableuses. Certains bras alimentent de vastes cuvettes argileuses peu profondes et à fond plat qui se remplissent en fonction de la cote atteinte par les crues annuelles. Dans la zone de Goundam, des dunes et des petites collines rocheuses limitent les plaines du delta où se

sont formés des lacs semi-permanents. Une échancrure dans ces collines permet à un bras du fleuve d'alimenter, lors des années de forte hydraulité, le lac Faguibine qui constitue alors le plan d'eau de surface permanent le plus septentrional du Mali, en bordure du désert de l'Azaouad.

Un second ensemble de plaines s'étend à l'est du delta constituant le Gourma entre la boucle du Niger au Nord et le plateau dogon au Sud. On y observe des cordons de dunes fixées et de petits inselbergs émergeant des plaines caillouteuses ou ensablées.

Dans la zone désertique au nord du 17^e parallèle, de grands systèmes dunaires tels que les ergs de l'Azaouad, des Erigat, de Mreyyé notamment, s'étendent jusqu'au plateau du Khenachich à 500 km au nord du fleuve Niger et se prolongent à l'ouest en Mauritanie. Dans la partie centrale, ces ergs sont constitués par des cordons longitudinaux orientés OSO-ENE tandis qu'à l'ouest, en bordure de la Mauritanie, ils sont représentés par des ondulations de faible dénivelé et de direction NO-SE ou par de grandes dunes chaotiques [2-1].

A l'extrémité nord du Mali, le plateau du Khenachich, à surface rocheuse et dénudée de type reg, domine la cuvette de Taoudenni dont le point bas, occupé par les salines d'Agorgott, est situé à une altitude de 133 m. Le plateau du Khenachich est relayé à l'est par ceux du Tanezrouft et, au sud-est, par celui du Timetrine.

L'Adrar des Iforas est une extension des massifs cristallins du Sahara central. Il culmine à 890 m près de la frontière algérienne. Le réseau hydrographique y a dégagé des inselbergs et des lignes de relief résiduel bordés de glacis. Sur son flanc ouest, l'Adrar est longé par la vallée fossile du Tilemsi qui rejoint la vallée du Niger près de Gao tandis que le flanc sud-est est relayé par les plateaux et les plaines du Tamesna traversés par la vallée de l'Azaouak.

2.3. CLIMATOLOGIE

2.3.1. Zones climatiques

Les caractéristiques climatiques du Mali sont liées à sa continentalité et à l'absence de reliefs marqués pouvant perturber le déplacement du front intertropical (FIT) qui conditionne le régime des précipitations et rythme l'alternance des saisons sèche et humide.

L'évolution des paramètres climatiques se fait avec des gradients approximativement latitudinaux selon quatre zones climatiques étagées du sud au nord:

* La zone soudanienne

Limitée par le 12^{ème} parallèle N, elle couvre la partie méridionale de la Région de Sikasso jusqu'à la frontière avec la Côte d'Ivoire. Les précipitations y sont supérieures à 1.200 mm par an et peuvent dépasser 1.500 mm ; elles se produisent sur une période de Mai à Octobre avec 90 jours d'occurrence de pluie en moyenne.

** La zone soudano-sahélienne*

Située entre les 12ème et 14ème parallèles N, elle couvre le domaine des plateaux gréseux de l'ouest et du sud du Mali avec des précipitations moyennes comprises entre 700 et 1.200 mm par an étalées sur 4 mois (juin à octobre) avec entre 60 et 80 jours d'occurrence de pluie en moyenne.

** La zone sahélienne*

Elle représente près du quart de la superficie totale du Mali, entre le 14ème et le 16ème parallèles N. Les précipitations qui y décroissent de 700 mm à 200 mm par an sur sa bordure nord, sont concentrées durant un hivernage de courte durée de Juin-Juillet à Septembre - Octobre avec de 30 à 40 jours d'occurrence de pluie en moyenne.

** La zone sud saharienne*

Elle s'étend sur toute la région désertique du nord du Mali avec des précipitations inférieures à 200 mm et jusqu'à moins de 50 mm par an ou nulles au nord du 20ème parallèle.

2.3.2. Pluviométrie

Le régime pluviométrique du Mali, de type intertropical continental, est donc caractérisé par :

- une décroissance régulière des précipitations et de la durée de la saison pluvieuse (hivernage) du sud vers le nord,
- une distribution irrégulière des précipitations dans l'espace avec, principalement, des épisodes pluvieux sous forme de grains localisés,
- une forte variabilité interannuelle.

Tableau 2.1 - Précipitations mensuelles et annuelles moyennes aux stations représentatives des différentes zones climatiques, en mm (période 1926-1975) [2.2].

Station	Latitude nord	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne annuelle	Nb. jours pluie
KIDAL	18°26'	0	0	0	1	7	10	35	56	25	3	0	0	137	21
NIORO	15°14'	0	1	0	5	17	65	58	215	118	24	2	1	506	48
SEGOU	13°24'	0	0	3	11	26	91	180	245	127	26	3	1	713	64
BAMAKO	12°38'	1	0	4	17	65	141	204	333	213	66	7	1	1.052	83
SIKASSO	11°21'	1	5	17	50	114	157	270	333	230	91	17	3	1.288	98

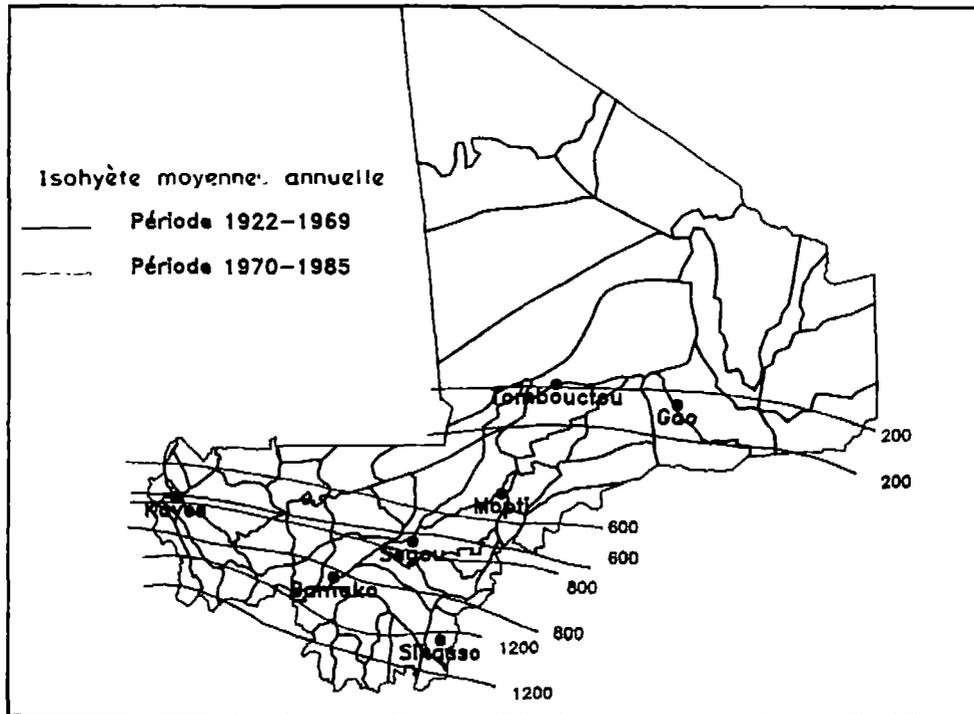


Fig. 2.2 - Pluviométrie moyenne en période humide (1922 - 69) et en période sèche (1970 - 85), en mm

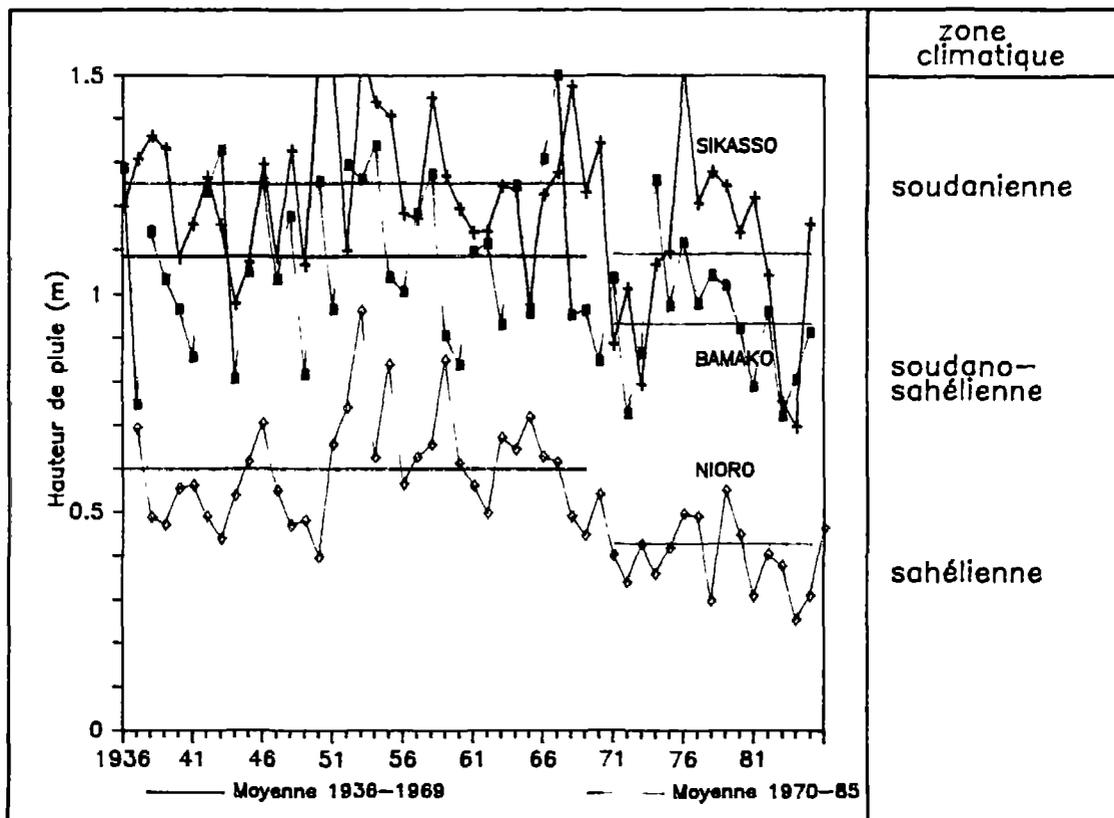


Fig. 2.3 - Historiques pluviométriques aux stations représentatives des zones climatiques.

La diminution des précipitations est de l'ordre de 150 à 200 mm par degré de latitude (*figure 2.2*). Dans le sud du Mali, l'hivernage débute en mai et se termine en octobre avec certaines années des pluies importantes en avril et en novembre. En zone sahélienne, les pluies sont concentrées entre juillet et septembre. Le mois d'août est le plus pluvieux dans toutes les zones climatiques.

Tableau 2.2 - Exemple de variations locales des pluies annuelles, en mm (secteur de Kolokani)

	Station	1983	1984	1985	1986	1987
Pluie annuelle (mm)	KOLOKANI	549	512	608	872	541
	TIORIBOUGOU	529	477	498	-	749
	NOSSOMBOUGOU	-	624	758	638	817
Variations	KOLOKANI/TIORIBOUGOU	-4%	-7%	-18%	-	+38%
	KOLOKANI/NOSSOMBOUGOU	-	+22%	+25%	-27%	+51%
	TIORIBOUGOU/NOSSOMBG.	-	+31%	+52%	-	+9%

Ces trois stations, installées par le projet DCTD/MLI/84/005 pour l'interprétation des fluctuations piézométriques dans l'aquifère infracambrien, sont distantes d'environ 25 km l'une de l'autre, Nossombougou étant la station la plus méridionale. L'amplitude des variations observées et leur caractère aléatoire mettent en évidence la portée limitée des historiques pluviométriques pour des études locales lorsqu'on ne dispose pas de postes d'observation relativement proches des sites choisis.

Tableau 2.3 - Variabilité interannuelle des précipitations, en mm (période 1936-1986)

Station	Moyenne	Maximum	Minimum	Ecart-Type	Tendance (mm/an)
KIDAL	128	227	60	42	-0,1
NIORO	537	965	256	148	-4,6
SEGOU	685	952	391	132	-3,1
BAMAKO	1.044	1.500	722	187	-3,6
SIKASSO	1.202	1.592	699	193	-3,9

La tendance interannuelle moyenne définie sur la période 1936-1985 met en évidence la diminution générale des précipitations dans toutes les régions du Mali. En valeur absolue, la baisse la plus marquée est enregistrée en zone soudanienne (Sikasso) tandis qu'en valeur relative par rapport à la moyenne, c'est la zone sahélienne qui est la plus affectée (station de Nioro). Cette évolution n'est toutefois pas régulière; elle recouvre en fait deux périodes de tendance opposée (*figures 2.2 et 2.3*) :

- de 1936 à 1969, une période humide avec une tendance à l'augmentation de la pluviométrie,
- à partir de 1970, une période de sécheresse chronique avec des années qui présentent des déficits pluviométriques dépassant 30 % par rapport à la moyenne (notamment en 1970, 1972-73, 1977, 1984 pour la majorité des stations).

Les courbes isohyètes correspondant à cette dernière période se sont déplacées de près de 200 km vers le sud par rapport à celles de la période antérieure

2.3.3. Température

Sur l'ensemble du Mali les températures moyennes annuelles sont peu différenciées; elles montrent seulement une légère augmentation du sud-ouest vers le nord-est, de 26°C dans la région de Sikasso à 29°C à Tombouctou (*figure 2.4a*).

Les températures moyennes mensuelles sont beaucoup plus contrastées avec des amplitudes saisonnières caractéristiques des différentes zones climatiques.

Tableau 2.4 - Températures moyennes mensuelles aux stations représentatives des zones climatiques, en °C (période 1951-75) [2.2].

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne annuel.
KIDAL	20,3	23,4	27,0	30,8	33,7	34,7	33,0	31,5	32,1	30,2	25,6	21,4	28,6
NIORO	22,7	25,7	28,8	31,9	34,3	32,8	29,0	27,3	28,2	29,4	27,2	22,9	28,4
SEGOU	23,9	27,0	29,7	31,8	32,3	30,1	27,3	26,2	26,6	27,8	26,8	24,0	27,8
SIKASSO	23,9	27,2	29,5	30,4	29,5	27,5	25,9	25,3	25,7	26,9	26,0	23,7	27,0

La zone désertique sud-saharienne est caractérisée par une forte variation thermique mensuelle, en moyenne supérieure à 14°C, avec des températures maximales en juin et minimales en janvier. C'est aussi dans cette zone que les variations journalières de température sont les plus marquées notamment en hiver. L'amplitude des variations annuelles moyennes décroît de la zone sahélienne vers la zone soudanienne (11,4°C à Nioro et 6,7°C à Sikasso) de même que les températures maximales qui sont enregistrées en fin de saison sèche avant les premières pluies importantes annonçant le début de l'hivernage (34,3°C en mai à Nioro et 30,4°C en avril à Sikasso).

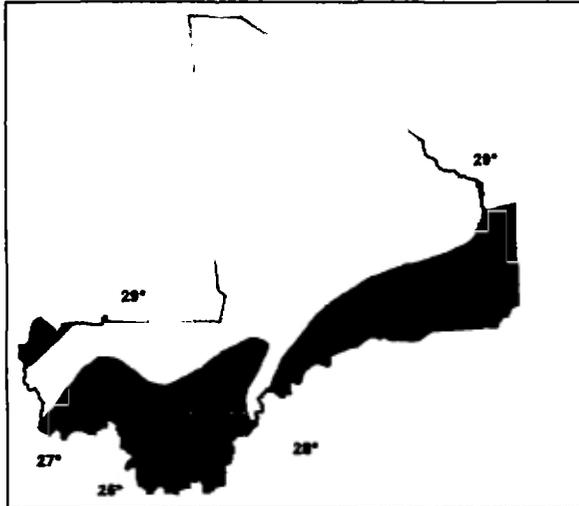


FIG. 2.4a: TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE SOUS ABRI (°C)

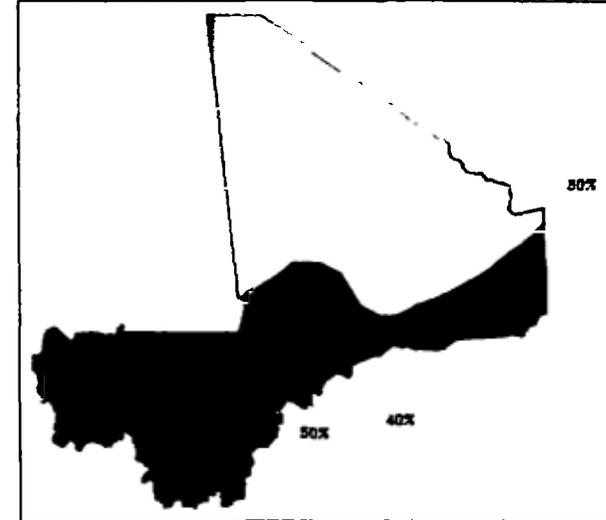


FIG. 2.4b: HUMIDITE RELATIVE MOYENNE ANNUELLE (%)

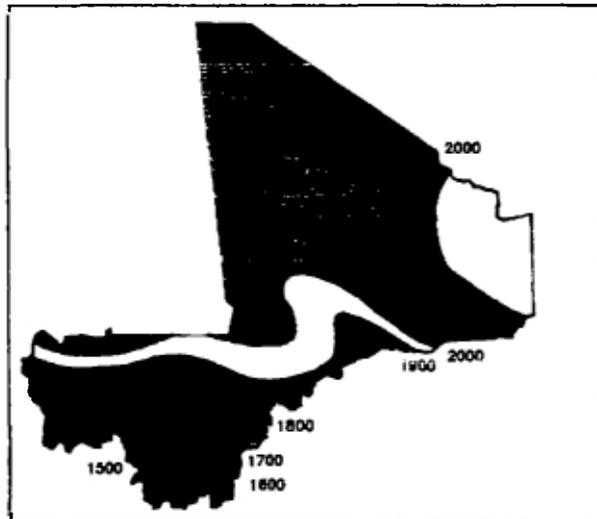


FIG. 2.4c: ETP PENMAN MOYENNE ANNUELLE (mm)

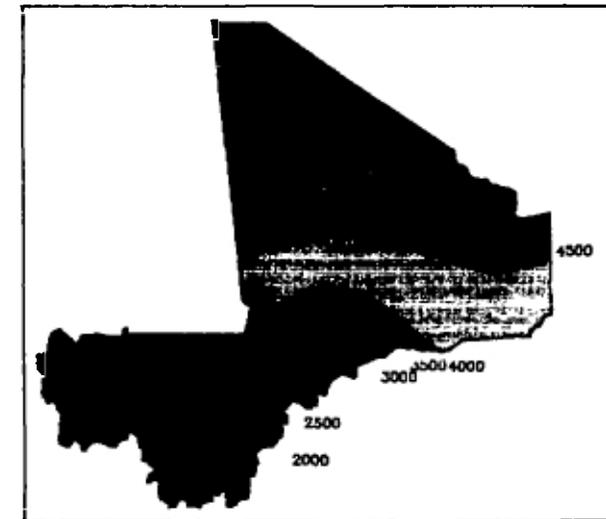


FIG. 2.4d: EVAPORATION BAC CLASSE A MOYENNE ANNUELLE (mm)

Fig. 2.4: Données climatiques moyennes annuelles

2.3.4. Autres paramètres climatiques

a) Humidité relative

En moyenne annuelle, elle est inférieure à 50 %, sauf dans la zone soudanienne (*figure 2.4b*). Les valeurs moyennes mensuelles dépassent 50 % pendant les mois pluvieux, de juin à octobre en zone soudano-sahélienne et sahélienne, et de mai à novembre, en zone soudanienne. L'humidité relative est minimale en février-mars et jusqu'en avril en zone nord-sahélienne.

Tableau 2.5 - Humidité moyenne mensuelle en zones sahélienne et soudanienne, en % (période 1951-1975) [2.2].

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne annuel.
NIORO	27	23	22	22	29	45	65	75	70	50	34	30	41
SIKASSO	34	31	37	49	61	70	77	82	78	71	57	47	58

b) Evaporation et évapotranspiration (ETP)

Les températures élevées, les faibles humidités relatives et l'effet desséchant de l'alizé continental (harmattan) durant la saison sèche expliquent les fortes valeurs de l'ETP, même dans la région bien arrosée du sud-ouest du Mali. Cette caractéristique joue un rôle majeur dans le bilan hydrique des aquifères puisqu'il intervient aussi bien sur leur recharge que sur leur décharge ou vidange (*figure 2.4c*).

Tableau 2.6. - Evapotranspiration (ETP) moyenne mensuelle et annuelle Penman, en mm (d'après la Direction Nationale de la Météorologie - DNM)

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne annuel.
GAO	171	187	242	260	276	247	244	213	206	189	171	158	2.564
BAMAKO	168	176	209	202	203	176	152	145	150	150	155	159	2.045
SIKASSO	112	126	149	157	161	136	129	126	124	129	116	108	1.573

Les valeurs de l'évaporation mesurée sur bac classe A pendant quelques années durant la période 1968-1978 montrent, pour les différentes zones climatiques, des variations plus importantes que celles de l'ETP Penman, l'augmentation de l'évaporation en comparaison de l'ETP étant particulièrement marquée en zone sahélienne (*figure 2.4d*).

Tableau 2.7 - Evaporation sur bac classe A, en mm [2.2]

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Moyenne annuel.
GAO (1)	323	320	444	492	514	470	431	363	365	405	393	311	4.831
SEGOU (2)	260	271	353	334	326	281	210	159	151	200	229	235	3.009
SIKAS. (3)	156	241	263	240	151	154	137	175	134	163	161	195	2.170

(1) 1971-78 (2) 1970-78 (3) 1974-78

2.4. GEOLOGIE

Les formations géologiques représentées au Mali couvrent les principaux ensembles stratigraphiques définis pour la géologie de l'Afrique avec, de la périphérie vers l'intérieur du pays, des séries de plus en plus récentes. Le Mali occupe la majeure partie du vaste bassin sédimentaire de Taoudenni qui représente une des structures majeures de la géologie de l'Afrique de l'Ouest.

Neuf grandes subdivisions géologiques sont représentées au Mali (*Figure 2.5*).

2.4.1. Socle birrimien (Précambrien C)

Il affleure dans la région de Bougouni ainsi que dans la zone de Kéniéba et de Kayes sur les bordures sud-ouest et ouest du Mali, le Birrimien s'étendant plus largement au-delà des frontières en Côte d'Ivoire et en Guinée. Il constitue également la zone axiale de l'Adrar des Iforas et affleure aussi au nord de Taoudenni marquant la limite septentrionale du bassin de Taoudenni.

Il est constitué d'une part de formations volcano-sédimentaires de lithologie variée, affectées par un métamorphisme plus ou moins poussé et déformées par des orogènes successives, d'autre part de massifs de granites intrusifs qui se sont mis en place à différentes époques.

* *Dans la région de Bougouni*, le Birrimien est représenté dans des sillons orientés NE-SO à NO-SE constitués par des schistes, des grauwackes, des conglomérats et des quartzites avec des intrusions de roches volcaniques. Ces sillons sont séparés par des rides granitiques où l'on trouve des faciès de granites à biotite, des diorites quartziques et des granodiorites.

* *Dans la région de Kéniéba*, on observe des séries volcano-sédimentaires (conglomérats, jaspes, schistes carbonés, roches carbonatées avec des basaltes et des gabbros interstratifiés) et des séries schisteuses épaisses. Les formations sont plissées suivant une direction NE et redressées. Les intrusions granitiques, moins fréquentes que dans la région de Bougouni, présentent souvent des faciès pegmatitiques et porphyriques ou sont représentées par des granites à biotite.

* *Dans la "boutonnière de Kayes"*, le Birrimien est comparable à celui de Kéniéba avec des séries volcano-sédimentaires légèrement métamorphosées à schistes, arkoses et grauwackes. Elles comportent des intercalations de basaltes, de dolérites et de tufs.

L E G E N D E

	Cont. terminal/Quaternaire	Sables, argiles, latérites, alluvions limono-sableuses
	Crétacé sup. Eocène inf.	Calcaires, marnes, argiles
	Cont.int./Cont.terminal	Sables grésifiés, argiles, argiles sableuses, sables éol.
	Continental intercalaire	Sables grésifiés, argiles, conglomérats
	Permo-trias	Intrusions doléritiques : dykes, sills, laccolites
	Primaire non différencié	Grès, calcaires, argiles
	Cambrien	Argilites, siltstones, grès, jaspes
	Infracambrien tabulaire	Grès de granulo. variée, grès schisteux, pélites
	Infracambrien plissé	Schistes métamorphiques, calcaires, grès
	Socle birrimien	Roches granitiques et métamorphiques

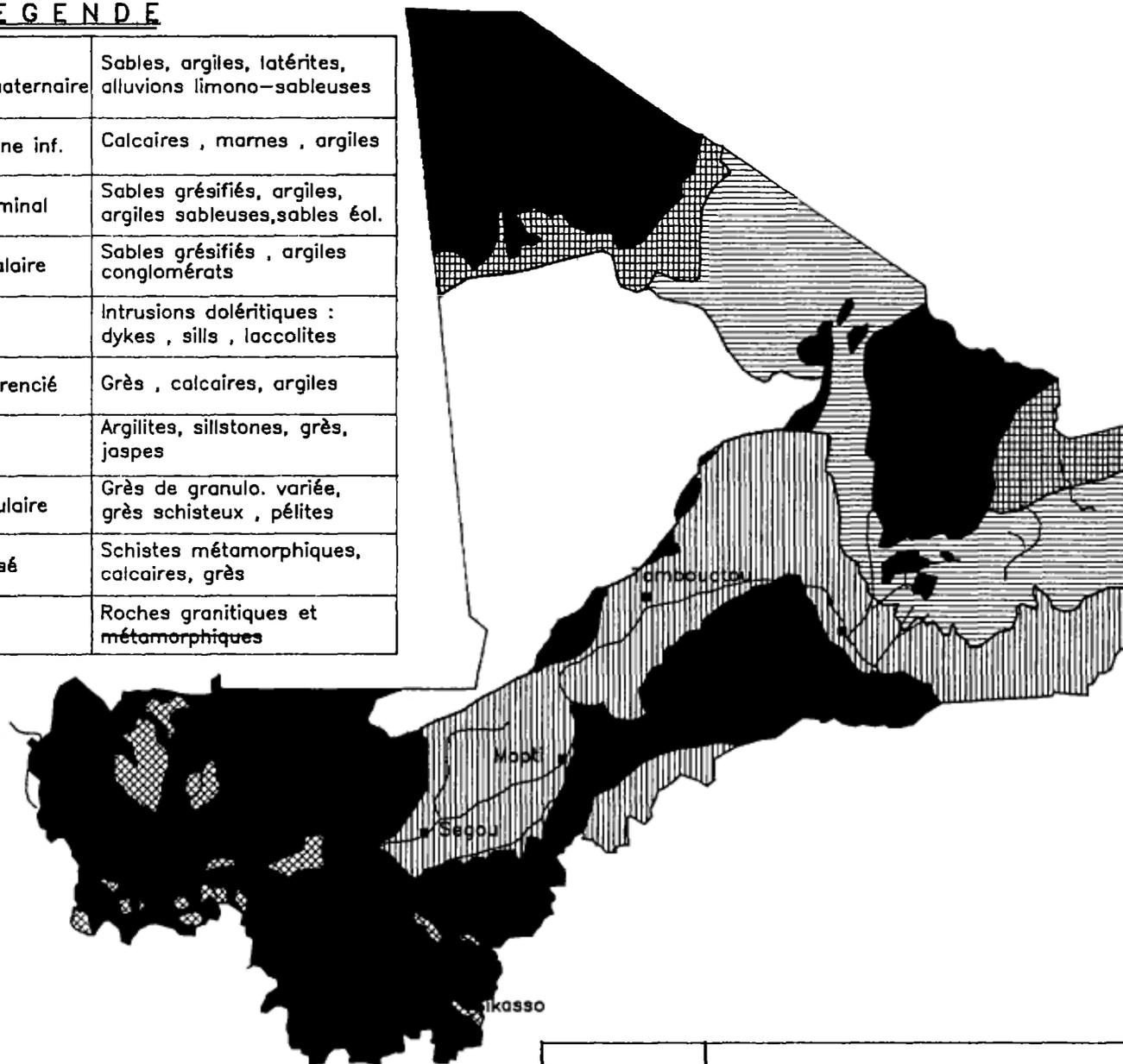


Fig. 2.5

ENSEMBLES LITHOSTRATIGRAPHIQUES

Les intrusions granitiques y sont également représentées, notamment par des granites calco-alcalins et des granodiorites à biotite et amphibole.

** Dans l'Adrar des Iforas, une structure complexe à orientation subméridienne a été mise en évidence par des études géologiques récentes [2.4] qui proposent la succession stratigraphique suivante :*

- les formations du Birrimien sensu stricto (Précambrien C) ne seraient représentées que dans la zone axiale du massif avec des quartzites, des leytinites et des granites métamorphisés. Elles sont probablement associées à des gneiss plus anciens correspondant au Précambrien D;
- les granites et les granodiorites ainsi que les formations volcano-sédimentaires à quartzites, marbres, amphibolites, basaltes et roches ultrabasiques qui affleurent sur les flancs de l'Adrar des Iforas, seraient à rapporter au Précambrien A;
- le Nigritien qui représente les faciès terminaux du Précambrien, affleure à la périphérie du massif avec des rhyolites, des arkoses et des tufs.

2.4.2. Infracambrien (Précambrien A)

Il affleure largement dans la moitié sud du Mali avec des faciès essentiellement gréseux et schisteux. Sa succession lithologique et son épaisseur sont toutefois très variables suivant les aires de dépôts et leur évolution structurale. Trois domaines ont ainsi été distingués :

- la bordure méridionale du bassin de Taoudenni où sont représentées des séries détritiques sub-horizontales constituant les plateaux gréseux soudano-sahéliens,
- le bassin du Gourma en bordure de l'Adrar des Iforas dans lequel se sont accumulées des séries épaisses à forte composante pélitique, plissées et partiellement métamorphisées,
- le seuil de Hombori - Douentza qui s'intercale entre les deux bassins et se caractérise par un développement des faciès carbonatés.

a) Les plateaux gréseux

L'Infracambrien est composé d'alternances de bancs gréseux, de granulométrie variable, et de séquences pélitiques en disposition monoclinale à faible pendage vers le nord. Bien que les variations latérales de faciès et d'épaisseur, rapides et importantes, rendent malaisé l'établissement d'une coupe lithologique de référence, la succession suivante a été adoptée pour la carte géologique du Mali [2.4], de bas en haut :

** La formation gréseuse inférieure*

Elle est représentée par des grès épicontinentaux de 10 à 200 m d'épaisseur à sédimentation irrégulière et stratifications obliques fréquentes avec des passées conglomératiques.

** La formation gréseuse avec intercalations dolomitiques*

Elle est constituée par le groupe de Sotuba formé de grès fins glauconieux régulièrement stratifiés sur une épaisseur de 300 à 500 m et se termine par le groupe de Bobo-Dioulasso avec une série de 500 m d'épaisseur essentiellement gréseuse à stratifications entrecroisées dans sa partie inférieure et surmontée par une série schisteuse et schisto-gréseuse à intercalations calcaro-dolomitiques.

** Les schistes de Toun*

Il s'agit d'une série essentiellement pélitique de 100 à 300 m d'épaisseur avec des niveaux de jaspes et de dolomies interstratifiés.

** Les grès de Koutiala*

Cette formation est constituée, sur 20 à 200 m d'épaisseur, de grès de granulométrie variée localement feldspathiques ou ferrugineux, l'abondance des ripple-marks dénotant une origine marine probable.

** Les grès de Bandiagara*

Cette formation, presque exclusivement gréseuse, comporte dans sa partie inférieure des grès quartzitiques et arkosiques et dans sa partie supérieure des grès conglomératiques à stratifications obliques ; elle totalise 400 à 800 m d'épaisseur.

Dans le secteur ouest des plateaux mandingues et jusqu'à la falaise de Tambaoura, les grès sont plus fréquents et les différentes formations définies dans la partie centrale n'ont pu être identifiées avec certitude en l'absence de niveaux repères. Les nombreux forages exécutés pour l'hydraulique villageoise dans la partie centrale du plateau mandingue (zone de Banamba - Kolokani) ont aussi mis en évidence plusieurs séries schisteuses avec des intercalations de jaspes, de calcaires et de calcaires dolomitiques dans la partie moyenne de l'Infracambrien.

b) Le bassin du Gourma

Les formations du Groupe d'Ydouban se sont accumulées dans un bassin subsident couvrant le Gourma central et oriental. Durant l'orogénèse panafricaine, ces formations ont été plissées et métamorphisées. L'épaisseur totale du Groupe d'Ydouban, difficile à estimer en raison des plissements, doit dépasser 7.000 m. Les formations schisteuses et argileuses dominent largement avec de fréquentes intercalations gréseuses, quartzitiques et conglomératiques dans les parties inférieure et supérieure et calcaro-dolomitique dans la partie moyenne.

c) Le seuil de Hombori - Douentza

Cette zone de transition couvre la partie sud-ouest du Gourma (secteur de Hombori - Douentza et plaine du Gondo) et s'étend jusqu'à la bordure SE du fossé de Nara et à la dorsale de l'Azaouad. Les formations du Groupe de Hombori qui sont caractéristiques de cette zone, se sont déposées sur un seuil structural. Elles incluent une puissante série carbonatée qui constitue un caractère distinctif par rapport aux formations de l'Infracambrien qui se sont déposées plus à l'Ouest. La succession suivante a été établie par Reichelt [2.5] avec, de bas en haut :

** La formation de base*

Elle est constituée de grès quartzites à passées conglomératiques et épaisse de 10 à 40 m.

** La formation du Beli*

Elle est représentée par des schistes argileux à lentilles calcaires et épaisse de 300 à 500 m.

** La formation d'Irma*

Elle est composée de dolomies à stromatolites passant à des shales dans sa partie supérieure et épaisse de 1.500 m en moyenne.

** La formation d'Hombori - Douentza*

Elle est constituée de grès et de quartzites pouvant atteindre 150 m d'épaisseur.

** La formation d'Oualo - Sarniéré*

A dominante argileuse avec des lentilles de grès et de calcaire, elle a une épaisseur de 300 à 500 m.

** La formation de Bandiagara*

Elle est constituée de grès tabulaires et repose sur l'ensemble de cette série, plissée lors de l'orogénèse panafricaine.

2.4.3. Cambrien

Il affleure au nord-ouest du Mali en bordure de la frontière mauritanienne. Il débute par une triade lithologique (tillites, calcaires à barytine et jaspes) qui souligne le contact avec l'Infracambrien entre Kayes et Niéro. Cette formation est surmontée par une série à dominante pélitique dont l'épaisseur est estimée à plus de 1.000 m comprenant des schistes, des shales et des argilites. Des bancs de grès et de calcaires dolomitiques sont intercalés dans les parties moyenne et supérieure de cette série ainsi que des niveaux de jaspes. Les couches supérieures sont probablement d'âge ordovicien.

2.4.4. Primaire de Taoudenni

La stratigraphie des formations primaires qui affleurent à l'extrémité nord du Mali, est constituée par trois étages géologiques.

** Le Cambro-silurien*

Epais de plus de 1.200 m, il est représenté essentiellement par des faciès pélitiques devenant plus gréseux dans sa partie supérieure.

** Le Dévonien*

D'épaisseur variant de 50 à 1.500 m, il est constitué de calcaires, de marnes et d'argiles contenant des niveaux de gypse.

* *Le Carbonifère*

Epais de 600 à plus de 1.000 m, sa partie inférieure, d'origine marine, est représentée par les calcaires du Viséen. Le Carbonifère supérieur ou Namurien est caractérisé par des faciès de type continental avec des argiles rouges comportant des niveaux gréseux et des horizons gypsifères. Son épaisseur croît fortement sur le flanc nord du bassin de l'Azaouad, un forage pétrolier exécuté sur le plateau du Khénachich ayant traversé les argiles namuriennes sur près de 1.000 m.

2.4.5. *Intrusions doléritiques*

Elles se sont mises en place à différentes époques, principalement au Permien et au Trias. Leur mode de gisement est varié et fonction de la lithologie et de la compétence des formations sédimentaires. Dans les séries gréseuses, les filons sub-verticaux ou dykes sont prédominants et ont créé un compartimentage très dense au sein des formations sédimentaires encaissantes. L'épaisseur de ces filons, variable, peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et leur extension longitudinale plusieurs dizaines de kilomètres.

Les sills ou filons-couches sont par contre très fréquents dans les séries pélitiques. Ils constituent dans certaines zones schisteuses du Cambrien et de l'Infracambrien des complexes volcaniques de type laccolite dont l'épaisseur peut dépasser 100 à 150 m et qui s'étendent sur plusieurs centaines de km² (plateau du Kaarta et zone de Nossombougou).

L'appellation "doléritique" de ces intrusions regroupe une grande variété de roches volcaniques se rattachant à l'association calco-alcaline, constituée notamment de gabbros et de basaltes.

2.4.6. *Continental intercalaire*

Il est constitué par les formations continentales qui se sont accumulées au cours du Secondaire dans les parties centrales des bassins sédimentaires, avant la transgression du Crétacé moyen. Il est largement représenté dans le nord et l'est du Mali ainsi que dans sa région centrale où il est recouvert par le Continental terminal. La lithologie des dépôts et leur épaisseur varie suivant les aires de sédimentation.

* *Le bassin de l'Azaouad nord*

Il est formé de grès quartzitiques et microconglomératiques surmontés par des grès plus ou moins sableux et des argiles. L'épaisseur, de l'ordre de 200 m le long de la piste Tombouctou - Taoudenni, croît vers l'ouest où elle pourrait atteindre 500 à 1.000 m.

* *Le fossé de Nara*

Le Continental intercalaire en constitue le remplissage principal avec des alternances de sables, de grès et d'argiles bariolées intercalées de niveaux de graviers et de gaizes siliceuses. Son épaisseur dépasse 400 m dans la zone axiale du fossé.

* *La bordure nord-ouest de l'Adrar des Iforas*

La série y est composée de grès et de conglomérats continentaux présentant des influences lagunaires dans leur partie supérieure. L'épaisseur maximum, de plus de 700 m dans le secteur sud du Tanezrouft, se réduit rapidement à l'approche de l'Adrar.

** La bordure sud-est de l'Adrar des Iforas*

Elle fait partie du bassin des Ioullemedene principalement développé au Niger où la stratigraphie des dépôts a été définie, avec de bas en haut :

- la formation gréso-arkosique de base (180 m d'épaisseur),
- la formation gréseuse d'Agadès (250 m d'épaisseur),
- la formation argileuse d'Irhazer (600 m d'épaisseur),
- le groupe de Tegama, argilo-sableux (1.000 m d'épaisseur).

Ces formations ont été recoupées par des forages pétroliers exécutés dans le Tamesna, au nord de Menaka, mais avec des épaisseurs plus faibles.

2.4.7. Crétacé supérieur/Eocène inférieur

Des sédiments marins ou lagunaires se sont déposés sur les bordures du massif de l'Adrar directement sur le socle birrimien ou se sont intercalés entre les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire. Au nord-ouest de l'Adrar, ils sont d'épaisseur réduite et représentés, de bas en haut, par quatre étages géologiques.

** Le Sénonien - Maestrichtien*

Il est constitué de grès argileux sur 40 m d'épaisseur.

** Le Paléocène inférieur*

Il est formé d'une dalle de calcaire fossilifère de 20 m d'épaisseur datée du Danien et surmontée par des sables et des marno-calcaires.

** Le Paléocène terminal*

Il est représenté par des calcaires et calcaires marneux surmontés par un niveau de graviers phosphatés et atteint 15 à 20 m d'épaisseur.

** L'Eocène moyen*

Il existe sous forme de schistes papyracés plus ou moins gypseux avec des niveaux phosphatés et a une épaisseur de 8 à 10 m.

Plus au Sud, dans le "détroit soudanais", le Sénonien-Maestrichtien s'épaissit fortement et comporte des argilites à pyrite ou bitumineuses, des grès fins micacés et glauconieux qui alternent avec des grès calcaires. Des intercalations de lignites ont aussi été observées.

2.4.8. *Continental terminal*

Il regroupe les formations continentales qui se sont déposées principalement au Miocène et au Pliocène. Son aire d'accumulation déborde, vers le Sud, celle du Continental intercalaire, constituant ainsi le remplissage de nouvelles zones déprimées où les dépôts reposent directement sur le substratum précambrien : cuvette du delta intérieur du Niger, bassin de l'Azaouad sud, fossé de Gao dans le "détroit soudanais" et plaine du Gondo.

La lithostratigraphie des dépôts est très variable avec des alternances de niveaux sableux de différentes granulométries, souvent en disposition lenticulaire et localement grésifiés, et d'argiles de couleurs variées. Des horizons de latérite cuirassée ou gravillonnaire sont aussi interstratifiés. L'épaisseur du Continental terminal, très variable suivant les structures des bassins d'accumulation, est d'une centaine de mètres en moyenne dans le delta intérieur et peut atteindre 1.000 m dans le fossé de Gao [2.4].

2.4.9. *Formations de recouvrement*

On observe quatre principaux types de formations de recouvrement.

** Les formations latéritiques*

Elles couvrent la majeure partie des affleurements du socle birrimien et des plateaux gréseux infracambriens de l'ouest et du sud-ouest du Mali. Elles correspondent à une succession de phases d'altération suivies de périodes d'érosion qui s'est traduite, dans le relief, par un étagement en altitude des surfaces latérisées. Les plus hautes sont les plus anciennes avec des témoins à 800 m d'altitude, puis entre 450 et 650 m, et remonteraient au début du Tertiaire. Les plus récentes couvrent les glacis au bas des versants.

L'épaisseur des formations latéritiques dépend de la nature lithologique de la roche mère et des conditions climatiques. Ainsi l'épaisseur maximale (40 à 50 m) se rencontre sur le socle cristallin et métamorphique de la zone soudanienne (région de Bougouni) tandis qu'elle se réduit à un mince placage discontinu en zone sahélienne (région de Nara).

** Les dépôts alluviaux*

Ils sont surtout représentés dans le delta intérieur du Niger avec des alluvions anciennes dans le delta fossile surmontées par des alluvions récentes dans la partie vive du delta. Ils sont constitués par des argiles, des argiles sableuses et des sables en disposition lenticulaire sur une épaisseur de 10 à 20 m.

Des alluvions et des colluvions limono-sableuses se sont déposées dans les fonds de vallée sur une épaisseur de quelques mètres jusqu'à une vingtaine de mètres et tapissent les cuvettes topographiques.

** Les formations lacustres*

Elles datent du Pléistocène et affleurent dans les creux interdunaires de la zone saharienne. Elles sont représentées par des marnes et des calcaires lacustres dans la partie sud de l'Azaouad et, par des travertins dans la cuvette de Taoudenni. Elles sont localement associées à des évaporites de type sebkha (secteur des Daouanas au sud du lac Faguibine) qui peuvent prendre localement une grande importance (salines de Taoudenni).

* Les formations dunaires

Elles sont très développées dans les régions désertiques du nord et de l'est du Mali. Dans la zone sahélienne, l'ensablement reste important avec des dunes résiduelles localement organisées en cordons dunaires (nord du delta intérieur et du Gourma, flanc sud de l'Adrar des Iforas) ou sous forme d'un ensablement diffus (plaine de Nara).

2.4.10. Schéma structural

L'Infracambrien et le Cambrien de la partie ouest du Mali qui reposent sur un socle birrimien plissé et pénéplanisé, sont en disposition monoclinale avec un pendage général faible vers le nord. Des mouvements épéirogéniques successifs ont entraîné la constitution d'un réseau dense de fracturation souvent injecté de dolérites avec des accidents majeurs orientés OSO-ENE dont certains se relaient sur plusieurs centaines de kilomètres sous forme de couloirs linéamentaires (*figure 2.6*). La fracturation secondaire est d'orientation variable principalement O-E à NO-SE et constitue un maillage plus ou moins dense suivant la compétence des formations. La zone de Kayes est plus fortement tectonisée avec des contacts souvent faillés entre le Birrimien, l'Infracambrien et le Cambrien qui ont favorisé la mise en place des intrusions massives de dolérites, notamment dans le Kaarta. Le contact entre l'Infracambrien du plateau mandingue et le Cambrien de la plaine de Nara est aussi probablement faillé.

L'Infracambrien du Gourma a été intensément plissé avec une direction axiale des plis NNO-SSE à NO-SE que l'on retrouve sur les affleurements des collines de Goundam en bordure du fossé de Nara. Il est recoupé par les grands accidents OSO-ENE qui affectent l'Infracambrien tabulaire de la région ouest du Mali.

Sur la bordure nord du bassin de Taoudenni, le Précambrien et le Primaire sont aussi en disposition monoclinale à pendage vers le SSE en direction du centre du bassin.

Les zones déprimées dans lesquelles se sont accumulées les formations du Continental intercalaire, couvrent le nord et l'est du Mali. Elles sont représentées par :

- le bassin nord de l'Azaouad, entre le plateau du Khénachich et la dorsale de l'Azaouad, subdivisé en deux secteurs par la flexure faillée d'Araouane,
- le fossé de Nara, sur la bordure SO du bassin de l'Azaouad, encadré par un système de failles en gradins, d'orientation OSO-ENE, le mettant en contact avec le Cambrien et l'Infracambrien,
- les structures de bordure de l'Adrar des Iforas, avec, à l'ouest, le fossé de Gao orienté NNO-SSE, au nord-ouest le Tanezrouft structure relayant vers l'est le bassin de l'Azaouad, tandis que vers le sud il s'ouvre sur le grand bassin des Ioullemedene.

De nouvelles structures déprimées se forment au début du Tertiaire et étendent vers le sud l'aire de dépôt du Continental terminal :

- le bassin sud de l'Azaouad, structure allongée de l'OSO à l'ENE, faillée et située dans le prolongement du fossé de Nara entre la dorsale de l'Azaouad et le Gourma,
- la partie axiale du fossé de Gao,
- le bassin des Ioullemedene, au sud de l'Adrar des Iforas,
- la cuvette du delta intérieur du Niger qui s'installe dans la zone de transition entre l'Infracambrien tabulaire du plateau mandingue et l'Infracambrien plissé du Gourma,
- la petite dépression du Gondo, zone synclinale peu marquée bordée par un système de failles orientées OSO-ENE, au pied du plateau dogon.

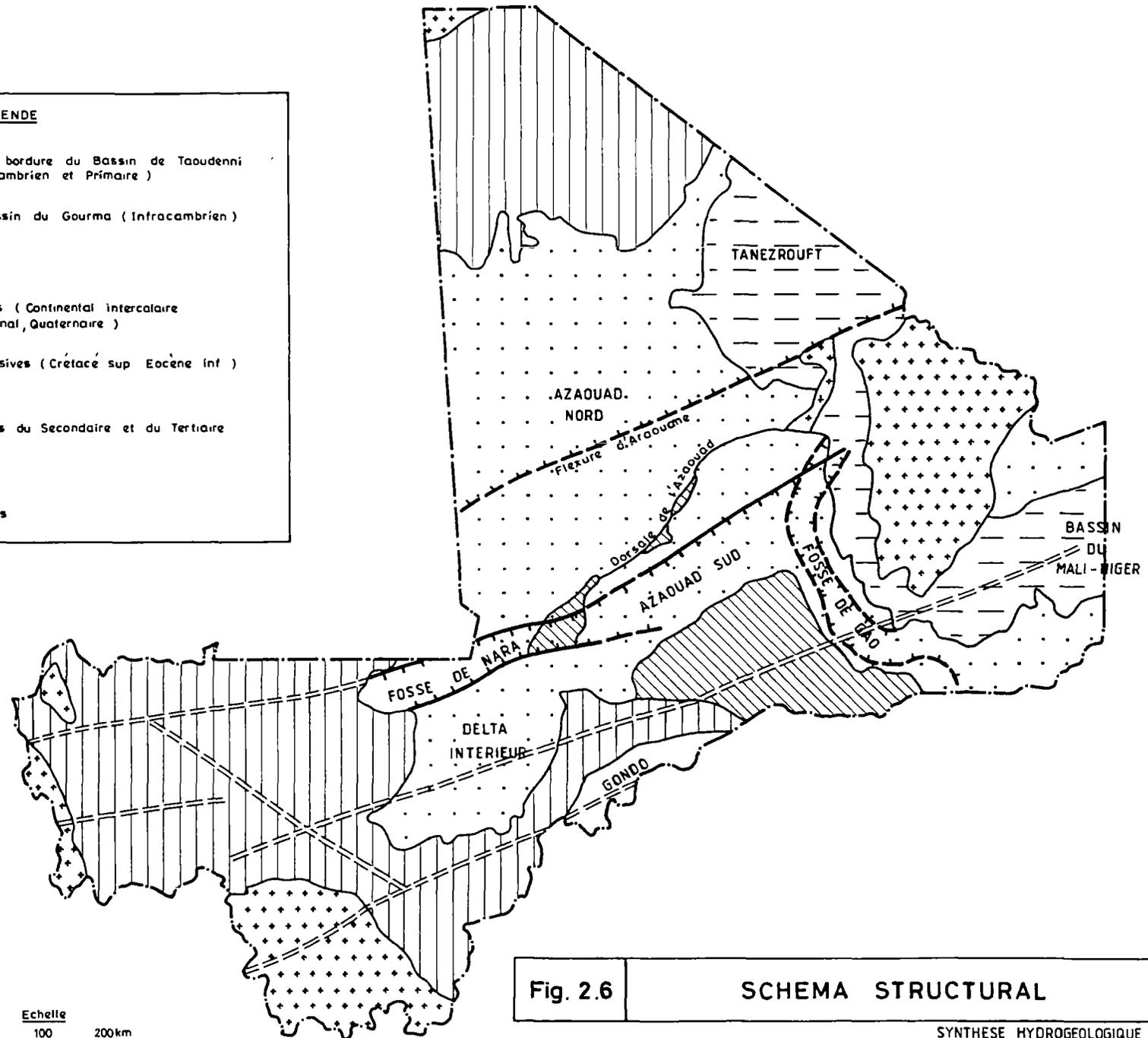
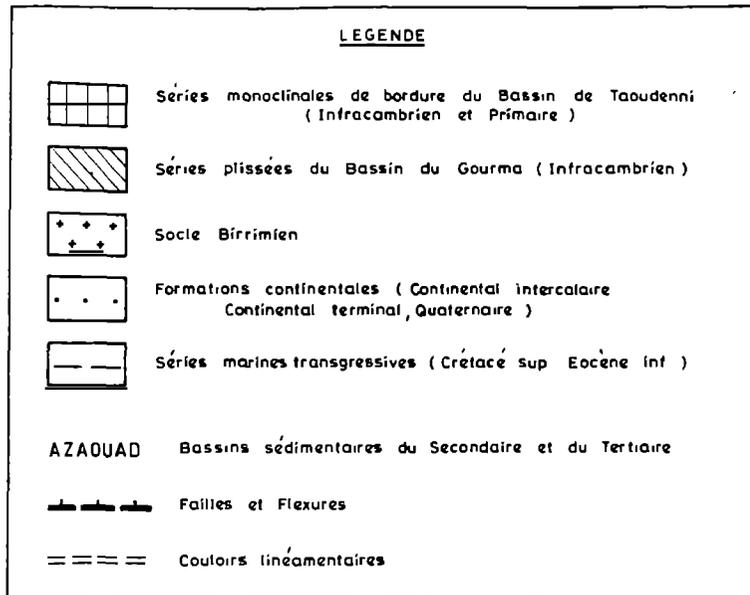


Fig. 2.6 **SCHEMA STRUCTURAL**

Echelle
0 100 200km

2.5. HYDROLOGIE

2.5.1. Réseau hydrographique

Les cours d'eau permanents sont localisés dans les régions de l'ouest et du sud-ouest du Mali avec une pluviométrie supérieure à 800 mm. Ils constituent les branches et les affluents en amont des fleuves Sénégal et Niger. Dans les autres régions du pays, à climat sahélien ou désertique, l'écoulement de surface est saisonnier ou épisodique et de nombreuses vallées, envahies par les sables, ont été fossilisées (vallée du Serpent dans la plaine de Nara et vallée du Tilemsi sur la bordure ouest de l'Adrar des Iforas). Dans ces régions, le Niger et le Sénégal constituent les seuls écoulements de surface permanents, grâce aux débits collectés à l'amont de leur bassin. Pour le Niger, la traversée de la zone sahélienne s'accompagne d'énormes pertes évaporatoires dans le delta intérieur.

a) Le Sénégal

Il prend sa source en Guinée sur les hauts plateaux du Fouta Djalon, vers 900 m d'altitude. Le Mali couvre l'amont de son bassin versant et sa longueur y est d'environ 850 km pour un total de 1.700 km jusqu'à l'Atlantique. Il est constitué par la confluence de trois branches principales drainant la partie ouest du plateau mandingue : le Bafing, le Bakoye et le Baoulé. Le secteur nord du bassin versant de ce dernier affluent où se trouve "la vallée du Serpent", n'est plus fonctionnel. En aval de Kayes, le Sénégal reçoit, en rive gauche, la Falémé qui forme la frontière avec la République du Sénégal et, en rive droite, deux rivières temporaires : le Kolombiné et le Karakoro. Les débits sont caractérisés par de très fortes variations saisonnières et annuelles. L'étiage se situe en mai et la pointe de crue en septembre.

Le barrage de Manantali, en cours de remplissage, contrôle les eaux du Bafing peu avant sa confluence avec le Bakoye, à environ 180 km en amont de Kayes.

b) Le Niger

Il prend aussi sa source sur la bordure nord du Fouta Djalon vers 800 m d'altitude. C'est l'un des plus grands fleuves d'Afrique avec un cours de 4.200 km de long dont 1.700 km au Mali. Ses affluents permanents sont exclusivement localisés en rive droite pour des raisons topographiques et climatiques; leurs bassins versants sont en effet très étendus et situés en zone climatique soudanienne avec des pluies annuelles supérieures à 1.000 mm. A l'amont de Bamako, il reçoit le Sankarani sur lequel a été construit le barrage hydroélectrique de Sélingué. A l'aval de Bamako et sur plus de 550 km, il n'a plus d'affluent pérenne. Sa vallée, d'abord étroite et entaillée dans les plateaux gréseux jusqu'à Koulikoro, s'élargit, à l'aval de Ségou, lorsque le fleuve entre dans la vaste cuvette alluviale du delta intérieur. A Mopti, le Niger reçoit le Bani, affluent long de 900 km : il est constitué par la confluence, en amont, du Bagoé, du Baoulé et du Banifing, eux-mêmes contrôlant des affluents de moindre importance mais généralement permanents.

La diversité géomorphologique de son bassin versant et son extension sur des zones aux conditions pluviométriques contrastées confèrent un caractère original au régime hydrologique du Niger. A la station de Koulikoro qui contrôle tout le bassin amont, la crue se produit en septembre et l'étiage en avril. Dans la partie centrale du delta, à Mopti, la crue est maximale en septembre-octobre. Elle se produit en décembre à Kabara, à l'aval du delta, près de Tombouctou. La crue n'arrive que fin janvier à Gao à la sortie de la boucle du Niger.

2.5.2. Données hydrométriques

Les stations de mesure sont concentrées sur les secteurs en amont des bassins du Sénégal et du Niger où elles contrôlent les principaux biefs de ces deux fleuves et de leurs plus importants affluents (*figure 2.7*). Le réseau d'observation est complété, sur le Niger, par des stations à l'entrée et à la sortie du delta intérieur et sur la boucle du fleuve jusqu'à la frontière nigérienne.

La forte variabilité des débits mensuels et annuels est une caractéristique générale du régime des fleuves au Mali. Elle est illustrée par les hydrogrammes de la *figure 2.8* (Sénégal à Kayes et Niger à Koulikoro) qui sont représentatifs de trois types d'hydraulicité : 1958 et 1967 - années humides, 1978 et 1979 - années médianes et 1984 - année sèche.

Les débits de crue peuvent varier dans un rapport de 1 à 10 entre une année sèche et une année humide. Les variations saisonnières entre les débits de crue et d'étiage d'une même année sont encore plus marquées, dans un rapport de 1 à 100. L'écoulement de certains affluents normalement pérennes peut se tarir dès le milieu de la saison sèche lors de séquences d'années de pluviométrie très déficitaire (Baoulé et Bani aval dans le bassin du Niger durant la période 1983-85).

Les caractéristiques physiques propres aux différents secteurs des bassins versants telles que la topographie, la morphologie, la géologie ainsi que leur superficie, entraînent des variations spatiales de l'écoulement qui se surimposent aux fluctuations dues à l'alternance des saisons et des cycles climatiques.

Le résultat de la combinaison de ces facteurs (*tableau 2.8*) apparaît dans les débits unitaires moyens mesurés aux principales stations hydrométriques du Sénégal et du Niger durant la période excédentaire 1960-69 et durant les périodes déficitaires (1970-1979 et 1980-1987).

Plus la superficie des sous-bassins versants est grande, plus les débits unitaires sont faibles. Ce phénomène, que l'on constate aussi à petite échelle, est accentué lorsque ces grands sous-bassins incluent des secteurs situés en zone sahéenne à faible pluviométrie.

Les très faibles débits unitaires des sous-bassins situés en zone sahéenne (Siramakana et Kabaté notamment) s'expliquent non seulement par une faible pluviométrie, mais aussi par des pertes par évaporation et par infiltration vers les aquifères.

Le *tableau 2.8* montre que la période de sécheresse, à partir de 1970, est marquée par une brutale réduction des débits qui se poursuit et s'accroît jusqu'au milieu des années 80 en raison d'une nouvelle séquence d'années à pluviométrie très déficitaire (1983-1984 surtout).

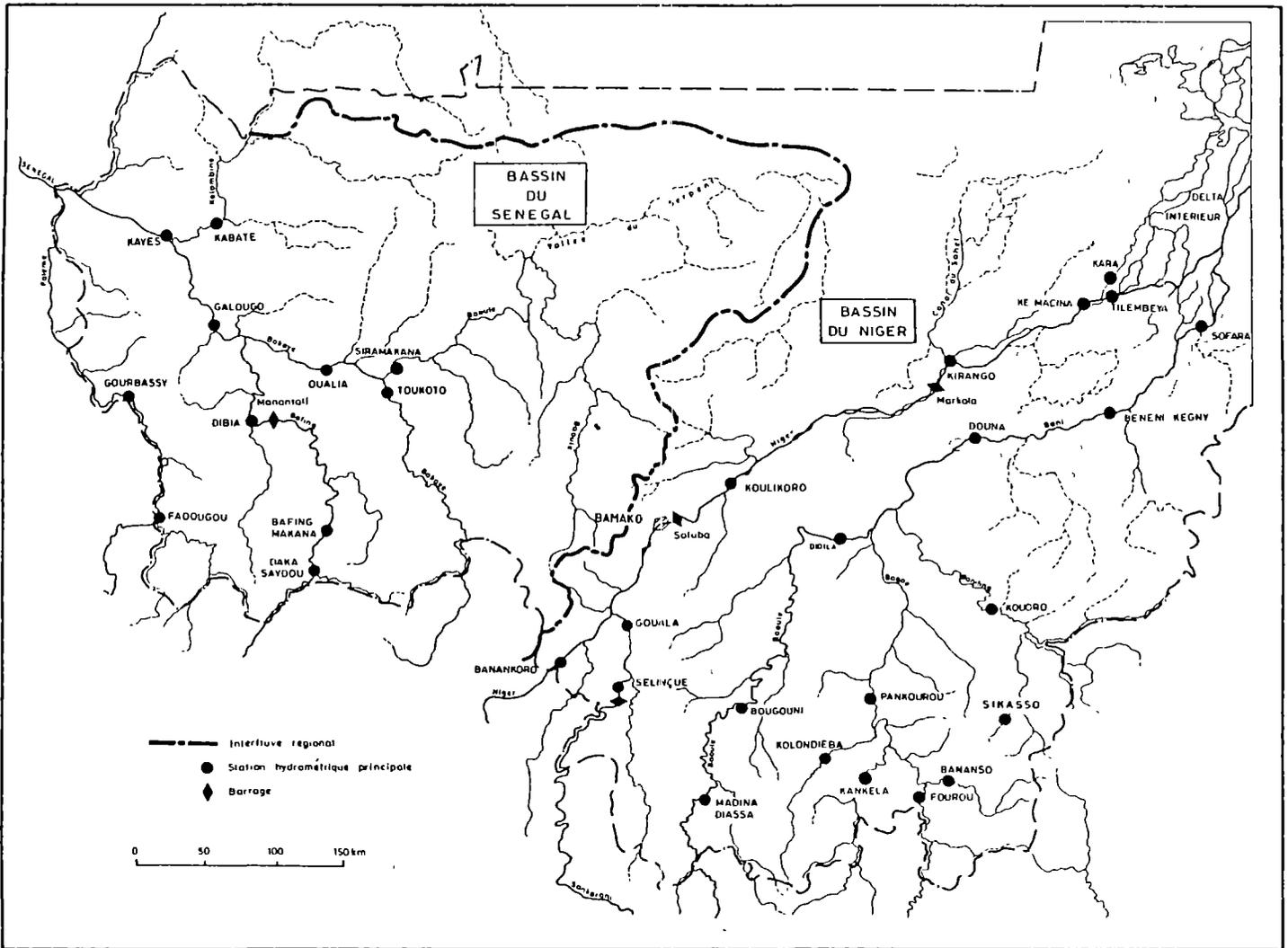


Fig 2 7 _ Réseau hydrographique des régions Ouest et Sud du Mali

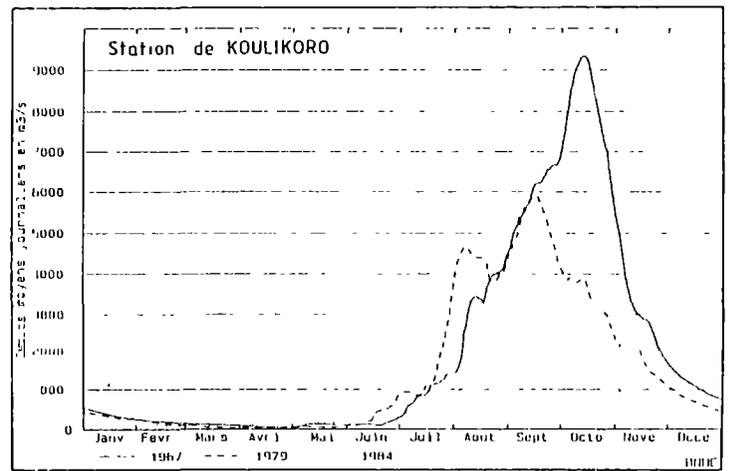
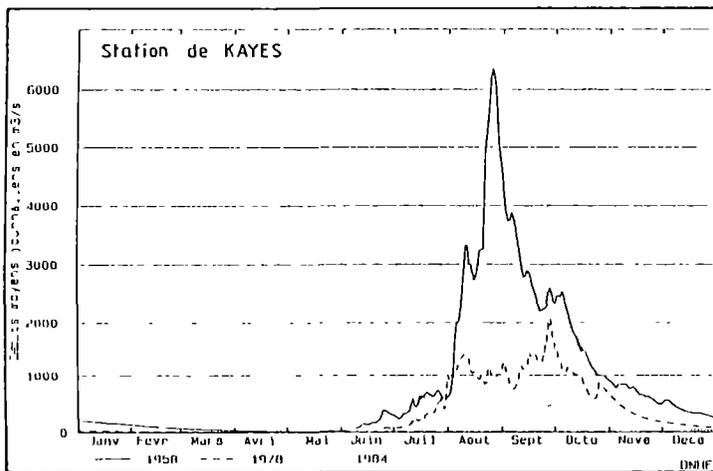


Fig 2 8 _ Hydrogrammes de référence des fleuves Sénégal à Kayes et Niger à Koulikoro

Tableau 2.8 - Débits unitaires moyens aux stations hydrométriques principales selon trois périodes de référence, en l/s/km²

Station	Surface B.V. (km ²)	Débits unitaires moyens en l/s/km ²		
		1960/69	1970/79	1980/87
SENEGAL				
Gourbassy	15.000	11,2	6,1	3,4
Galougo	126.900	5,0	2,8	1,8
Bafing	21.700	16,7	10,6	6,6
Toukoto	16.000	6,3	2,8	1,2
Kabaté	25.000	-	0,4	0,3
Siramakana	58.000	1,0	0,4	0,2
Daka Seydou	15.500	18,0	12,1	9,8
Oualia	84.400	2,2	1,1	0,4
NIGER				
Koulikoro	120.000	13,7	10,5	-
Bougouni	15.700	8,4	5,1	3,3
Pankourou	31.800	8,6	3,7	2,4
Douna	102.000	6,0	2,7	1,5
Dioila	32.500	6,3	3,4	2,0
Beneni Kegny	116.000	5,0	2,4	1,6
Sofara	126.000	3,6	1,9	1,1

2.5.3. Composantes de l'écoulement de surface

La connaissance des relations entre les eaux de surface et les eaux souterraines à travers le réseau hydrographique est essentielle pour l'établissement du bilan hydrologique des aquifères fissurés de l'ouest du Mali. Pour ce faire, l'écoulement total mesuré aux stations a été scindé en deux composantes : le ruissellement exclusivement alimenté par la pluie et l'écoulement de base qui représente les apports en provenance des aquifères. Les valeurs à obtenir étant seulement des ordres de grandeur, une méthode simplifiée a été mise au point en utilisant les hydrogrammes synthétiques établis à partir des débits mensuels moyens par période et en se basant sur un tarissement exponentiel décroissant des apports souterrains [HDG/NTL/15]. Un exemple de décomposition est représenté dans la figure 2.9 et les valeurs obtenues se trouvent dans le tableau 2.9.

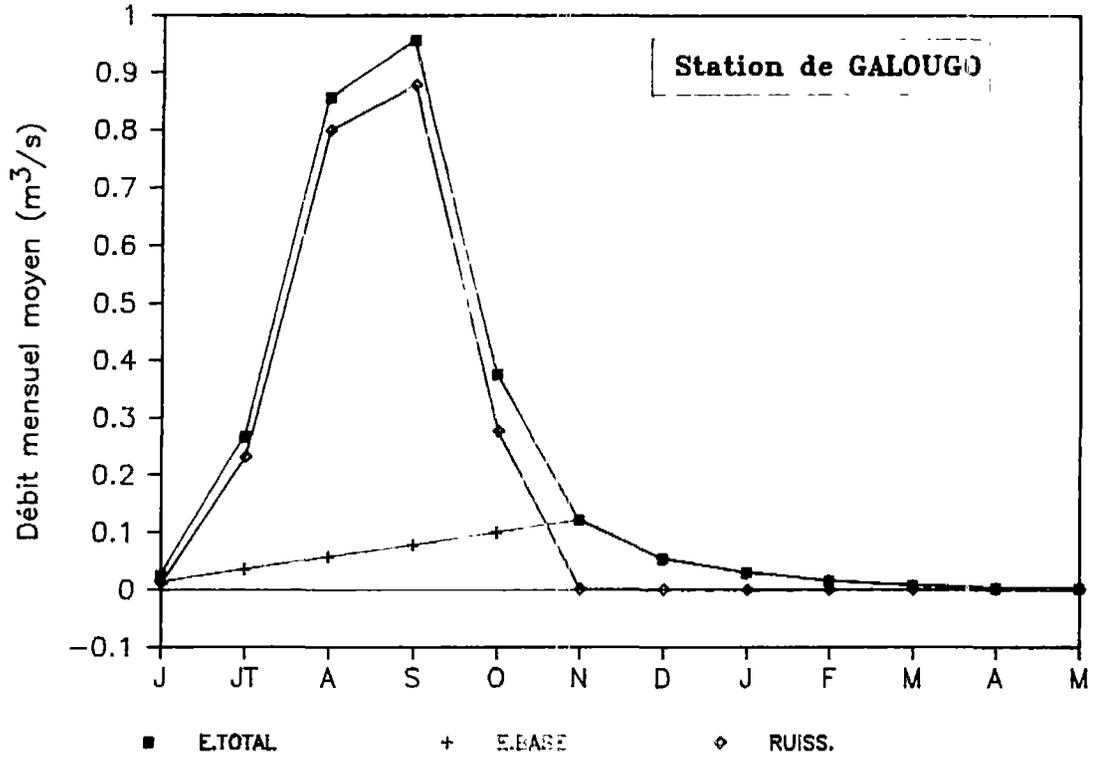


Figure 2.9: Composantes de l'écoulement du fleuve Sénégal

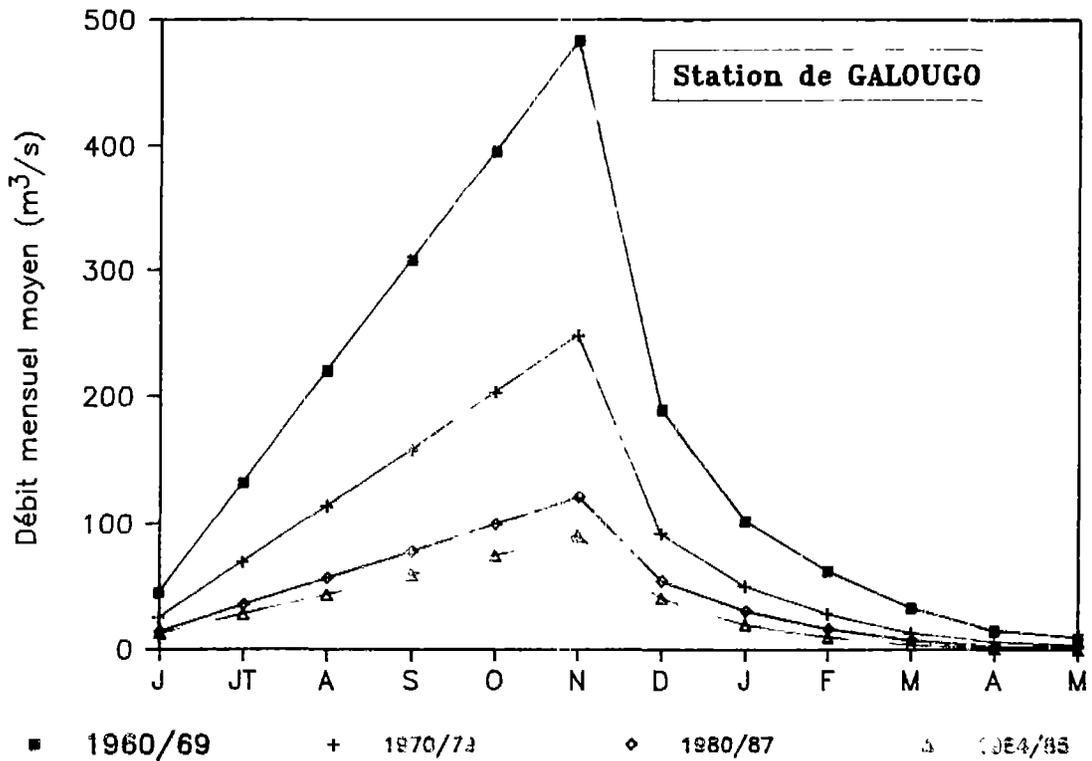


Figure 2.10: Variations de la composante "Ecoulement de base" du Sénégal

Tableau 2.9 - Valeurs moyennes des composantes de l'écoulement, en m³/s

Station	1960/69			1970/79			1980/87		
	E.TOT.	E.BASE	RUIS.	E.TOT.	E.BASE	RUIS.	E.TOT.	E.BASE	RUIS.
SENEGAL									
Gourbassy	168	33	135	92	14	78	51	6	45
Galougo	637	166	471	361	84	277	226	43	183
Bafing Makana	362	128	234	231	76	155	144	47	97
Toukoto	100	26	74	44	7	37	19	3	16
Kabaté	-	-	-	10	3	7	9	2	7
Siramakana	58	23	35	26	3	23	12	1	11
Daka Seydou	280	94	186	187	64	123	152	43	109
Oualia	186	39	147	95	12	83	35	5	30
NIGER									
Koulikoro	1.640	402	1.257	1.257	283	974	-	-	-
Bougouni	132	53	79	80	27	53	52	13	39
Pankourou	272	100	179	118	37	81	77	18	59
Douna	616	229	387	280	102	178	155	45	110
Dioila	205	83	122	109	39	70	64	21	43
Beneni Kegny	583	153	430	282	55	227	185	38	147
Sofara	460	259	201	241	107	134	138	54	84

On constate que les apports souterrains ne représentent qu'une fraction des apports par ruissellement, avec des valeurs de 2 à 5 fois plus faibles. Ils ont été aussi plus fortement affectés par la sécheresse, le rapport ruissellement sur écoulement de base croissant de 1960/69 à 1980/87. La variation de l'écoulement de base du fleuve Sénégal à différentes périodes est représentée par la figure 2.10. La faible contribution des aquifères ainsi que l'irrégularité du régime pluviométrique tropical continental sont les deux facteurs essentiels de la très forte variabilité de l'écoulement de surface.

2.5.4. Le delta intérieur

Le delta vif s'étend sur près de 300 km de long et 100 km de large soit une superficie de près de 30.000 km² en période de crue et les années de bonne hydraulité. Les lacs semi-permanents occupent une superficie de 1.500 km² tandis que les plaines d'inondation couvrent 13.500 km² dans le secteur nord du delta et 15.500 km² dans le secteur sud. Le Niger se ramifie en plusieurs bras dont les plus importants sont le Diaka qui alimente le lac Debo, l'Issaka qui rejoint le Bani près de Mopti et, dans le secteur nord, l'Issa Ber et le Bara-Issa qui alimentent le chapelet de lacs de la zone de Goundam et le lac Faguibine. La comparaison entre les débits mesurés à l'amont du delta (stations de Koulikoro sur le Niger et de Douna sur le Bani) et ceux mesurés à Diré près de son extrémité aval montre une perte d'écoulement de l'ordre de 33 milliards de m³ (1.000 m³/s) en année moyenne.

Ces pertes sont très variables : les années de bonne hydraulité, elles peuvent dépasser 46 milliards de m³ (1.480 m³/s en 1969) tandis qu'en année sèche, elles peuvent se réduire à moins de 17 milliards de m³ (528 m³/s en 1973), la diminution des pertes étant liée à une forte réduction des surfaces inondées.

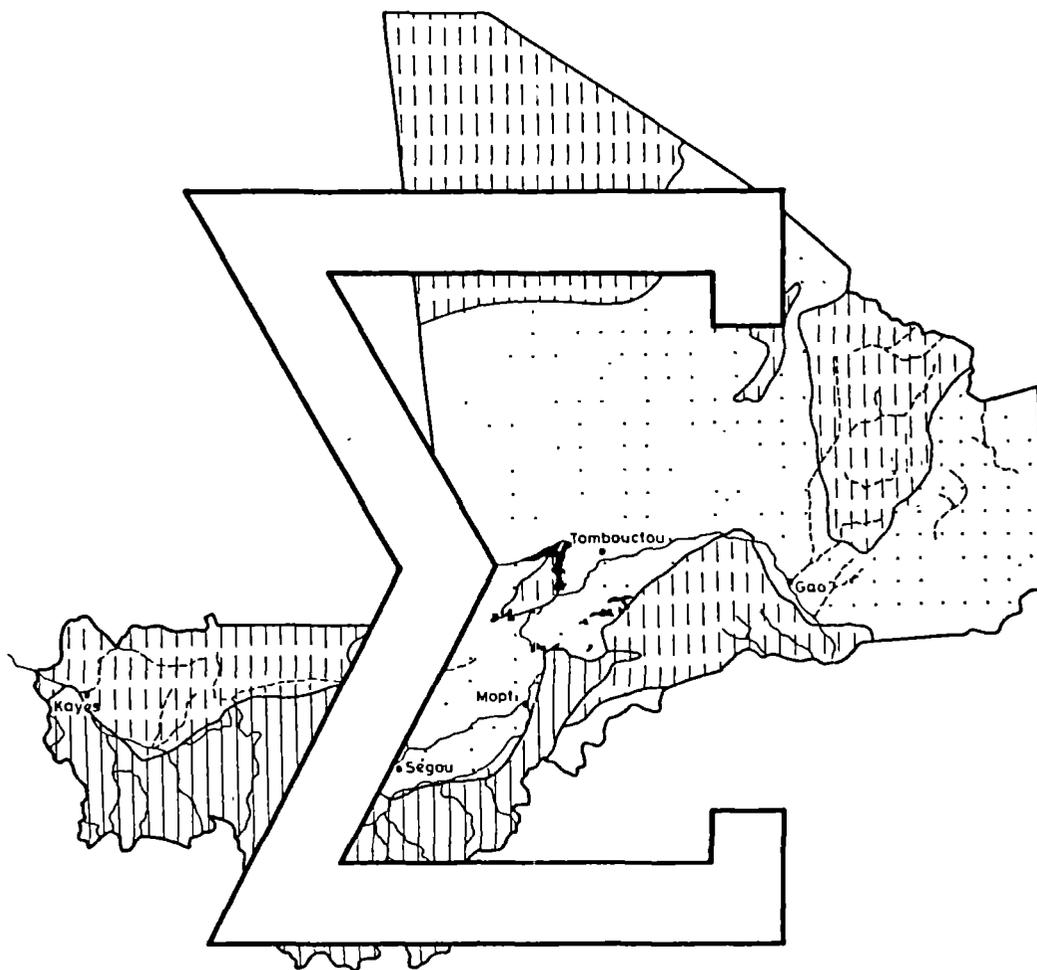
Un calcul des pertes par évaporation directe sur les plans d'eau de surface et par évapotranspiration du couvert végétal établi à partir de l'estimation des superficies concernées observées sur les images Landsat, après avoir décompté les eaux dérivées pour les périmètres d'irrigation de l'Office du Niger, a donné pour l'année 1978 année d'hydraulité moyenne, une valeur de 32,8 milliards de m³ proche du déficit moyen d'écoulement observé [2.2]. Comparativement, les pertes par infiltration dans l'aquifère du Continental terminal du delta ne semblent donc avoir qu'une importance très limitée. Les interprétations des mesures piézométriques et isotopiques ont d'ailleurs confirmé cette conclusion (*voir chapitres 4 et 6*).

CHAPITRE 2

Références bibliographiques hors projet

- [2.1] - Atlas du Mali - Jeune Afrique - 1980
- [2.2] - Les ressources terrestres au Mali - TAMS - 1983
- [2.3] - Pluviométrie du Mali 1936-1985 - Office Statistique des Communautés européennes - 1988
- [2.4] - Notice explicative de la carte géologique au 1/1.500.000 de la République du Mali - DNGM/BRGM - 1981
- [2.5] - REICHELT R. - Géologie du Gourma (Afrique occidentale). Un "soul" et un bassin du Précambrien supérieur. Stratigraphie, tectonique, métamorphisme - Mémoire BRGM n° 53 - 1972.





SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 3

SYSTEMES AQUIFERES



CHAPITRE 3

TABLE DES MATIERES

TEXTE

3.1. GENERALITES, DEFINITION ET CLASSIFICATION.....	1
3.2. AQUIFERES FISSURES.....	6
3.2.1. Aquifère du socle.....	9
3.2.1.1. Données générales.....	9
3.2.1.2. Traitements statistiques.....	10
3.2.2. Aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	13
3.2.2.1. Données générales.....	13
3.2.2.2. Traitements statistiques.....	13
3.2.3. Aquifère de l'Infracambrien plissé métamorphique.....	16
3.2.3.1. Données générales.....	16
3.2.3.2. Traitements statistiques.....	17
3.2.4. Aquifère du Cambrien.....	18
3.2.4.1. Données générales.....	18
3.2.4.2. Traitements statistiques.....	20
3.2.5. Aquifère des formations primaires de Taoudenni.....	22
3.3. AQUIFERES GENERALISES.....	23
3.3.1. Aquifère du Continental intercalaire.....	24
3.3.1.1. Unité du Khenachich.....	25
3.3.1.2. Unité du Tamesna.....	25
3.3.2. Aquifère du Continental intercalaire/Continental terminal.....	25
3.3.2.1. Unité de l'Azaouad nord.....	26
3.3.2.2. Unité du fossé de Nara.....	28
3.3.3. Aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	28
3.3.4. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire.....	29
3.3.4.1. Unité du delta intérieur.....	31
3.3.4.2. Unité de l'Azaouad sud.....	32
3.3.4.3. Unité du fossé de Gao.....	32
3.3.4.4. Unité du Gourma nord-ouest.....	33
3.3.4.5. La plaine du Gondo.....	33
3.4. AQUIFERES DU RECOUVREMENT OU AQUIFERES SUPERFICIELS.....	34
3.4.1. Aquifères semi-continus.....	34
3.4.1.1. Recouvrement sur socle.....	34
3.4.1.2. Recouvrement sur grès infracambriens.....	36
3.4.2. Aquifères discontinus.....	38
3.4.2.1. Recouvrement sur aquifères fissurés.....	38
3.4.2.2. Recouvrement sur aquifères généralisés.....	38
BIBLIOGRAPHIE.....	39

FIGURES

Fig.3.1.	Répartition des types d'aquifère.....	3
Fig.3.2.	Découpage stratigraphique et hydrogéologique.....	5
Fig.3.3.	Densité de forages par secteur hydrogéologique.....	7
Fig.3.4.	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère du socle : a) profondeur des venues d'eau principales, b) débit des forages productifs, c) profondeur des niveaux statiques.....	12
Fig.3.5.	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire: a) profondeur des venues d'eau principales, b) débit des forages productifs, c) profondeur des niveaux statiques.....	15
Fig.3.6.	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère de l'Infracambrien plissé : a) profondeur des venues d'eau principales, b) débit des forages productifs, c) profondeur des niveaux statiques.....	19
Fig.3.7.	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère du Cambrien : a) profondeur des venues d'eau principales, b) débit des forages productifs, c) profondeur des niveaux statiques.....	21
Fig.3.8	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère du Continental intercalaire/ Continental terminal : a) débit des forages productifs, b) profondeur des niveaux statiques.....	27
Fig.3.9.	Histogrammes de distribution des paramètres hydrogéologiques par unité hydrogéologique de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire: a) débit des forages productifs, b) profondeur des niveaux statiques.....	27
Fig.3.10.	Epaisseur moyenne du recouvrement sur les aquifères fissurés....	35
Fig.3.11.	Schémas hydrogéologiques types des aquifères de recouvrement : a) sur le socle, b) sur l'Infracambrien, c) sur le Cambrien, d) sur le Continental terminal.....	37

TABLEAUX

Tab.3.1.	Classement des systèmes aquifères du Mali.....	2
Tab.3.2.	Subdivisions hydrogéologiques des aquifères fissurés.....	8/9
Tab.3.3.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du socle.....	10
Tab.3.4.	Données statistiques moyennes par catégories lithologiques de l'aquifère du socle.....	11
Tab.3.5.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	14
Tab.3.6.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère de l'Infracambrien plissé métamorphique.....	17
Tab 3.7.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Cambrien.....	20
Tab.3.8.	Subdivisions hydrogéologiques des aquifères généralisés.....	24
Tab.3.9.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental intercalaire.....	25
Tab.3.10.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental intercalaire/Continental terminal.....	26
Tab.3.11.	Données statistiques moyennes sur l'aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	29
Tab.3.12.	Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire.....	30

CHAPITRE 3

SYSTEMES AQUIFERES

3.1. GENERALITES, DEFINITION ET CLASSIFICATION

Le Mali compte 9 systèmes aquifères profonds qui correspondent aux principaux étages stratigraphiques. Ils ont été classés en deux catégories selon le type de gisement des eaux souterraines :

- les aquifères de type fissuré sont semi-continus ou discontinus suivant la densité, l'extension et le degré d'interconnection des réseaux de fissuration qui affectent la roche encaissante et selon leur relation hydraulique avec les nappes superficielles situées dans le recouvrement. Ils sont représentés par les formations cristallines et sédimentaires du Précambrien et du Primaire;
- les aquifères de type généralisé sont associés à des formations peu ou non consolidées, à porosité intergranulaire, principalement constituées de dépôts d'origine continentale accumulés dans de vastes bassins sédimentaires depuis le Secondaire jusqu'au Quaternaire.

A noter que les intrusions doléritiques du Permo-Trias n'ont pas été individualisées en tant que formation aquifère bien qu'elles soient très fréquentes dans l'ouest du Mali. Elles n'occupent pas, en effet, de zones géographiques définies, mais sont irrégulièrement distribuées dans tout le domaine occupé par l'Infracambrien et le Primaire. Généralement imperméables lorsqu'elles sont saines, les épontes de ces filons constituent par contre des zones de circulation préférentielle au contact des roches sédimentaires encaissantes.

Ces systèmes aquifères profonds sont généralement surmontés par des aquifères superficiels localisés dans les formations d'altération latéritique à la surface des plateaux ou dans les dépôts alluviaux et colluviaux des plaines et des fonds de vallée. Suivant l'épaisseur du recouvrement et les conditions géomorphologiques et pluviométriques locales, ces aquifères superficiels peuvent être semi-continus et en liaison hydraulique avec les aquifères profonds ou discontinus et en situation perchée.

Tableau 3.1 - Classement des systèmes aquifères du Mali

Type d'aquifère	Etage stratigraphique	SIGLE GEOL.	CODE SIGMA	Lithologie dominante	Superficie (km ²)	% superf. du Mali
Aquifères généralisés	Continental terminal et Quaternaire	CTQ	1	Argiles, argiles sableuses, sables, latérites	202.830	16
	Crétacé supérieur et Eocène inférieur	CSE	2	Calcaires, marnes	138.910	11
	Continental terminal et Continental intercalaire	CIT	3	Sables, argiles sableuses, argiles	208.870	17
	Continental intercalaire	CIN	4	Sables, grès, conglomérats	82.320	7
						51
Aquifères fissurés	Primaire Taoudenni	PRI	5	Calcaires, grès	112.700	9
	Cambrien	CAM	6	Schistes, shales, calcaires, grès	66.060	5
	Infracambrien tabulaire	ICT	7	Grès, grès schisteux, schistes	174.810	14
	Infracambrien plissé métamorphique	ICP	8	Schistes, calcaires, quartzites	97.420	8
	Socle granitique et métamorphique	SOC	9	Granites, grauwackes, micaschistes, schistes	156.080	13
						49
Aquifères superficiels	Quaternaire	QAT	0	Latérites, argiles, sables, graviers	Dispersée	-

La localisation schématique des différents types d'aquifères profonds et superficiels est montrée dans la figure 3.1.

Pour les études hydrogéologiques et le traitement statistique des données de la banque SIGMA, les 9 systèmes aquifères profonds ont été divisés en 29 unités hydrogéologiques subdivisées en 61 secteurs hydrogéologiques (figure 3.2⁽¹⁾).

* Les unités hydrogéologiques sont des zones à piézométrie homogène. Dans les aquifères généralisés de l'est et du nord du Mali, leurs limites ont été définies par un ou plusieurs des éléments suivants :

SIGMA : Système Informatique de Gestion des ressources en eau du Mali

(1) : à noter que les unités/secteurs 11 et 83 sont superposés, seul le 83 est figuré.

LEGENDE

-  Aquifère généralisé de type intergranulaire.
-  Aquifère semi-continu de type fissuré avec nappe superficielle intergranulaire.
-  Aquifère discontinu de type fissuré ou de type intergranulaire de bas-fond.

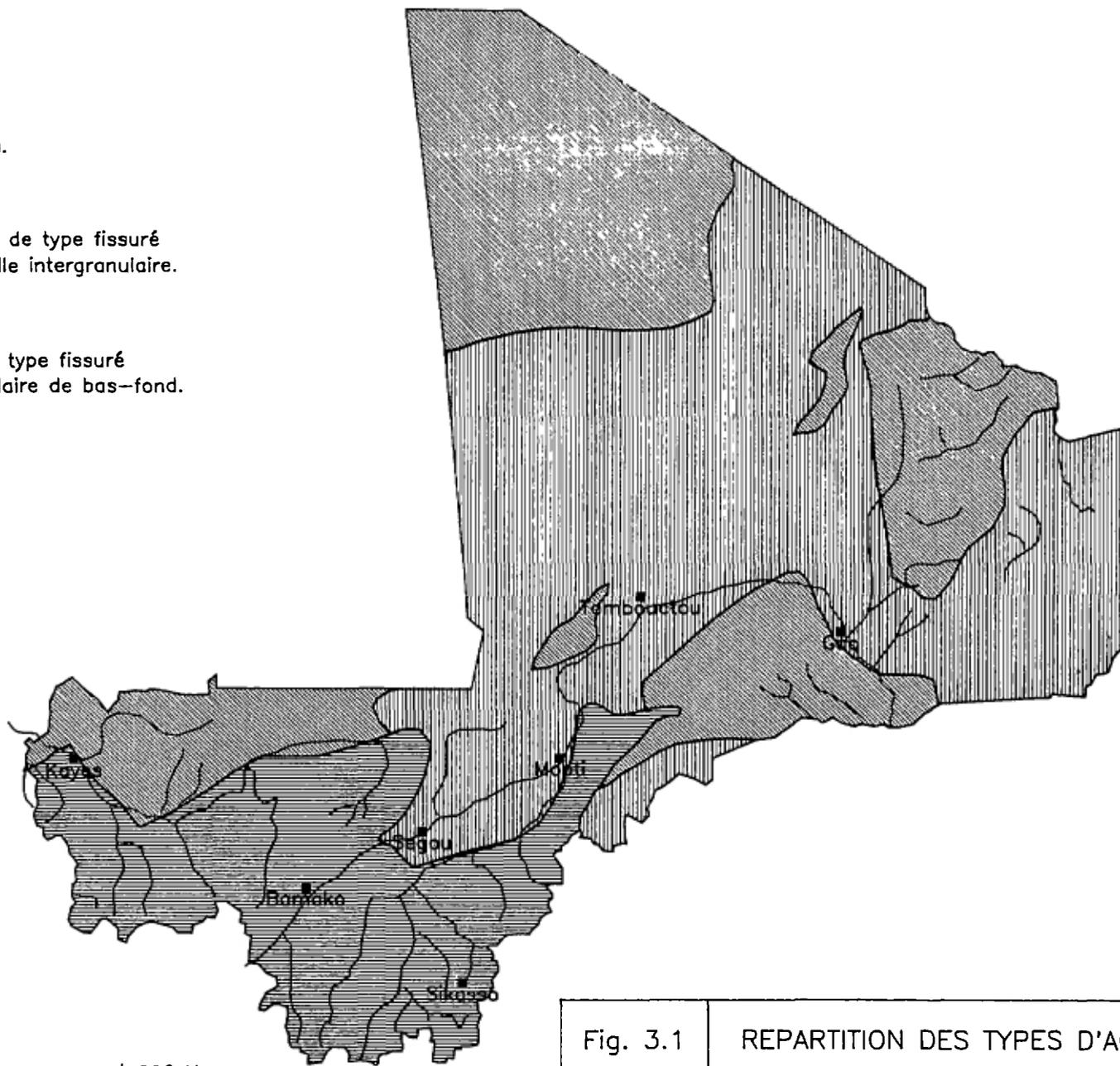


Fig. 3.1 REPARTITION DES TYPES D'AQUIFERE

- . axes piézométriques régionaux,
- . axes structuraux majeurs,
- . bordures des zones rechargées par les eaux de surface.

Les unités des aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali sont limitées aux thalwegs des principales rivières permanentes qui correspondent aux lignes de rupture de la surface piézométrique. Il ne s'agit donc pas d'unités hydrogéologiques au sens classique du terme, généralement limitées par les lignes de crête piézométrique ou lignes de partage des eaux. Ce découpage particulier se justifie par le caractère local des écoulements au sein des aquifères fissurés et par le faible débit souterrain contrôlé par le réseau hydrographique qui ne permet pas de considérer ce réseau comme formant des axes majeurs de drainage des systèmes aquifères. Les unités qui ont été ainsi définies représentent par contre des zones lithostratigraphiques, géomorphologiques et climatiques homogènes à l'intérieur des aquifères.

- * les secteurs hydrogéologiques constituent la plus petite subdivision sur laquelle ont été effectués les traitements statistiques des données de la banque SIGMA ayant servi à la préparation de cette synthèse. De même que pour les unités hydrogéologiques, ces secteurs ont été définis sur la base du critère d'homogénéité notamment en ce qui concerne leurs caractéristiques lithologiques, piézométriques, hydrochimiques et leurs relations hydrauliques avec les aquifères superficiels. Du fait que cette subdivision hydrogéologique a été utilisée au cours des traitements statistiques, les unités n'ont été scindées en secteurs que lorsque les données existantes sur le secteur considéré étaient suffisantes pour que les paramètres calculés soient significatifs et représentatifs.

Le traitement informatique a nécessité la codification des subdivisions hydrogéologiques auxquelles sont rapportées toutes les données des fichiers. Les étages stratigraphiques ont d'abord été identifiés par un code de trois lettres (*tableau 3.1*) qui a été utilisé durant la première phase d'élaboration de la banque SIGMA lorsque les données nécessaires pour le découpage en subdivisions hydrogéologiques n'étaient pas encore disponibles. Par la suite, un code composé de deux chiffres et d'une lettre minuscule a été adopté. Le premier chiffre se réfère au système aquifère (et à l'étage stratigraphique correspondant), le second à l'unité hydrogéologique et la lettre définit le secteur hydrogéologique. Dans la figure 3.2, les systèmes aquifères sont représentés par des couleurs et des figurés tandis que les secteurs hydrogéologiques sont repérés seulement par leurs limites et l'indication de leur code (*voir tableau 3.2*).

Les données synthétiques et les valeurs statistiques sur les systèmes aquifères présentées dans ce chapitre sont, pour l'essentiel, issues du traitement des données du fichier FORAGES de la banque SIGMA. Les caractéristiques piézométriques, hydrochimiques et isotopiques ainsi que les paramètres hydrauliques et le bilan des aquifères seront détaillées dans des chapitres séparés (*chapitres 4, 5, 6 et 7*). On ne donnera ici qu'un aperçu d'ensemble des différents systèmes aquifères et une description sommaire des principales caractéristiques géométriques et lithologiques des unités et secteurs hydrogéologiques en les situant dans leur contexte géographique, climatique et géologique. Les données statistiques mentionnées venant à l'appui de cette description ne porteront que sur les conditions hydrogéologiques moyennes de ces aquifères : taux de réussite et débit des forages, profondeur des niveaux statiques et, pour les aquifères de type fissuré, profondeur des venues d'eau principales. Les données complètes et le calcul des caractéristiques de distribution (écart-type) sont fournies dans l'Annexe 3.

La portée de cette synthèse hydrogéologique est étroitement liée au nombre et à la valeur des données disponibles, lesquelles proviennent essentiellement des quelques 12.000 forages réalisés au Mali. Ainsi, la carte de densité des forages par secteur hydrogéologique ci-après (*figure 3.3*) montre, à l'évidence, une information beaucoup plus complète sur les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali que sur les aquifères généralisés de l'est et du nord du pays dont certains secteurs sont totalement dépourvus de forages. Pour ces secteurs, la synthèse hydrogéologique sera essentiellement descriptive et basée sur les connaissances corrélatives dont on dispose sur ce type d'aquifère.

3.2. AQUIFERES FISSURES

Les formations sédimentaires, métamorphiques et cristallines du Primaire et du Précambrien sont caractérisées par de très faibles perméabilités intrinsèques. Les ressources en eau sont presque exclusivement associées à des perméabilités secondaires provenant d'une part de la fissuration dans la partie profonde des formations, d'autre part de l'altération de leur partie supérieure.

Dans les régions à pluviométrie supérieure à 600 mm par an, la nappe de fissures et la nappe intergranulaire des altérites qui la surmonte constituent, en général, un système aquifère en continuité hydraulique. Le milieu fissuré profond a une fonction préférentielle de transfert latéral de l'eau tandis que l'aquifère des altérites constitue surtout un niveau d'accumulation et de transfert per descensum.

Lorsqu'il existe un niveau imperméable, il ne s'intercale que rarement entre les formations de recouvrement et le substratum fissuré. Au contraire, le contact entre les deux horizons aquifères constitue, pour certains aquifères, une zone d'écoulement préférentiel. L'horizon imperméable se situe plutôt soit dans le recouvrement (niveau d'arènes argileuses dans les formations d'altération sur socle), soit dans le substratum (bancs compacts et non fissurés ou strates schisteuses imperméables).

Les études hydrogéologiques ont montré également que les discontinuités hydrauliques observées dans les systèmes aquifères fissurés se produisent au droit des limites latérales étanches compartimentant le milieu fissuré profond plutôt qu'au niveau des transferts verticaux entre les deux aquifères du système.

Le tableau 3.2 montre la répartition des principaux systèmes aquifères fissurés ainsi que des 19 unités hydrogéologiques et des 44 secteurs hydrogéologiques correspondants.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

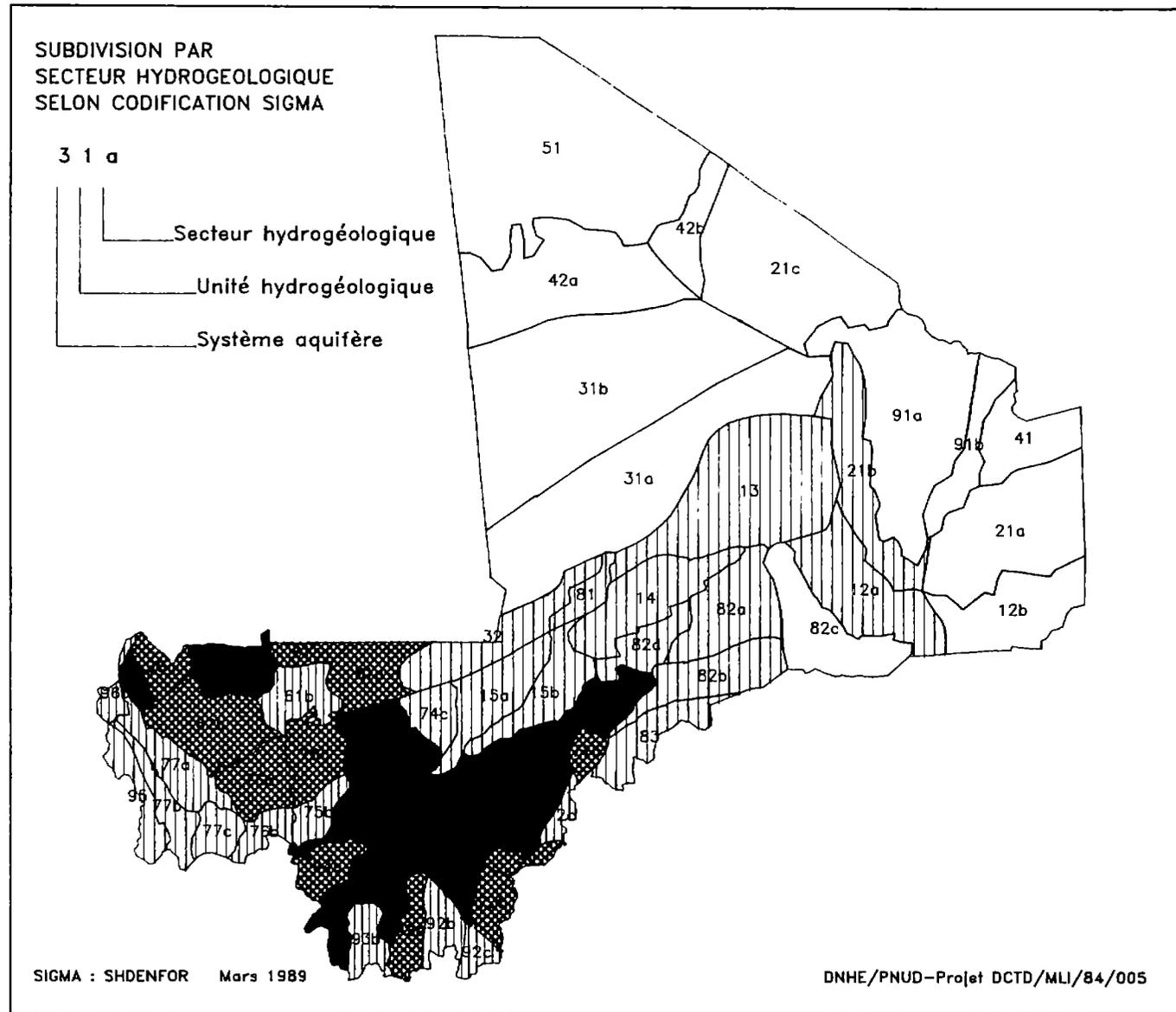
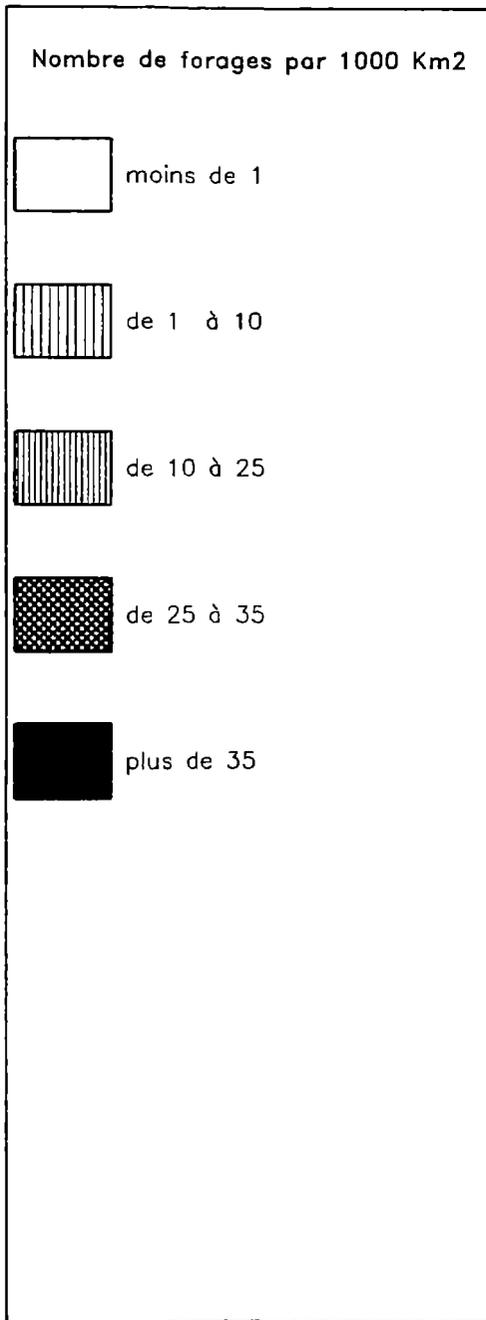


Figure 3.3 DENSITE DE FORAGES

Tableau 3.2 - Subdivisions hydrogéologiques des aquifères fissurés

AQUIFERE	SIGLE/CODE	UNITE HYDROGEOLOGIQUE	CODE	SUPERFICIE (km ²)	SECTEUR HYDROGEOLOGIQUE	CODE	SUPERFICIE (km ²)
Primaire non différencié	PRI 5	Taoudenni	51	112.700	Taoudenni	51	112.700
Cambrien	CAM 6	Ouagadou	61	30.970	Nara Diéma Ballé	61a 61b 61c	14.400 11.950 4.620
		Kaarta	62	35.090	Nioro Diallan	62a 62b	12.250 22.840
Infracambrien tabulaire	ICT 7	Plateau dogon	71	12.780	Nord plateau Sud plateau	71a 71b	8.680 4.100
		San-Koutiala	72	19.670	Koutiala San Yorosso	72a 72b 72c	9.520 6.810 3.340
		Bani moyen	73	39.190	Dioila Sikasso Banifing aval Banifing amont	73a 73b 73c 73d	18.460 7.710 8.730 4.290
		Est plateaux mandingues	74	35.740	Kolokani-Mourdiah Kati-Banamba Segela-Guiré	74a 74b 74c	15.770 11.410 8.560
		Baoulé	75	19.210	Boucle Baoulé Negala	75a 75b	12.560 6.650
		Bakoye	76	19.120	Kita Sirakoro	76a 76b	13.220 5.900
		Bafing	77	29.100	Bafoulabé Est Tambaoura Bafing Nakana	77a 77b 77c	13.370 8.930 6.800
Infracambrien plissé métamorphique	ICP 8	Nord Delta	81	5.660	Goundam-Soumpi	81	5.660
		Gourma	82	78.350	Gourma central Gourma sud Gourma est Gourma ouest	82a 82b 82c 82d	23.580 19.230 25.440 10.100
		Gondo	83	13.410	Gondo	83	13.410

Tableau 3.2 (suite)

AQUIFERE	SIGLE/CODE	UNITE HYDROGEOLOGIQUE	CODE	SUPERFICIE (km ²)	SECTEUR HYDROGEOLOGIQUE	CODE	SUPERFICIE (km ²)
Socle	SOC 9	Adrar des Iforas	91	77.070	Ouest Adrar Est Adrar	91a 91b	62.860 14.210
		Bagoé	92	20.430	Kolondiéba Niéna Kadiolo	92a 92b 92c	8.030 8.040 4.360
		Baoulé	93	20.770	Baoulé amont Baoulé aval	93a 93b	12.890 8.080
		Sankarani	94	15.260	Kangaba Yanfoula	94a 94b	8.600 6.660
		Kéniéba	95	9.100	Kéniéba	95	9.100
		Kayes (1)	96	13.450	Tambakara Aourou Ambidedi	96a 96b 96c	6.550 3.480 3.420

(1) Cette unité, fortement tectonisée, inclut des compartiments d'Infracambrien et de Cambrien.

3.2.1. Aquifère du socle

3.2.1.1. Données générales

L'aquifère du socle est représenté par 6 unités hydrogéologiques subdivisées en 13 secteurs qui occupent une superficie totale de 156.080 km² et sont répartis entre trois ensembles géographiques correspondant à trois types spécifiques de conditions hydrogéologiques, géomorphologiques et climatiques :

a) au sud, dans la Région de Sikasso, les unités du Sankarani, du Baoulé et de la Bagoé bénéficient des précipitations les plus importantes du Mali avec plus de 1.000 mm/an. Le socle birrimien est recouvert par une épaisse couverture d'altérites, en grande partie saturée d'eau, avec un niveau piézométrique peu profond. Le réseau hydrographique draine les systèmes aquifères ce qui assure la pérennité de l'écoulement des affluents en amont du Niger.

b) à l'ouest, les unités de Kéniéba et de Kayes, étagées en latitude et en altitude, présentent des caractéristiques variant du sud au nord. L'unité de Kéniéba située en zone climatique soudanienne est comparable aux unités de la région de Sikasso : recouvrement épais, surface piézométrique peu profonde et drainage par le réseau hydrographique. L'unité de Kayes présente des caractéristiques particulières liées d'une part à une pluviométrie plus faible et surtout à l'érosion régressive du fleuve Sénégal qui a décapé en grande partie la couverture d'altérites. Les formations superficielles y sont d'épaisseur réduite et dénoyées, sauf dans les fonds de vallée. La profondeur moyenne des niveaux piézométriques croît progressivement vers le nord, le réseau hydrographique devenant perché par rapport à l'aquifère. Son écoulement, saisonnier, contribue à la recharge de l'aquifère fissuré.

c) à l'est, l'unité de l'Adrar des Iforas est située en zones nord sahélienne et désertique avec un substratum affleurant où se situe un aquifère fissuré discontinu avec des niveaux d'eau de profondeur variable. Des petites nappes superficielles perchées sont localisées dans les alluvions des fonds d'oued.

3.2.1.2. Traitements statistiques

Ils sont établis à partir des données de 2.188 forages dont 1.396 ouvrages productifs⁽¹⁾ situés essentiellement dans les deux premiers ensembles. L'Adrar des Iforas n'a été reconnu par forages que dans la zone de Kidal.

Tableau 3.3 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du socle

Unité hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altit. (m)	Nb. forages	Nb. For. produc.	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)	Ep. alt. (m)	VEP. moy (m)
Adrar des Iforas	91	<100	400	40	10	40	4,3	20,4	54,9	12	49
Bagoe	92	1.250	335	504	350	69	5,5	7,9	26,0	35	47
Baoulé	93	1.250	355	607	410	69	4,2	8,8	29,5	33	47
Sankarani	94	1.200	370	564	396	70	5,9	8,5	(73,0)	40	51
Kéniéba	95	1.100	180	86	51	59	4,4	14,6	27,8	26	39
Kayes	96	580	70	387	157	43	6,5	12,9	39,0	12	33

T.R. = Taux de réussite, Q = Débit, NS = Profondeur du niveau statique, Ep. alt. = Epaisseur des altérites, VEP = Profondeur des venues d'eau principales.

a) Taux de réussite

Les plus faibles taux de réussite des forages sont enregistrés dans les unités de Kayes et de l'Adrar des Iforas bien que peu significatifs pour cette dernière. Il est plus élevé dans les trois unités de la région de Sikasso où il atteint des valeurs moyennes de l'ordre de 70 %, liées en fait aux formations de recouvrement et à la nappe superficielle qu'elles contiennent. En effet, dans la région de Sikasso, les venues d'eau proviennent des arènes grenues situées à la base du recouvrement et dans la frange altérée du substratum. Si l'on considère seulement les forages exploitant les venues d'eau dans le socle sain, le taux de réussite devient nettement plus faible. L'aquifère du socle est en effet globalement discontinu avec, soit des compartiments imperméables, soit une fissuration colmatée par les produits d'altération. Cela n'exclut pas, toutefois, des possibilités de circulation préférentielle associées à certains faciès pétrographiques, à des zones filoniennes fracturées ou à des contacts structuraux.

Ce n'est donc que lorsqu'il existe un aquifère intergranulaire dans les altérites que l'aquifère du socle peut être qualifié de semi-continu.

(1) Ouvrage productif : ouvrage débitant au moins 1 m³/h après développement et pompage d'essai de réception.

b) Profondeur des venues d'eau principales (figure 3.4a)

Les profondeurs moyennes par unité varient de 33 à 51 m avec une moyenne globale de 46 m. Les venues d'eau sont en général plus profondes dans les unités comportant une nappe superficielle en raison de l'épaisseur des formations de recouvrement, des venues d'eau exploitables étant rencontrées jusqu'à 10 ou 15 m sous la base des altérites. Près de 90 % des venues d'eau sont localisés à moins de 80 m de profondeur. Au-delà de 100 m, leur fréquence devient très faible avec moins de 1 % de forages productifs (7 % dans l'Adrar des Iforas) et leur débit est peu important.

c) Débit des forages productifs (figure 3.4b)

Les débits moyens par unité sont compris entre 4,2 et 6,5 m³/h avec de 50 à 80 % des forages productifs à moins de 5 m³/h. Les débits supérieurs à 5 m³/h sont relativement plus fréquents dans les unités où le taux de réussite est faible avec une nappe superficielle d'épaisseur réduite ou inexistante (unité de Kayes notamment). Cela suggère que le captage de l'horizon aquifère à la base des altérites, s'il fait augmenter les taux de réussite, réduit par contre la fréquence des débits importants en raison de sa perméabilité en général plus faible que celle du milieu fissuré.

d) Profondeur des niveaux statiques (figure 3.4c)

Dans les unités de la région de Sikasso, les profondeurs moyennes des niveaux statiques sont inférieures à 10 m, 1 à 2 % des niveaux d'eau seulement se situant au-delà de 20 m. Dans les autres unités, la profondeur, entre 13 m et 20 m en moyenne, est d'autant plus grande que la pluviométrie est plus faible. Ainsi, la fréquence des niveaux dont la profondeur est supérieure à 20 m, varie de 13 % dans l'unité de Kayes à 28 % dans l'Adrar des Iforas.

e) Influence de la lithologie

Des statistiques établies à partir des forages dans les granites et dans les roches métamorphiques ont donné les valeurs suivantes :

Tableau 3.4 - Données statistiques moyennes par catégories lithologiques de l'aquifère du socle

Lithologie	Taux de réussite (%)	Débit moyen (m ³ /h)	Forages Q > 5 m ³ /h (%)	Profondeur venues d'eau > 80m (%)
Granites	62	4,8	27	2
Roches métamorphiques	80	5,4	43	9

Le développement du milieu fissuré est plus important dans les roches métamorphiques, ce qui se traduit par des taux de réussite plus élevés, par une plus grande proportion de forages à débit supérieur à 5 m³/h et par un pourcentage de venues d'eau profondes plus élevé.

HISTOGRAMMES DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES PAR UNITE HYDROGEOLOGIQUE

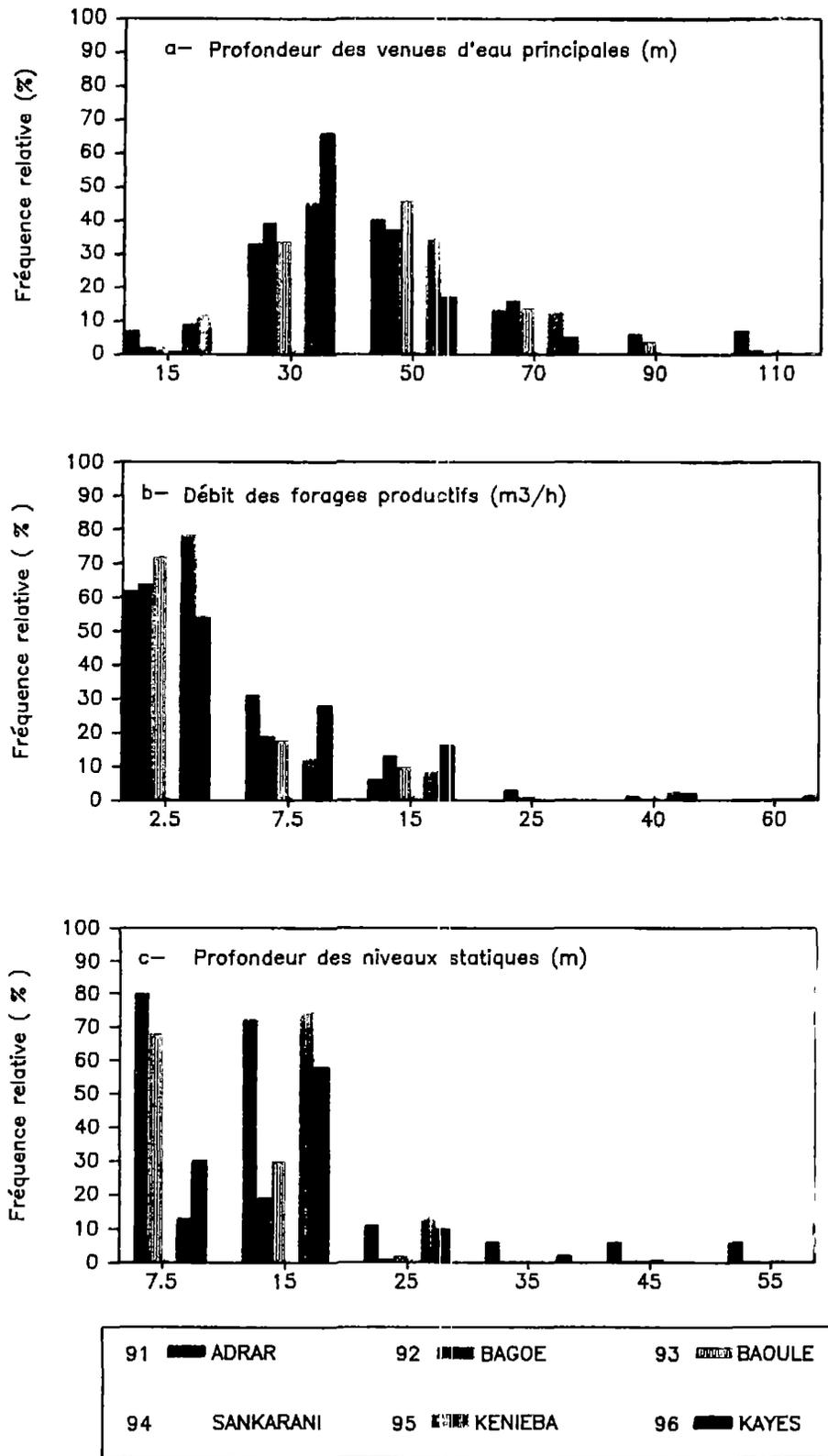


Figure 3.4: Aquifère du socle

3.2.2. Aquifère de l'Infracambrien tabulaire

3.2.2.1. Données générales

Avec une superficie de 174.810 km², l'Infracambrien tabulaire est l'aquifère fissuré le plus important du Mali et le plus exploité avec près de 6.700 forages, soit plus de la moitié des forages recensés au Mali. Cet aquifère, subdivisé en 7 unités et 19 secteurs hydrogéologiques, correspond à la bande de plateaux gréseux occupant la partie médiane de la zone climatique soudano-sahélienne avec des pluies moyennes annuelles variant entre 500 mm sur la bordure nord et 1.000 mm au sud dans la zone de contact avec le socle.

À l'exception du plateau dogon et de la frange septentrionale du plateau mandingue où les grès sont affleurants, l'Infracambrien est recouvert en quasi totalité par des formations latéritiques.

Il est constitué de formations grés-schisteuses en disposition monoclinale qui sont caractérisées par un développement important de la perméabilité secondaire. Celle-ci est non seulement liée aux réseaux de fracturation mais aussi à une microfissuration favorisée par l'alternance de couches tendres et dures due à des mouvements différentiels. Le litage des couches et les joints de stratification ainsi que les épontes fracturées des intrusions doléritiques sont aussi une des composantes de cette perméabilité secondaire. Enfin, certaines barres de grès présentent, localement, une perméabilité de type intergranulaire.

En fait, il s'agit typiquement d'un milieu à double porosité avec deux composantes en continuité hydraulique :

- des blocs de faible perméabilité et de forte porosité,
- des fractures de forte perméabilité mais à faible emmagasinement.

Du point de vue hydraulique, comme pour le socle, les principales discontinuités horizontales ne se situent pas au contact entre la nappe superficielle et le milieu fissuré. Elles se produisent au sein même de l'aquifère fissuré lorsque des séquences pélitiques épaisses et homogènes et des bancs quartzitiques compacts s'intercalent entre les strates alternées de grès et de schistes qui constituent les principaux faciès de l'Infracambrien. En raison des variations rapides de faciès et d'épaisseur, ces discontinuités horizontales sont généralement d'extension limitée et ne provoquent que des mises en charge locales de la nappe de fissures.

Les dykes doléritiques constituent par contre des discontinuités verticales quasi continues, car ils recoupent toute la série infracambrienne et entraînent un compartimentage du système aquifère. Ils jouent ainsi un rôle hydraulique majeur en limitant d'une part les possibilités d'écoulement régional, mais en favorisant par ailleurs les échanges verticaux au sein des compartiments, le long de leurs épontes et sur les bordures des compartiments qu'ils délimitent.

3.2.2.2. Traitements statistiques

Ils sont effectués à partir des données de 6.697 forages dont 4.751 ouvrages productifs régulièrement répartis dans toutes les unités.

Tableau 3.5 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Unité hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. Forages	Nb. For. product	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)	Ep. alt. (m)	VEP moy (m)
Plateau dogon	71	540	400	628	354	60,5	5,5	38	14,5	95	11	51
San - Koutiala	72	860	335	1.628	1.228	75,4	6,0	100	11,8	41	13	44
Bani moyen	73	1.050	340	1.521	1.218	60,1	5,7	>150	13,0	44	22	49
Kolokani-Mourdiah	74	700	325	1.533	976	63,6	4,7	62	17,0	61	19	47
Baoulé	75	900	380	541	366	67,7	4,6	47	15,0	35	20	47
Bakoye	76	1.030	345	434	293	67,5	8,8	120	12,4	28	19	45
Bafing	77	1.100	250	414	317	76,6	8,4	72	10,6	24	12	43

a) Taux de réussite

Il varie selon les unités entre 55 et 80 % avec une valeur moyenne de 71 % pour l'ensemble de l'aquifère. Les plus faibles valeurs sont rencontrées dans les secteurs où prédominent les grès quartzites et dans les zones d'occurrence de séries schisteuses épaisses, dépourvues d'intercalations de bancs durs.

b) Profondeur. des venues d'eau principales (figure 3.5a)

Les profondeurs moyennes par unité varient entre 43 et 50 m. Les valeurs les plus faibles correspondent aux unités où l'Infracambrien est représenté par des grès sous une épaisse couverture d'altérites.

Plus de 90 % des forages productifs ont recoupé les venues d'eau exploitables à moins de 80 m de profondeur, dont 40 % dans la tranche 40 - 60 m tandis que moins de 1 % des forages a recoupé les venues d'eau profondes au-delà de 100 m. On peut donc considérer que la zone fissurée hydrauliquement productive est limitée, au plan régional, à une profondeur de l'ordre de 80 m.

c) Débit des forages productifs (figure 3.5b)

Le débit moyen pour l'aquifère s'établit à 5,6 m³/h avec des valeurs par unité variant entre 4,6 et 8,8 m³/h.

Selon les unités, entre 30 et 51 % des ouvrages productifs ont des débits supérieurs à 5 m³/h et entre 12 et 23 % des débits supérieurs à 10 m³/h. Plusieurs forages ont débité plus de 100 m³/h.

HISTOGRAMMES DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES PAR UNITE HYDROGEOLOGIQUE

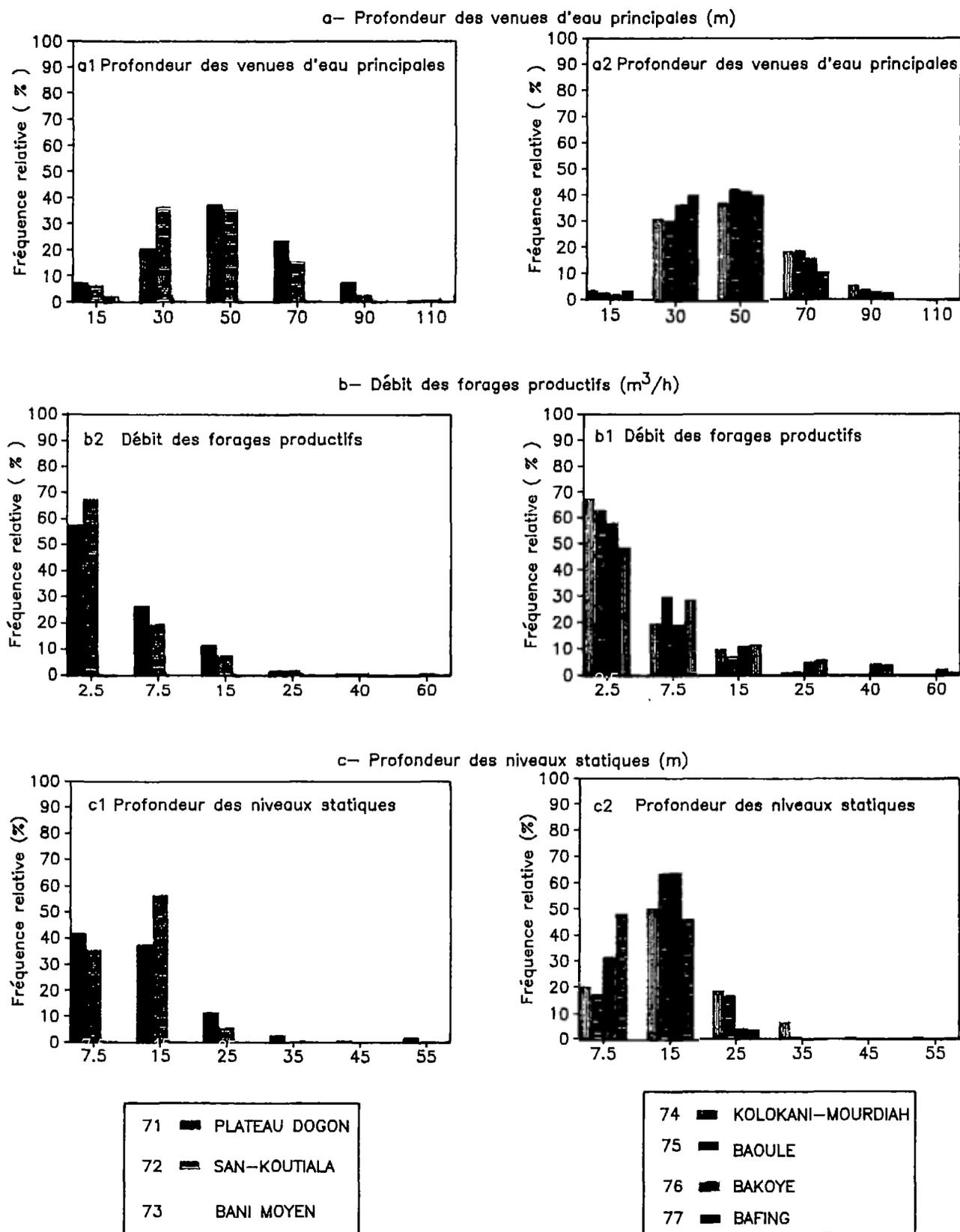


Figure 3.5: Aquifère de l'Infracambrien tabulaire

d) Profondeur des niveaux statiques (figure 3.5c)

Les niveaux sont en général peu profonds, entre 10 et 17 m en moyenne, plus de 80 % des forages ayant leur niveau d'eau à moins de 20 m de profondeur.

Dans les secteurs situés en zone sahélienne, les niveaux statiques s'abaissent progressivement vers le nord et peuvent même dépasser localement 50 m de profondeur. En raison de cet approfondissement des niveaux et de la diminution de l'épaisseur du recouvrement, la nappe superficielle perd progressivement de son importance jusqu'à disparaître complètement ou du moins être réduite à de petites nappes perchées locales. On passe ainsi, du sud vers le nord, d'un système aquifère bicouche (intergranulaire et fissuré) à un aquifère monocouche (uniquement fissuré).

Une des particularités de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire est l'existence d'un artésianisme local qui, sans être fréquent, a toutefois été observé dans une dizaine de forages, notamment dans les secteurs de Sikasso, Koutiala et Bafoulabé. La mise en charge est liée d'une part à la présence de bancs imperméables de quartzites massifs ou de filons doléritiques, d'autre part à des dénivelés topographiques importants et à une pluviométrie supérieure à 1.000 mm par an qui sont à l'origine de gradients piézométriques élevés.

e) Influence de la lithologie

Bien que l'imbrication des faciès, leur variation latérale et leur granulométrie ne soient décrites que d'une manière sommaire dans les coupes de forage, il est possible de définir quelques tendances générales de l'influence de la lithologie. Ainsi, les grès régulièrement lités et les alternances de grès et de schistes en bancs peu épais constituent les faciès les plus favorables au développement des réseaux de fissuration. Les niveaux de jaspes et de calcaires ou de dolomies interstratifiés dans des séquences schisteuses sont souvent fracturés dans la masse et constituent des horizons de perméabilité préférentielle qui permettent d'atteindre des débits de plusieurs dizaines de m³/h. Les épontes des filons-couches doléritiques sont aussi des zones de perméabilité préférentielle, même à des profondeurs supérieures à 100 m.

Dans les séries gréseuses homogènes et non-quartzitiques, les venues d'eau sont fréquemment échelonnées en profondeur avec une augmentation progressive du débit des forages à l'avancement. Les alternances schistes-grès sont par contre caractérisées par des venues d'eau stratifiées localisées aux contacts lithologiques ou au niveau de bancs durs fissurés.

Les forages négatifs sont surtout fréquents dans les séquences lithologiques homogènes et épaisses : schistes, grès quartzites et laccolites doléritiques. Il est probable toutefois que, pour nombre d'entre eux, des débits exploitables auraient pu être trouvés si le forage avait été approfondi jusqu'à un changement lithologique, en particulier dans le cas des intrusions doléritiques.

3.2.3. Aquifère de l'Infracambrien plissé métamorphique

3.2.3.1. Données générales

Cet aquifère qui couvre 97.420 km², a été distingué de celui de l'Infracambrien tabulaire car ses caractéristiques hydrogéologiques sont très différentes. Il a été subdivisé en trois unités : le Gondo, le Nord delta dans lesquelles il est surmonté par les formations du Continental Terminal et du Quaternaire, et le Gourma qui constitue l'unité la plus étendue.

Cet aquifère est situé en zone sahélienne et sub-désertique sous des précipitations annuelles inférieures à 500 mm. Ce contexte climatique et la prédominance de séries schisteuses plissées et plus ou moins métamorphisées qui fragmentent les zones fissurées perméables, lui confèrent des caractéristiques hydrogéologiques spécifiques :

- la piézométrie est profonde : les niveaux d'eau sont situés à plus de 50 m, sauf dans les secteurs où sont localisées des eaux de surface semi-permanentes ou temporaires;
- les zones aquifères sont discontinues : les formations schisteuses sont en général stériles, même quand elles sont fortement tectonisées, et les zones perméables sont localisées dans des bancs durs de grès, grès quartzites, calcaires et dolomies; cependant, le fort pendage des couches et la forte épaisseur des séquences schisteuses entraînent un morcellement de ces zones aquifères;
- dans certains secteurs, les formations carbonatées sont épaisses et affectées par une tectonique cassante : bordure sud-ouest du Gourma et Gondo; une karstification profonde mise en évidence par les forages semble s'y être développée avec de rares manifestations en surface (doline d'Irma).

Le projet en cours du Liptako-Gourma apportera des données complémentaires sur cet aquifère qui reste encore mal connu dans le détail bien que ses principales caractéristiques aient pu être établies.

Tableau 3.6 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère de l'Infracambrien plissé métamorphique

Unité Hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)	Ep.alt. (m)	VBP moy (m)
Nord delta	81	250	270	39	30	77	8,5	28	12,5	30,5	30	48
Gourma	82	350	285	235	110	47	6,7	34	43,1	96,5	37	72
Gondo	83	600	255	65	31	48	6,5	28	47,4	78,3	35	68

3.2.3.2. Traitements statistiques

Ils ont été effectués sur les données de 339 forages situés en majorité dans l'unité du Gourma. Les valeurs moyennes calculées pour l'unité Nord delta ne sont pas réellement significatives car établies à partir d'un trop petit nombre de forages. En outre, ces forages sont concentrés dans le secteur de Goundam dont les caractéristiques hydrogéologiques, liées à la présence de lacs semi-permanents et d'une nappe superficielle, sont peu représentatives de l'ensemble de l'unité.

a) Taux de réussite

Il est inférieur à 50 % dans le Gourma et le Gondo. Toutefois les valeurs moyennes mentionnées masquent une grande variabilité selon les secteurs. Ainsi la bordure occidentale du Gourma, au contact du delta intérieur, est influencée par les eaux de surface et on y a enregistré un taux de réussite supérieur à 80 %. Il en est de même dans la plaine du Gondo où l'on a rencontré des zones de calcaires karstifiés.

Par contre, dans le Gourma central, le taux de réussite n'est que de l'ordre de 20 %. Enfin, le pourcentage élevé de forages productifs enregistré dans le secteur de Goundam confirme le rôle des eaux de surface et des nappes superficielles associées à des milieux fissurés formant un système aquifère semi-continu.

b) Profondeur des venues d'eau principales (figure 3.6a)

Les venues d'eau ont été rencontrées, pour plus de 50 % des forages, au-delà de 60 m de profondeur dans le Gourma et le Gondo et dans 12 à 15 % des cas, à plus de 100 m.

c) Débit des forages productifs (figure 3.6b)

Les valeurs moyennes par unité varient entre 6,5 et 8 m³/h. Environ 50 % des forages productifs débitent moins de 5 m³/h et 16 à 30 % ont un débit supérieur à 10 m³/h. Ces derniers débits proviennent des calcaires karstifiés du Gondo et des niveaux gréseux très fracturés situés sous une nappe superficielle rechargée par les eaux de surface comme à Goundam et dans le Gourma occidental.

d) Profondeur des niveaux statiques (figure 3.6c)

Dans le Gourma et le Gondo, la profondeur moyenne du niveau des nappes est supérieure à 40 m avec un maximum de 96,5 m mesuré dans le Gourma central. Ce n'est que sur les bordures des unités, à proximité et au niveau des zones de recharge par les eaux superficielles, que la surface des nappes se trouve à moins de 20 m sous le sol. A noter que la faible profondeur moyenne (12,5 m) indiquée pour l'unité Nord delta n'est représentative que du secteur de Goundam. Dans les autres secteurs de cette unité, les niveaux d'eau sont plus profonds, au-delà de 40 m, comme dans le Gourma central.

3.2.4. Aquifère du Cambrien

3.2.4.1. Données générales

Cet aquifère couvre, sur 66.060 km², la région de Nioro - Nara et se prolonge au-delà de la frontière nord-ouest du Mali dans le bassin du Hodh, en Mauritanie. Sa partie malienne a été subdivisée en deux unités hydrogéologiques : à l'est, celle du Ouagadou qui couvre les plaines ensablées de la région de Nara et, à l'ouest, l'unité du Kaarta qui s'étend sur une zone d'intrusions doléritiques massives. Cet aquifère est situé dans la frange climatique sahélienne, l'unité du Kaarta bénéficiant toutefois d'une pluviométrie plus élevée que celle du Ouagadou dont la bordure nord est sous influence désertique.

Les caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère sont liées à la prédominance des formations schisteuses dans la série cambrienne ainsi qu'à la fréquence et au caractère souvent massif des intrusions doléritiques. Les zones aquifères sont discontinues et les formations d'altération latéritique sont d'épaisseur très réduite ou complètement érodées. Les ressources en eau sont donc essentiellement localisées dans les zones fissurées. Ce n'est que dans le Kaarta où la pluviométrie est plus élevée et le réseau hydrographique fonctionnel que les fonds de vallées contiennent des petites nappes alluviales; celle de l'oued Faka est exploitée pour l'adduction d'eau de la ville de Nioro du Sahel.

HISTOGRAMMES DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES PAR UNITE HYDROGEOLOGIQUE

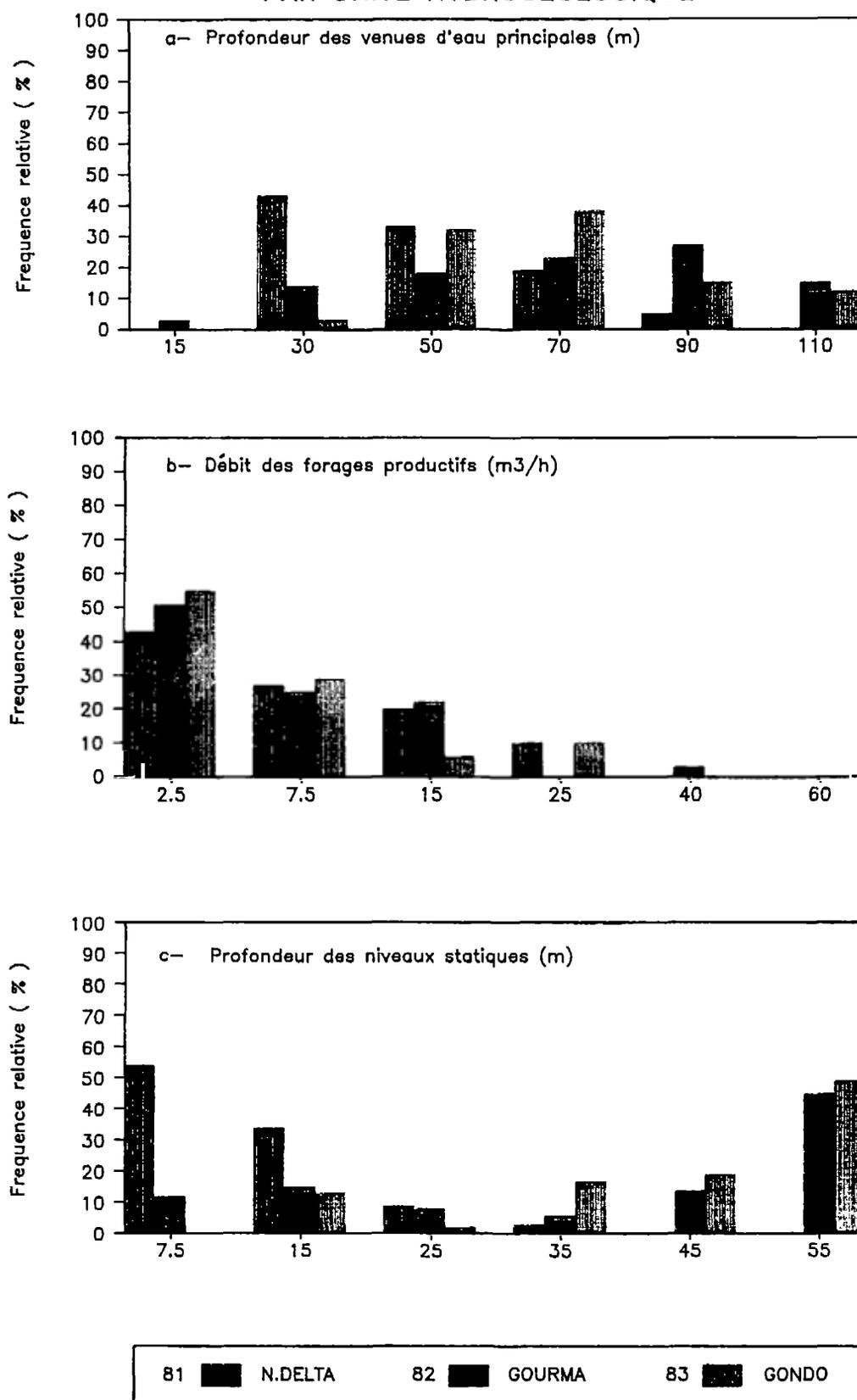


Figure 3.6: Aquifère de l'Infracambrien plissé

3.2.4.2. Traitements statistiques

Ils ont été effectués à partir de 1.998 forages dont 899 ouvrages productifs avec une répartition régulière sur l'ensemble des deux unités.

Tableau 3.7 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Cambrien

Unité Hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)	Sp.alt. (m)	VEP moy (m)
Ouagadougou	61	520	275	875	356	41	6,8	90	16,4	63,8	10	43,5
Kaarta	62	680	235	1.123	543	48	5,9	72	12,6	77,1	12	38,9

a) Taux de réussite

Il est l'un des plus faibles parmi les aquifères fissurés du Mali après celui de l'Infracambrien plissé, avec moins de 50 % de forages productifs. La principale cause d'échec est le faible développement de la perméabilité fissurale dans les séries schisteuses et dans les intrusions doléritiques massives. Dans les secteurs où existent des intercalations de niveaux durs tels que grès, jaspes, calcaires et sills doléritiques peu épais, des taux de réussite de l'ordre de 60 % ont été enregistrés. Ainsi l'implantation des forages doit être très précise en raison de l'étroitesse des zones fissurées et nécessite des études géophysiques détaillées combinant les méthodes électriques, sismiques et électro-magnétiques. D'autre part, des études statistiques menées dans le cadre des projets ODIK et CEA0-1 [3.2, 3.3] ont montré que le taux de réussite des forages était plus élevé dans le réseau de fissures secondaires (de direction N-S) que dans les grandes fractures (de direction OSO-ENE).

b) Profondeur des venues d'eau principales (figures 3.7a)

Selon les unités, 50 à 63 % des forages ont rencontré les venues d'eau exploitables à moins de 40 m de profondeur et entre 20 et 40 m pour plus de 40 % des forages. La fréquence des venues d'eau décroît ensuite avec la profondeur et atteint moins de 2 % au-delà de 100 m avec, en général, des débits très faibles. L'épaisseur de la zone fissurée productive est donc, au plan régional, plus faible que celle des aquifères de l'Infracambrien tabulaire et du socle. Cela est probablement à mettre en relation avec une lithologie peu favorable au développement de la fissuration et à l'érosion de la couverture d'altérites.

c) Débit des forages productifs (figure 3.7b)

Les débits moyens par unité sont de 5,9 à 6,8 m³/h, comparables à ceux des autres aquifères fissurés. Les deux tiers des forages productifs débitent moins de 5 m³/h, mais près de 17 % des ouvrages ont des débits supérieurs à 10 m³/h. Le faible taux de réussite en forages productifs qui caractérise l'aquifère de Cambrien n'est pas accompagné par une modification marquée dans la distribution des débits par rapport à ceux des aquifères du socle et de l'Infracambrien tabulaire. Ce sont les horizons de jaspes et de calcaires qui fournissent en général les débits les plus élevés ainsi que les éponges des filons doléritiques. Les zones où l'on trouve les shales, les schistes tendres

HISTOGRAMMES DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES PAR UNITE HYDROGEOLOGIQUE

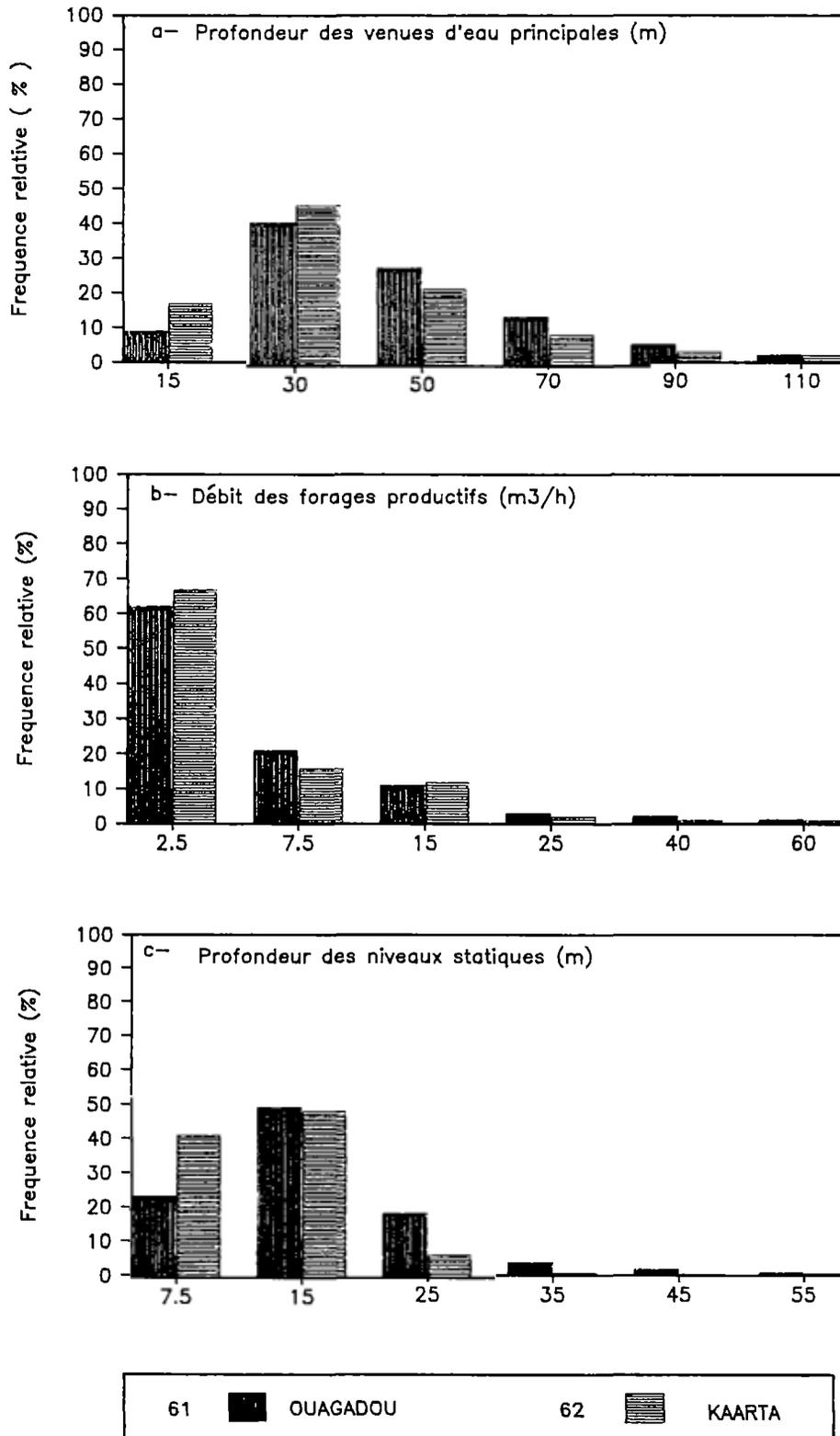


Figure 3.7: Aquifère du Cambrien

et les dolérites altérées sont par contre tellement peu productives que certains forages ont dû y être équipés malgré des débits inférieurs à 1 m³/h.

d) Profondeur des niveaux statiques (figure 3.7c)

La tendance est un approfondissement général des niveaux vers le nord et vers l'est dans le même sens que la décroissance des précipitations. Les irrégularités sont toutefois nombreuses et liées aux conditions locales de recharge indirecte par les eaux de ruissellement. La profondeur moyenne des niveaux d'eau dans l'unité orientale du Ouagadou est de 16,4 m et plus de 25 % des forages ont un niveau au-delà de 20 m de profondeur. Elle est de 12,6 m dans la région plus arrosée du Kaarta avec seulement 9 % des forages ayant des niveaux supérieurs à 20 m de profondeur. Certaines anomalies (profondeurs supérieures à 40 m) sont localisées en bordure du fossé de Nara et dans des compartiments calcaires du Kaarta où elles pourraient éventuellement être l'indice d'une circulation karstique profonde.

c) Influence de la lithologie

Elle se manifeste surtout par l'augmentation des taux de réussite et du débit des forages lorsque les séquences lithologiques comportent des bancs durs intercalés tels que calcaires, calcaires dolomitiques, grès et jaspes. Les zones fissurées ne sont pas alors seulement localisées au voisinage immédiat d'un accident structural, mais elles se développent aussi au sein même de ces bancs durs. La fissuration y est également moins souvent colmatée par des produits résiduels d'altération que dans les séries pélitiques. La fréquence des débits supérieurs à 5 m³/h est aussi plus élevée dans les grès que dans les pélitites et les dolérites et la profondeur des venues d'eau y est en général plus grande avec une charge hydraulique plus élevée (différence entre la profondeur de la venue d'eau et celle du niveau statique) [3.2].

3.2.5. Aquifère des formations primaires de Taoudenni

Les données hydrogéologiques sur les formations précambriennes et primaires qui couvrent 112.700 km² à l'extrémité nord du Mali, sont peu nombreuses (11 forages).

Les calcaires du Viséen qui affleurent dans le secteur central de la cuvette de Taoudenni sont fracturés et karstifiés en surface avec la formation de lapiaz. Le débit moyen des forages qui ont été réalisés près de Taoudenni est de l'ordre de 20 m³/h, l'un d'eux dépassant 50 m³/h. Les venues d'eau se produisent dans les 20 premiers mètres et sont associées à une karstification superficielle. Les niveaux statiques sont situés à moins de 10 m de profondeur dans la partie basse de la cuvette, près des salines d'Agorgott, et s'approfondissent à mesure que la topographie s'élève, la surface de la nappe étant sub-horizontale.

Un forage de 340 m de profondeur exécuté par la SONAREM dans les calcaires viséens n'a pas identifié de signes importants de karstification profonde. Il a cependant recoupé en fin de foration une zone fissurée en charge avec un débit d'artésianisme de 0,4 m³/h et un niveau statique à 3 m au-dessus du sol.

Les argiles rouges du Namurien qui surmontent sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur les calcaires viséens sont stériles et constituent le mur imperméable de l'aquifère généralisé du Continental intercalaire de l'Azaouad.

Les formations de l'Infracambrien, du Cambro-silurien et du Dévonien qui affleurent sur le flanc nord de la cuvette de Taoudenni dans l'Erg Chech et le Krib en Naga, comportent des séries de grès et de calcaires fissurés qui n'ont pas été reconnues par forages; elles sont probablement aquifères avec des eaux moins salines que celles du Carbonifère. Il existe aussi des petites nappes superficielles dans les alluvions et colluvions de fonds d'oued alimentées par les eaux de ruissellement comme celle de Tellig à l'est de Taoudenni exploitée par un puits nomade peu profond.

3.3. AQUIFERES GENERALISES

Ces aquifères sont caractérisés par une perméabilité de type intergranulaire et par des nappes continues couvrant la majeure partie des régions sahéniennes et désertiques de l'est et du nord pour une superficie totale de plus de 630.000 km² (51 % de la superficie du Mali). Ils sont constitués par des formations essentiellement détritiques et d'origine continentale qui se sont accumulées, depuis le Secondaire, dans trois vastes bassins sédimentaires :

- le bassin de Taoudenni (partie centrale et méridionale),
- le détroit soudanais,
- le bassin du Niger (partie malienne).

L'épaisseur de ces formations essentiellement sablo-argileuses varie en fonction des mouvements orogéniques qui se sont produits dans leur aire de sédimentation durant la fin du Secondaire et au début du Tertiaire.

Les principaux aquifères généralisés du Mali sont le Continental intercalaire et le Continental terminal (et, à un moindre degré, le Crétacé supérieur/Eocène inférieur) principalement constitués de couches lenticulaires où alternent des argiles et des sables de granulométrie variée et plus ou moins grésifiés. Les forages et les prospections géophysiques n'ont pas permis de caractériser les séries de base de ces formations de même que la position du mur imperméable de ces aquifères car les forages profonds sont peu nombreux et les surfaces couvertes par les prospections géophysiques limitées.

La similitude des faciès et l'absence de niveaux repères ont amené à associer les aquifères dans certains bassins lorsqu'ils étaient en continuité hydraulique. Quatre systèmes aquifères ont ainsi été définis (*tableau 3.8*) :

- le Continental intercalaire individualisé,
- le Continental intercalaire et terminal indifférenciés,
- le Crétacé supérieur/Eocène inférieur,
- le Continental terminal/Quaternaire.

Ils ont été subdivisés en 10 unités et 17 secteurs hydrogéologiques (*voir figure 3.2, page 5*).

Tableau 3.8 - Subdivisions hydrogéologiques des aquifères généralisés

AQUIFERE	SIGLE/CODE	UNITE HYDROGEOLOGIQUE	COD3	SUPERFICIE (km ²)	SECTEUR HYDROGEOLOGIE	CODE	SUPERFICIE (km ²)
Continental terminal/ Quaternaire	CTQ 1	Gondo	11	pn	Koro	11	pn
		Fossé de Gao	12	59.180	Gao Menaka	12a 12b	31.940 27.240
		Azaouad sud	13	61.620	Azaouad sud	13	61.620
		Gourma nord-ouest	14	24.360	Gourma nord ouest	14	24.360
		Delta intérieur	15	57.670	Niono-Diouara Macina-Diaka Bani-Niger	15a 15b 15c	18.350 16.140 23.180
Crétacé supérieur/ Eocène inférieur	CSE 2	Bordure Adrar	21	138.910	Azaouak Tlemsi-Telataye Nord Adrar	21a 21b 21c	48.790 27.280 62.840
Continental inter./ Continental terminal	CIT 3	Azaouad nord	31	188.320	Sud Araouane Nord Araouane	31a 31b	84.950 103.370
		Fossé de Nara	32	20.550	Fossé de Nara	32	20.550
Continental intercalaire	CIN 4	Tamesna	41	17.920	Tamesna	41	17.920
		Khenachich	42	64.400	Ouest Khenachich Est Khenachich	42a 42b	51.200 13.200

A la différence des aquifères fissurés, la description des aquifères généralisés sera faite par unité hydrogéologique parce qu'elles présentent des caractéristiques spécifiques. Cependant, le nombre de données disponibles variant fortement de l'une à l'autre, le niveau de connaissance de ces caractéristiques n'est pas homogène.

3.3.1. Aquifère du Continental intercalaire

Les formations du Continental intercalaire affleurent sur les bordures nord du bassin de l'Azaouad (Unité du Khenachich) et du bassin Mali - Niger (unité du Tamesna). Les données hydrogéologiques y sont très dispersées, anciennes et incomplètes.

Tableau 3.9 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental intercalaire

Unité hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product.	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)
Tamesna	41	<100	325	5	4	80	12,8	18	39	68
Khenachich	42	<100	380	2	0	0	0	0	10	10

3.3.1.1. Unité du Khenachich

Deux forages seulement y ont été exécutés dans le cadre du projet PNUD/DCTD "Route du Sel", à proximité de Bir Ounane. Le Continental intercalaire est représenté par des grès conglomératiques à galets de quartz recoupés sur 20 à 30 m et qui reposent sur une puissante série d'argiles namuriennes imperméables. Il ne contient que de petites nappes superficielles isolées par des seuils dûs à l'irrégularité du contact avec les argiles namuriennes. Les forages n'y ont rencontré que des traces d'humidité. Les puits de Bir Ounane ont un débit très faible et ne couvrent pas les besoins en eau des caravanes transportant le sel de Taoudenni. Quelques oglats non permanents jalonnent la falaise bordant au nord le plateau, au contact avec les argiles du Namurien.

A l'est du plateau du Khenachich et dans le Tanezrouft, le Continental intercalaire s'épaissit et repose en partie sur les séries gréso-pélitiques du Cambro-ordovicien. Il devrait contenir une nappe généralisée qui n'a toutefois pas été mise en évidence puisqu'aucune reconnaissance n'y a été réalisée.

3.3.1.2. Unité du Tamesna

Elle constitue la partie nord-ouest de l'aquifère du Continental intercalaire du bassin Mali-Niger. Les formations sont représentées par des séries sablo-gréseuses dans lesquelles sont intercalées des séquences pélitiques dont l'épaisseur croît du flanc SE de l'Adrar des Iforas vers le centre du bassin du Niger. Ces formations abritent un aquifère continu, multicouche, dont les grès de Tegama constituent le niveau aquifère le plus important. Dans le secteur nord où affleure le Continental intercalaire, la nappe est libre avec des profondeurs de niveau supérieures à 40 m. Vers le sud, elle est mise en charge par les couches du Crétacé supérieur et, du fait de l'abaissement de la topographie, les niveaux piézométriques deviennent peu profonds et localement artésiens (secteur nord de la vallée de l'Azaouak). La profondeur des couches aquifères du Continental intercalaire dépasse alors 300 m.

3.3.2. Aquifère du Continental intercalaire/Continental terminal

Il occupe la partie centrale et septentrionale du bassin de l'Azaouad ainsi que le fossé de Nara avec une superficie totale de près de 210.000 km².

Les similitudes de faciès des formations du Continental intercalaire et du Continental terminal ne permettent pas de les distinguer. Ces séries continentales anciennes sont couvertes par des dunes quaternaires et, localement, par des dépôts lacustres de l'Holocène qui affleurent dans les creux interdunaires.

En raison de la piézométrie déprimée qui caractérise ce système aquifère, les formations du Continental terminal et du Quaternaire sont en général dénoyées et les ressources en eau sont donc, en fait, contenues essentiellement dans l'aquifère du Continental intercalaire.

Les forages sont peu nombreux, moins d'une centaine, en regard de la superficie couverte par cet aquifère. Ils permettent cependant, avec les données provenant de l'inventaire des puits nomades, des campagnes de prospection géophysique et des études isotopiques et hydrochimiques, d'avoir un aperçu assez complet des conditions hydrogéologiques de cet aquifère.

Tableau 3.10 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental intercalaire / Continental terminal

Unité hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product.	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)
Azaouad nord	31	<50	286	37	32	87	9,4	34	44,2	68
Fossé de Nara	32	350	266	60	44	73	11,6	50	44,7	92

3.3.2.1. Unité de l'Azaouad nord

Elle couvre la partie du bassin de l'Azaouad située au nord de la dorsale de l'Azaouad jusqu'au plateau du Khenachich. Vers l'est, elle vient au contact des formations du Crétacé supérieur/Eocène inférieur du Tanezrouft. Vers l'ouest, elle se poursuit en Mauritanie.

Les forages de reconnaissance exécutés par les projets PNUD "Route du Sel" sont échelonnés le long des deux pistes empruntées par les caravanes pour transporter le sel de Taoudenni vers Tombouctou et Gao [3.4].

L'épaisseur moyenne des formations continentales est de l'ordre de 150 à 200 m; elle se réduit à moins de 100 m à Fom el Alba en bordure du plateau du Khenachich ainsi qu'au voisinage de la dorsale de l'Azaouad où le substratum affleure. Par contre, son épaisseur croît vers l'Ouest et dépasserait 500 m en Mauritanie [3.5].

Le mur de l'aquifère est constitué par les séries schisto-gréseuses de l'Infracambrien et du Cambro-ordovicien dans la partie sud et par les formations calcaires et argileuses du Carbonifère dans la partie nord. La limite entre les deux secteurs est constituée par la "flexure d'Araouane" qui correspond à une zone d'accidents d'orientation OSO-ENE provoquant le plongement des couches infracambriennes et primaires.

Les formations aquifères sont constituées de sables et de grès localement grossiers avec des intercalations d'argiles plus ou moins sableuses. L'ensemble constitue une nappe libre multicouche car les forages de reconnaissance n'ont pas enregistré de différences de charge notables entre les divers horizons perméables.

A l'exception de quelques forages exécutés près de la dorsale de l'Azaouad où les formations continentales sont moins épaisses et plus argileuses, tous les autres forages sont productifs avec un débit moyen proche de 10 m³/h, 44 % de ces forages ayant

HISTOGRAMMES DE DISTRIBUTION DES PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES
PAR UNITE HYDROGEOLOGIQUE

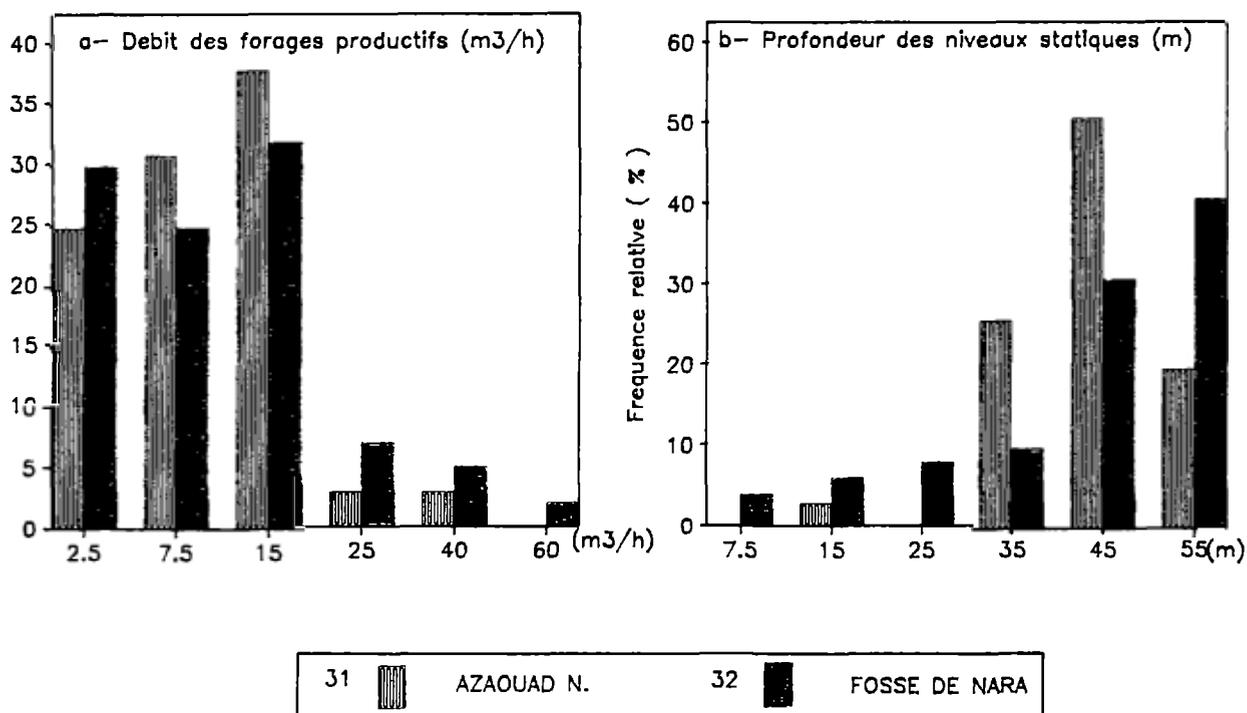


Figure 3.8 : Aquifère du Continental Intercalaire/Continental terminal

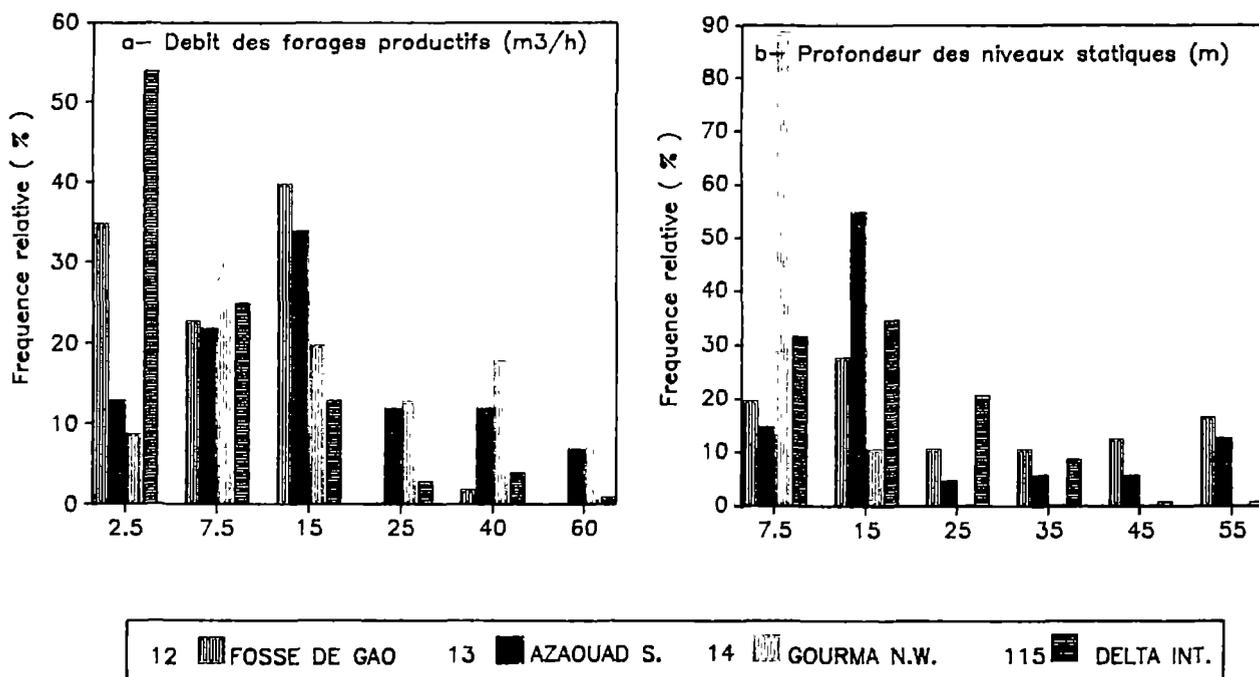


Fig. 3.9: Aquifère du Continental terminal/Quaternaire

fourni un débit nettement supérieur lors des essais de production (*figure 3.8a*). Les faibles rabattements observés durant les pompages d'essai sur plusieurs forages dans la zone de Taganet et d'Araouane indiquent que des débits supérieurs à 50 m³/h pourraient y être exploités.

Les niveaux d'eau sont profonds avec une valeur moyenne de 44 m et une profondeur maximale mesurée de 58 m (*figure 3.8b*). La principale différence entre les deux secteurs de cette unité, au nord et au sud de la flexure d'Araouane, réside dans la différence de salinité : les eaux du secteur nord sont saumâtres tandis qu'elles sont peu minéralisées dans le secteur sud. Cette caractéristique est surtout liée à l'origine des eaux de recharge (*chapitre 6*).

3.3.2.2. Unité du fossé de Nara

Elle est circonscrite au fossé d'effondrement situé sur la bordure SO du bassin de l'Azaouad, entre Nara et le lac Faguibine. L'épaisseur des formations continentales dépasserait 500 m dans la zone axiale du fossé et se réduit sur ses bordures à moins de 50 m par suite d'un système de failles en gradins faisant remonter le substratum. Celui-ci est constitué par les schistes et les grès de l'Infracambrien sauf à l'extrémité occidentale du fossé où il est représenté par les schistes du Cambrien.

Le Continental intercalaire est composé principalement de sables et de grès de granulométrie et d'induration variables, les niveaux argileux étant peu fréquents. Sur les bordures du fossé, la diminution d'épaisseur des formations continentales est accompagnée d'une augmentation de la fraction argileuse qui devient prédominante dans le secteur occidental du fossé. La couche aquifère supérieure est libre et exploitée par de nombreux puits traditionnels avec un niveau statique entre 45 et 60 m de profondeur. Sur les bordures, une épaisse séquence argileuse la sépare d'un horizon aquifère inférieur captif associé à un niveau de grès grossiers et conglomératiques marquant la base de la série continentale.

Le taux de réussite moyen des forages est de 73 %. Les forages non productifs sont exclusivement localisés sur les bordures sud et ouest du fossé où les formations continentales sont argileuses, peu épaisses ou dénoyées. Dans la partie axiale du fossé et dans son secteur oriental, tous les forages sont productifs. Leur débit moyen est de 11,6 m³/h avec 14 % des forages ayant des débits supérieurs à 20 m³/h. Ces valeurs sont probablement sous-estimées car le diamètre de tubage utilisé pour l'équipement des forages et la profondeur élevée des niveaux statiques n'ont pas permis de tester leur capacité réelle.

La profondeur moyenne des niveaux statiques est d'environ 45 m avec pour 41 % des forages des niveaux situés à plus de 50 m de profondeur. Dans le secteur central du fossé de Nara, en raison d'une topographie légèrement plus haute que dans les autres secteurs, la profondeur des niveaux d'eau varie de 70 à 90 m. Ce n'est que sur les bordures est et sud-est du fossé que la proximité des plans d'eau de surface semi-permanents alimentés par les crues du Niger entraîne une remontée locale des niveaux de la nappe jusqu'à moins de 20 m.

3.3.3. Aquifère du Crétacé supérieur / Eocène inférieur

Cet aquifère est localisé à la périphérie occidentale de l'Adrar des Iforas ; il est caractérisé par des épaisseurs très variables de moins de 100 m à plus de 400 m et une lithologie complexe. Les formations sont d'origine marine ou lagunaire et constituées principalement d'argilites, de schistes et de grès argileux avec des intercalations de

niveaux calcaires et, localement, de couches phosphatées et d'horizons de lignite. A l'ouest et au sud de l'Adrar, elles reposent directement sur le socle précambrien tandis qu'au nord et au sud-est, elles sont en contact avec le Continental intercalaire.

Considérées globalement, les formations du Crétacé supérieur et de l'Eocène inférieur constituent un aquifère de qualité médiocre.

L'extension des couches perméables et leurs relations hydrauliques sont mal connues car les données des forages, pour la plupart exécutés avant 1970, sont très incomplètes. La couche captée est en général le Sénonien où des horizons de sables et de grès sont intercalés dans une série argileuse. La nappe qui y a été identifiée est captive avec des eaux le plus souvent fortement minéralisées. Les niveaux gréseux et calcaires du Maestrichtien et du Paléocène contiennent aussi des horizons aquifères, mais insuffisamment reconnus.

Tableau 3.11 - Données statistiques moyennes sur l'aquifère du Crétacé supérieur / Eocène inférieur

Unité hydrogéologique	Code	Pluie	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product.	T.R. (%)	Q. moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /)	NS moy. (m)	NS max. (m)
Bordure Adrar	21	120	295	82	59	72	7,3	32	51,2	113

La plupart des forages exécutés dans l'aquifère du Crétacé-Eocène sont productifs. Leur débit est toutefois relativement faible pour ce type d'aquifère : 48 % des ouvrages ont moins de 5 m³/h de capacité et 15 % seulement entre 10 et 18 m³/h.

La profondeur des niveaux statiques, toujours élevée, est supérieure à 50 m dans près de la moitié des forages. Sur le flanc sud-ouest de l'Adrar des Iforas, elle peut dépasser localement 100 m.

3.3.4. Aquifère du Continental terminal / Quaternaire

Cet aquifère couvre les vastes plaines alluviales qui s'étendent de part et d'autre du fleuve Niger à l'aval de Ségou jusqu'à Gao ainsi que le sud de l'Azaouad et les glacis de la bordure sud de l'Adrar des Iforas. Sa superficie totale est proche de 200.000 km² et il est situé essentiellement en zone climatique sahélienne et sub-désertique avec des précipitations annuelles allant de 600 mm dans les secteurs les plus méridionaux à moins de 100 mm sur la limite nord.

Les caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère sont liées à la présence d'eaux de surface permanentes et à l'extension des zones d'inondation couvertes par les crues du fleuve Niger.

L'aquifère a été subdivisé en 4 unités hydrogéologiques sur la base des conditions géomorphologiques et structurales, de la nature des formations quaternaires et du rôle des eaux de surface :

- Delta intérieur,
- Gourma nord-ouest,
- Azaouad sud,
- Fossé de Gao.

La plaine du Gondo serait à ajouter à cette liste, mais elle ne constitue pas une unité hydrogéologique car le Continental terminal n'y contient pas de nappe généralisée.

Les limites de l'aquifère sont constituées par les affleurements du substratum infracambrien : le plateau mandingue à l'ouest, le plateau de San - Koutiala et le plateau dogon au sud, le Gourma au sud-est et les collines de Nampala - Goundam et la dorsale de l'Azaouad au nord. L'Infracambrien constitue aussi le mur de cet aquifère, sauf dans l'unité de Gao où le Continental terminal repose sur les formations de l'Eocène inférieur.

Les formations quaternaires d'origine alluviale, lacustre ou éolienne ne sont aquifères et en liaison hydraulique avec la nappe principale que dans les zones inondables.

Le Continental terminal est représenté par des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables fins à grossiers, souvent en disposition lenticulaire et localement grésifiés. Des niveaux à graviers de quartz et des horizons latéritiques argileux ou concrétionnés sont fréquemment intercalés dans les parties moyenne et inférieure des formations continentales.

Leur épaisseur varie fortement suivant les structures affectant les aires de sédimentation : elle est inférieure à 100 m dans la partie occidentale du delta intérieur et probablement de l'ordre de 1.000 m dans la zone axiale du fossé de Gao.

A l'échelle régionale, l'aquifère est de type libre et multicouche. En dehors des zones sous influence directe des eaux de surface, la nappe est déprimée avec des niveaux d'eau situés à des profondeurs supérieures à 40 m. Des "biseaux secs" sont localisés en bordure de certains secteurs où les formations continentales, peu épaisses par suite de la remontée du substratum infracambrien, sont dénoyées. La surface piézométrique s'établit alors dans le substratum fissuré et les échanges hydrauliques entre la nappe du Continental terminal et la nappe de fissures du substratum sont en général peu importants.

Les données statistiques sur cet aquifère sont établies à partir de 1.332 forages (1.119 productifs), en grande majorité situés dans la région de Ségou, c'est-à-dire dans la partie occidentale du delta intérieur (*Figures 3.9a et 3.9b*).

Tableau 3.12 - Données statistiques moyennes sur les unités de l'aquifère du Continental terminal / Quaternaire

Unité hydrogéologique	Code	Pluie (mm/an)	Altitude (m)	Nb. forages	Nb. For. product.	T.R. (%)	Q moy. (m ³ /h)	Q max. (m ³ /h)	NS moy. (m)	NS max. (m)
Fossé de Gao	12	230	280	56	48	87	8,8	37	28,2	78
Azaouad Sud	13	100	270	75	68	91	18,0	72	23,2	72
Gourma Nord-Ouest	14	280	265	51	45	88	23,1	100	6,9	(10)
Delta intérieur	15	550	280	1.150	958	83	7,7	100	17,0	86

3.3.4.1. Unité du delta intérieur

Trois secteurs ont été définis suivant la répartition des eaux de surface.

a) *Le secteur ouest*

Il correspond à la zone du delta fossile ou delta mort du Niger qui était fonctionnel à l'Holocène. Les formations continentales sont relativement peu épaisses (30 à 80 m) en raison d'une remontée d'un haut - fond gréseux du substratum infracambrien. La réduction d'épaisseur des dépôts s'accompagne d'une augmentation de leur composante argileuse. Les périmètres d'irrigation de l'Office du Niger alimentés par les eaux du canal du Sahel, dérivées du Niger au barrage de Markala, occupent la bordure ouest de ce secteur et participent à la recharge de cette unité.

b) *Le secteur central*

Il couvre le delta vif actuel constitué par le réseau des différents bras du Niger, par les lacs qu'ils alimentent et par les plaines d'inondation saisonnière. L'épaisseur moyenne des formations continentales est de l'ordre de 100 m. Elle pourrait être supérieure à 150 m dans le secteur le plus déprimé. Les faciès sableux sont prédominants avec des niveaux de graviers intercalés.

c) *Le secteur sud*

Il s'étend entre Ségou et Mopti sur les plaines alluviales situées entre le Niger et le Bani et au sud du Bani jusqu'à la bordure des plateaux gréseux de San et de Bandiagara. Les dépôts continentaux, souvent très argileux, ont des épaisseurs variant de 30 à 80 m.

Le taux de réussite moyen en forages productifs atteint dans cette unité 83 %. Il est proche des 100 % dans le secteur central, les rares forages abandonnés l'ayant été pour des raisons techniques. Les échecs sont par contre plus nombreux dans le delta mort en raison du dénoyage fréquent de l'aquifère ou de la prédominance des faciès argileux improductifs dans la zone saturée. Cette augmentation de la teneur en argile est aussi à l'origine des forages "secs" exécutés dans certains secteurs de la plaine alluviale du Bani (Arrondissement de Sy) où les schistes infracambriens du substratum sont, eux aussi, stériles [HDG/RGL/15]. Dans la zone de Ségou au contraire, l'Infracambrien, représenté par des jaspes très fracturés, constitue une couche aquifère de bonne perméabilité en continuité avec les dépôts alluviaux qui la recouvrent.

Le débit moyen des forages est de 7,7 m³/h avec 21 % de forages débitant plus de 10 m³/h. Dans le secteur central du delta, de nombreux forages ont une capacité supérieure à 20 m³/h et plusieurs forages ont fourni, durant leur développement, des débits supérieurs à 50 m³/h.

Les niveaux statiques sont à moins de 10 m de profondeur dans la zone lacustre ainsi que dans les plaines d'inondation en bordure des fleuves Niger et Bani, à l'amont du delta. Ils s'approfondissent dans la zone de transition à la périphérie du domaine lacustre et sont situés au-delà de 40 m dans le delta mort.

3.3.4.2. Unité de l'Azaouad sud

Elle est limitée au nord et au sud par les affleurements de schistes infracambriens plissés de la dorsale de l'Azaouad et du Gourma. Vers l'ouest, elle est en continuité hydraulique avec celle du Gourma nord-ouest. Un seuil d'érosion situé au niveau du substratum infracambrien réduit toutefois l'épaisseur de la nappe dans la zone de transition. A l'est, elle est en contact avec l'unité du fossé de Gao.

L'épaisseur du Continental terminal croît de l'ouest vers l'est et dépasse 300 m dans les compartiments déprimés. Les formations sont sablo-argileuses avec des horizons grésifiés, la partie inférieure des dépôts étant plus argileuse. Les séquences sableuses sont plus fréquentes et incluent des niveaux de sables grossiers et de graviers dans les compartiments où le Continental terminal est le plus épais [3.6].

Dans les terrasses alluviales bordant le Niger, le Quaternaire est représenté par des limons argileux et des lentilles sableuses. Son épaisseur est estimée à une vingtaine de mètres. Ces alluvions ne sont aquifères qu'en bordure du fleuve et s'intègrent alors au système aquifère multicouche à nappe libre du Continental terminal. Un horizon aquifère, peu productif, a été identifié localement dans la partie inférieure de la série.

Les niveaux statiques sont proches de la surface dans la frange des terrasses alluviales et s'approfondissent rapidement vers le nord et vers le sud pour atteindre près de 40 m en bordure de la dorsale de l'Azaouad et dépasser 80 m dans la zone de transition avec le fossé de Gao.

Les forages de débit inférieur à 1 m³/h sont rares, le taux de réussite moyen atteignant 91 %. Les forages peu productifs sont principalement localisés à l'ouest de Tombouctou où le Continental terminal est moins épais et plus argileux. Ailleurs, le débit moyen des forages productifs atteint 18 m³/h, 65 % des forages débitant plus de 10 m³/h et 7 % plus de 50 m³/h. Les débits les plus élevés sont rencontrés dans la plaine alluviale du Niger et dans les compartiments où l'épaisseur cumulée des horizons sableux aquifères est la plus forte.

3.3.4.3. Unité du fossé de Gao

Elle s'étend sur la majeure partie du détroit soudanais et sur le flanc sud-est de l'Adrar des Iforas. Dans le secteur du fossé de Gao, le Continental terminal est très épais d'après des études géophysiques. Il comble un compartiment effondré de l'Infracambrien plissé et métamorphisé. Sur les flancs ouest et sud de l'Adrar, son épaisseur se réduit progressivement de 200 m à moins de 30 m et il repose sur les couches de l'Eocène inférieur.

Les faciès lithologiques sont essentiellement argileux dans le secteur du fossé de Gao. En bordure de l'Adrar, des niveaux de sables, de sables argileux et de grès à oolithes ferrugineuses ainsi que des horizons de lignite sont interstratifiés dans les séries argileuses.

Les horizons aquifères, associés aux lentilles sableuses, sont d'épaisseur très variable. Leur interconnection hydraulique dépend de l'épaisseur et de la continuité des séries argileuses encaissantes. Au sud de l'Adrar, les caractéristiques hydrochimiques des eaux du Continental terminal sembleraient indiquer l'existence de transferts en provenance de l'aquifère du Crétacé supérieur / Eocène inférieur (*Voir chapitre 6*).

Les valeurs statistiques calculées à partir des données de forage ne sont pas réellement représentatives des conditions hydrogéologiques moyennes de cette unité. Les forages, dans leur majorité, ont en effet été réalisés dans une bande d'une vingtaine de kilomètres de large le long du fleuve Niger où les conditions hydrogéologiques sont les plus favorables du fait de l'influence des eaux de surface. Cela explique la faible profondeur moyenne des niveaux statiques qui est de 28 m et les débits relativement élevés des forages qui sont de 8,8 m³/h en moyenne avec 42 % des forages débitant plus de 10 m³/h. Des débits supérieurs à 20 m³/h ne sont rencontrés qu'à proximité du fleuve.

Dans les autres secteurs les niveaux d'eau sont profonds, supérieurs à 50 m, et les débits n'excèdent que rarement 5 m³/h.

3.3.4.4. Unité du Gourma nord-ouest

Cette unité couvre la partie aval du delta intérieur, à l'est d'une ligne Niafouké-Korientzé, ainsi que la bordure nord-ouest du Gourma où les alluvions anciennes sont recouvertes par des systèmes dunaires. Les surfaces temporairement inondées sont d'extension réduite sauf dans la zone des lacs de Bambara Maoundé.

L'épaisseur de l'aquifère est en général de quelques dizaines de mètres seulement en raison de la remontée du substratum infracambrien.

Dans le secteur lacustre, la granulométrie des dépôts est grossière avec des formations essentiellement sableuses comportant des niveaux à graviers de quartz. Des horizons latéritiques sont fréquemment intercalés dans la partie inférieure du Continental terminal. Vers l'est, en bordure du Gourma, les faciès deviennent plus argileux et les séquences latéritiques très épaisses.

La nappe, peu profonde, est à 6,9 m en moyenne sous le sol et en équilibre avec les plans d'eau de surface. Le taux de réussite des forages est de 88 %, inférieur cependant à la réalité car la plupart des forages abandonnés, décomptés comme négatifs, l'ont été pour des raisons techniques, certains horizons très productifs n'ayant pu être contrôlés lors de la foration à cause d'éboulements dans des sables aquifères non consolidés. Le débit moyen des forages atteint 23 m³/h et est le plus élevé de tous les aquifères du Mali, avec 60 % des forages débitant plus de 10 m³/h et près de 10 % des forages à plus de 50 m³/h.

3.3.4.5. La plaine du Gondo

Les formations du Continental Terminal et du Quaternaire de la plaine du Gondo ne contiennent pas de nappe généralisée, mais seulement des petites nappes perchées étagées entre 10 et 50 m de profondeur et localisées dans les niveaux sableux intercalés dans une série limono-argileuse. Les horizons aquifères sont de faible perméabilité et ne peuvent être exploités que par des ouvrages de grand diamètre (puits) avec des débits inférieurs à 0,5 m³/h. Ces nappes sont réalimentées par le ruissellement en bordure du plateau dogon et, localement, par des transferts en provenance de la nappe de fissures de l'Infracambrien. Les seuls forages productifs sont ceux qui exploitent des venues d'eau dans les calcaires infracambriens sous les formations continentales de la plaine.

3.4. AQUIFERES DU RECOUVREMENT OU AQUIFERES SUPERFICIELS

Des formations récentes, en général meubles ou peu consolidées, d'âge et d'origine variés, couvrent la majeure partie de la surface du Mali. Elles ont un rôle hydrogéologique important car elles constituent le premier réservoir interceptant les eaux d'infiltration générées par les précipitations et le ruissellement. Elles ne forment toutefois des aquifères exploitables que lorsqu'elles bénéficient d'une recharge périodique suffisante pour compenser les pertes importantes par évapotranspiration dûes à leur faible profondeur. Elles sont alimentées :

- soit, par infiltration directe dans les zones de pluviométrie supérieure à 400 mm : les nappes du recouvrement sont alors semi-continues;
- soit, par infiltration indirecte des eaux de ruissellement dans les zones nord-sahélienne et désertique : le ruissellement permet alors de concentrer sur une petite surface des pluies par ailleurs très faibles tombées sur un bassin versant beaucoup plus étendu et de dépasser ainsi le seuil d'infiltration les nappes du recouvrement sont alors locales.

La répartition régionale de ces deux types d'aquifère est représentée schématiquement dans la figure 3.1 au début de ce chapitre. Dans les zones dunaires et aréiques de l'Azaouad, le recouvrement sableux est stérile.

3.4.1. Aquifères semi-continus

Ils sont exclusivement localisés dans les régions bien arrosées de l'ouest et du sud du Mali où ils sont associés aux aquifères fissurés du socle et des grès infracambriens. Les nappes superficielles constituent, traditionnellement, la principale ressource en eau exploitée par les populations rurales, en raison de la faible profondeur des niveaux phréatiques et de la nature meuble des formations de recouvrement qui permettent un fonçage des puits de captage avec des moyens rudimentaires accessibles à ces populations.

Les aquifères superficiels sont constitués par les couvertures d'altération latéritique, en place ou remaniées, et par les dépôts alluviaux et colluviaux des fonds de vallée. Leur épaisseur croît assez régulièrement du nord vers le sud, de moins de 10 m à plus de 50 m, dans le même sens que le gradient pluviométrique. L'épaisseur maximale des altérites est rencontrée sur le socle de la zone de Bougouni où les précipitations annuelles dépassent 1.200 mm (*figure 3.10*). Ces aquifères superficiels à porosité intergranulaire sont en liaison hydraulique avec les aquifères de fissures qu'ils surmontent et dont ils contrôlent à la fois la recharge et la vidange et pour lesquels ils constituent une couche-réservoir régulatrice des écoulements.

Leurs caractéristiques hydrauliques dépendent de la lithologie du substratum ainsi que des conditions pluviométriques et géomorphologiques.

3.4.1.1. Recouvrement sur socle (*figure 3.11a*)

Les altérites sur les unités du socle de Bougouni et de Kéniéba sont épaisses de 20 m à plus de 50 m et en grande partie saturées, les niveaux phréatiques étant en général situés à moins de 10 m, même en fin de saison sèche. Du point de vue hydrogéologique, elles peuvent se schématiser en trois zones superposées avec :

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

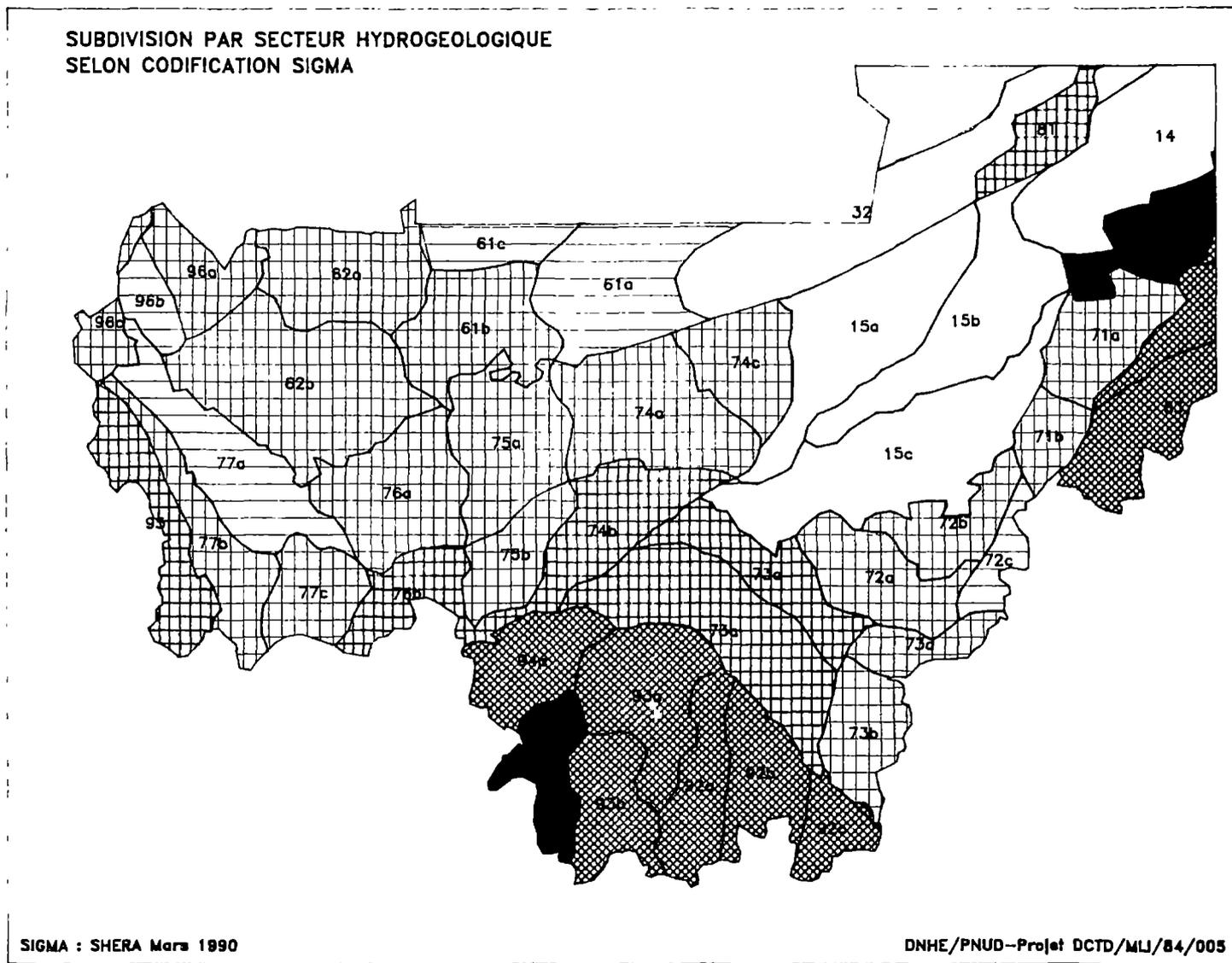
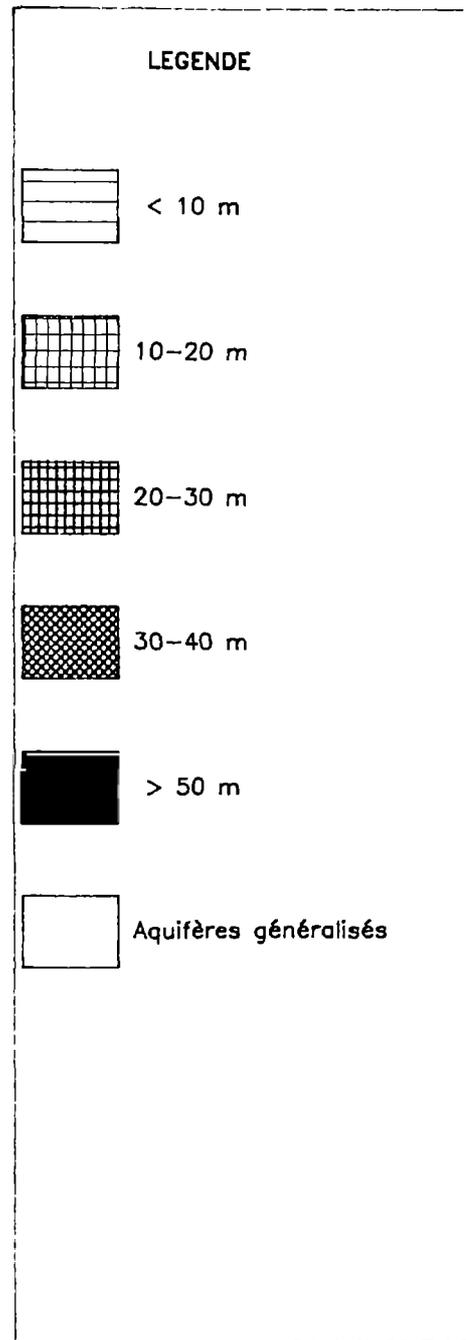


Fig. 3.10

EPAISSEUR MOYENNE DU RECOUVREMENT SUR LES AQUIFERES FISSURES

- une couche aquifère supérieure qui correspond aux horizons latéritiques cuirassés et pisolithiques bénéficiant d'une bonne perméabilité verticale et horizontale,
- une couche peu perméable constituée d'une épaisse séquence d'arènes argileuses,
- une couche aquifère inférieure représentée par des arènes de granulométrie variable et par la frange supérieure fracturée et altérée du socle qui constitue une zone de transition avec le milieu fissuré profond. L'épaisseur de cette couche sont très irrégulières et la perméabilité et dépendent du contexte géomorphologique et de la composition pétrographique et minéralogique des roches constituant le substratum.

Les niveaux les plus perméables de la couche aquifère supérieure ne sont généralement en eau que durant l'hivernage, d'abord d'une manière épisodique en interceptant les eaux d'infiltration dans la zone dénoyée en début d'hivernage, puis d'une façon plus continue après la saturation des horizons sous-jacents. En raison d'une perméabilité horizontale beaucoup plus importante que la perméabilité verticale des arènes argileuses sous-jacentes, cette couche aquifère superficielle va favoriser l'évacuation, par écoulement latéral, d'une partie des eaux d'infiltration sous la forme d'un ruissellement différé collecté ensuite par le réseau hydrographique. Cet horizon perméable supérieur joue, en quelque sorte, le rôle d'un trop-plein pour le système aquifère.

La couche aquifère inférieure et l'aquifère fissuré ne sont rechargés que par une fraction de l'infiltration générée par les pluies. Cette recharge se fait de façon diffuse par transfert interstitiel dans les arènes argileuses et par circulations préférentielles dans des réseaux de fines diaclases et dans les filons résiduels fracturés au sein des altérites.

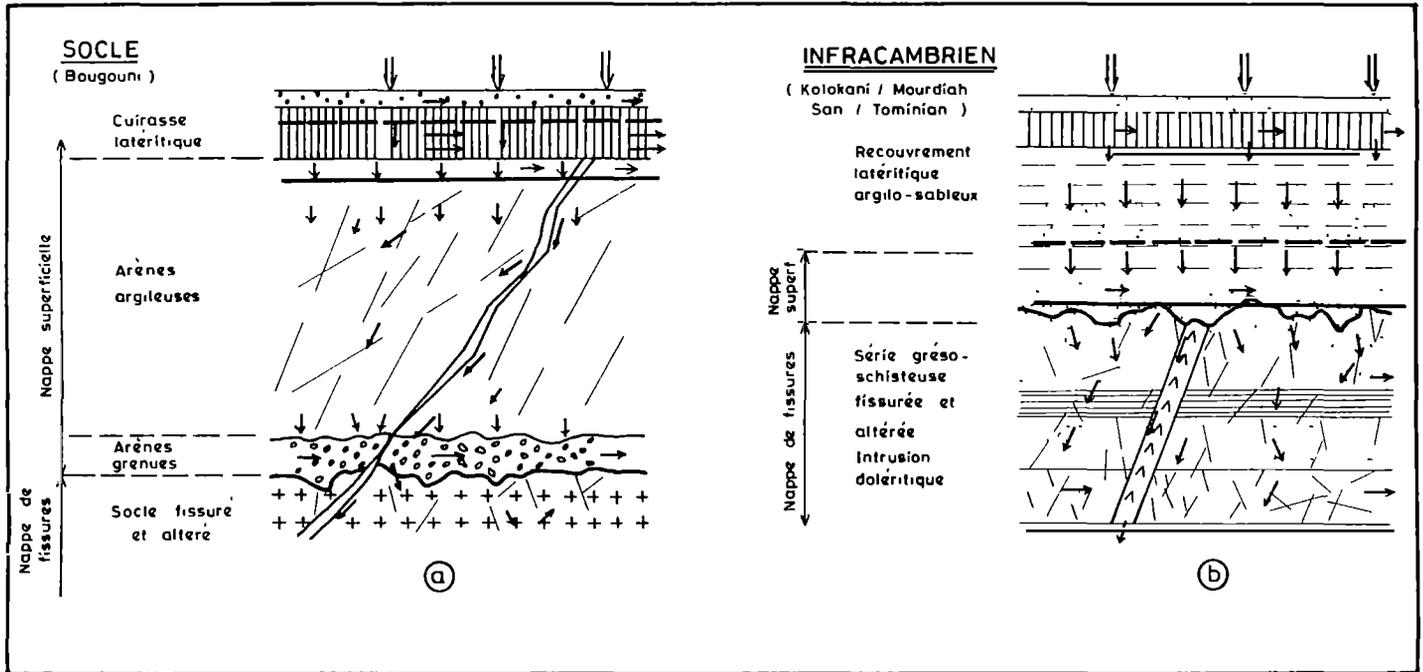
3.4.1.2. Recouvrement sur grès infracambriens (figure 3.11b)

Les formations d'altération qui recouvrent les plateaux gréseux soudano-sahéliens sont moins épaisses, 10 à 20 m en moyenne, que sur le socle. Elles sont aussi plus perméables du fait d'une fraction sableuse résiduelle importante et d'une perméabilité secondaire liée à l'activité biologique développée sur toute la hauteur des profils d'altération.

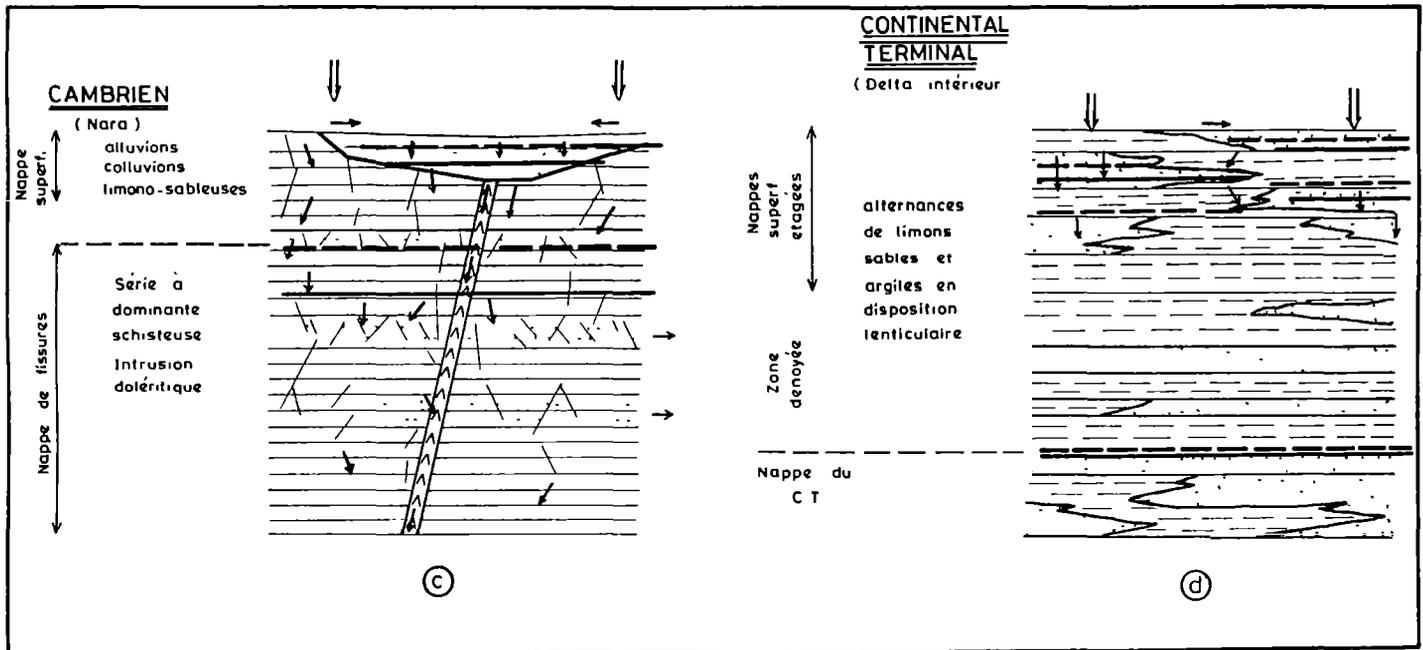
Les perméabilités verticales des différents horizons étant relativement peu contrastées, les eaux d'infiltration percolent rapidement vers la base du recouvrement et vers le milieu fissuré. La fraction des eaux de recharge s'écoulant latéralement dans le recouvrement sous forme de ruissellement hypodermique est en général réduite et fonction des conditions géomorphologiques et lithologiques locales. Elle dépend notamment de la position de l'horizon cuirassé ou de latérite gravillonnaire par rapport à la zone de battement de la nappe ainsi que de la nature, gréseuse ou schisteuse, des formations infracambriennes puisque celles-ci conditionnent l'importance de la matrice argileuse dans les altérites.

L'épaisseur de la nappe superficielle varie suivant sa position morphologique. Les formations latéritiques anciennes qui reposent sur les plateaux, sont en général dénoyées, de même que sur les parties hautes des versants où les grès sont d'ailleurs souvent affleurants. A mi-versant, seule la couche inférieure des altérites est saturée, le niveau de la nappe se stabilisant en fin de saison sèche à proximité du contact avec le substratum ou dans sa frange altérée. C'est dans les fonds de vallée que l'épaisseur saturée est la plus grande, les niveaux phréatiques étant proches de la surface.

AQUIFERES DU RECOUVREMENT SEMI-CONTINUS (Zones climatiques soudano-sahélienne)



AQUIFERES DU RECOUVREMENT DISCONTINU (Zones climatiques sahélienne et désertique)



↓ → Ecoulement par voie préférentielle
 ↓ → Ecoulement interstitiel dominant

— — — — — Surface piézométrique durant l'hivernage
 — — — — — Surface piézométrique en fin de saison sèche

Fig 3.11 - Schémas hydrogéologiques types des aquifères de recouvrement

3.4.2. Aquifères discontinus

Ils sont représentés dans les zones sahéliennes et désertiques du nord et de l'est du Mali. Leur extension, toujours limitée, et l'épaisseur des nappes qu'ils contiennent, varient suivant la nature des formations de couverture et du substratum sous-jacent et en fonction de la topographie et de la pluviométrie locales. Les nappes sont en général en situation perchée par rapport à celles des aquifères sous-jacents.

3.4.2.1. Recouvrement sur aquifères fissurés (figure 3.11c)

Les aquifères des schistes cambriens, de l'Infracambrien plissé du Gourma et du socle de l'Adrar de Iforas sont surmontées par des petites nappes superficielles localisées dans les alluvions de fond de vallée et dans les zones topographiquement basses où des placages d'altérites ont été préservés par l'érosion. Les nappes superficielles sont situées dans les secteurs où le réseau hydrographique est encore fonctionnel, même si c'est de manière épisodique. L'essentiel de leur recharge se fait par l'infiltration des eaux de ruissellement. Ces nappes ont en général une épaisseur faible, de quelques mètres à une quinzaine de mètres, avec des variations saisonnières importantes de leur niveau statique. Elles sont très sensibles aux fluctuations climatiques en raison de leur faibles réserves.

Leur vidange se fait principalement par évapotranspiration. Les pertes par percolation profonde ne sont toutefois pas négligeables et peuvent contribuer d'une manière significative à la recharge des aquifères fissurés sous-jacents. C'est notamment le cas de l'aquifère du Cambrien où la nappe de fissures, en général peu profonde, est en semi-continuité hydraulique avec l'aquifère superficiel. Ce phénomène est favorisé par le fait que le réseau hydrographique (et donc les nappes alluviales) s'est localisé préférentiellement dans les zones fracturées et filoniennes du substratum.

3.4.2.2. Recouvrement sur aquifères généralisés (figure 3.11d)

Les alluvions anciennes limono-sableuses ou argileuses qui recouvrent les formations du Continental terminal dans le secteur du delta mort du fleuve Niger ne sont aquifères que localement. Ils contiennent, ainsi que la partie supérieure dénoyée du Continental terminal, des petites nappes perchées et étagées en profondeur. Elles sont associées aux lits et aux lentilles de sables interstratifiés dans des couches de limons argileux. Elles interceptent la quasi totalité de l'infiltration générée par les pluies et le ruissellement local.

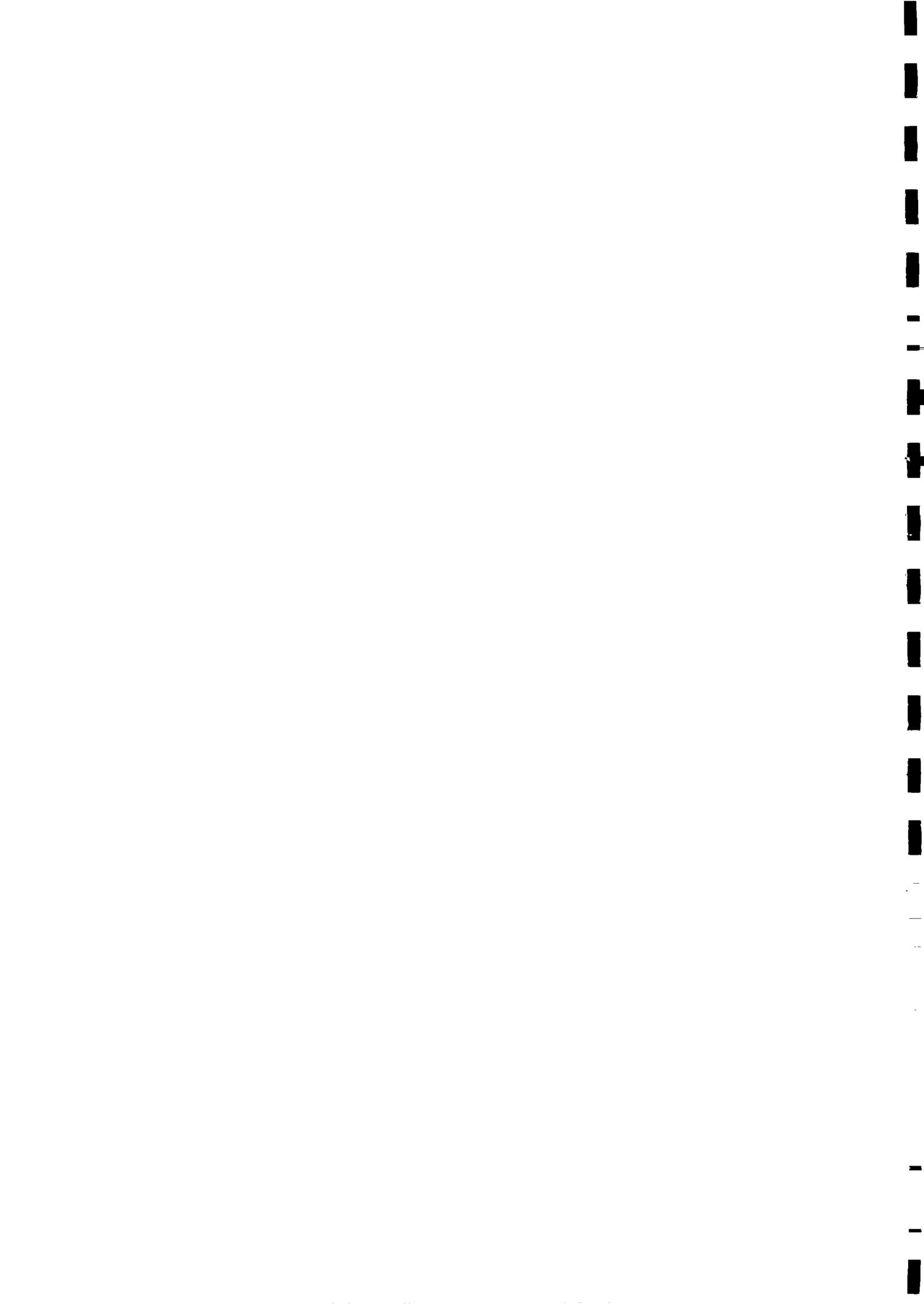
Les réserves de ces nappes perchées, mal réalimentées durant la période de sécheresse de la dernière décennie, se sont en grande partie épuisées comme en témoignent les forêts d'arbres morts rongées par les termites dans la zone de Niono et dans le Mema Dioura.

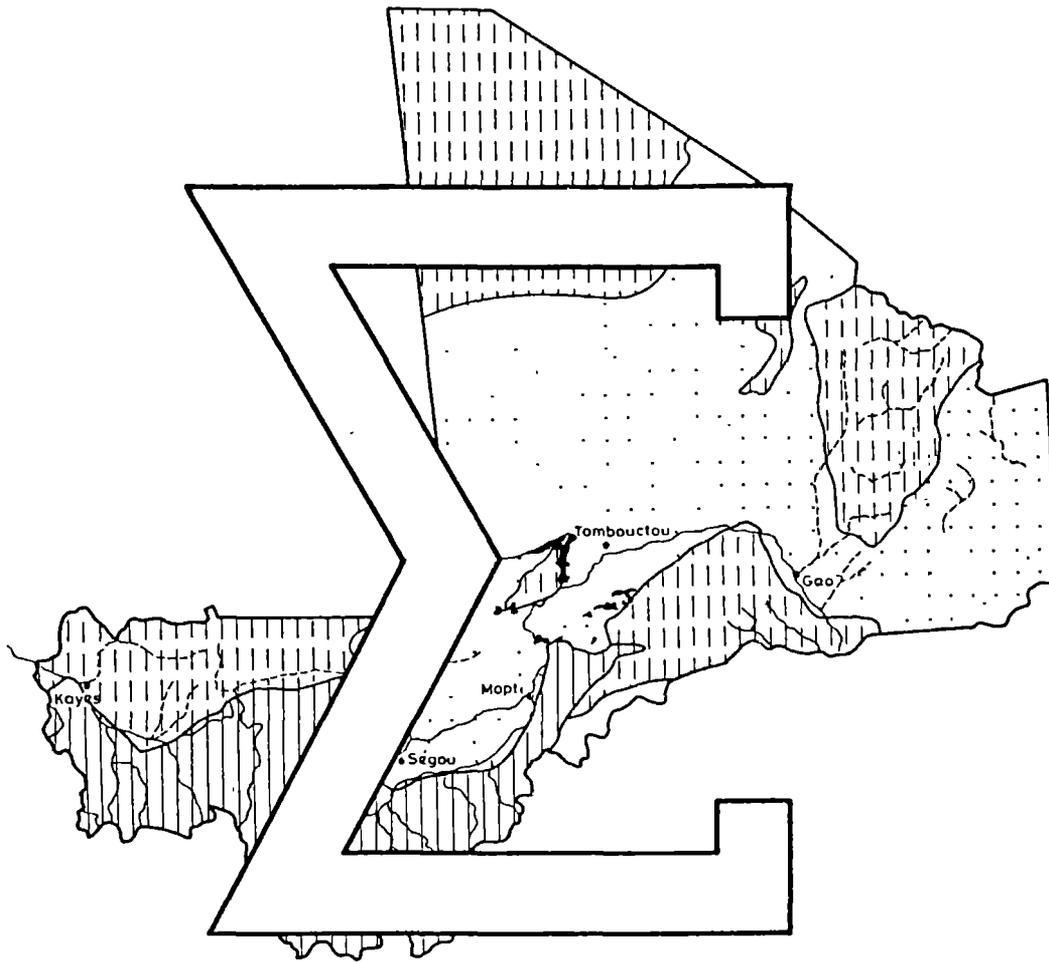
Le même dispositif de petites nappes perchées se rencontre dans les formations continentales de la plaine du Gondo.

CHAPITRE 3

Références bibliographiques hors-projet

- [3.1] - Projet MLI/74/001 - Rapport final - PNUD/DCTD - 1976
- [3.2] - BRGM/BURGEAP - Programme CEAO d'hydraulique villageoise et pastorale dans les 1ères et 2ème Régions - Rapport de fin de travaux (1983-1986) - 1986
- [3.3] - Société LAMBERT HYDROGEO Canada - Projet de développement rural intégré du Kaarta (ODIK), phase II - Rapport technique - ACDI - 1988
- [3.4] - Projet MLI/80/005 - "Route du Sel" - phase 1 - Rapport de synthèse - B.E.R.H.I International - 1984
- [3.5] - Rapport MLI/67/502 - Rapport final - PNUD/DCTD - 1975
- [3.6] - Projets PNUD/DCTD "Route du Sel" MLI/80/005 et MLI/84/027 - Rapport final - 1989

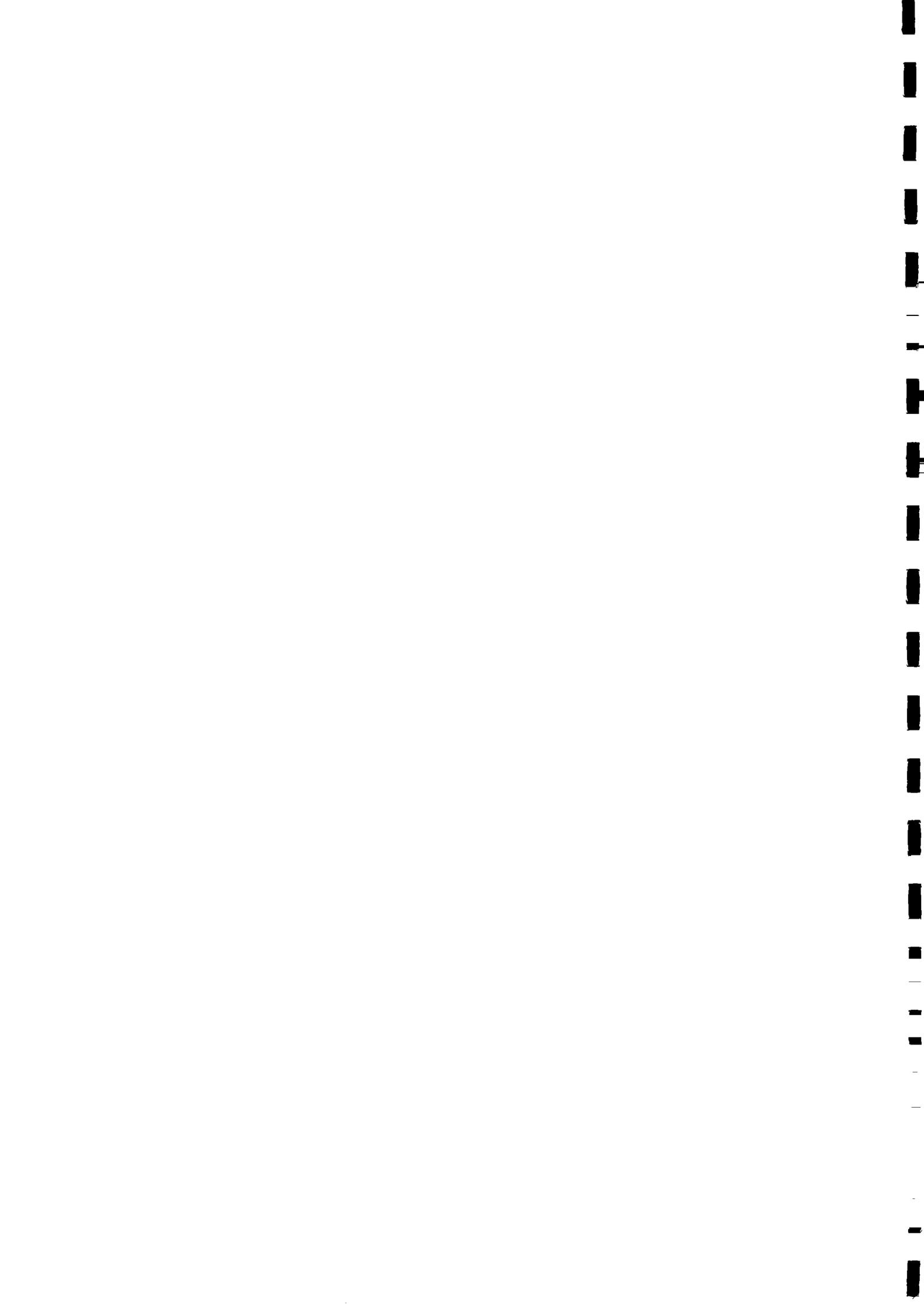




SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES PIEZOMETRIQUES



CHAPITRE 4

TABLE DES MATIERES

TEXTE

4.1. ORIGINE, MODE D'ACQUISITION ET PRECISION DES DONNEES.....	1
4.1.1. Piézométrie régionale.....	1
4.1.2. Historiques piézométriques.....	1
4.1.2.1. Réseau d'observation.....	1
4.1.2.2. Méthode et qualité des mesures.....	4
4.2. CARTE PIEZOMETRIQUE DU MALI.....	5
4.2.1. Modalités d'établissement.....	5
4.2.1.1. Données de base.....	5
4.2.1.2. Hypothèses retenues pour le tracé de la carte.....	5
4.2.1.3. Echelles de préparation de la carte.....	7
4.2.2. Facteurs contrôlant la piézométrie régionale.....	7
4.2.2.1. Topographie.....	7
4.2.2.2. Pluviométrie.....	9
4.2.2.3. Géologie.....	10
4.2.2.4. Relation avec les eaux de surface.....	10
4.3. PRINCIPALES DEPRESSIONS PIEZOMETRIQUES.....	13
4.4. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES.....	15
4.4.1. Données disponibles et méthode d'interprétation.....	15
4.4.2. Aquifères fissurés.....	16
4.4.2.1. Types de fluctuations saisonnières.....	16
4.4.2.2. Amplitude des fluctuations saisonnières.....	18
4.4.2.3. Estimation de l'infiltration.....	20
4.4.2.4. Fluctuations piézométriques annuelles.....	22
4.4.2.5. Fluctuations piézométriques interannuelles.....	24
4.4.2.6. Evolution piézométrique en régime d'exploitation....	25
4.4.3. Aquifères généralisés.....	28
4.4.3.1. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire du delta intérieur.....	28
4.4.3.2. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire de l'Azaouad sud.....	32
4.4.3.3. Autres aquifères généralisés.....	32
4.5. CONCLUSION.....	33
BIBLIOGRAPHIE.....	34

FIGURES

Fig.4.1.	Réseau d'observation piézométrique.....	2
Fig.4.2.	Tableau d'assemblage des cartes de base et exemple de carte piézométrique.....	6
Fig.4.3.	Piézométrie régionale.....	8
Fig.4.4.	Relations eau souterraine/eau de surface.....	11
Fig.4.5.	Dépressions piézométriques régionales.....	14
Fig.4.6.	Exemples d'hydrogrammes piézométriques dans les aquifères fissurés : a) aquifère de l'Infracambrien tabulaire, b) aquifère du socle.....	17
Fig.4.7.	Histogrammes des amplitudes de fluctuation piézométrique saisonnière dans les aquifères fissurés : a) données globales, b) par aquifère, c) par tranche pluviométrique, d) par tranche du niveau statique.....	19
Fig.4.8.	Relation entre l'infiltration régionale et la pluie annuelle (aquifères fissurés).....	21
Fig.4.9.	Relation entre l'infiltration régionale et la profondeur moyenne de nappe (aquifères fissurés).....	21
Fig.4.10.	Histogrammes des amplitudes de fluctuation piézométrique annuelle des niveaux d'étiage des aquifères fissurés : a) données globales, b) par aquifère, c) par tranche pluviométrique, d) par tranche de profondeur de niveau statique.....	23
Fig.4.11.	Exemples d'évolution piézométrique des sites équipés de pompe solaire exploitant l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire : a) Madina Kagoro, b) Tioribougou, c) Nossombougou d) Karadié.....	27
Fig.4.12.	Coupe hydrogéologique schématique de la bordure occidentale du Delta intérieur du Niger.....	29
Fig.4.13.	Hydrogrammes piézométriques caractéristiques des différents secteurs hydrogéologiques du Delta intérieur du Niger : a) Delta fossile, b) Delta actif.....	29
Fig.4.14.	Variations des amplitudes de fluctuation piézométrique en fonction de la profondeur de la nappe et de la distance au delta vif.	31

TABLEAUX

Tab.4.1.	Répartition des sites d'observation et des piézomètres par aquifère.....	3
Tab.4.2.	Répartition des sites d'observation selon différents facteurs influençant la piézométrie.....	4

CHAPITRE 4

CARACTERISTIQUES PIEZOMETRIQUES

4.1. ORIGINE, MODE D'ACQUISITION ET PRECISION DES DONNEES

La piézométrie est une donnée fondamentale de l'étude des aquifères, notamment pour l'établissement de leur bilan hydrologique, car elle régit les transferts hydrauliques et permet de déterminer les réserves des aquifères et le taux de renouvellement de ces réserves. Elle doit être connue dans l'espace pour pouvoir tracer la carte de la surface piézométrique des nappes et visualiser ainsi les axes d'écoulement souterrain et de partage des eaux et dans le temps pour pouvoir estimer les ressources renouvelables et mesurer les effets de l'exploitation par l'interprétation de ses variations. Par ailleurs, un suivi piézométrique continu est un moyen efficace pour parvenir à une gestion optimale des réserves en vue d'une exploitation à long terme.

4.1.1. Piézométrie régionale

Les données utilisées proviennent, pour l'essentiel, de mesures de profondeur du niveau d'eau effectuées dans les forages, en fin de foration, avant les pompages d'essai ou lors de la mise en place ou du retrait des pompes, c'est-à-dire lorsqu'on se trouve dans des conditions statiques du niveau d'eau. Dans plusieurs secteurs des aquifères généralisés de l'est du Mali, les données piézométriques des forages étant trop peu nombreuses, elles ont été complétées par des mesures de niveau sur des puits pastoraux ou villageois effectuées lors des campagnes d'inventaire.

La précision de ces données est variable du fait de la multiplicité de leur origine. Les repères de mesure sont rarement mentionnés et leur altitude doit être extrapolée à partir des courbes de niveau des cartes topographiques. Les niveaux mesurés dans les puits correspondent rarement à des conditions statiques.

Toutefois, la principale difficulté pour l'établissement des cartes piézométriques provient de l'étalement dans le temps des mesures, et donc de l'absence d'une courte période de référence commune à un nombre suffisant de mesures, notamment pour les aquifères fissurés à ressources renouvelables où les fluctuations saisonnières et annuelles des nappes sont importantes. Ces données piézométriques sont donc, en général, impropres à des études locales, mais elles permettent, par contre, de décrire d'une manière satisfaisante l'allure de la piézométrie à l'échelle régionale et d'identifier ainsi les facteurs qui la contrôlent.

4.1.2. Historiques piézométriques

4.1.2.1. Réseau d'observation

Ce réseau comprend, fin 1989, 70 sites d'observation équipés de 210 piézomètres constitués par 88 forages et 122 puits (*figure 4.1*) [HDG/NTL/7].

Il a été progressivement mis en place, à partir de 1981, par la DNHE avec l'aide des projets PNUD/DCTD et la participation de plusieurs projets d'hydraulique villageoise (Helvetas, Mali Aqua Viva, KBK, Caritas notamment).

RESEAU DES SITES DE MESURE DANS LES SECTEURS D'OBSERVATION

LEGENDE

-  Zone piézométrique haute
-  Zone de nappes discontinues généralement peu profonde
-  Zone piézométrique déprimée
-  Zone influencée par l'infiltration des eaux de surface
-  Limite de la dépression piézométrique centrale du Mali
-  Limite de zone déprimée

SECTEUR PNUD

Madina Kagoro	L, OL	Dilly	OL
Kossaba	OL	Demba Diawara	OL
Tinéguebougou	OL	Kolokani	OL
Dialakoro	OL	Taman Bassala	L, OL
Sirakoroba	OL	Nassombougou	L, OL
Tieribougou	L, OL	Karadié	L, OL

SECTEUR HELVETAS

Zambougou	OL	Bekossekoura	OL
Damana	OL	Yanfella	OL
Sokourani	OL	Kola	OL
Garala	OL	Gouala	OL
Dionkala	OL	Kolassokoro	OL
Faraba	OL	Banantoumou	OL
Bougouni	OL	Damba	OL
Sakoro	OL	Gouha	OL
Kolassokoura	OL	Diban	OL
Kolondieba	L, OL	Kologo	OL
Kelaya	OL		

SECTEUR MALI AQUA VIVA

San	L	Kamagasso	L
Yorosso	L	Manara	L

SECTEUR PNUD / BID

Garadi	L	Soala	L
Oulato	L	Pouli	L
Diguissire	L	Doungoura	L
Gnimignama	L	Sanongo	L
Ganla	L	Kadiat	L

Type de mesure piézométrique

L Limnigraphe

OL Observateur local

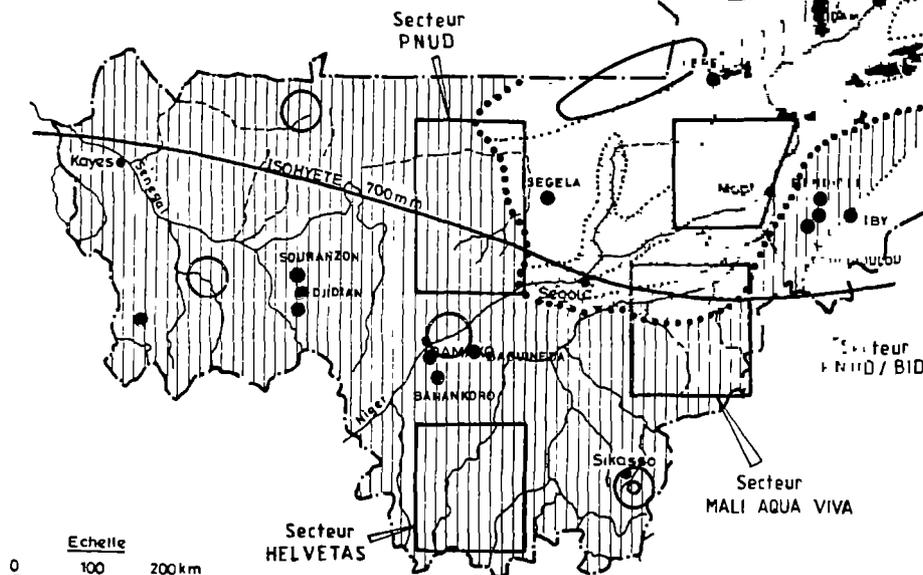
 Secteur d'observation piézométrique

 Site d'observation fonctionnel en 1988

 Nouveau secteur d'observation (1989/90)

Fig. 4 1

RESEAU D'OBSERVATION PIEZOMETRIQUE



Jusqu'en 1985, ce réseau concernait exclusivement les aquifères fissurés de l'ouest du Mali et les aquifères d'altérites qui leur sont associées. Il était d'abord destiné à étudier le régime naturel de fluctuation des nappes puis, à partir de 1983, à évaluer les effets d'exploitations locales à débit élevé (pompes solaires).

Après 1985, le réseau a été étendu aux aquifères généralisés d'une part dans des secteurs influencés par les eaux de surface, d'autre part dans les zones de dépression piézométrique.

De nouveaux sites d'observation sont en cours d'installation ou prévus dans les aquifères de l'est du Mali pour lesquels on ne dispose que de quelques mesures périodiques sur des forages proches de Gao ainsi que pour compléter le réseau sur les aquifères fissurés (projet Coopération Italienne).

Tableau 4.1 - Répartition des sites d'observation et des piézomètres par aquifère

Aquifère	Code de l'unité hydrogéologique	Nombre de sites	Nombre de piézomètres
Socle Birrimien	93 - 92	24	28
Infracambrien	74	16	26
	75	3	3
	71 - 72	12	21
Cambrien	61	2	6
Continental intercalaire	32	1	1
Continental terminal/ Quaternaire	15	10	12
	13	2	4
Recouvrement	0	33 (1)	109

- (1) Les sites d'observation sur les nappes superficielles ne sont pas à additionner car ils sont tous également des sites d'observation des aquifères fissurés sous-jacents.

La sélection des sites a été faite, mise à part leur accessibilité, de manière à ce que soient représentés les principaux contextes pluviométriques et hydrogéologiques du Mali.

Des réseaux locaux d'observation de 3 à 8 piézomètres ont été mis en place sur plusieurs sites d'aquifères fissurés afin de définir plus précisément les variations, à l'échelle locale, de l'amplitude des fluctuations saisonnières du niveau piézométrique et, également, sur les sites équipés de pompe solaire pour déterminer l'extension et l'évolution piézométrique de la zone influencée par le pompage.

Tableau 4.2 - Répartition des sites d'observation selon différents facteurs influençant la piézométrie

Zone pluviométrique

Pluviométrie (mm/an)	Nombre de sites
1100-1300	20
800-1000	16
500-800	24
200-500	8
200	2

Profondeur du niveau statique (NS)

Profondeur NS (m)	Nombre de sites
<10	35
10-20	27
20-30	2
30-40	2
>40	4

Exploitation

Régime	Nombre de sites
Régime naturel ou peu influencé	59
Régime influencé	11

Eaux de surface

Type d'eau de surface	Nombre de sites
Zone d'inondation temporaire	7
Retenues collinaires	2

4.1.2.2. Méthode et qualité des mesures

Au début du suivi piézométrique, les mesures ont été effectuées au cours de tournées mensuelles par des hydrogéologues de la DNHE.

A partir de 1983, l'extension du réseau et la dispersion des sites ainsi que la nécessité d'avoir des mesures plus fréquentes durant l'hivernage afin de mieux suivre la remontée des nappes, ont amené à recruter des observateurs permanents, rémunérés, sur la majorité des sites. Ils sont chargés durant la saison des pluies de faire des mesures journalières sur les forages piézométriques et bi-journalières sur les puits (matin et soir) afin de corriger les erreurs de niveau dues aux prélèvements. En saison sèche, la fréquence est ramenée à 2 ou 3 mesures par semaine.

Les appareils de mesure sont des dispositifs simples : sonde à sifflet ou double-décamètre à flotteur. L'hydrogéologue de la DNHE qui collecte les fiches de mesures à la fin de chaque mois, effectue aussi des mesures de contrôle sur tous les points d'observation. En général, les différences de niveau avec les mesures faites par les observateurs locaux sont inférieures à 5 cm et toujours dans le même sens.

Des limnigraphes ont été installés sur 23 des 210 piézomètres dans des sites où l'exploitation des aquifères fissurés était importante ainsi que dans le delta intérieur où les conditions d'accès sont difficiles durant l'hivernage et la période de crue du Niger.

Dans les zones désertiques de la Région de Tombouctou, les mesures de niveau se font d'une manière épisodique.

Des pluviomètres suivis également par les observateurs ont été installés sur de nombreux sites d'observation afin de disposer de l'historique de la pluie pour l'analyse des données piézométriques.

4.2. CARTE PIEZOMETRIQUE DU MALI

4.2.1. Modalités d'établissement

4.2.1.1. Données de base

Le tracé de la carte piézométrique synthétique pour un pays aussi vaste que le Mali avec des contextes hydrogéologiques variés et sur la base des données piézométriques de précision inégale et étalées dans le temps, a dû faire appel à un certain nombre d'approximations et d'hypothèses simplificatrices qui ne rendent cette carte significative qu'à l'échelle régionale.

La carte a été établie à partir des mesures de niveau sur environ 8.000 points d'eau dont près de 6.500 forages et 1.500 puits pastoraux et villageois. Les données provenant des forages ont été utilisées en priorité et lorsque leur densité était insuffisante, elles ont été complétées par les mesures sur les puits profonds (aquifères généralisés des Régions de Gao et de Tombouctou) ou sur des puits villageois (aquifère du Continental terminal du delta intérieur).

Toutes les mesures utilisées ont été prises entre 1980 et 1987 c'est-à-dire durant une période de déficit pluviométrique. Elles ont été collectées durant les campagnes de travaux et donc en dehors des périodes d'hivernage, c'est-à-dire au cours de la période où les nappes atteignent leur plus bas niveau.

Pour les aquifères fissurés à ressources renouvelables, le suivi piézométrique sur le réseau d'observation montre que l'erreur maximale due à la non concordance des dates de mesure est de l'ordre de 8 m dont 3 m provenant des variations interannuelles du niveau des nappes et 5 m dûs aux fluctuations saisonnières. Elle est inférieure à 1 m pour les aquifères généralisés. Lorsqu'il n'y a pas de point côté, l'erreur maximale sur l'altitude des repères de mesure est inférieure à 5 m dans les zones de plaine et à 10 m dans les zones de plateau.

Pour diminuer l'effet de l'imprécision des données, les courbes isopièzes ont été tracées avec une équidistance de 40 m dans les zones de plateau et de 20 m dans les zones de plaine.

4.2.1.2. Hypothèses retenues pour le tracé de la carte

Elles dépendent du type d'aquifère :

- pour les aquifères fissurés, les isopièzes sont tracées en continu même dans les secteurs où la nappe est nettement compartimentée (aquifères de l'Infracambrien plissé et du Cambrien). Par ailleurs, il a été considéré que le niveau de la nappe superficielle et celui de la nappe de fissures sous-jacente pouvaient être confondus, les aquifères superficiels et fissurés étant généralement en liaison hydraulique. Les mesures de niveau sur les forages ont ainsi pu être complétées par celles effectuées sur les puits pour les systèmes aquifères du socle et de l'Infracambrien tabulaire;
- pour les aquifères généralisés, dans les rares cas où il existe plusieurs horizons aquifères ayant des charges hydrauliques différentes, on a adopté le niveau piézométrique de l'horizon le plus productif.

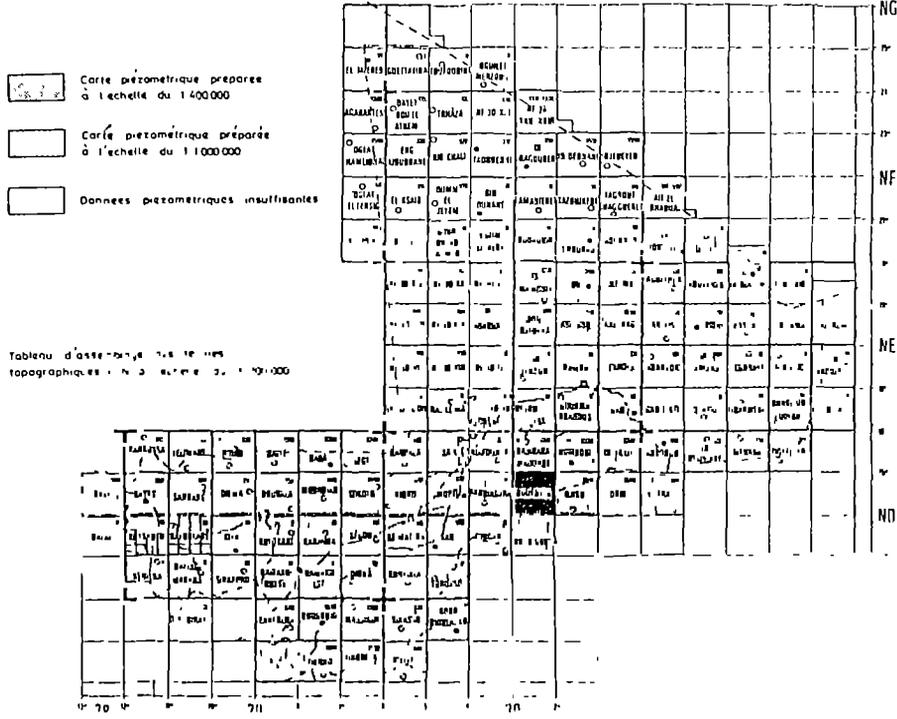
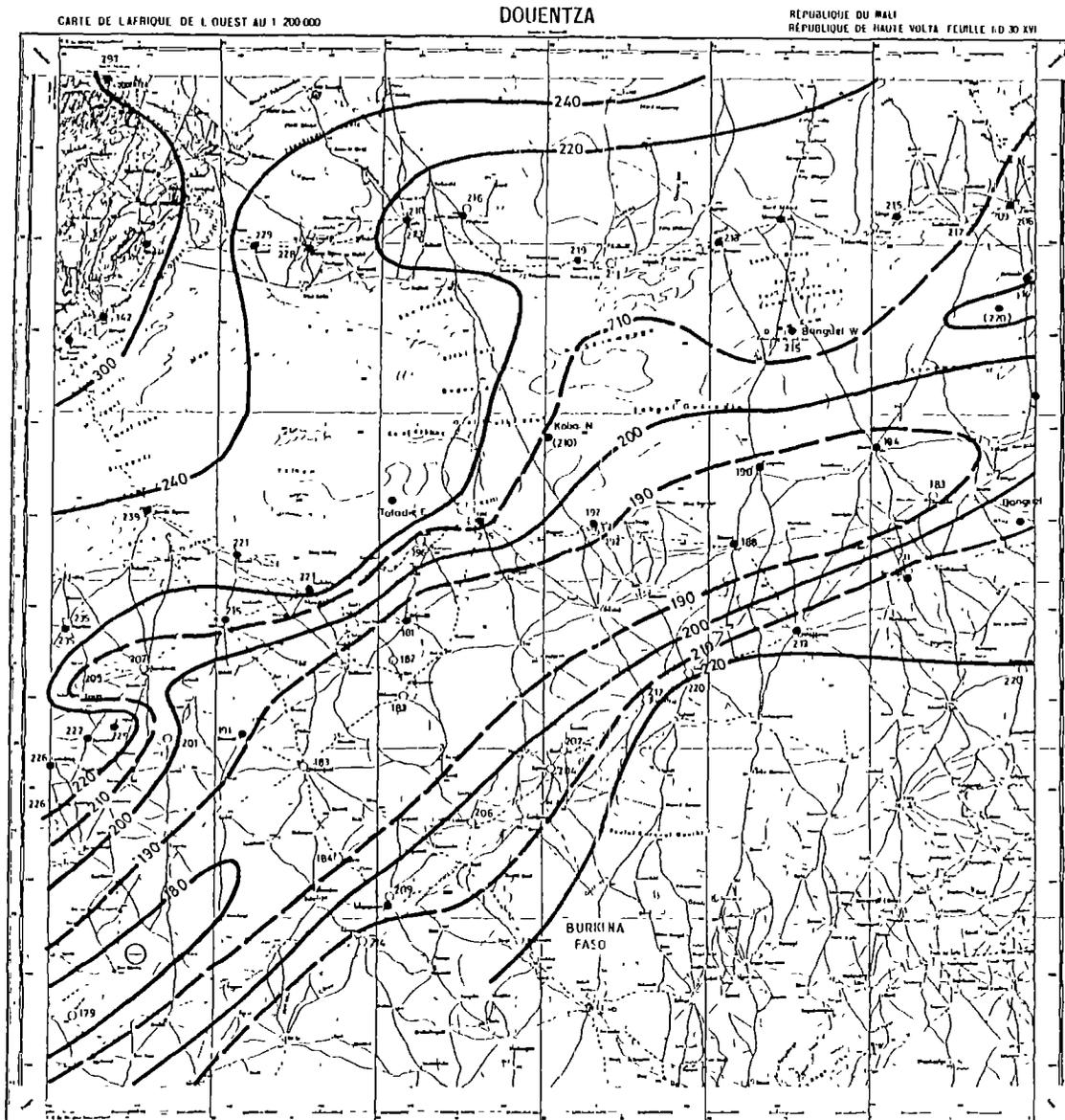


Fig 4 2 _Tableau d'assemblage des cartes de base et exemple de carte piézométrique

4.2.1.3. Echelles de préparation de la carte

Les cartes de base ayant servi à l'élaboration de la carte de synthèse ont été établies à deux échelles différentes en fonction de la densité des données piézométriques disponibles :

- pour les régions de l'ouest et du centre du Mali où est située la majorité des forages, le tracé des isopièzes a été fait sur un fond topographique à l'échelle du 1:400.000 obtenu par réduction photographique des coupures topographiques IGN au 1:200.000. Au total, 53 feuilles ont été préparées couvrant 620.000 km² soit la moitié de la superficie du Mali. Un exemple de carte piézométrique établie à cette échelle est illustré par la figure 4.2 ainsi que le tableau d'assemblage des cartes préparées ;
- dans les régions sahéniennes et désertiques du nord et de l'est du Mali, les cartes piézométriques ont été préparées à l'échelle du 1:1.000.000 (IGN) en raison, d'une part de la faible densité des points de mesure, d'autre part de la régularité de la surface piézométrique des aquifères généralisés. Toutefois, les courbes isopièzes n'ont été tracées que dans les zones disposant d'un minimum de points de mesure où l'altitude de référence restait dans les normes de précision décrites ci-dessus.

La carte piézométrique de synthèse a été éditée à l'échelle 1/2.500.000 dans le rapport [HDG/NTL/8]. La figure 4.3 ci-après présente une version simplifiée de cette carte montrant les zones hautes et les zones déprimées de la surface piézométrique, à l'échelle régionale.

4.2.2. Facteurs contrôlant la piézométrie régionale

Le modèle piézométrique régional met en évidence l'influence de quatre facteurs principaux : la topographie, la pluviométrie, la géologie et la relation avec les eaux de surface. Suivant le type d'aquifère et les zones géographiques, un facteur peut être dominant ou plusieurs peuvent se combiner de façon cumulative.

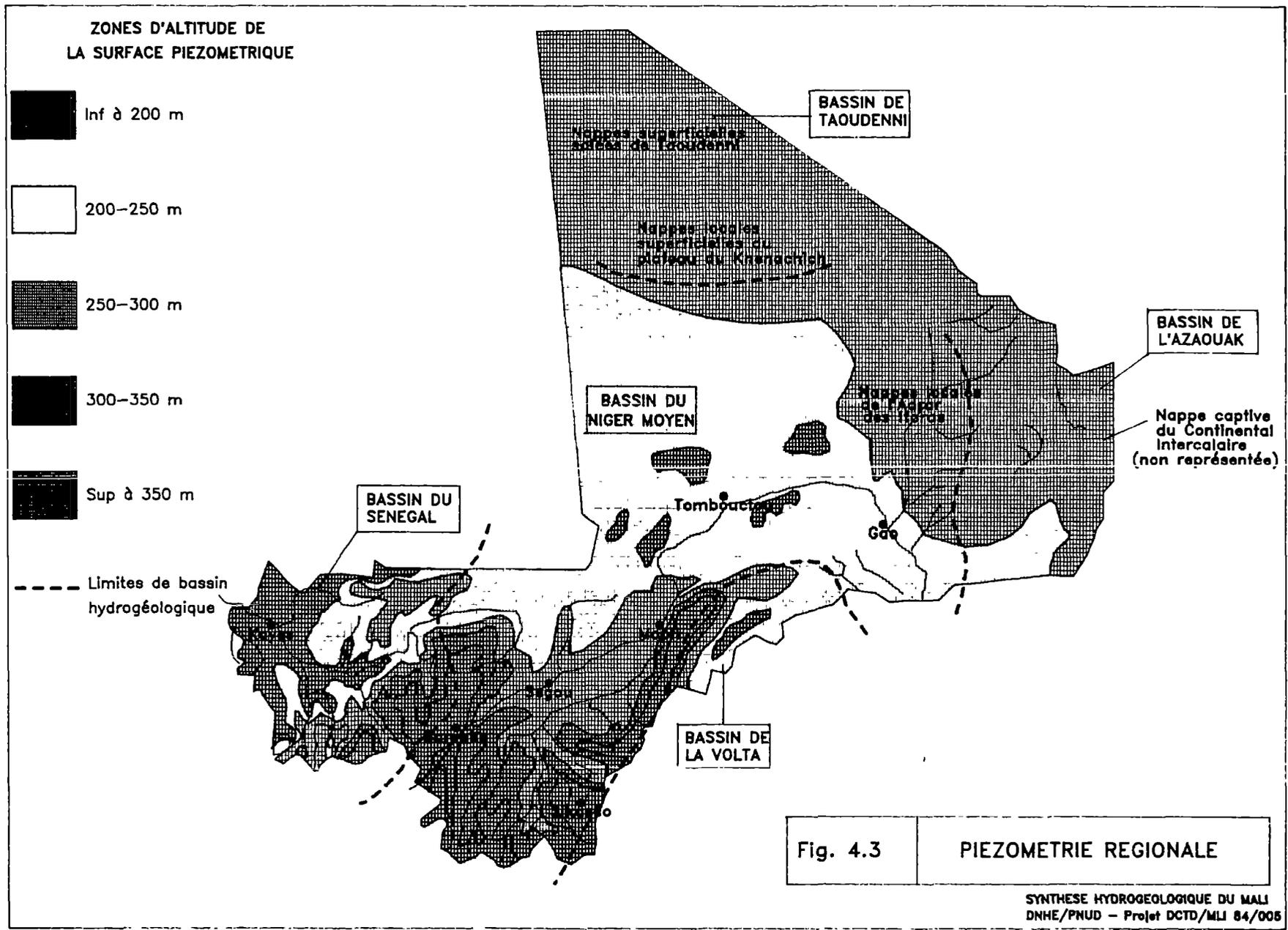
4.2.2.1. Topographie

Les cotes piézométriques s'étagent entre 20 m d'altitude dans la vallée du fleuve Sénégal, à la frontière NO du Mali, jusqu'à plus de 600 m dans le plateau dogon. La majeure partie du pays s'inscrit, toutefois, entre les isopièzes 200 et 400 m.

Trois grands bassins hydrogéologiques couvrant la majeure partie du Mali peuvent être définis. Leurs limites correspondent aux lignes de crêtes séparant les principaux bassins hydrographiques (figure 4.3) :

- à l'ouest, le bassin amont du fleuve Sénégal,
- au centre et à l'est, le bassin moyen du fleuve Niger,
- au sud-est, la bordure septentrionale du bassin de la Volta.

Dans les zones désertiques du nord et de l'est du Mali, la cuvette de Taoudenni et les bassins du Tanezrouft et de l'Azaouak renferment des nappes dont la piézométrie est indépendante de celle contrôlée par les trois principaux bassins hydrogéologiques et se caractérisent par des systèmes aquifères profonds en charge (formations primaires de Taoudenni, Continental Intercalaire du Tamesna) ou des nappes superficielles discontinues (Plateau du Khenachich, Adrar des Iforas).



Le bassin amont du fleuve Sénégal se compose de trois secteurs morpho-piézométriques :

- au sud-est, les plateaux gréseux latérisés profondément disséqués par les branches amont du fleuve et leurs nombreux affluents temporaires se caractérisent par des altitudes piézométriques variant de 100 m à plus de 450 m sur la ligne de partage des eaux ainsi que par de forts gradients hydrauliques sur les versants des vallées, lesquels deviennent beaucoup plus faibles dans les interfluves, les isopièzes épousant les irrégularités du relief;
- au nord-est, les plaines et les plateaux du Kaarta présentent une surface piézométrique plus régulière, entre les cotes 200 et 300 m, qui chute brutalement à la cote piézométrique 100 m en bordure de la vallée du fleuve Sénégal ;
- à l'ouest, la plaine d'érosion du fleuve Sénégal constitue la zone ayant la piézométrie la plus basse du Mali (de 20 à 100 m).

Le bassin moyen du fleuve Niger couvre plus de la moitié de la superficie totale du Mali et comporte trois principales zones morphologiques présentant des caractéristiques piézométriques spécifiques :

- à l'ouest et au sud, l'arc de collines et de plateaux gréseux est caractérisé par une surface piézométrique en relief et des courbes isopièzes festonnées épousant la morphologie locale;
- au nord et à l'est, les vastes pénéplaines largement ensablées correspondent à une surface piézométrique globalement déprimée;
- au centre, la zone inondable du delta intérieur est caractérisée par une remontée généralisée de la surface piézométrique tandis que le delta mort correspond à une piézométrie déprimée.

Le bassin de la Volta n'est représenté au Mali que par la plaine du Gondo et par la zone dunaire du Sénomango. Cette région correspond à un couloir piézométrique très déprimé (180 m).

4.2.2.2. Pluviométrie

L'isohyète 700 mm sépare, approximativement, deux domaines aux caractéristiques piézométriques bien différenciées :

- le domaine situé au sud de cette isohyète, bénéficiant de précipitations importantes, est caractérisé par une piézométrie élevée et un tracé des isopièzes épousant la forme des reliefs. Le réseau d'observation piézométrique montre aussi que cette région est celle où se manifestent les plus fortes variations piézométriques saisonnières et interannuelles en étroite relation avec le régime pluviométrique;
- le domaine situé au nord de cette isohyète, beaucoup plus vaste et soumis au climat sahélien et désertique, est au contraire une zone piézométrique déprimée, à l'exception de la zone du delta vif du Niger. C'est aussi le domaine où les fluctuations saisonnières sont les plus faibles, souvent non mesurables.

Du fait d'une concordance entre la répartition des reliefs et la zonation climatique, la topographie et la pluviométrie influent dans le même sens sur le modelé de la surface piézométrique en marquant leur influence propre par des reliefs piézométriques associés

aux plateaux et aux collines bien arrosés de l'ouest et du sud (zones de recharge) et par des zones déprimées dans les plaines alluviales et les pénéplaines ensablées des zones sahéliennes et désertiques du nord et de l'est du pays (réceptacle des écoulements régionaux).

4.2.2.3. Géologie

Les différentes unités lithostratigraphiques ne sont pas toujours caractérisées par une piézométrie spécifique. En fait, c'est surtout le type d'aquifère et le mode de gisement des eaux souterraines (milieu fissuré ou intergranulaire) qui influencent le modelé piézométrique, cette influence étant, comme on l'a vu, plus ou moins marquée suivant le contexte topographique et pluviométrique :

- les aquifères de type fissuré surmontés par des nappes superficielles dans les formations du recouvrement correspondent à un domaine de piézométrie élevée et proche de la surface;
- les aquifères généralisés correspondent au contraire à un domaine de piézométrie déprimée avec des niveaux d'eau profonds;
- les zones de transition entre ces deux domaines où sont localisés les aquifères fissurés de type discontinu sans nappe superficielle, présentent des caractéristiques intermédiaires avec un approfondissement progressif du niveau des nappes et une influence plus faible de la topographie.

Les accidents tectoniques majeurs tels que couloirs linéamentaires, failles, flexures n'apparaissent pas comme des axes de circulation préférentielle mais comme des limites entre compartiments à piézométrie indépendante.

4.2.2.4 Relation avec les eaux de surface

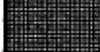
Différents types de relation entre eau de surface et eau souterraine apparaissent sur la carte piézométrique. Ils peuvent être classés suivant leur degré de permanence et le sens des transferts :

- recharge permanente des nappes par les eaux de surface,
- drainage permanent des nappes par le réseau hydrographique,
- relation variable (recharge/drainage) en fonction des cycles pluviométriques,
- recharge linéaire des nappes par les eaux de surface,
- recharge ponctuelle des nappes par les eaux de surface,
- recharge épisodique des nappes par les eaux de surface.

La figure 4.4 montre qu'un domaine géographique particulier est associé à chacun de ces types de relation.

La recharge permanente est une caractéristique majeure de la piézométrie régionale et se traduit par une remontée de la surface piézométrique qui devient subaffleurante et se raccorde aux plans d'eau de surface. Le secteur central du delta intérieur qui couvre le delta vif, est la principale zone bénéficiant de ce type de recharge. Celle-ci varie cependant fortement selon les saisons et les années en fonction de la hauteur des crues qui conditionne l'extension des zones inondées, et de leur durée. Une recharge permanente se produit aussi, mais de façon beaucoup plus limitée, dans la frange des plaines alluviales bordant le lit du Niger, entre Koulikoro et Gao, ainsi que le long du

LEGENDE

-  Recharge permanente
-  Drainage permanent
-  Relation variable recharge/drainage
-  Recharge linéaire (réseau hydrographique fonctionnel)
-  Recharge ponctuelle (réseau hydrographique désorganisé)
-  Recharge épisodique
-  Zone dunaire aréique

800 mm: Isohyète moyenne (1922-1980)

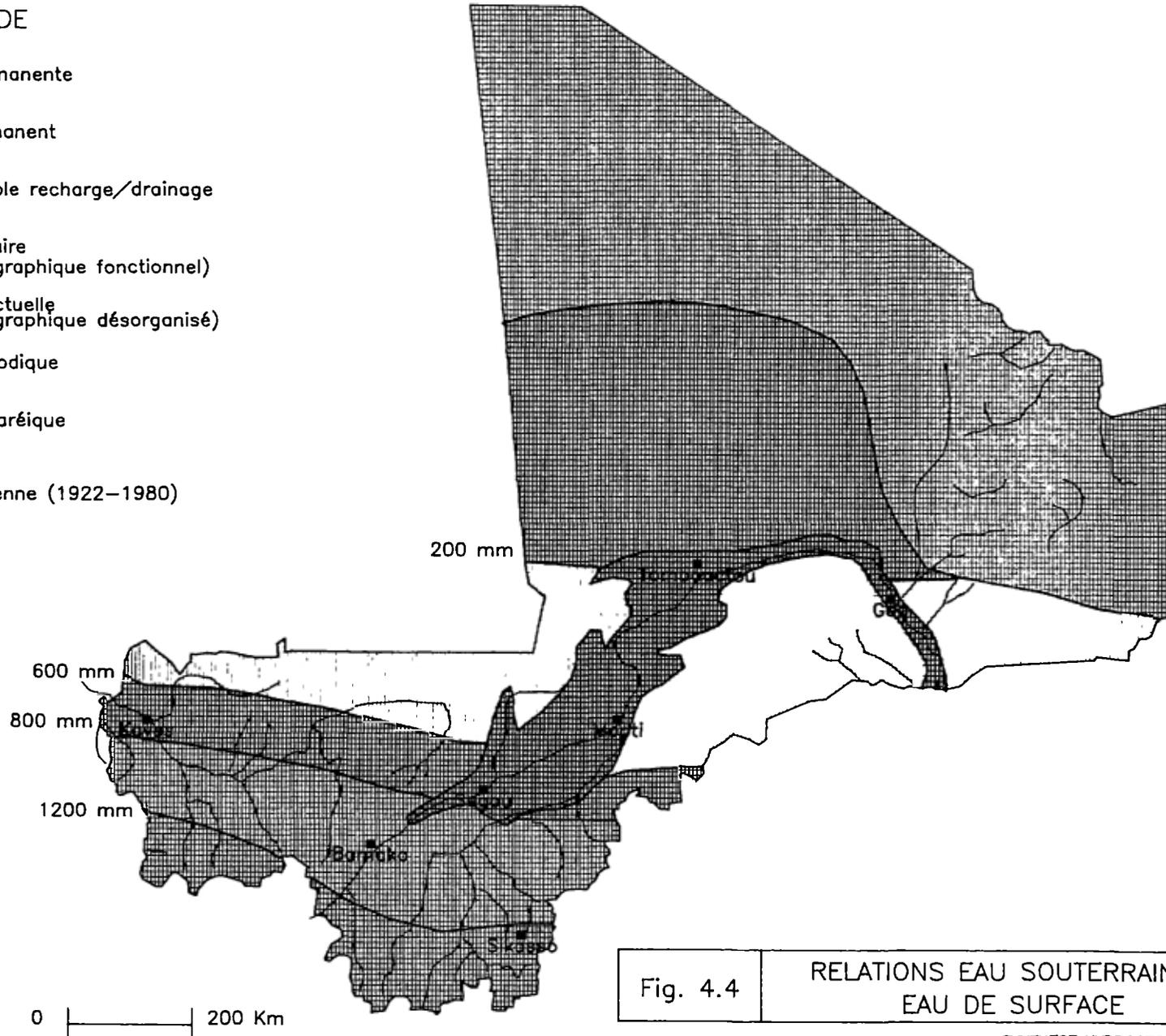


Fig. 4.4 RELATIONS EAU SOUTERRAINE / EAU DE SURFACE

Bani, entre Douna et Mopti. Enfin, une remontée de la nappe, bien circonscrite, est provoquée par l'infiltration des eaux d'irrigation dans les périmètres de l'Office du Niger de la zone de Niono.

Le drainage permanent des systèmes aquifères par le réseau hydrographique ne se produit que dans la zone méridionale du Mali où la pluviométrie est la plus élevée. La limite nord de cette zone correspond approximativement à l'isohyète 1.200 mm. Ainsi, les systèmes aquifères fissurés du socle et de l'Infracambrien tabulaire alimentent, par l'intermédiaire de zones de sources et d'émergences diffuses, l'écoulement de base des affluents pérennes du Niger et du Sénégal. Même durant la période de sécheresse commencée en 1969, ces apports souterrains ont permis le maintien d'un écoulement dans ces rivières durant les saisons sèches. Ce n'est que lors des années exceptionnellement sèches (1983-85) que l'écoulement s'est tari en fin d'étiage dans certains biefs.

Les relations variables recharge/drainage caractérisent la zone climatique soudano-sahélienne qui s'étend entre les isohyètes 800 et 1.200 mm. Le principal aquifère concerné est celui des grès infracambriens.

Le sens de la relation entre eau de surface et eau souterraine dépend essentiellement des cycles pluviométriques interannuels de longue durée.

Durant le cycle d'années humides précédant 1969, les aquifères alimentaient l'écoulement de surface durant une grande partie de la saison sèche, les cours aval des principaux marigots étant même permanents comme le montrent les cartes topographiques IGN éditées en 1956 et les enquêtes villageoises. Après 1969 et surtout à partir du milieu de la dernière décennie, l'abaissement généralisé du niveau des nappes a eu pour conséquence de rendre perché le réseau hydrographique. Les pluies n'alimentent plus alors qu'un ruissellement temporaire qui percole rapidement pour alimenter les nappes sous-jacentes. Même dans les cours aval des marigots où le niveau des nappes est peu profond, l'écoulement de surface cesse, en général, après les dernières pluies importantes de l'hivernage.

La recharge linéaire se produit dans la zone sud-sahélienne, approximativement entre les isohyètes 600 et 800 mm. Les pluies sont suffisamment abondantes pour générer un ruissellement important qui est collecté par un réseau hydrographique fonctionnel. Même durant les périodes humides avant 1969, ce réseau était perché au-dessus des nappes et les alimentait tout au long du tracé des marigots. Cette recharge a persisté durant la période pluviométrique déficitaire actuelle, mais avec des volumes plus faibles.

La recharge ponctuelle est une caractéristique des zones nord-sahéliennes où le réseau hydrographique est partiellement désorganisé par l'ensablement. Les précipitations, comprises entre 200 et 600 mm, alimentent un ruissellement qui est collecté dans les dépressions topographiques et dans certains tronçons encore fonctionnels du réseau hydrographique. Il s'accumule fréquemment dans des mares temporaires qui sont associées à des nappes perchées. Il contribue aussi, et d'une manière importante, à la recharge des aquifères fissurés lorsque le recouvrement est peu épais et perméable.

La recharge épisodique se produit dans les zones désertiques où les quelques crues des oueds alimentent des nappes alluviales en général peu épaisses. Le ruissellement à la surface des plateaux rocheux contribue aussi, localement, à la recharge des aquifères profonds fissurés ou généralisés (Crétacé Supérieur - Eocène inférieur, Primaire de Taoudenni et socle de l'Adrar des Iforas).

4.3. PRINCIPALES DEPRESSIONS PIEZOMETRIQUES

Un trait marquant de la piézométrie régionale du Mali, que l'on retrouve d'ailleurs également dans d'autres pays sahéliens d'Afrique [4.1], est l'existence de vastes zones où la surface piézométrique des nappes est déprimée avec des profondeurs jusqu'à l'eau de 40 à 50 m (localement 100 m) et pour lesquelles les courbes isopièzes semblent se refermer sur elles-mêmes (nappes en creux).

Ces dépressions piézométriques couvrent les plaines sahéliennes et désertiques des régions centrales et orientales du Mali sur une superficie de plusieurs centaines de milliers de km². Ce vaste domaine est approximativement délimité sur la carte piézométrique régionale par l'isopièze 250 m. On peut distinguer trois zones principales, certaines étant subdivisées en secteurs par des remontées locales des nappes associées aux infiltrations d'eau de surface ou à des compartiments surélevés du substratum précambrien (*figure 4.5*) :

- La dépression piézométrique centrale localisée dans le bassin du Niger moyen est de loin la plus étendue. Ses limites sont proches de celles du delta fossile du Niger. Les principaux secteurs à piézométrie déprimée sont, de l'ouest vers l'est : le fossé de Nara, la plaine de Segala-Guiré, le Méma-Dioura, la plaine alluviale de Katiéna-Sy entre les fleuves Niger et Bani, les bassins nord et sud de l'Azaouad, ainsi que le Gourma central ;
- la dépression de Gao couvre le détroit soudanais et le Gourma oriental;
- la dépression du Gondo, d'extension plus réduite, est localisée dans la partie amont du bassin hydrogéologique de la Volta.

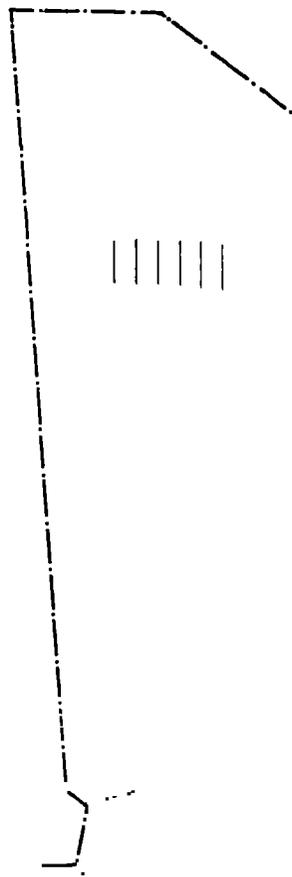
Ces dépressions présentent plusieurs caractères communs représentatifs de leur situation géographique et de la nature des aquifères dans lesquels elles se sont développées :

- elles sont toutes localisées dans des zones géographiques à climat sahélien et désertique, au nord de l'isohyète 700 mm, caractérisées par des pluies moyennes annuelles de l'ordre de 200 à 300 mm et une très forte évapotranspiration (plus de 2.500 mm/an d'ETP Penman);
- elles se sont essentiellement développées dans les aquifères de type intergranulaire du Continental terminal/Quaternaire et du Continental intercalaire et dans les secteurs d'aquifères fissurés où le substratum est surmonté par une épaisse couverture d'altérites argilo-sableuses;
- à l'exception du Gondo, ces dépressions piézométriques ne semblent pas liées à des conditions structurales spécifiques. Certaines sont associées à des structures de type graben : fossés de Nara et de Gao, d'autres à des zones fortement plissées comme le Gourma, d'autres enfin à des secteurs relativement surélevés comme le Méma Dioura et la plaine de Ségala-Guiré dans le prolongement du plateau mandingue. Cette hétérogénéité structurale ne plaide pas en faveur d'une subsidence généralisée qui serait à l'origine de la formation de ces dépressions piézométriques même si ce phénomène a pu jouer dans certains secteurs.

Ces observations conduisent à penser que, malgré la grande profondeur de l'eau, l'évaporation pourrait jouer un rôle prépondérant dans la formation et le maintien de ces dépressions piézométriques régionales dans les zones sahéliennes et désertiques où les aquifères sont constitués ou surmontés par des couches argilo-sableuses.

LEGENDE

-  Zone piézométrique haute
-  Zone de nappes discontinues généralement peu profonde
-  Zone piézométrique déprimée
-  Zone influencée par l'infiltration des eaux de surface
-  Limite de la dépression piézométrique centrale du Mali
-  Limite de zone déprimée



Nappe en

PRINCIPALES DEPRESSIONS PIEZOMETRIQUES

N° REF	ZONE	AQUIFERE
①	Fossé de Nara	Continental Intercalaire
②	Plaine de Ségéla - Guiré	Infracambrien
③	Méma - Dioura	Continental Term./ Quat / Infracambrien
④	Plaine alluviale Katiéna - Sy	Continental Term./ Quat / Infracambrien
⑤	Bassin de l'Azzaouad Nord	Continental Term / continental Int
⑥	Bassin de l'Azzaouad Sud	Continental Term./ Quat
⑦	Gourma Central et Occidental	Continental Term./ Quat / Infracambrien
⑧	Détroit Soudanais	Continental Term / Cretacé Sup-Eocene Inf
⑨	Gourma Oriental	Infracambrien
	Plaine du Gondo	Continental Term / Quat / Infracambrien

Fig. 4.5

DEPRESSIONS PIEZOMETRIQUES REGIONALES

Echelle

0 100 200km

Des études récentes (*voir chapitre 6*) basées sur les analyses isotopiques et chimiques effectuées sur les aquifères des zones désertiques ont montré que l'évaporation pouvait affecter des niveaux d'eau profonds et que ce processus, replacé dans l'échelle de temps des variations climatiques depuis la fin du Pléistocène, pourrait expliquer la formation progressive de certaines de ces dépressions jusqu'à leur état actuel.

4.4. FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

4.4.1. Données disponibles et méthode d'interprétation

Les données collectées depuis 1981 sur le réseau de suivi piézométrique ont été informatisées dans le fichier "PIEZOMETRIE" développé à partir du logiciel LOTUS 123 et intégré à la banque de données SIGMA. Ce fichier est actualisé chaque mois et compte actuellement plus de 30.000 mesures sur les 210 points d'observation, la majeure partie des données étant relative à la période 1984-1989.

Un premier recueil des hydrogrammes disponibles a été édité par le projet DCTD/MLI/84/005 en octobre 1988 [HDG/NTL/8].

La grande variété des types d'hydrogrammes de fluctuations piézométriques observés dans les aquifères fissurés, la relative brièveté des périodes d'observation et l'hétérogénéité des conditions hydrogéologiques locales qui caractérisent ce type d'aquifère, ont nécessité de limiter l'interprétation quantitative de ces fluctuations aux quelques sites équipés de limnigraphes sur lesquels on disposait d'historiques piézométriques couvrant une période d'au moins 5 années (*voir chapitre 7*).

Les données piézométriques ont été traitées par une approche statistique à l'échelle régionale après avoir été classées en catégories selon le type d'aquifère, l'unité ou le secteur hydrogéologique, les conditions pluviométriques et géomorphologiques. Cette approche a permis de dégager des tendances d'évolution piézométrique que l'on peut considérer comme significatives à l'échelle régionale car affranchies des fortes disparités locales grâce à un nombre suffisant de données, notamment pour les aquifères fissurés.

Durant la période de suivi piézométrique, les précipitations ont été très déficitaires sur l'ensemble des sites d'observation (déficit de 16 à 30 % pour les pluies moyennes durant la période 1980-87 par rapport à celles de la période 1936-1980). Les années 1983-1984 ont été exceptionnellement sèches avec un déficit pluviométrique pouvant dépasser 40 % à certaines stations. Les historiques piézométriques se situent donc dans une phase de recharge réduite des aquifères à ressources renouvelables. Ainsi, l'analyse des données conduit plutôt à une sous-estimation de l'infiltration moyenne.

D'une manière générale, le régime des fluctuations piézométriques dans les aquifères fissurés est très différent de celui des aquifères généralisés, non seulement en raison de leurs caractéristiques hydrauliques mais aussi du fait de leur situation climatique et de leurs relations avec les eaux de surface.

4.4.2. Aquifères fissurés

Les piézomètres sont principalement localisés dans une zone délimitée par les méridiens 7° et 10° Ouest qui recoupent les principaux aquifères fissurés sous différentes zones climatiques : aquifères du Cambrien en zone sahélienne, de l'Infracambrien tabulaire en zone soudano-sahélienne et du socle cristallin en zone soudanienne. Le réseau d'observation de ces aquifères est complété par des piézomètres sur les secteurs de l'aquifère infracambrien de la zone de San et du plateau dogon. Sur la majorité des sites, les fluctuations piézométriques de la nappe superficielle ont également été mesurées.

4.4.2.1. Types de fluctuations saisonnières

L'allure générale des hydrogrammes est la résultante des conditions d'écoulement dans la zone saturée et des transferts en provenance de la zone non saturée ainsi que des apports indirects provenant des eaux de surface. Leur mise en parallèle avec les hyétogrammes permet d'évaluer la fonction hydraulique exercée par la zone dénoyée. La comparaison entre l'évolution piézométrique de la nappe superficielle et celle de la nappe de fissures sur un même site permet de mettre en évidence leurs interrelations hydrauliques.

Les hydrogrammes ont été classés qualitativement en 6 types de courbe de crue et 3 types de courbe de tarissement selon 3 critères [HDG/NTL/9] :

- dates d'étiage et de crue souterrains,
- allure des courbes de remontée et de vidange des nappes,
- amplitude des fluctuations saisonnières.

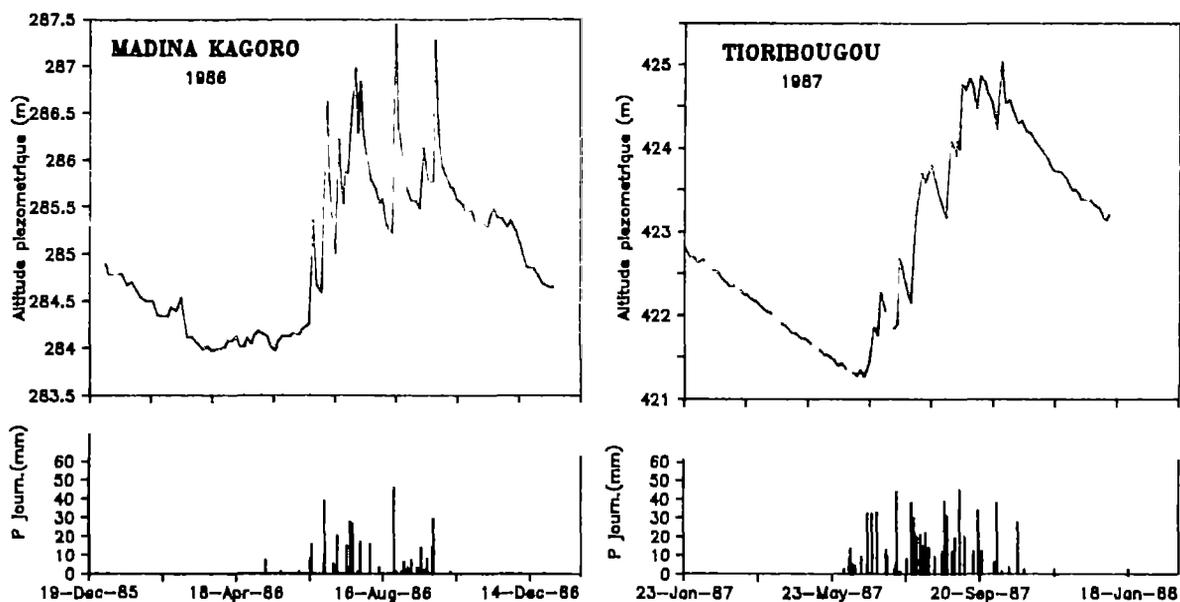
La diversité des types de courbe ainsi obtenus met bien en évidence l'hétérogénéité des caractéristiques hydrauliques des aquifères fissurés et l'importance des conditions locales.

La figure 4.6 représente les principaux types d'hydrogrammes observés pour l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire (*figure 4.6a* : Madina Kagoro et Tioribougou) et pour l'aquifère du socle (*figure 4.6b* : Bougouni et Kolassokoro).

a) Site de Madina Kagoro

Les formations de recouvrement sur ce site, localisé sur la bordure nord du plateau mandingue, sont peu épaisses et dénoyées. Durant la saison sèche, l'évolution des niveaux est perturbée par les pompages. La nappe remonte brusquement dès les premières pluies d'hivernage puis à chaque séquence pluvieuse, avec des pointes de crue secondaires représentant des variations de niveau pouvant dépasser deux mètres pour des averses de 30 à 40 cm et suivies de décrues tout aussi rapides. Le tarissement de la nappe s'amorce en septembre dès la diminution des pluies d'hivernage. La proximité d'un marigot drainant un bassin versant étendu et les fortes remontées de niveau indiquent une contribution importante de l'infiltration indirecte du ruissellement de surface.

a. Aquifère de l'Infracambrien tabulaire : Zone climatique sahélienne et soudano-sahélienne



b. Aquifère du socle: Zone climatique soudanienne

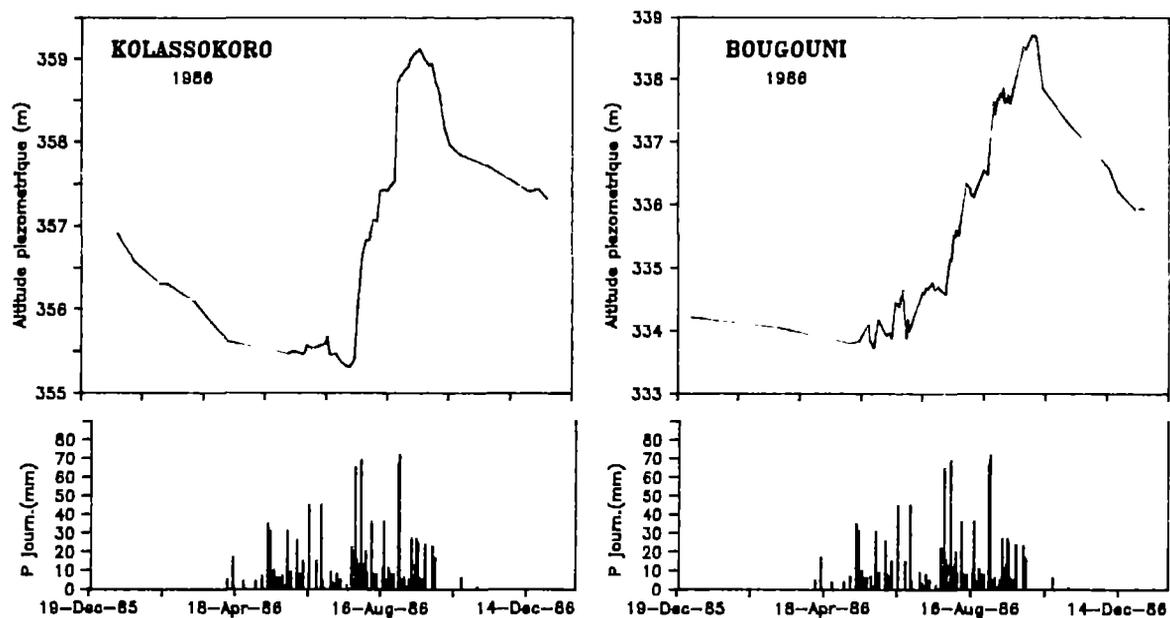


Fig. : 4.6: Exemples d'hydrogrammes piézométriques dans les aquifères fissurés

b) Site de Tioribougou

L'épaisseur du recouvrement latéritique varie de 15 à 30 m. Les premières pluies d'hivernage entraînent, ici aussi, des remontées de la nappe qui sont toutefois beaucoup plus faibles que sur le piézomètre de Madina Kagoro. Durant l'hivernage, des pointes de crues secondaires sont associées aux principales séquences d'averses avec des décrues intermédiaires. Le tarissement saisonnier, très régulier et de type exponentiel, débute à la fin septembre. Cette évolution des niveaux est caractéristique des aquifères gréseux associés à des nappes superficielles avec des écoulements relativement importants dans la zone fissurée.

c) Sites de Bougouni et de Kolassokoro

Ils sont proches l'un de l'autre et localisés à proximité de la vallée du Baoulé. Le recouvrement est représenté par une épaisse séquence latéritique constituée d'un horizon cuirassé et d'argiles et arènes grenues surmontant des roches granitiques et métamorphiques fissurées et recoupées par des filons de quartz. L'exploitation des eaux souterraines sur ces sites concerne principalement la nappe des altérites. Les pluies du premier mois d'hivernage n'entraînent aucune remontée de nappe; elles ralentissent seulement la baisse liée au tarissement de la saison sèche, puis stabilisent le niveau des nappes. Ce n'est qu'à partir de la mi-juillet que les niveaux amorcent une remontée qui continue, avec quelques paliers associés aux averses les plus importantes, jusqu'à une crue saisonnière tardive, en octobre. La phase de tarissement est régulière et de type exponentiel pour le piézomètre de Bougouni tandis qu'à Kolassokoro, le début du tarissement est marqué par une décrue rapide probablement associée à un écoulement préférentiel dans la cuirasse latéritique qui évacue une partie des eaux d'infiltration vers le réseau hydrographique.

4.4.2. Amplitude des fluctuations saisonnières

L'étude statistique a été faite à partir des variations mesurées sur 519 hydrogrammes annuels. Les fluctuations saisonnières ont des amplitudes comprises entre moins de 1 m et 16 m. Les valeurs se répartissent selon une distribution de type log-normale avec une moyenne de 3,5 m et un écart-type de 3,1 m (*figure 4.7a*). L'amplitude de la remontée saisonnière du niveau des nappes dépend de plusieurs facteurs: la pluviométrie, les caractéristiques hydrauliques des aquifères, l'épaisseur et la nature lithologique et la granulométrie des terrains dénoyés :

- la distribution par tranches pluviométriques (*figure 4.7b*) montre que les plus fortes amplitudes de fluctuation se rencontrent dans la zone soudano-sahélienne pour des pluviométries comprises entre 600 et 800 mm et non pas dans la zone soudanienne, la plus arrosée. Toutefois, les valeurs moyennes calculées par tranche pluviométrique (de 3,5 à 4,8 m) sont beaucoup plus homogènes que ne pouvaient le laisser supposer les grands écarts pluviométriques, de moins de 400 mm à plus de 1.200 mm. Les seules données brutes de variation du niveau des nappes ne sont donc pas suffisantes pour avoir une idée de l'importance de la recharge des aquifères et de l'écoulement dans la zone non saturée. Pour être significatives, elles doivent être associées à la porosité de l'aquifère. Il faut aussi noter les fortes variations d'amplitude à l'intérieur d'une même tranche pluviométrique qui témoignent de la diversité des conditions hydrogéologiques locales;
- la distribution par aquifère (*figure 4.7c*) indique des remontées plus importantes dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire que dans les autres aquifères fissurés et dans les nappes superficielles. Lorsque l'on compare les données site par site, on constate que les plus fortes amplitudes sont enregistrées dans les secteurs où les grès infracambriens sont affleurants (plateau dogon notamment). Dans les secteurs où les aquifères de fissures sont associés à des nappes superficielles, l'amplitude des

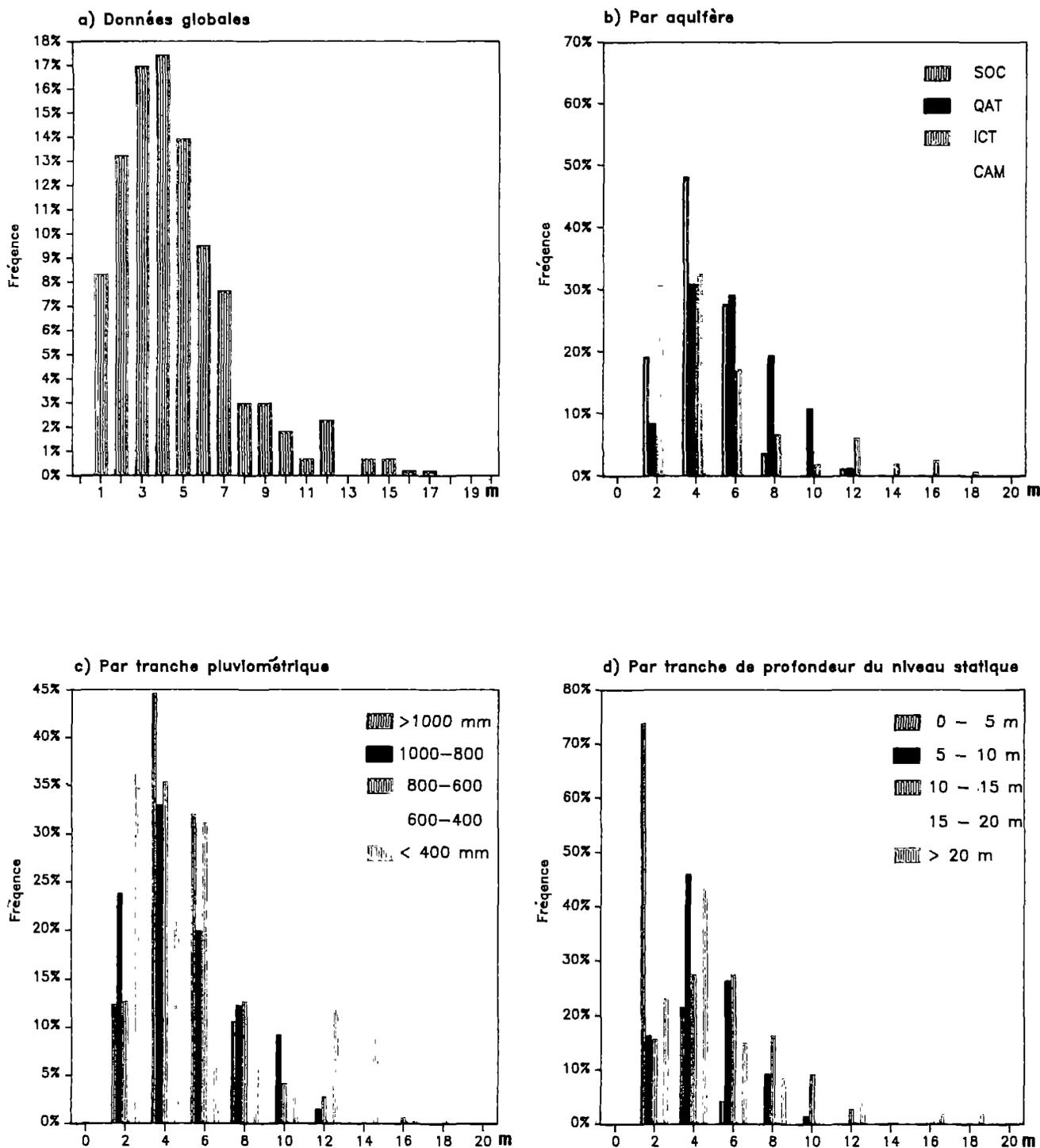


Fig. 4.7 : Histogrammes des amplitudes de fluctuation piezométrique saisonnière dans les aquifères fissurés

fluctuations est, en général, plus forte dans le milieu intergranulaire superficiel que dans le milieu fissuré profond. C'est cette différence d'amplitude ou de charge hydraulique qui permet les transferts verticaux entre les deux couches aquifères ;

- la distribution en fonction des profondeurs de la nappe (*figure 4.7d*) met bien en évidence la diminution de l'amplitude des fluctuations piézométriques avec l'augmentation de la profondeur des niveaux statiques. Elle passe de plus de 5 m en moyenne pour les nappes peu profondes à une moyenne de 3 m pour des nappes situées vers 15 m de profondeur et à moins de 1 m au-delà d'une profondeur de 20 m. Ainsi, pour les secteurs où la surface piézométrique est profonde et qui correspondent en outre à des zones de faible pluviométrie (aquifère du Cambrien de Nara), la recharge par infiltration directe est aléatoire lorsque les conditions géomorphologiques ne facilitent pas une concentration du ruissellement de surface permettant une réalimentation de la nappe par infiltration indirecte.

4.4.2.3. Estimation de l'infiltration

Cette estimation ne peut être établie qu'à l'échelle régionale car la corrélation entre la valeur des pluies annuelles et l'amplitude des fluctuations saisonnières ne permet pas d'établir une relation significative. Tout au plus, une tendance peut-elle être notée montrant des amplitudes décroissantes vers les zones de faible pluviométrie. Cela s'explique par le rôle prépondérant des conditions hydrogéologiques locales sur le régime des fluctuations piézométriques.

Pour une première évaluation de l'infiltration régionale, les amplitudes de remontée saisonnière des niveaux ont été converties en hauteur de lames d'eau équivalentes à l'aide des valeurs de porosité moyenne suivantes :

- 4 à 6 % pour les aquifères du recouvrement,
- 2 à 3 % pour les aquifères fissurés associés à des nappes superficielles,
- 0,5 % pour les aquifères fissurés sans nappe superficielle.

Afin de pondérer l'effet des conditions hydrogéologiques locales, des valeurs moyennes d'infiltration ont été calculées, après classement des hydrogrammes, par tranches pluviométriques. Les moyennes ainsi calculées ont permis de construire la courbe de la *figure 4.8*. La relation obtenue entre l'infiltration estimée (I) et la pluie moyenne annuelle (P) n'est pas linéaire. Un ajustement approché peut être obtenu avec deux demi-droites. La première est représentative de la zone soudanienne, la seconde de la zone sahélienne :

DEMI-DROITE 1 : $I = 0,11P + 63$ en mm, pour P supérieur à 700 mm

DEMI-DROITE 2 : $I = 0,30P - 70$ en mm, pour P entre 300 mm et 700 mm

Ces relations correspondent à des taux d'infiltration moyens variant entre 7 et 20 % de la pluie brute. Au-dessous de 300 mm de pluie, l'infiltration directe est négligeable et la recharge des nappes se fait essentiellement par infiltration du ruissellement de surface, donc de façon localisée et indirecte.

Une relation a aussi pu être établie entre la hauteur moyenne des lames d'eau infiltrée et la profondeur des niveaux statiques en utilisant, comme pour la pluviométrie, des valeurs moyennes par tranche de profondeur (*figure 4.9*). L'infiltration décroît d'une manière approximativement exponentielle pour des profondeurs croissantes des niveaux. Pour les nappes situées à moins de 3 m de profondeur, l'infiltration

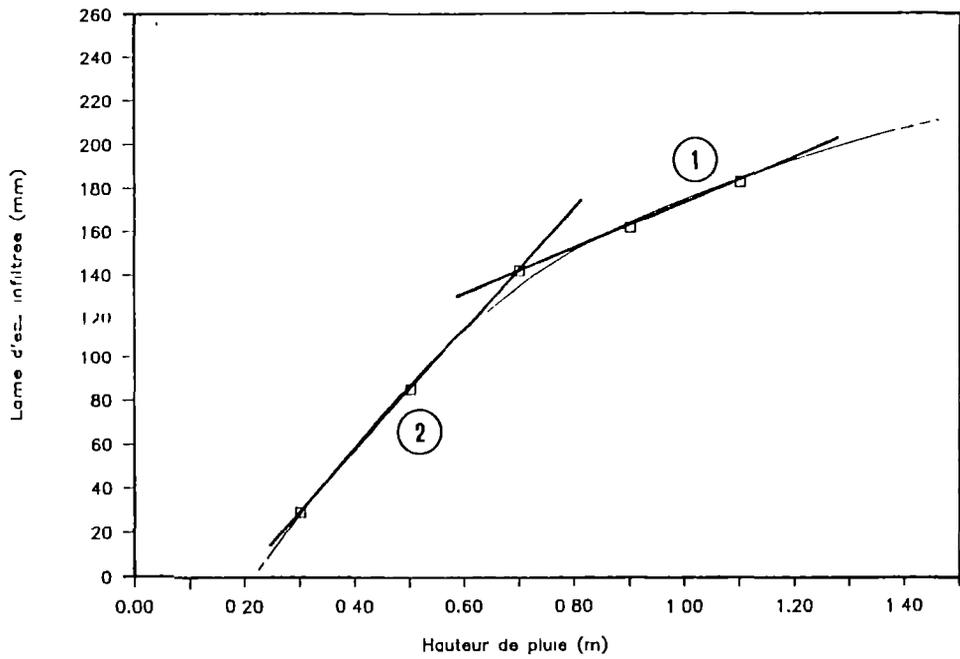


Fig 4.8 _Relation entre l'infiltration régionale et la pluie annuelle (Aquifères fissurés)

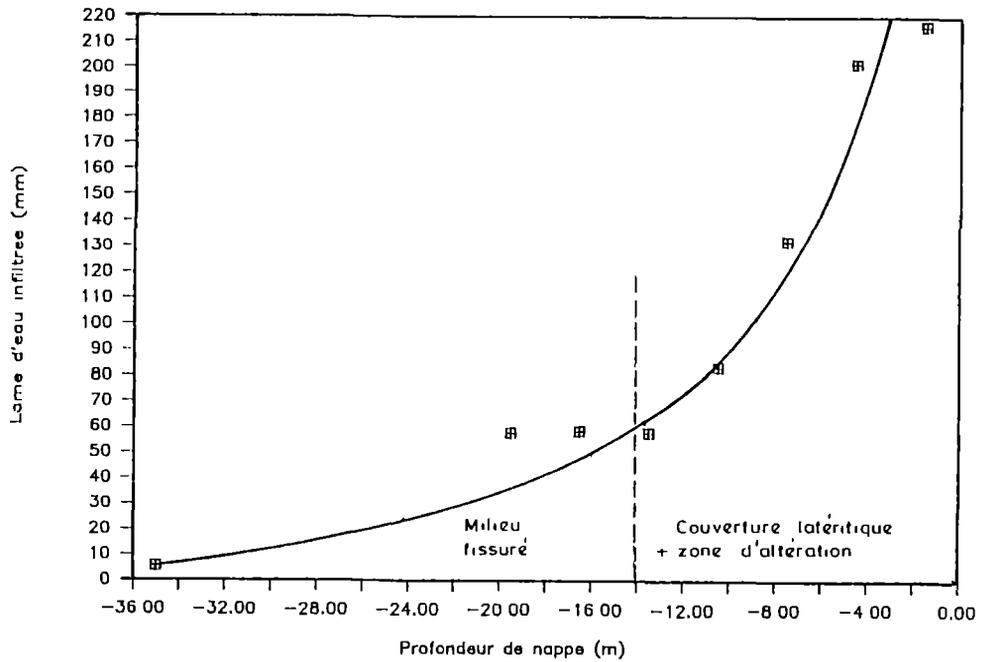


Fig.4.9 _Relation entre l'infiltration régionale et la profondeur moyenne de nappe (Aquifères fissurés)

calculée à partir des remontées saisonnières est trop faible en raison de la reprise rapide d'une partie de l'infiltration sous forme de ruissellement hypodermique et d'évapotranspiration. Pour les profondeurs supérieures à 16 m, l'infiltration estimée semble, au contraire, trop élevée. La porosité de 0,5 % adoptée pour le milieu fissuré serait trop forte ou, plus vraisemblablement, la recharge des nappes se fait en grande partie par infiltration indirecte des eaux de ruissellement.

La relation de l'infiltration avec la profondeur des niveaux statiques est compatible avec celle établie par rapport à la pluviométrie. On constate en effet que les secteurs d'aquifère à niveau peu profond sont ceux situés dans la zone soudanienne à forte pluviométrie où l'infiltration est la plus forte. Au contraire, dans la zone sahéenne moins arrosée, la profondeur de ces niveaux est plus importante.

En conclusion, la profondeur piézométrique moyenne de la nappe dans chaque secteur représenterait, en fait, un état d'équilibre réglé par les conditions pluviométriques prévalant dans le secteur. Ceci tendrait à confirmer que les échanges ou transferts d'eau entre secteurs contigus sont peu importants.

4.4.2.4. *Fluctuations piézométriques annuelles*

Les fluctuations annuelles de niveau sont définies par la différence entre les niveaux d'étiage ou les pointes de crue de deux années successives (*figure 4.10a*).

La fluctuation annuelle moyenne des niveaux d'étiage pour l'ensemble des hydrogrammes est de -0,24 m avec un écart-type de 0,89 m et des extrêmes de +4 et -4 m. Les variations les plus fréquentes sont comprises entre +0,5 et -0,5 m. La légère dissymétrie de l'histogramme vers les valeurs négatives fait apparaître la baisse globale du niveau des nappes durant la période d'observation (1981-1987). Cette baisse apparaît toutefois remarquablement faible si l'on considère les importants déficits pluviométriques enregistrés durant la même période, entre 15 et 30 % par rapport à la normale pluviométrique d'avant la sécheresse. Les nappes, après une forte baisse de leur surface durant les années 1970, au début de la période de sécheresse, semblent donc avoir atteint un équilibre, différent de celui de la période humide 1950-1969, s'adaptant ainsi aux nouvelles conditions de recharge, déficitaires, qui prévalent actuellement.

a) Distribution par aquifère (figure 4.10b)

La décroissance des niveaux d'étiage est plus forte pour les aquifères du recouvrement sur socle granitique que pour ceux sur grès infracambriens. Il en est de même pour les aquifères fissurés avec une baisse de niveau plus marquée pour l'aquifère du socle que pour l'aquifère de l'Infracambrien. La valeur moyenne indiquée pour les schistes cambriens est peu significative en raison du petit nombre de valeurs disponibles. Cette différence d'évolution est à rapprocher de ce qui a été constaté par zone pluviométrique, les plus fortes baisses étant observées dans la zone soudanienne où sont localisées les formations du socle.

b) Distribution par tranche pluviométrique (figure 4.10c)

Les histogrammes sont de tendance normale avec une légère dissymétrie vers les valeurs négatives. Les moyennes indiquent toutefois que la baisse du niveau d'étiage durant la période d'observation est plus forte dans la zone soudanienne que dans la zone sahéenne.

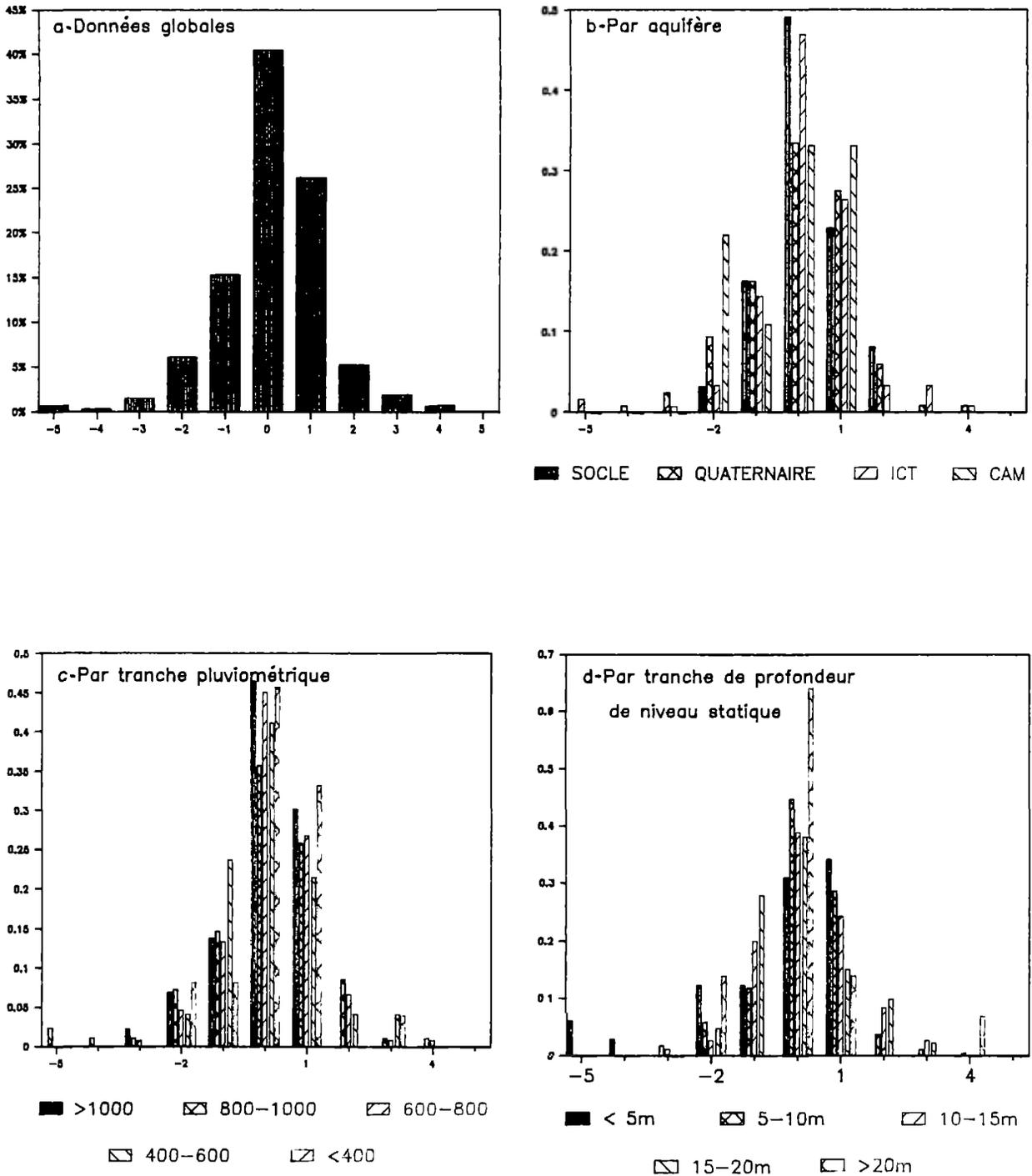


Fig. 4.10 : Histogrammes des amplitudes de fluctuation piézométrique annuelle du niveau d'étiage des aquifères fissurés

c) *Distribution par tranche de profondeur de niveau statique (figure 4.10d)*

Ce sont les niveaux peu profonds, jusqu'à 5 m, et, à un moindre degré, ceux entre 5 et 10 m pour lesquels les variations négatives sont les plus fréquentes et les plus importantes. Au-delà de 15 m de profondeur, les données de fluctuations annuelles du niveau d'étiage sont trop peu nombreuses pour que les moyennes soient significatives.

Les historiques piézométriques sont encore trop courts pour permettre l'établissement d'une relation précise entre les fluctuations annuelles des niveaux d'étiage et les variations de la pluviométrie. Une analyse sur quelques sites montre cependant que la fluctuation annuelle des niveaux d'étiage, positive ou négative, est principalement liée à la différence de pluviométrie entre les deux hivernages précédant l'étiage considéré. Un écart pluviométrique positif entraîne une remontée relative de la nappe et un écart pluviométrique négatif une baisse relative. Toutefois l'amplitude des fluctuations n'est pas exclusivement due à cette écart pluviométrique. Les conditions pluviométriques des années antérieures ont également une influence, mais son importance diminue très rapidement dans les aquifères semi-continus. En effet, en se basant sur les historiques piézométriques disponibles, l'effet des variations pluviométriques sur la fluctuation annuelle des niveaux piézométriques paraît s'amortir au bout de quelques années seulement (3 à 5 ans pour les systèmes aquifères associés aux grès infracambriens et aux formations du socle).

4.4.2.5. *Fluctuations piézométriques interannuelles*

La sécheresse qui affecte le Mali depuis 1970 avec des déficits pluviométriques plus ou moins marqués suivant les années a provoqué un abaissement généralisé du niveau des aquifères à ressources renouvelables.

Ce phénomène s'explique par la combinaison de plusieurs facteurs : une infiltration réduite, la faible capacité de régularisation interannuelle des systèmes aquifères fissurés comparée à la durée des cycles pluviométriques et l'absence d'écoulement souterrain important à l'échelle régionale.

L'estimation de la baisse du niveau des nappes liée à la sécheresse a été approchée par le biais de trois méthodes semi-quantitatives [HDG/NTL/9]. Les valeurs estimées sont les suivantes :

- baisses de 3 à 5 m si l'on compare les moyennes pluviométriques calculées pour trois périodes de référence : 1950-69 (cycle d'années humides), 1970-79 (première phase de la sécheresse) et 1980-87 (période actuelle). La baisse du niveau a surtout été marquée au début de la sécheresse avec des valeurs atteignant entre 3 et 4 m pour les aquifères du socle du secteur de Bougouni et de l'Infracambrien du plateau mandingue;
- baisses de 4,3 à 4,8 m lorsqu'on compare les niveaux piézométriques mesurés en 1957 [4.2] et en 1983-85 dans l'aquifère de l'Infracambrien du plateau mandingue et dans l'aquifère du Cambrien de Nara;
- baisses de 5 à 7 m évaluées indirectement à partir de l'écoulement de surface dans le réseau hydrographique secondaire, en comparant d'une part le régime d'écoulement observé actuellement et la profondeur du niveau piézométrique correspondant, d'autre part le régime qui peut être inféré des cartes topographiques IGN éditées en 1956 et représentatives de l'écoulement en période humide. Il a été supposé que la pérennité de l'écoulement des rivières était liée à l'affleurement des nappes ainsi qu'on peut l'observer actuellement dans la zone climatique soudanienne.

Ces différentes méthodes d'estimation, quoique très approximatives, fournissent cependant des valeurs relativement homogènes avec un abaissement moyen du niveau piézométrique dû à la sécheresse, de 1970 à 1987, de l'ordre de 5 m en moyenne pour les systèmes aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali.

4.4.2.6. Evolution piézométrique en régime d'exploitation

Pour la grande majorité des sites d'observation, l'exploitation actuelle des eaux souterraines varie de quelques m^3/j à une vingtaine de m^3/j prélevés sur les points d'eau traditionnels dans les nappes superficielles et sur les forages équipés de pompe à main dans les nappes de fissures. De plus, les points d'eau sont le plus souvent dispersés et l'on peut considérer que l'évolution piézométrique observée est proche d'une évolution en régime naturel.

L'installation de pompes solaires et de groupes motopompes submersibles sur des forages exploitant l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire avec des débits de pompage variant entre 50 m^3/j (Tioribougou) et plus de 700 m^3/j (Koutiala) a été accompagnée de la mise en place de réseaux locaux d'observation sur la nappe superficielle et la nappe de fissures (forages équipés de limnigraphes).

Pendant les 5 à 6 années d'observation continue (de 1983/84 jusqu'en 1989), aucun déséquilibre permanent ne s'est manifesté, même sur les sites ou les pompages sont les plus importants (usines de BRAMALI : 400 m^3/j , et de Koutiala). Le démarrage de l'exploitation a provoqué un rabattement de moins d'un mètre et même inférieur à 50 cm sur plusieurs sites, ne représentant que l'adaptation de la piézométrie locale aux écoulements souterrains imposés par les pompages [HDG/NTL/3]. Cet abaissement, du même ordre de grandeur que les fluctuations annuelles du niveau piézométrique en régime naturel, ne représente donc qu'une fraction de l'amplitude des fluctuations saisonnières. Cela explique l'absence de déséquilibre constaté et la marge d'exploitation encore disponible pour des projets de développement à partir des eaux souterraines.

A titre d'exemple, les historiques piézométriques et pluviométriques sur 4 sites équipés de pompes solaires sont représentés par la figure 4.11 (Région de Koulikoro-pluviométrie de 400 à 800 mm).

a) Site de Madina Kagoro (figure 4.11a)

Six forages dont trois productifs avec des débits de 1 à 12 m^3/h ont été réalisés sur ce site. Les venues d'eau principales ont été rencontrées vers 60 m de profondeur dans des grès durs très fracturés. Les niveaux statiques sont situés vers 13 m de profondeur. L'exploitation moyenne en saison sèche est de l'ordre de 90 m^3/j dont 85 m^3/j provenant de la pompe solaire installée en 1984 et 5 m^3/j des puits forcés dans la nappe superficielle. Durant la période d'observation, les précipitations annuelles ont varié entre 375 mm (1987) et 609 mm (1989). La profondeur des niveaux en fin de saison sèche est stabilisée à partir de 1987 après une baisse cumulée d'environ 40 cm durant les trois premières années de fonctionnement de la pompe solaire. Les amplitudes croissantes des pointes de crue entre 1986 et 1989 sont liées à l'augmentation de la pluviométrie durant cette période.

b) Site de Tioribougou (figure 4.11b)

Il est localisé à moins de 3 km de l'interfluve régional entre les bassins des fleuves Sénégal et Niger. Sept forages ont été réalisés avec des débits compris entre 0,6 et 16 m^3/h . Les venues d'eau principales ont été rencontrées entre 43 et 48 m de profondeur dans des grès fins à moyens en bancs peu épais et régulièrement lités. Les niveaux statiques sont à 20 m de profondeur.

L'exploitation est de l'ordre de 60 m³/j dont 50 m³/j à partir de l'aquifère fissuré (une pompe solaire et deux pompes manuelles) et de 10 m³/j dans l'aquifère superficiel. Durant la période d'observation, les pluies annuelles ont varié entre un minimum de 524 mm (1985) et un maximum de 850 mm (1988).

Entre 1983 et 1986, l'abaissement des niveaux piézométriques de la nappe de fissures est continu avec une baisse cumulée de près de 2,20 m. La nappe superficielle a suivi la même évolution. Les piézomètres situés en dehors de la zone influencée par les pompages montrent toutefois que l'essentiel de cette baisse est à imputer à une recharge très déficitaire durant la succession d'années sèches 1984, 1985 et 1986. Ainsi le démarrage de l'exploitation de la nappe de fissures n'a provoqué qu'un rabattement de 40 - 60 cm [HDG/NTL/1]. La remontée de la nappe à partir de 1987, année où la pluviométrie a été moins déficitaire tout en restant inférieure à la moyenne, confirme que les aquifères sur ce site n'étaient pas en régime de surexploitation. Les fortes précipitations de l'hivernage 1988 ont même permis aux nappes de retrouver leur niveau piézométrique de 1983.

c) Site de Nossombougou (figure 4.11c)

Onze forages ont été exécutés sur ce site et, à l'exception d'un forage sec dans un filon doléritique, ont des débits compris entre 4 et 20 m³/h, les venues d'eau étant localisées dans des bancs de jaspes très fracturés entre 19 et 26 m de profondeur. Les niveaux statiques sont situés entre 6 et 10 m de profondeur.

L'exploitation est d'environ 160 m³/j dont 110 m³/j par une pompe solaire installée en 1984, 30 m³/j à partir de pompes à main et 20 m³/j par des puits et puisards dans la nappe superficielle. La pluviométrie a varié entre un minimum de 624 mm (1984) et un maximum de 955 mm (1989).

Les pompages dans la nappe de fissures n'ont provoqué qu'une très faible baisse du niveau de la nappe, moins de 40 cm, qui est inférieure à l'amplitude des fluctuations annuelles en régime naturel dûes aux variations pluviométriques. Après l'année 1988, d'hydraulicité moyenne, le niveau a remonté de 1 m par rapport à ce qu'il était en 1984. Les bonnes conditions hydrogéologiques sur ce site ont amené à le retenir pour la création d'un périmètre pilote d'irrigation, ce qui porterait l'exploitation totale à plus de 400 m³/j.

d) Site de Karadié (figure 4.11d)

Les cinq forages exécutés sur ce site sont tous productifs avec des débits compris entre 14 et 21 m³/h. La zone perméable, semi-captive, a été recoupée à 53 m de profondeur. Elle est représentée par des bancs de jaspes équivalents à ceux du site de Nossombougou et surmontés par une épaisse séquence de schistes. La profondeur des niveaux piézométriques est de 19 m. L'exploitation, dans la nappe de fissures est de 90 m³/j. Les pluies ont varié entre un minimum de 610 mm (1984) et un maximum de 788 mm (1988).

La mise en fonctionnement de la pompe solaire, en 1984, s'est accompagnée d'une remontée du niveau piézométrique de près de 2 m, probablement liée à un développement de la zone fissurée au voisinage du forage. Les années sèches 1986 et 1987 ont entraîné par contre une baisse de niveau qui a été plus que compensée en 1988 et 1989, années de pluviométrie proche de la moyenne.

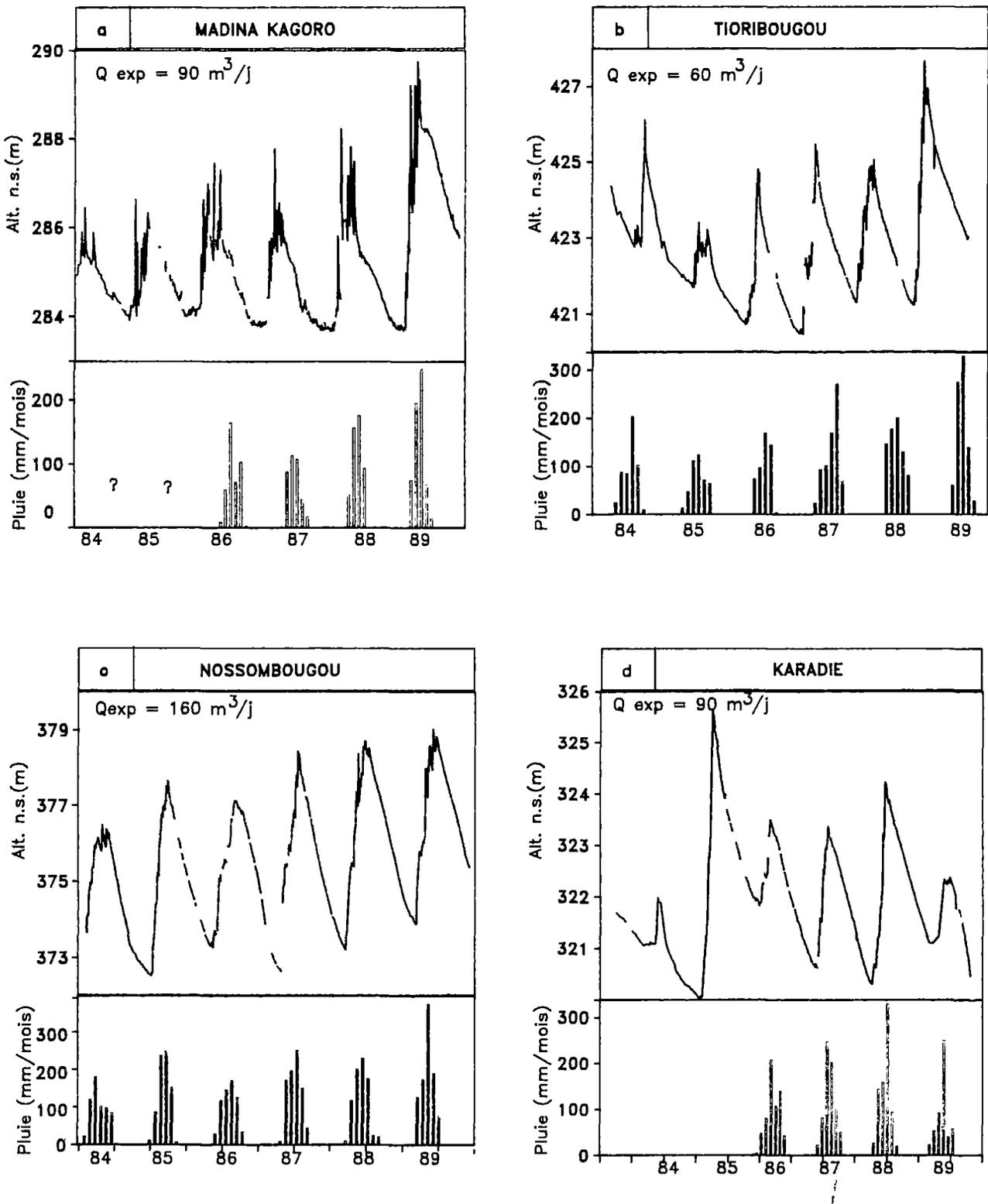


Fig. 4.11: Exemples d'évolution piezométrique des sites équipés de pompe solaire exploitant l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Ces exemples d'évolution piézométrique en régime d'exploitation montrent que, au moins pour l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire, les possibilités de développement par pompage sont importantes et très supérieures à la capacité des pompes à motricité humaine qui sont couramment installées dans le cadre des projets d'hydraulique villageoise.

4.4.3. Aquifères généralisés

Le réseau de suivi piézométrique dans ces aquifères est d'installation récente (1986-87) et ne concerne actuellement que deux unités hydrogéologiques de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire :

- le delta intérieur du Niger,
- l'Azaouad sud.

Les piézomètres, bien qu'en nombre limité (14), ont été implantés de manière à être représentatifs de différentes situations piézométriques et de permettre l'étude des relations entre eau de surface et eau souterraine.

Quelques mesures épisodiques sont aussi disponibles sur les autres aquifères généralisés du Mali.

4.4.3.1. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire du delta intérieur

Les piézomètres ont été répartis le long de profils recoupant les secteurs du delta vif et du delta fossile qui ont des caractéristiques hydrauliques et piézométriques bien différenciées (*figure 4.12*).

Les hydrogrammes présentent deux particularités que l'on ne retrouve pas sur ceux des aquifères fissurés rechargés essentiellement par l'infiltration de la pluie :

- l'amplitude des fluctuations piézométriques saisonnières est faible (de 0 à un peu plus de 1 m) et les périodes de hautes eaux souterraines sont toujours décalées de plusieurs mois par rapport à l'hivernage;
- les fluctuations piézométriques interannuelles sont en général plus marquées que les fluctuations saisonnières.

a) Secteur du delta vif (*figure 4.13a*)

Dans cette zone où le niveau d'eau est peu profond, inférieur à 5 m, l'amplitude moyenne des fluctuations saisonnières est de l'ordre du mètre. Pour les sites proches des zones d'inondation, elles doivent être supérieures et suivre en fait les variations du niveau des plans d'eau de surface. Les pluies du début d'hivernage n'ont que peu d'influence, une remontée significative du niveau piézométrique n'apparaissant qu'en août-septembre avec un maximum atteint en novembre-décembre lors de l'étale de crue du fleuve Niger. La recharge principale apparaît donc liée à la percolation des eaux de surface, la remontée s'amorçant toutefois vers le milieu de l'hivernage grâce à l'infiltration directe de la pluie.

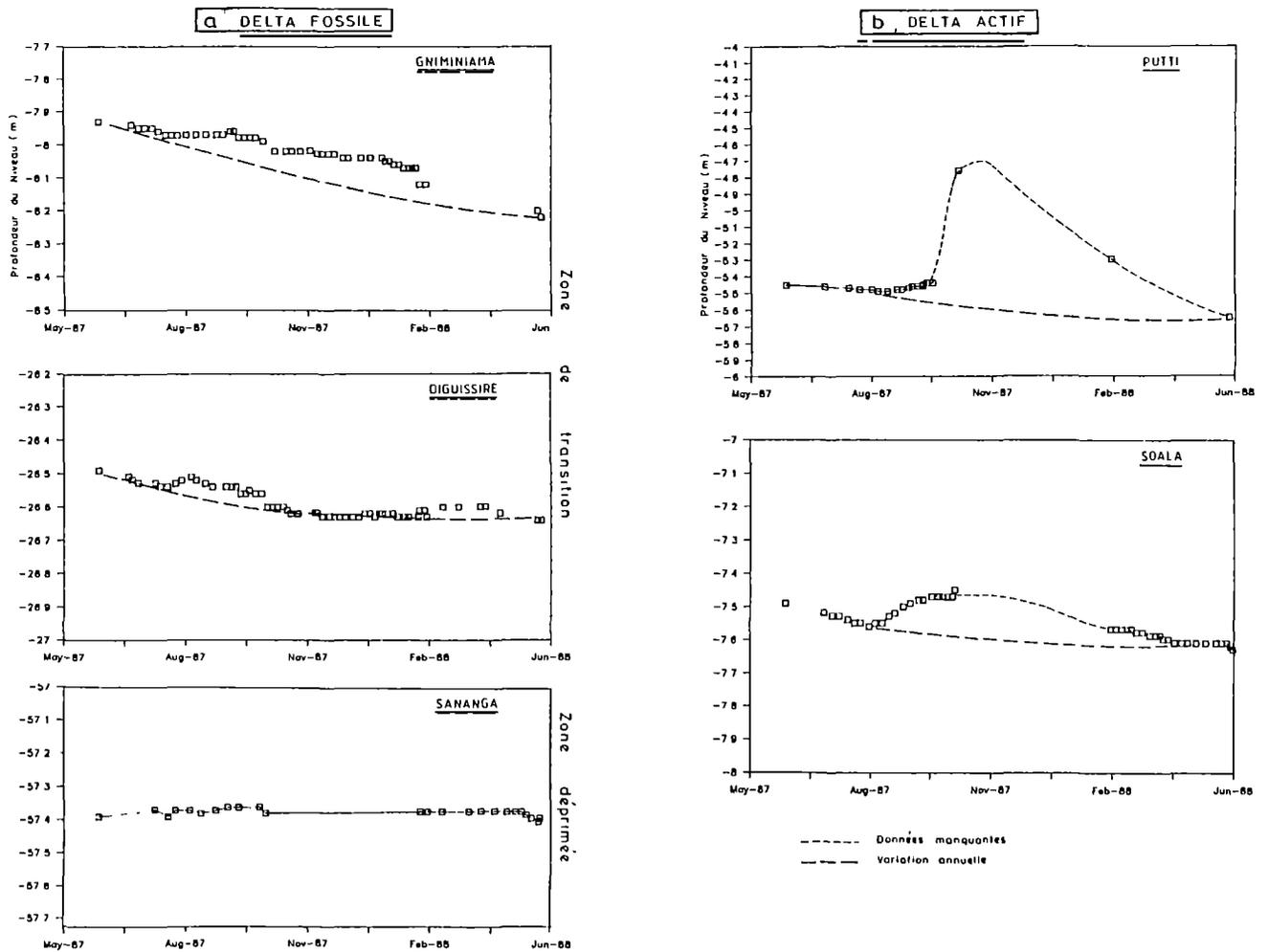


Fig 4.13 _Hydrogrammes piézométriques caractéristiques des différents secteurs hydrogéologiques du Delta intérieur du Niger

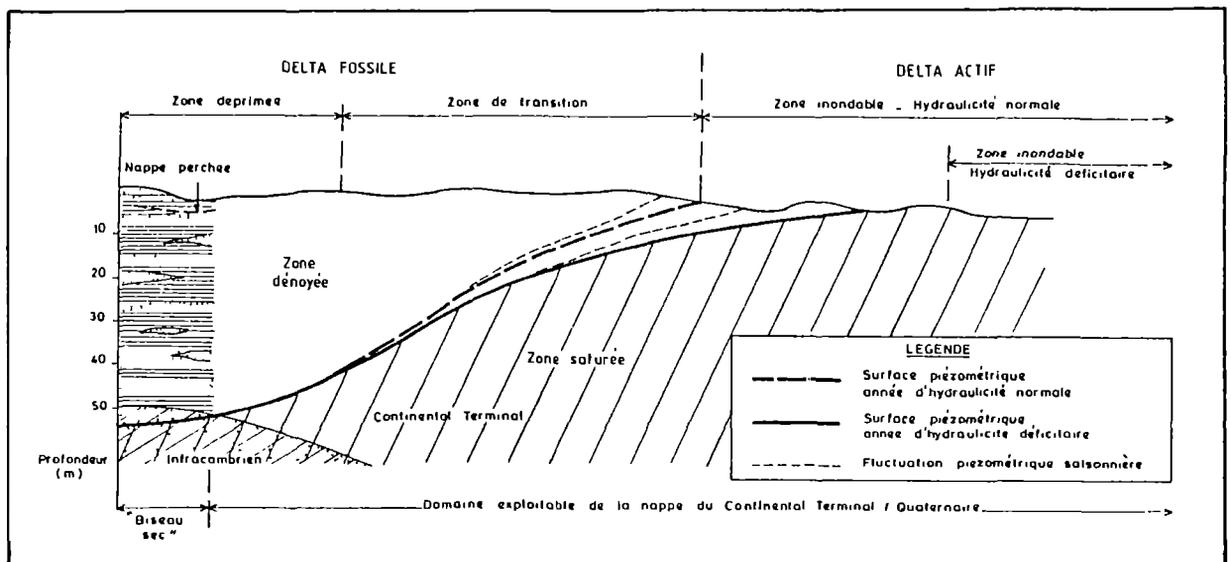


Fig 4.12 _Coupe hydrogéologique schématique de la bordure occidentale du Delta intérieur du Niger

b) Secteur du delta fossile (figure 4.13b)

La profondeur du niveau piézométrique croît régulièrement de 5 à 40 m au fur et à mesure que l'on s'éloigne du domaine lacustre actuel. Une ligne de piézomètres a été installée au travers de cette zone. Leurs hydrogrammes montrent que les fluctuations saisonnières décroissent d'amplitude lorsque la profondeur du niveau et la distance aux zones d'inondation augmentent. Cet amortissement n'est toutefois pas linéaire. Pour des niveaux entre 5 et 8 m, l'amplitude passe rapidement de 1 m à une dizaine de cm. Pour des profondeurs de niveau plus grandes, jusqu'à 25 - 30 m, l'amplitude des remontées saisonnières varie peu et est de l'ordre de quelques cm. Au-delà de 30 m de profondeur, aucune remontée significative n'a pu être mise en évidence durant la période d'observation.

Les fluctuations saisonnières ont une double origine : l'infiltration de la pluie et les transferts d'eau de surface. La part de la recharge relative à chacun de ces apports dépend de l'éloignement des zones inondées. Le piézomètre de Gniminiama où la profondeur de l'eau est inférieure à 10 m et qui est peu éloigné de la zone d'inondation, montre bien ce phénomène. La remontée de la nappe s'amorce vers la fin juillet suite aux pluies d'hivernage avec une première crue au début octobre. Après une légère baisse de niveau, une nouvelle remontée se produit en décembre-janvier qui est liée à l'arrivée de la crue des eaux de surface dans le delta.

Lorsque le niveau piézométrique est à plus de 20 m, profondeur rencontrée à environ 25 km de la zone d'inondation, l'influence saisonnière des eaux de surface devient très faible et très tardive, en mars-avril. Seule la recharge par la pluie est décelable avec des remontées de quelques centimètres au plus.

La figure 4.14 établie à partir des mesures de 1987-88 représente ces variations saisonnières de niveau en fonction de la profondeur des niveaux piézométriques et de la distance approximative à la zone d'inondation.

L'origine des fluctuations annuelles de niveau est à rechercher dans l'extension variable de la zone inondée du delta actif. Suivant les hauteurs de crue atteintes par le fleuve Niger, sa superficie change considérablement ce qui modifie d'une manière importante l'aire de recharge des aquifères sur la bordure de la zone de transition en la décalant plus ou moins vers l'est.

L'année 1987 a été précédée de deux années d'hydraulicité très déficitaire caractérisées par une extension réduite des zones inondées du delta. L'éloignement des zones de recharge et la réduction de leur superficie n'ont pas amené d'apports suffisants pour compenser la baisse naturelle des niveaux liée à l'écoulement dans la zone saturée et aux pertes par évapotranspiration dans la zone non saturée.

Une première estimation de l'infiltration directe de la pluie a été faite à partir des fluctuations piézométriques saisonnières en éliminant les remontées de niveau liées aux apports par infiltration des eaux de surface [HDG/NTL/9]. En supposant une porosité moyenne de 10 % pour les formations continentales, la lame d'eau infiltrée ayant atteint la zone saturée représenterait, suivant la profondeur de la nappe :

- 50 mm soit 10 % de la pluie, entre 5 et 8 m de profondeur,
- 10 mm soit 2 à 3 % de la pluie, entre 8 et 20 m de profondeur,
- 5 mm soit 1 % de la pluie, entre 20 et 30 m de profondeur.

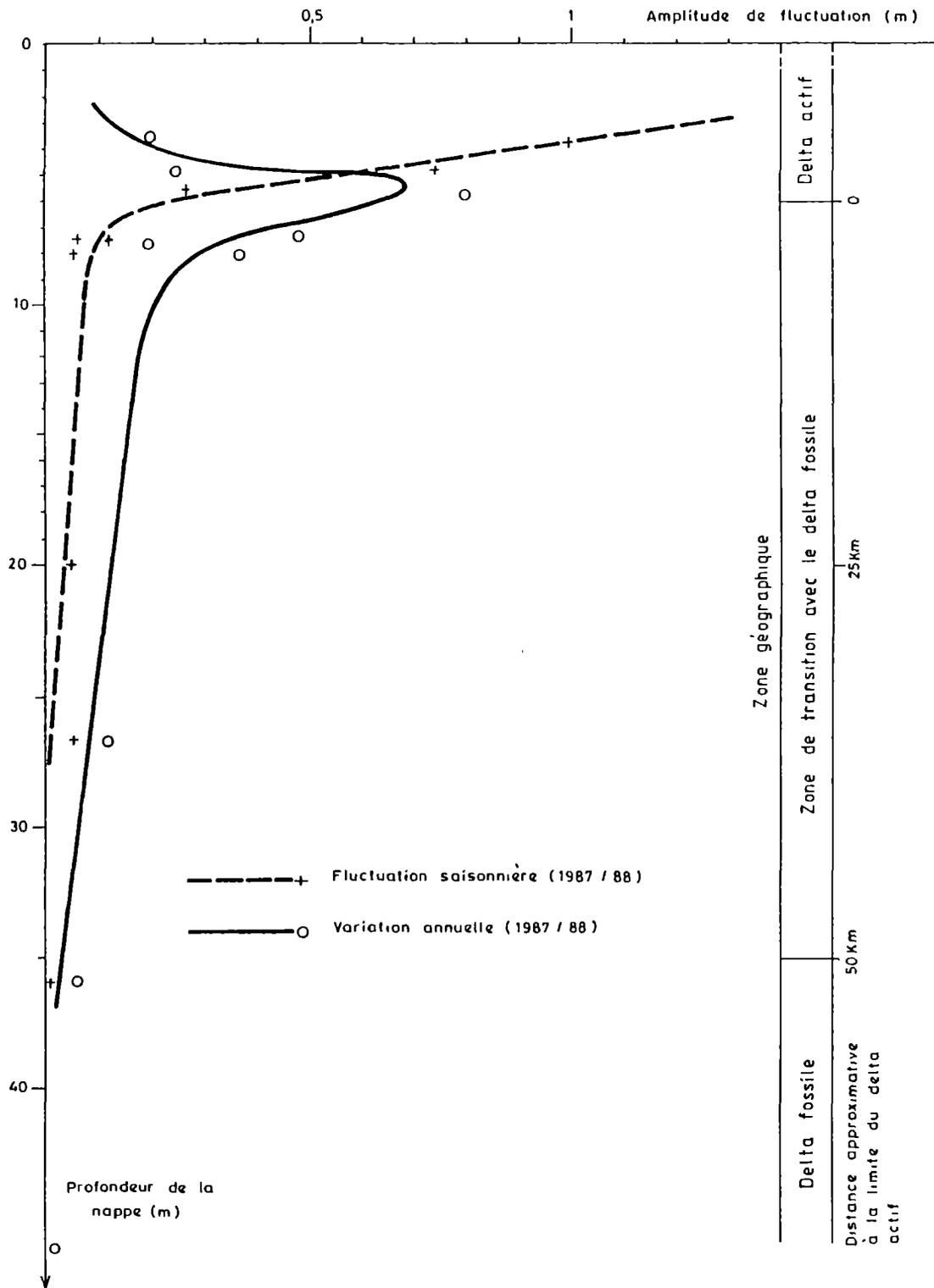


Fig 4.14 - Variations des amplitudes de fluctuation piézométrique en fonction de la profondeur de la nappe et de la distance au delta vif

Ces valeurs d'infiltration sont beaucoup plus faibles que celles estimées pour les systèmes aquifères fissurés situés dans des conditions pluviométriques équivalentes. Cette différence s'explique par la nature argileuse et silteuse des dépôts accumulés dans le delta intérieur. Cette forte proportion d'argiles a pour conséquence une faible perméabilité verticale et une capacité d'emmagasinement temporaire importante de la zone dénoyée. Il est donc logique que les apports atteignant la zone saturée soient d'autant plus réduits que le niveau piézométrique est profond.

4.4.3.2. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire de l'Azaouad sud

Le réseau piézométrique ne comporte actuellement que deux sites d'observation : Tombouctou et Agouni Gefal distants respectivement de 10 et 45 km du fleuve Niger. Ils sont situés dans une zone ensablée avec des précipitations inférieures à 200 mm.

Les eaux de surface sont d'extension réduite et limitées à la bande de plaines alluviales situées de part et d'autre du fleuve sur une largeur de 2 à 3 km au plus.

Les deux piézomètres de Tombouctou montrent des fluctuations de niveau exclusivement associés à la période de crue des eaux de surface, en décembre-janvier [HDG/NTL/7].

Sur le site d'Agouni Gefal où la profondeur du niveau piézométrique est de 40 m, les fluctuations saisonnières, si elles existent, sont du même ordre de grandeur que la précision des mesures, ± 2 cm. La variation de 6 à 7 cm du niveau, entre avril 1985 et janvier 1987, semble par contre significative. Elle témoignerait que ce site, en dépit de sa grande distance du fleuve, est encore soumis à l'influence des eaux de surface qui se seraient infiltrées lors des années de forte hydraulicité, celle-ci se faisant toutefois sentir avec un déphasage de plusieurs années au niveau d'Agouni Gefal. Les études isotopiques ont d'ailleurs mis en évidence une fraction d'eau récente dans les échantillons prélevés sur ce site (*voir chapitre 6*).

4.4.3.3. Autres aquifères généralisés

Les données piézométriques y sont encore trop fragmentaires. Pour l'aquifère du Continental intercalaire du fossé de Nara, le piézomètre de Léré, avec un niveau vers 40 m de profondeur, montre des variations de quelques centimètres seulement, voisines de la précision des mesures.

Les forages exécutés le long de la piste Tombouctou-Taoudenni dans l'aquifère du Continental intercalaire du nord de l'Azaouad, avec des niveaux entre 40 et 50 m de profondeur, ne montrent aucune variation significative depuis leur exécution en 1985.

Dans la région de Gao, les mesures piézométriques exécutées dans le cadre du projet JICA sur des forages situés à différentes distances du fleuve mettent en évidence des variations de niveau dans l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire liées aux fluctuations de niveau du Niger avec un amortissement progressif des amplitudes lorsque l'on s'éloigne du fleuve et que les niveaux d'eau s'approfondissent. Le mécanisme de recharge devrait donc être similaire à celui qui caractérise le secteur de Tombouctou et la bordure du delta actif.

4.5. CONCLUSION

L'interprétation des nombreuses données piézométriques disponibles au Mali et, en particulier, celles provenant d'un réseau de suivi des aquifères mis en place dès 1981, a permis de mettre en évidence des caractéristiques spécifiques pour les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali et les aquifères généralisés des régions de l'est et du nord du pays.

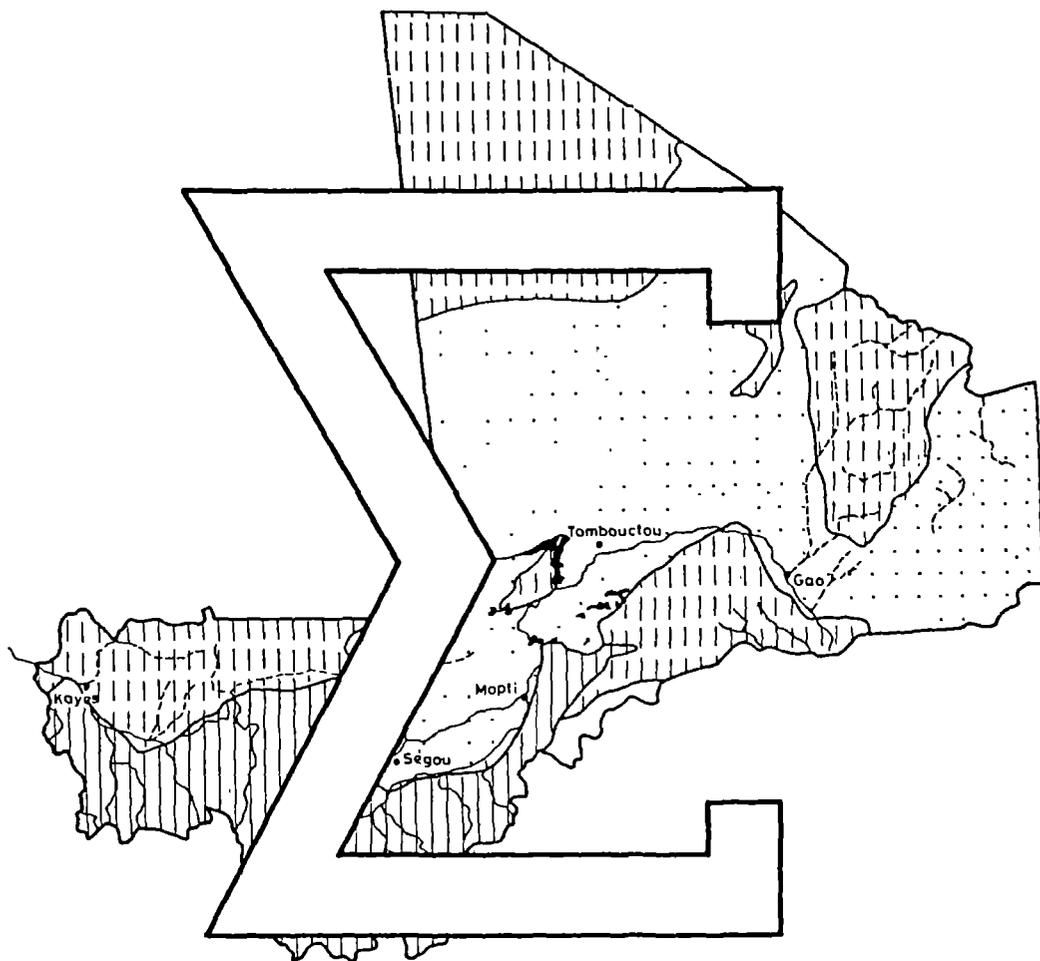
Les aquifères fissurés dans les zones climatiques soudanienne et soudano-sahélienne montrent une piézométrie élevée avec des niveaux d'eau à moins de 20 m de profondeur et des fluctuations saisonnières et annuelles de niveau importantes. Ces aquifères bénéficient, durant les hivernages, d'une recharge périodique qui dépend de la hauteur des précipitations annuelles. Les coefficients d'infiltration estimés, à l'échelle régionale, varient entre 7 et 20 %, ces valeurs incluant dans les zones soudano-sahélienne et sahélienne des apports indirects par infiltration des eaux de ruissellement. Toutefois une fraction de cette recharge, variable suivant l'épaisseur et granulométrie des altérites, et surtout en zone climatique soudanienne, est évacuée sous forme de ruissellement différé vers le réseau hydrographique et n'atteint pas le milieu fissuré profond. La recharge effective, à l'échelle locale, est cependant très supérieure à l'exploitation actuelle même sur les sites où elle dépasse actuellement 100 m³/j, les suivis piézométriques pendant plusieurs années n'ayant montré, jusqu'à présent, aucun déséquilibre permanent.

Les aquifères généralisés localisés dans les zones sahéliennes et désertiques du Mali sont caractérisés par une piézométrie déprimée avec des profondeurs de niveau d'eau en général supérieures à 40 m et des fluctuations de niveau très faibles ou non mesurables. La recharge de ces aquifères ne se produit que dans les zones d'inondation et le long des fleuves permanents par percolation des eaux de surface et par infiltration directe de la pluie dans les secteurs à surface piézométrique peu profonde. Celle-ci se réduit toutefois rapidement pour des profondeurs de niveau croissantes et devient très faible pour des niveaux piézométriques situés au-delà de 30 m, l'essentiel des eaux d'infiltration étant alors stocké dans la zone non-saturée sous la forme de nappes perchées.

CHAPITRE 4

Références bibliographiques hors projet

- [4.1] - ARCHAMBAULT, J. - Reflexions sur l'alimentation et l'évaporation des nappes phréatiques en Afrique sub-saharienne, CIEH - Mai 1986
- [4.2] - ROURE, J. - Hydrogéologie du Soudan occidental, carte au 1/1.000.000 - Serv. Hydro. AOF - 1957



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 5

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES



CHAPITRE 5

TABLE DES MATIERES

TEXTE

5.1. NATURE ET REPRESENTATIVITE DES DONNEES.....	1
5.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES GENERALES DES AQUIFERES.....	2
5.2.1. Aquifères fissurés.....	2
5.2.1.1. Aquifères du Cambrien et de l'Infracambrien.....	2
5.2.1.2. Aquifères du socle.....	3
5.2.1.3. Conclusion.....	3
5.2.2. Aquifères généralisés.....	3
5.3. STATISTIQUES SUR LE DEBIT DES FORAGES.....	4
5.3.1. Taux de réussite.....	4
5.3.2. Débits.....	7
5.3.2.1. Aquifères fissurés.....	7
5.3.2.2. Aquifères généralisés.....	10
5.4. POMPAGES D'ESSAI ET PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES.....	10
5.4.1. Origine des données.....	10
5.4.2. Méthodes d'interprétation.....	12
5.4.3. Analyse statistique des paramètres hydrauliques.....	12
5.4.3.1. Transmissivités.....	13
5.4.3.2. Coefficients d'emmagasinement.....	17
5.4.3.3. Débits spécifiques.....	18
5.5. REGIONALISATION DES TRANSMISSIVITES.....	20
5.5.1. Ajustement à des lois log-normales (méthode de Matheron).....	20
5.5.2. Cartes de transmissivité.....	23
5.6. CONCLUSION.....	25

FIGURES

Fig.5.1. Taux de réussite moyen en forages productifs (par secteur hydrogéologique).....	6
Fig.5.2. Répartition en % des débits par tranche et par type d'aquifère : a) aquifères généralisés, b) aquifères fissurés.....	8
Fig.5.3. Pourcentage des forages productifs de débit supérieur à 5 m ³ /h (par secteur hydrogéologique).....	9
Fig.5.4. Nombre de pompages d'essai (par secteur hydrogéologique).....	11
Fig.5.5. Distribution des valeurs de transmissivité par type d'aquifère : a) aquifères généralisés, b) aquifères fissurés.....	14
Fig.5.6. Débits spécifiques moyens (par secteur hydrogéologique).....	19
Fig.5.7. Moyennes géométriques des transmissivités (par unité hydrogéologique).....	21
Fig.5.8. Ajustement des distributions des transmissivités par aquifère à des lois log-normales : a) aquifère du Continental terminal/Quaternaire, b) aquifère du Cambrien, c) aquifère du Socle, d) aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	22
Fig.5.9. Exemples de cartes de transmissivité sorties par ordinateur : a) aquifère généralisé (Niono), b) aquifère fissuré (Banamba)...	24

TABLEAUX

Tab.5.1.	Données statistiques sur le taux de réussite et le débit des forages par unité hydrogéologique et système aquifère.....	4/5
Tab.5.2.	Données statistiques sur les transmissivités et les débits spécifiques par système aquifère.....	13
Tab.5.3.	Données statistiques sur les transmissivités et les débits spécifiques par unité hydrogéologique.....	15
Tab.5.4.	Données statistiques sur les coefficients d'emmagasinement S....	17
Tab.5.5.	Valeurs moyennes caractéristiques de la distribution des transmissivités par aquifère.....	20

CHAPITRE 5

CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

Les caractéristiques hydrodynamiques contrôlant l'écoulement des eaux souterraines ne sont pas seulement représentées par les seuls paramètres hydrauliques des aquifères, transmissivité et coefficient d'emmagasinement, mais aussi par le degré de continuité des horizons aquifères et par leurs relations hydrauliques avec les couches semi-perméables ou imperméables encaissantes.

5.1. NATURE ET REPRESENTATIVITE DES DONNEES

Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères ont été déterminées à partir de l'analyse de plusieurs variables hydrogéologiques issues de la banque de données SIGMA ainsi que des observations faites durant l'exécution des forages. Toutefois, ces variables intègrent de multiples facteurs parmi lesquels les paramètres hydrauliques des aquifères ont une influence plus ou moins grande. Certains, comme les variations de charge piézométrique et de débit observées à l'avancement des forages, n'ont qu'une valeur ponctuelle et principalement qualitative du point de vue de l'hydraulique souterraine. Les fluctuations piézométriques et les délais de réponse à la recharge des aquifères donnent également des indications sur les conditions physiques qualitatives de gisement des nappes et d'écoulement souterrain à l'échelle régionale, mais, seuls, les pompages d'essai permettent de calculer les paramètres hydrauliques des aquifères.

Cette approche diversifiée qui fait largement appel à l'analyse statistique, est rendue nécessaire par la forte hétérogénéité des aquifères, notamment ceux de type fissuré, et par le petit nombre d'essais atteignant la qualité standard (longue durée, débit constant, mesures sur piézomètres), nombre insuffisant pour être réellement représentatif de la diversité des conditions hydrogéologiques rencontrées au Mali.

Dans ce chapitre, seront successivement présentés :

- une analyse des conditions hydrodynamiques générales des principaux aquifères,
- les données statistiques sur le débit des forages,
- les résultats des pompages d'essai et l'analyse statistique par subdivision hydrogéologique, des paramètres hydrodynamiques.

Les données de débit sont de précision variable suivant les projets ayant exécuté les forages. Il s'agit, en général, de débits stabilisés mesurés à la fin de la phase de développement de l'ouvrage sans indications sur les niveaux rabattus correspondants.

Les pompages d'essai sont constitués, pour une large majorité, d'essais de production de courte durée exécutés pour la réception des forages [HDG/NTL/12].

5.2. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES GENERALES DES AQUIFERES

Les observations et les mesures faites à l'avancement des forages ainsi que les suivis piézométriques apportent des informations sur les conditions de gisement des eaux souterraines, sur les gradients hydrauliques verticaux et sur les relations entre les horizons perméables d'une part et les couches semi-perméables ou imperméables encaissantes d'autre part. Ces informations, complétées par les données géologiques, permettent de faire le choix de la méthode la plus appropriée pour l'interprétation des pompages d'essai et d'expliquer certaines particularités de l'évolution des rabattements observés durant les essais.

La foration au marteau fond-de-trou et à l'air comprimé provoque une exhaure de l'eau à l'avancement qui représente, en quelque sorte, un pompage de courte durée à débit variable selon les différentes venues d'eau recoupées en cours de foration.

L'infiltration saisonnière est, par contre, assimilable à un essai de recharge de longue durée à débit variable puisque les fluctuations piézométriques intègrent les transferts hydrauliques, verticaux et latéraux, qui se produisent à l'intérieur d'une zone dont l'extension est très supérieure à celle déterminée par le rayon d'influence du pompage.

5.2.1. Aquifères fissurés

Le nombre et le débit des venues d'eau recoupées par les forages ainsi que leur distribution en profondeur sont très variables selon les aquifères, entre les sites d'un même aquifère et entre les forages d'un même site.

Les observations faites sur les forages (*chapitre 3*) et le résultat des suivis piézométriques (*chapitre 4*) peuvent se résumer comme suit pour les principaux aquifères.

5.2.1.1. Aquifères du Cambrien et de l'Infracambrien

Les aquifères contenus dans les formations sédimentaires anciennes en disposition tabulaire sont caractérisés par les points communs suivants :

- les venues d'eau sont généralement étagées en profondeur, mais les différences de charge hydraulique entre ces venues d'eau sont peu importantes, en général inférieures à 1 mètre;
- lorsque des différences de charge existent, elles décroissent avec la profondeur, les zones fissurées superficielles ayant des niveaux piézométriques plus élevés que ceux des zones fissurées profondes (écoulement vertical "per descensum");
- les niveaux phréatiques de l'aquifère superficiel sont généralement proches des niveaux piézométriques de l'aquifère fissuré sous-jacent ou légèrement supérieurs, notamment durant l'hivernage;
- le réseau principal de fracturation où se localisent les venues d'eau les plus importantes mesurées dans les forages, est complété par un réseau secondaire de fissuration, de perméabilité plus réduite, qui se manifeste par une augmentation, faible mais progressive, des débits (milieu à double perméabilité).

Les zones perméables sont donc en général interconnectées du point de vue hydraulique aussi bien au sein de l'aquifère fissuré qu'entre l'aquifère fissuré et l'aquifère superficiel. Les couches apparemment stériles (dolérites et grès massifs, séquences schisteuses ou argilites épaisses) ne constituent donc pas, sinon localement, des barrières étanches.

5.2.1.2. Aquifères du socle

Les aquifères associés aux formations de socle présentent les caractéristiques communes suivantes :

- les venues d'eau principales recoupées par les forages sont presque exclusivement localisées à la base des profils d'altération, sous 20 à 30 m d'arènes argileuses, et dans la frange altérée et fissurée du substratum;
- l'observation de l'évolution piézométrique de l'aquifère superficiel montre des amplitudes différentes et surtout asynchrones par rapport à l'évolution de l'aquifère profond généralement exploité par les forages, ces deux phénomènes étant liés à la faible perméabilité des arènes argileuses.

5.2.1.3. Conclusion

Les aquifères fissurés représentent donc, du point de vue hydraulique, des systèmes de type semi-captif, à confinement plus marqué pour l'aquifère du socle que pour les aquifères de l'Infracambrien et du Cambrien, et à double perméabilité macro et microfissurale (avec encaissant rocheux peu perméable) ou à double porosité mixte fissurale/intergranulaire (avec encaissant lui-même perméable).

5.2.2. Aquifères généralisés

Ils constituent des systèmes aquifères multicouches (*chapitre 3*) qui, du fait de la disposition en général lenticulaire des horizons perméables et de la nature récurrente des séquences de dépôts, ont les caractéristiques communes suivantes :

- les couches perméables sont étagées avec des variations latérales importantes de leurs caractéristiques hydrauliques;
- les couches intermédiaires, semi-perméables, sont lenticulaires et hétérogènes, les séquences argileuses épaisses et homogènes n'étant rencontrées que localement;
- les différences de niveau piézométrique entre les différentes couches aquifères sont en général très peu marquées.

Ces caractéristiques sont celles d'un système aquifère semi-libre, au moins dans sa partie supérieure qui est la seule à être actuellement exploitée par les forages. Des horizons aquifères profonds captifs ont toutefois été identifiés dans le Continental intercalaire du bassin Mali-Niger où un artésianisme peut se produire localement dans les points bas.

5.3. STATISTIQUES SUR LE DEBIT DES FORAGES

Les données sur les débits sont saisies dans le fichier FORAGES de la banque SIGMA. Elles ont été traitées d'abord de façon globale, puis par subdivisions hydrogéologiques (secteur, unité et aquifère) et enfin, pour les aquifères fissurés, par classe lithologique.

5.3.1. Taux de réussite

La DNHE a fixé la norme de débit stabilisé à un minimum de 1 m³/h pour les forages d'hydraulique villageoise à équiper avec une pompe à motricité humaine (PMH). Sont donc considérés comme productifs tous les ouvrages ayant atteint ou dépassé ce débit. Le taux de réussite est défini par le rapport entre le nombre de forages productifs et le nombre total de forages pour une zone déterminée.

Il est considéré généralement comme un bon indicateur des conditions régionales de perméabilité. Ainsi, un taux de réussite élevé peut dénoter une fissuration active bien développée en réseaux interconnectés tandis qu'un faible taux de réussite caractérise, en général, une fissuration localisée et irrégulièrement distribuée à l'échelle régionale.

Les valeurs du taux de réussite dans les aquifères généralisés sont moins significatives que dans les aquifères fissurés car la plupart des forages déclarés négatifs sont en fait des forages positifs abandonnés à cause de problèmes techniques (éboulements surtout) et non en raison d'un débit trop faible.

Le taux de réussite moyen par secteur hydrogéologique est représenté dans la figure 5.1. Les valeurs moyennes par aquifère et par unité hydrogéologique sont récapitulées dans le tableau 5.1 avec les débits moyens et maxima et leur distribution par tranche de débit.

Tableau 5.1 - Données statistiques sur le taux de réussite et le débit des forages par unité hydrogéologique et par système aquifère

UNITE HYDRO- GEOLOGIQUE ET AQUIFERE	TAUX DE REUSSITE (%)	DEBIT (m ³ /h)		DISTRIBUTION (%) par tranche de débit en m ³ /h					
		MAX.	MOYEN	1 à 5	5 à 10	10 à 20	20 à 30	30 à 50	> 50
CTQ12	85,7	36,8	8,8	35,0	23,0	40,0	0,0	2,0	0,0
CTQ13	90,7	72,0	18,0	13,0	22,0	34,0	12,0	12,0	7,0
CTQ14	88,2	99,2	23,1	9,0	31,0	20,0	13,0	18,0	9,0
CTQ15	83,3	100,0	7,1	54,0	25,0	13,0	3,0	4,0	1,0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CTQ	84,0	100,0	9,0	49,3	24,9	15,7	3,5	5,1	1,5
CSE21	72,0	72,0	7,3	46,0	37,0	15,0	0,0	0,0	2,0
CIT31	86,5	33,6	9,8	25,0	31,0	38,0	3,0	3,0	0,0
CIT32	73,3	50,0	11,6	30,0	25,0	31,0	7,0	5,0	2,0
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
CIT	78,4	50,0	10,0	27,7	27,6	34,2	5,3	3,9	1,3

Tableau 5.1 - (Suite)

UNITE HYDRO- GEOLOGIQUE ET AQUIFERE	TAUX DE REUSSITE (%)	DEBIT (m ³ /h)		DISTRIBUTION (%) par tranche de débit en m ³ /h					
		MAX.	MOYEN	1 à 5	5 à 10	10 à 20	20 à 30	30 à 50	> 50
CIN41	80,0	18,0	12,8	25,0	0,0	75,0	0,0	0,0	0,0
CIN42	16,7	1,1	1,1	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CIN	45,5	18,0	10,4	40,0	0,0	60,0	0,0	0,0	0,0
PRI51	57,1	50,0	16,6	40,0	0,0	40,0	0,0	0,0	20,0
CAM61	40,7	90,0	6,8	62,0	21,0	11,0	3,0	2,0	1,0
CAM62	48,4	72,0	5,9	68,0	16,0	12,0	2,0	1,0	1,0
CAM	45,0	90,0	6,3	65,1	17,9	11,2	2,6	1,8	1,4
ICT71	56,5	36,0	5,5	58,0	27,0	12,0	2,0	1,0	0,0
ICT72	75,4	100,0	5,0	68,0	20,0	8,0	2,0	1,0	1,0
ICT73	80,1	158,0	5,7	64,0	22,0	9,0	2,0	2,0	1,0
ICT74	63,6	52,2	4,7	69,0	20,0	10,0	1,0	0,0	0,0
ICT75	67,7	47,0	4,6	62,0	30,0	7,0	1,0	0,0	0,0
ICT76	67,5	120,0	8,8	58,0	20,0	11,0	5,0	4,0	2,0
ICT77	76,6	72,0	8,4	48,0	29,0	12,0	6,0	4,0	1,0
ICT	70,9	158,0	5,6	64,6	22,6	9,0	2,0	1,3	0,5
ICP81	76,9	28,0	8,5	43,0	27,0	20,0	10,0	0,0	0,0
ICP82	46,8	34,3	6,7	50,0	25,0	22,0	0,0	3,0	0,0
ICP83	47,7	27,7	6,5	55,0	29,0	6,0	10,0	0,0	0,0
ICP	50,4	34,3	7,0	50,3	25,7	18,7	3,5	1,8	0,0
SOC91	40,0	12,6	4,3	62,0	32,0	6,0	0,0	0,0	0,0
SOC92	69,4	60,0	5,5	64,0	19,0	13,0	3,0	1,0	0,0
SOC93	68,5	25,2	4,2	71,0	18,0	10,0	1,0	0,0	0,0
SOC94	70,2	100,0	5,9	64,0	18,0	14,0	1,0	3,0	0,0
SOC95	59,3	45,0	4,4	78,0	12,0	8,0	0,0	2,0	0,0
SOC96	43,2	100,0	6,5	53,0	28,0	16,0	0,0	2,0	1,0
SOC	63,8	100,0	5,3	65,7	19,3	12,4	1,0	1,4	0,2
MALI	66,5	158,0	6,2	62,0	22,0	11,0	2,0	2,0	1,0

Les taux de réussite les plus élevés, supérieurs à 80 % et proches de 100 % dans plusieurs secteurs, sont rencontrés dans l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger et dans l'aquifère du Continental intercalaire du nord de l'Azaouad. Pour les autres aquifères généralisés, les taux sont moins élevés, compris entre 70 et 80 %, car leur continuité hydraulique diminue sur les bordures des bassins du fait de la réduction d'épaisseur des dépôts continentaux et de la prédominance des faciès argileux.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

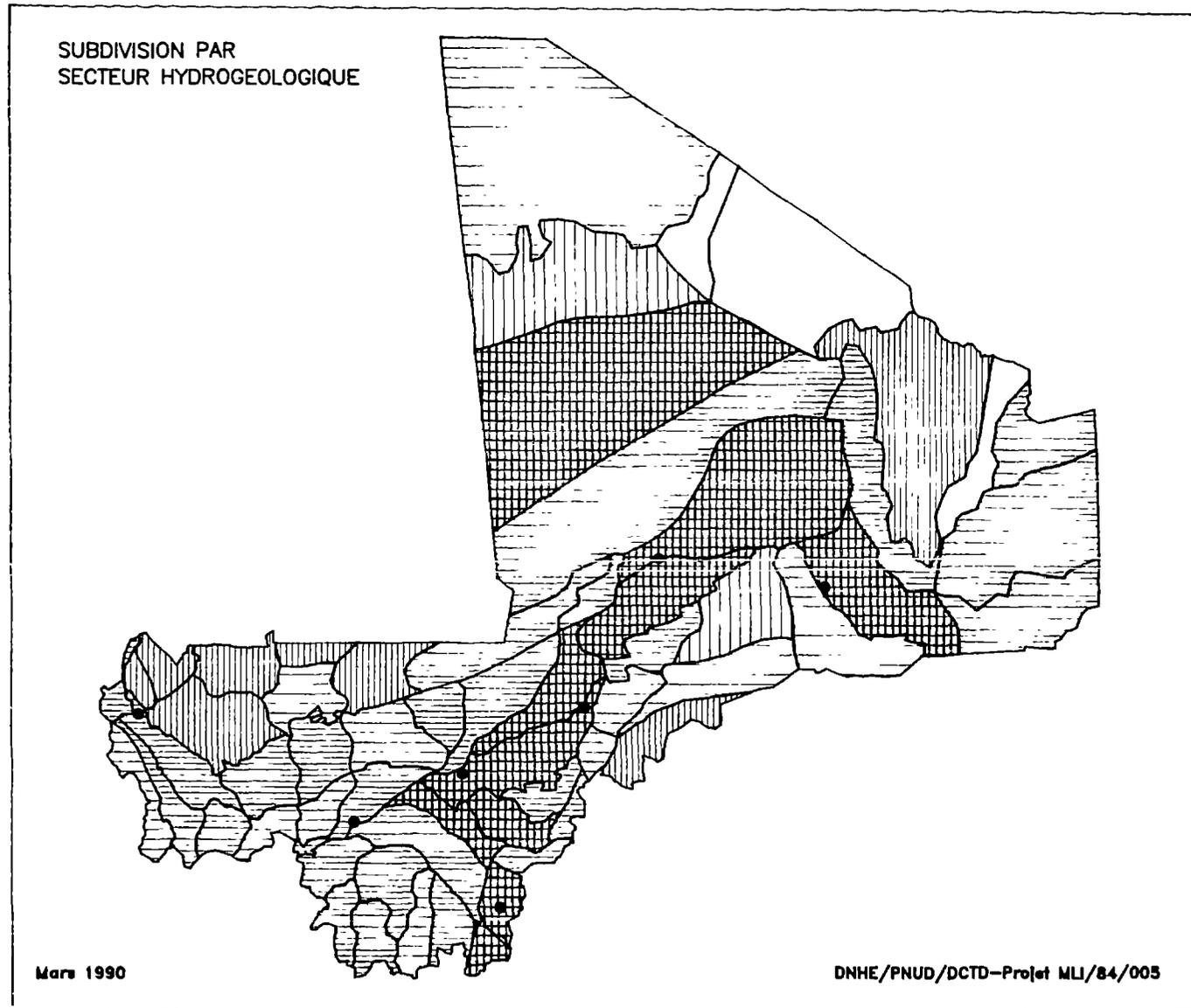
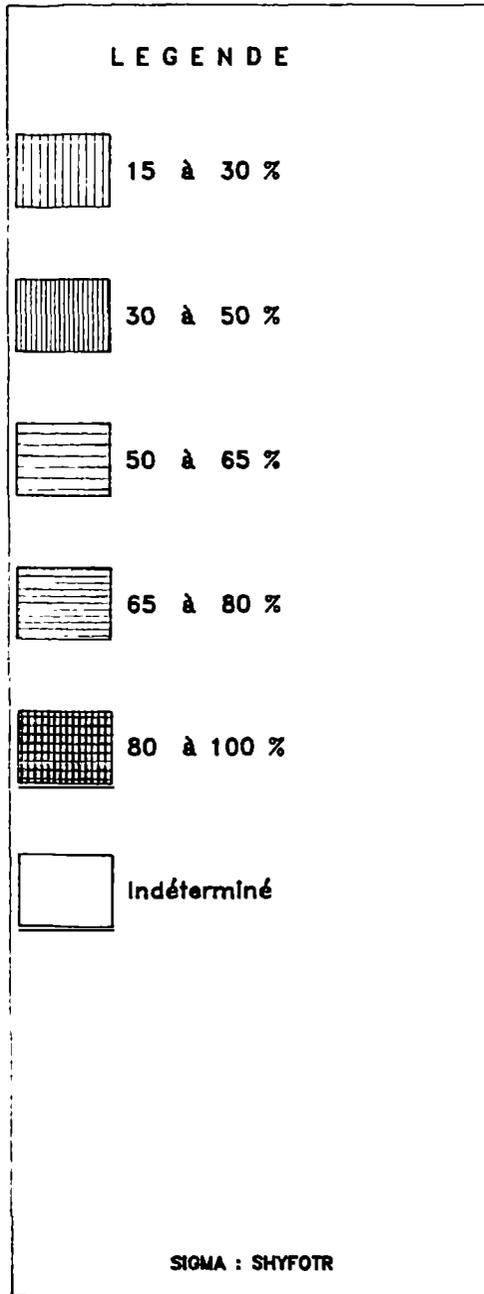


Fig. 5.1 **TAUX DE REUSSITE MOYEN EN FORAGES PRODUCTIFS**
 Nombre total de forages productifs/Nombre total de forages (X)

Des taux de réussite supérieurs à 80 % (jusqu'à 86 %) sont aussi rencontrés dans plusieurs secteurs de l'Infracambrien tabulaire associés aux plateaux gréseux situés au sud du fleuve Niger. Ils indiquent une extension généralisée des réseaux fissurés. Toutefois, les taux de réussite dans les aquifères fissurés sous aquifère superficiel sont en général compris entre 60 et 70 %.

Le caractère nettement discontinu des aquifères fissurés se traduit par des taux de réussite inférieurs à 50 % rencontrés dans les aquifères de l'Infracambrien plissé et du Cambrien du fait d'une lithologie schisteuse dominante ou comportant des intrusions doléritiques massives. Certaines unités de l'aquifère du socle dépourvues d'un aquifère superficiel sont dans le même cas.

5.3.2. Débits

L'analyse statistique des débits a porté sur les données de 8.480 forages productifs dont 1.318 forages dans les aquifères généralisés et 7.162 forages dans les aquifères fissurés.

Le débit donne une première indication sur la perméabilité de l'aquifère au voisinage immédiat du forage. Cependant, les pertes de charge liées aux caractéristiques techniques de l'ouvrage ou à son développement souvent insuffisant peuvent donner une fausse image des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère avec une sous-estimation de son potentiel d'exploitation. Par ailleurs, les débits obtenus dans les forages exploitant les aquifères généralisés profonds ne représentent, le plus souvent, qu'une fraction des débits réels car les dispositifs de pompage utilisés (pompe de \varnothing 4" ou émulseur) ne permettent pas de soutirer des débits élevés lorsque les niveaux d'eau sont situés à plus de 40 m de profondeur.

5.3.2.1. Aquifères fissurés

Les débits moyens et maxima des aquifères fissurés et de leurs unités hydrogéologiques ainsi que les fréquences de distribution par tranche de débit (*tableau 5.1*) montrent une relative homogénéité en dépit de leur grande diversité lithologique et structurale. Ils sont aussi du même ordre de grandeur que les débits moyens obtenus sur les mêmes types d'aquifères des autres pays de l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire et Burkina Faso notamment).

Les débits moyens sont compris entre 5 et 6 m³/h et varient de 4 à 9 m³/h selon les unités hydrogéologiques.

Les débits maxima peuvent, par contre, être très différents d'une unité à l'autre : de 13 m³/h à plus de 100 m³/h. D'une manière générale, c'est dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire que les débits les plus élevés ont été mesurés, le maximum ayant été obtenu dans un forage près de Sikasso (158 m³/h), et les plus faibles dans l'aquifère du socle granitique.

Les fréquences de distribution des débits par tranche, sans être identiques, présentent néanmoins beaucoup de similitudes (*figure 5.2b*), avec notamment :

- une nette prédominance des débits inférieurs à 5 m³/h, obtenus dans près de 2/3 des forages productifs,
- une proportion d'ouvrages de débits supérieurs à 20 m³/h de 4 % en moyenne, mais qui peut dépasser 10 % dans certaines unités (*chapitre 3 et figure 5.3*).

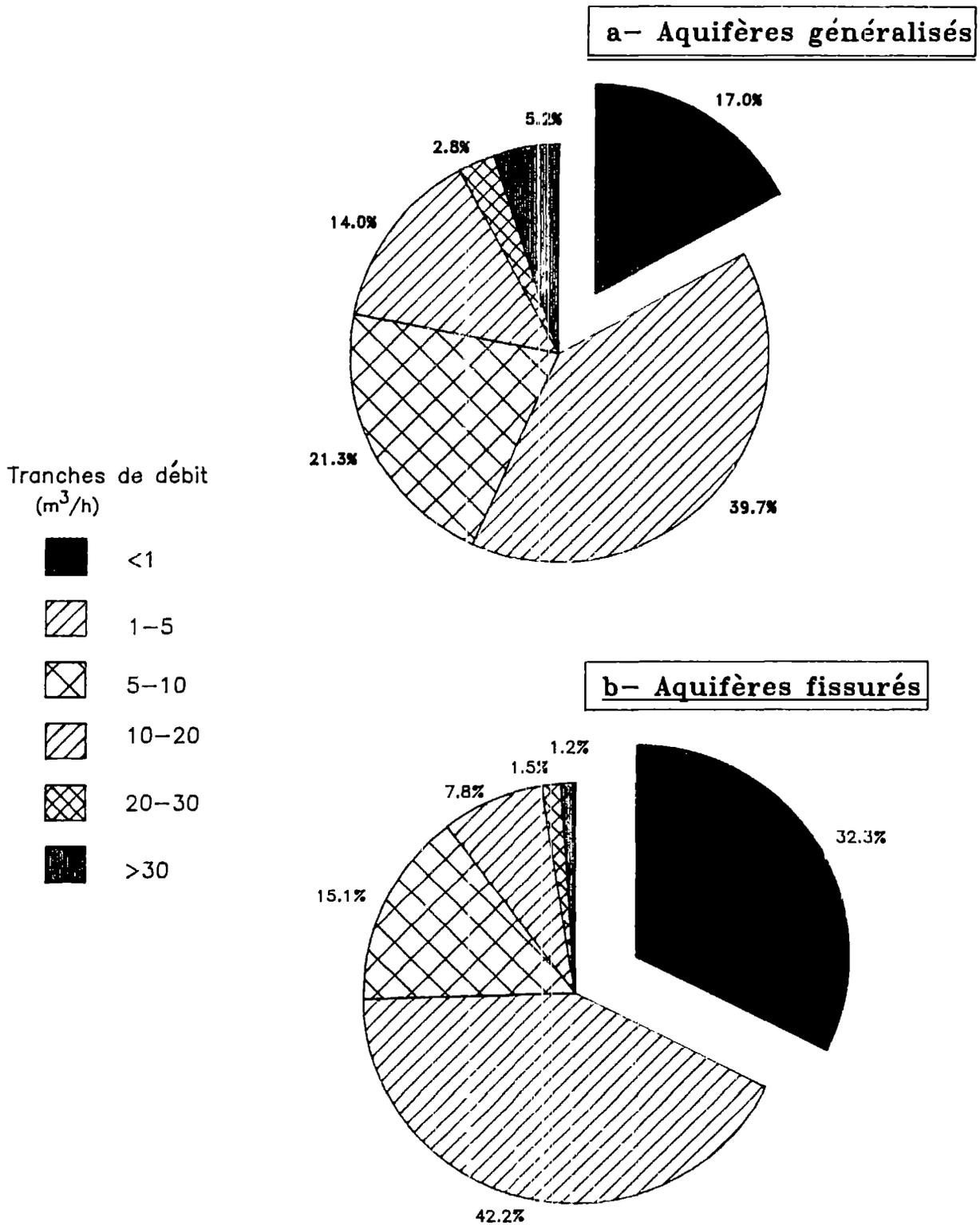


Figure 5.2: Répartition en % des débits par tranche et par type d'aquifère

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

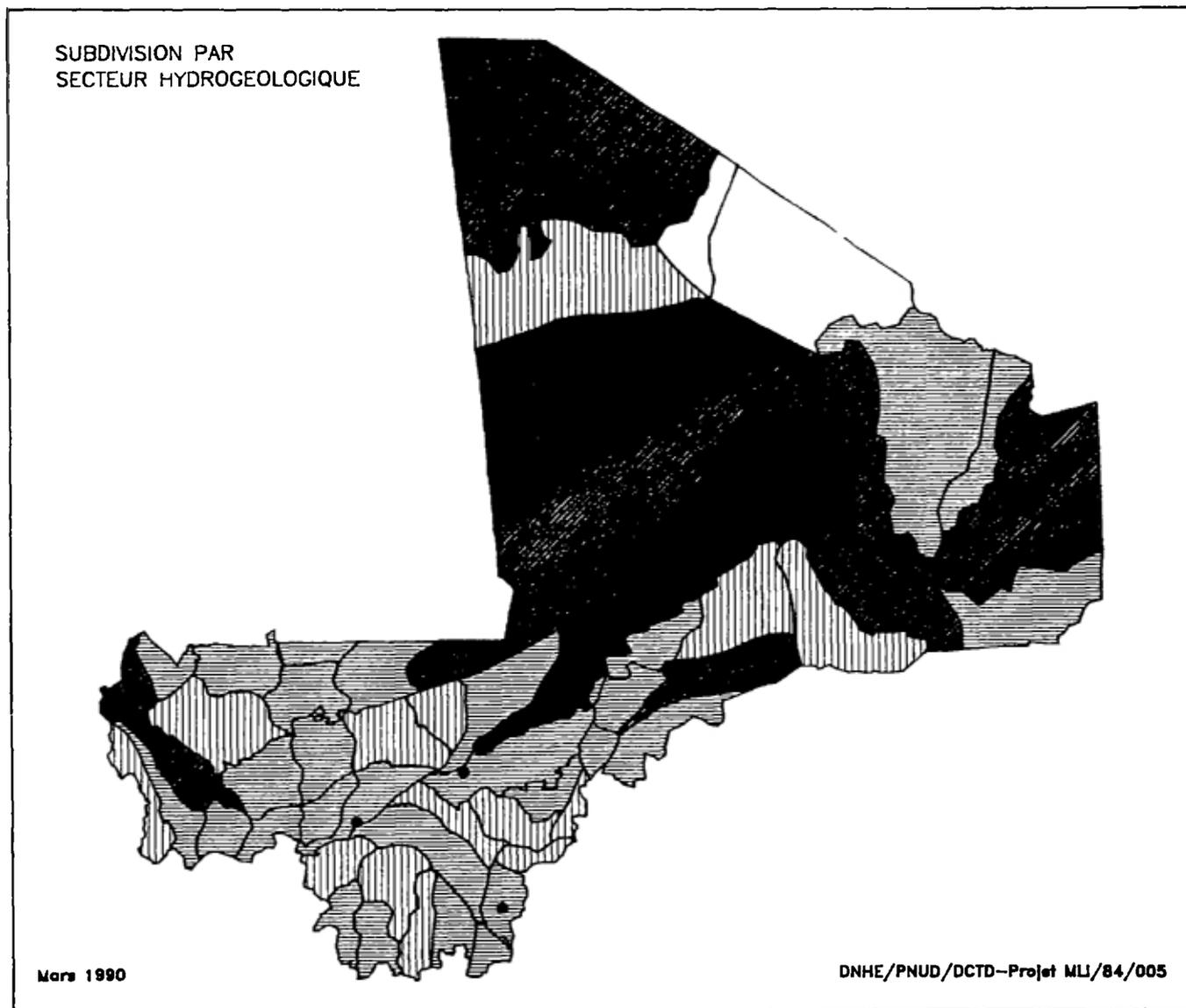
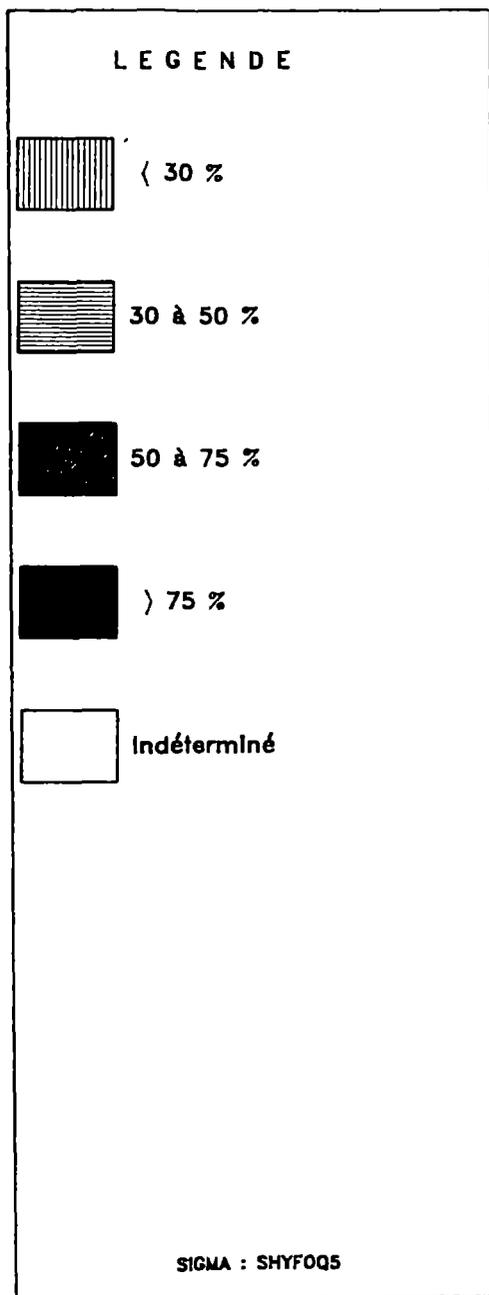


Fig. 5.3 POURCENTAGE DES FORAGES PRODUCTIFS DE DEBIT > 5 m³/h

5.3.2.2. Aquifères généralisés

Les débits moyens mesurés dans les forages exploitant les aquifères généralisés ne correspondent pas, pour les raisons indiquées précédemment, à leur capacité réelle qui est nettement plus élevée dans ce type d'aquifère par rapport à celle du milieu fissuré.

Cependant, même avec cette sous-estimation, le plus petit débit moyen (7,7 m³/h dans l'aquifère du Crétacé supérieur / Eocène inférieur) est encore supérieur au meilleur débit moyen des aquifères fissurés (figure 5.2a). Dans les formations continentales, le plus petit débit moyen dépasse 10 m³/h. Mais c'est surtout dans la fréquence des débits que la différence est la plus marquée : plus de 55 % des forages ont un débit supérieur à 5 m³/h et plus de 23 % à 20 m³/h.

La carte (figure 5.3) représentant le pourcentage de forages productifs de débit supérieur à 5 m³/h par secteur hydrogéologique montre que, dans la plupart des régions du Mali, au moins 30 % des forages productifs exécutés dans les aquifères fissurés pourraient être équipés d'un moyen d'exhaure débitant suffisamment pour justifier des projets intégrés de développement. Il en est de même pour la majorité des forages exploitant les aquifères généralisés. Même dans les secteurs où les réseaux de fissuration sont moins développés, le pourcentage de forages à débit supérieur à 5 m³/h descend rarement au-dessous de 20 %.

5.4. POMPAGES D'ESSAI ET PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

5.4.1. Origine des données

Les données des pompages d'essai proviennent en majorité d'essais de production de courte durée (2 à 6h) exécutés pour la réception des forages d'hydraulique villageoise et la détermination de la cote d'installation de la pompe manuelle. Ces essais ont été conduits selon la procédure classique des essais à débit constant ou en paliers de débit sans piézomètres. Les niveaux dynamiques ont été mesurés durant les phases de descente et de remontée jusqu'au retour au niveau statique initial. Ces essais représentent une masse considérable d'informations, en particulier pour l'étude des transmissivités des aquifères, même si les valeurs obtenues ne sont que des ordres de grandeur compte tenu de l'absence de piézomètres de contrôle et de la courte durée du pompage.

Les essais de longue durée et à débit constant ont été presque exclusivement réalisés dans le cadre des activités d'études et de reconnaissance des projets PNUD/DCTD/MLI/82/005 et MLI/84/005. Ils ont en général été exécutés sur 12 à 72 heures de pompage avec observation des niveaux d'eau dans un ou plusieurs piézomètres, permettant une détermination beaucoup plus précise des paramètres hydrauliques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement) et constituant ainsi des essais de référence pour les aquifères concernés.

Les caractéristiques des pompages d'essai et les résultats de leur interprétation ont été saisis dans le fichier "POMPAGES" de la banque SIGMA et édités dans un répertoire [INF/RPT/3]. Le fichier comporte d'une part les données de base (géométrie et équipement de l'ouvrage, type d'essai réalisé, durée, débit et rabattement à la fin de chaque palier ou de l'essai de longue durée), d'autre part les paramètres hydrauliques calculés (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, débit spécifique et débit exploitable) avec mention de la méthode d'interprétation. Des indications complémentaires sont également fournies décrivant le type d'évolution des niveaux en début et en fin d'essai (stabilisés, pseudo-stabilisés ou transitoires).

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

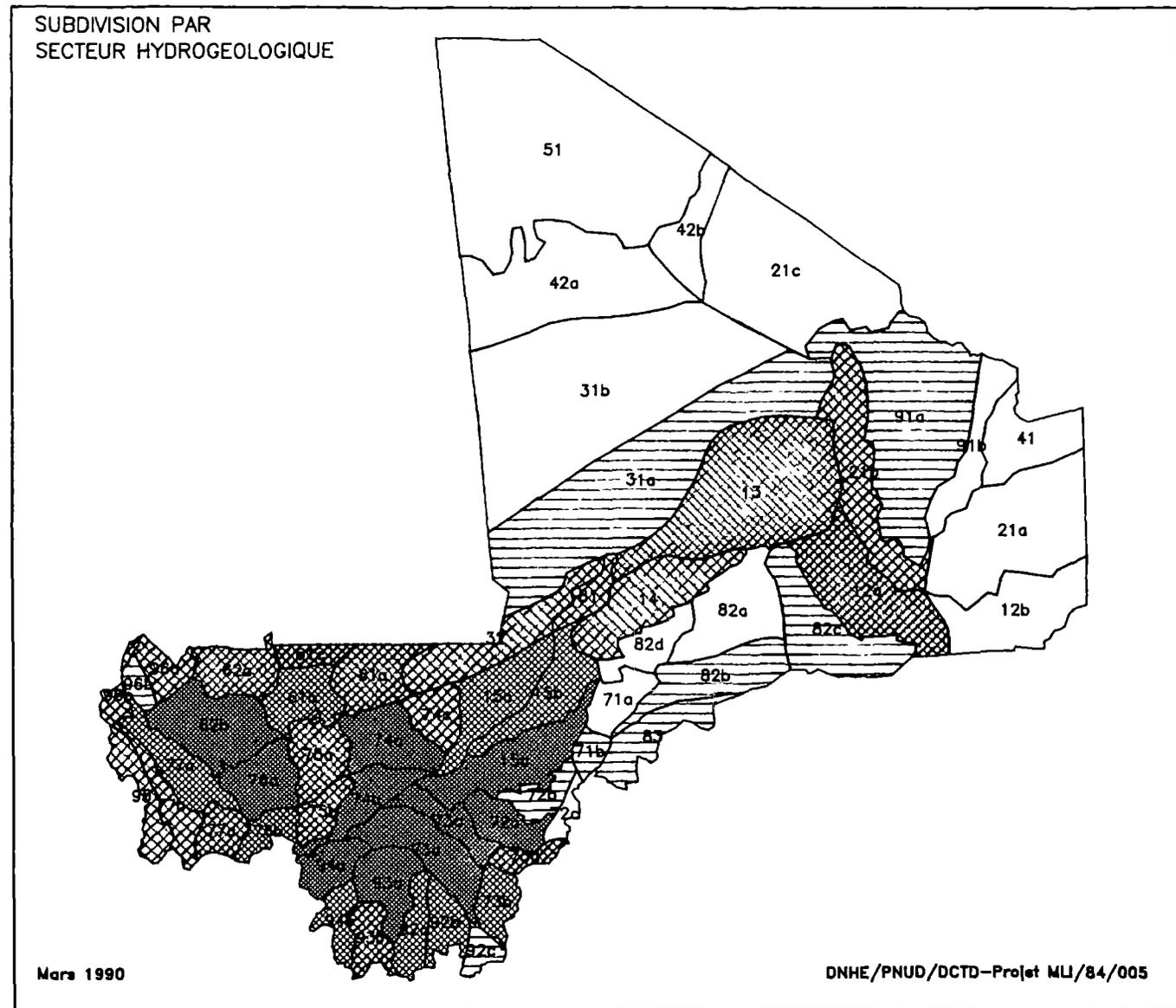
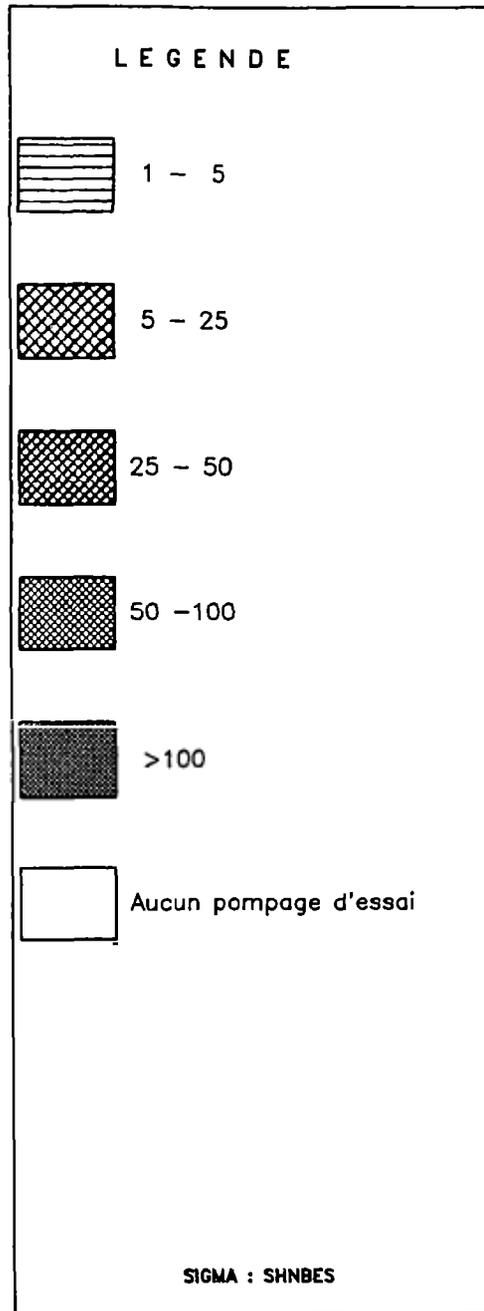


Fig. : 5.4 NOMBRE DE POMPAGES D'ESSAI

Le fichier "POMPAGES" comporte actuellement les données de 3.696 essais réalisés sur 3.249 forages, soit un peu moins de 40 % des forages productifs testés. Parmi ces essais, 80 % portent sur les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali. Leur répartition géographique suivant les secteurs hydrogéologiques est indiquée dans la figure 5.4. Les essais de référence et les essais de réception sont en nombre équivalent (1.857 contre 1.839) mais seulement 134 essais avec piézomètres ont été réalisés.

5.4.2. Méthodes d'interprétation

Environ 1.300 essais, interprétés par les différents projets qui les avaient réalisés, sont des essais de 2 à 3 paliers enchaînés d'une durée de 1 à 2 h chacun et à débit croissant. La méthode d'approximation logarithmique de Jacob a été systématiquement utilisée pour le calcul des transmissivités. Certains projets ont déterminé les pertes de charge, supposées quadratiques, liées au forage après correction des rabattements mesurés à la fin de chaque palier pour limiter l'effet des paliers antérieurs. Ces pertes de charge ainsi que les fluctuations saisonnières du niveau des nappes ont été prises en compte pour la détermination du débit exploitable des forages [5.1].

Le projet MLI/84/005 a réinterprété ou corrigé 600 de ces essais pour lesquels l'interprétation manquait d'homogénéité (en particulier au niveau de l'ajustement de la courbe de descente sur la droite de Jacob). Par ailleurs, près de 1.900 essais pour lesquels les données étaient disponibles mais qui n'avaient pas été interprétés ou dont les résultats n'étaient pas encore archivés à la DNHE, ont été analysés selon 4 méthodes en fonction de l'allure des courbes de descente et de remontée, de la durée des essais et des conditions hydrogéologiques locales :

- la méthode de Jacob a été le plus souvent adoptée pour la détermination de la transmissivité à partir des phases de descente et de remontée. Par contre, le coefficient d'emmagasinement n'a pas été calculé lorsque les mesures de niveau étaient effectuées dans le forage d'essai lui-même;
- la méthode de Theis, avec ajustement sur la courbe type, n'a été utilisée que pour les essais de longue durée à débit constant et mesures sur des piézomètres voisins, ce qui a permis, ainsi qu'avec les deux suivantes, de calculer le coefficient d'emmagasinement;
- la méthode d'Hantush a été en général utilisée lorsqu'en fin d'essai une tendance vers une pseudo-stabilisation se manifestait, une stabilisation effective n'ayant été atteinte que pour quelques essais de longue durée dans l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire;
- la méthode de Boulton, plus rarement appliquée, a servi seulement à l'interprétation des essais de longue durée dont la courbe de descente avait une forme en S.

L'interprétation d'un certain nombre d'essais par les méthodes de Theis et de Hantush a été faite sur ordinateur à l'aide du logiciel MWELLS (FRANLAB - France) qui permet la superposition des courbes types et des courbes mesurées.

5.4.3. Analyse statistique des paramètres hydrauliques

Elle concerne essentiellement les valeurs de la transmissivité et du débit spécifique et a été traitée par aquifère, unité et secteur hydrogéologique. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement, peu nombreuses, ne sont pas réellement significatives à l'échelle régionale mais donnent néanmoins des indications sur le mode de gisement des eaux souterraines.

5.4.3.1. Transmissivités

Lorsqu'en cours d'essai l'évolution des niveaux dynamiques était aberrante (principalement en raison d'un développement insuffisant du forage ou à cause d'un débit mal contrôlé) ou lorsque la durée de la phase d'évolution transitoire était trop brève, la transmissivité calculée n'a pas été retenue pour le traitement statistique. Au total, 2.774 valeurs de transmissivité réparties sur 7 des 9 systèmes aquifères que compte le Mali, 25 des 28 unités hydrogéologiques et 53 des 60 secteurs hydrogéologiques ont été retenues.

La représentativité des valeurs moyennes calculées (*tableau 5.2*) varie selon le découpage ci-dessus et en fonction du nombre de données disponibles pour chaque catégorie. Ainsi, pour plusieurs secteurs, les valeurs n'ont été calculées que pour un nombre très réduit d'essais (moins de 4) et ne sont donc représentatives que des conditions locales autour des forages correspondants.

Sur l'ensemble des valeurs obtenues, les transmissivités sont comprises entre un minimum de $1,4 \cdot 10^{-7}$ m²/s et un maximum de $5 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

a) Transmissivités par aquifère

La transmissivité moyenne des aquifères fissurés est de $2 \cdot 10^{-4}$ m²/s avec un champ de variation de $1,4 \cdot 10^{-7}$ m²/s à $2 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Pour les aquifères généralisés, la valeur moyenne est de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s, avec un minimum de $1,4 \cdot 10^{-7}$ m²/s et un maximum de $5 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

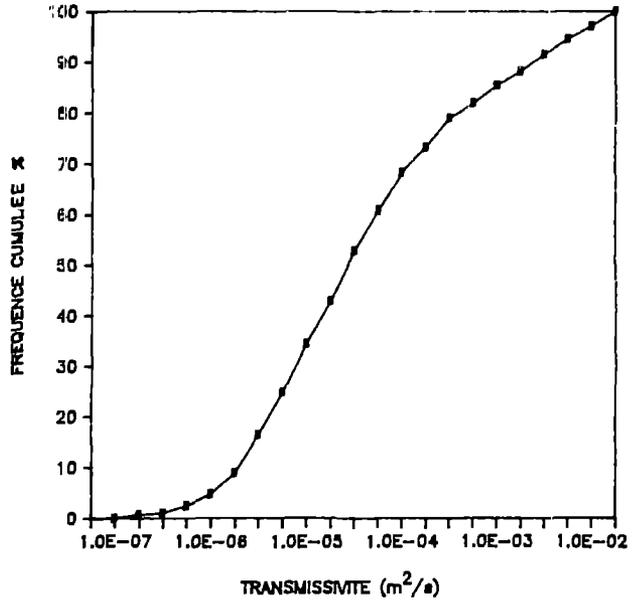
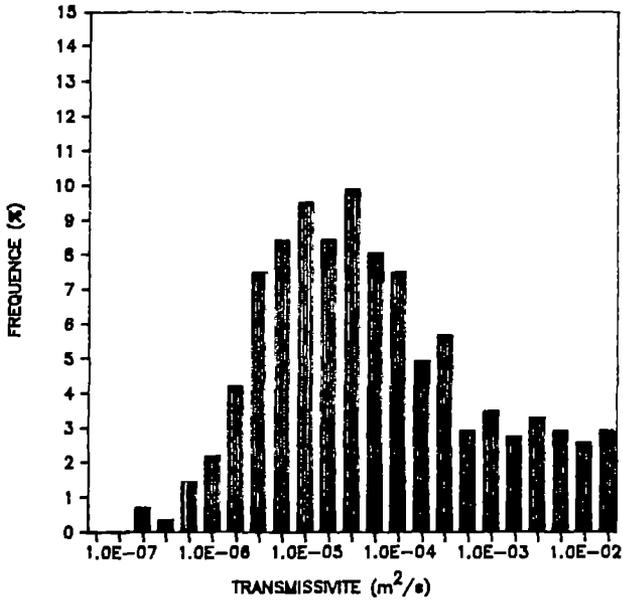
Les histogrammes de distribution et les courbes de fréquence cumulée des valeurs de transmissivité regroupées par type d'aquifère sont présentés sur la figure 5.5 qui met en évidence la nette différence entre les aquifères généralisés et les aquifères fissurés vis-à-vis de ce paramètre hydraulique.

Tableau 5.2 - Données statistiques sur les transmissivités et les débits spécifiques par système aquifère

CODE	AQUIFERE	NB. DE DON-NEES	TRANSMISSIVITE (m ² /s)			DEBIT SPECIFIQUE (m ³ /h/m)		
			MOY.	MAX.	MIN.	MOY.	MAX.	MIN.
1	Cont. term./Quat.	519	1,2E-3 ⁽¹⁾	5,0E-2	1,4E-7	4,8	131,0	0,1
2	Crétac. sup/Eoc. inf.	11	1,9E-3	1,2E-2	1,2E-5	2,7	14,5	0,1
3	Cont. int./Cont. term.	12	7,4E-3	4,0E-2	1,2E-4	13,2	55,2	1,1
6	Cambrien	470	2,0E-4	5,0E-3	1,4E-7	0,8	22,2	0,1
7	Infracambrien tab.	1.306	2,6E-4	2,0E-2	2,9E-7	1,4	12,8	0,1
8	Infracambrien plis.	18	2,0E-4	1,0E-3	5,0E-6	3,6	43,7	0,1
9	Socle	437	8,6E-5	3,6E-3	1,0E-6	0,4	3,6	0,1

(1) E-3 : 10⁻³

a. Aquifères généralisés



b. Aquifères fissurés

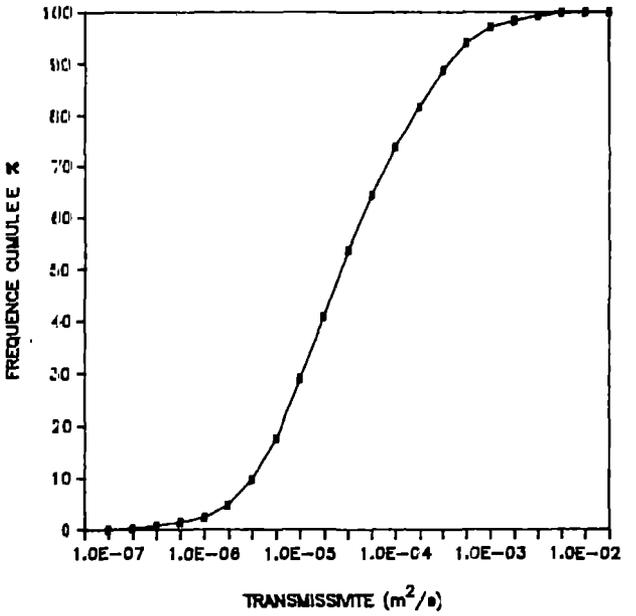
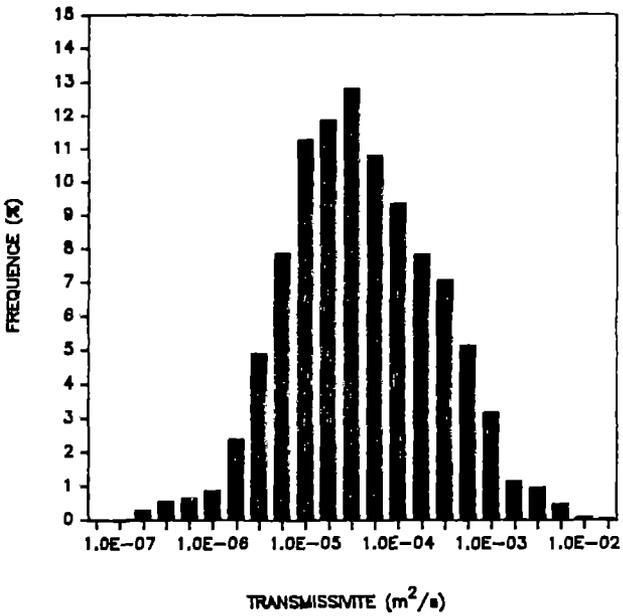


Figure 5.5: Distribution des valeurs de transmissivité par type d'aquifère

Tableau 5.3 - Données statistiques sur les transmissivités et les débits spécifiques par unité hydrogéologique

AQUIFERE Code et unité hydrog.	NB. DE DONNEES	TRANSMISSIVITE (m ² /s)			DEB. SPEC. MOY. (m ³ /h/m)
		MOY.	MAX.	MIN.	
CONTINENTAL TERM./QUAT. 12. Fossé de Gao	29	3,4E-4	2,7E-3	2,8E-6	1,1
13. Azouad sud	29	5,5E-3	5,0E-2	1,8E-5	9,9
14. Gourma nord-ouest	22	6,1E-3	2,0E-2	5,0E-4	10,5
15. Delta intérieur	439	7,03E-4	2,0E-2	1,4E-7	4,3
CRETACE SUP/EOCENE INF. 21. Bordure Adrar	11	1,9E-3	1,0E-2	1,9E-3	2,7
CONTINENTAL INT./CONT. TERM. 31. Azaouad nord	4	(2,0E-2)	4,0E-2	1,2E-4	38,4
32. Fossé de Nara	8	(1,1E-3)	3,2E-3	1,3E-4	5,4
CAMBRIEN 61. Ouagadougou	165	2,0E-4	4,4E-3	3,5E-7	0,9
62. Kaarta	305	2,0E-4	5,0E-3	1,4E-7	0,7
INFRACAMBRIEN TABULAIRE 71. Plateau dogon	4	(1,3E-3)	4,8E-3	5,5E-3	1,5
72. San - Koutiala	105	9,6E-5	1,5E-3	2,9E-7	0,7
73. Bani moyen	546	2,6E-4	1,0E-2	5,0E-7	2,1
74. Est plateau mandingue	187	4,0E-4	2,0E-2	4,3E-7	1,2
75. Baoulé (Sénégal)	55	2,7E-4	2,0E-3	4,0E-6	0,9
76. Bakoye	293	2,0E-4	3,8E-3	1,0E-6	0,6
77. Bafing	116	3,0E-4	5,0E-3	1,7E-6	0,9
INFRACAMBRIEN PLISSE 81. Nord delta	10	2,3E-4	1,0E-3	5,0E-6	1,6
82. Gourma	6	(1,4E-4)	4,5E-4	1,0E-5	6,4
83. Gondo	2	(3,1E-3)	6,1E-3	4,2E-5	7,4
SOCLE 91. Adrar des Ifoghas	4	(1,1E-4)	2,2E-4	5,0E-6	2,2
92. Bagoé	127	3,9E-5	3,7E-4	1,0E-6	0,4
93. Baoulé (Niger) ^a	187	5,3E-5	7,1E-4	1,1E-6	0,4
94. Sankarani	85	1,1E-4	7,2E-4	4,6E-6	0,4
95. Kéniéba	15	4,7E-4	3,6E-3	2,3E-6	0,6
96. Kayes	19	3,2E-4	1,3E-3	1,1E-5	0,6

() : Valeurs non représentatives

Les transmissivités les plus élevées sont rencontrées dans l'aquifère du Continental intercalaire/Continental terminal alors qu'il n'est capté que partiellement par les forages en raison de la grande profondeur des niveaux statiques et de celle encore plus grande du mur imperméable.

De fortes transmissivités sont aussi fréquentes dans l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire, mais, comme pour les taux de réussite, la réduction de l'épaisseur des dépôts en bordure des bassins sédimentaires ainsi que l'augmentation concomitante de la fraction argileuse dans ces dépôts entraînent une baisse de la moyenne si on considère l'ensemble de cet aquifère.

Les transmissivités moyennes sont très voisines pour la plupart des aquifères fissurés, seul l'aquifère du socle étant caractérisé par une valeur nettement plus faible ($8,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

C'est encore dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire que la fréquence des fortes valeurs de transmissivité (supérieures à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) est la plus élevée avec quelques valeurs supérieures à $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ comparables à celles des aquifères généralisés, dénotant des conditions hydrogéologiques parmi les plus favorables.

b) Transmissivités par unité et secteur hydrogéologiques

Pour les aquifères généralisés, les unités de l'Azaouad sud et du Gourma nord-ouest (Continental terminal/Quaternaire) sont caractérisées par les plus fortes valeurs de transmissivités (supérieures à $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ en moyenne) tandis que les plus faibles valeurs ($3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ en moyenne) se rencontrent dans le fossé de Gao où les formations continentales sont plus argileuses.

La valeur intermédiaire de la transmissivité moyenne dans l'unité du delta intérieur ($7,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) masque en fait une forte disparité entre les 3 secteurs qui la constituent : ainsi, des transmissivités supérieures à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ sont obtenues dans les secteurs central et nord qui sont en grande partie inclus dans le domaine lacustre tandis qu'elles n'atteignent que $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le secteur méridional.

Les unités de l'aquifère du Continental intercalaire/Continental terminal ont des transmissivités supérieures à $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ qui peuvent être considérées comme représentatives, malgré le petit nombre de valeurs, car la granulométrie des formations constituant cet aquifère est en général très homogène.

Les différentes unités de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire montrent des valeurs moyennes de transmissivité remarquablement homogènes, entre 2 et $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, si l'on exclut la valeur élevée de l'unité du plateau dogon qui n'est pas significative en raison du petit nombre de transmissivités calculées. Seule l'unité de San-Koutiala se singularise avec une transmissivité moyenne de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

La même relative homogénéité se retrouve dans l'aquifère de l'Infracambrien plissé avec des transmissivités moyennes comprises entre 1 et $2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Les valeurs plus fortes calculées pour l'unité du Gondo sont liées à la présence de calcaires karstifiés.

Les unités de l'aquifère du socle présentent les transmissivités moyennes les plus faibles et les plus variables, entre 0,4 et $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette disparité est liée à l'existence en proportions variables de roches métamorphiques à fissuration généralement plus développée (donc plus perméables) et de granitoïdes.

5.4.3.2. Coefficients d'emmagasinement

Sur les 134 essais à débit constant réalisés avec suivi des niveaux dans au moins un piézomètre, 96 seulement ont été pris en compte, les autres essais ayant donné des valeurs de coefficient d'emmagasinement douteuses ou aberrantes.

La répartition spatiale des données ainsi sélectionnées est très irrégulière et les moyennes calculées ne sont véritablement représentatives que pour deux unités de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire. Les logarithmes des valeurs du coefficient d'emmagasinement ($\log S$) ont été utilisées pour le calcul de l'écart-type.

Tableau 5.4 - Données statistiques sur les coefficients d'emmagasinement S

AQUIFERE Unité hydrogéologique (code et nom)	Nombre de données	S moyen	log S moyen	Ecart- type (sur logs)	S max.	S min.
CONT. TERMINAL/QUATERNAIRE						
12. Fossé de Gao	1	1,0E-4	-4,00	-	-	-
13. Azaouad sud	1	6,2E-4	-3,21	-	-	-
15. Delta intérieur	2	1,2E-4	-3,90	-	1,4E-4	1,0E-4
CAMBRIEN						
61. Ouagadou	4	6,0E-6	-5,49	-	1,8E-5	1,0E-5
62. Kaarta	1	4,0E-6	-5,40	-	-	-
INFRACAMBRIEN TABULAIRE						
73. Bani moyen	6	5,4E-4	-3,57	-	1,0E-3	6,0E-5
74. Est plateau mandingue	49	8,4E-3	-3,52	1,20	1,4E-1	4,0E-7
75. Baoulé (Sénégal)	20	3,5E-3	-3,50	0,88	5,0E-2	2,0E-5
76. Bakoye	5	7,0E-5	-4,56	-	2,6E-4	2,3E-6
77. Bafing	4	2,2E-4	-4,39	-	8,0E-4	2,0E-6
SOCLE						
93. Baoulé (Niger)	2	1,1E-4	-4,13	-	2,0E-4	2,8E-5

Quel que soit le type d'aquifère, les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont en général faibles, comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} , et caractéristiques de nappes semi-libres à semi-captives. Cela confirme les observations faites durant l'exécution des forages et l'évolution des niveaux piézométriques constatée sur le réseau d'observation.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement de l'aquifère du Continental terminal paraissent trop faibles, mais elles correspondent à un très petit nombre d'essais pour lesquels l'évolution transitoire a été très brève et suivie par une période avec des niveaux pseudo-stabilisés. Cette évolution est à rapprocher de celle étudiée par Boulton pour les aquifères avec égouttement ("delayed yield" ou débit retardé), la période de pompage n'ayant toutefois pas été assez longue pour amorcer la phase finale d'évolution transitoire représentative de la porosité efficace de l'aquifère.

A l'inverse, dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire, de nombreux d'essais de longue durée ont donné des valeurs de coefficient d'emménagement plutôt élevées pour ce type d'aquifère. Ceci, ainsi que la tendance vers une pseudo-stabilisation dans plus de la moitié des essais de production en milieu fissuré, peut s'expliquer par le drainage de la nappe intergranulaire superficielle et par la double porosité du milieu fissural.

5.4.3.3. Débits spécifiques

Les débits spécifiques (débit par mètre de rabattement) entrés dans la banque de données sont ceux indiqués dans les fiches d'essai des projets. Différents débits et rabattements correspondants ont été utilisés dans le calcul : débit et rabattement du premier palier, débit moyen pondéré et rabattement final, débit exploitable et rabattement maximum calculés. Cette diversité du mode de calcul ajoutée à l'absence d'une durée de référence commune et à la non prise en compte de la variation des pertes de charge liées au forage pour des débits croissants ainsi que l'absence de remontée entre chaque palier de débit, limitent singulièrement la représentativité de ce paramètre.

Comme il demeure néanmoins un indicateur semi-quantitatif de la capacité d'exploitation des forages pour un aquifère donné, ses variations ont été étudiées.

Les débits spécifiques moyens calculés par aquifère et par unité hydrogéologique sont indiqués dans les tableaux 5.2 et 5.3. tandis que la figure 5.6 montre la répartition spatiale des valeurs par secteur hydrogéologique.

Les débits spécifiques sont en moyenne compris entre 5 et 10 m³/h/m pour les aquifères des formations continentales. L'aquifère du Continental intercalaire du nord de l'Azaouad atteint même un débit spécifique de 38 m³/h/m. Dans le fossé de Gao, la valeur moyenne est par contre beaucoup plus faible, de l'ordre de 1 m³/h/m.

Dans les aquifères fissurés, les débits spécifiques varient entre 0,4 et 2,1 m³/h/m et leur répartition par secteur hydrogéologique suit à peu près celle des transmissivités: les plus fortes valeurs sont associées à l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire (jusqu'à 20 m³/h/m) et les plus faibles à l'aquifère du socle (en moyenne 0,4 m³/h/m).

On note toutefois, dans certaines unités, en particulier celles des plateaux dogon et mandingue, des débits spécifiques relativement faibles par rapport aux transmissivités calculées. Ceci est dû aux pertes de charge, souvent très importantes en début de pompage, dans les forages captant les aquifères fissurés (le rabattement après 3 mn peut représenter jusqu'à plus de 80 % du rabattement maximum en fin de pompage).

Les débits spécifiques élevés obtenus sur l'aquifère de l'Infracambrien plissé du Gourma et du Gondo (de l'ordre de 6 à 7 m³/h/m) ne résultent que de conditions locales, les essais étant peu nombreux alors qu'une majorité de forages a dû être abandonnée pour cause de débit insuffisant.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

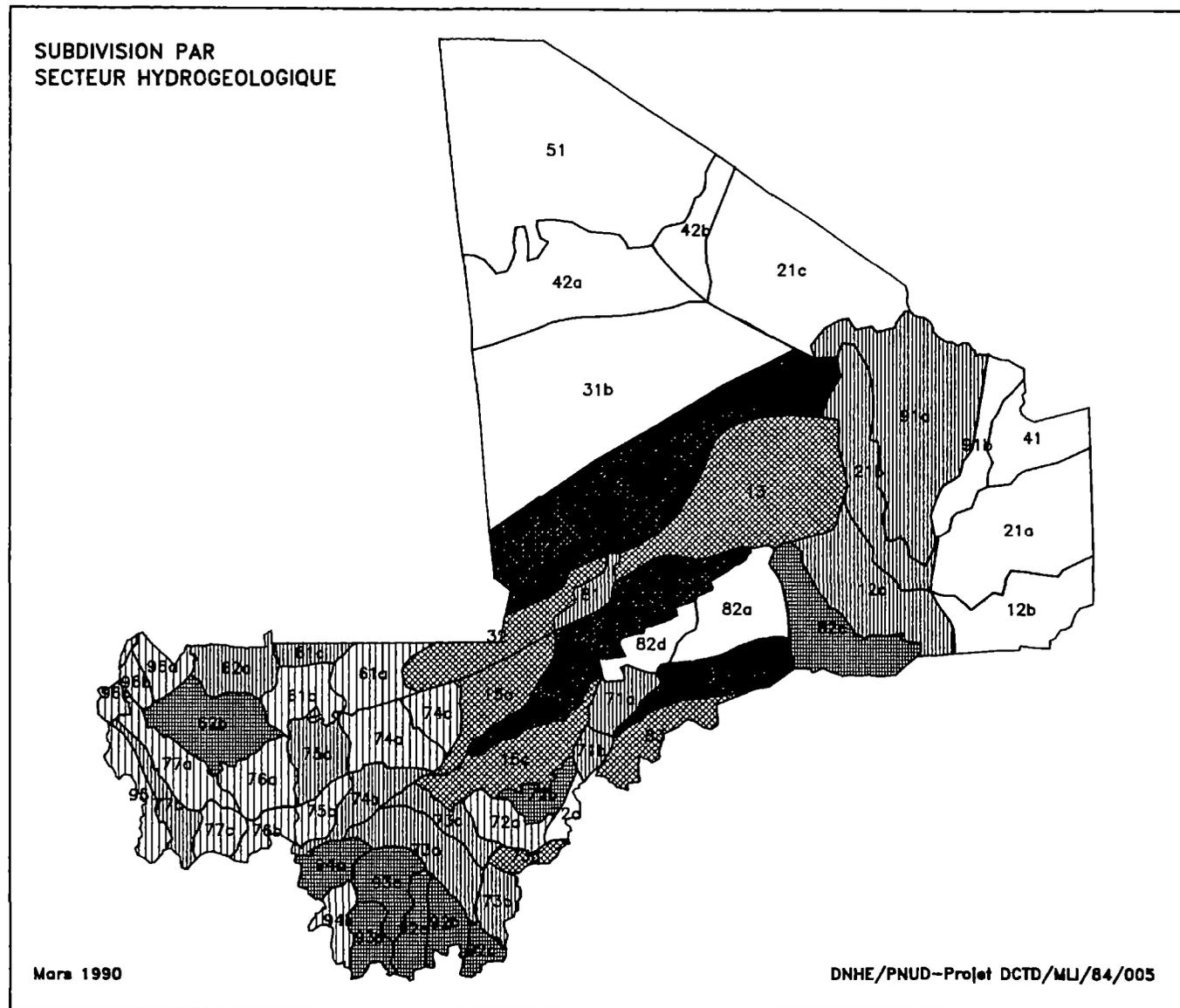
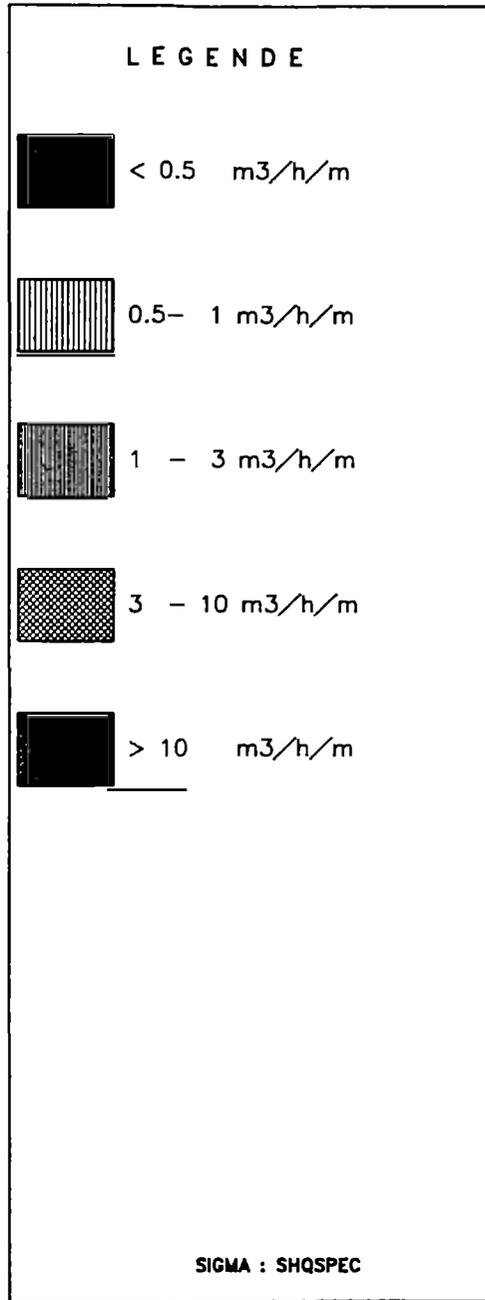


Fig. : 5.6

DEBITS SPECIFIQUES MOYENS

5.5. REGIONALISATION DES TRANSMISSIVITES

5.5.1. Ajustement à des lois log-normales (méthode de Matheron)

Selon la théorie des variables régionalisées appliquée aux milieux poreux (G.Matheron, 1967), lorsque la distribution d'un paramètre hydrodynamique caractérisant un groupe de données suit une loi log-normale, l'intervalle [moyenne harmonique - moyenne arithmétique] du groupe de données est représentatif régionalement du paramètre et la valeur moyenne régionale la plus probable du paramètre est la moyenne géométrique du groupe de données.

Les différentes moyennes ont été calculées selon cette méthode sur les transmissivités classées par aquifère et par unité hydrogéologique [INF/STA/6].

Tableau 5.5 - Valeurs moyennes caractéristiques de la distribution des transmissivités par aquifère

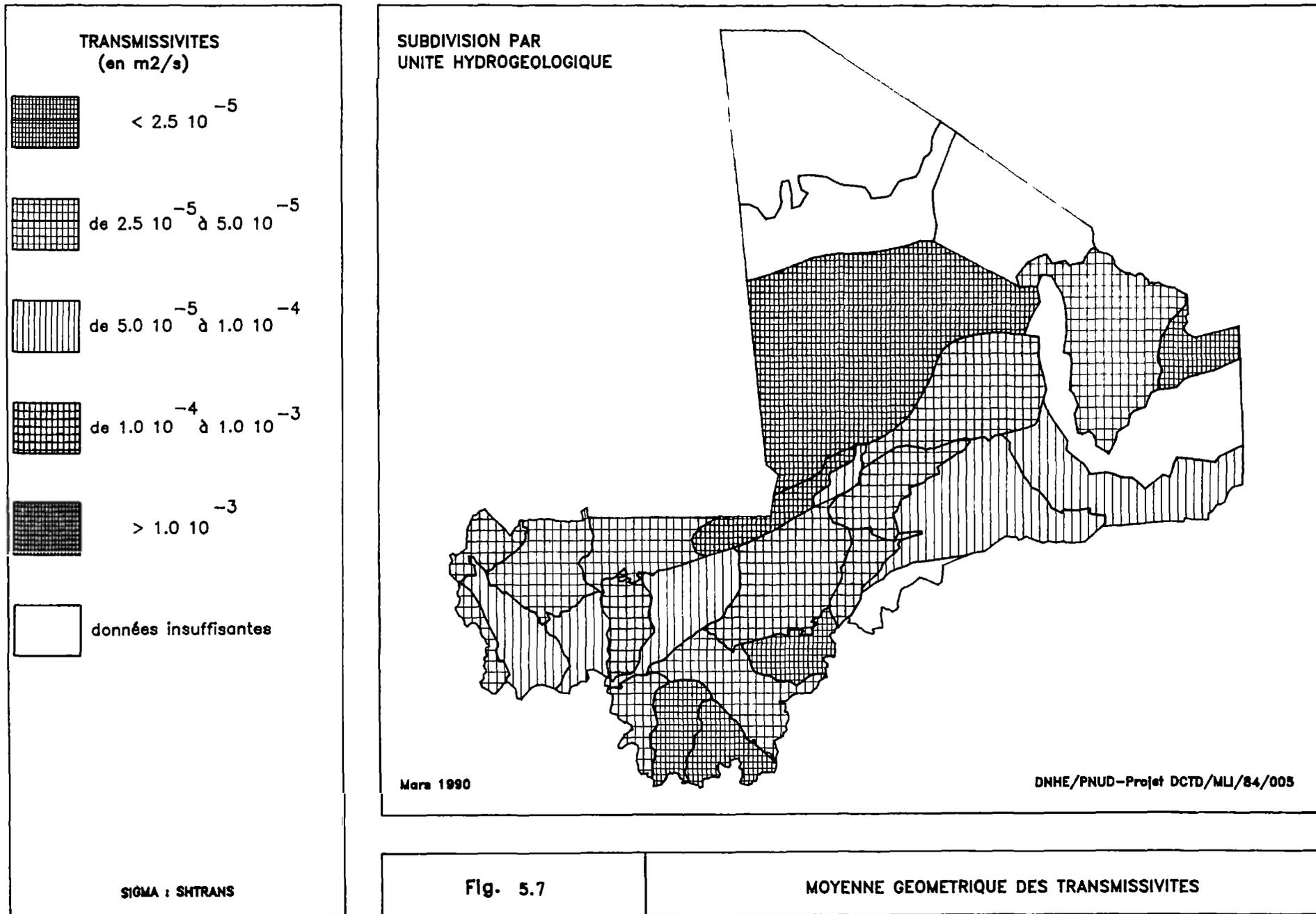
CODE	AQUIFERE	Nombre de données	Minimum	Moyenne harmonique	Moyenne géométrique	Moyenne arithmétique	Maximum
1	Cont.term./Quaternaire	549	1.4E-7	5.3E-6	4.8E-5	1.2E-3	5.0E-2
2	Crét.sup./Eocène inf.	11	1.2E-5	4.2E-5	1.6E-4	1.9E-3	1.2E-2
3	Cont.int./Cont.term.	12	1.2E-4	4.0E-4	1.4E-3	7.4E-3	4.0E-2
6	Cambrien	470	1.4E-7	4.0E-6	3.6E-5	2.0E-4	5.0E-3
7	Infracambrien tab.	1.306	2.9E-7	1.1E-5	4.7E-5	2.6E-4	2.0E-2
8	Infracambrien plissé	18	5.0E-6	1.9E-5	6.4E-5	2.0E-4	1.0E-3
9	Socle	437	1.0E-6	1.3E-5	2.8E-5	8.7E-5	3.6E-3

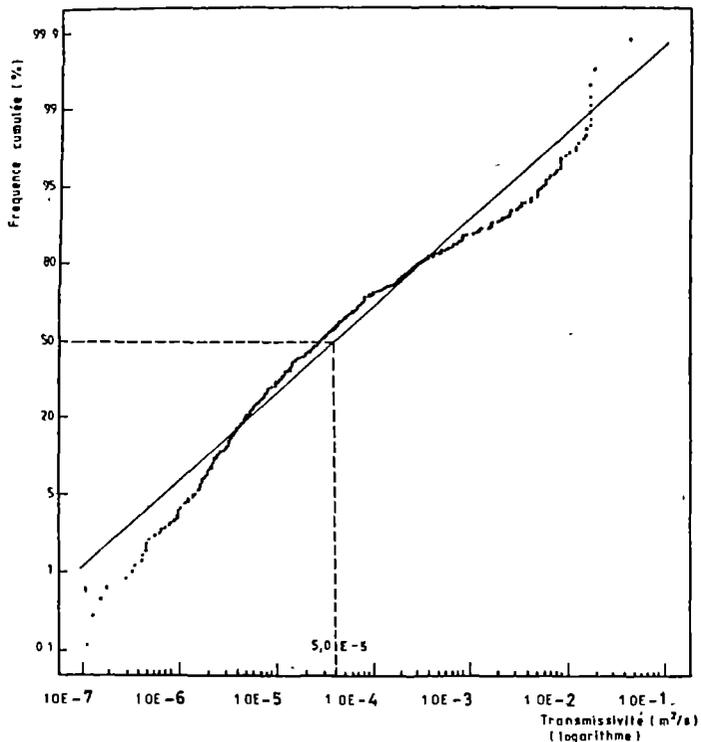
Pour tous les aquifères, les valeurs moyennes caractéristiques respectent l'ordre de succession des lois log-normales et peuvent donc être considérées comme globalement représentatives des transmissivités à l'échelle régionale. Le même résultat a été obtenu pour les données de transmissivité classées par unité hydrogéologique.

La figure 5.7 représente les valeurs des moyennes géométriques des transmissivités calculées par unité hydrogéologique.

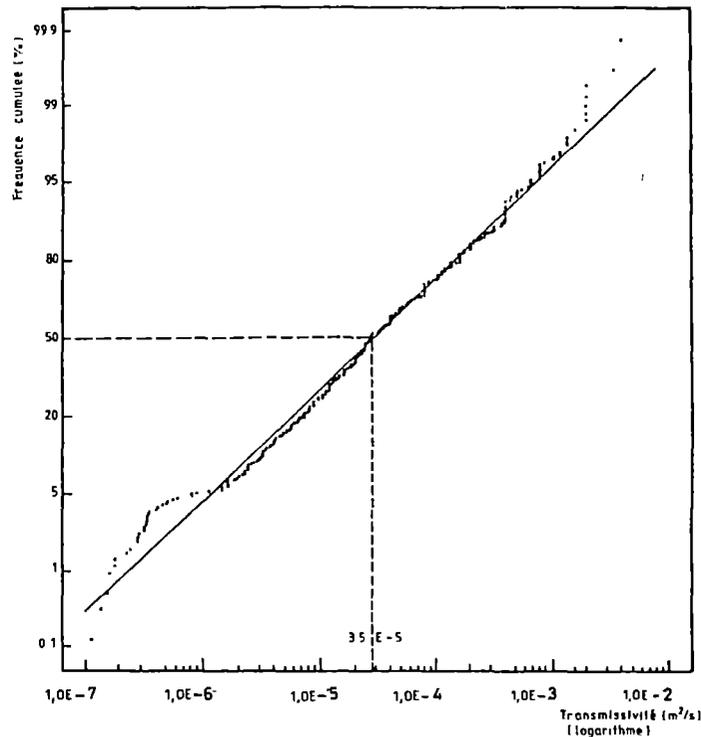
Pour les quatre aquifères disposant d'un nombre suffisant de données, un ajustement des distributions des transmissivités à des lois log-normales a été fait à l'aide du logiciel STATGRAPHICS (figure 5.8). L'ajustement est bon pour les aquifères fissurés de type sédimentaire, Cambrien et Infracambrien tabulaire. Il l'est moins pour l'aquifère du socle et celui du Continental terminal/Quaternaire bien que la tendance générale vers une distribution log-normale soit respectée. Les valeurs de transmissivité correspondant à une fréquence de 50 % sont d'ailleurs très proches des moyennes géométriques calculées pour les quatre aquifères.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

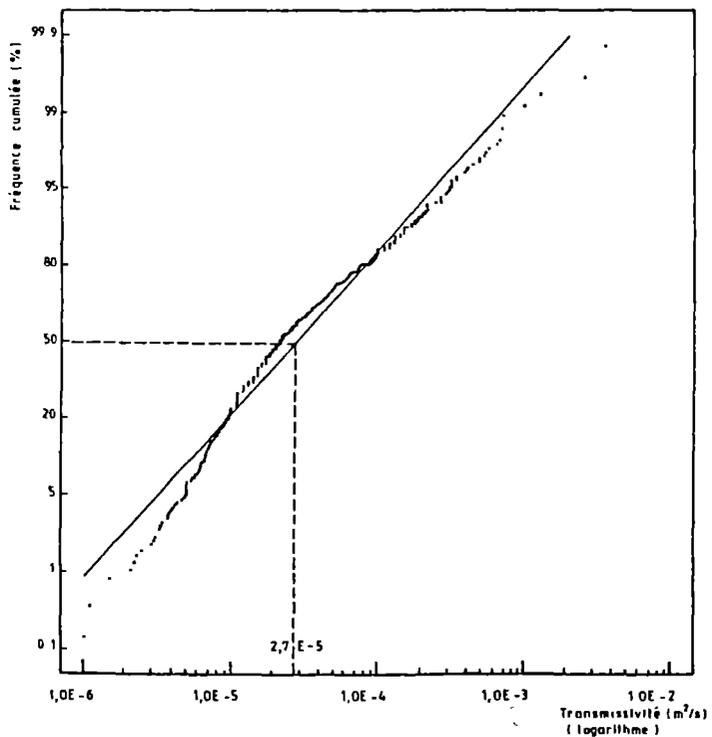




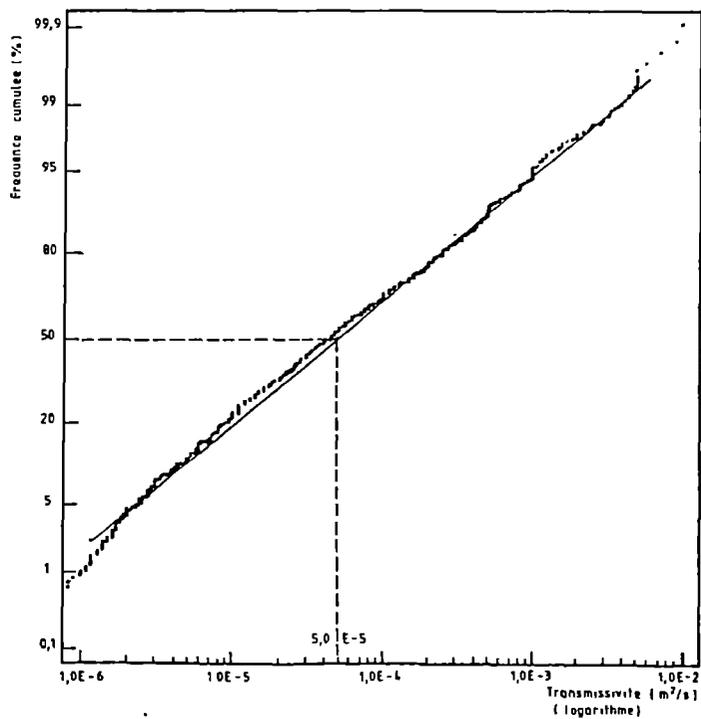
a - Aquifère du Continental terminal / Quaternaire



b - Aquifère du Cambrien



c - Aquifère du socle



d - Aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Fig. 5 B - Ajustement des distributions des transmissivités par aquifère à des lois log-normales.

En vue de compléter l'approche globale proposée par Matheron, des ajustements successifs à des lois log-normales ont été testés sur les transmissivités classées d'abord par aquifère, puis par unité, ensuite par secteur hydrogéologique et enfin par association lithologique jusqu'à ce que le test du x^2 montre une population homogène.

Au niveau des aquifères, le test du x^2 n'atteint pas le seuil de signification bien qu'il en soit relativement proche, notamment pour les aquifères de l'Infracambrien tabulaire et du Cambrien. La tendance à la distribution log-normale des transmissivités est toutefois nettement marquée.

Au niveau des unités hydrogéologiques, la valeur du x^2 dépasse le seuil de signification pour 7 unités appartenant aux aquifères fissurés (Infracambrien tabulaire: 72, 74, 75 et 77, Cambrien : 61, Socle : 92, 94) tandis que, pour 5 unités, il n'a pu être calculé en raison du nombre insuffisant de données.

Pour ces dernières unités, l'analyse a été faite au niveau des secteurs hydrogéologiques correspondants. Dans 13 des secteurs concernés, les transmissivités suivent des lois log-normales (en particulier pour ceux de l'Aquifère du Continental terminal/Quaternaire); seules les distributions de 3 secteurs caractérisés par une lithologie hétérogène (62a, 73a et 93a) n'ont pu être ajustées. Un dernier classement des transmissivités par association lithologique pour ces secteurs a permis d'obtenir des ajustements significatifs.

Deux conclusions peuvent être tirées de cette analyse :

- en dépit de leur caractère sommaire, les essais de production réalisés sur les forages d'hydraulique villageoise permettent, s'ils sont assez nombreux, d'atteindre une bonne caractérisation régionale de la transmissivité des aquifères. Il est cependant indispensable qu'ils soient complétés par des essais de référence de longue durée pour étalonner la distribution des transmissivités, déterminer les coefficients d'emmagasinement et identifier les conditions aux limites ;
- les subdivisions hydrogéologiques définies dans cette synthèse correspondent à des conditions hydrogéologiques homogènes même si, pour quelques unes, une partition plus fine, en zones lithologiques notamment, aurait été utile; chaque subdivision hydrogéologique a ainsi pu être caractérisée par des valeurs moyennes de transmissivité géostatistiquement représentatives.

5.5.2. Cartes de transmissivité

Les valeurs de transmissivité entrées dans la banque de données SIGMA ont été utilisées pour le tracé automatique de cartes d'isovaleurs à l'aide du logiciel SURFER. Elles ont été établies sur la base des cartes IGN au 1:200.000. La figure 5.9 en montre deux exemples pour lesquels les données de transmissivité étaient suffisamment nombreuses : le premier est représentatif d'un aquifère généralisé (Unité 15a du Continental terminal/Quaternaire), le second d'un aquifère fissuré (Unité 74 de l'Infracambrien tabulaire).

a) Carte de Niono (figure 5.9a)

Elle couvre une partie de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire des deltas vif et mort du Niger. Les fortes valeurs de transmissivités qui apparaissent dans les parties est et sud-est de la carte correspondent à des zones réalimentées par les eaux de surface où la surface piézométrique est peu profonde et l'épaisseur de la nappe maximale. Les transmissivités décroissent vers l'est et le nord, dans la zone du delta mort par suite de la réduction d'épaisseur des formations continentales et de l'augmentation de leur composante argileuse.

b) Carte de Banamba (figure 5.9b)

Elle s'étend sur un secteur de l'Infracambrien tabulaire du plateau mandingue. Le tracé des courbes d'isotransmissivité montre une faible continuité, avec des îlots de forte ou de faible transmissivité répartis sur l'ensemble de la carte. Les grands couloirs de linéaments qui traversent cette zone suivant une direction OSO-ENE ne sont pas soulignés par des axes de transmissivité tout comme ils n'apparaissent pas comme des axes piézométriques correspondant à des écoulements préférentiels. On peut cependant noter les transmissivités plus élevées dans la moitié sud de la carte où sont localisés de nombreuses intrusions doléritiques ainsi que des horizons de jaspes très fracturés.

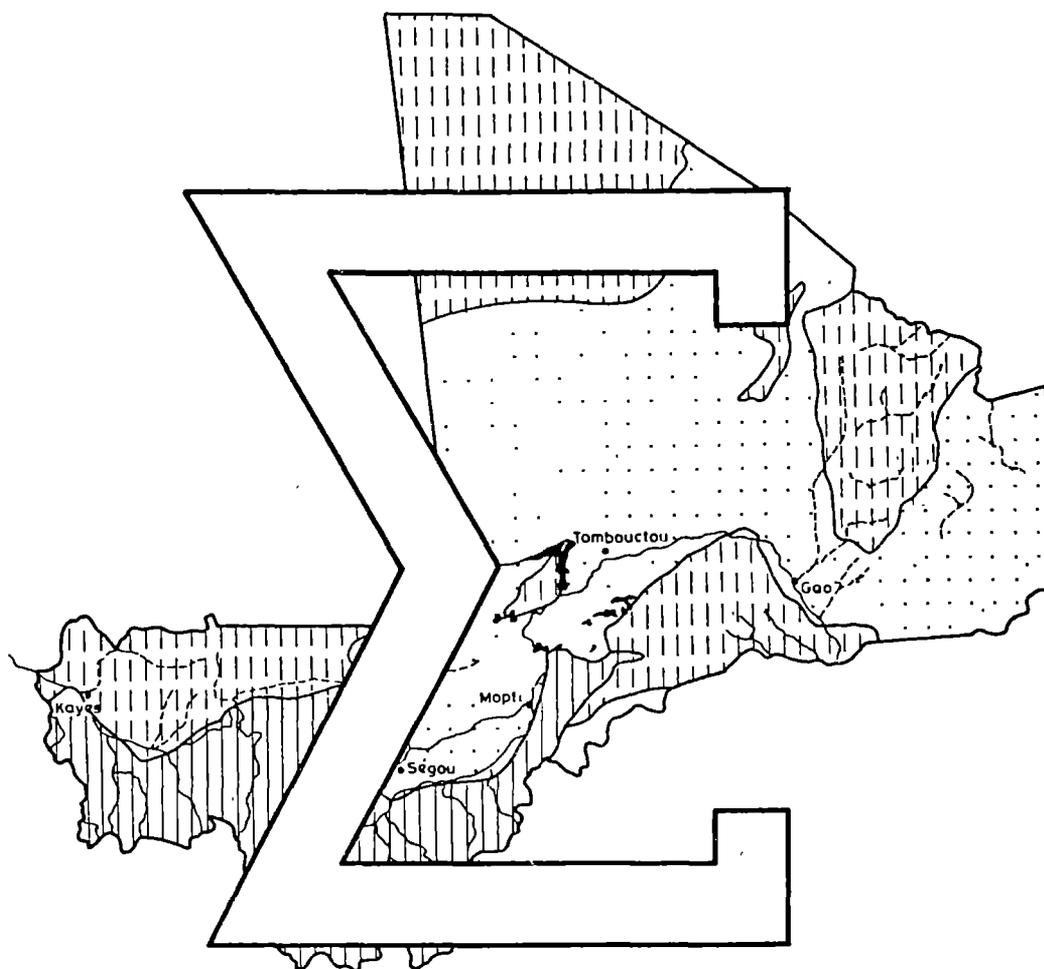
Le modèle de carte hydrogéologique présenté au chapitre 8 (figure 8.14) correspond à la feuille IGN de Banamba. On y remarquera la variabilité et la distribution irrégulière du débit des forages, comparables à celles des transmissivités, ainsi que la zone de perméabilité préférentielle associée aux jaspes et aux intrusions doléritiques qui occupent la partie sud de la carte.

Ces cartes de transmissivité présentent l'avantage de montrer la localisation des zones potentiellement les plus favorables pour l'implantation des forages. Cependant, la disparité des valeurs de transmissivité dans les aquifères fissurés et l'insuffisance de données sur certaines zones de la carte limitent cet avantage car elles ne permettent pas de prévoir avec certitude la productivité de nouveaux forages dans ces zones. Par contre, là où les données sont suffisamment denses, ces cartes peuvent orienter utilement la recherche des sites de forage les plus productifs.

5.6. CONCLUSION

Dans les aquifères fissurés, les taux de réussite en forages productifs sont très variables, entre 40 et plus de 80 %, et montrent que, dans ce type d'aquifère, peuvent coexister des secteurs où les nappes sont discontinues et d'autres où elles sont semi-continues avec des réseaux de fissures denses et bien interconnectés. L'analyse des données des forages et des pompages d'essai a mis en évidence leur caractère semi-captif avec une double perméabilité de deux types : macro/microfissurale ou mixte fissurale/intergranulaire. Les débits moyens des forages productifs dans les principaux aquifères fissurés sont compris entre 5 et 6 m³/h, la fréquence des débits supérieurs à 5 m³/h étant toutefois plus grande dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire. Les débits spécifiques moyens varient entre 0,4 et 2,1 m³/h/m suivant les aquifères, les plus faibles étant rencontrés dans l'aquifère du socle. Le champ de variation des transmissivités à l'échelle régionale s'établit entre 0,1 et 3.10⁻⁴ m²/s avec des valeurs moyennes de 5.10⁻⁵ m²/s. La distribution régionale des transmissivités est irrégulière et paraît plus directement liée à la lithologie des formations fissurées et aux réseaux de fracturation secondaire qu'aux linéaments structuraux d'extension régionale.

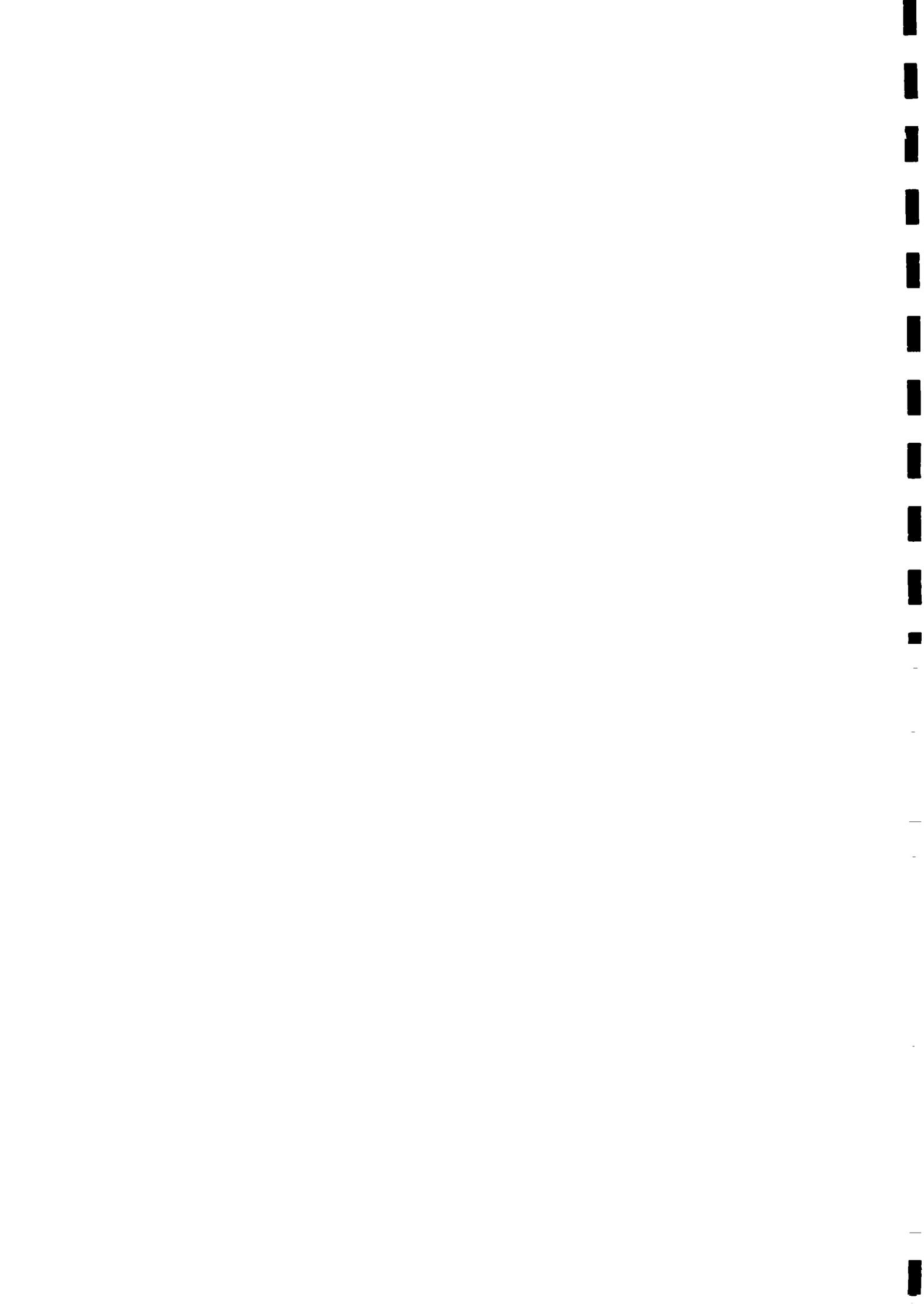
Les aquifères généralisés sont caractérisés par des taux de réussite très élevés, voisins de 100 % dans de nombreux secteurs. Les forages ont un débit moyen de 7,7 m³/h et plus de 20 % d'entre eux ont un débit supérieur à 20 m³/h. Les débits spécifiques sont généralement compris entre 5 et 10 m³/h/m. Ces aquifères sont de type multicouche et semi-libre avec des transmissivités fréquemment supérieures à 10⁻³ m²/s dans la partie supérieure des aquifères, la seule à être actuellement captée par les forages.



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 6

CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES
ET ISOTOPIQUES



CHAPITRE 6

TABLE DES MATIERES

TEXTE

6.1. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES.....	1
6.1.1. Données disponibles.....	1
6.1.1.1. Origine des données.....	1
6.1.1.2. Représentativité et qualité des données.....	1
6.1.2. Caractéristiques régionales.....	2
6.1.2.1. Régions ouest et sud.....	2
6.1.2.2. Région centrale.....	4
6.1.2.3. Régions est et nord.....	4
6.1.2.4. Limites d'utilisation des eaux souterraines selon l'usage.....	5
6.1.3. Caractéristiques des aquifères.....	7
6.1.3.1. Aquifère du socle.....	9
6.1.3.2. Aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	10
6.1.3.3. Aquifère de l'Infracambrien plissé.....	12
6.1.3.4. Aquifère du Cambrien.....	13
6.1.3.5. Aquifère des formations primaires de Taoudenni.....	13
6.1.3.6. Aquifères du Continental intercalaire et du Conti- nental intercalaire/terminal.....	14
6.1.3.7. Aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	15
6.1.3.8. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire.....	16
6.1.4. Répartition régionale des teneurs ioniques.....	18
6.1.4.1. Chlorures.....	18
6.1.4.2. Sulfates.....	20
6.1.4.3. Calcium et Magnésium.....	20
6.1.5. Facteurs de variation de la salinité des aquifères fissurés..	20
6.1.5.1. Variations verticales.....	20
6.1.5.2. Variations latérales.....	22
6.1.5.3. Variations dans le temps.....	24
6.2. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES.....	25
6.2.1. Données disponibles.....	25
6.2.2. Aquifères fissurés.....	27
6.2.2.1. Teneurs en Tritium.....	27
6.2.2.2. Teneurs en Carbone 14.....	31
6.2.2.3. Teneurs en isotopes stables.....	33
6.2.3. Aquifères généralisés.....	36
6.2.3.1. Aquifère du Continental intercalaire.....	36
6.2.3.2. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire.....	39
6.2.3.3. Autres secteurs étudiés.....	41
6.5. CONCLUSION.....	41
BIBLIGRAPHIE.....	43

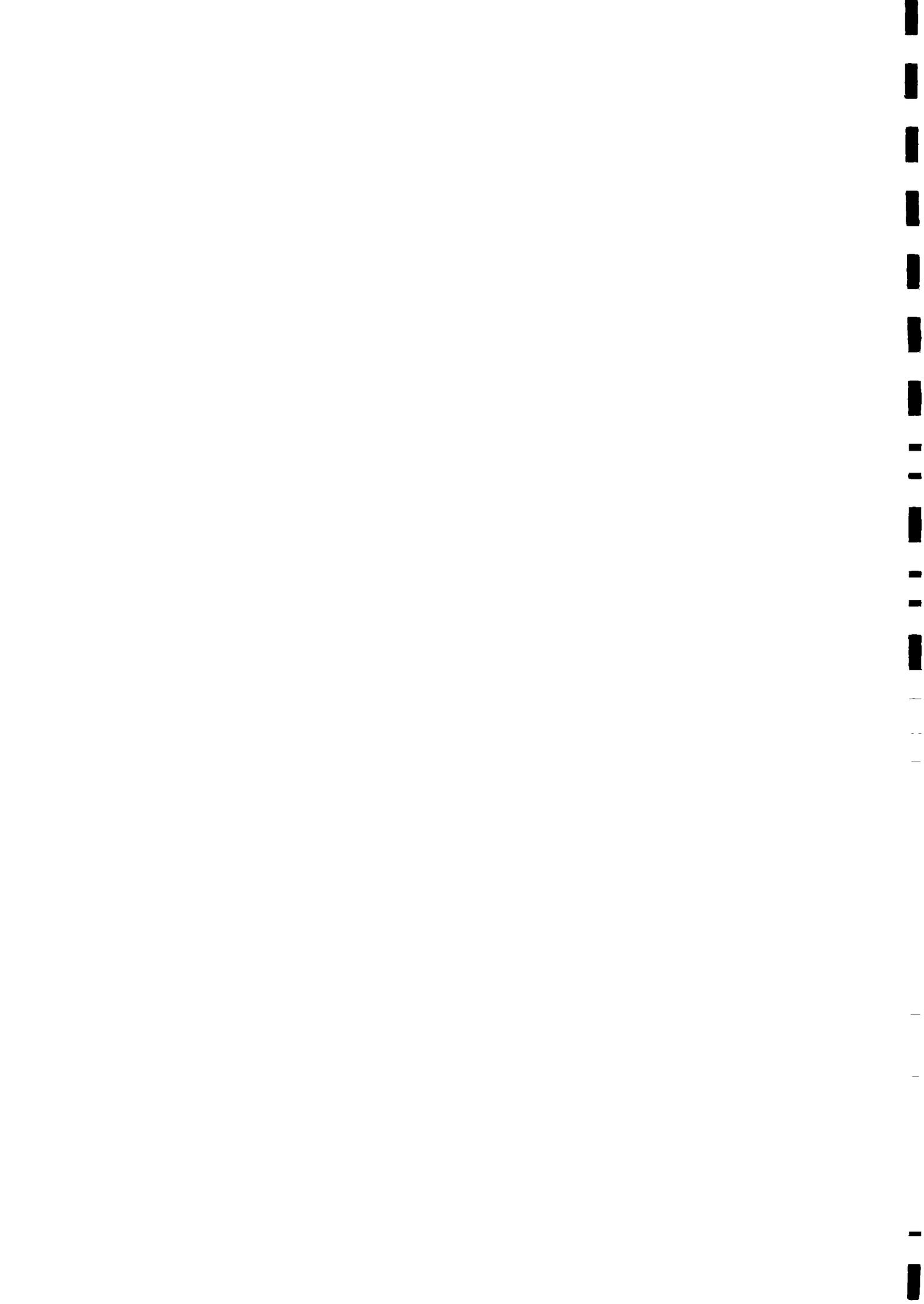
FIGURES

Fig.6.1.	Conductivité moyenne (par secteur hydrogéologique).....	3
Fig.6.2.	Teneurs moyennes en Fer (par secteur hydrogéologique).....	6
Fig.6.3.	Teneurs moyennes en Nitrate (par secteur hydrogéologique).....	6
Fig.6.4.	Valeurs moyennes du pH (par secteur hydrogéologique).....	8
Fig.6.5.	Agressivité des eaux (indice de Ryznar) (par secteur hydrogéologique).....	8
Fig.6.6.	Teneurs moyennes en Chlorure (par secteur hydrogéologique).....	19
Fig.6.7.	Teneurs moyennes en Sulfate (par secteur hydrogéologique).....	19
Fig.6.8.	Teneurs moyennes en Calcium (par secteur hydrogéologique).....	21
Fig.6.9.	Valeurs moyennes du rapport rMg/rCa.....	21
Fig.6.10.	Variation de la conductivité avec la profondeur des venues d'eau dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	23
Fig.6.11.	Variations saisonnière et annuelle de la conductivité.....	23
Fig.6.12.	Distributions des teneurs en Tritium dans les aquifères fissurés.....	29
fig.6.13.	Variations de la teneur moyenne en Tritium dans les aquifères fissurés en fonction de l'épaisseur de la nappe superficielle et de la profondeur du niveau statique : a) avec nappe superficielle, b) sans nappe superficielle.....	29
Fig.6.14.	Relations Carbone 14/Carbone 13 et distributions des activités en Carbone 14 pour l'aquifère du Socle et l'aquifère de l'Infracambrien : a) relation Carbone 14/Carbone 13, b) histogramme de distribution du C14.....	32
Fig.6.15.	Relation Oxygène 18/Deutérium pour les aquifères fissurés.....	34
Fig.6.16.	Variation de la distribution des teneurs en Oxygène 18 en fonction de la latitude.....	34
Fig.6.17.	Variation de la relation Oxygène 18/Deutérium en fonction de la latitude.....	34
Fig.6.18.	Esquisse hydrogéologique et paléogéographique et coupe schématique des aquifères généralisés du nord du Mali.....	37
Fig.6.19.	Relations Oxygène 18/Deutérium pour les aquifères généralisés du nord du Mali.....	37
Fig.6.20.	Carte piézométrique schématique du secteur de Moninnpé/Boumodi : aquifère du Continental terminal/Quaternaire (Unité du delta intérieur).....	40
Fig.6.21.	Relation Oxygène 18/Deutérium : secteur de Moninnpé.....	40
Fig.6.22.	Variations des teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 : secteur de Moninnpé.....	40

TABLEAUX

Tab.6.1.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes par Région.....	2
Tab.6.2.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du socle.....	9
Tab.6.3.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	10
Tab.6.4.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes selon le faciès lithologique dominant (Aquifère de l'Infracambrien tabulaire - Unité de Kolokani - Guiré).....	11
Tab.6.5.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère de l'Infracambrien plissé.....	12
Tab.6.6.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du Cambrien.....	13
Tab.6.7.	Analyses chimiques de deux points d'eau de Taoudenni.....	13
Tab.6.8.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes des aquifères du Continental intercalaire et du Continental intercalaire/terminal.....	14
Tab.6.9.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur.....	16

Tab.6.10.	Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire.....	17
Tab.6.11.	Variations de la conductivité moyenne en fonction des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères fissurés.....	22
Tab.6.12.	Variations locales de la conductivité des eaux de forage dans les aquifères fissurés.....	24
Tab.6.13.	Caractéristiques des secteurs d'études isotopiques, nombre et types d'analyses	26
Tab.6.14.	Résultat des analyses de Tritium dans les aquifères fissurés....	27
Tab.6.15.	Evolution dans le temps de la teneur en Tritium sur des sites de pompage dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire.....	30
Tab.6.16.	Teneurs caractéristiques en isotopes stables des aquifères fissurés.....	33



CHAPITRE 6

CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

La connaissance des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines constitue, outre la détermination de leur potabilité et de leur agressivité, un apport essentiel à la connaissance des conditions de recharge, d'écoulement et de vidange des aquifères et, par là-même, à l'évaluation de leurs ressources exploitables. L'étude des teneurs en isotopes naturels contribue également à cette évaluation du bilan des aquifères en apportant des informations précieuses sur l'origine des eaux souterraines et sur les conditions climatiques auxquelles elles ont été soumises, notamment en ce qui concerne l'évaporation des nappes, facteur particulièrement important en Afrique sahélo-saharienne pour expliquer certaines anomalies hydrogéologiques telles que les dépressions piézométriques naturelles.

6.1. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES

6.1.1. Données disponibles

6.1.1.1. Origine des données

Jusqu'en 1981, les données hydrochimiques ne concernaient qu'un nombre très réduit de points d'eau, généralement exécutés dans le cadre de campagnes de reconnaissance ou d'études locales. A partir de 1982, la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE), avec l'aide de l'Agence Canadienne pour le Développement International (ACDI) et la participation de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), s'est dotée d'un laboratoire d'analyses chimiques et bactériologiques des eaux. Ce laboratoire a réalisé environ, jusque fin 1988, 6.000 analyses qui représentent approximativement 80 % de l'ensemble des données hydrochimiques disponibles au Mali, les 20 % restant, soit 1.500 environ, provenant d'analyses ayant été effectuées par des projets d'hydraulique villageoise équipés de laboratoires sommaires ou par des laboratoires extérieurs. Ces analyses ne portent en général que sur les principaux cations et anions (tableau 6.1), mais généralement pas sur les oligo-éléments.

6.1.1.2. Représentativité et qualité des données

Sur 10.000 points d'eau modernes recensés au Mali fin 88 dont 8.500 forages productifs (6.300 équipés de pompes) et 1.500 puits, 3.500 environ ont fait l'objet d'une ou plusieurs analyses chimiques essentiellement depuis 1985. Avant 1985 en effet, l'eau des forages et puits d'hydraulique villageoise n'était pas analysée systématiquement. C'est encore le cas pour la majorité des puits cimentés exécutés actuellement.

Les analyses effectuées par le laboratoire de la DNHE entre 1982 et 1984 et en 1988 sont de qualité standard. Les échantillons prélevés par ses techniciens sur le terrain ont été analysés par un dosage de tous les ions usuels. Elles sont généralement équilibrées du point de vue ionique et donc utilisables pour établir les caractéristiques chimiques des aquifères.

Par contre, les analyses réalisées entre 1985 et 1987 sont incomplètes et leur qualité est douteuse; notamment, celles effectuées par les projets à partir de laboratoires portatifs ont montré, après contrôle, des erreurs dans le dosage de certains éléments chimiques.

Au total, 7.000 analyses ont été collectées et saisies dans le fichier IRHCHIM de la banque SIGMA, mais seulement 4.416 analyses ont été retenues après deux phases de contrôle, l'une automatique basée sur la méthode de la conductivité diluée et sur celle de Dienert, l'autre par traitement manuel. Les données de ces 4.416 analyses dont 3.562 intéressent les aquifères généralisés, 134 les aquifères généralisés et 720 les aquifères superficiels, ont été publiées dans un répertoire en 1989 [INF/RPT/5] et leur interprétation a fait l'objet d'un rapport technique du projet MLI/84/005 [HDG/NTL/12].

6.1.2. Caractéristiques régionales

Dans le Schéma directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali présenté en Mars 1990, les données du fichier IRHCHIM de SIGMA ont été traitées sur la base des subdivisions administratives. Les caractéristiques hydrochimiques moyennes par Région sont montrées dans le tableau 6.1 tandis que les données statistiques par Arrondissement sont présentées dans l'Annexe 3D.

On se référera aux figures 6.1 à 6.8 qui présentent les caractéristiques des eaux par élément chimique, ramenées aux secteurs hydrogéologiques.

Tableau 6.1 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes⁽¹⁾ par Région

CODE	Région	Nb	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Mn	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TAC	Cond.	pH
1	Kayes	1.139	59,2	25,8	20,8	4,9	1,0	0,9	30,2	35,1	227,2	16,9	243,5	574	7,4
2	Koulikoro	1.925	24,5	14,2	6,8	4,4	0,9	0,8	25,1	18,2	146,0	3,4	123,5	303	8,9
3	Sikasso	789	20,1	13,7	3,9	4,0	0,9	0,5	3,9	16,9	120,3	1,0	96,9	224	6,8
4	Ségou	147	15,6	13,2	23,2	13,8	1,4	0,2	12,9	67,2	84,1	7,1	67,3	307	6,3
5	Hopti	55	36,6	33,3	40,5	11,6	0,5	-	35,1	67,5	207,5	1,1	169,7	568	7,4
6	Tombouctou	340	64,2	34,5	59,2	51,0	2,8	0,2	297,3	135,0	196,0	8,5	157,1	1.271	7,1
7	Gao	21	62,2	21,1	20,3	14,4	5,6	0,7	49,2	99,4	139,3	11,2	143,1	1.217	7,2

6.1.2.1. Régions ouest et sud

Dans les Régions de Kayes, Koulikoro, Sikasso et Ségou, les points d'eau exploitent exclusivement des aquifères fissurés ou des aquifères superficiels dans les couvertures d'altérites. Les eaux sont en général peu minéralisées avec des conductivités inférieures à 500 µmhos/cm (résidus secs inférieurs à 0,4 g/l) sauf dans la zone nord-sahélienne où elles peuvent dépasser 1.000 µmhos/cm.

(1) Dans tous les tableaux donnant les caractéristiques hydrochimiques, les teneurs ioniques sont exprimées en mg/l, la conductivité en µmhos/cm, le TAC en mg/l de CaCO₃ et les nitrates en mg/l d'azote (N).

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

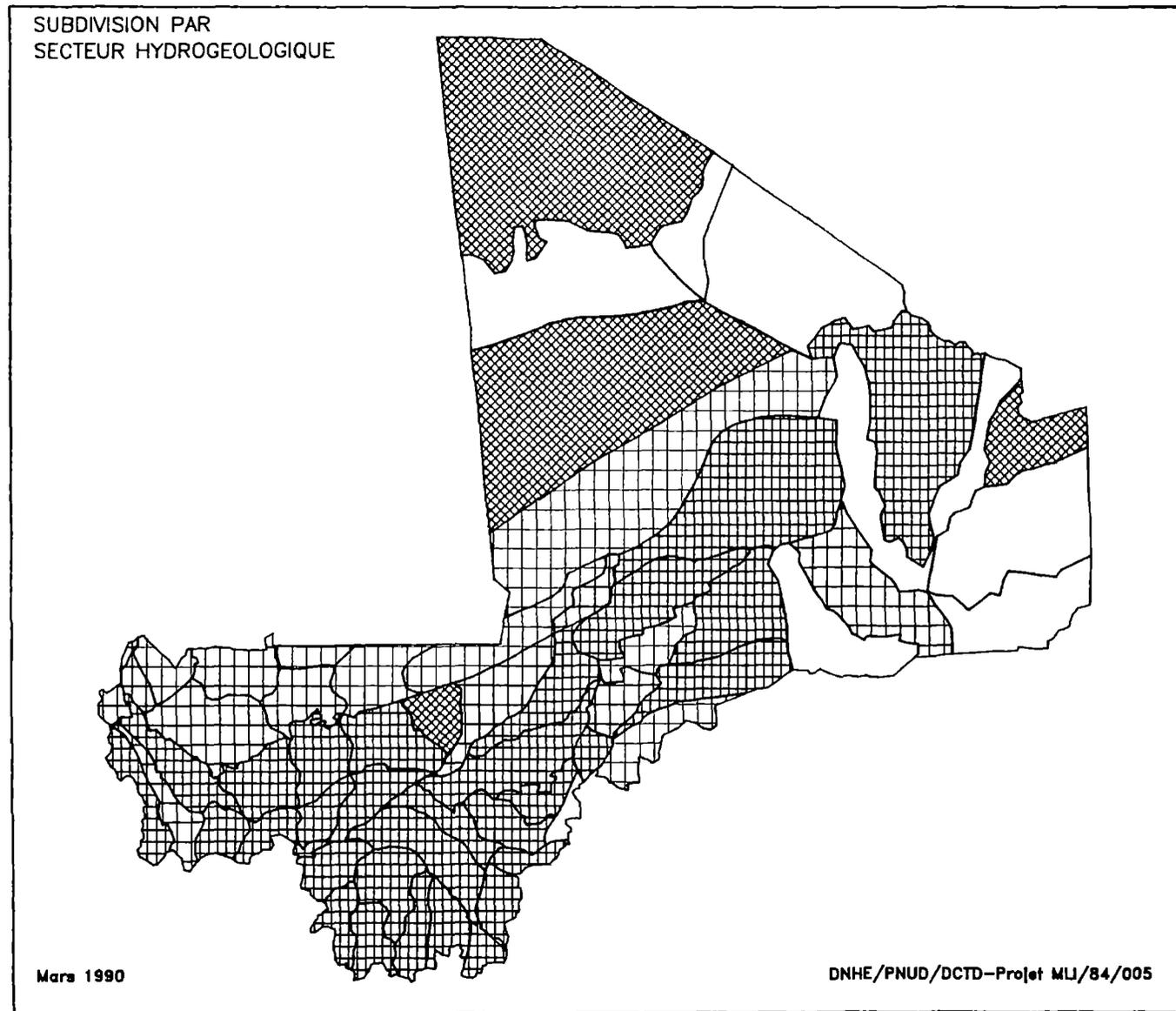
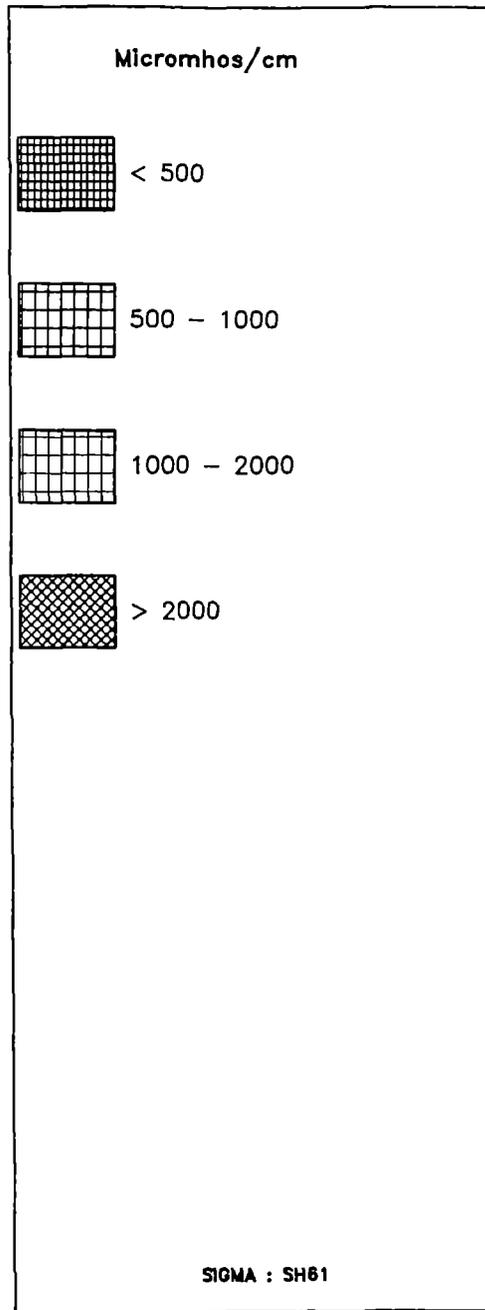


Fig. 6.1

CONDUCTIVITE MOYENNE

Le faciès dominant des eaux est bicarbonaté-calcique avec des concentrations moyennes en calcium comprises entre 20 et 50 mg/l et entre 15 et 30 mg/l pour le magnésium. Les teneurs en alcalins (sodium et potassium) sont faibles, inférieures à 10 mg/l ; de même, les teneurs en sulfate excèdent rarement 30 mg/l.

Le fer est presque toujours présent avec des concentrations pouvant atteindre 1 mg/l, c'est-à-dire une valeur supérieure à la norme OMS. Il est parfois accompagné de manganèse. Les nitrates se retrouvent aussi dans de nombreux échantillons mais avec des teneurs le plus souvent inférieures à 10 mg/l. Les pH ont des valeurs variables, mais on observe une prédominance des eaux acides sur les eaux neutres ou basiques. Les températures de l'eau sont comprises entre 27 et 33°C. Les eaux contiennent enfin fréquemment de la silice avec des teneurs de 10 à 50 mg/l.

Il faut cependant noter que des anomalies sont fréquentes et irrégulièrement distribuées : elles peuvent se localiser à un village, parfois même à un seul forage.

6.1.2.2. Région centrale

Dans la Région de Mopti où les eaux analysées proviennent principalement des aquifères généralisés du Continental intercalaire et du Continental terminal, les salinités sont plus variables et en général supérieures à celles mesurées dans les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali, sauf toutefois dans la partie centrale du delta actif du Niger.

Les eaux ont un faciès bicarbonaté calcique et magnésien avec des teneurs en magnésium souvent supérieures à celles en calcium, mais excédant rarement 50 mg/l. Les teneurs en sulfate sont en général supérieures à celles en chlorure, mais ne dépassent qu'exceptionnellement 50 mg/l. Le fer et les nitrates sont aussi présents avec des concentrations très variables pouvant atteindre localement plusieurs dizaines de mg/l. Le pH des eaux est globalement neutre à légèrement basique.

6.1.2.3. Régions est et nord

Les eaux souterraines exploitées dans les Régions de Gao et de Tombouctou proviennent principalement d'aquifères généralisés à ressources en eau fossiles qui sont beaucoup plus minéralisées que celles des aquifères fissurés périodiquement rechargées par l'infiltration de la pluie et des eaux de surface. Les conductivités sont ainsi fréquemment supérieures à 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$ et dépassent 5.000 $\mu\text{mhos/cm}$ dans la zone désertique au nord d'Araouane et dans la cuvette de Taoudenni où elles peuvent atteindre 50.000 $\mu\text{mhos/cm}$.

Toutefois, des eaux moins minéralisées, entre 300 et 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$, se rencontrent dans le sud de l'Azaouad, le long de la vallée du fleuve Niger et dans le cercle de Menaka grâce à la recharge par le fleuve.

Les fortes salinités sont liées à des teneurs élevées en chlorure et en sulfate ainsi qu'en sodium et en magnésium. Les eaux sont basiques sauf dans les zones où elles sont moins minéralisées, leur pH étant alors légèrement acide.

6.1.2.4. Limites d'utilisation des eaux souterraines selon l'usage

a) Consommation humaine et usages domestiques

Dans toutes les zones à forte densité de population, c'est-à-dire au sud du 15ème parallèle, les caractéristiques physico-chimiques moyennes sont dans les normes de l'OMS pour la minéralisation totale et la concentration en ions majeurs. Seules les teneurs en fer excèdent la norme (0,3 mg/l), mais sans que cela affecte la potabilité chimique des eaux (*figure 6.2*).

Les concentrations en nitrate varient fortement (*figure 6.3*), mais restent en général inférieures à la norme OMS de 10 mg/l sauf dans quelques secteurs d'aquifère fissuré en zone sahélienne (cercles de Yélimané et de Kayes). La température des eaux souterraines, entre 27° et 33°C, est très supérieure à la norme de l'OMS (15°C), mais ceci n'affecte en rien leur potabilité bien qu'elle favorise la prolifération bactérienne en cas de pollution organique.

Ce n'est que localement, en particulier en zone sahélienne, que des eaux de médiocre qualité peuvent être rencontrées, soit dans les aquifères superficiels en raison d'une pollution bactériologique, soit dans les aquifères fissurés profonds où la salinité peut être supérieure à 1,5 g/l avec des teneurs en magnésium ou/et en sulfate supérieures aux normes de potabilité.

Dans les régions pastorales et désertiques du nord et de l'est du Mali, les eaux très minéralisées et à faciès sulfaté ou magnésien sont le plus souvent impropres à la consommation humaine. Cependant, la rareté des points d'eau potable oblige souvent les nomades à les consommer.

b) Irrigation

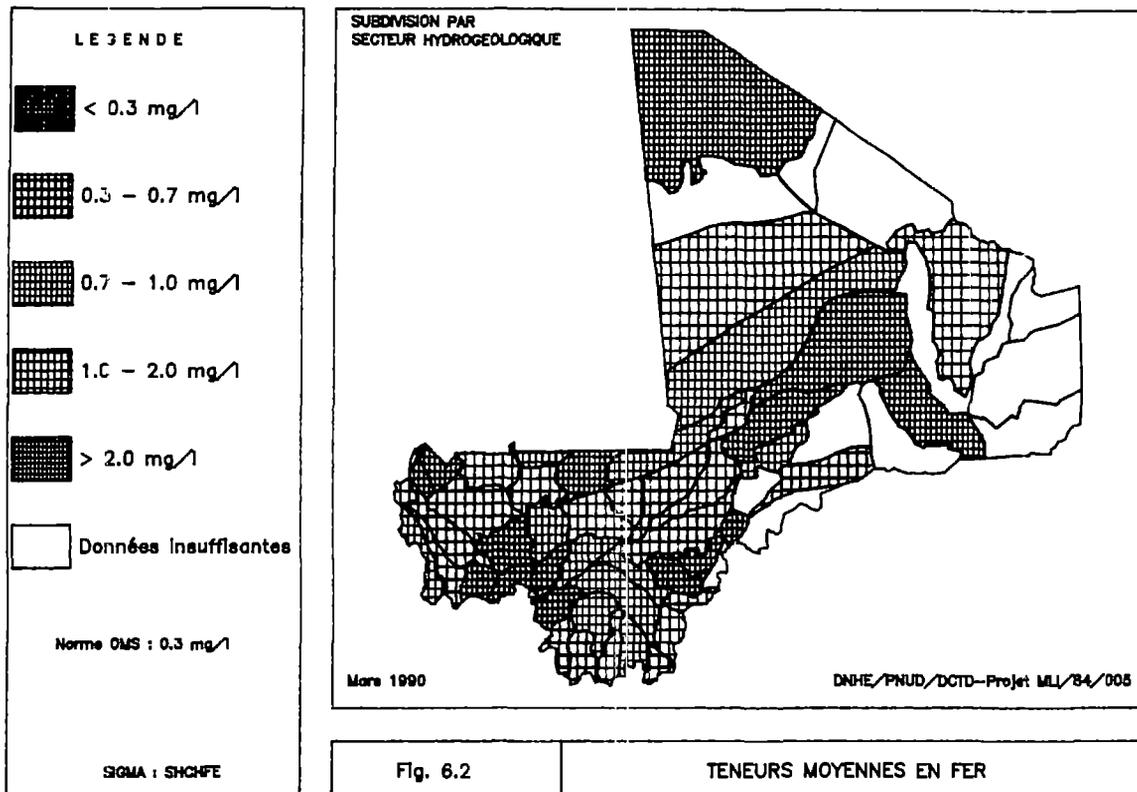
Les eaux souterraines sont utilisables pour l'irrigation dans la plupart des zones cultivables du Mali. Leur conductivité inférieure à 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$, leur basse valeur de SAR⁽¹⁾ et leur classement favorable selon les normes américaines (catégories C1-S1 et C2-S1) indiquent que ces eaux peuvent y être utilisées pour l'irrigation de la plupart des cultures et sur la majorité des sols, sans risque important de salinisation.

Par contre, dans les zones désertiques et sahéliennes de l'est et du nord, la conductivité et les teneurs en sodium des eaux souterraines constituent une contrainte restreignant leur utilisation à des fins agricoles. Toutefois, la rareté des sols arables et l'existence d'une population essentiellement nomade limitent naturellement les possibilités de développement agricole dans ces régions. Il existe cependant un potentiel agricole au sud de l'Azaouad, dans certains secteurs de la Région de Gao, dans les fonds d'oued du massif de l'Adrar des Iforas et dans la vallée du Tilemsi où la minéralisation des eaux souterraines est suffisamment basse pour l'irrigation.

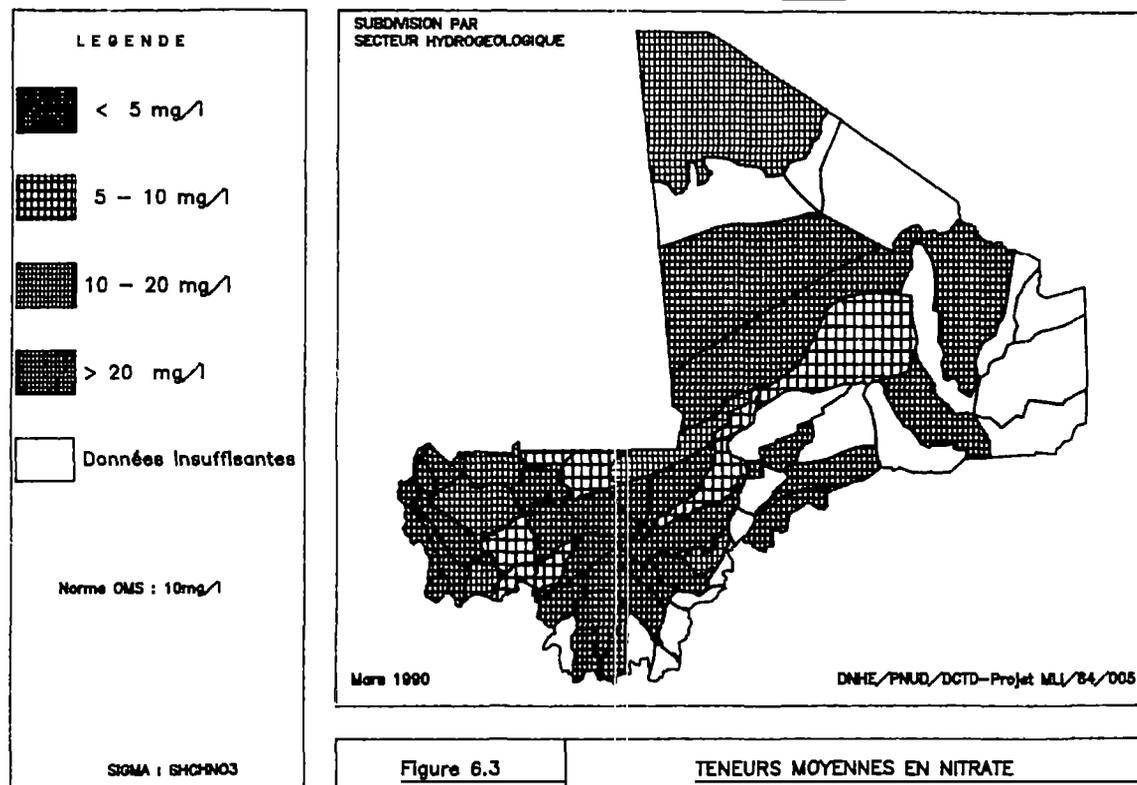
Dans l'ouest du Mali, il existe aussi des zones où l'irrigation par les eaux souterraines peut poser certains problèmes, au moins localement. Elles se situent essentiellement dans la bande sahélienne couverte par les Cercles de Yélimané, Nioro et Nara où une proportion non négligeable de forages a recoupé des venues d'eau de conductivité supérieure à 1.500 $\mu\text{mhos/cm}$ et de faciès sulfaté ou chloruré sodique pouvant limiter le choix des cultures et entraîner, à terme, une salinisation des sols.

(1) SAR : Sodium Absorption Ratio

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



c) Abreuvement du bétail

A l'exception du secteur de Taoudenni et de certaines zones de la Région de Gao en bordure de l'Adrar des Iforas, les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, au moins pour les teneurs en ions majeurs, permettent leur utilisation pour l'abreuvement du bétail sans risques particuliers.

d) Equipement des ouvrages

On constate que les eaux des aquifères fissurés sont en général acides et agressives lorsqu'elles sont faiblement minéralisées [6.1]. Les cartes des valeurs moyennes du pH et de l'indice de Ryznar⁽¹⁾ par secteur hydrogéologique (*figures 6.4 et 6.5*) montrent que, dans toute la région sud-ouest du Mali où sont localisés les aquifères de l'Infracambrien et du socle granitique, les eaux souterraines sont généralement agressives. Elles perdent ce caractère lorsque la salinité augmente comme dans l'aquifère schisteux du Cambrien en zone sahélienne et dans les aquifères généralisés où seulement quelques secteurs, en contact avec les eaux de surface, ont des pH légèrement acides.

Dans les zones où l'eau est agressive, les forages d'exploitation doivent être équipés de matériaux résistant à la corrosion tant au niveau de la colonne de captage que de la pompe, du réservoir de stockage et du réseau de distribution. L'utilisation généralisée de tubages en PVC pour les forages d'hydraulique villageoise est une solution bien adaptée. Par contre, pour les équipements de pompage, seule la pompe de type Vergnet à tuyaux de refoulement en plastique souple est résistante à la corrosion. L'utilisation de colonnes d'exhaure galvanisées s'est également avérée inappropriée. Seuls les corps de pompe et les tuyaux de refoulement en acier inox constituent une solution durable mais coûteuse, d'autant plus qu'elle devrait être appliquée à plus de 50 % des forages exploitant les aquifères fissurés (jusqu'à 70 % dans certaines zones).

Lorsque les teneurs en fer sont élevées et surtout si elles se combinent avec l'activité de ferro-bactéries, un colmatage progressif des crépines du forage et de la pompe peut se produire et affecter la capacité d'exploitation de l'ouvrage. Un traitement périodique du forage est alors nécessaire si l'on veut conserver son potentiel en eau.

6.1.3. Caractéristiques des aquifères

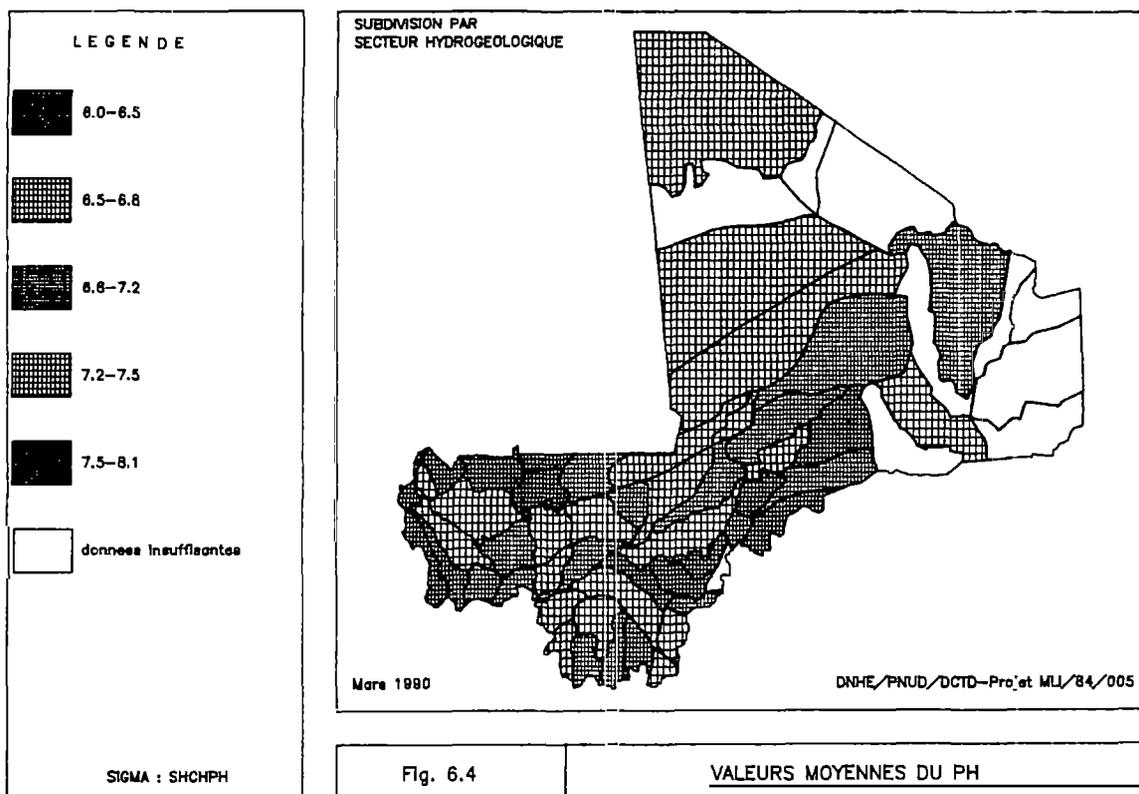
Près des 96 % des analyses enregistrées dans la banque SIGMA sont relatives aux aquifères fissurés. Leur répartition par unité hydrogéologique, sans être homogène, est toutefois suffisamment dense, à quelques exceptions près, pour définir des valeurs statistiques moyennes significatives.

Pour les aquifères généralisés, malgré le nombre réduit d'analyses et du fait de la faible variabilité de leurs caractéristiques chimiques, les données sont suffisantes pour identifier l'origine de leur minéralisation, évaluer leur utilisation potentielle et définir leurs principales caractéristiques à l'échelle des aquifères.

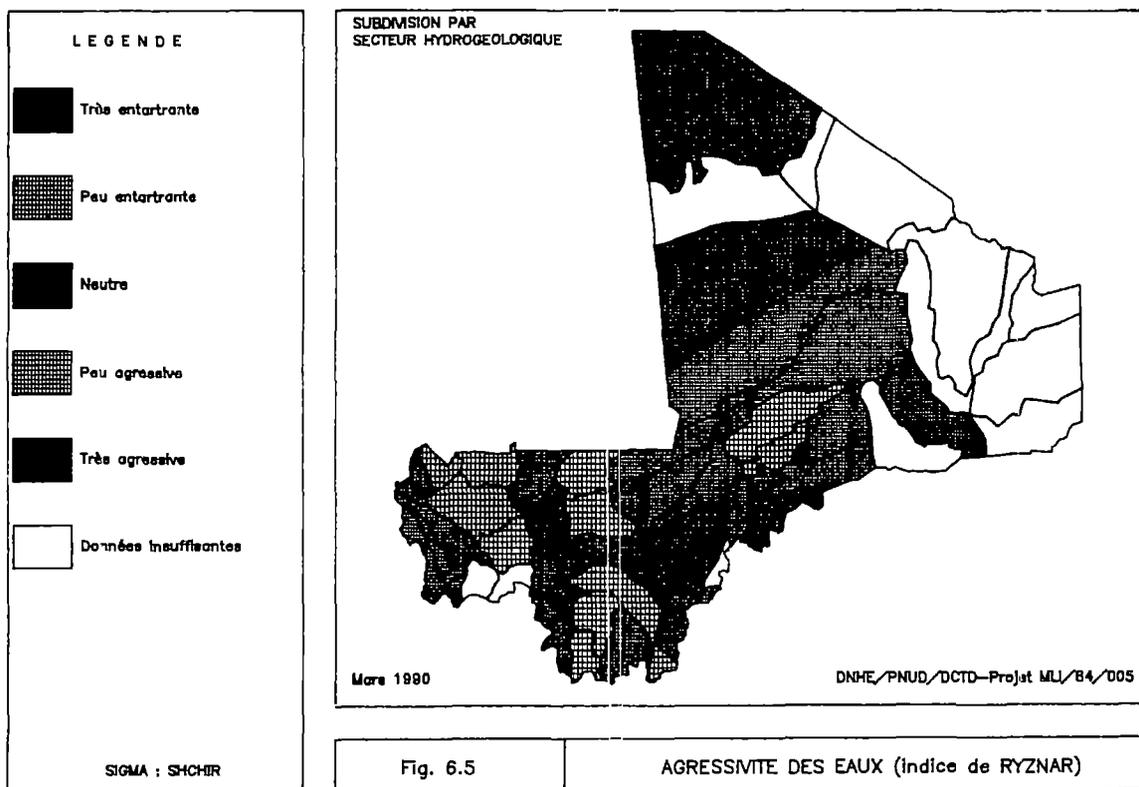
On se reportera également aux figures 6.1 à 6.8 qui montrent la répartition de différentes caractéristiques chimiques des aquifères par secteur hydrogéologique.

(1) Indice de Ryznar $I_r = 2(\text{pH sat}) - \text{pH}$
avec $\text{pH} = \text{valeur mesurée}$ et $\text{pH sat} = A + B - \log [\text{TAC}]$,
A et B étant des constantes, fonctions respectivement de la température et de la conductivité et qui sont déterminées à partir de tables de référence.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



6.1.3.1. Aquifère du socle

Les échantillons d'eau analysés ont été exclusivement prélevés dans des forages exploitant l'horizon aquifère constitué par le réseau fissural profond et le niveau d'arènes grenues situé à la base de la couverture d'altérites.

Tableau 6.2 -Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du socle

Unité hydrogéologique		Nb Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TAC	pH	Cond.
Nom	Code													
Kayes	96	101	41	39	29	21	3,7	80	86	296	1,6	243	7,6	1.085
Kéniéba	95	40	39	33	4,8	7,8	1,0	14	8,4	277	0,7	233	7,9	474
Sankarani	94	118	19	13	6,6	2,3	0,3	3,6	9,0	131	2,9	129	7,3	228
Baoulé	93	240	18	12	3,9	4,1	0,7	3,3	3,6	123	1,8	104	6,9	219
Bagoé	92	188	23	14	3,8	1,4	1,0	6,7	4,9	151	0,2	125	7,1	263
MOYENNE AQUIFERE		(687)	24	18	5,9	4,3	1,1	21	27	168	2,1	142	7,2	375

() total

Les eaux du socle sont caractérisées par une faible conductivité, un faciès bicarbonaté calcique et des teneurs en sulfate et en chlorure inférieures à 20 mg/l. Le fer est presque toujours présent avec une concentration moyenne de 1,1 mg/l, mais les valeurs les plus élevées peuvent être dues en fait au fer provenant de la corrosion des pompes de type India.

Le pH varie entre 5,6 et 8,8, les eaux à pH acide étant toutefois les plus fréquentes. L'indice moyen de Ryznar est de 8,8 et confirme la proportion élevée d'eaux agressives qui représentent, suivant les unités, entre 30 et 60 % des échantillons.

Les eaux localisées dans les massifs granitiques sont généralement moins minéralisées que celles associées aux roches métamorphiques; leurs teneurs en bicarbonate et leur pH sont aussi plus faibles.

L'unité de Kayes se singularise par des eaux en moyenne 3 à 4 fois plus minéralisées que celles des autres unités. Cette augmentation de salinité est principalement due aux teneurs en sulfate et en chlorure et peut s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs :

- lithologie complexe avec une proportion importante de faciès schisteux,
- faible perméabilité et nappe discontinue sans exutoire superficiel et donc une très lente circulation de l'eau impliquant des temps de résidence très longs.

Dans les autres unités situées dans la zone climatique soudanienne, l'aquifère fissuré est surmonté par une épaisse couche d'altérites saturée d'eau et n'est pratiquement pas affecté par l'évaporation. Une recharge saisonnière importante et la nature semi-continue de l'horizon aquifère profond permettent une circulation des eaux souterraines drainées par le réseau hydrographique, d'où une faible minéralisation.

La conductivité de l'eau des forages exécutés dans l'Adrar des Iforas est comprise entre 300 et 8.000 $\mu\text{mhos/cm}$. Elle témoigne de la grande variabilité des caractéristiques hydrochimiques de cette unité due à l'hétérogénéité de la lithologie et à la discontinuité de cet aquifère. La salinité des eaux y est en général supérieure à 1 g/l et ce n'est qu'à l'aplomb des fonds d'oued où existent des petites nappes alluviales réalimentées par les crues que la salinité peut descendre au-dessous de cette valeur.

6.1.3.2. Aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Plus de 50 % des analyses chimiques de la banque SIGMA (2305 sur 4116) concernent cet aquifère avec un peu plus de 1.000 analyses sur la seule unité de Kolokani-Guiré (zone d'activités des projets PNUD/DCTD).

Tableau 6.3 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Unité hydrogéologique		Nb Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na'	K'	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TAC	pH	Cond.
Nom	Code													
Bafing	77	107	33	24	5,0	4,6	0,4	5,9	26	210	7,9	247	7,4	434
Bakoye	76	282	30	11	12	4,7	0,3	2,5	9,9	123	7,0	-	7,1	247
Baoulé	75	473	20	12	11	4,9	0,8	12	23	119	2,7	99	6,7	254
Kolokani-Guiré	74	1.031	24	14	13	4,5	0,9	28	21	153	3,8	125	6,9	319
Bani moyen	73	278	24	18	2,4	2,3	1,0	3,2	5,9	125	3,0	97	6,7	240
San - Koutiala	72	127	7,7	5,6	0,9	1,0	0,4	3,9	4,1	36	0,3	29	6,3	95
Plateau Dogon	71	7	37	15	1,6	-	0,6	11	27	195	0,1	160	7,3	420
MOYENNE AQUIFERE		(2.305)	24	14	8,3	4,8	0,8	17	26	136	4,4	112	6,8	281

Les eaux de l'Infracambrien tabulaire sont encore moins minéralisées que celles du socle avec une conductivité moyenne de l'ordre de 280 $\mu\text{mhos/cm}$ (moins de 0,2 g/l de résidu sec). Dans certains secteurs où les grès sont prédominants et les zones fissurées peu profondes, la conductivité est inférieure à 100 $\mu\text{mhos/cm}$ et peut même descendre au-dessous de 50 $\mu\text{mhos/cm}$. Les eaux ont un faciès bicarbonaté calcique avec des teneurs en calcium nettement supérieures aux teneurs en magnésium. Les eaux sont en général acides et agressives.

Les teneurs en fer sont très variables mais restent, en moyenne, inférieures à 1 mg/l. Les nitrates sont fréquents mais avec des concentrations faibles, le plus souvent inférieures à 10 mg/l, ce qui n'exclut pas, localement, des valeurs pouvant excéder 50 mg/l.

Parmi les facteurs contrôlant la composition chimique des eaux souterraines, la lithologie joue un rôle déterminant, soit directement comme source de minéraux mis en solution dans l'eau (*tableau 6.4*), soit indirectement en favorisant ou en limitant selon la perméabilité les écoulements au sein des zones fissurées et de la couverture latéritique.

Tableau 6.4 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes selon le faciès lithologique dominant (Aquifère de l'Infracambrien tabulaire - Unité de Kolokani-Guiré)

Faciès Lithologique	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	Cond.
Grès	22	-	9,9	5,8	1,1	15	25	113	4,5	6,7	271
Schistes/grès	29	-	14	4,8	0,9	31	28	181	4,8	7,0	412
Schistes/grès/dolérites	40	-	16	4,7	0,7	34	42	182	8,9	7,2	437
Schistes/jaspes/calcaires	39	-	8	4,9	1,3	21	51	170	2,2	7,0	542

Les eaux contenues dans les grès sont les moins minéralisées avec de faibles teneurs en chlorure et en bicarbonate. Elles sont acides et agressives et la corrosion des pompes y est particulièrement fréquente.

Les séquences grésos-schisteuses contiennent des eaux nettement plus minéralisées avec une augmentation des teneurs en bicarbonate et, à un degré moindre, en chlorure et en sodium. Le pH moyen des eaux dans ce type de formation est neutre.

La présence d'intrusions doléritiques augmente légèrement la conductivité avec un enrichissement en calcium et en magnésium, le pH des eaux devenant légèrement basique.

Les salinités les plus fortes sont associées aux horizons de jaspes et de calcaires fissurés interstratifiés dans la partie moyenne de l'Infracambrien. Cet accroissement de la salinité est lié à un temps de résidence plus long de l'eau dans cet horizon perméable au contact des épontes schisteuses qui le mettent en charge. Ceci a été mis en évidence par les études isotopiques qui ont montré que ces eaux étaient plus anciennes (absence de tritium) que celles des zones gréseuses homogènes.

La composition chimique des eaux dans les différentes unités hydrogéologiques de l'Infracambrien varie peu. Elle dépend principalement des proportions relatives de grès et de schistes ainsi que de la densité et de l'extension des intrusions doléritiques.

Bien que les eaux de l'aquifère infracambrien soient en majorité de bonne qualité chimique, mis à part leur agressivité et leurs teneurs en fer supérieures aux normes OMS, quelques forages, dans chacune des unités, présentent des anomalies chimiques avec une minéralisation élevée, jusqu'à 5 g/l, et un faciès sulfaté calcique ou chloruré sodique. Ces anomalies difficilement explicables sont très localisées, les forages d'un même site pouvant présenter des salinités variant dans un rapport de 1 à 5. On a seulement observé que ces anomalies semblaient être liées aux intrusions doléritiques ou à la présence de schistes à minéralisation diffuse.

6.1.3.3. Aquifère de l'Infracambrien plissé

Peu de forages ont été réalisés dans cet aquifère notamment dans le Gourma. Dans l'unité du Nord delta (81), la plupart des analyses correspondent à des eaux prélevées dans le secteur où l'aquifère fissuré est en contact direct avec celui du Continental terminal/Quaternaire.

Tableau 6.5 -Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère de l'Infracambrien plissé

Unité hydrogéologique		Nb Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ^{..}	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TAC	pH	Cond.
Nom	Code													
Nord delta	81	42	63	37	71	9,0	1,5	69	263	229	5,5	182	6,7	876
Gourma	82	17	60	31	-	-	0,7	522	82	360	0,3	295	7,3	1.214
MOYENNE AQUIFERE		(59)	66	35	-	-	1,1	240	214	273	4,7	220	6,8	974

Les eaux sont relativement minéralisées avec des résidus secs dépassant 1 g/l dans tous les secteurs où la surface piézométrique est profonde. Le faciès chimique est sulfaté calcique ou chloruré sodique avec des teneurs en bicarbonate élevées et des pH basiques tandis que les teneurs en nitrate sont plutôt faibles.

Lorsque l'aquifère fissuré est au contact de l'aquifère du Continental terminal, la salinité décroît et le faciès chimique devient sulfaté et bicarbonaté avec des teneurs élevées en sodium et une augmentation des teneurs en nitrate.

6.1.3.4. Aquifère du Cambrien

La plupart des analyses concernant cet aquifère intéressent l'unité du Kaarta où plusieurs projets d'hydraulique villageoise et pastorale se sont succédés.

Tableau 6.6 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du cambrien

Unité Hydrogéologique		Nb Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TAC	PH	Cond.
Nom	Code													
Kaarta	82	414	102	32	32	3,6	1,5	41	43	298	34	248	7,5	749
Ouagadou	61	95	72	37	47	6,6	1,6	99	62	313	6,6	281	7,5	1.016
MOYENNE AQUIFERE		(509)	94	13	36	3,9	1,5	61	92	302	30	250	7,5	790

Les eaux du Cambrien ont une minéralisation relativement élevée avec des valeurs moyennes de résidu sec par unité hydrogéologique comprises entre 500 et 800 mg/l. Un nombre important de forages présente une salinité supérieure à 1 g/l et donc une qualité médiocre pour la consommation. Les eaux non potables du point de vue chimique ne concernent toutefois que les quelques ouvrages où les teneurs en sulfate et en magnésium sont supérieures aux normes OMS.

Les eaux les moins minéralisées ont un faciès bicarbonaté calcique tandis que les eaux à concentration élevée ont un faciès chloruré sodique et magnésien. Les teneurs en fer sont en général supérieures à 1 mg/l tandis que les teneurs en nitrate peuvent dépasser 30 mg/l.

Les fortes salinités mesurées sont dues à la prédominance de formations schisteuses et aux intrusions doléritiques massives qui caractérisent la série stratigraphique du Cambrien. En outre, l'évaporation des nappes, mise en évidence par les études isotopiques, joue un rôle important dans l'augmentation de la salinité.

6.1.3.5. Aquifère des formations primaires de Taoudenni

Les données disponibles ne concernent que les formations carbonifères qui n'ont été reconnues que sur le site de Taoudenni.

Tableau 6.7 - Analyses chimiques de deux points d'eau de Taoudenni

Aquifère	Secteur hydrogéol.		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺ + K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ H ⁻	pH	Résidu Sec	Cond.
Primaire Taoudenni	51	Puits	749	226	803	1.900	1.700	115	7,1	5.840	7.880
		Forages	577	107	-	5.248	5.750	105	7,8	17.650	23.230

Un forage réalisé en 1969 à proximité des salines de Taoudenni a recoupé, dans les calcaires carbonifères vers 300 m de profondeur, un aquifère captif dont la salinité serait de 150 g/l. Des forages moins profonds exécutés dans le même secteur par le projet PNUD/DCTD/ MLI/80/005 ont rencontré jusqu'à une cinquantaine de mètres de profondeur des eaux dont les conductivités varient de 13.000 à plus de 50.000 $\mu\text{hos/cm}$. Des puits creusés dans la partie supérieure de la nappe, à quelques mètres seulement sous le sol, exploitent des lentilles d'eau moins minéralisées où la salinité est de l'ordre de 5 g/l, mais avec toutefois des teneurs en chlorures et en sulfates de 1,7 et 1,9 g/l respectivement.

Cette diminution de la salinité est due à une dilution des eaux saumâtres des calcaires carbonifères par les eaux d'infiltration issues des ruissellements épisodiques. Bien que de qualité très médiocre, elles sont néanmoins utilisées par les nomades et les mineurs des salines d'Agorgott car il n'existe pas d'autres ressources en eau dans ce secteur.

6.1.3.6. Aquifères du Continental intercalaire et du Continental intercalaire/terminal

Les analyses chimiques effectuées sur les eaux des formations des aquifères du Continental intercalaire et du Continental intercalaire/terminal, bien que peu nombreuses, permettent cependant de définir leurs caractéristiques hydrochimiques. Par ailleurs, une étude géochimique et isotopique menée dans le désert de l'Azaouad a aussi permis d'identifier l'origine des eaux des grands aquifères localisés dans cette zone [6.7].

Tableau 6.8 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes des aquifères du Continental intercalaire et du Continental intercalaire/terminal

Unité ou secteur hydro.		Nb. Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺ K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁻ CO ₃ ⁻⁻	pH	Résidu sec	Cond.
Non	Code										
Tanesna	41	6	23	7	58	31	96	96	7,5	451	600
Nord Azaouad/ Sect. Nord Araouane	31b	7	184	271	1.343	1.348	1.981	470	7,0	4.780	6.290
Nord Azaouad/ Sect. Sud Araouane	31a	7	38	17	51	45	68	153	6,7	435	580
Fossé de Nara	32	6	25	5	12	4	7	126	6,5	200	270
MOYENNE AQUIFERE		(26)	61	54	334	1.016	224	243	7,4	1.200	1.438

a) Unité du Tamesna

Dans le secteur sud où l'aquifère est captif, les eaux sont moyennement minéralisées avec des conductivités comprises entre 400 et 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$. Elles ont un faciès bicarbonaté ou sulfaté avec des teneurs en alcalins pouvant être relativement importantes et un pH basique. Des eaux saumâtres ont été rencontrées dans le secteur NE de cette unité où le Continental intercalaire est affleurant, avec un résidu sec proche de 4 g/l et un faciès sulfaté et chloruré sodique. Cette augmentation de la salinité est liée à l'évaporation car les niveaux d'eau se situent à faible profondeur sous le sol.

b) Unité de l'Azaouad nord

Les deux secteurs qui constituent cette unité présentent des caractéristiques hydrochimiques très différentes :

- au sud d'Araouane (secteur 31a), les eaux ont des conductivités inférieures à 1.000 $\mu\text{mhos/cm}$, un faciès bicarbonaté calcique et sont légèrement acides et réductrices. Les teneurs en nitrate sont inférieures à 5 mg/l et peuvent n'exister qu'à l'état de traces;
- au nord d'Araouane (secteur 31b), les eaux ont une conductivité moyenne de l'ordre de 6.300 $\mu\text{mhos/cm}$ (résidu sec d'environ 4,5 g/l) dépassant 10.000 $\mu\text{mhos/cm}$ dans plusieurs forages. Les eaux sont sulfatées sodiques avec une teneur moyenne en sulfate de plus de 2 g/l, supérieure à celle en chlorure. Les teneurs en magnésium sont toujours plus élevées que celles en calcium et varient entre 100 et 800 mg/l.

Les différences de salinité entre les deux secteurs sont liées aux modes de recharge de cette unité aquifère durant l'Holocène supérieur, l'infiltration actuelle étant nulle (voir paragraphe 6.1.4).

c) Unité du fossé de Nara

Les eaux y sont douces avec des résidus secs en général inférieurs à 0,4 g/l, un faciès bicarbonaté calcique et de très faibles teneurs en sulfate et en chlorure. Cette unité dont les eaux sont fossiles a été rechargée à la fin du Pléistocène et durant l'Holocène.

La salinité augmente sur la bordure méridionale du fossé où elle peut atteindre 1 g/l, probablement par contamination à partir de l'aquifère fissuré des grès infracambriens. Elle augmente plus fortement au niveau de la terminaison orientale du fossé, dans le secteur de Gargando, où elle peut dépasser 2 g/l avec des eaux bicarbonatées sodiques et une teneur en fluor de 1,7 mg/l. Cette salinité élevée est liée à l'évaporation sur les plans d'eau lacustres de la fin de l'Holocène.

6.1.3.7. Aquifère du Crétacé supérieur / Eocène inférieur

Toutes les analyses concernant cet aquifère portent sur des forages de reconnaissance hydrogéologique exécutés avant 1970 [6.2].

Tableau 6.9 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur

Secteur hydrogéologique	Code	Nb. Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na+K'	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ H ⁻ CO ₃ ⁻⁻	pH	Résidu Sec	Cond.
Sud Adrar	21a	10	85	25	89	65	280	205	-	768	1.020
Ouest Adrar	21b	11	305	177	432	590	1.053	159	7,4	3.008	3.950
MOYENNE AQUIFERE		(21)	200	110	280	330	700	180	-	1.900	2.500

Dans le secteur Sud Adrar des Iforas, la zone orientale renferme des eaux de qualité médiocre avec des résidus secs dépassant 1 g/l et un faciès sulfaté calcique. Dans la zone occidentale, entre Ansongo et Menaka, la salinité est le plus souvent inférieure à 1 g/l avec toutefois des teneurs en sodium, chlorure et sulfate relativement élevées.

Dans le secteur Ouest Adrar des Iforas, les formations éocènes contiennent des horizons lagunaires et les eaux sont saumâtres avec des résidus secs dépassant 2 g/l et un faciès sulfaté calcique.

6.1.3.8. Aquifère du Continental terminal / Quaternaire

Pour les unités du fossé de Gao et de l'Azaouad sud où le Continental terminal est très épais, les analyses chimiques ne sont représentatives que des couches aquifères supérieures, les seules à être exploitées par forages. Dans l'unité du delta intérieur où il est d'épaisseur plus réduite, les forages ont par contre capté la majeure partie de la zone aquifère.

Tableau 6.10 - Caractéristiques hydrochimiques moyennes de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire

Unité ou secteur hydrog.		Nb. Anal.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na+K'	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ H ⁻ CO ₃ ⁻⁻	pH	Résidu Sec	Cond.
Nom	Code										
Fossé de Gao Secteur Sud Adrar	12b	7	32	10	93	43	38	181	-	366	490
Fossé de Gao Secteur Ouest Adrar	12a	9	277	149	276	473	664	143	7,8	2.440	3.210
Sud Azaouad	13	10	18	17	0,3	5	17	144	7,0	190	250
Delta Intérieur Secteur Sud	16c	27	13	14	5,6	36	17	117	6,8	165	219
Delta Intérieur Sect. Central	15b	21	21	16	4,9	8,5	7,3	135	7,2	210	280
Delta Intérieur Secteur Ouest	15a	13	27	29	(67)	32	62	179	7,3	520	696
MOYENNE AQUIFERE		(87)	52	34	25	216	88	162	7,2	800	1.104

a) Unité du fossé de Gao

La salinité des eaux varie d'une manière comparable à celle de l'aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur sur lequel reposent les formations du Continental terminal, avec :

- dans la zone située au sud de l'Adrar des Iforas (secteur 12b), des eaux peu minéralisées (résidus secs variant entre 0,2 et 0,7 g/l), un faciès bicarbonaté calcique ou sodique pour les eaux les plus minéralisées et des teneurs en chlorure et en sulfate relativement faibles,
- dans le couloir de Gao, entre l'Adrar des Iforas et le Gourma (secteur 12a), des eaux saumâtres avec des résidus secs pouvant atteindre 5 g/l et des eaux de faciès sulfaté calcique et magnésien avec des teneurs en sulfate variant entre 0,5 et 2 g/l.

En bordure du fleuve Niger, l'aquifère est rechargé par les eaux de surface et la salinité décroît à moins de 1 g/l. Les eaux conservent toutefois un faciès sulfaté calcique alors que celles du fleuve sont bicarbonatées ce qui paraît confirmer le caractère limité de la recharge de cet aquifère par les eaux de surface.

b) Unité de l'Azaouad sud

Les eaux sont en général peu minéralisées avec des résidus secs compris entre 0,2 et 0,7 g/l et un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Elles sont neutres ou légèrement basiques. Les teneurs en nitrate sont inférieures à 1 mg/l, mais peuvent atteindre, dans certains puits, jusqu'à 50 mg/l. Les plus faibles salinités sont localisées sur la bordure sud de cette unité où la nappe est rechargée par les crues du fleuve Niger. Elles croissent vers le nord, probablement en liaison avec le remontée du substratum infracambrien, et vers l'est en bordure de l'unité du fossé de Gao.

c) Unité du delta intérieur

Dans les différents secteurs de cette unité, la salinité moyenne reste faible (de l'ordre de 0,25 g/l). Les eaux sont neutres ou légèrement basiques et bicarbonatées calciques. Les teneurs en nitrate sont faibles (en général inférieures à 1 mg/l) et le fer est souvent présent avec une teneur moyenne de 1,1 mg/l dans la zone lacustre (secteur 15b).

La salinité croît vers les bordures du delta actif, à l'ouest dans le Méma Dioura où elle est en moyenne de 0,5 g/l, et surtout à l'est, en bordure du Gourma, où elle peut dépasser localement 1,3 g/l, les eaux s'enrichissant en sulfate et en chlorure.

Il faut noter que les salinités des eaux de cette unité sont nettement supérieures à celles du fleuve Niger qui varient entre environ 30 mg/l à l'entrée du delta jusqu'à moins de 100 mg/l à sa sortie près de Tombouctou. Cette différence de minéralisation est due essentiellement à l'évaporation de la nappe dans les secteurs où la surface piézométrique est peu profonde, mais aussi à l'importance limitée de la recharge par les eaux de surface dès que l'on s'éloigne du fleuve ou des zones périodiquement inondées.

6.1.4. Répartition régionale des teneurs ioniques

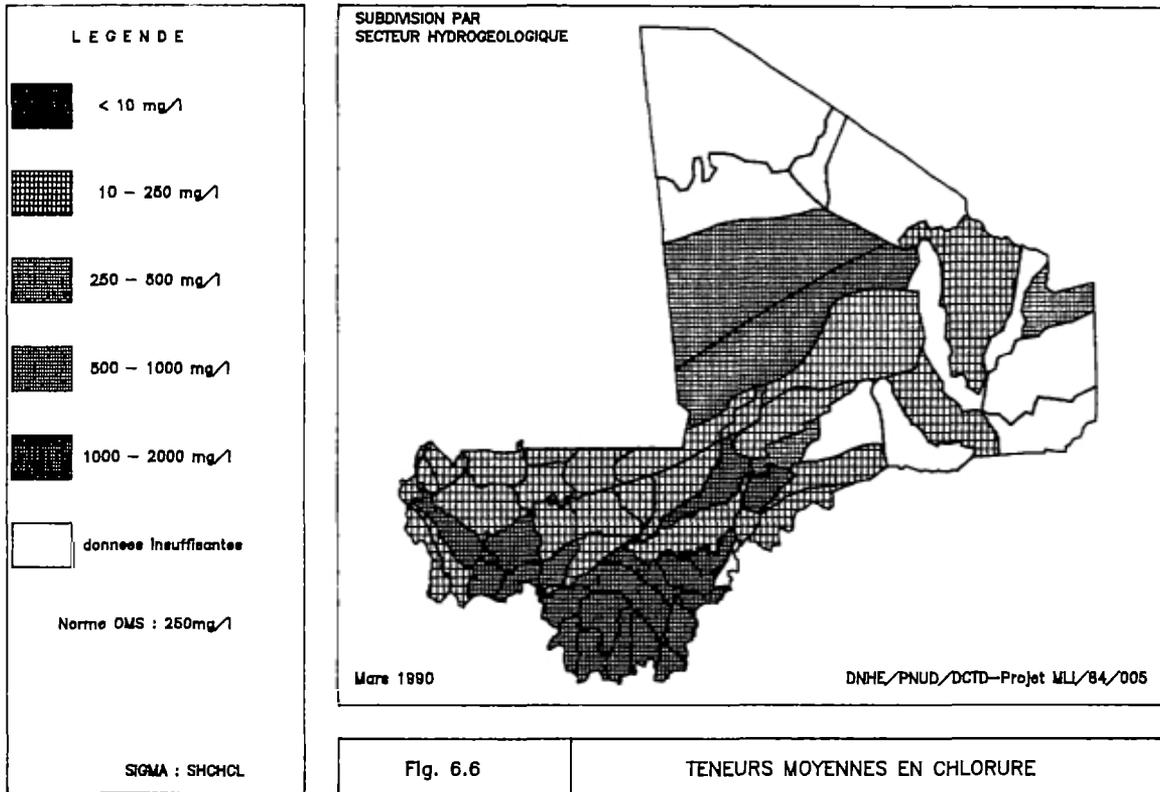
Les cartes représentant les valeurs moyennes par secteur hydrogéologique des teneurs ioniques des éléments dosés dans les analyses standard peuvent être consultées dans le rapport HDG/NTL/12, seules celles des éléments les plus représentatifs sont fournies dans la présente synthèse.

6.1.4.1. Chlorures

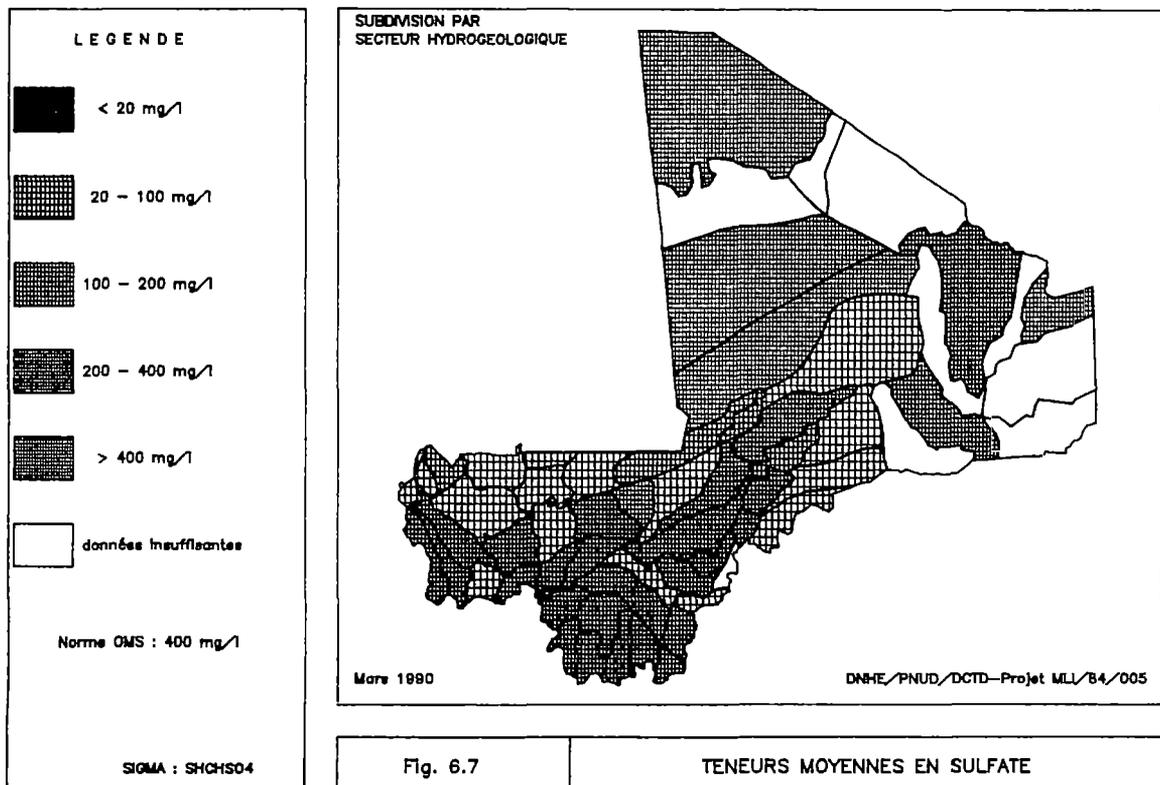
Dans la moitié ouest du Mali, les teneurs en chlorure (*figure 6.6*) croissent du sud vers le nord selon un gradient variant avec la latitude de la même manière que celui des paramètres climatiques : les concentrations augmentent pour des pluviométries décroissantes et une évapotranspiration croissante. Les teneurs en chlorure étant généralement considérées comme un bon indicateur de l'influence de l'évaporation, leurs variations régionales confirmeraient l'importance de la vidange par évapotranspiration dans le bilan des aquifères à ressources renouvelables.

Pour les aquifères généralisés, les teneurs en chlorure sont faibles dans les unités localisées dans la vallée du Niger moyen où les eaux sont peu minéralisées. Elles augmentent dans les secteurs où la nappe s'approfondit. Les fortes concentrations en chlorures ne sont rencontrées que dans le fossé de Gao et dans la zone désertique couvrant le nord du Mali.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



6.1.4.2. Sulfates

La répartition régionale des teneurs en sulfate (*figure 6.7*) présente des similitudes avec celle des teneurs en chlorure, les valeurs minimales étant rencontrées dans les aquifères du socle de l'ouest du Mali et les valeurs maximales dans le nord et l'est du pays. L'augmentation des concentrations vers le nord est toutefois plus irrégulière, l'influence de la lithologie des formations aquifères pouvant masquer les effets de l'évaporation. C'est ainsi que, dans les aquifères de l'Infracambrien tabulaire et plissé et en bordure du delta et du Gourma, des concentrations en sulfate beaucoup plus importantes peuvent être rencontrées : elles sont à mettre en relation avec une plus grande fréquence des schistes à minéralisation diffuse. C'est aussi le cas pour l'aquifère du Crétacé supérieur/Eocène inférieur qui inclut des niveaux de schistes pyriteux.

Par contre les eaux de l'aquifère du Continental terminal de la vallée du Niger, à l'exception de l'unité du fossé de Gao contaminée par des apports des couches aquifères éocènes, sont caractérisées par de faibles teneurs en sulfate.

6.1.4.3. Calcium et magnésium

Les secteurs de faible teneur en calcium (*figures 6.8 et 6.9*) dessinent une bande, orientée approximativement SO-NE, qui couvre, entre les zones climatiques soudanienne et sahélienne, les aquifères du socle et des grès infracambriens de l'ouest du Mali et les formations du Continental intercalaire et du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger. La faible teneur mesurée dans l'unité du socle de l'Adrar des Iforas n'est pas réellement représentative. Au nord et au sud de cette bande, les concentrations en calcium augmentent et sont maximales dans les zones nord-sahélienne et désertique, suivant l'augmentation de la salinité.

La répartition des teneurs en magnésium est différente. Le rapport des concentrations (en milliéquivalents par litre) en magnésium et en calcium montre un enrichissement relatif en magnésium dans les aquifères du socle et du Continental terminal. Les eaux des formations grés-schisteuses de l'Infracambrien et du Cambrien ainsi que celles du Continental intercalaire et du Crétacé supérieur/Eocène inférieur montrent par contre un enrichissement relatif en calcium.

6.1.5. Facteurs de variation de la salinité des aquifères fissurés

Tout comme pour les aquifères généralisés, la lithologie a un rôle déterminant dans la salinité et le faciès chimique des eaux des aquifères fissurés. Mais d'autres facteurs interviennent qui sont liés d'une part aux conditions d'écoulement des eaux souterraines dans ce type d'aquifères semi-continus, d'autre part à l'influence du contexte hydrogéologique local qui contrôle la recharge et la vidange des nappes ainsi que leur taux de renouvellement.

6.1.5.1. Variations verticales

Des statistiques d'évolution de la salinité en fonction de la profondeur de l'eau, de l'épaisseur du recouvrement et de la profondeur de la venue d'eau principale ont été établies à partir des données de conductivité d'environ 4.500 forages, tous aquifères confondus.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

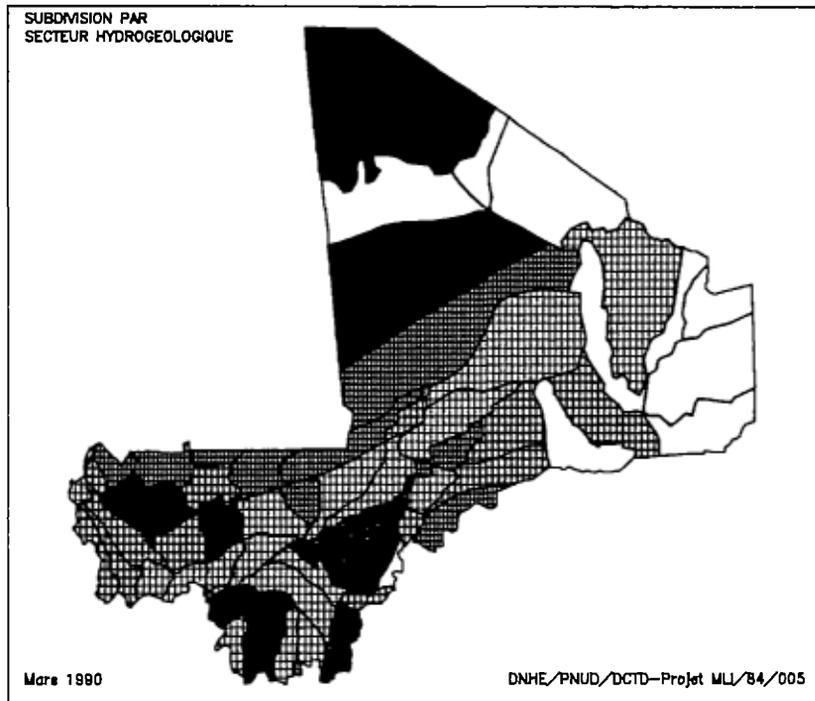
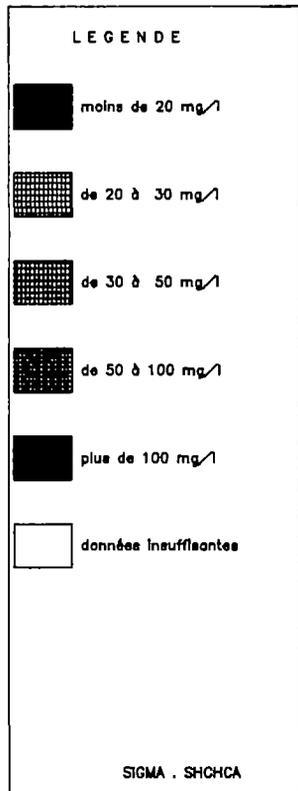


Fig. 6.8 TENEURS MOYENNES EN CALCIUM

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

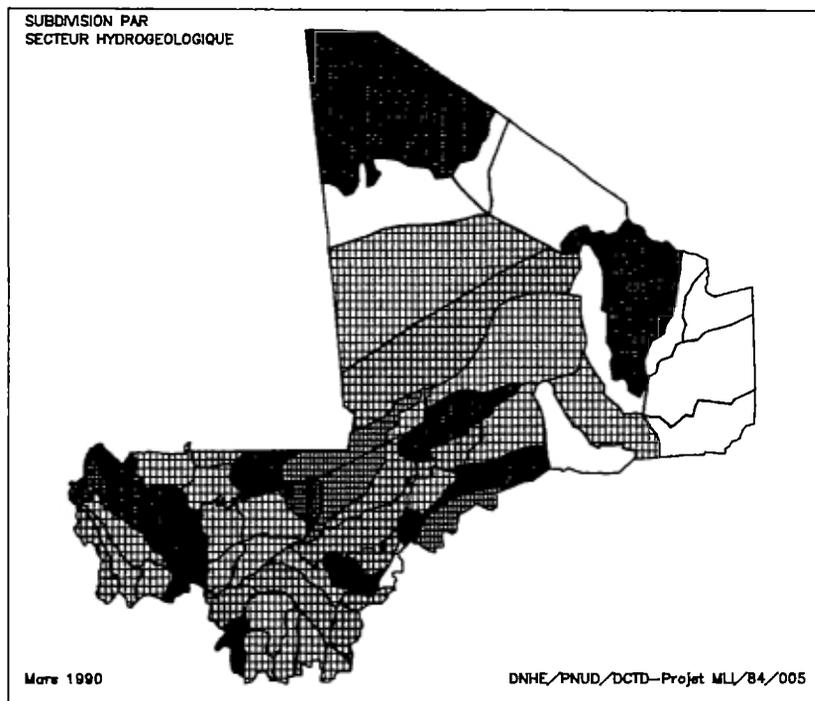
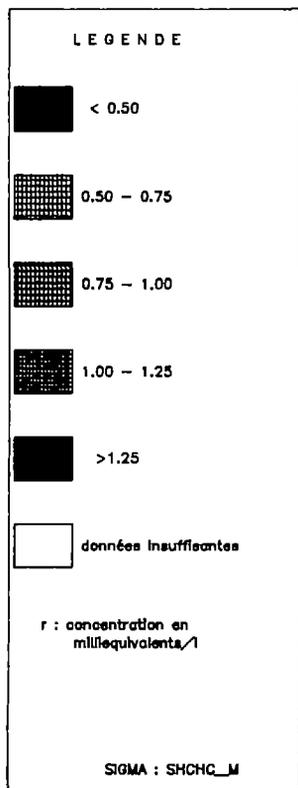


Fig. 6.9 VALEURS MOYENNES DU RAPPORT rMg / rCa

Tableau 6.11 - Variations de la conductivité moyenne (en micromhos/cm) en fonction des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères fissurés

Profondeur niv. statique (m)	Cond.
< 10	414
10 - 20	355
20 - 30	541
> 30	1.399

Epaisseur recouvrement (m)	Cond.
0 - 10	516
10 - 20	396
20 - 30	333

Profondeur venue d'eau principale (m)	Cond.
> 10	507
10 - 30	458
30 - 50	374
50 - 70	349
> 70	593

On constate que jusqu'à 30 m de profondeur, les conductivités les plus élevées sont généralement mesurées dans les dix premiers mètres d'aquifère et que leur augmentation par rapport à la zone des 10 - 30 m est d'autant plus marquée que les formations de recouvrement sont peu épaisses et la venue d'eau principale peu profonde. L'évaporation directe sur les nappes est très probablement à l'origine de cette augmentation de la salinité dans la zone superficielle même si, localement, la pollution peut aussi jouer un certain rôle. On constate enfin une augmentation de la salinité dans les zones fissurées profondes au-delà de 30 m et pour des profondeurs croissantes du niveau des nappes et des venues d'eau principales.

Il est à noter que cette tendance avait déjà été identifiée lors d'une campagne de reconnaissance exécutée dans l'aquifère infracambrien du plateau mandingue au cours de laquelle des mesures de conductivité avaient été faites à l'avancement sur les principales venues d'eau recoupées (*figure 6.10*). L'augmentation de la salinité en profondeur ne semble pas liée à un faciès lithologique particulier puisqu'elle s'observe aussi bien dans les séries gréseuses que dans celles qui sont essentiellement schisteuses. Elle semble plutôt due à une faible vitesse d'écoulement impliquant un long temps de résidence de l'eau au niveau des zones fissurées profondes.

6.1.5.2. Variations latérales

Des mesures de conductivité sur les eaux des forages situés dans un même village montrent presque toujours des différences importantes de salinité. Le tableau 6.12 indique les moyennes des conductivités maximum et minimum mesurées dans 141 villages comportant au moins 2 forages productifs, les mesures ayant été faites le même jour sur chaque site.

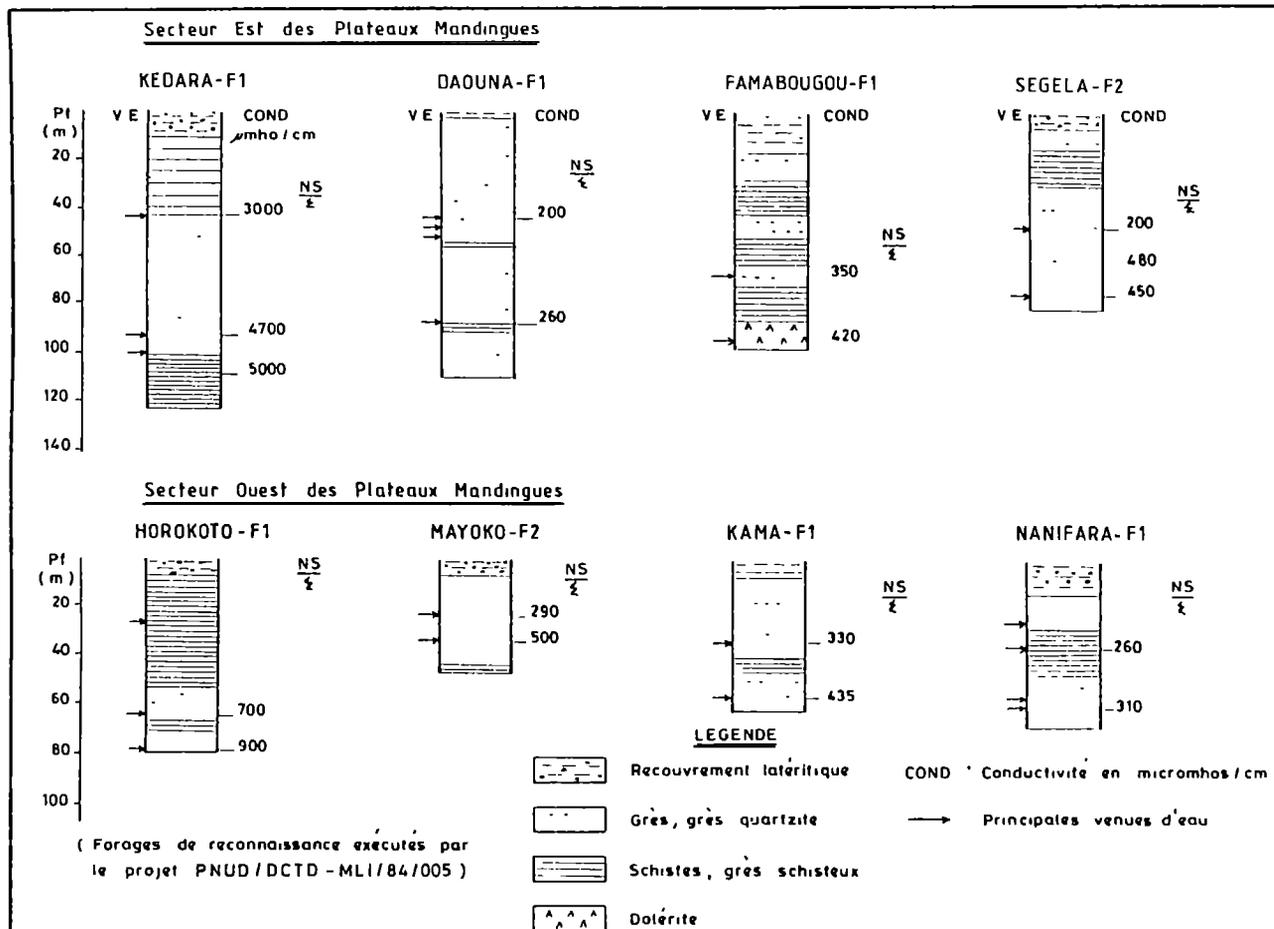


Fig. 6.10 - Variation de la conductivité avec la profondeur des venues d'eau dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire

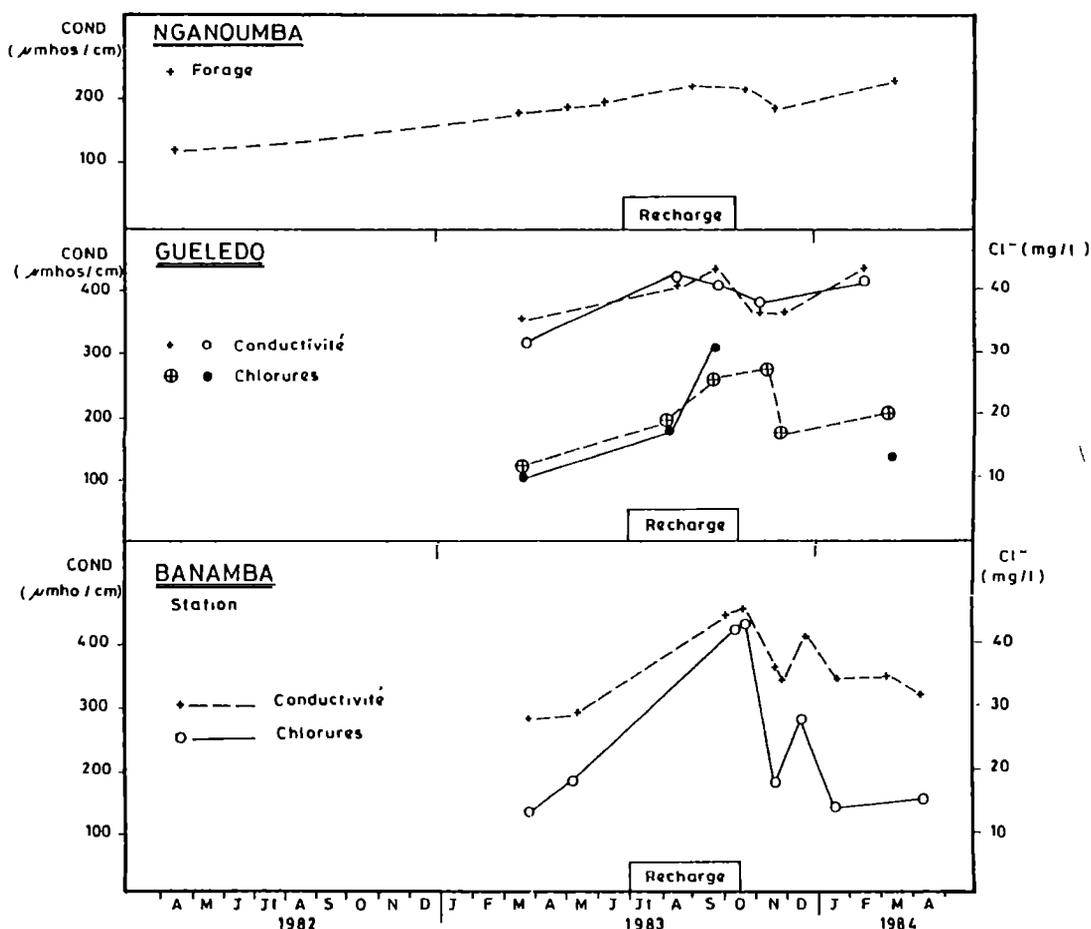


Fig. 6.11 - Variations saisonnière et annuelle de la conductivité dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire (unité de Kolokani - Mourdiah)

Tableau 6.12 - Variations locales de la conductivité des eaux de forage dans les aquifères fissurés

Aquifère	Infracambrien tabulaire		Socle granitique
	Grès dominants	Schistes dominants	
Nombre de sites (2 forages ou +)	72	36	33
Moyenne des valeurs minimum de conductivité	179	234	171
Moyenne des valeurs maximum de conductivité	526	919	284

La plus forte variation est enregistrée dans l'aquifère de l'Infracambrien en particulier dans les zones où les schistes sont prédominants.

Les conductivités sont plus homogènes dans l'aquifère du socle granitique où l'horizon des arènes grenues exploité par les forages présente une meilleure continuité hydraulique à l'échelle locale.

Ces différences de salinité sont dûes aux variations de vitesse d'écoulement au sein du milieu fissuré qui limitent le mélange des eaux et donc l'homogénéisation de leurs caractéristiques hydrochimiques. Ce fait est à rapprocher de la double porosité macro et microfissurale mise en évidence par les pompages d'essai.

6.1.5.3. Variations dans le temps

Des analyses périodiques ont été faites sur une cinquantaine de forages exploitant l'aquifère de l'Infracambrien du plateau mandingue durant les saisons sèches 1982, 1983 et 1984, ainsi que pendant l'hivernage 1983.

La figure 6.11 représente les variations observées sur trois sites. D'une manière générale et sur l'ensemble des forages suivis, la conductivité et les teneurs ioniques sont variables dans le temps avec des coefficients de variation compris entre 10 et plus de 50 %. Deux tendances peuvent être observées :

- une augmentation saisonnière de la salinité qui, paradoxalement, se produit d'abord durant ou en fin d'hivernage. Elle est suivie, en début de saison sèche, par une diminution de salinité puis par une croissance progressive jusqu'en fin d'étiage;
- une variation annuelle de la salinité, plus élevée en 1983/84 qu'en 1982/83, qui pourrait être dûe aux effets cumulés de recharges déficitaires pendant ces deux années sèches successives [HDG/NTL/12].

L'augmentation de la salinité en début d'hivernage est probablement liée au lessivage, par les eaux d'infiltration, des sels accumulés par évaporation dans la zone dénoyée durant la saison sèche. A noter que le même phénomène a été observé pour les variations saisonnières des concentrations en isotopes stables.

6.2. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES

6.2.1. Données disponibles

Le fichier ISOTOPES de la banque de données SIGMA comprend les résultats des analyses d'isotopes naturels de 360 échantillons prélevés entre 1980 et 1988 dans 11 secteurs représentatifs des différents types de conditions hydrogéologiques rencontrées dans les aquifères fissurés et généralisés du Mali et des principales zones climatiques. Les analyses ont été faites à Vienne (Autriche) par l'AIEA (Projets PNUD/AIEA/MLI/8/002 et RAF/012) sauf celles concernant les aquifères généralisés de l'Azaouad qui ont été réalisées par le Laboratoire d'Hydrologie Isotopique de l'Université d'Orsay (France).

Les points d'eau échantillonnés sont principalement des forages, pour la plupart équipés de pompes manuelles. Des prélèvements ont aussi été faits sur quelques puits dans les aquifères superficiels ainsi que dans les fleuves Niger et Bani.

Les premières études ont été consacrées aux aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali afin de compléter les données du suivi piézométrique et l'étude des conditions de recharge de ces aquifères et du taux de renouvellement de leurs réserves.

Par la suite, les recherches ont concerné les aquifères généralisés des régions désertiques et sahéliennes du Mali en vue de déterminer l'origine et l'âge de leurs réserves ainsi que leurs relations actuelles avec les eaux de surface. Ces recherches ont enfin permis de préciser les données sur le rôle de l'évapotranspiration en tant qu'élément fondamental du bilan hydrologique des aquifères.

L'interprétation des données isotopiques a fait l'objet d'un rapport technique du projet MLI/84/005 [HDG/NTL/10] et de plusieurs publications [6.6, 6.7].

Tableau 6.13 - Caractéristiques des secteurs d'études isotopiques, nombre et types d'analyses

Secteur Géographique	Latitude (N)	Type d'aquifère	Code Aquif/Unité	Profond. Niv. eau	Pluie (mm)	ETP (mm)	ANALYSES ISOTOPIQUES				
							Nb. Ech.	D	¹⁸ O	T	¹⁴ C ¹³ C
NARA	15°00'	Fissuré	CAN-81	15m	500	1.900	50	41	49	44	1
KOLOKANI/ MOURDIAH	14°30' 13°00'	Fissuré	ICT-74/75	15m	800	1.700	80	89	80	49	10
SAN/TOMINIAN	13°00'	Fissuré	ICT-72	15m	750	1.800	82	59	61	72	9
BOUGOUNI	11°00'	Fissuré	80C-93	10m	1.100	1.500	62	31	62	60	18
MONINPE	14°30'	Granulaire	CTQ-15	10-40m	500	1.850	12	12	12	6	6
FOSSE DE NARA	16°30' 15°30'	Granulaire	CIN-32	60m	300	2.000	13	13	13	3	11
SUD AZAOUAD	18°00' 17°00'	Granulaire	CTQ-13	10-40m	150	2.200	6	6	6	0	5
NORD AZAOUAD	24°30' 18°00'	Granulaire	CIN-31	40-50m	50	>2.200	17	17	17	0	12
GONDO	14°00' 14°30'	Fissuré Profond	ICP-83	60-80m	550	1.900	2	2	2	1	1
GOURMA OUEST	15°30'	Fissuré Profond	ICP-82	40-60m	400	1.950	3	3	3	1	-
SY	13°30'	Granulaire	CTQ-15	20-35m	700	1.800	4	4	29	2	2
Fleuves	Niger - Bani						29	29	4	3	-
TOTAUX							360	286	338	241	75

Analyses isotopiques : D = Deutérium ¹⁸O = Oxygène 18 T = Tritium
¹⁴C = Carbone 14
(le Carbone 13 a aussi été systématiquement dosé).

6.2.2. Aquifères fissurés

Trois types d'analyses isotopiques ont été réalisés pour déterminer les teneurs en Tritium, en Carbone 14 (et en Carbone 13) et en isotopes stables (Oxygène 18 et Deutérium).

6.2.2.1. Teneurs en Tritium

L'interprétation porte sur 225 analyses de Tritium effectuées sur des échantillons prélevés dans les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali (210 forages et 15 puits villageois).

Tableau 6.14 - Résultat des analyses de Tritium dans les aquifères fissurés

Aquifère et secteur hydrogéologique	Nb. échantillons	Teneur moyenne en Tritium (UT)	Ecart type (UT)	Teneur maximum (UT)	Echantillons ≥ 5 UT		Echantillons < 5 UT	
					Nb.	%	Nb.	%
Socle Secteur BOUGOUNI	60	1,7	4,0	23,1	6	10	54	90
Infracambrien Secteur KOLOKANI-MOURDIAH	49	12,6	13,1	41,3	27	54	22	46
Infracambrien Secteur SAN-TOMINIAN	72	21,8	17,9	65,4	49	68	23	32
Cambrien Secteur DILLY-NARA	44	18,1	14,2	46	30	68	14	32

Le tableau 6.14 met en évidence une différence marquée dans les teneurs moyennes en Tritium entre l'aquifère du socle et les aquifères schisto-gréseux de l'Infracambrien et du Cambrien. Les graphiques de la figure 6.12 donnant les distributions des teneurs en Tritium par secteur d'étude font également ressortir cette caractéristique. Pourtant, les fluctuations saisonnières dans les zones d'échantillonnage indiquent une recharge actuelle générale. Les très faibles valeurs en Tritium mesurées dans l'aquifère du socle ne pouvant donc être interprétées comme une absence de recharge, les différences observées s'expliquent en fait par le jeu des deux facteurs qui contrôlent les écoulements dans les systèmes aquifères fissurés :

- l'épaisseur et la granulométrie de la couverture d'altérites contenant une nappe superficielle ainsi que le développement d'une perméabilité secondaire dans cette couverture,
- l'extension en profondeur des réseaux de fissuration du substratum et son compartimentage vertical et latéral.

. L'aquifère du socle se caractérise par une épaisse séquence d'arènes argileuses intercalée dans les profils d'altération qui entraîne une percolation très lente, de type interstitiel, des eaux d'infiltration jusqu'à la base du recouvrement et jusqu'au substratum fissuré capté par les forages. Ainsi, l'absence ou la très faible teneur en Tritium de nombreux échantillons correspondrait en fait à des eaux infiltrées il y a plus de 35 ans. Toutefois, la présence dans quelques échantillons de teneurs significatives en Tritium (> 5 UT) est due à l'existence d'une circulation locale plus rapide grâce à un réseau de diaclases ou de filons fracturés résiduels recoupant les altérites et qui permettent une mise en relation directe de la couche aquifère superficielle (cuirasse latéritique) et de la couche aquifère profonde (arènes grenues et milieu fissuré).

. L'aquifère de l'Infracambrien se caractérise par une couverture d'altérites beaucoup moins épaisse et plus perméable due à une fraction sableuse résiduelle importante et à une perméabilité secondaire bien développée sur toute la hauteur du profil d'altération. En outre, les réseaux de fissuration dans le substratum infracambrien sont généralement plus denses et plus profonds que dans le socle cristallin. Cette perméabilité verticale explique la percolation rapide des eaux d'infiltration vers la nappe de fissures et les teneurs en Tritium supérieures à 5 UT dans près de 60 % des échantillons, indiquant donc une prédominance des eaux d'origine actuelle (secteurs de Kolokani et de San). Toutefois, quelques échantillons avec de faibles teneurs attestent la présence d'eaux plus anciennes dans cet aquifère ou d'un mélange, en proportions variables, d'eaux anciennes et d'eaux actuelles.

. L'aquifère du Cambrien est caractérisé par un recharge préférentielle à travers le réseau fissural ou par percolation diffuse à partir des nappes alluviales de fonds d'oued alimentées par les eaux de surface. Les teneurs élevées en Tritium et leur forte dispersion confirment l'existence d'une réalimentation actuelle de cet aquifère malgré les faibles hauteurs pluviométriques dans ce secteur (300 à 400 mm/an). Elles confirment également la contribution des deux modes de recharge facilitant le renouvellement rapide des nappes avec cependant, dans certaines zones, la présence d'eaux plus ou moins anciennes, résultant du mélange d'eaux anciennes et actuelles.

Cette analyse fait donc ressortir l'importance hydraulique des aquifères superficiels contenus dans les altérites. Outre leur capacité d'emmagasinement, ils contrôlent la vitesse de transfert des eaux d'infiltration vers les nappes de fissures. Les écoulements latéraux qui s'y produisent, peuvent réduire le volume de la recharge effectivement exploitable par les forages. On constate que lorsque les nappes superficielles dépassent une vingtaine de mètres d'épaisseur, les teneurs en Tritium dans les aquifères fissurés diminuent fortement (*figure 6.13a*).

On constate aussi que lorsque les formations du recouvrement sont absentes ou sèches, les teneurs moyennes en Tritium des eaux emmagasinées dans le réseau fissuré décroissent lorsque la profondeur de la nappe augmente (*figure 6.13b*); au-delà de 30 m, elles sont en général très faibles. Ainsi, cette absence de recharge actuelle ou son caractère limité dans les secteurs où la nappe est profonde, confirme les observations piézométriques qui ne montrent pas de fluctuations saisonnières significatives sauf à l'aplomb des zones où se concentre le ruissellement de surface.

. La distribution géographique du Tritium ne fait pas apparaître de zones bien circonscrites qui constitueraient des aires de recharge préférentielle. Tout au plus peut-on observer une fréquence plus grande des échantillons ayant des teneurs inférieures à 5 UT dans les zones où des intrusions doléritiques massives provoquent des mises en charge locales des couches fissurées (partie sud du secteur de Kolokani). Aucune évolution particulière des teneurs en Tritium n'est perceptible le long des principales lignes d'écoulement indiquées par la piézométrie régionale.

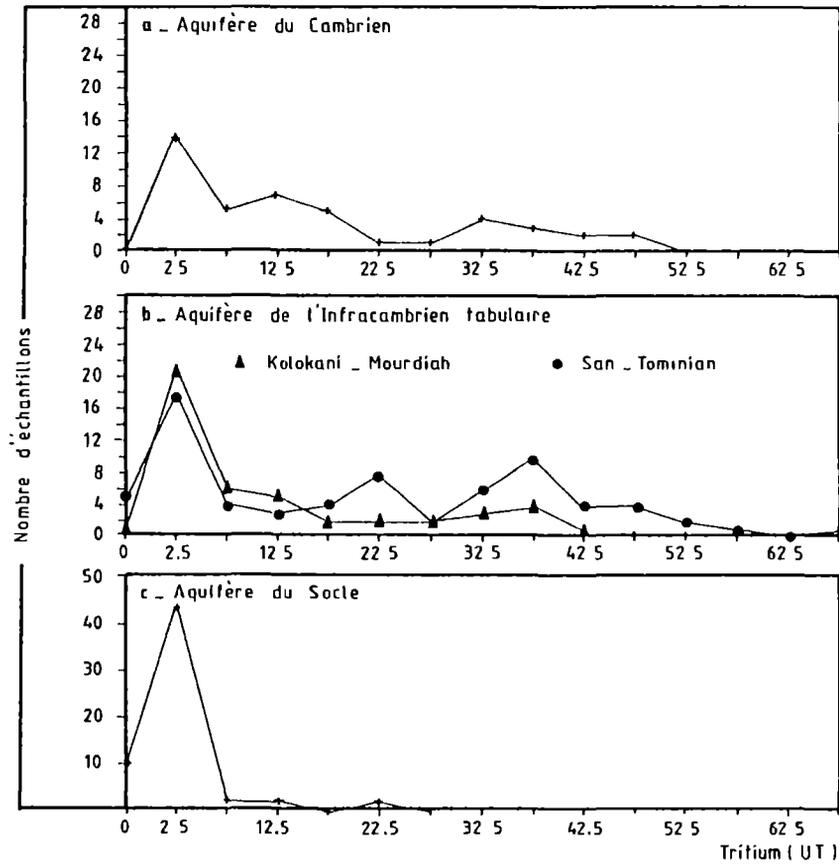


Fig. 6.12 - Distributions des teneurs en tritium dans les aquifères fissurés

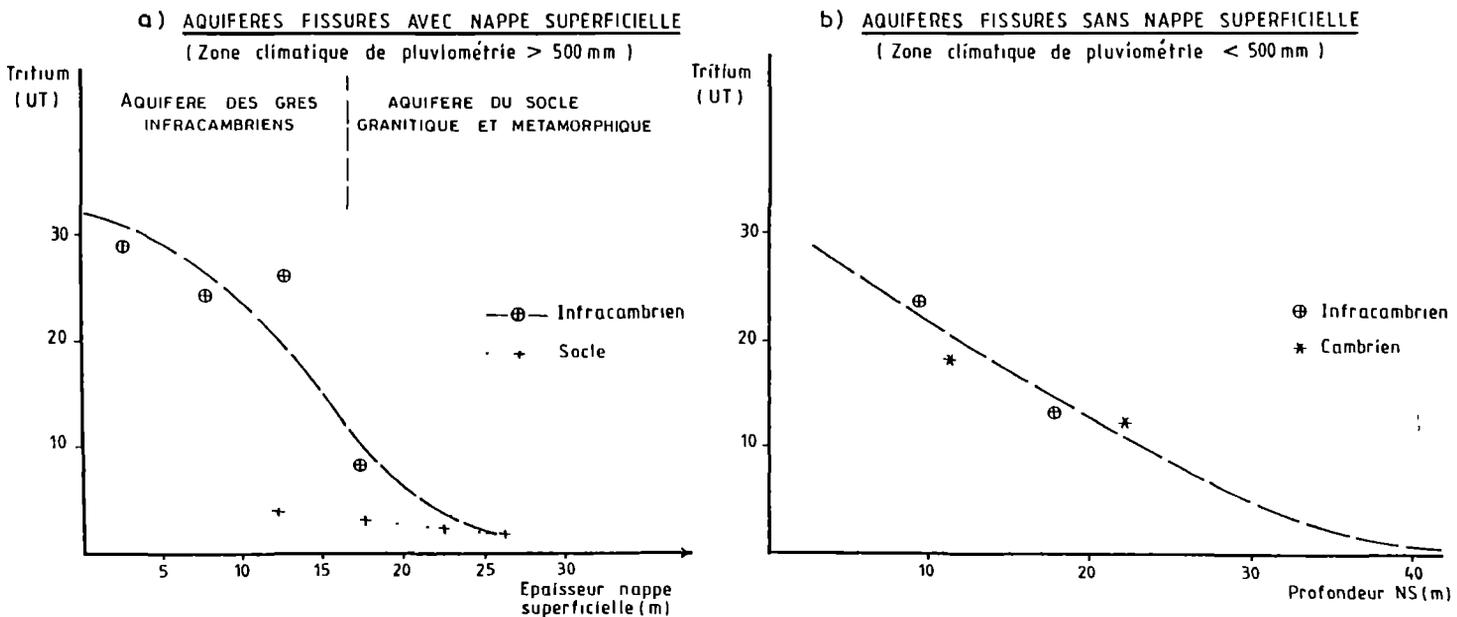


Fig. 6.13 - Variations de la teneur moyenne en tritium dans les aquifères fissurés en fonction de l'épaisseur de la nappe superficielle et de la profondeur du niveau statique

Les données confirment donc la nature essentiellement locale des écoulements dans les aquifères fissurés et la prédominance des transferts verticaux [HDG/NTL/10].

. L'évolution dans le temps des teneurs en Tritium a pu être mesurée grâce à un double échantillonnage réalisé, à 2 ou 4 années d'intervalle, sur 6 forages équipés de pompes manuelles ou de pompes solaires (débit d'exploitation de 8 à 110 m³/j). Les résultats sont donnés dans le tableau 6.15.

Tableau 6.15 - Evolution dans le temps de la teneur en Tritium sur des sites de pompage dans l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Site	Date	Tritium (UT)	Date	Tritium (UT)
SAN	1980	1,8	1982	7,2
NOSSOMBOUGOU	1982	2,4	1986	20,2
MANTA	1982	0,3	1986	3,8
KOUMI	1982	12,3	1986	36
MADINA KAGORO	1980	8,7	1982	13,3
KARADIE	1982	0,4	1986	0,4

A l'exception de Karadié, les concentrations en Tritium ont fortement augmenté sur tous les sites entre 1980 et 1986. Cette évolution est due principalement à la modification des écoulements dans les systèmes aquifères fissurés provoqués par les pompages avec, en particulier, une augmentation des transferts d'eau récente de la nappe superficielle vers la nappe de fissures par drainance. La part croissante d'eaux actuelles dans les eaux exhaurées indique un remplacement progressif des réserves plus anciennes par des eaux récentes dans les zones fissurées profondes.

La stabilité des teneurs en Tritium à Karadié s'explique par l'existence d'une couche aquifère fissurée captive avec un coefficient d'emménagement élevé (*voir chapitre 4*) qui fait que la contribution des eaux actuelles ne deviendra significative qu'après une longue période d'exploitation.

6.2.2.2. Teneurs en Carbone 14

Au total, 38 échantillons d'eau ont été prélevés dans les aquifères fissurés, exclusivement sur des forages dont les teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 ont été mesurées.

. L'aquifère du socle se caractérise par une activité en Carbone 14 et en Carbone 13 présentant une bonne homogénéité (*figure 6.14*) avec des valeurs comprises respectivement entre 90 et 102 % et entre -18 et -20 ‰ qui caractérisent des eaux récentes. Les faibles teneurs en Tritium indiquent toutefois une recharge antérieure à 1954. Un seul échantillon a une activité en Carbone 14 de 55,1 % correspondant à une eau plus ancienne tandis qu'un autre échantillon est enrichi en Carbone 13 bien que son activité en Carbone 14, proche de 100 %, le classe dans les eaux récentes.

. L'aquifère de l'Infracambrien, dans les deux secteurs d'étude, est caractérisé par de fortes variations, entre 36 et 104 %, de l'activité en Carbone 14 et, entre -13 et -20 ‰, des teneurs en Carbone 13. Les eaux prélevées sont donc le résultat d'un mélange en proportions variables d'eaux actuelles et anciennes. Elles peuvent se classer en trois catégories :

- des eaux actuelles avec des valeurs en Carbone 14 autour de 100 %, des teneurs en Carbone 13 entre -17 et -20 ‰ et des teneurs en Tritium supérieures à 5 UT.. Toutes ces eaux proviennent du secteur de San, les forages captant aussi bien la nappe superficielle régulièrement alimentée par les pluies que l'aquifère fissuré ;
- des eaux récentes et actuelles mélangées avec des concentrations comparables à celles observés pour l'aquifère du socle mais avec des teneurs significatives en Tritium;
- des eaux anciennes ayant des activités en Carbone 14 comprises entre 30 et 70 % et dépourvues de Tritium. Elles correspondent à des âges corrigés de 3.000 à 9.000 ans, c'est-à-dire qu'elles se sont infiltrées durant les dernières phases humides de l'Holocène.

En moyenne, les eaux des grès infracambriens sont donc des eaux actuelles à récentes avec, localement, des réserves anciennes non ou peu renouvelées en régime d'écoulement naturel.

. L'aquifère du Cambrien n'a été capté que par un seul forage, à Tanganagaba, qui exploite une eau récente ayant une activité en Carbone 14 de 92,4 % et une teneur de 35 UT. Il est probable que certaines eaux du Cambrien qui sont dépourvues de Tritium et assez fortement minéralisées, correspondent à des eaux anciennes.

D'une manière générale et comme pour le Tritium, les activités en Carbone 14 dans les aquifères fissurés ne montrent pas d'évolution régionale puisque des eaux de faible activité se rencontrent aussi bien à l'amont qu'à l'aval des secteurs hydrogéologiques. Ce sont plutôt les conditions lithologiques, structurales et piézométriques locales qui en contrôlent la répartition avec en particulier, pour les aquifères grésoschisteux, de faibles activités dans les zones compartimentées par les intrusions doléritiques et les séries schisteuses épaisses ou dans les zones fissurées profondes. Ces conditions ne sont qu'exceptionnellement rencontrées dans l'aquifère du socle, les venues d'eau exploitées par les forages étant généralement localisées à la base du recouvrement au contact avec le substratum, ce qui explique le caractère récent des eaux échantillonnées.

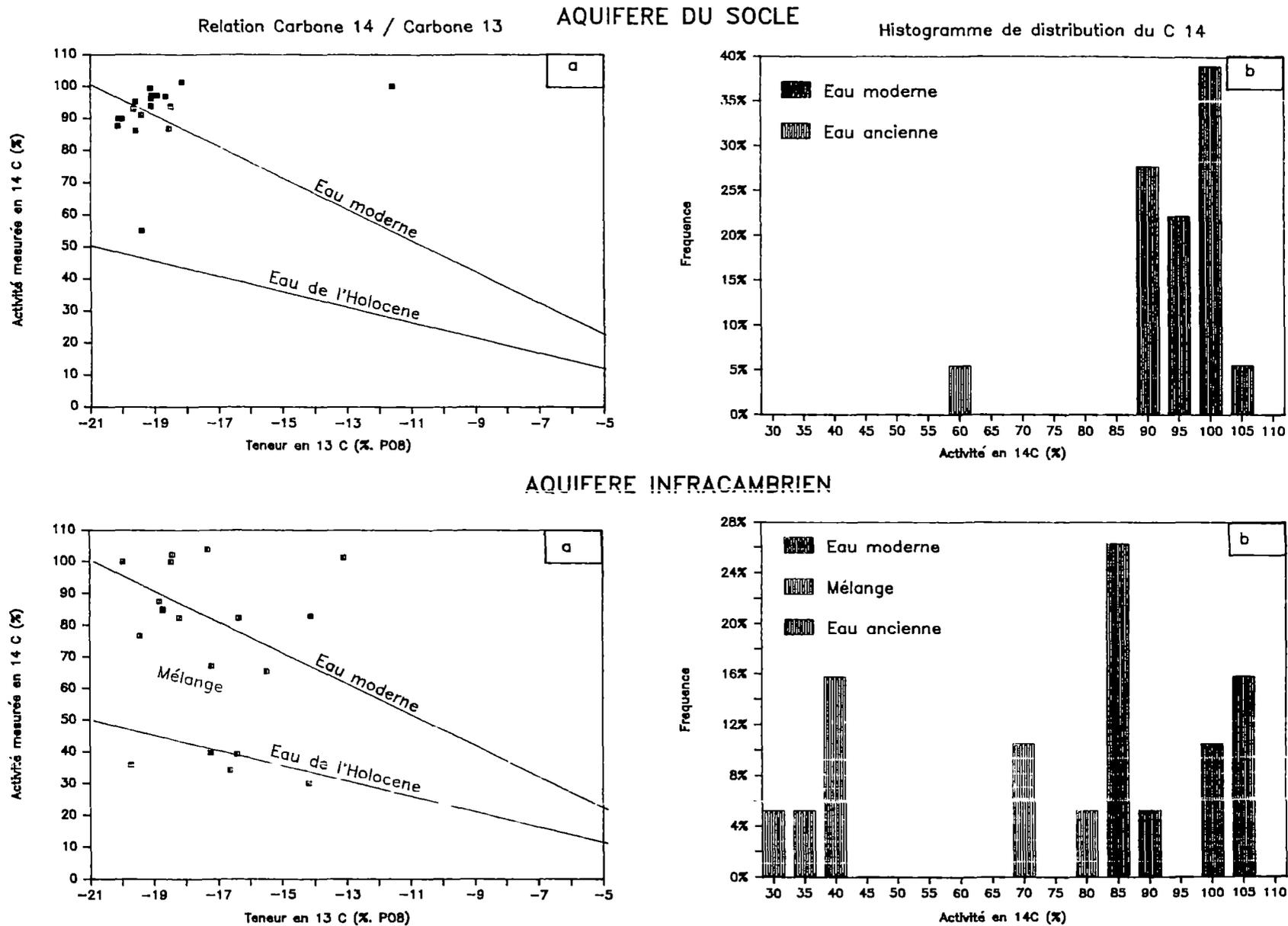


Fig.6.14 : Relations Carbone 14 / Carbone 13 et distributions des activités en Carbone 14

6.2.2.3. Teneurs en isotopes stables

L'analyse des isotopes stables a porté sur 226 échantillons pour l'Oxygène 18 (^{18}O) et 177 échantillons pour le Deutérium (D).

Tableau 6.16 - Teneurs caractéristiques en isotopes stables des aquifères fissurés

Aquifère Secteur hydrogéologique	OXYGENE 18 (‰ vs SMOW)					DEUTERIUM (‰ vs SMOW)				
	Nb. Ech.	MAX.	MIN.	MOY.	Ecart type	Nb. Ech.	MAX.	MIN.	MOY.	Ecart type
SOCLE Bougouni	62	-4,69	-6,09	-5,54	0,28	31	-32,6	-39,4	-35,5	1,9
INFRACAMBRIEN Kolokani-Mourdiah	80	-3,41	-7,03	-5,46	0,77	69	-21,4	-47,4	-36,6	5,8
INFRACAMBRIEN San-Tominian	61	-3,10	-6,96	-5,39	0,79	59	-20,3	-44,3	-34,4	5,8
CAMBRIEN Nara	49	-2,3	-5,97	-4,68	0,99	41	-17,7	-41,9	-33,2	5,6

Les teneurs en isotopes stables dans les aquifères fissurés, très variables, se situent entre $-2,3$ et $-7,0$ ‰ pour l'Oxygène 18 et entre $-17,7$ et $-47,4$ ‰ pour le Deutérium. Sur le graphique montrant la relation entre ces 2 isotopes (*figure 6.15*), trois groupes peuvent être identifiés :

- pour une majorité d'échantillons, les teneurs sont proches de la droite des eaux météoriques et correspondent donc à des eaux de pluies actuelles ou récentes tombées au cours des mois les plus arrosés de l'hivernage, soit de juillet à septembre, avec des teneurs moyennes en Oxygène 18 comprises entre -5 et -6 ‰ (groupe 1);
- un petit nombre d'échantillons situés également sur la droite météorique mondiale mais appauvries en isotopes stables avec des teneurs en Oxygène 18 de -7 à -8 ‰, correspond à une recharge ancienne dans des conditions climatiques différentes des conditions actuelles (groupe 2);
- près du tiers des échantillons est représenté par des points situés sous la droite météorique avec des teneurs en Oxygène 18 entre -2 et -4 ‰ témoignent d'un enrichissement par fractionnement isotopique (groupe 3).

. L'aquifère du socle est caractérisé par des teneurs en ^{18}O bien groupées autour d'une valeur moyenne de $-5,55$ ‰ (écart-type de $0,28$ ‰). L'enrichissement est négligeable, les eaux conservant les caractéristiques isotopiques des pluies actuelles.

. L'aquifère infracambrien a une teneur moyenne en ^{18}O de $-5,46$ ‰ proche de celle des eaux de l'aquifère du socle. Par contre, les distributions sont beaucoup plus étalées avec de nombreux échantillons montrant un enrichissement en ^{18}O jusqu'à -3 ‰.

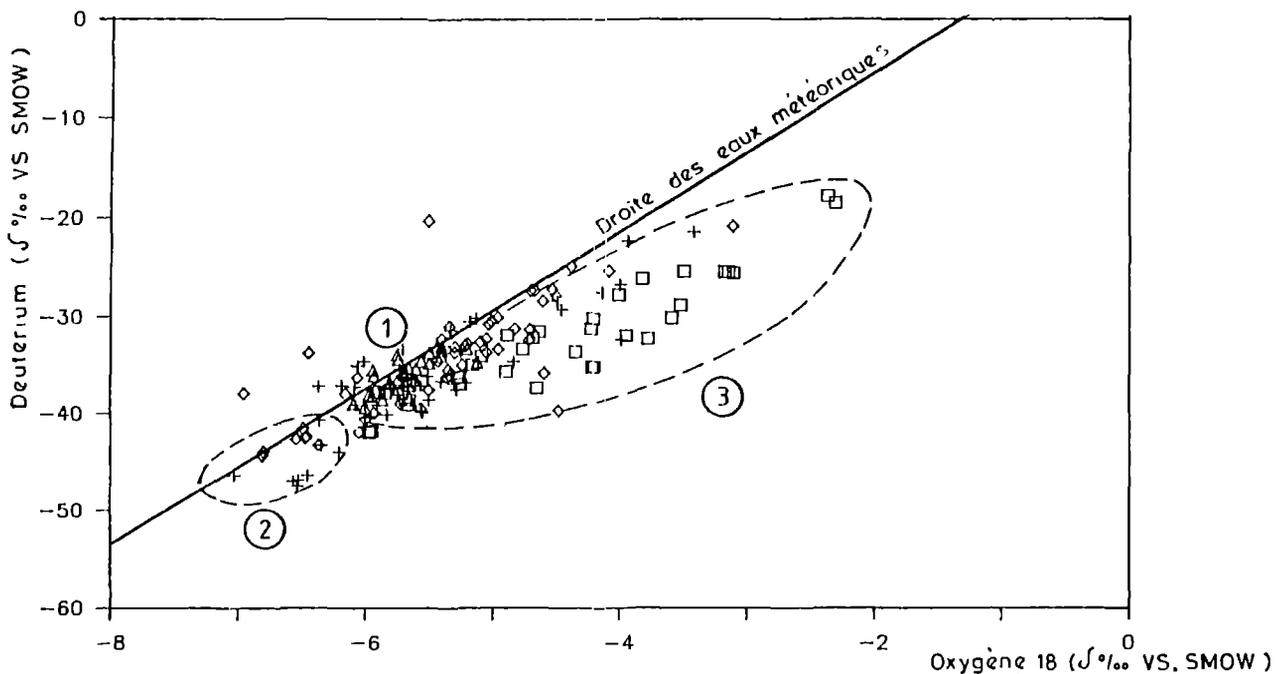


Fig 6 15 _Relation Oxygène 18 / Deutérium pour les aquifères fissurés

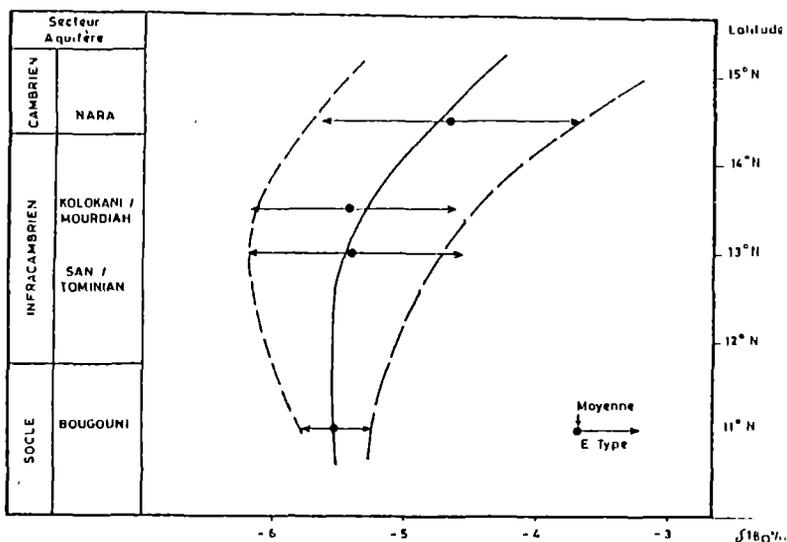


Fig 6 16 _Variation de la distribution des teneurs en Oxygène 18 en fonction de la latitude

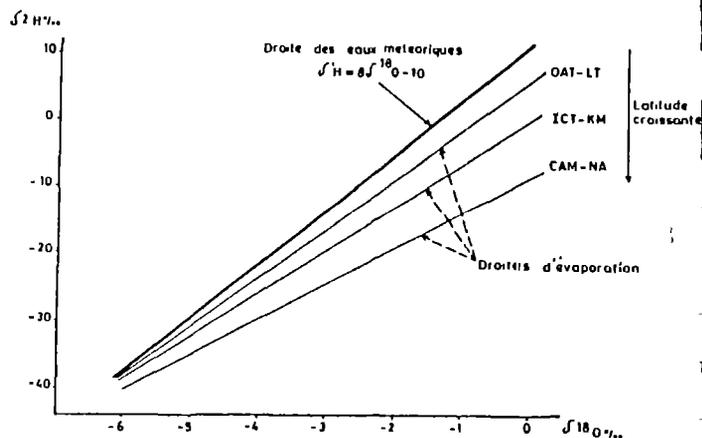


Fig 6 17 _Variation de la relation O¹⁸ / D en fonction de la latitude.

. L'aquifère du Cambrien est caractérisé par un enrichissement généralisé en ^{18}O avec une teneur moyenne de $-4,6 \text{ ‰}$ et une teneur maximum de $-2,3 \text{ ‰}$.

. Les teneurs en ^{18}O inférieures à -6 ‰ correspondent à des échantillons dépourvus de Tritium avec des activités en Carbone 14 inférieures à 75 %. Ces échantillons sont représentatifs d'eaux anciennes rechargées dans des conditions climatiques plus humides que celles prévalant actuellement, probablement vers la fin de l'Holocène. A noter que cette composante d'eaux anciennes ne se retrouve pas dans l'aquifère du socle de Bougouni.

. L'origine des eaux enrichies en isotopes stables par rapport aux pluies actuelles peut être expliquée par deux hypothèses :

- une recharge importante par les pluies en début et en fin d'hivernage, ces pluies étant naturellement enrichies dans l'atmosphère par rapport à celles du milieu de l'hivernage,
- un fractionnement isotopique par évaporation directe des nappes.

Les données hydrogéologiques et, en particulier, celles provenant des suivis piézométriques ne sont pas compatibles avec la première hypothèse car l'essentiel de la recharge des nappes se produit en juillet et en août, surtout dans les régions où les pluies sont les plus abondantes et les plus intenses. Par contre, de nombreuses observations plaident en faveur d'un enrichissement par évaporation.

. L'influence de la latitude sur les teneurs moyennes en Oxygène 18 et les écarts-types pour chaque secteur étudié est schématiquement représentée par la figure 6.16. On constate que l'enrichissement en ^{18}O croît avec la latitude, de même que les écarts-type. Ceci témoigne en faveur d'une évaporation plus intense pour les latitudes élevées, mais aussi en fonction des conditions hydrogéologiques locales qui expliqueraient les variations observées.

. Les relations Oxygène 18/Deutérium confirment également que l'enrichissement en isotopes stables provient principalement de l'évaporation (figure 6.17). Ainsi les droites représentatives de l'aquifère infracambrien du secteur de Kolokani-Mourdiah (ICT-KM) et de l'aquifère qui lui est associé (QAT-LT) ainsi que celle de l'aquifère cambrien de Nara (CAM-NA) présentent des pentes inférieures à celle de la droite représentative des eaux météoriques. On remarque aussi que ces pentes sont d'autant plus faibles que la latitude est élevée ce qui implique un caractère évaporé d'autant plus prononcé [6.6].

. L'influence de la profondeur du niveau des nappes a été étudiée statistiquement en comparant les teneurs moyennes en isotopes stables par tranche de profondeur du niveau piézométrique [HDG/RTL/10]. Elle montre que l'enrichissement isotopique est important jusqu'à 10 - 12 m de profondeur et qu'il peut affecter certains échantillons jusqu'à 18 - 20 m. Les effets de l'évaporation sont donc bien dépendants de la profondeur du niveau des nappes et ils sont d'autant plus marqués que celui-ci est peu profond. Mais on a constaté que des faciès d'eau évaporée pouvaient se rencontrer aussi à des profondeurs bien supérieures à celles habituellement considérées pour une influence de l'évaporation et qui étaient limitées en principe aux nappes subaffleurantes.

Des études théoriques et des expériences effectuées en laboratoire [6.5] ainsi que des mesures in situ [6.3, 6.4] ont démontré que les isotopes stables se concentrent par évaporation dans la zone non saturée, au niveau de la zone de transition entre transfert liquide et transfert gazeux située généralement entre 1 et 3 m de profondeur. L'enrichissement isotopique des eaux souterraines se fait ensuite par lessivage périodique de ces isotopes stables accumulés dans la zone non saturée lors des épisodes de recharge des nappes. En l'absence de recharge, l'eau des nappes conserve son cachet isotopique originel car les isotopes stables concentrés par évaporation restent dans la zone non saturée ou sont évacués par le ruissellement hypodermique. Ceci explique les différences d'enrichissement observées entre les eaux de l'aquifère du socle et celles des formations de l'Infracambrien et du Cambrien. Ainsi, dans le secteur de Bougouni, une fraction importante des eaux infiltrées en début d'hivernage se sont chargées en isotopes stables lors de la percolation à travers la zone d'accumulation superficielle et est ensuite reprise par le réseau hydrographique au niveau de l'horizon cuirassé perméable. Par contre, pour les aquifères de l'Infracambrien et du Cambrien, la bonne perméabilité verticale du recouvrement (ou son épaisseur réduite) permet une percolation rapide des eaux enrichies en isotopes jusqu'à la zone fissurée profonde.

Des analyses périodiques effectuées sur quelques forages exploitant l'aquifère infracambrien montrent que les teneurs en isotopes stables sont les plus basses en fin de saison sèche tandis que l'enrichissement maximum est atteint après l'hivernage, en novembre-décembre, suivant en cela la même évolution que la salinité.

Il est à noter que le même décalage saisonnier de l'enrichissement isotopique par évaporation se retrouve dans les eaux du fleuve Niger à la station de Siguiri. Au début de la période des pluies, les apports des eaux de ruissellement hypodermique qui ont lessivé la zone d'accumulation superficielle entraînent un enrichissement en isotopes stables de l'écoulement de surface [HDG/NTL/10].

6.2.3. Aquifères généralisés (figure 6.18)

Ce chapitre reprend les principaux résultats d'une étude isotopique des aquifères généralisés du nord du Mali ayant fait l'objet d'une publication [6.7].

6.2.3.1. Aquifère du Continental intercalaire

a) Unité du fossé de Nara

Les analyses isotopiques ont porté sur 9 sites répartis dans les différents secteurs du fossé. L'échantillonnage a été fait dans des forages et des puits nomades de 50 à 96 m de profondeur.

. Les teneurs en isotopes stables varient de $-7,33$ à $+3,57$ ‰ pour l'Oxygène 18 et de $-50,4$ à $+10,0$ ‰ pour le Deutérium, donc un champ de variation beaucoup plus étendu que dans les aquifères fissurés. La droite d'évaporation montrant la relation $^{18}\text{O}/\text{D}$ se situe sous la droite météorique mondiale avec une pente de $+6$. Au point d'intersection des 2 droites la teneur en ^{18}O est de -9 ‰ et en D de 65 ‰. Ces teneurs sont représentatives des eaux du fleuve Niger à la fin de l'Holocène. Les eaux les plus enrichies par évaporation sont localisées dans le secteur oriental du fossé (Gargando) et correspondent probablement à une recharge tardive à la fin de l'assèchement du delta fossile (figure 6.19).

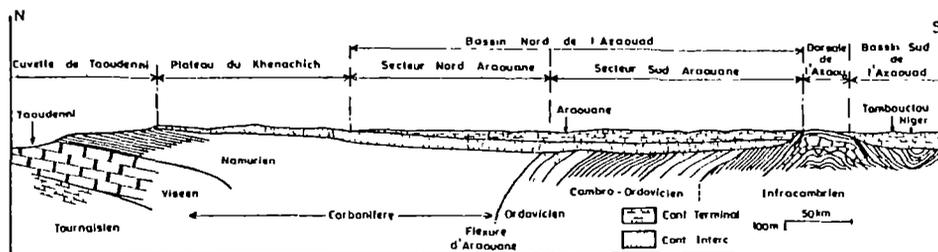
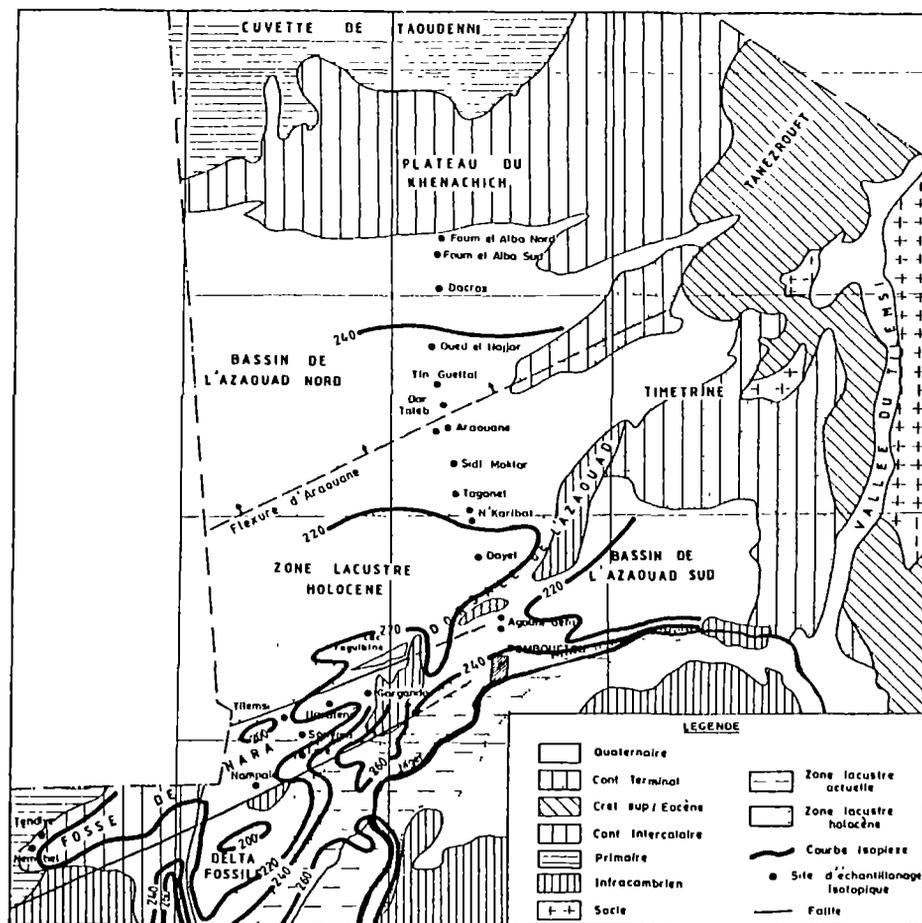


Fig. 6.18 _ Esquisse hydrogéologique et paléogéographique et coupe schématique des aquifères généralisés du nord du Mali.

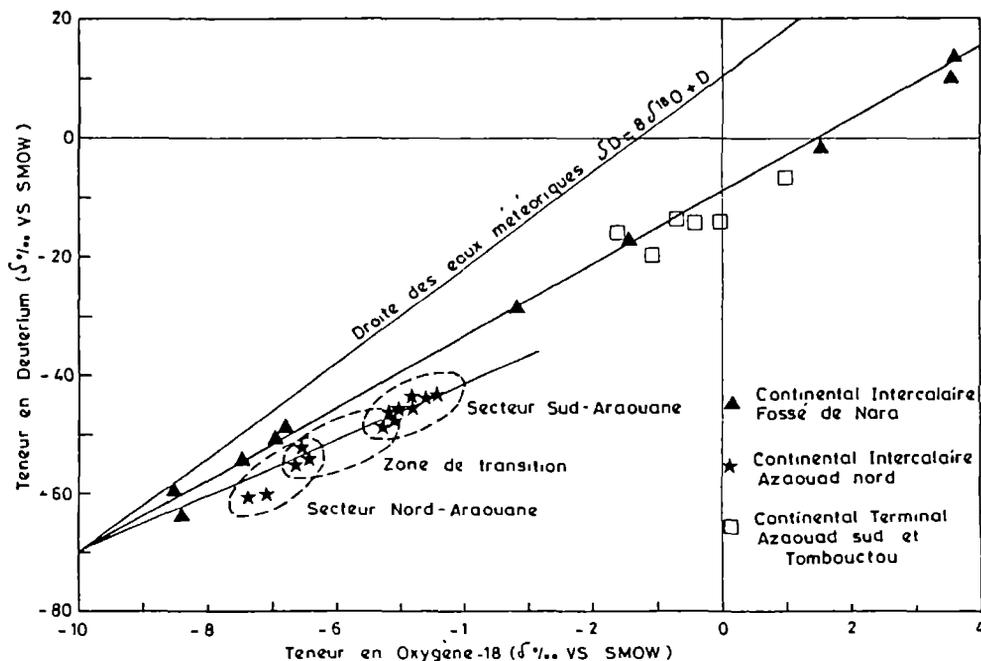


Fig. 6.19 _ Relations Oxygène-18 / Deutérium pour les aquifères généralisés du nord du Mali

. Les teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 indiquent un système aquifère libre avec équilibre entre la nappe et le gaz carbonique contenu dans les sols de ces zones nord-sahélienne et sub-désertique. Les âges déterminés à partir de l'activité en Carbone 14 ne nécessitent donc pas de correction. Ils s'étagent entre 2.000 et plus de 25.000 ans suivant les secteurs et correspondent à différentes périodes de recharge et à un certain compartimentage des réserves :

- le secteur ouest, entre Nara et Sokolo, est caractérisé par les eaux les plus anciennes infiltrées durant la dernière phase humide du Pléistocène;
- le secteur central, entre Nampala, Léré et Ras el Ma, contient des eaux de 3.000 à 6.000 ans qui correspondent aux épisodes pluvieux de l'Holocène moyen et supérieur au cours desquels ce secteur représentait une partie du delta actif du fleuve Niger dont les eaux s'écoulaient vers le nord et s'accumulaient dans une vaste zone lacustre occupant le secteur méridional de l'actuel désert de l'Azaouad;
- le secteur est du fossé renferme les eaux les plus récentes, entre 2.000 et 3.000 ans qui correspondent aux infiltrations qui se sont produites durant la période de transition entre le dernier pluvial holocène et la phase aride actuelle. Cette période s'est accompagnée du recul du delta actif vers l'est et de la fossilisation progressive de l'ancien delta holocène où les plans d'eau résiduels ont été soumis à l'évaporation.

b) Unité de l'Azaouad nord

Les échantillons ont été prélevés dans 11 forages de reconnaissance exécutés le long de la piste Tombouctou-Taoudenni ainsi que dans 3 puits nomades (*figure 6.18*).

. Les teneurs en isotopes stables portées sur le diagramme Oxygène 18/Deutérium de la *figure 6.19* montrent que tous les points représentatifs de l'unité de l'Azaouad nord sont situés sur une droite d'évaporation de pente plus faible que celle du fossé de Nara. Cette unité est donc caractérisée par un faciès évaporé plus important. Par contre, l'intersection avec la droite des eaux météoriques, proche de celle de la droite de Nara, indique une même origine des eaux de recharge dans les deux unités.

. Les faibles teneurs en isotopes stables mesurées à Foum el Alba, sur la bordure nord de l'aquifère, s'expliqueraient par l'origine locale des eaux d'infiltration provenant du ruissellement à la surface du plateau du Khenachich.

. Les teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 montrent que les eaux ont été affectées par des processus soit de dissolution chimique du Carbone fossile, soit d'échanges isotopiques. Aussi, les âges calculés à partir des activités en Carbone 14 pour les échantillons très enrichis en Carbone 13 sont-ils des âges maxima.

. Dans le secteur situé au sud d'Araouane caractérisé par des eaux peu minéralisées, les activités en Carbone 14 correspondent à des eaux infiltrées entre approximativement -9.000 et -6.000 ans. Cette période qui couvre en partie l'Holocène inférieur et moyen, est celle pendant laquelle la zone lacustre de l'Azaouad avait son extension maximum.

. Dans le secteur s'étendant au nord d'Araouane où les eaux sont salines, les teneurs en Carbone 14 caractérisent des eaux plus récentes avec un âge apparent de l'ordre de 2.600 ans qui correspond au début de la période aride qui a suivi le dernier pluvial holocène. Le ruissellement sur le plateau du Khenachich semble donc avoir persisté pendant un certain temps alors que la zone lacustre au sud d'Araouane était en voie d'assèchement.

6.2.3.2. Aquifère du Continental terminal/Quaternaire

a) Unité de l'Azaouad sud

L'échantillonnage n'a concerné que des forages situés dans le secteur situé au nord du fleuve Niger, à Tombouctou-Korioumé et sur le site d'Agouni Gefal à 35 km au nord, le long de la piste de Tombouctou à Taoudenni.

. Les teneurs en isotopes stables, comprises entre $-1,81 \text{ ‰}$ et $+0,53 \text{ ‰}$ pour l'Oxygène 18 et entre $-14,8 \text{ ‰}$ et $-5,8 \text{ ‰}$ pour le Deutérium, sont fortement enrichies. Elles le sont toutefois beaucoup moins que celles mesurées sur les eaux du fleuve Niger qui atteignent, après la longue période d'évaporation à la surface du delta intérieur durant la saison sèche, $+5,45 \text{ ‰}$ pour l'Oxygène 18 et $+21,0 \text{ ‰}$ pour le Deutérium. Ceci indiquerait que la recharge par le fleuve Niger n'est significative que durant les périodes de crue au cours desquelles les eaux de surface ont un faciès évaporé moins prononcé.

. Les teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 caractérisent des eaux modernes provenant d'infiltrations récentes à partir du fleuve Niger. La proportion d'eaux anciennes croît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du fleuve et que les couches aquifères captées par les forages deviennent plus profondes.

b) Unité du delta intérieur

Des prélèvements sur un forage et un puits ont été effectués sur cinq sites du secteur de Moninnpé le long d'une ligne radiale recoupant une partie des deltas fossile et vif du fleuve Niger (*figure 6.20*).

. Les teneurs en isotopes stables fournissent des points représentatifs de la relation Deutérium/Oxygène 18 tous situés sous la droite des eaux météoriques (*figure 6.21*). Ces points se situent entre deux droites d'évaporation. Celle de plus faible pente ($+3,7$) est ajustée sur les échantillons de l'aquifère infracambrien de la zone du "biseau sec". La seconde, de pente plus forte ($+5,5$), tout en restant nettement inférieure à celle des eaux météoriques ($+8$), est relative à l'aquifère du Continental terminal. Ces deux droites interceptent la droite de référence en un point commun où la teneur en Oxygène 18 est d'environ -6 ‰ comparable à celle des pluies actuelles. L'enrichissement par évaporation est d'autant plus marqué que l'on est proche de la zone d'inondation et que la surface piézométrique est peu profonde.

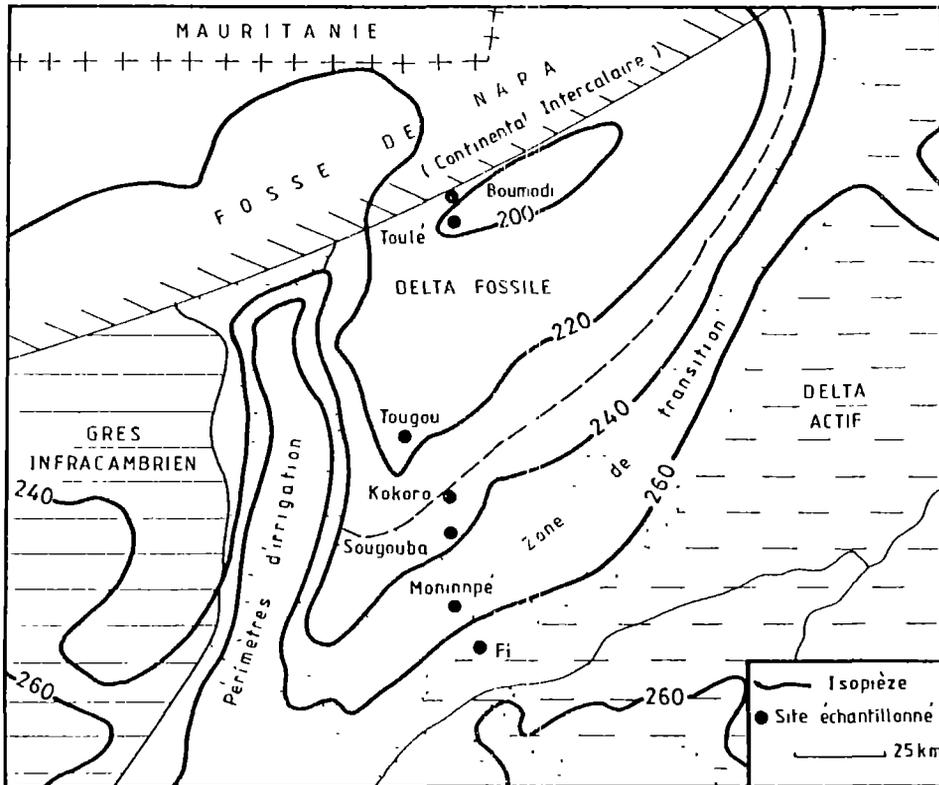


Fig 6 20 - Carte piézométrique schématique du secteur de Moninnpé / Boumadi - Aquifère Continental Terminal / Quaternaire - Unité du delta intérieur.

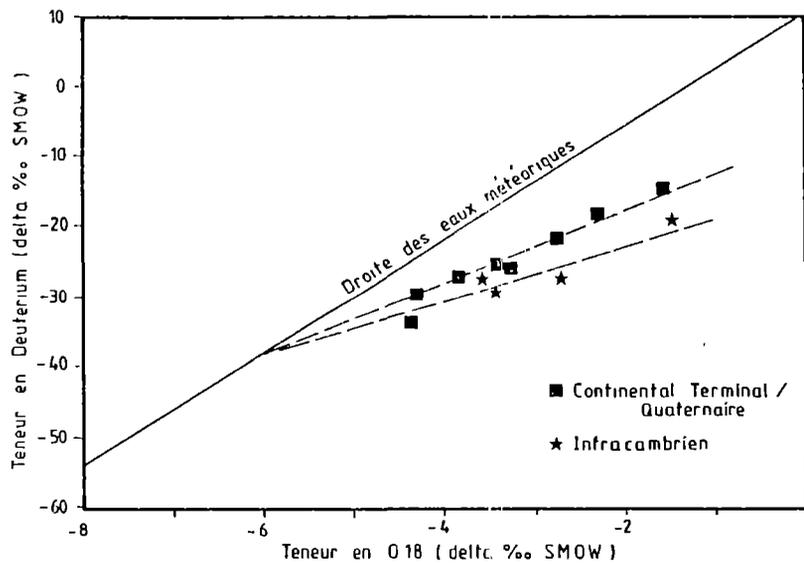


Fig 6 21 - Relation Oxygène 18 / Deutérium - Secteur de Moninnpé

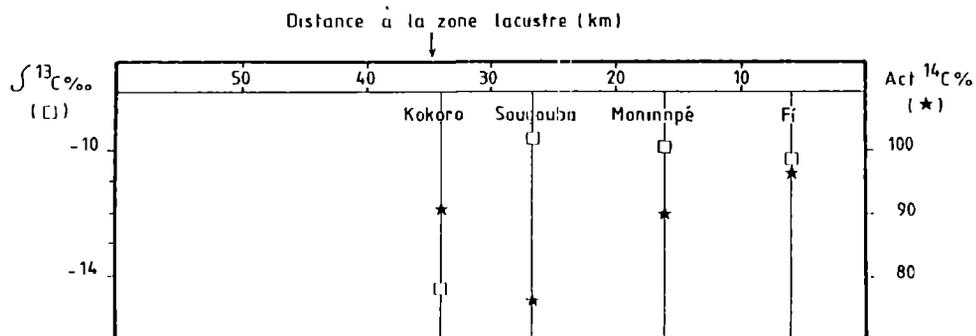


Fig 6 22 - Variations des teneurs en ¹⁴C et ¹³C - Secteur de Moninnpé

. Les teneurs en Carbone 14 et en Carbone 13 sont comparables à celles mesurées à Tombouctou. Les teneurs en Carbone 13 sont de l'ordre de -10 ‰ et les activités en Carbone 14 décroissent en s'éloignant de la zone inondable, partant de 96,1 % en bordure du delta vif pour atteindre 75,8 % en bordure du delta fossile (*figure 6.22*) : elles correspondent à des eaux de 300 et 2.300 ans respectivement. La vitesse réelle d'écoulement est donc faible, en moyenne de l'ordre de 15 à 20 m/an. Ceci s'explique par le fait que les lentilles sableuses de bonne perméabilité sont sans continuité et interstratifiées dans des dépôts silto-argileux de perméabilité beaucoup plus faible. Ceci signifie que la perméabilité moyenne globale des formations du Continental terminal/Quaternaire est plus petite que ne le laissent supposer les pompages d'essai. Ceci explique également que les transferts en provenance des eaux de surface soient relativement faibles en dehors de la zone lacustre proprement dite.

Dans le secteur du delta fossile, les eaux prélevées à Boumodi, près du fossé de Nara, ont une activité en Carbone 14 de 62,8 % comparable à celle mesurée sur l'aquifère du Continental intercalaire, avec un âge de l'ordre de 4.000 ans.

6.2.3.3. Autres secteurs étudiés

. Dans le secteur de San qui couvre la bordure méridionale de la plaine d'inondation du Bani, les eaux du Continental terminal/Quaternaire sont enrichies en isotopes stables avec une droite d'évaporation similaire à celle établie pour la zone du delta intérieur dans le secteur de Moninnpé. Les teneurs en Tritium comprises entre 3 et 39 UT et les activités en Carbone 14 supérieures à 100 % sont caractéristiques d'eaux infiltrées récemment.

. Sur la bordure occidentale du Gourma, les échantillons prélevés dans les forages présentent aussi un faciès évaporé similaire à celui des eaux du delta intérieur.

. Dans la plaine du Gondo, l'aquifère fissuré de l'Infracambrien sous remplissage du Continental terminal contient des eaux anciennes, l'activité en Carbone 14 de 49,9 % donnant un âge approximatif de 5.000 à 6.000 ans.

6.3. CONCLUSION

Les eaux souterraines contenues dans les aquifères fissurés des cinq premières Régions du Mali : Kayes, Koulikoro, Sikasso, Ségou et Mopti sont de bonne qualité chimique avec une faible minéralisation et des teneurs en ions majeurs en général très inférieures aux normes de l'OMS pour les eaux de consommation. Toutefois, dans de nombreux secteurs où prédominent des formations gréseuses ou granitiques, les eaux ont un pH acide et sont agressives avec des teneurs en fer souvent supérieures à la norme OMS, sans que cela affecte toutefois leur potabilité chimique. Ces caractéristiques obligent cependant à prévoir des équipements de forage et de pompage résistants à la corrosion.

Les eaux des aquifères généralisés des régions de Tombouctou et de Gao sont plus minéralisées, mais ce n'est que dans quelques secteurs où leur salinité peut atteindre plusieurs g/l avec des teneurs en sulfate et en magnésium très élevées les rendant impropres à la consommation humaine et même, pour certaines, à l'abreuvement du bétail.

Dans la quasi totalité du domaine cultivable du Mali, les eaux souterraines peuvent être utilisées pour l'irrigation sans précautions particulières et sur la majorité des sols.

L'interprétation des données chimiques et isotopiques a permis de définir l'importance et les modalités de la recharge actuelle pour les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali et de confirmer les conclusions tirées de l'analyse des fluctuations piézométriques. Ces aquifères bénéficient d'une recharge actuelle même dans les secteurs sahéliens à faible pluviométrie. Le compartimentage des aquifères et la réduction en profondeur de la fissuration active ont pu être confirmés avec une prédominance des écoulements souterrains à l'échelle locale et l'existence de poches d'eau anciennes.

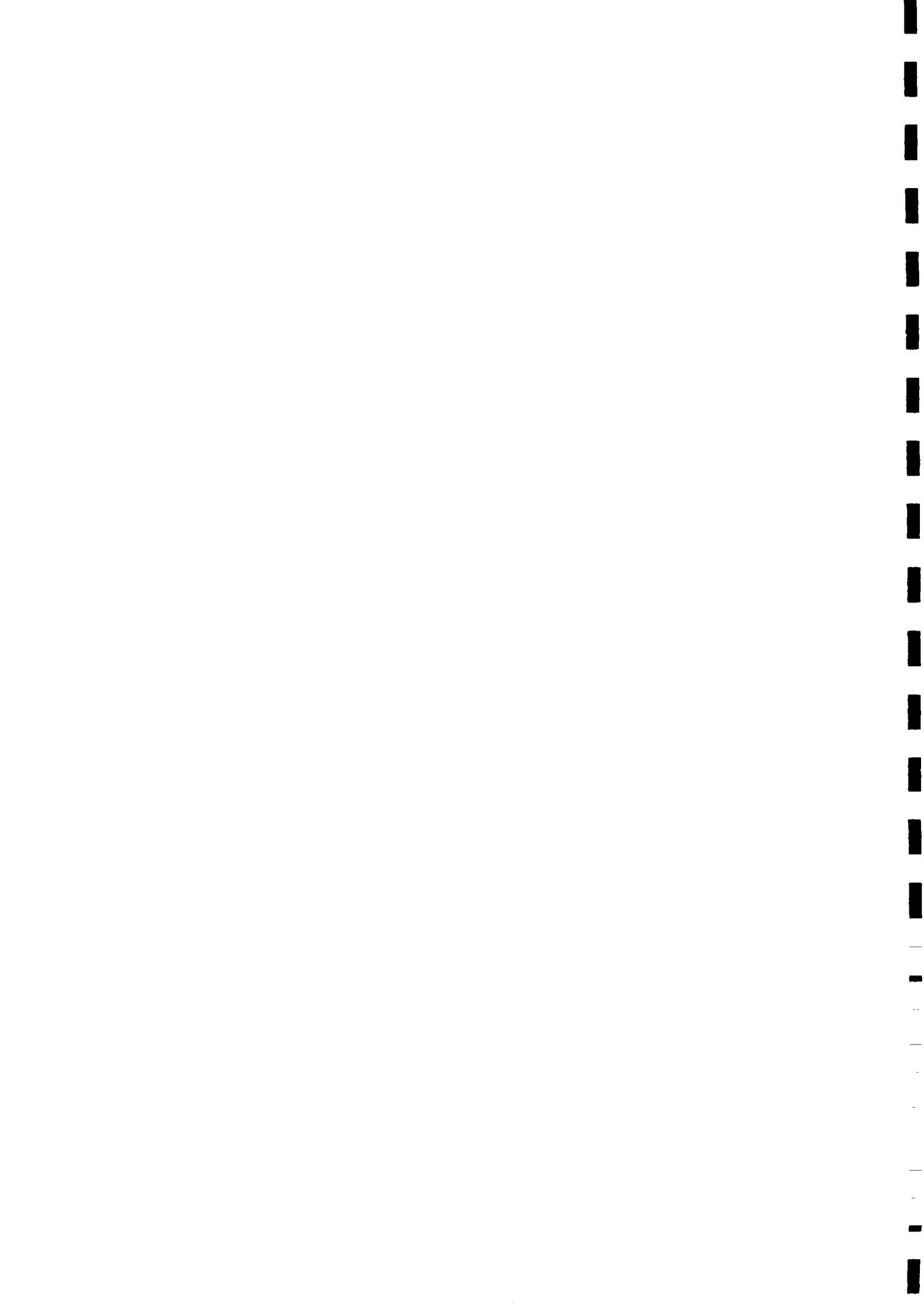
Les variations de salinité en profondeur et selon les saisons ainsi que celles des teneurs en isotopes stables confortent l'hypothèse donnant à l'évapotranspiration des nappes un rôle majeur dans le bilan des aquifères à ressources renouvelables.

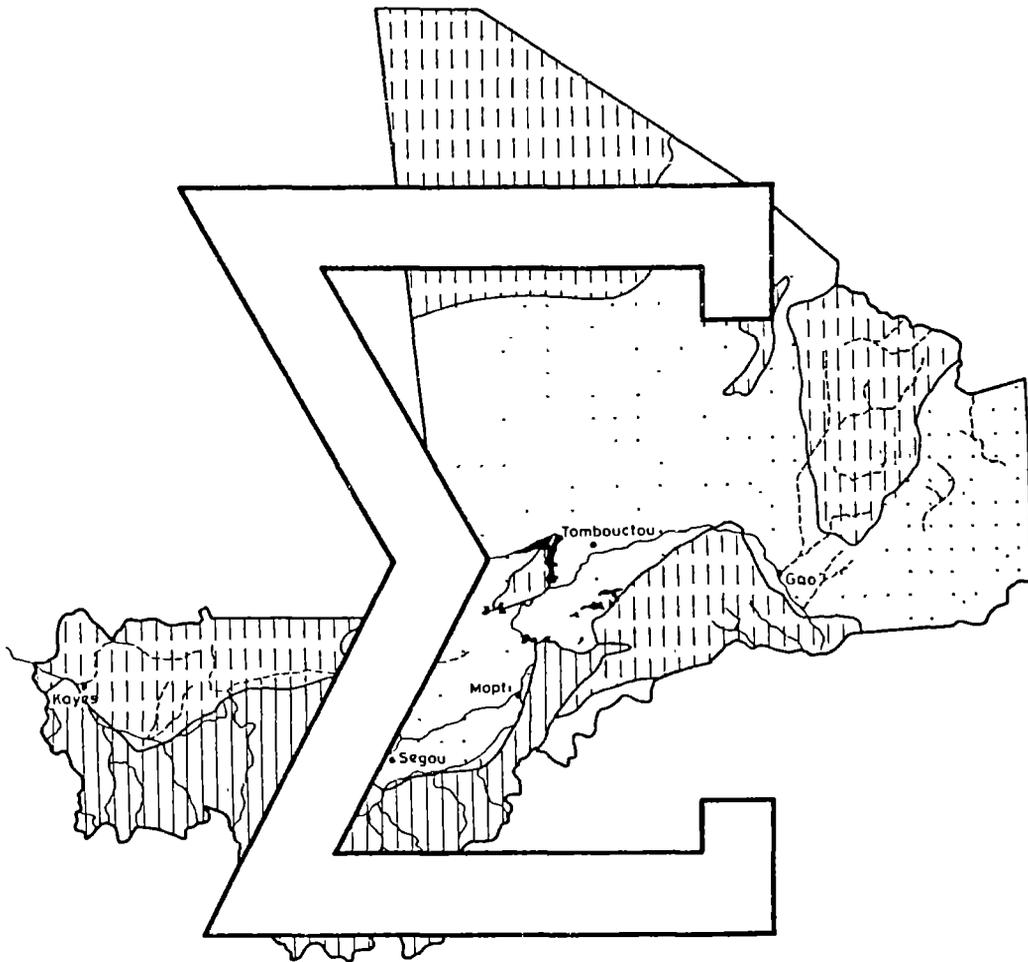
Les ressources en eau souterraine des aquifères généralisés de l'est et du nord du Mali sont essentiellement d'origine fossile et ont été principalement rechargées durant les épisodes humides de l'Holocène, entre -3.000 et -9.000 ans. La recharge actuelle de ces aquifères par infiltration de la pluie est d'importance réduite et celle provenant des eaux de surface est limitée aux abords immédiats du fleuve Niger, des lacs semi-permanents et des plaines périodiquement inondées par les crues du fleuve.

CHAPITRE 6

Références bibliographiques hors projet

- [6.1] - C & M - Etude préliminaire sur l'agressivité des eaux souterraines dans la zone du projet de Coopération Mali-Italie (Cercles de Kati, Koulikoro et Kangaba) - DNHE - 1987
- [6.2] - SAAD K.F. - Etude hydrogéologique de l'est du Mali - UNESCO - 1989
- [6.3] - ALLISON G.B., BARNES C.J. - Estimation of evaporation from a normally dry lake in South Australia - J. Hydrol. - 1985
- [6.4] - FONTES J.C., YOUSFI M., ALLISON G.B. - Estimation of long term diffuse groundwater discharge in the northern Sahara using stable isotope profiles in the water - J. Hydrol; - 1986
- [6.5] - SONNTAG C., CHRISTMANN D., MUNNICH K.O. - Laboratory and field experiments of infiltration and evaporation of soil water by means of deuterium and Oxygen -18 - Tech. Doc. AIEA - 1985
- [6.6] - ARANYOSSY J.F., GUERRE A., SIDORO M. - Etude par les isotopes de l'environnement des dépressions piézométriques : premières données sur des exemples au Mali - Hydrog. BRGM - 1989
- [6.7] - FONTES J.C., ANDREWS J.N., EDMUNDS W.M., GUERRE A., TRAVI Y.- Geochemical evaluation of groundwater evolution and recharge in arid areas: the Azaouad depression of northern Mali - 1990 (non édité).

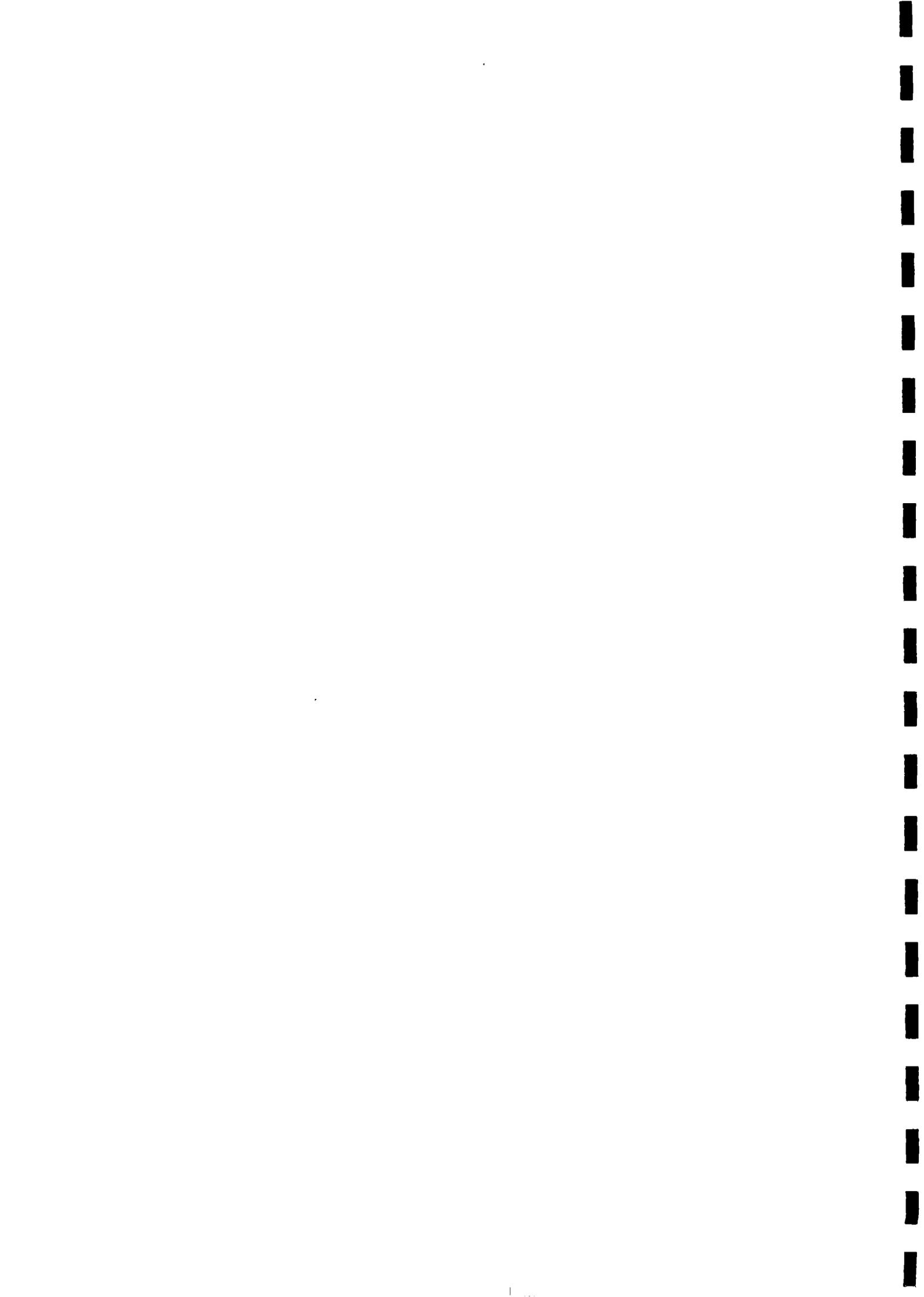




SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 7

BILAN DES AQUIFERES



CHAPITRE 7

TABLE DES MATIERES

TEXTE

7.1. GENERALITES.....	1
7.2. ESTIMATION DES TERMES DU BILAN.....	1
7.2.1. Apports aux nappes.....	1
7.2.1.1. Infiltration de la pluie.....	2
7.2.1.2. Infiltration des eaux de surface.....	7
7.2.2. Sorties des nappes.....	9
7.2.2.1. Ecoulement souterrain drainé par le réseau hydro- graphique.....	9
7.2.2.2. Evapotranspiration.....	10
7.2.3. Réserves des aquifères.....	11
7.2.3.1. Aquifères fissurés.....	11
7.2.3.2. Aquifères généralisés.....	13
7.3. MODELE GLOBAL DE SIMULATION DES AQUIFERES DU MALI.....	16
7.3.1. Objectifs du modèle.....	16
7.3.2. Caractéristiques du modèle et données utilisées.....	16
7.3.2.1. Réseau maillé et schématisation des unités hydro- géologiques.....	16
7.3.2.2. Transmissivités.....	18
7.3.2.3. Conditions aux limites.....	18
7.3.2.4. Discontinuités internes.....	18
7.3.2.5. Termes du bilan hydrologique.....	20
7.3.3. Etalonnage du modèle.....	20
7.3.4. Bilan des aquifères.....	21
7.4. MODELES SECTORIELS DE SIMULATION.....	24
7.4.1. Secteur occidental du delta intérieur du Niger.....	24
7.4.1.1. Caractéristiques du modèle.....	24
7.4.1.2. Simulation en régime permanent.....	26
7.4.1.3. Simulation en régime transitoire.....	26
7.4.2. Secteur de San.....	27
7.4.2.1. Caractéristiques du modèle.....	27
7.4.2.2. Simulation en régime permanent.....	27
7.4.2.3. Simulation en régime transitoire.....	29
7.4.3. Secteur de Nossombougou.....	29
7.4.3.1. Caractéristiques du modèle.....	29
7.4.3.2. Simulation en régime permanent.....	31
7.4.3.3. Simulation en régime transitoire.....	31
7.4.4. Récapitulation des simulations sur modèles.....	31
7.5. RESSOURCES EXPLOITABLES.....	32
7.5.1. Qualité de l'eau.....	33
7.5.2. Conditions hydrogéologiques.....	33
7.5.3. Contraintes économiques.....	34
7.6. BIBLIOGRAPHIE.....	36

FIGURES

Fig.7.1.	Exemples de simulation de la recharge annuelle par le modèle SIMERO sur 3 sites d'aquifères fissurés.....	4
Fig.7.2.	Simulations de l'historique piézométrique du site de Tioribougou avec le modèle GARDENIA - BRGM (Période 1983-85).....	4
Fig.7.3.	Relations entre l'écoulement de base des rivières (apports des nappes) et la pluviométrie : a) aquifère de l'Infracambrien tabulaire, b) aquifère du socle.....	8
Fig.7.4.	Ressources en eau souterraine par unité hydrogéologique.....	15
Fig.7.5.	Modèle global des aquifères du Mali : réseau maillé et piézométrie observée.....	17
Fig.7.6.	Modèle global des aquifères du Mali : schématisation des unités hydrogéologiques et piézométrie simulée.....	19
Fig.7.7.	Modèle de simulation du secteur occidental du delta intérieur du Niger (piézométries observée et simulée).....	25
Fig.7.8.	Modèle de simulation du secteur de San (piézométries observée et simulée).....	28
Fig.7.9.	Modèle de simulation du secteur de Nossombougou : a) piézométrie observée, b) piézométrie simulée.....	30

TABLEAUX

Tab.7.1.	Estimation de la recharge par infiltration de la pluie d'après les fluctuations piézométriques.....	2
Tab.7.2.	Infiltration annuelle calculée par le modèle SIMERO pour 3 sites d'aquifères fissurés.....	3
Tab.7.3.	Infiltration calculée par le modèle GARDENIA sur le site de Tioribougou (période 1983-1985).....	6
Tab.7.4.	Comparaison entre les valeurs d'infiltration calculées par différentes méthodes pour 3 sites d'aquifères fissurés.....	6
Tab.7.5.	Sorties des aquifères de l'ouest et du sud du Mali liées à l'écoulement de base des rivières permanentes par période de référence.....	9
Tab.7.6.	Estimation des lames d'eau évapotranspirée en fonction de la profondeur des nappes.....	11
Tab.7.7.	Caractéristiques géométriques moyennes des aquifères fissurés d'après les données de forage.....	12
Tab.7.8.	Réserves estimées des aquifères fissurés.....	13
Tab.7.9.	Réserves utiles estimées des aquifères généralisés.....	14
Tab.7.10.	Bilan par aquifère.....	22
Tab.7.11.	Bilan par unité hydrogéologique.....	23
Tab.7.12.	Récapitulation des caractéristiques des modèles de simulation et des bilans calculés.....	31/32
Tab.7.13.	Débits exploitables ponctuellement dans les aquifères fissurés à ressources renouvelables.....	34

CHAPITRE 7

BILAN DES AQUIFERES

7.1. GENERALITES

Les ressources en eau souterraine sont constituées, en proportions variables selon les aquifères et les conditions climatiques, de ressources renouvelables, périodiquement reconstituées, et de réserves statiques d'eau plus ou moins anciennes.

Les ressources renouvelables correspondent à la partie supérieure des aquifères (y compris selon le cas la nappe superficielle) où se situent les fluctuations piézométriques des nappes tandis que les réserves correspondent à l'ensemble de l'aquifère jusqu'à son plancher (éponte) imperméable. La connaissance quantitative de ces ressources et réserves conditionne leur exploitation à long terme. Elle constitue donc un élément important de la gestion des eaux souterraines.

L'estimation de ces deux types de ressources se heurte à de nombreuses difficultés dues, en particulier, à l'imprécision de l'évaluation des termes du bilan hydrologique et des caractéristiques hydrauliques des aquifères dans les milieux hétérogènes et discontinus. De plus, le mode de vidange, en zone sahélienne notamment, n'est pas encore clairement déterminé, le schéma classique de vidange par écoulement souterrain n'étant pas cohérent avec l'ensemble des données hydrogéologiques actuellement disponibles.

Les chiffres avancés dans ce chapitre sont donc à considérer comme des estimations préliminaires qui permettent toutefois de définir des orientations de développement à court et moyen terme avec une marge de sécurité suffisante.

7.2. ESTIMATION DES TERMES DU BILAN

L'établissement d'un bilan hydrologique n'est réellement significatif que pour les aquifères disposant de ressources à taux élevés de renouvellement sur quelques années à quelques dizaines d'années. Une connaissance, même approximative, des termes du bilan est alors nécessaire pour la gestion optimale des ressources en eau souterraine.

Entrent dans cette catégorie les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du pays à faibles réserves et rechargés par l'infiltration de la pluie ainsi que les aquifères généralisés situés en zone climatique sahélienne qui bénéficient par endroits d'apports par percolation des eaux de surface et par infiltration de la pluie.

Les aquifères situés en zone désertique ont une recharge nulle ou négligeable en comparaison de leurs réserves considérées comme fossiles; par ailleurs, l'échelle de temps à utiliser pour l'établissement de leur bilan est sans commune mesure avec celle du développement prévisible de leur exploitation.

7.2.1. Apports aux nappes

Les apports aux nappes sont constitués essentiellement par les infiltrations d'eaux de pluie et de surface.

7.2.1.1. Infiltration de la pluie

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour cerner ce terme qui représente le principal mode d'alimentation des aquifères.

a) Estimation à partir des fluctuations piézométriques

L'étude statistique des données du suivi piézométrique des aquifères a permis l'établissement de relations approchées qui ne sont significatives qu'à l'échelle régionale, entre la recharge moyenne des aquifères (I) et la pluviométrie moyenne (P). Le tableau 7.1 récapitule, pour les différentes zones climatiques et les divers types d'aquifères, les lames d'eau infiltrée annuellement selon les équations I de P établies au chapitre 4.

Tableau 7.1 - Estimation de la recharge par infiltration de la pluie d'après les fluctuations piézométriques

Zone Climatique	Précipit. moyennes P (mm/an)	Profondeur moyenne de nappe PN (m)	Type d'aquifère	Infiltration régionale I (mm/an)	Lame d'eau infiltrée (mm/an)
Soudanienne et Soudano-Sahélienne	≥700	5-15	Fissuré	$I=0,11P + 63$	140-220
Sahélienne	300-700	10-25	Fissuré	$I=0,30P - 70$	20-140
		<5	Généralisé	$I=0,40P$	120-200
		5- 8	Généralisé	$I=0,10P$	30- 50
		8-20	Généralisé	$I=0,02P \text{ à } 0,03P$	6- 15
		20-40	Généralisé	$I=0,01P$	3- 5
Sub-désertique	50-300	20-40	Généralisé et Fissuré	$I \leq 0,005P$	0,1-1,5
Désertique	<50	>40	Généralisé	$I=0$	0

b) Estimation à partir du modèle SIMERO

Ce modèle [7.1] schématise l'aquifère sous forme de trois réservoirs superposés dont les échanges hydrauliques sont contrôlés par des fonctions de transfert exprimées par des constantes de temps :

- le réservoir supérieur représenté par le sol contrôle le bilan hydrologique;
- le réservoir intermédiaire correspondant à la zone dénoyée assure la modulation dans le temps de la composante "infiltration" générée à la base du réservoir supérieur;
- le réservoir inférieur représente la zone saturée et intègre la lame d'eau infiltrée aux écoulements dont il est le siège.

Les données d'entrée du modèle sont la pluie et l'évapotranspiration (ETP) sur une base journalière, les teneurs en eau initiales et maxima des réservoirs supérieur et intermédiaire, les constantes de temps.

Trente simulations annuelles ont été réalisées sur huit sites dans les aquifères fissurés de l'Infracambrien tabulaire, de l'Infracambrien plissé et du socle et deux sites de l'aquifère généralisé du Continental terminal/Quaternaire [HDG/NTL/17]. Sur les sites de Tombouctou et de Bandiagara, aucun calage satisfaisant n'a pu être obtenu. Sur les autres sites, les coefficients d'infiltration obtenus varient entre 8 % et 42 % de la pluie brute.

La figure 7.1 montre des exemples de superposition d'hydrogrammes annuels mesurés sur le terrain et calculés par le modèle sur trois sites d'aquifères fissurés de l'ouest du Mali : Tioribougou et Karadié dans l'Infracambrien tabulaire (Unité 74) et Bougouni dans le socle (Unité 92). Le tableau 7.2 récapitule pour ces trois sites les lames d'eau infiltrée et les coefficients d'infiltration correspondants, année par année, pendant la période de suivi piézométrique. Les coefficients d'emmagasinage obtenus après étalonnage sont de 3 % .

Tableau 7.2 - Infiltration annuelle calculée par le modèle SIMERO pour 3 sites d'aquifères fissurés

Année	Site		TIORIBOUGOU	KARADIE	BOUGOUNI
1982		P (mm)	-	-	1276
		LI (mm)	-	-	252
		I (%)	-	-	20
1983		P	448	-	987
		LI	116	-	207
		I	26	-	21
1984		P	449	-	848
		LI	94	-	158
		I	21	-	19
1985		P	522	-	958
		LI	147	-	237
		I	28	-	25
1986		P	629	647	960
		LI	186	167	258
		I	30	26	27
1987		P	749	731	885
		LI	218	241	331
		I	29	33	37
1988		P	849	786	-
		LI	272	332	-
		I	32	42	-

P : Précipitation annuelle
I : Coefficient d'infiltration

LI : Lame d'eau infiltrée

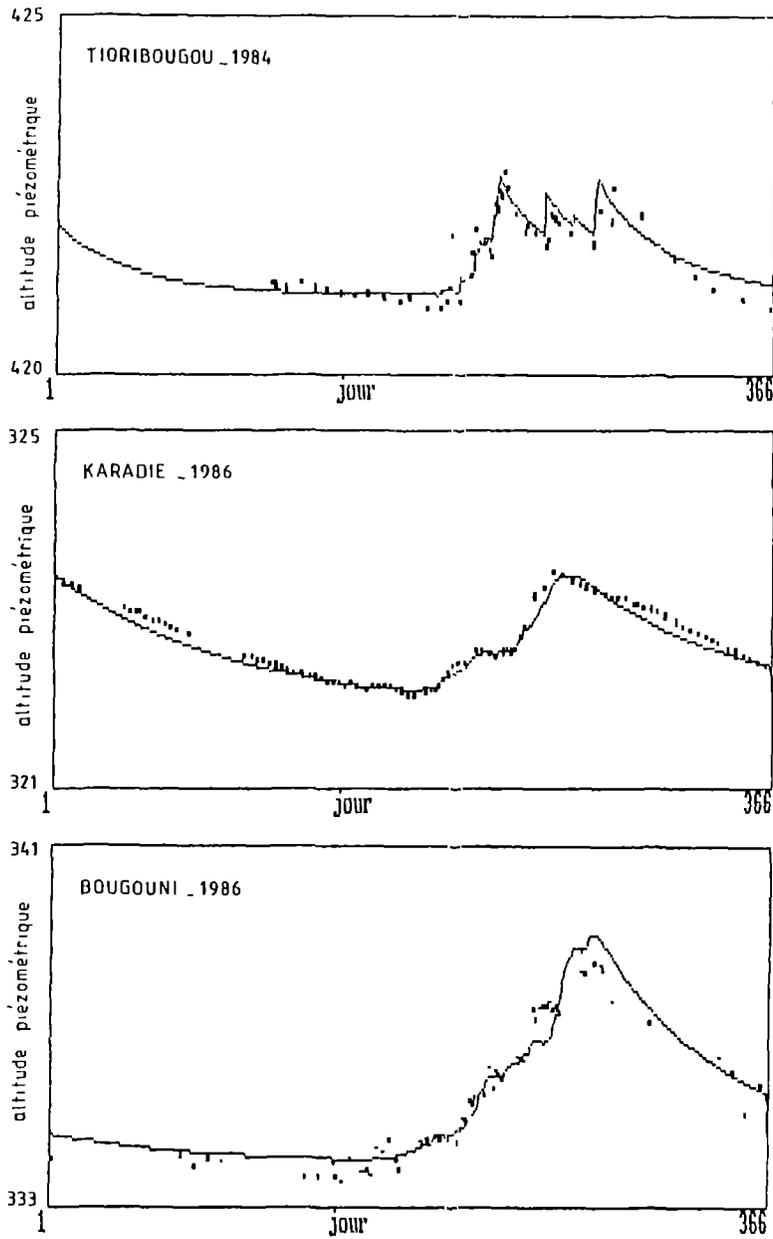


Fig 7.1 - Exemples de simulation de la recharge annuelle par le modèle SIMERO sur 3 sites d'aquifères fissurés

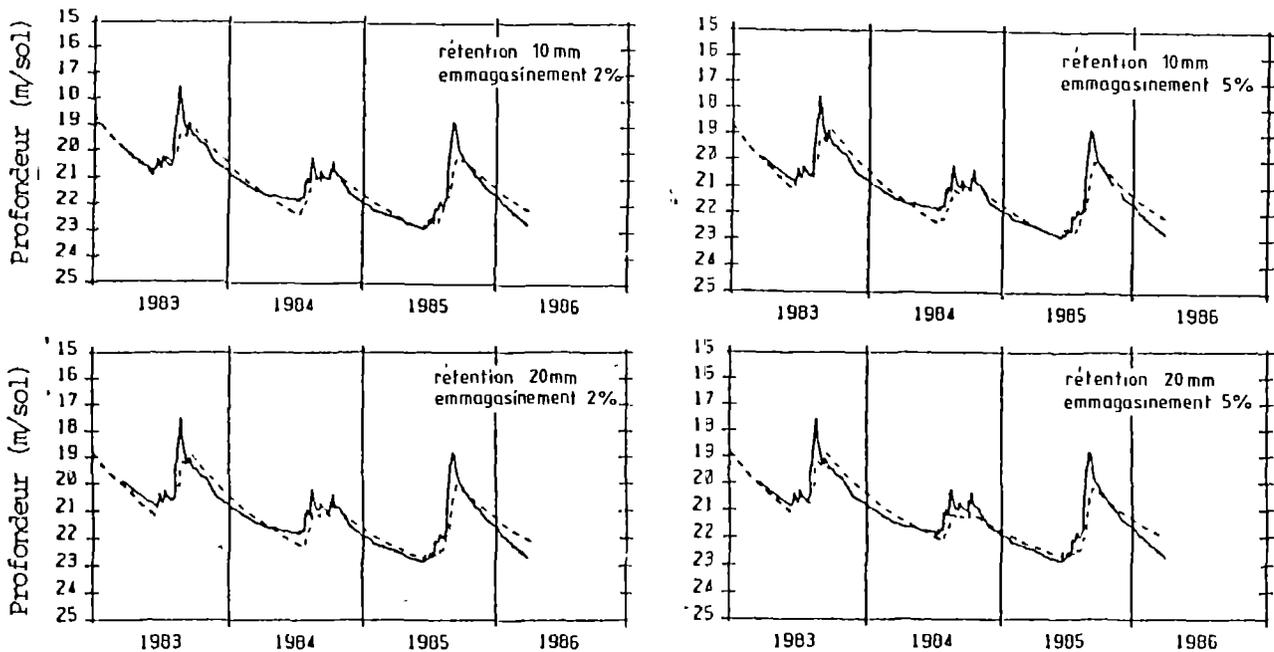


Fig.7.2 - Simulations de l'historique piézométrique du site de Tioribougou avec le modèle GARDENIA (BRGM) - Période 1983 - 85

On remarquera que pour l'aquifère infracambrien, l'infiltration croît de façon approximativement linéaire avec les hauteurs des précipitations. Pour l'aquifère du socle, la relation est plus irrégulière, les calages des hydrogrammes étant d'ailleurs moins satisfaisants, notamment en fin de tarissement et en début de remontée des niveaux piézométriques. Le modèle SIMERO ne permet pas de prendre en compte les conditions hydrauliques spécifiques dans les formations d'altération sur socle avec la présence d'un horizon de perméabilité préférentielle à écoulement latéral temporaire qui intercepte une partie des eaux d'infiltration.

Les deux simulations effectuées sur l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire (Gniminiama et Doungoura) donnent des valeurs de coefficient d'infiltration voisines de 8 %. Ces deux sites sont localisés en bordure de la zone lacustre du delta intérieur du Niger avec une surface piézométrique située à moins de 10 m de profondeur.

c) Estimation à partir du modèle GARDENIA

Ce modèle global pluie-niveau mis au point par le BRGM⁽¹⁾ a été testé sur l'historique piézométrique de Tioribougou [7.2]. Il s'agit aussi d'un modèle à réservoirs superposés avec un premier réservoir représentant la capacité de rétention des sols qui génère des pluies "efficaces" pour l'infiltration et le ruissellement. Les proportions relatives de ces deux composantes sont contrôlées par la hauteur d'eau dans un réservoir intermédiaire. La composante infiltration atteint le réservoir inférieur représentant la zone saturée. Les données sont entrées sur une base journalière, la période simulée couvrant les années 1983 à 1985.

Les paramètres caractéristiques du modèle : coefficient d'emmagasinement et capacité de rétention des sols n'étant pas connus, des simulations ont été faites en considérant une large plage de variation pour ces deux paramètres :

- entre 0,1 et 20 % pour le coefficient d'emmagasinement,
- entre 0 et 70 mm pour la capacité de rétention des sols.

Les meilleurs ajustements entre la piézométrie observée et la piézométrie calculée ont été obtenus pour des valeurs d'emmagasinement de 2 à 5 % et une capacité de rétention des sols de 10 et 20 mm. Le tableau 7.3 récapitule les valeurs d'infiltration calculées tandis que la figure 7.2 permet de visualiser la qualité des ajustements réalisés.

Tableau 7.3 - Infiltration calculée par le modèle GARDENIA sur le site de Tioribougou (période 1983-1985)

Coefficient d'emmagasinement		2 %		5 %	
Capacité de rétention	(mm)	10	20	10	20
Pluie "efficace" 1983-85	(mm/an)	197	140	197	140
Evapotranspiration réelle	(mm/an)	302	358	302	358
Ruissellement	(mm/an)	132	79	35	5
Infiltration	(mm/an)	65	62	162	135
Infiltration/Pluie brute	(%)	13	12	32	27

L'infiltration calculée avec ce modèle de recharge varie fortement suivant les valeurs de coefficient d'emmagasinement adoptées pour la zone de battement des nappes généralement localisée dans la frange altérée du substratum ou à la base des profils d'altération. On peut cependant considérer que, pour cette zone aquifère de type essentiellement intergranulaire et sur un plan régional, les valeurs de 2 à 5 % représentent le champ de variation probable des coefficients d'emmagasinement.

d) Comparaison entre les méthodes d'estimation

Les valeurs de l'infiltration estimées à partir des statistiques sur les fluctuations piézométriques saisonnières qui intègrent l'hétérogénéité des conditions hydrogéologiques locales des aquifères fissurés, sont en général plus faibles que celles calculées ponctuellement par des modèles de simulation de la recharge, ces dernières présentant néanmoins une certaine homogénéité, du moins pour les limites inférieures des estimations ainsi que le montre le tableau 7.4. ci-après.

Tableau 7.4 - Comparaison entre les valeurs d'infiltration calculées par différentes méthodes pour 3 sites d'aquifères fissurés (Infracambrien tabulaire et socle)

Méthode d'estimation	TIORIBOUGOU		KARADIE		BOUGOUNI	
	Infiltr. (mm/an)	Inf/Pluie(%)	Infiltr. (mm/an)	Inf/Pluie(%)	Infiltr. (mm/an)	Inf/Pluie(%)
Fluctuations piézométr.	64-156	14-18	124-149	18-19	160-203	18-16
Modèle SIMERO	94-272	21-32	167-332	26-42	158-331	19-37
Modèle GARDENIA	62-162	12-32	-	-	-	-

Pour les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali et les aquifères d'altérites qui les surmontent, une recharge annuelle moyenne à l'échelle régionale variant entre 10 et 20 % de la pluie brute paraît une fourchette d'estimation réaliste. Ces valeurs de coefficient d'infiltration incluent une recharge indirecte par l'écoulement temporaire des eaux de surface dans les secteurs sahéliens et soudano-sahéliens où le réseau hydrographique est perché.

La recharge des aquifères généralisés par infiltration directe est nettement plus faible que pour les aquifères fissurés situés dans des conditions pluviométriques équivalentes. Pour les secteurs d'extension très limitée où la surface piézométrique est située à moins de 10 m de profondeur, l'analyse des fluctuations piézométriques et les simulations sur modèle SIMERO donnent des coefficients d'infiltration situés entre 8 et 10 %. Pour des profondeurs de nappe supérieures à 10 m, conditions rencontrées dans la majeure partie du domaine couvert par les aquifères généralisés, l'infiltration se réduit rapidement pour des profondeurs croissantes. Elle serait de l'ordre de 1 % de la pluie à 20 m de profondeur et négligeable au delà de 40 m, les eaux d'infiltration étant presque entièrement interceptées par des nappes perchées.

7.2.1.2. Infiltration des eaux de surface

a) Ecoulements non pérennes

L'infiltration du ruissellement de surface et de l'écoulement temporaire des marigots lorsqu'ils ne sont pas drainés par le réseau hydrographique principal peuvent constituer une composante significative de la recharge des aquifères d'altérites et de fissures. C'est le cas dans la majeure partie des régions où les hauteurs annuelles de pluie sont inférieures à 700 mm et où le réseau hydrogéologique est en situation perchée par rapport aux nappes. On considère que les lames d'eau infiltrée calculées à partir des fluctuations piézométriques dans les aquifères fissurés prennent également en compte ce mode de recharge.

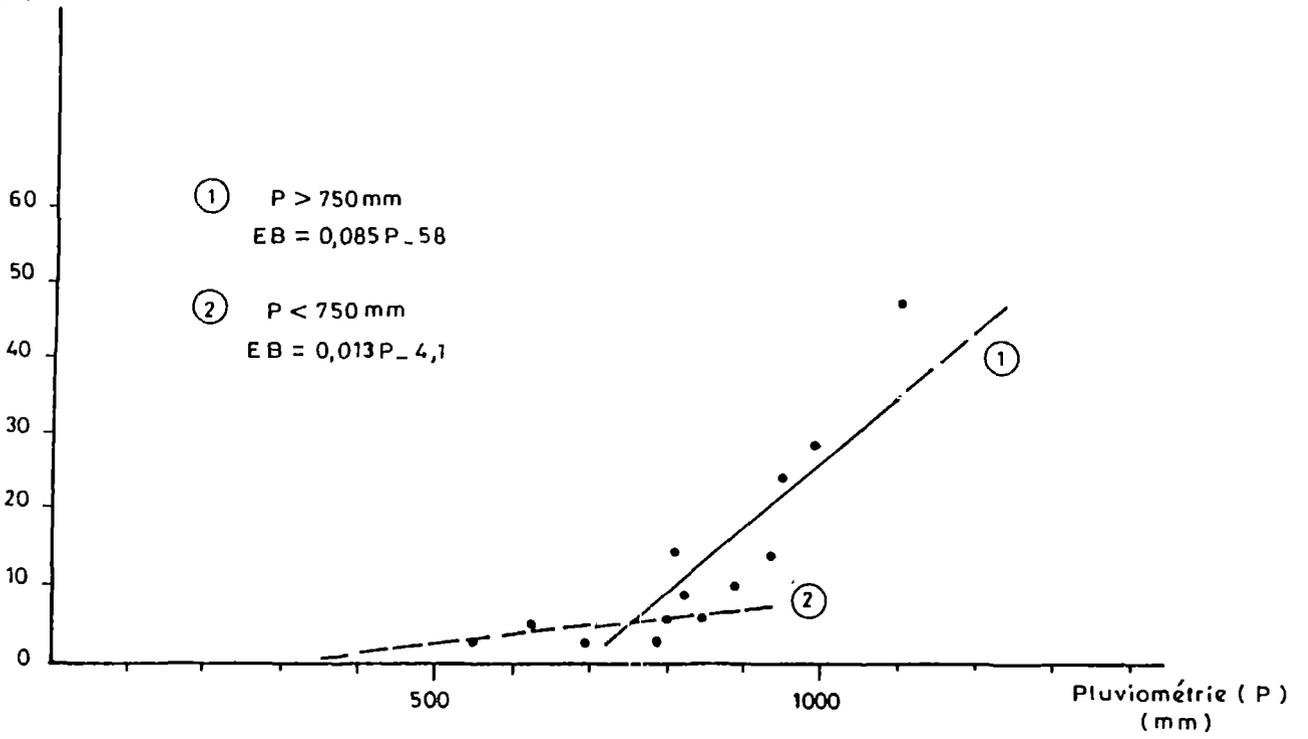
b) Zone lacustre du delta intérieur

Les pertes d'écoulement du Niger calculées par différence entre les débits mesurés à l'entrée et à la sortie du delta sont de l'ordre de 33 milliards de m³ /an en moyenne (voir chapitre 2). La recharge de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire présent sous le delta ne représente qu'une fraction de ces pertes en raison d'une part de la faible épaisseur de la zone non saturée, la surface piézométrique étant située entre 3 et 5 m de profondeur et donc soumise à l'évapotranspiration, d'autre part des perméabilités horizontales réduites des formations argilo-sableuses de cet aquifère qui ne permettent pas un transfert important des volumes de recharge. A défaut de données plus précises, la recharge par les eaux de surface a été estimée à 5 % des pertes d'écoulement du Niger dans le bilan de l'unité hydrogéologique du delta intérieur.

c) Plaines d'inondation

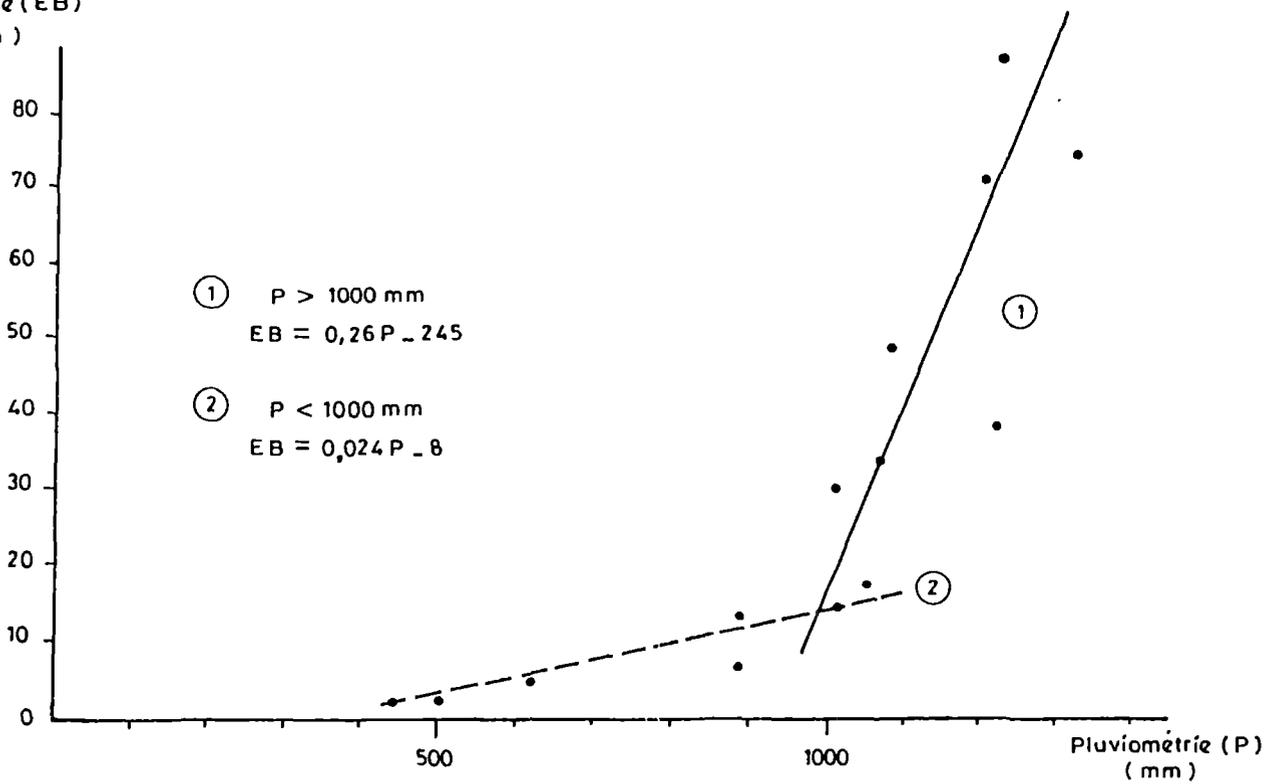
A la périphérie de la zone lacustre et dans les plaines alluviales bordant les fleuves Niger et Bani qui sont temporairement inondées durant les périodes de crue, la recharge par les eaux de surface se traduit par des remontées locales de la surface piézométrique. Les apports sont toutefois de faible importance et leur ordre de grandeur peut être estimé à partir de la loi de Darcy en considérant les valeurs moyennes de 0,1 % pour les gradients hydrauliques et de $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s pour les transmissivités (d'après les données de la piézométrie et des pompages d'essai). Les apports d'eau de surface à l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire en bordure des plaines d'inondation représenteraient ainsi de l'ordre de 100.000 m³/an/km².

Ecoulement
de base (EB)
(mm)



a_ Aquifère de l'Infracambrien tabulaire

Ecoulement
de base (EB)
(mm)



b_ Aquifère du socle

Fig.7.3 - Relations entre l'écoulement de base des rivières (apports des nappes) et la pluviométrie.

7.2.2. Sorties des nappes

7.2.2.1. Ecoulement souterrain drainé par le réseau hydrographique

Il correspond à l'écoulement de base des rivières permanentes et semi-permanentes des bassins versants en amont des fleuves Sénégal et Niger alimenté par des apports souterrains en provenance des aquifères fissurés et d'altérites.

L'écoulement de base a été estimé par sous-bassin hydrographique à partir de la séparation des écoulements sur les hydrogrammes mesurés aux principales stations hydrométriques (*voir chapitre 2*). Il a été réparti entre les différentes unités hydrogéologiques couvertes par ces sous-bassins [HDG/NTL/15] et pour trois périodes de référence qui correspondent à un cycle d'années humides (1960-1969) suivi de deux cycles d'années déficitaires (1970-1979 et 1980-1987).

Tableau 7.5 - Apports des aquifères de l'ouest et du sud du Mali à l'écoulement des rivières permanentes par période de référence

Aquifère	Unité Hydrogéologique	Période 1960-69		Période 1970-79		Période 1980-87	
		mm/an	% P	mm/an	% P	mm/an	% P
Cambrien	61	(-2)	-	0	0	0	0
	62	-	-	1	-	-	0
Infracambrien tabulaire + altérites	72	-	-	-	-	-	-
	73	48	4,4	26	2,7	10	1,4
	74	15	2,1	5	0,8	4	0,7
	75	12	1,3	2	0,2	1	0,1
	76	30	3,1	12	1,4	4	0,6
	77	23	2,1	15	1,6	5	0,6
	Moy. pond.	27	2,8	12	1,3	5,5	0,8
Socle + altérites	92	87	7,3	33	3,3	15	1,7
	93	76	6,0	35	3,3	20	1,9
	94	105	7,6	73	6,4	50	4,7
	95	40	3,3	18	1,7	7	0,8
	96	6	1,0	4	0,8	3	0,7
		Moy. pond. (92 exclu)	81	6,4	30	3,1	24

% P : pourcentage de l'écoulement de base par rapport à la pluie moyenne pendant la période considérée.

La comparaison entre les écoulements de base (apports des nappes) de la période humide et ceux des périodes sèches met en évidence l'influence de la pluviométrie. La relation n'est toutefois pas linéaire ; elle peut être approximativement schématisée par deux segments de droite à pente croissante en fonction de l'augmentation de la pluviométrie, ces pentes étant cependant différentes pour les aquifères de l'Infracambrien tabulaire et du socle (*figure 7.3*). Le drainage de l'Infracambrien tabulaire par le réseau hydrographique ne devient réellement significatif que pour des pluviométries supérieures à 800 mm/an tandis que pour l'aquifère du socle, le seuil pluviométrique, plus élevé, s'établit aux environs de 1000 mm/an.

7.2.2.2. *Evapotranspiration*

Ce terme du bilan n'est généralement pas considéré comme une composante principale de la vidange des systèmes aquifères sauf dans les secteurs où la surface piézométrique est subaffleurante. En réalité, les multiples observations faites au Mali et dans les pays voisins amènent à considérer que l'évapotranspiration est le principal mode de vidange des systèmes aquifères de la zone climatique sahélienne, même dans les secteurs où la surface piézométrique est relativement profonde.

Dans les chapitres précédents, l'analyse des données piézométriques et hydrochimiques et des caractéristiques hydrauliques des aquifères a apporté des indications convergentes sur le rôle probable de l'évapotranspiration. On citera notamment les arguments suivants :

- l'existence de vastes zones à piézométrie déprimée qui sont délimitées par des isopièzes fermées alors qu'elles sont bordées par des zones où la recharge se fait par la pluie ou par les eaux de surface ;
- l'enrichissement en isotopes stables, en fonction de la profondeur de l'eau, de la majorité des échantillons prélevés dans les aquifères fissurés et généralisés qui prouve sans conteste le rôle essentiel de l'évaporation ;
- la faible importance des transferts latéraux par écoulement souterrain en raison du compartimentage des aquifères et des faibles perméabilités moyennes ;
- l'absence probable, le long des grands accidents structuraux, d'écoulements préférentiels qui n'ont pu être mis en évidence ni dans la piézométrie régionale, ni dans le débit des forages qui y sont localisés, ni enfin dans l'écoulement de base des rivières permanentes qui les recoupent, et ceci en dépit des très forts gradients piézométriques liés à l'encaissement des vallées ;
- l'absence probable de circulations d'eau dans les zones fissurées profondes, sinon localement, puisque l'étude statistique sur les données de forage montre une décroissance significative de la perméabilité fissurale avec la profondeur.

Ainsi le bilan hydrologique et les modèles numériques de simulation de l'écoulement ont été établis avec l'évapotranspiration comme principal mode de vidange des aquifères suivant une loi exponentielle décroissante en fonction de la profondeur de la surface piézométrique.

Après étalonnage sur le modèle de simulation numérique de la région de San [HDG/RGL/15], un ordre de grandeur de l'évapotranspiration profonde a été obtenu.

Tableau 7.6 - Estimation des lames d'eau évapotranspirée en fonction de la profondeur des nappes

Profondeur de nappe	Sub-affleurante	3 m	10 m	20 m
Evapotranspiration (mm/an)	630	390	10	0,6

Ces valeurs sont supérieures à celles généralement citées, mais compatibles avec les résultats des études isotopiques si l'on considère qu'une fraction significative de l'évapotranspiration correspond à une reprise par la transpiration des plantes.

7.2.3. Réserves des aquifères

Les données sur la géométrie des aquifères et sur leur capacité d'emmagasinement sont incomplètes et ne permettent que des estimations très approximatives sur la base d'hypothèses simplificatrices.

7.2.3.1. Aquifères fissurés

L'analyse statistique des données de forage permet de définir trois zones d'emmagasinement superposées qui sont caractérisées par des porosités efficaces décroissantes avec la profondeur.

* Zone des altérites : elle inclut la partie saturée des formations du recouvrement et la frange altérée du substratum. Les fluctuations saisonnières des niveaux piézométriques y sont localisées. Elle représente essentiellement l'aquifère superficiel avec une porosité de type intergranulaire estimée en moyenne à 5 %. Son épaisseur varie de quelques mètres à une trentaine de mètres selon les aquifères en fonction de leur situation climatique et de leur contexte géomorphologique.

* Zone fissurée active : elle correspond à la partie supérieure de la zone fissurée où se produit l'essentiel des transferts hydrauliques au sein du milieu fissuré et dans laquelle transitent les eaux de recharge saisonnière. Sa limite inférieure a été fixée, par unité hydrogéologique, à partir de la distribution des venues d'eau principales dans les forages et correspond à la profondeur à laquelle 80 % des venues d'eau exploitables ont été recoupées. L'épaisseur de la zone fissurée active varie, selon les unités, entre 25 et 50 m. La porosité efficace moyenne, macro et microfissurale, serait de l'ordre de 1 %, la densité et l'ouverture des réseaux de fissuration décroissant rapidement avec la profondeur tandis que la porosité des blocs reste faible.

* Zone fissurée profonde : elle contient en général, d'après les études isotopiques, des eaux anciennes, substatiques, peu ou non renouvelées en dehors des zones influencées par les pompages. Sa profondeur a été arbitrairement fixée à 150 m qui est la profondeur maximum des forages d'hydraulique villageoise. Une porosité de 0,1 % a été affectée à cette zone pour les aquifères grésos-schisteux de l'Infracambrien tabulaire et du Cambrien. Pour l'aquifère du socle, l'emmagasinement profond a été considéré comme négligeable au plan régional en raison du faible développement de la fissuration ouverte et non colmatée dans les roches cristallines et de la faible porosité des blocs.

En ce qui concerne les aquifères fissurés de l'est du Mali (dans le Gourma et l'Adrar des Iforas), il a été considéré que la totalité du milieu fissuré était de type profond avec une porosité de 0,1 % en raison de leur caractère discontinu, de leur piézométrie déprimée et du faible taux de réussite des forages qui y ont été exécutés.

Les données hydrogéologiques moyennes utilisées pour l'estimation des réserves des aquifères fissurés sont indiquées dans le tableau 7.7 tandis que les réserves par zones d'emmagasinement et les réserves totales sont calculées dans le tableau 7.8.

Tableau 7.7 - Caractéristiques géométriques moyennes des aquifères fissurés d'après les données de forages

Aquifère	Unité	Prof. N.S (m)	Epais. altér. (m)	Epais. nappe sup. (m)	Prof. 80% VEP (m)	Epais. fiss. active (m)	Epais. fiss. prof. (m)	Taux réus. forage (%)
Cambrien	61	18	10	0	63	45	87	43
	62	15	12	0	55	40	95	48
Infracambrien tabulaire	71	18	12	0	66	48	84	56
	72	14	12	0	58	44	92	76
	73	15	21	6	61	41	89	81
	74	19	20	1	69	49	81	65
	75	17	20	3	58	38	92	67
	76	14	20	6	52	32	98	66
Infracambrien plissé	77	13	14	1	57	43	93	75
	81	13	30	17	-	-	120	77
	82	43	37	0	-	-	107	47
Socle	83	47	35	0	-	-	103	48
	91	20	12	0	50	30	-	40
	92	10	35	25	64	29	-	68
	93	12	33	21	58	25	-	69
	94	11	40	29	66	26	-	71
95	15	26	11	54	28	-	60	
96	15	12	0	42	27	-	48	

Tableau 7.8 - Réserves estimées des aquifères fissurés

Aquifère	Unité	Réserves nappe superfic. (mm)	Réserves fissuration active (mm)	Réserves fissuration profonde (mm)	Réserves totales (mm)
Cambrien	62	0	450	85	535
	61	0	400	95	495
Moyenne		0	423	91	514
Infracambrien tabulaire	71	0	480	80	560
	72	0	440	90	530
	73	300	410	90	800
	74	50	490	80	620
	75	150	380	90	620
	76	300	320	100	720
77	50	430	90	570	
Moyenne		134	426	88	648
Infracambrien plissé	51	850	-	120	970
	52	0	-	110	110
	53	0	-	100	100
Moyenne		50	-	109	159
Socle	91	0	30	-	30
	92	1250	290	-	1540
	93	1050	250	-	1300
	94	1450	260	-	1710
	95	550	280	-	830
	96	0	270	-	270
Moyenne		478	151	-	629

7.2.3.2. Aquifères généralisés

Le mur imperméable des principaux aquifères généralisés est mal connu, aussi l'épaisseur des formations saturées ne peut-elle être estimée qu'avec une marge d'incertitude importante. Il en est de même de la lithologie et de la granulométrie des couches profondes ainsi que de leur capacité d'emmagasinement.

Une estimation des réserves utiles susceptibles d'être exploitées dans des conditions économiquement acceptables a donc été faite sur les bases suivantes :

- seules ont été considérées les réserves de la zone saturée située à moins de 100 m de profondeur bien que, dans la majorité des secteurs d'aquifères généralisés, le mur soit beaucoup plus profond et que l'épaisseur saturée puisse atteindre plusieurs centaines de mètres;

- la porosité efficace a été estimée à partir des pourcentages moyens respectifs des couches à dominante sableuse et des couches à dominante argileuse déterminés sur les coupes lithologiques des forages. Les porosités de référence ont été fixées à 15 % pour les sables moyens à grossiers et graviers, et à 3 % pour les argiles sableuses, sables argileux et sables fins, valeurs qui correspondent à des aquifères multicouches de type libre ou semi-libre correspondant le plus souvent à la partie supérieure des aquifères généralisés du Mali (voir chapitre 3).

Compte tenu de ces approximations, les réserves indiquées dans le tableau 7.9 ne représentent donc qu'une fraction, plus ou moins importante, des volumes d'eau réellement emmagasinés.

Tableau 7.9 - Réserves utiles estimées des aquifères généralisés

Aquifère	Unité et Secteur hydrog.	Prof. du niveau statique (m)	Epais. utile de l'aquif. (m)	% sable	% argile sableuse	Réserves exploit. (mm)
Continental term./ Quaternaire	12a	28	72	20	80	3880
	12b	38	62	10	90	2600
	13	23	77	30	70	5080
	14	7	93	30	70	6130
	15a	25	25	20	80	1350
	15b	13	67	60	40	6830
	15c	17	83	30	70	5470
Moyenne						4530
Crétacé supérieur/ Eocène inférieur	21a	55	45	10	90	1890
	21b	45	55	5	95	(1600)
	21c	-	-	-	-	-
Moyenne						1786
Continental int./ Continental term.	31a	49	51	40	60	3970
	31b	42	58	30	70	(4000)
	32	45	55	40	60	4290
Moyenne						4016
Continental intercalaire	41	39	61	50	50	5490
	42a	-	-	-	-	-
	42b	-	-	-	-	-

- Données insuffisantes

() Eaux de qualité médiocre

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

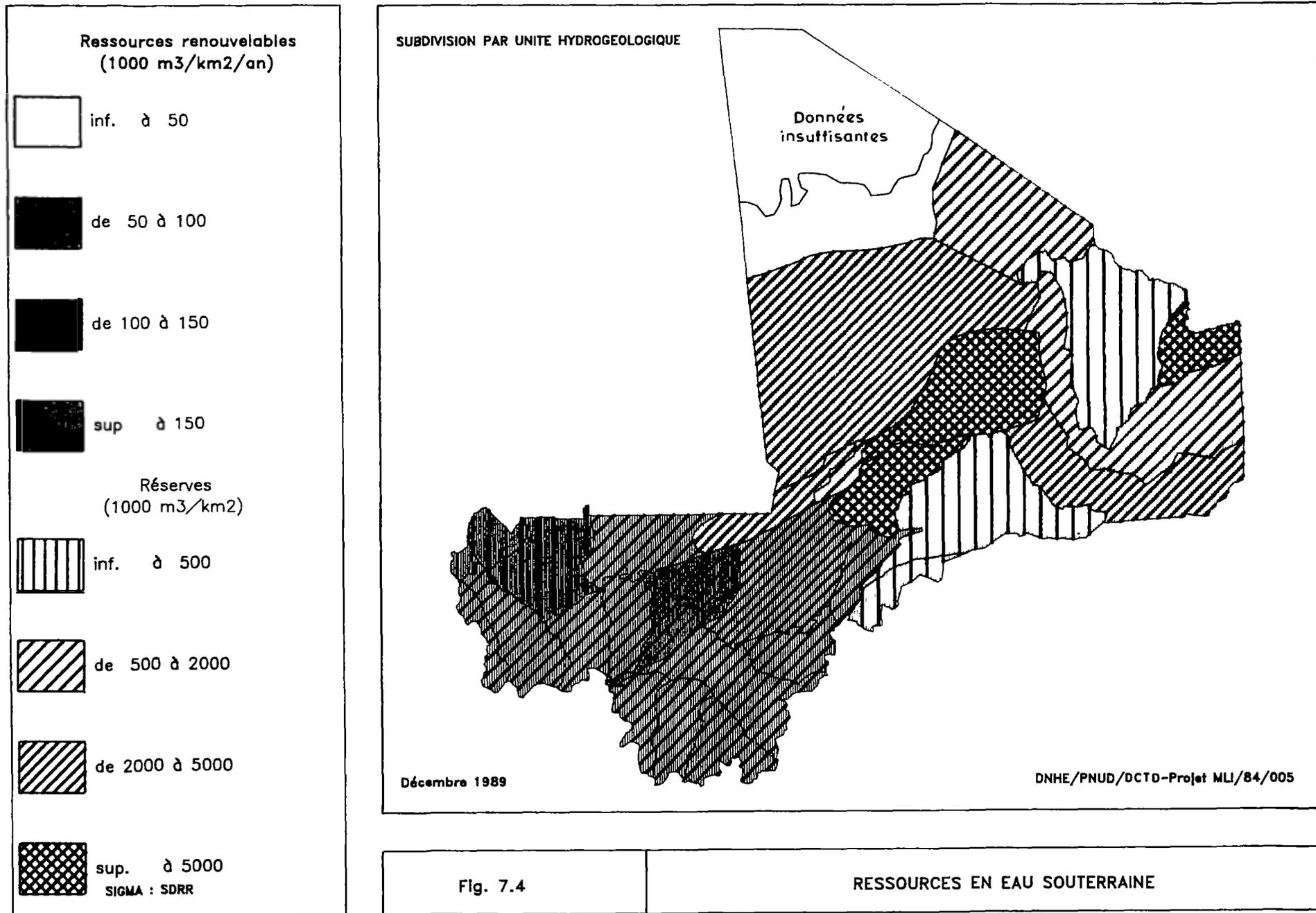


Fig. 7.4

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

La figure 7.4 montre de façon synthétique la répartition des ressources en eau souterraine par unité hydrogéologique et par type de ressources, selon les méthodes d'estimation décrites ci-dessus. Elle met en évidence l'opposition existant entre les régions ouest et sud, domaine des aquifères fissurés à ressources renouvelables importantes et à réserves réduites, et les régions est et nord, domaine des aquifères généralisés à réserves d'eau importantes mais peu ou non renouvelées. Dans la région centrale du Mali, l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger est une zone privilégiée, en particulier le secteur du delta intérieur, où les réserves et les ressources renouvelables sont importantes.

7.3. MODELE GLOBAL DE SIMULATION DES AQUIFERES DU MALI

7.3.1. Objectifs du modèle

La préparation d'un modèle global simulant l'ensemble des aquifères du Mali considérés comme un seul et même aquifère répondait à plusieurs objectifs :

- vérifier, à l'échelle du pays, l'homogénéité et la compatibilité des résultats statistiques obtenus par le traitement de la banque de données SIGMA pour les différentes unités hydrogéologiques,
- vérifier les estimations de la recharge par la pluie et les eaux de surface ainsi que celles des apports des aquifères à l'écoulement de surface,
- évaluer les transferts hydrauliques entre les unités hydrogéologiques d'un même aquifère et entre les différents aquifères,
- tester l'hypothèse selon laquelle l'évapotranspiration constituerait le principal mode de vidange des aquifères à ressources renouvelables.

Les simulations ont été faites uniquement en régime permanent car les simulations en régime transitoire ne présentent qu'un intérêt limité en raison de la taille des mailles utilisées et des objectifs du modèle.

7.3.2. Caractéristiques du modèle et données utilisées

Le modèle a été réalisé à partir du logiciel MHYDRO2D développé par la Société FRANLAB (France). C'est un modèle bi-dimensionnel utilisant la méthode des différences finies avec un réseau maillé rectangulaire. Il ne prend généralement en compte que les écoulements horizontaux, mais dispose d'une option pour simuler des transferts verticaux.

7.3.2.1. Réseau maillé et schématisation des unités hydrogéologiques

La discrétisation du territoire malien a été faite sur la base des feuilles topographiques de l'IGN au 1:200.000. Chaque maille représente un degré carré et couvre une superficie d'environ 11.000 km². Le modèle comporte 119 mailles actives (figure 7.5).

Les limites des unités hydrogéologiques ont été approximativement ajustées aux limites des cartes topographiques en respectant l'ordre de grandeur de leur surface ainsi que leur position relative (figure 7.6). Il est bien évident que le canevas des unités hydrogéologiques ainsi obtenu n'est qu'une schématisation mais suffisante toutefois pour représenter les conditions hydrogéologiques à l'échelle régionale.

Les limitations de ce modèle et le résultat des simulations ont fait l'objet du rapport technique HDG/NTL/21 (voir Annexe 1).

7.3.2.2. Transmissivités

Une seule valeur de transmissivité par unité hydrogéologique a été adaptée et affectée aux mailles correspondantes. Les premières simulations ont été faites en utilisant les moyennes géométriques déterminées à partir des résultats des pompages d'essai qui représentent les valeurs les plus probables (*voir chapitre 5*), le calage du modèle ayant toutefois été fait avec des moyennes arithmétiques plus fortes afin de favoriser la composante "écoulement souterrain" dans le bilan des aquifères. Celui-ci reste d'ailleurs d'importance réduite même avec ces valeurs. Pour l'unité du Delta intérieur (aquifère du Continental terminal/Quaternaire), la plupart des pompages d'essai ayant été exécutés dans les zones de bordure où l'aquifère est d'épaisseur réduite et les faciès plus argileux, la valeur moyenne calculée n'est pas représentative de l'ensemble de l'unité; la transmissivité retenue est la moyenne des valeurs mesurées dans la partie centrale du delta.

7.3.2.3. Conditions aux limites

Un potentiel a été imposé sur toutes les mailles de bordure du modèle sauf pour celles couvrant la frontière sud-est (Gondo, Gcurma et sud de l'Adrar des Iforas) où un débit de sortie a été imposé afin de simuler les transferts souterrains vers les aquifères limitrophes du Burkina Faso et du Niger comme suggéré par la piézométrie.

Les potentiels imposés ont été définis à partir de la carte piézométrique du Mali. Les potentiels les plus bas se situent dans le secteur de Kayes avec une altitude minimum de 20 m dans la maille couvrant la vallée du Sénégal tandis que les potentiels les plus élevés sont localisés sur la frontière sud du Mali et correspondent à l'interfluve entre les bassins versants du Niger et de la Volta (Plateaux de Sikasso - Koutiala).

7.3.2.4. Discontinuités internes

Trois limites étanches ont été introduites entre certaines mailles du modèle pour représenter les remontées du substratum primaire ou infracambrien peu perméable qui séparent certaines unités d'aquifères généralisés :

- la première suit les bordures sud et nord du plateau du Khenachich et sépare les aquifères du Continental intercalaire de l'Azaouad nord et du Crétacé supérieur/Eocène inférieur du Tanezrouft de l'aquifère des formations primaires de la cuvette de Taoudenni,
- la deuxième est fixée le long du système de failles limitant au sud l'aquifère du Continental intercalaire du fossé de Nara,
- la troisième correspond à la dorsale de l'Azaouad et sépare les bassins sédimentaires de l'Azaouad sud et nord.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

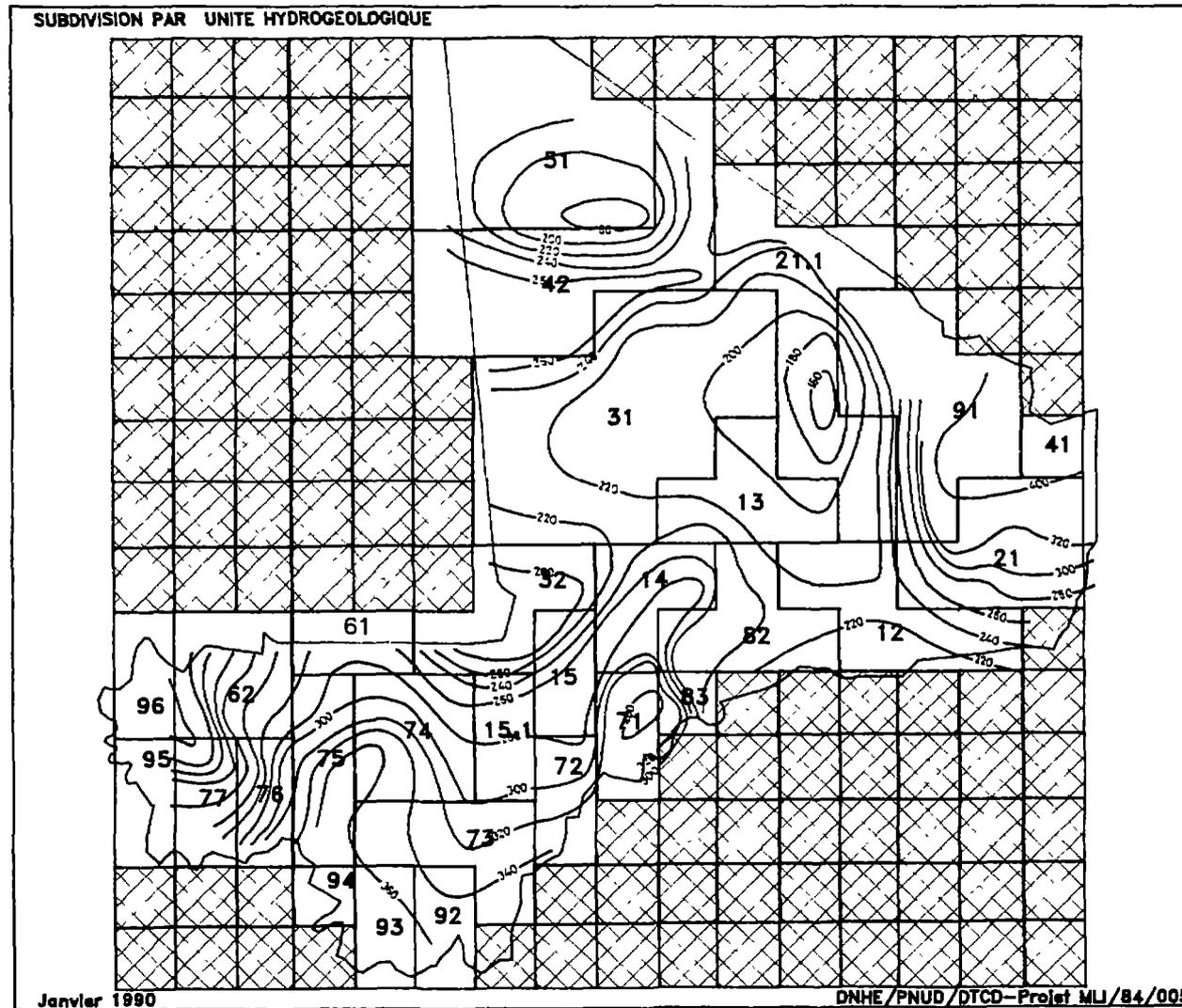
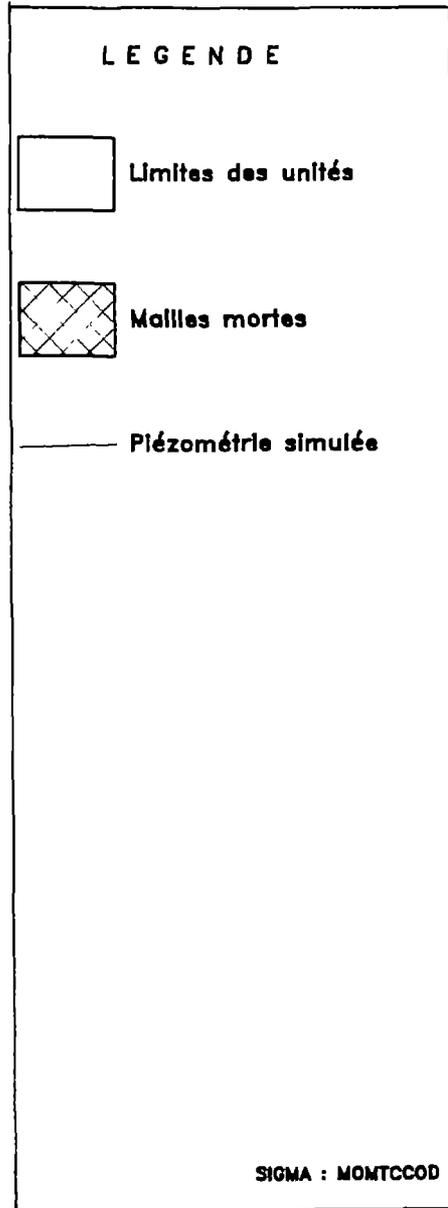


Fig. 7.6 MODELE GLOBAL DES AQUIFERES DU MALI :
Schématisation des unités hydrogéologiques et piézométrie simulée

7.3.2.5. Termes du bilan hydrologique

Les valeurs utilisées sont celles mentionnées dans le paragraphe 7.1 pour la recharge par la pluie et les eaux de surface ainsi que pour le drainage des aquifères par le réseau hydrographique. Des valeurs identiques ont été affectées à toutes les mailles d'une même unité hydrogéologique.

Afin de simuler l'évapotranspiration en fonction de la profondeur de la nappe et compte tenu du fait que le modèle MHYDRO2D n'accepte que des relations linéaires pour l'option concernant les transferts verticaux, la décroissance exponentielle de l'évapotranspiration a été approchée par deux droites dont les équations sont de la forme $Q \text{ (ETP)} = L (H_m - H_r)$

avec :

- Q (ETP): Débit évapotranspiré, en m^3/s
- L : Liaison hydraulique verticale (elle s'exprime comme une transmissivité, en m^2/s)
- H_m : Altitude piézométrique de la maille calculée par le modèle, en m
- H_r : Altitude de référence correspondant à un seuil de profondeur pour lequel la liaison hydraulique change de valeur,

Pour le modèle général, deux valeurs de liaisons hydrauliques ont été utilisées :

- une valeur élevée jusqu'à la profondeur de 5 m ($L_1 = 1,27 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/s \text{ par km}^2$),
- une valeur faible entre 5 et 15 m de profondeur ($L_2 = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/s \text{ par km}^2$).

Au-delà de 15 m et jusqu'à une profondeur de nappe de 40 m, un flux évaporatoire très faible de 0,1 mm/an a été simulé sous la forme d'un prélèvement à débit constant.

Les infiltrations provenant des eaux d'irrigation ("return-flow") et les pompages dans les aquifères n'ont pas été pris en compte étant donné d'une part leur faible importance comparée aux autres termes du bilan, d'autre part la taille des mailles du modèle.

7.3.3. Etalonnage du modèle

La carte piézométrique du Mali établie par le projet MLI/84/005 [HDG/NTL/8] a été utilisée comme référence pour le calage du modèle. Elle est schématisée sur la figure 7.5.

Des simulations préliminaires ont montré qu'aucun calage même approximatif ne pouvait être obtenu sans faire intervenir l'évapotranspiration, même en utilisant des transmissivités très élevées sans commune mesure avec celles déduites des pompages d'essai. En effet, si l'on considère que l'ordre de grandeur de la recharge des aquifères est réaliste selon les différentes méthodes d'estimation du chapitre 7.2, le seul écoulement souterrain n'est pas à même d'équilibrer d'une manière satisfaisante le bilan des aquifères.

Par contre, la prise en compte de l'évapotranspiration a permis de reconstituer de façon acceptable les principales caractéristiques de la piézométrie régionale (*figure 7.6*). Notamment, sont restitués correctement :

- le relief piézométrique correspondant aux aquifères fissurés de l'ouest et du sud,
- la ligne de partage des eaux entre les aquifères drainés par le Sénégal et par le Niger,
- le point le plus bas de la piézométrie du secteur de Kayes,
- la remontée de la nappe du Continental terminal/Quaternaire dans le delta intérieur,
- les dépressions piézométriques des aquifères du Continental intercalaire du fossé de Nara et de l'Azaouad, du Primaire de Taoudenni ainsi que de l'Infracambrien plissé du Gourma et du Gondo.

7.3.4. Bilan des aquifères

A partir du calage obtenu, le bilan global des aquifères du Mali calculé par le modèle s'établit comme suit :

ENTREES - Infiltration de la pluie	: 2.044,1 m ³ /sec	= 50,0 mm/an
- Infiltration eau de surface	: 52,0 "	= 1,0 mm/an
- Apports aux limites	: 1,3 "	= -
	<hr/>	<hr/>
Total Entrée	: 2.097,4 m ³ /sec	= 51,0 mm/an
SORTIES - Drainage par les rivières	: 287,0 m ³ /sec	= 7,0 mm/an
- Pertes par ETP	: 1.810,0 "	= 44,0 mm/an
- Sorties aux limites	: 0,4 "	= -
	<hr/>	<hr/>
Total Sorties	: 2.097,3 m ³ /sec	= 51,0 mm/an

Le bilan par aquifère est donné dans le tableau 7.10 et le bilan par unité hydrogéologique dans le tableau 7.11.

La recharge moyenne par infiltration de la pluie est d'environ 65 milliards de m³/an, équivalente à une lame d'eau de 50 mm/an; elle correspond à un coefficient d'infiltration moyen pour l'ensemble du Mali de l'ordre de 16 %.

La recharge des aquifères par les eaux de surface est d'environ 1,6 milliards de m³/an, sur la base des hypothèses retenues. Elle est probablement plus importante car les pertes du fleuve Niger à l'aval du delta intérieur n'ont pas été prises en compte.

Les apports et les sorties aux limites des frontières du Mali apparaissent comme négligeables en regard des autres termes du bilan.

Le drainage par le réseau hydrographique ne représente, en moyenne, que 14 % de la recharge des aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali par la pluie (30 % pour l'aquifère du socle, 11 % pour l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire et moins de 4 % pour l'aquifère du Cambrien).

Tableau 7.10 - Bilan par système aquifère (en m³/s)

N° et nom du système aquifère	ENTRÉES				SORTIES				BILAN
	Infiltr. pluie	Infiltr. eau surface	Apports aux limites	Total entrées	Drainage rivières	ETR	Pertes aux limites	Total sorties	Variations de stock
1 Continental terminal/Quat.	243,2	52,0	0	295,2	0	295,0	0,1	295,1	+0,1
2 Crétacé sup./ Eocène inf.	0,3	0	0,3	0,6	0	0,5	0,1	0,6	0,0
3 Cont. int./ Cont. terminal	0	0	0,4	0,4	0	0,7	0	0,7	-0,3
4 Continental intercalaire	0,1	0	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0,0
Total Aquifères généralisés	243,6	52	0,7	296,3	0	296,3	0,2	296,5	-0,2
5 Primaire de Taoudenni	0	0	0,4	0,4	0	0,4	0	0,4	0,0
6 Cambrien	234,0	0	0	234,0	8	225,8	0,1	233,9	+0,1
7 Infracambrien tabulaire	1.014,0	0	0,1	1.014,1	112,0	902,0	0	1.014,0	+0,1
8 Infracambrien plissé	0,2	0	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0,0
9a Socle Adrar	0,3	0	0	0,3	0	0,3	0	0,3	0,0
9b Socle soudanien	552,0	0	0,1	552,1	167,0	385,0	0,1	552,1	+0,0
Total Aquifères fissurés	1.800,5	0	0,6	1.801,1	287,0	1.513,7	0,2	1.800,9	+0,2
TOTAL MALI	2.044,1	52,0	1,3	2.097,4	287,0	1.810,0	0,4	2.097,4	0,0

Tableau 7.11 - Bilan par unité hydrogéologique

NOM ET NUMERO UNITE HYDROGEOLOGIQUE	NOMBRE MAILLES	TRANSMISSIVITE MOYENNE (m ² /s)	PLUIE MOYENNE (mm/an)	ENTREES				SORTIES				BILAN VARIATIONS DE STOCK (l/s)
				INFILTRATION PLUIE (l/s)	INFILTRATION EAU SURFACE (l/s)	APPORTS AUX LIMITES (l/s)	TOTAL ENTREES (l/s)	DRAINAGE PAR RIVIERES (l/s)	ETR (l/s)	PERTES AUX LIMITES (l/s)	TOTAL SORTIES (l/s)	
Fossé Gao 12	5	4.10 ⁻⁴	230	175	0	0	175	0	175	70	245	- 70
Azaouad sud 13	4	5.10 ⁻³	100	0	0	0	0	0	140	0	140	-140
Gourma NW 14	3	5.10 ⁻³	280	117.000	31.200	0	148.200	0	147.827	0	147.827	+373
Delta int.amont 15(1)	2	7.10 ⁻⁴	450	126.000	20.800	0	146.800	0	146.849	0	146.849	- 49
Delta int. aval 15	2	7.10 ⁻⁴	550	35	0	0	35	0	35	0	35	0
MOYENNE AQUIFERE 1	16		290	243.210	52.000	0	295.210	0	295.026	70	295.096	+114
Bordure Adrar 21.a	5	2.10 ⁻³	150	220	0	56	276	0	175	25	200	+ 76
Bordure Adrar 21.b/c	10	5.10 ⁻⁴	50	105	0	189	294	0	350	0	350	- 56
MOYENNE AQUIFERE 2	15		80	325	0	245	570	0	525	25	550	+ 20
Azaouad 31	15	1.10 ⁻²	50	0	0	356	356	0	525	0	525	-169
Fossé de Nara 32(2)	4	1.10 ⁻³	350	0	0	36	36	0	140	0	140	-104
MOYENNE AQUIFERE 3	19		110	0	0	392	392	0	665	0	665	-273
Tamesna 41	1	3.10 ⁻³	100	50	0	0	50	0	35	10	45	+ 5
Ebenachich 42	10	1.10 ⁻⁷	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MOYENNE AQUIFERE 4	11		30	50	0	0	50	0	35	10	45	+ 5
MOYENNE AQUIFERE 5	11	1.10 ⁻³	10	0	0	385	385	0	385	0	385	0
Ouagadou 61	2	2.10 ⁻⁴	520	58.000	0	0	58.000	0	57.957	29	57.986	+ 14
Kaarta 62	4	2.10 ⁻⁴	680	176.000	0	0	176.000	8.000	167.911	46	175.957	+ 43
MOYENNE AQUIFERE 6	6		625	234.000	0	0	234.000	8.000	225.868	75	233.943	+ 57
Pl. dogon 71	2	5.10 ⁻⁵	540	56.000	0	0	56.000	0	55.931	14	55.945	+ 55
San Koutiala 72	2	1.10 ⁻⁴	680	110.000	0	4	110.004	6.000	103.997	0	109.997	+ 7
Bani moyen 73	4	3.10 ⁻⁴	1.050	248.000	0	72	248.072	44.000	204.061	0	248.061	+ 11
Pl. manding. 74	4	4.10 ⁻⁴	700	176.000	0	0	176.000	0	176.008	0	176.008	- 8
Baoulé 75	3	3.10 ⁻⁴	900	168.000	0	0	168.000	18.000	149.949	0	167.949	+ 51
Bakoye 76	2	2.10 ⁻⁴	1.030	126.000	0	27	126.027	20.000	105.991	0	125.991	+ 36
Bafing 77	2	3.10 ⁻⁴	1.100	130.000	0	27	130.027	24.000	106.085	0	130.085	- 58
MOYENNE AQUIFERE 7	19		830	1.014.000	0	130	1.014.130	112.000	902.022	14	1.014.036	+ 94
Gourma (2) 82	4	1.10 ⁻³	350	140	0	0	140	0	140	0	140	0
Gondo 83	1	5.10 ⁻⁴	600	35	0	0	35	0	35	20	55	- 20
MOYENNE AQUIFERE 8	5		400	175	0	0	175	0	175	20	195	- 20
Adrar Iforas 91(3)	8	3.10 ⁻⁵	80	310	0	3	313	0	280	0	280	+ 33
Bagoé 92	2	4.10 ⁻⁵	1.250	140.000	0	4	140.004	56.000	84.006	0	140.006	- 2
Baoulé 93	2	4.10 ⁻⁵	1.250	138.000	0	1	138.001	56.000	81.998	0	137.998	+ 3
Sankarani 94	1	1.10 ⁻⁴	1.200	70.000	0	1	70.001	23.000	47.001	0	70.001	0
Kenéba 95	2	5.10 ⁻⁴	1.100	126.000	0	64	126.064	28.000	97.937	83	126.020	+ 44
Kayes 96	2	3.10 ⁻⁴	580	78.000	0	2	78.002	4.000	74.073	34	78.107	-105
MOY.AQUIFERE 9(hors 91)	9		1.050	552.000	0	72	552.072	167.000	385.015	117	552.132	- 60
TOTAL MAGI	119		300	2.044.070	52.000	1.227	2.097.297	287.000	1.809.996	331	2.097.327	- 30

(1) l'unité hydrogéologique du delta intérieur (15) a été scindée en deux parties : partie aval et partie amont.

(2) l'unité hydrogéologique de l'Infracambrien plissé de Goundam (81) a été intégrée à l'unité du fossé de Nara (32).

(3) l'unité hydrogéologique de l'Adrar des Iforas (91) a été distinguée car des conditions pluviométriques très différentes des autres unités de l'aquifère 9.

Les variations de réserves par aquifère, à l'échelle de temps du modèle, sont très faibles. Pour les aquifères généralisés, les apports réduits provenant des recharges locales et des transferts souterrains vers les zones à piézométrie déprimée seraient pratiquement compensés par les pertes par évapotranspiration profonde avec un très faible taux de renouvellement du stock d'eau fossile. Au contraire, pour les systèmes aquifères fissurés bénéficiant d'une recharge saisonnière, le temps de renouvellement des réserves dans les zones d'altérites et de fissuration active n'excède pas quelques années pour l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire et quelques dizaines d'années au plus pour l'aquifère du socle.

7.4. MODELES SECTORIELS DE SIMULATION

Trois modèles sectoriels de simulation ont été préparés avec pour objet de simuler, en régimes permanent et transitoire, des secteurs d'extension variable caractéristiques des conditions hydrogéologiques les plus fréquemment rencontrées dans les aquifères fissurés et généralisés du Mali. Le but était de vérifier la validité des hypothèses introduites dans le modèle global des aquifères du Mali, notamment en ce qui concerne l'évapotranspiration.

Les modèles ont aussi été préparés à partir du logiciel MHYDRO2D sur les mêmes bases que le modèle général du Mali notamment pour la simulation de l'évapotranspiration. Les résultats de ces modèles ont fait l'objet de plusieurs rapports techniques du projet MLI/84/005.

7.4.1. Secteur occidental du delta intérieur du Niger

7.4.1.1. Caractéristiques du modèle

La section modélisée couvre une partie de l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire avec une superficie de 15.400 km² entre les latitudes 14 et 15°N et les longitudes 4°42' et 6°O. Elle s'étend sur la zone de transition entre le delta actif et le delta fossile du fleuve Niger (*voir figure 4.12*) et inclut une partie des périmètres d'irrigation de l'Office du Niger. Le réseau maillé est constitué de 154 mailles carrées de 10 km de côté [HDG/NTL/17].

Deux valeurs de transmissivité ont été adoptées sur la base des données des pompages d'essai et de l'épaisseur des formations continentales saturées : $5 \cdot 10^{-4}$ m²/s pour la zone du delta fossile et $7 \cdot 10^{-4}$ m²/s dans le reste du secteur modélisé.

Les apports sont représentés par :

- l'infiltration de la pluie dans les secteurs où la surface piézométrique est située à moins de 30 m de profondeur,
- la percolation des eaux de surface pour les mailles de la bordure sud-est couvrant la zone d'inondation du delta intérieur,
- le retour des eaux d'irrigation sur les mailles de la bordure ouest où sont localisés les périmètres de l'Office du Niger et la zone de recharge du canal du Sahel.

Les sorties ne sont représentées que par l'évapotranspiration, les prélèvements par pompages étant négligeables.

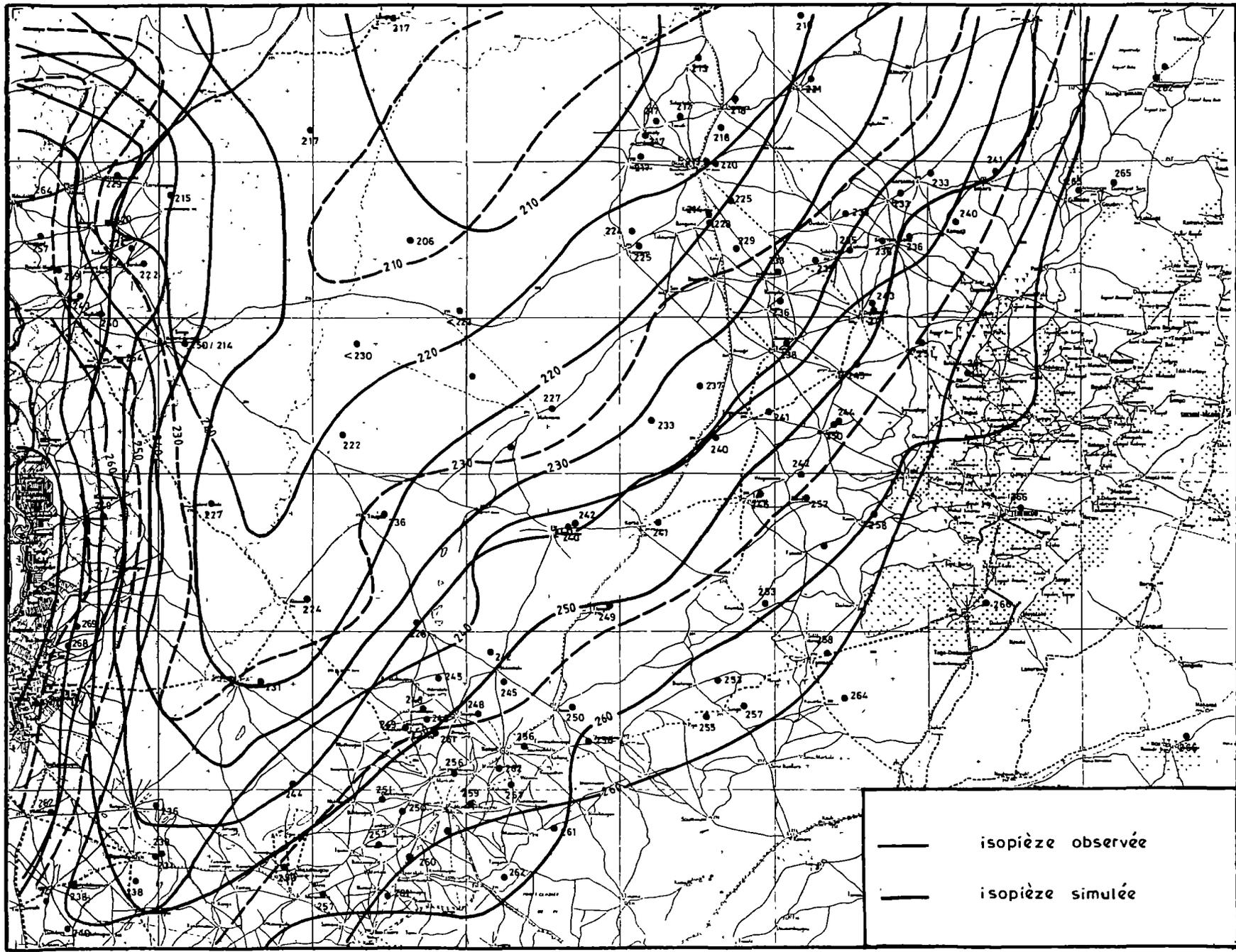


Fig. 7.7 _Modèle de simulation du secteur occidental du delta intérieur du Niger (piézométries observée et mesurée)

7.4.1.2. Simulation en régime permanent

Le calage du modèle a permis de reconstituer les principales caractéristiques piézométriques du secteur (*figure 7.7*), et notamment :

- la dépression piézométrique localisée dans le delta fossile,
- les niveaux d'eau peu profonds dans la zone d'inondation,
- la remontée locale du niveau des nappes à l'aplomb des périmètres d'irrigation.

Le bilan s'établit comme suit :

ENTREES :- Infiltration de la pluie	:	19.102 l/s	=	39.7 mm/an
- Infiltration eau de surface (y compris eau d'irrigation)	:	3.382 l/s	=	6.3 mm/an
Total Entrées	:	22.484 l/s	=	46,0 mm/an
SORTIES :- ETP par liaison	:	22.354 l/s	=	45.7 mm/an
- ETP profonde	:	130 l/s	=	0.3 mm/an
Total Sorties	:	22.484 l/s	=	46.0 mm/an

7.4.1.3. Simulation en régime transitoire

Un coefficient d'emménagement unique de 8 % a été affecté à toutes les mailles du modèle, valeur correspondant au meilleur ajustement obtenu avec les fluctuations du niveau piézométrique mesurées.

a) Simulation pour une année d'hydraulicité moyenne

Elle restitue d'une manière satisfaisante les fluctuations saisonnières de niveau qui sont proches de celles qui ont été mesurées avec une décroissance d'amplitude pour des distances croissantes par rapport à la zone lacustre.

b) Simulation pour 10 années de forte hydraulicité

L'extension du domaine lacustre durant les années humides a été simulée par l'introduction d'une recharge par les eaux de surface dans 10 mailles supplémentaires (augmentation des apports de 2,6 m³/s) dans la zone sud-est du modèle. Seules ces 10 mailles enregistrent, la première année une remontée de niveau de 20 cm, celui-ci restant stable les années suivantes.

c) Simulation de 10 années d'exploitation

Des débits d'exploitation continus de 280 l/s ont été imposés dans 4 mailles représentatives du delta vif, de la zone de transition et du delta fossile. Les niveaux s'abaissent avec des rabattements pouvant atteindre 10 m dans les mailles dépourvues de recharge (les niveaux dynamiques se situeraient alors dans le substratum infracambrien). Le rabattement est par contre négligeable dans les mailles bénéficiant d'une recharge

par les eaux de surface (0,20 m) et se stabilise après la première année d'exploitation. Cette évolution confirme les faibles vitesses de transfert souterrain entre la zone du delta vif et celle du delta fossile, ce que laissaient déjà supposer les forts gradients hydrauliques observés dans la zone de transition et l'origine ancienne des eaux mesurée dans les analyses isotopiques.

7.4.2. Secteur de San

7.4.2.1. Caractéristiques du modèle

Le modèle a été préparé dans le cadre d'une étude pour l'adduction d'eau de la ville de San [HDG/RGL/10 et 11]. Il couvre une superficie de 869 km² et s'étend sur un secteur de la bordure méridionale du delta intérieur et de la plaine alluviale du Bani et de son affluent le Banifing. Sa partie sud est occupée par des collines de grès infracambriens qui constituent aussi le substratum des formations alluviales mais avec des faciès plus schisteux. Les alluvions sont épaisses d'une trentaine de mètres [HDG/HGR/15].

Le lit du Bani est perché au-dessus de la surface piézométrique des aquifères tant alluvial que fissuré et cette surface s'approfondit progressivement du sud vers le nord.

Les conditions géomorphologiques locales favorisent une recharge des aquifères dans la plaine alluviale par les eaux de surface issues du ruissellement sur les collines gréseuses ainsi que par les eaux de crue du Bani. Des infiltrations se produisent également dans une zone de périmètres irrigués.

Le modèle comporte 54 mailles carrées de 4 km de côté (*figure 7.8*). Les limites occidentale et orientale correspondent approximativement à des lignes de courant de la surface piézométrique tandis que les limites septentrionale et méridionale sont schématiquement axées sur des anomalies piézométriques (axe des dépressions). Les transmissivités, définies à partir des pompages d'essai et du débit des forages, varient entre 1.10^{-3} et 1.10^{-5} m²/s pour l'aquifère fissuré infracambrien et entre 1.10^{-2} et 1.10^{-3} m²/s pour les alluvions sableuses et silto-sableuses.

Les apports sont représentés d'une part par l'infiltration directe de la pluie dans les mailles où la surface piézométrique est située à moins de 20 m de profondeur, d'autre part par l'infiltration des eaux de surface et des eaux d'irrigation.

L'évapotranspiration a été considérée comme le seul mode de vidange des aquifères, l'exploitation actuelle étant très faible par rapport aux autres termes du bilan.

7.4.2.2. Simulation en régime permanent

Des simulations préliminaires sans introduire l'évapotranspiration n'ont pas permis le calage du modèle même en réduisant considérablement l'infiltration et en augmentant fortement les transmissivités. Après l'introduction de l'évapotranspiration, le modèle a restitué la piézométrie mesurée d'une manière satisfaisante, faisant notamment apparaître la remontée de la surface piézométrique dans la plaine alluviale en rive droite du Bani et son approfondissement en rive gauche où s'amorce une dépression piézométrique (*Figure 7.8*).

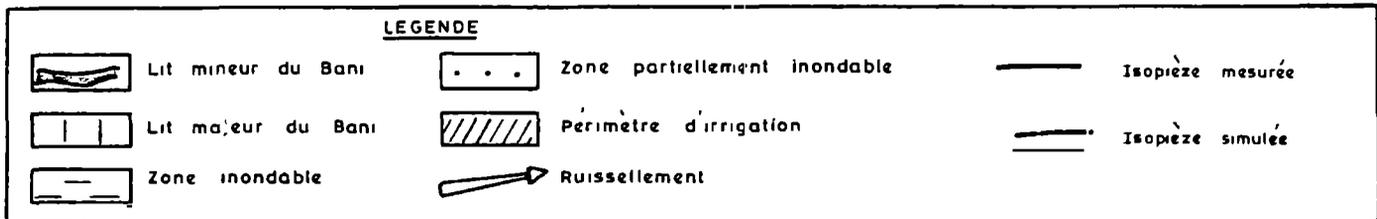
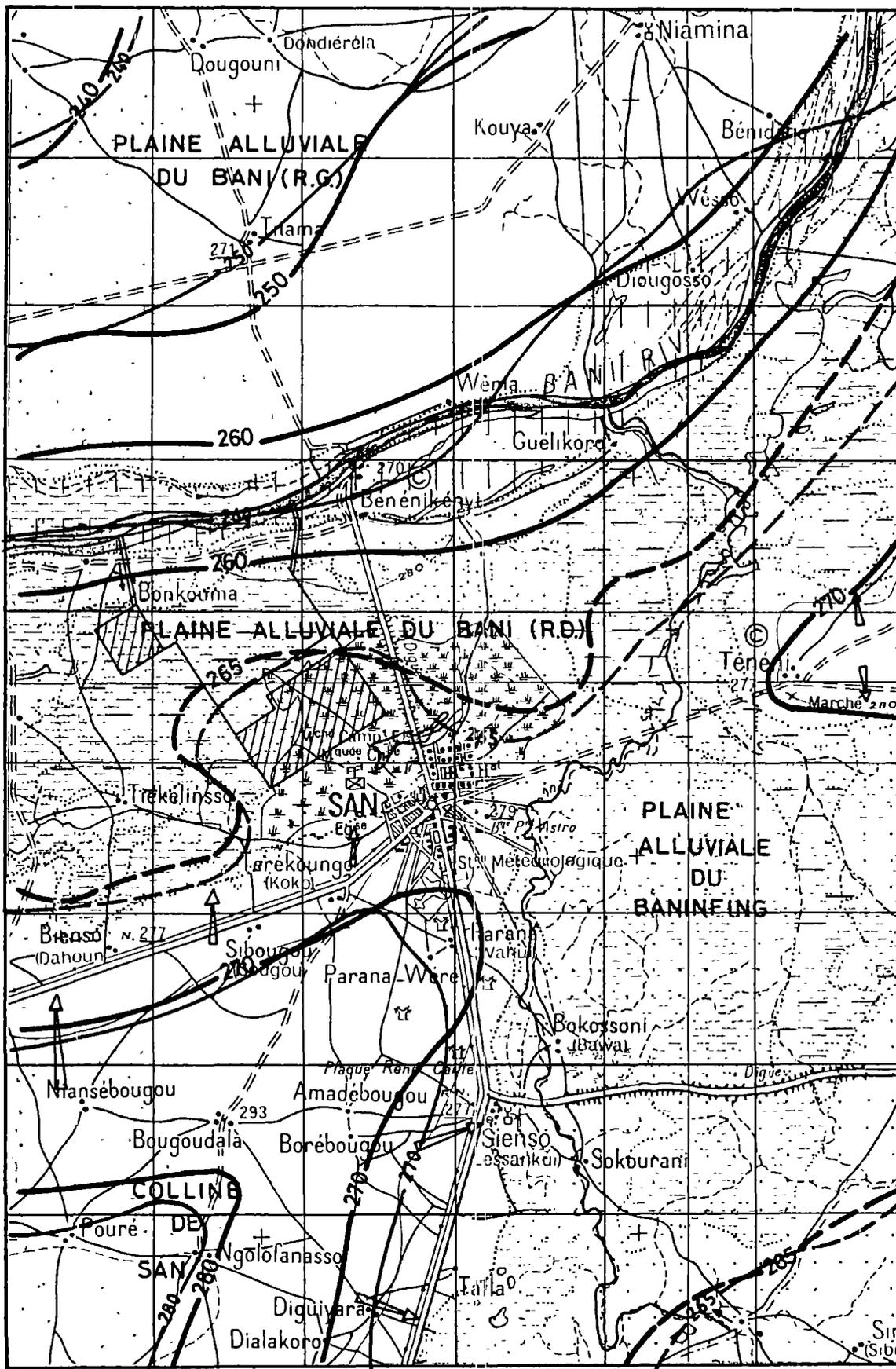


Fig.7.8 _ Modèle de simulation du secteur de San.
(Piézométries observée et simulée)

ENTREES - Infiltration directe	:	1.369,8 l/s	=	50,0 mm/an
- Infiltration eaux de surface	:	199,8 l/s	=	7,3 mm/an
- Infiltration eaux d'irrigation:		60,2 l/s	=	2,2 mm/an
		<hr/>		<hr/>
Total Entrées		1.629,8 l/s	=	59,5 mm/an
SORTIES - Evapotranspiration	:	1.629,8 l/s	=	59,5 mm/an
Total Sorties	:	1.629,8 l/s	=	59,5 mm/an

7.4.2.3. Simulation en régime transitoire

Trois valeurs uniformes de coefficient d'emmagasinement ont été utilisées : 3 % pour les alluvions, 1 % pour les grès fissurés et altérés et 0,5 % pour les schistes.

La simulation a été faite avec des apports caractéristiques d'année moyenne et des infiltrations provenant des eaux d'irrigation et représentant 20 % des volumes utilisés. Les fluctuations saisonnières dans les différents secteurs du modèle ont pu ainsi être reproduites avec :

- des amplitudes de 4 à 5 m dans le secteur d'aquifère fissuré à surface piézométrique peu profonde des collines gréseuses,
- des amplitudes de 1,5 à 3,5 m dans la plaine alluviale avec une remontée précoce des niveaux liée à l'infiltration des eaux d'irrigation,
- des amplitudes faibles ou nulles dans les alluvions en rive gauche du Bani à piézométrie déprimée.

7.4.3. Secteur de Nossombougou

7.4.3.1. Caractéristiques du modèle

Le secteur étudié couvre 144 km² et intéresse l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire du plateau mandingue. Il est équipé d'un réseau local de suivi piézométrique (site de Nossombougou). La profondeur des niveaux piézométriques est faible, entre 5 et 10 m, et les marigots drainent ou rechargent la nappe suivant les cycles pluviométriques. Ce secteur est caractéristique des conditions locales rencontrées dans les plateaux gréseux soudano-sahéliens [HDG/NTL/4].

Le modèle comporte 72 mailles rectangulaires de 1x2 km (*figure 7.9a*). Les limites correspondent à des lignes de défluence de l'écoulement souterrain à l'exception de la limite nord (sorties de la nappe). Deux zones de transmissivité ont été définies :

- $3 \cdot 10^{-3}$ m²/s dans les vallées à piézométrie peu profonde où l'aquifère de fissures est surmonté par des altérites sableuses en partie saturées,
- $5 \cdot 10^{-5}$ m²/s pour les mailles de bordure où l'aquifère est constitué exclusivement par le milieu fissuré.

Les entrées sont représentées par la pluie et les sorties par l'évapotranspiration et par le drainage souterrain et superficiel vers l'aval du secteur.

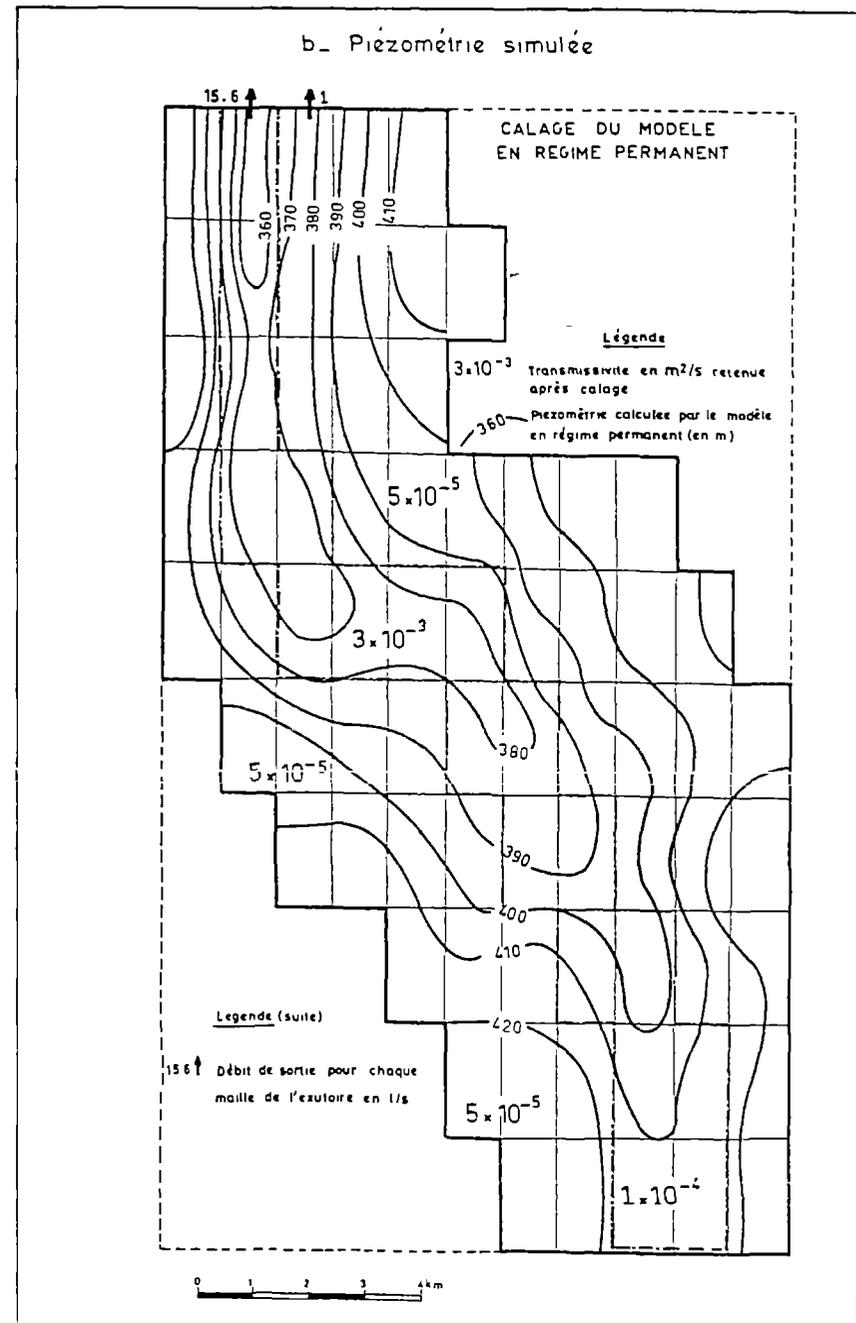
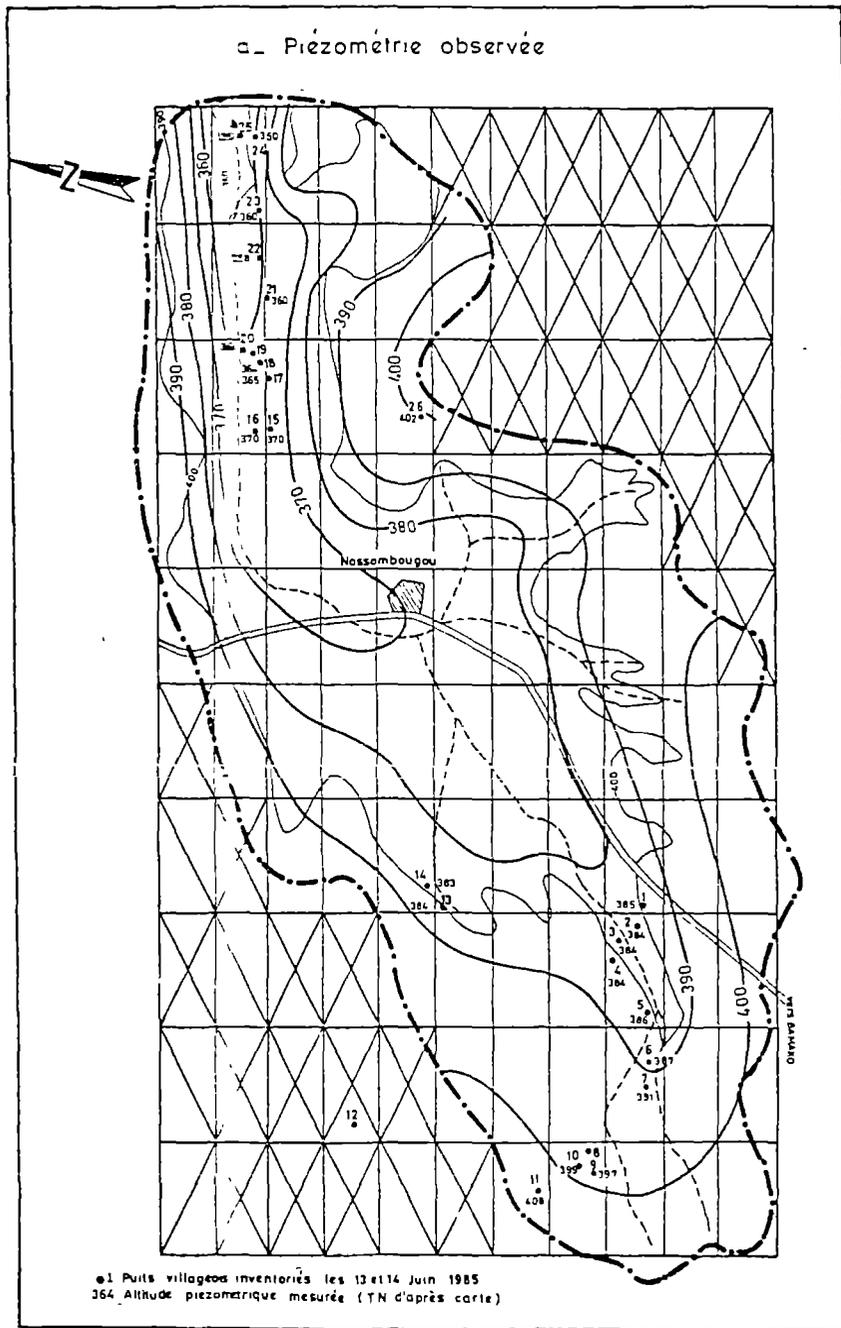


Fig 7.9 _Modèle de simulation du secteur de Nossombougou

7.4.3.2. Simulation en régime permanent

Comme pour les autres secteurs, le calage n'a pu être obtenu qu'avec la prise en compte de l'évapotranspiration. La piézométrie restituée présente un aspect comparable à la piézométrie mesurée (figure 7.9b).

ENTREES -Infiltration de la pluie	:	615,74 l/s	=	139 mm/an
		<hr/>		<hr/>
Total Entrées	:	615,74 l/s	=	139 mm/an
SORTIES -Evapotranspiration	:	599,08 l/s	=	135 mm/an
-Drainage	:	16,66 l/s	=	4 mm/an
		<hr/>		<hr/>
Total Sorties	:	615,74 l/s	=	139 mm/an

7.4.3.3. Simulation en régime transitoire

Elle a été faite avec une infiltration correspondant à une pluviométrie d'année moyenne et des coefficients d'emmagasinement variant entre 2 et 3,3 %. Des prélèvements de 10 l/s ont été simulés sur 4 mailles simultanément et en continu pendant 577 jours.

Seules les zones très proches des sites de pompage sont légèrement affectées avec des rabattements vite stabilisés et très inférieurs à l'amplitude des fluctuations saisonnières. Dans les mailles sans exploitation, la piézométrie reste inchangée.

7.4.4. Récapitulation des simulations sur modèles

Deux autres modèles régionaux ont été préparés [HDG/NTL/17]. Le premier concerne la zone de Tombouctou et couvre un secteur de l'aquifère du Continental terminal de l'Azaouad sud et de l'aquifère de l'Infracambrien plissé du Gourma. Il inclut une recharge par les eaux de crue dans la frange de plaines alluviales bordant le fleuve Niger. Le second représente un secteur de l'aquifère du socle dans la zone de Bougouni caractéristique du drainage des aquifères fissurés par le réseau hydrographique.

Tableau 7.12 - Récapitulation des caractéristiques des modèles de simulation et des bilans calculés

MODELE	GENERAL	DELTA INTERIEUR	AZAOUAD-GOURMA	SOCLE DE BOUGOUNI	NOSSOMBOUGOU	SAN
Zone Climatique Pluviométrie moyenne	-	Soudano-sahél. 540	Sahélienne 80	Soudanienne 1.180	Soudano-sahél. 930	Soudano-sahél. 730
Aquifère	-	Cont. term./ Quaternaire	Cont.term/Quat Infrac. plissé	Socle	Infrac. tabul.	Infrac. tabul.
Relation Eau souterraine Eau de surface	-	Recharge	Recharge	Drainage	Drainage/Rech.	Recharge
Nombre mailles	118	154	104	127	72	54
Dimension maille (km)	105 X 105	10 X 10	8 X 20	8 X 8	1 X 2	4 X 4

Tableau 7.12 - (Suite)

MODELE	GENERAL	DELTA INTERIEUR	AZAOUAD-GOURMA	SOCLE DE BOUGOUNI	NOSSOMBOUGOU	SAN
BILAN						
ENTREE						
Infiltration pluie	50 mm/an	39.7 mm/an	1.0 mm/an	150 mm/an	139 mm/an	50,0 mm/an
Infiltration Eau surf.	1 mm/an	6.3 mm/an	12,0 mm/an	-	-	9.5 mm/an
SORTIE						
Evapotranspiration	44 mm/an	46,0 mm/an	13.0 mm/an	89 mm/an	135 mm/an	59.5 mm/an
Drainage	7 mm/an	-	-	61 mm/an	4 mm/an	-

Dans tous les modèles préparés, à grande comme à petite échelle, l'introduction de l'évapotranspiration a été la seule solution permettant d'équilibrer les bilans et de restituer les grandes lignes du modèle piézométrique et l'amplitude des fluctuations saisonnières du niveau piézométrique observées. Les essais de calage en supprimant l'évapotranspiration, même en réduisant fortement la recharge et en augmentant les transmissivités jusqu'à des valeurs sans commune mesure avec celles déterminées à partir des pompages d'essai, ont échoué. L'hypothèse de transferts massifs par écoulement profond n'est pas envisageable en l'absence évidente d'exutoire au Mali et dans les pays limitrophes, en raison également de la réduction de la fissuration en profondeur et de l'âge ancien des eaux au-dessous de 40 m de profondeur dans les aquifères généralisés comme dans la majorité des secteurs d'aquifères fissurés. Une forte réduction de la recharge est par ailleurs incompatible avec l'amplitude des fluctuations piézométriques observées. Des études expérimentales et théoriques devraient permettre de vérifier l'importance de cette évapotranspiration profonde et de mieux la quantifier (voir chapitre 9).

7.5. RESSOURCES EXPLOITABLES

Les ressources en eau estimées pour les différents aquifères du Mali ne peuvent être que partiellement exploitées. En effet, l'exploitation des eaux souterraines peut être limitée par :

- la qualité de l'eau,
- les conditions hydrogéologiques locales,
- les contraintes économiques.

7.5.1. Qualité de l'eau

En moyenne, les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du Mali permettent leur utilisation sans précaution ou traitement particuliers. Cependant, des problèmes de pollution locale peuvent exister, notamment dans les puits. Dans certains secteurs d'aquifère fissurés, les eaux sont corrosives (*voir chapitre 6*). Des eaux de médiocre ou de mauvaise qualité se rencontrent dans certains secteurs d'aquifères généralisés et fissurés des zones désertiques de l'est et du nord du Mali; elles représentent environ 20 % des réserves en eau souterraine, mais une fraction infime des ressources renouvelables et sont de plus localisées dans des régions où les possibilités de mise en valeur sont limitées par d'autres facteurs.

7.5.2. Conditions hydrogéologiques

Elles sont surtout importantes pour les aquifères fissurés et liées à la nature semi-continue ou discontinue de ces aquifères et à leur fonctionnement hydraulique complexe.

Les ressources renouvelables ne sont pas en effet intégralement récupérables par pompage car une fraction, plus ou moins importante selon les conditions hydrogéologiques locales, peut être soit drainée par le réseau hydrographique, ou par un écoulement souterrain, soit reprise par évapotranspiration.

L'exploitation par pompage, grâce aux rabattements qu'elle provoque, réduira ces sorties naturelles sans toutefois les annuler. En première estimation et à défaut de données expérimentales, on peut raisonnablement considérer que la recharge calculée est récupérable au moins à 50 % par pompage.

La forte hétérogénéité des aquifères fissurés et l'existence de discontinuités étanches ou peu perméables compartimentant les zones aquifères peuvent faire varier considérablement la taille des zones influencées par les pompages. Les ressources mobilisables ponctuellement peuvent être de ce fait très différentes des ressources estimées pour une unité hydrogéologique. Des fourchettes de débits exploitables ponctuellement ont été établies sur la base des données de forage, des conditions hydrogéologiques et des suivis piézométriques. Ainsi, cinq critères ont été retenus :

- le taux de réussite en forages productifs,
- la densité des intrusions doléritiques,
- l'extension des aquifères superficiels,
- les relations hydrauliques entre l'aquifère superficiel et l'aquifère fissuré,
- la réaction des nappes à l'exploitation actuelle.

Tableau 7.13 - Débits exploitables ponctuellement dans les aquifères fissurés à ressources renouvelables

Aquifère	Zone influencée par pompage (km ²)	Recharge utile unitaire (10 ³ m ³ /an/km ²)	DEBIT EXPLOITABLE	
			en 10 ³ m ³ /an	en m ³ /j
Cambrien	0,3 - 3	15 - 50	4,5 - 150	12 - 410
Infracambrien tabulaire	0,3 - 10	30 - 70	9,5 - 700	25 - 1900
Socle	0,3 - 3	40 - 90	12,0 - 270	33 - 740

L'aquifère de l'Infracambrien tabulaire est le plus favorable pour le développement de l'exploitation des eaux souterraines. Il le doit à sa lithologie, à la densité des réseaux de fissuration et à la facilité des transferts hydrauliques entre l'aquifère des altérites et le milieu fissuré. C'est d'ailleurs l'aquifère qui supporte actuellement les exploitations ponctuelles les plus importantes sans aucun signe d'épuisement (*voir chapitre 4*). La mobilisation du potentiel en eau des aquifères fissurés ne peut toutefois se faire le plus souvent que par des forages dispersés en raison du compartimentage de ce type d'aquifère.

Dans les aquifères généralisés et multicouches, l'extension des horizons aquifères et leurs relations hydrauliques permettent des exploitations concentrées avec des débits par forage ou par batteries de forages pouvant aller de quelques dizaines de m³/h à plusieurs centaines de m³/h dans les zones les plus perméables rechargées par les eaux de surface. Les cônes de rabattement sont en général très étendus ce qui limite considérablement l'influence des pompages sur l'abaissement de la nappe.

7.5.3. Contraintes économiques

Les coûts d'exhaure étant proportionnels à la profondeur des niveaux dynamiques et au débit correspondant, la baisse des niveaux piézométriques en régime d'exploitation peut affecter la rentabilité des projets de développement.

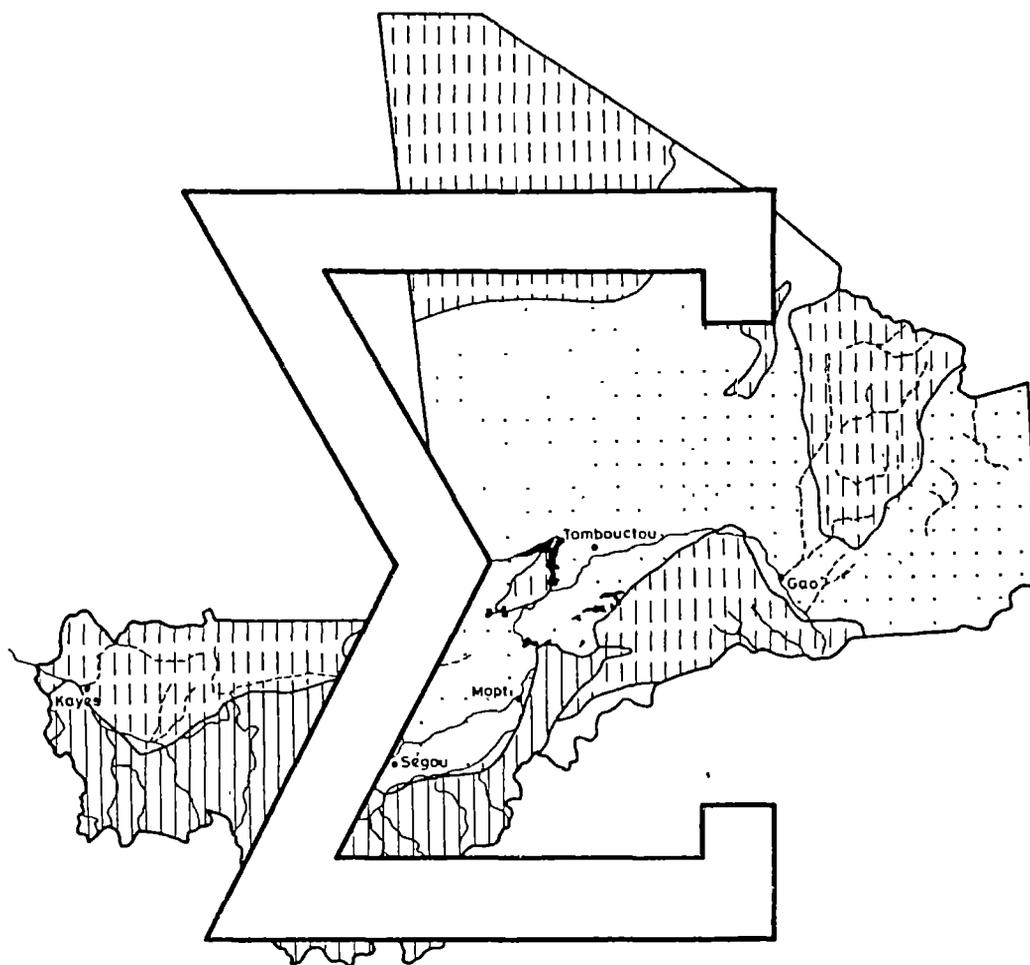
L'exploitation dans les aquifères fissurés doit être, en général, limitée à la fraction des ressources renouvelables exploitables localement. Les réserves ne doivent être mises à contribution que temporairement pour compenser les recharges déficitaires des périodes d'années sèches. Une exploitation systématique des réserves conduirait à des coûts d'exhaure croissants avec des risques de dénoyage de l'aquifère étant donnée l'incertitude actuelle sur la capacité réelle d'emmagasinement du milieu fissuré.

Une exploitation intensive des aquifères généralisés s'accompagnera d'une baisse permanente et continue des niveaux piézométriques sauf dans les secteurs rechargés par les eaux de surface, mais l'augmentation des coûts de pompage ne sera significative qu'à long terme et pour des débits d'exploitation de plusieurs centaines de m³/h. Sur la base des caractéristiques hydrauliques déterminées par les pompages d'essai, l'exploitation ponctuelle des réserves de ces aquifères pourraient se faire à des débits variant entre 40 et 400 m³/h selon les valeurs minimum et maximum des transmissivités et des coefficients d'emménagement et en admettant des rabattements maximum de 30 m au bout de dix années d'exploitation continue.

CHAPITRE 7

Références bibliographiques hors projet

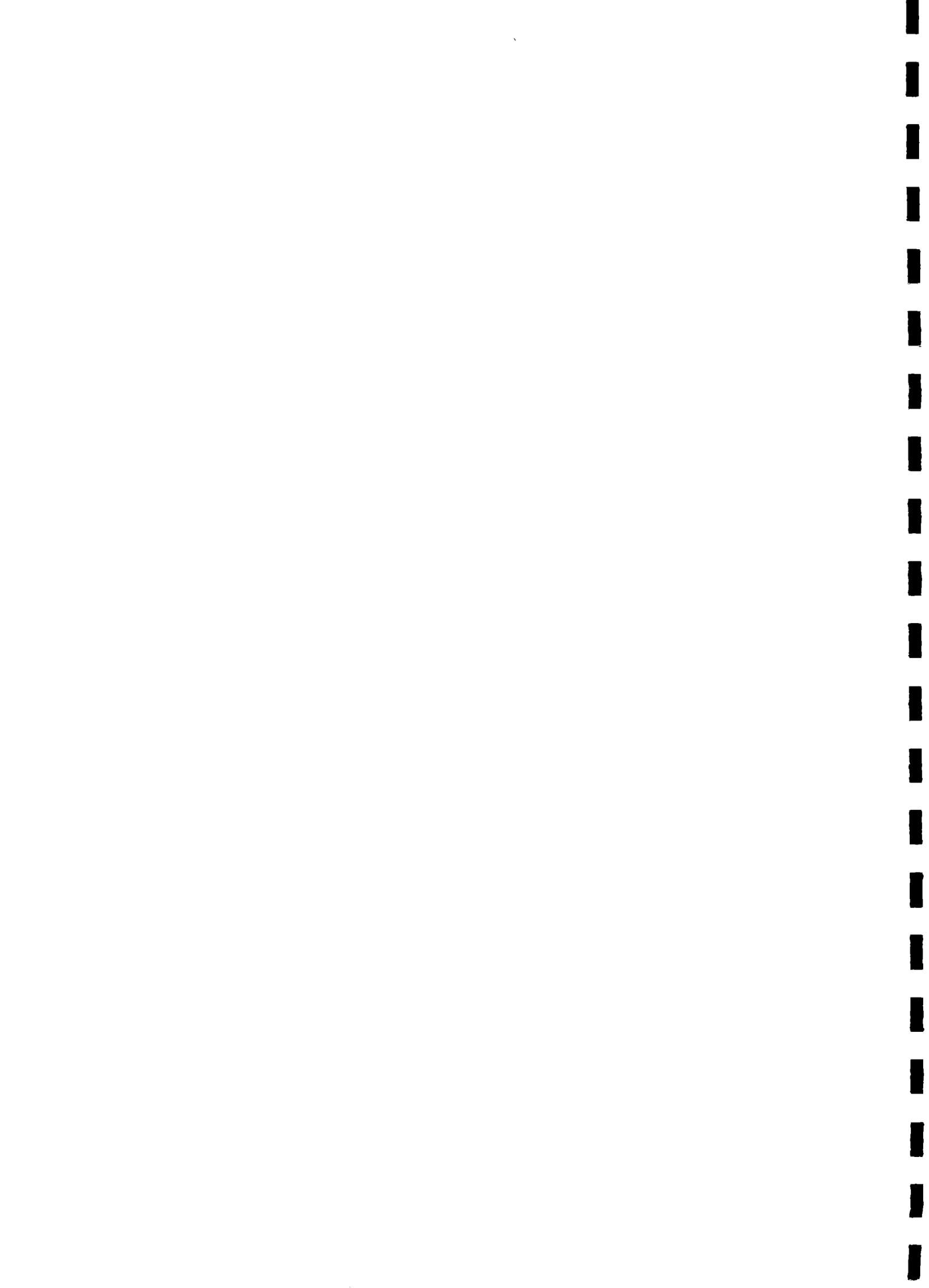
- [7.1] - DEGALLIER R. - Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains : le modèle SIMERO - 1972
- [7.2] - BRGM - Etude de la série piézométrique de Tioribougou (Mali) par le modèle global pluie-niveau GARDENIA - Note provisoire - 1986.



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 8

EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES



CHAPITRE 8

TABLE DES MATIERES

TEXTE

8.1. OUVRAGES D'EXPLOITATION.....	1
8.1.1. Points d'eau traditionnels.....	1
8.1.2. Points d'eau modernes.....	2
8.2. MOYENS D'EXHAURE.....	6
8.2.1. Exhaure traditionnelle.....	6
8.2.2. Exhaure moderne.....	6
8.3. EXPLOITATION ACTUELLE ET UTILISATION DES EAUX.....	9
8.3.1. Méthodes d'estimation.....	9
8.3.1.1. Consommation humaine et usages domestiques.....	9
8.3.1.2. Elevage.....	10
8.3.1.3. Irrigation.....	11
8.3.1.4. Usages industriels.....	11
8.3.2. Volumes exploités.....	11
8.3.3. Couverture des besoins en eau potable.....	14
8.3.3.1. Couverture actuelle en milieu rural.....	14
8.3.3.2. Couverture à moyen terme.....	14
8.3.3.3. Coût de l'eau suivant les systèmes d'alimentation en milieu rural.....	17
8.3.4. Activités de développement à partir des eaux souterraines.....	19
8.3.4.1. Elevage.....	19
8.3.4.2. Irrigation.....	19
8.3.4.3. Usages industriels.....	20
8.4. CONDITIONS D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	21
8.4.1. Accessibilité.....	21
8.4.2. Exploitabilité.....	23
8.4.3. Pérennité	25
8.4.4. Qualité	25
8.4.5. Potentialité	27
8.4.6. Implantation des forages d'exploitation.....	27
8.4.6.1. Aquifères fissurés.....	27
8.4.6.2. Aquifères généralisés.....	29
BIBLIOGRAPHIE.....	30

FIGURES

Fig.8.1. Historique du développement des travaux de forage.....	4
Fig.8.2. Objectifs et sources de financement des projets d'hydraulique en pourcentage de forages réalisés.....	4
Fig.8.3. Nombre de pompes installées.....	7
Fig.8.4. Répartition des pompes par marque et par Région.....	7
Fig.8.5. Exploitation estimée pour 1989.....	13
Fig.8.6. Répartition de l'exploitation actuelle estimée des eaux souter- raines par aquifère.....	13

Fig.8.7.	Taux de couverture des besoins en eau potable en 1989.....	16
Fig.8.8.	Besoins en eau villageois à l'horizon 2001.....	16
Fig.8.9.	Accessibilité.....	22
Fig.8.10.	Exploitableté.....	22
Fig.8.11.	Pérennité.....	24
Fig.8.12.	Qualité.....	24
Fig.8.13.	Potentialité des ressources en eau souterraine.....	26
Fig.8.14.	Carte hydrogéologique du Mali : Feuille de BANAMBA.....	28

TABLEAUX

Tab.8.1.	Exploitation des eaux souterraines estimée pour 1989, par aquifère et selon l'usage.....	12
Tab.8.2.	Situation actuelle de l'approvisionnement en eau du milieu rural, par Région.....	15
Tab.8.3.	Coûts moyens de l'eau selon différents systèmes d'alimentation en eau et en fonction de la taille des localités.....	18

CHAPITRE 8

EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

8.1. OUVRAGES D'EXPLOITATION

Les eaux souterraines sont depuis toujours exploitées au Mali pour satisfaire l'essentiel des besoins en eau des populations et du cheptel. Les eaux de surface sont en effet pour la plupart non pérennes ou, lorsqu'elles sont permanentes, trop localisées et irrégulièrement réparties. De ce fait, elles ne peuvent couvrir les besoins des populations rurales et des éleveurs nomades que durant une partie de l'année. La sécheresse qui a sévi au Mali depuis le début des années 1970, avec la baisse des niveaux phréatiques qu'elle a provoquée, a entraîné le tarissement de plus en plus précoce des points d'eau traditionnels constitués par les marigots et mares, temporaires dans leur grande majorité, et par des puits peu profonds exploitant les aquifères superficiels. Cette situation de pénurie a eu pour conséquence un développement spectaculaire de la construction de points d'eau modernes captant les aquifères profonds dont l'exploitation est beaucoup moins dépendante des aléas climatiques.

8.1.1. Points d'eau traditionnels

En milieu sédentaire, ils sont constitués par les puits villageois et de concession généralement utilisés pour la consommation humaine et les usages domestiques tandis que les puisards situés à proximité des villages servent plutôt au jardinage, à l'abreuvement du bétail et à la fabrication du banco.

Dans les régions sahéliennes et subdésertiques où l'élevage domine, les points d'eau traditionnels, beaucoup moins nombreux, sont essentiellement des puits, souvent profonds.

Ces ouvrages traditionnels extrêmement nombreux n'ont pas fait l'objet d'un inventaire systématique en dehors des quelques secteurs d'extension limitée inventoriés pour la préparation de projets d'hydraulique villageoise ou pour des études de reconnaissance hydrogéologique (aquifères généralisés des régions désertiques notamment). Leur nombre doit être de l'ordre de la centaine de milliers d'ouvrages si on y inclut les puits de concession dans les centres ruraux et urbains ainsi que les puisards.

a) Puits villageois et de concession

Ce sont des ouvrages profonds de 5 à 15 m en général, foncés dans des formations peu ou non consolidées : couverture d'altérites ou alluvions des plaines d'inondation et des fonds de vallée. Ils sont de construction rudimentaire avec parfois un soutènement sommaire en tête de l'ouvrage. Les parois, non étayées, s'effondrent fréquemment, ce qui nécessite le curage périodique de ce type d'ouvrage. Les hauteurs d'eau captées sont le plus souvent faibles, aussi le volume journalier disponible décroît-il fortement durant la saison sèche. Ils ont été pour la plupart régulièrement approfondis lorsque les niveaux phréatiques se sont abaissés durant la sécheresse, et beaucoup ont dû être abandonnés lorsque le niveau a atteint le substratum rocheux impossible à creuser avec les moyens traditionnels des puisatiers villageois.

b) Puisards

Creusés sans soutènement dans les dépôts fins des fonds de vallée et dans les mares après leur assèchement, les puisards ont une profondeur de quelques mètres seulement. De par leur position topographique, ils exploitent les aquifères superficiels caractérisés par des niveaux d'eau très peu profonds ou même subaffleurants durant l'hivernage dans certains secteurs. Le faible débit unitaire dû à la mauvaise perméabilité de ces dépôts alluviaux essentiellement argileux et la facilité de construction de ces ouvrages font que leur nombre peut être très élevé sur un même site, d'autant plus qu'ils doivent, pour la majorité d'entre eux, être recreusés en début de chaque saison sèche.

c) Puits pastoraux

Ils sont estimés à près d'un millier localisés dans les régions sahéliennes et sahariennes du nord et de l'est du Mali. Ce sont des ouvrages profonds de 40 à 50 m en moyenne avec des diamètres de 1,20 m à plus de 2 m. Creusés dans des dépôts argilo-sableux (aquifères du Continental terminal et intercalaire) ou dans des formations à dominante schisteuse (aquifère du Cambrien de la région de Nioro-Nara et de l'Infracambrien du Gourma), ils sont très rarement étayés et leur margelle est constituée par les déblais accumulés autour de l'ouverture du puits. Ils doivent être périodiquement recreusés à cause de l'ensablement à partir de la surface et des éboulements à hauteur du captage ce qui crée souvent, à ce niveau, de véritables cavernes pouvant provoquer un effondrement total du puits. Les hauteurs d'eau n'excèdent que rarement un mètre faute de moyens pour épuiser les venues d'eau et creuser ainsi plus bas.

8.1.2. Points d'eau modernes

Ils sont représentés par les forages et les puits cuvelés et busés de différents types. Ils ont l'avantage, par rapport aux points d'eau traditionnels, de capter les aquifères sur une plus grande hauteur ce qui leur permet de fournir des débits plus élevés et d'être en partie affranchis des variations saisonnières et interannuelles des niveaux d'eau. Dans leur grand majorité, ils exploitent les systèmes aquifères profonds qui de ce fait sont généralement mieux protégés de la pollution.

a) Puits modernes

Exécutés avec des équipements mécanisés permettant le fonçage dans les roches dures et dans la zone saturée, ils sont creusés jusqu'à une profondeur suffisante pour disposer d'une hauteur d'eau de 3 à 5 m en moyenne. Les parois sont soutenues par un cuvelage généralement en béton armé dans la zone stérile et par des buses crépinées dans la zone de captage. Les diamètres intérieurs les plus courants sont de 1,80 m pour le cuvelage et de 1,40 m pour le captage. Des tôles de type Aramco boulonnées sont parfois utilisées pour le soutènement des ouvrages (Puits ACORD).

Lorsque le captage se fait uniquement dans des formations non consolidées, des dalles sont mises en place à la base de la colonne de captage pour éviter la remontée de fines par le fond. Les superstructures comportent généralement une margelle circulaire de hauteur variable en ciment et une aire de protection en béton autour du puits.

Différents types de puits sont réalisés selon leur finalité et les conditions hydrogéologiques locales :

- * Puits direct : ce type d'ouvrage est le plus fréquemment réalisé pour l'exploitation des aquifères libres notamment lorsque des terrains de bonne perméabilité se rencontrent dans les premiers mètres de la zone saturée, sous le niveau statique.
- * Puits citerne : creusé à proximité ou sur l'axe d'un forage productif, il lui est connecté par l'intermédiaire d'une prise de dérivation positionnée à 3-5 mètres sous le niveau statique. De cette manière, le forage débite dans le puits qui, étant entièrement cuvelé, fait donc fonction de citerne. Ce type d'ouvrage est réalisé lorsqu'il s'agit d'aquifères à horizons perméables profonds en charge (plus de 50 m) dont le niveau piézométrique remonte à une profondeur moindre, accessible par puits. C'est la solution généralement retenue au Mali depuis quelques années pour l'exploitation des aquifères à piézométrie déprimée des régions sahéliennes et désertiques essentiellement pastorales bien qu'elle soit onéreuse du point de vue investissements puisqu'elle cumule les coûts du forage et du puits.
- * Puits foré : ce type d'ouvrage est exécuté par havage au moyen d'un atelier de forage spécialement équipé pour forer dans des diamètres de 0,80 à 1,40 m ou plus dans des terrains faiblement consolidés ou dans des roches moyennement compactes. Cette technique cumule les avantages du forage par sa rapidité d'exécution et du puits par ses grands diamètres. Un seul projet a mis en oeuvre cette technique dans la Région de Gao pour l'exploitation de l'aquifère du Continental terminal, mais a enregistré des résultats plutôt décevants, liés surtout à un défaut de maîtrise technologique.
- * Puits maraîchers : ce type d'ouvrage est une variante du puits direct dont il se distingue par sa faible profondeur puisqu'il exploite les nappes alluviales à niveau phréatique peu profond. Il est équipé d'un cuvelage et de buses filtrantes. Sa faible profondeur ne lui permet d'exploiter l'aquifère alluvial que sur quelques mètres seulement, la hauteur d'eau disponible se réduisant rapidement durant la saison sèche en raison de la baisse importante du niveau qui se produit toujours dans ce type d'aquifère réalimenté seulement par les crues d'hivernage.

b) Forages

Le développement spectaculaire des forages hydrauliques au Mali surtout depuis 1980 (12.7751 forages recensés au 31/12/1988) est dû essentiellement à la pénurie d'eau provoquée par la sécheresse dont la persistance a favorisé la mobilisation soutenue et croissante de l'aide internationale [INF/STA/1 et 2]. Le forage était en effet le seul moyen rapide et relativement économique pour faire face à cette situation d'urgence puisqu'il est exécuté en moyenne en 1 à 5 jours contre 1 à 3 mois pour le puits et à un coût du mètre linéaire de 5 à 10 fois moindre. Cet essor du forage au Mali, comme dans toute l'Afrique de l'Ouest, n'a été possible que grâce à une amélioration constante des méthodes d'implantation amenant des taux de réussite de plus en plus élevés (75 % actuellement) et à un perfectionnement des techniques d'exécution (marteau fond de trou). Bien que réticents au début car ils ne "voyaient" pas l'eau, les villageois ont finalement accepté le forage équipé d'une pompe comme une alternative à leurs points d'eau traditionnels, sans toutefois en mesurer les implications négatives au niveau de la pompe (*voir chapitre 8.2*).

Parmi les résultats positifs découlant de cette technologie, on peut citer :

- la confirmation de ressources exploitables en quantité et qualité suffisantes dans les aquifères fissurés et pratiquement sur toute leur étendue,

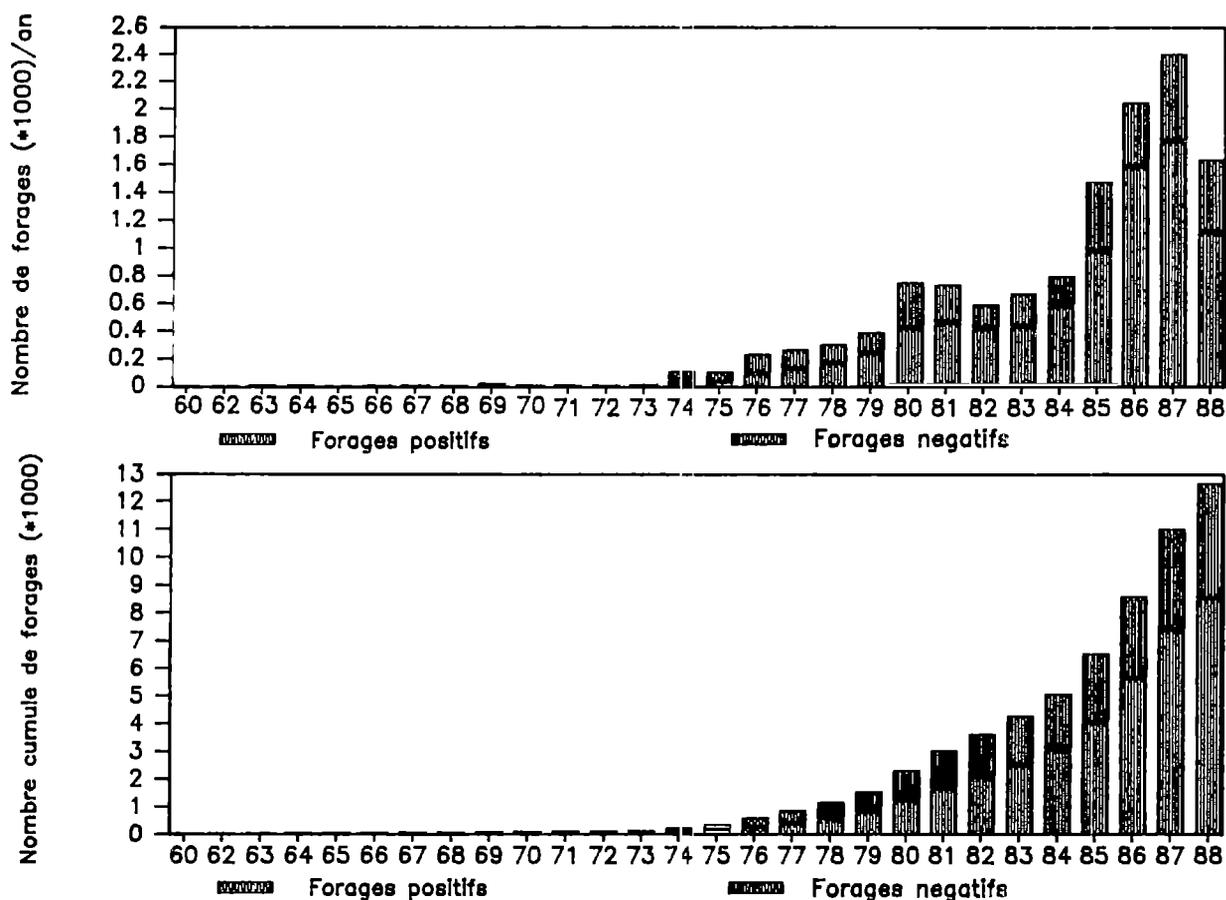


Fig. 8.1- Historique du développement des travaux de forage

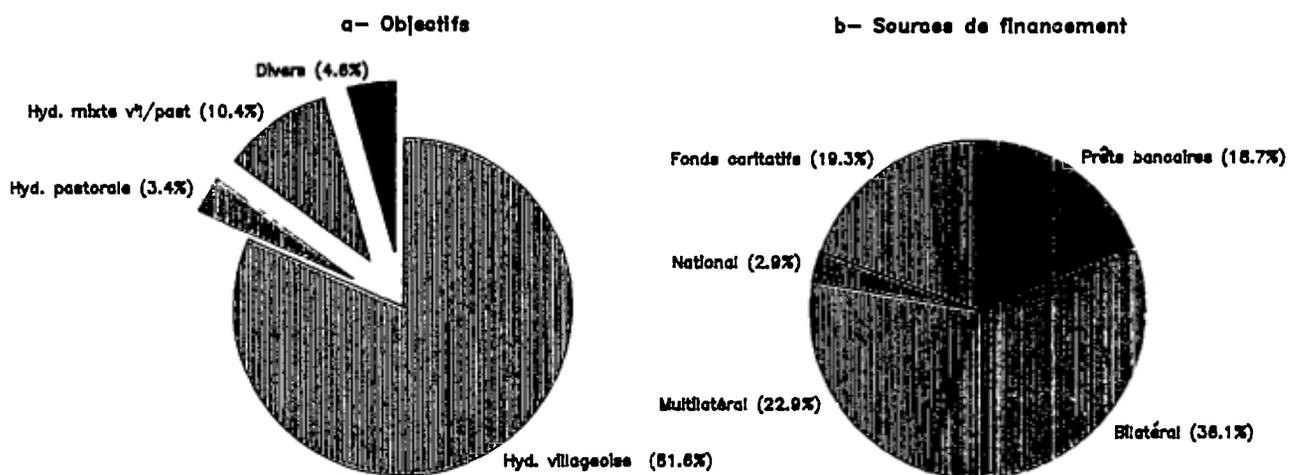


Fig 8.2- Objectifs et sources de financement des projets d'hydraulique en % de forages réalisés

- la mise au point de méthodes éprouvées d'implantation des forages et adaptées aux conditions hydrogéologiques locales combinant l'interprétation photogéologique, les prospections géophysiques et les forages de reconnaissance,
- la généralisation de la technique du forage au marteau fond-de-trou dans les aquifères fissurés permettant des rendements élevés et des prix de revient relativement bas dans les terrains durs.

Par contre, étant donné la multiplicité des intervenants, les caractéristiques des forages n'ont pas toujours été standardisées malgré les efforts de la DNHE pour imposer aux différents projets les mêmes normes techniques.

Par exemple, dans les aquifères fissurés, les forages sont soit tubés sur toute leur hauteur avec des sections crépinées au droit des principales venues d'eau, soit tubés seulement en face des altérites et jusqu'à la première venue d'eau importante dans le milieu fissuré, la partie captante étant laissée nue. De trop nombreux forages, pour des raisons contractuelles ou financières, ont été réalisés à des profondeurs soit excessives, soit insuffisantes, ou bien équipés avec des diamètres de tubage trop faibles alors que le débit exploitable aurait pu justifier un plus grand diamètre pouvant permettre l'installation éventuelle d'un moyen d'exhaure plus puissant que la pompe manuelle.

Par ailleurs, l'objectif des études d'implantation a été la recherche du meilleur débit aux dépens trop souvent d'un emplacement moins favorable mais situé dans le village. Enfin, les nécessités de rendement ont entraîné quelquefois une répartition non équitable des forages selon la taille des villages.

Depuis le début des années 1980, les forages sont équipés systématiquement de colonnes de tubage en PVC de 5" de diamètre intérieur (4" 1/2 pour quelques projets et 7" pour quelques forages débitant plus de 5 m³/h).

Dans les aquifères généralisés, les forages sont entièrement tubés avec des sections crépinées dans leur partie inférieure. Les diamètres sont de 5 à 7" suivant le débit des forages et l'utilisation prévue par le projet. La position des crépines et les caractéristiques du massif filtrant ont rarement été définies sur la base d'un carottage électrique et d'une analyse granulométrique des formations captées.

Les diagrammes représentés dans la figure 8.1. montrent que le développement des travaux de forage s'est fait par paliers avec des accélérations successives dans le rythme d'exécution après des séquences d'années sèches (en 1974 et en 1985) liées à une modification des objectifs des projets, à la participation de plus en plus active de l'aide internationale et à la priorité accordée par les Autorités au développement rural et à la maîtrise de l'eau. Le ralentissement que l'on peut observer après 1987 s'explique par une séquence d'années moins déficitaires, mais aussi par un désengagement de certains bailleurs de fonds du domaine de l'hydraulique villageoise dont le bilan, après 15 ans d'efforts, reste très décevant (*voir chapitres 8.2 et 8.3*). La tendance actuelle est de réorienter les activités vers d'autres modes de valorisation des eaux souterraines dans un dispositif de développement à moyen et long terme et dans le cadre d'une politique et de stratégies mieux adaptées.

Plus de 85 % des forages ont été exécutés pour l'hydraulique villageoise (*figure 8.2a*), ce qui montre l'importance des efforts consentis pour faire face à la situation désastreuse créée par la sécheresse et pour améliorer les conditions de vie du milieu rural qui représente près de 90 % de la population du pays. Les forages pour l'hydraulique pastorale et à double finalité (villageoise et pastorale) ne représentent respectivement que 3,4 % et 10,4 % des forages recensés. Nombre de ces forages ont d'ailleurs été transformés en puits-citernes pour y permettre l'exhaure traditionnelle.

Les forages regroupés dans la catégorie "Divers" sont ceux qui ont été exécutés pour des études hydrogéologiques de reconnaissance, pour des projets localisés de développement ou pour l'alimentation en eau de certaines villes et industries.

La répartition des forages selon les sources de financement (*figure 8.2b*) montre une contribution dominante de l'aide bilatérale (36 %) principalement à partir de 1985. Les organismes internationaux, caritatifs et bancaires ont financé la réalisation d'environ 20 % chacun du nombre total de forages.

8.2. MOYENS D'EXHAURE

8.2.1. Exhaure traditionnelle

L'eau des puits traditionnels villageois et pastoraux ainsi que de la plupart des puits modernes est tirée à l'aide de puisettes ou de délous en peau dont la capacité varie d'une dizaine à une cinquantaine de litres. Dans les zones rurales où les niveaux d'eau sont le plus souvent situés à moins de vingt mètres de profondeur, les puisages se font généralement à la main à raison de quelques centaines de l/j à quelques m³/j suivant la population utilisant le point d'eau tandis qu'en zone pastorale la profondeur élevée des niveaux d'eau et l'importance des volumes nécessaires pour abreuver les troupeaux oblige à utiliser la traction animale (âne ou chameau). Plusieurs fourches munies de poulies équipent souvent un même ouvrage et permettent des puisages simultanés. Les débits exploités peuvent ainsi atteindre 15 à 20 m³/j et même plus en période d'affluence des troupeaux en saison sèche et lorsque les puits en eau deviennent rares.

8.2.2. Exhaure moderne

Parmi les 8.480 forages productifs recensés à la fin 1988, 6.313 ont été équipés, en majorité avec des pompes à motricité humaine (PMH). Les informations collectées au cours des enquêtes de terrain ou à partir des listes fournies par les projets d'hydraulique villageoise et pastorale ont été enregistrées dans le fichier IRHPOM de la banque de données SIGMA et éditées dans un répertoire [INF/RPT/4]. Elles ont fait l'objet d'une étude statistique [INF/STA/4].

La densité des pompes par Arrondissement est représentée par la figure 8.3 pour les 5 premières Régions du Mali.

a) Pompes à motricité humaine

Elles constituent 97 % de l'ensemble des pompes installées au Mali. Les pompes à main de type India, d'abord importées puis fabriquées au Mali à partir de 1984 par l'usine EMAMA (*) de Sikasso, représentent plus de la moitié des pompes installées (51 %). Les pompes à pied Vergnet, les premières à être systématiquement installées sur les forages d'hydraulique villageoise, ne représentaient plus à la fin de 1988 que 28 % des installations. Plusieurs autres types de pompes ont été mis en place par divers projets d'hydraulique villageoise et concernent moins de 20 % du total des pompes installées (*figure 8.4a*)

(*) EMAMA : Entreprise Malienne de Maintenance

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE EAU DU MALI

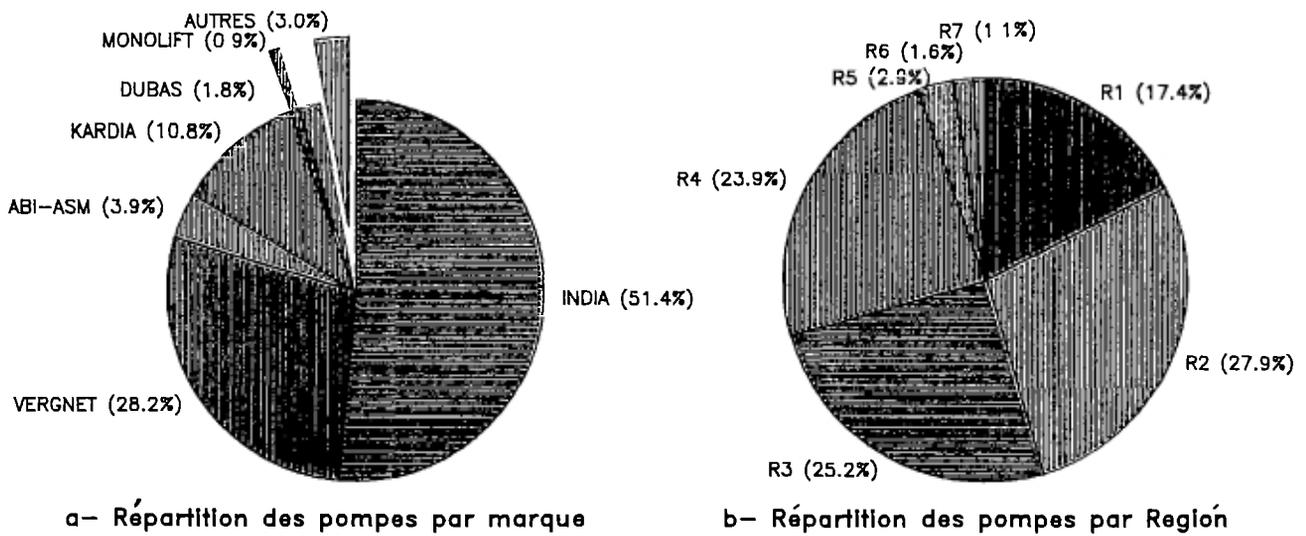
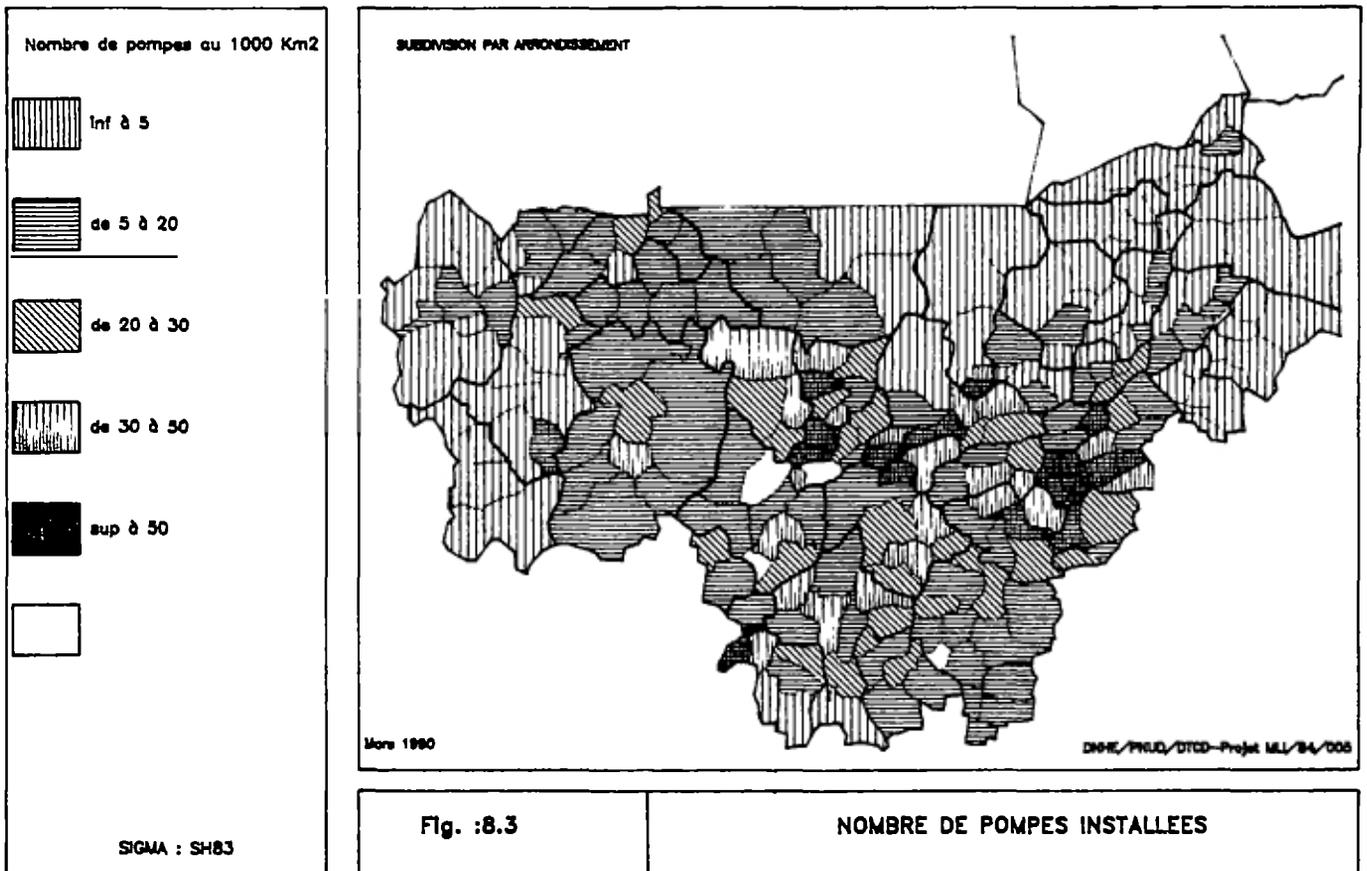


Fig. 8.4 Répartition des pompes par marque et par Région

Les PMH sont concentrées dans les Régions de Kayes, Koulikoro, Sikasso et Ségou qui ont bénéficié du plus grand nombre de programmes d'hydraulique rurale (*figure 8.4b*). Dans les autres Régions du Mali, les forages, beaucoup moins nombreux, ont souvent été convertis en puits ou puits-citernes.

Les aménagements autour des forages équipés de pompes manuelles varient suivant les projets qui les ont financés. Ils sont généralement constitués par une dalle d'ancrage en ciment, un canal d'évacuation, un puits perdu et une clôture construite en matériaux divers : parpaing, banco ou branches d'épineux.

Jusqu'en 1982, les pompes étaient fournies, installées et entretenues par les projets d'hydraulique villageoise, ce qui a eu pour avantage d'emporter immédiatement l'adhésion des populations, mais l'inconvénient, après la fin du projet, de laisser ces populations sans motivation et sans moyens face à une technologie "importée" et imposée. Aussi, à partir de 1983, la DNHE a tenté de mettre en place une nouvelle politique consistant à exiger tout d'abord une demande effective des populations bénéficiaires pour le forage, ensuite leur contribution financière à l'achat de la pompe (entre 40.000 et 300.000 F.CFA soit 10 à 100 % du coût selon les projets) et la prise en charge totale de sa maintenance par les villageois. Pour ce faire, des comités de gestion des points d'eau ont été créés au sein des villages tandis que des réparateurs locaux étaient formés par les projets et que des circuits de commercialisation des pièces détachées devaient être mis en place.

Mais la mise en oeuvre de cette politique s'est heurtée à de nombreuses difficultés :

- la demande de forage est toujours clairement formulée par les villageois, mais elle n'est pas toujours liée au versement d'une avance pour l'achat de la pompe, avance dont le montant n'est d'ailleurs pas homogène ;
- le forage, compte tenu que les meilleures implantations hydrogéologiques sont recherchées, n'est pas toujours situé en un lieu stratégique du point de vue des bénéficiaires, d'où leur désintérêt ;
- les comités villageois de gestion des points d'eau sont encore trop souvent inopérants ou inexpérimentés et la participation des femmes, principales pourvoyeuses et utilisatrices de l'eau donc les plus motivées pour la maintenance des pompes, est, lorsqu'elle existe, le plus souvent limitée à des tâches subalternes ;
- les réseaux de réparateurs privés formés par les projets ont du mal à fonctionner et à se développer du fait de la faible rentabilité (nombre d'interventions insuffisant et coût des réparations peu incitatif) ;
- le même problème se pose pour les réseaux de distribution de pièces détachées, le volume de vente et la marge bénéficiaire étant trop faibles pour intéresser les commerçants locaux ou régionaux, et justifier l'importance des stocks nécessaires et la densité du réseau à mettre en place pour couvrir tous les villages équipés ;
- à ceci s'ajoute la difficulté, pour les villages, de collecter les sommes nécessaires pour les réparations, et par voie de conséquence, l'abandon pur et simple de la pompe en panne lorsqu'elle est en concurrence avec des points d'eau traditionnels ou lorsqu'elle ne répond pas à un réel besoin des villageois (pompe trop éloignée du village, débit insuffisant, pannes trop fréquentes, attentes trop longues pour exécuter les réparations ou obtenir les pièces détachées).

Compte tenu de toutes ces difficultés et bien qu'il soit impossible d'avancer un chiffre, le pourcentage de pompes en fonctionnement et entretenues n'est élevé que dans les zones couvertes par les projets en activité qui assurent généralement l'encadrement des villages et maintiennent des structures de réparation et d'entretien.

b) Autres pompes

Fin 1988, 111 forages étaient équipés de pompes à axe vertical ou immergées actionnées par l'énergie solaire produite par des panneaux de cellules photovoltaïques. Ces pompes "solaires", débitant entre 20 et 110 m³/j, ont été installées à partir de 1980 principalement sur des forages exploitant l'aquifère de l'Infracambrien tabulaire, notamment dans les secteurs de San-Tominian (Projet Mali Aqua Viva) et de Kolokani (Projet PNUD/FED). Quelques unités de pompage ont aussi été mises en place dans les aquifères du socle dans le secteur de Bougouni, du Cambrien dans le secteur de Nara et du Continental terminal/Quaternaire dans la zone de Tombouctou. La maintenance de ces équipements est assurée par la cellule "Energie solaire" de la DNHE.

Enfin une centaine de forages est équipée de pompes submersibles électriques principalement pour des adductions d'eau urbaines et des usages industriels. Quelques forages pastoraux ont aussi été équipés avec ce type de pompe, dans la région de Mopti (ODEM), ainsi que, à un moindre degré, quelques forages pour l'irrigation de pépinières.

Quelques exemplaires de pompes éoliennes et de pompes avec traction animale ont été mis à l'essai, mais ces technologies ne se sont pas, jusqu'à présent, vraiment développées au Mali.

8.3. EXPLOITATION ACTUELLE ET UTILISATION DES EAUX

8.3.1. Méthodes d'estimation

Les données fiables sur l'exploitation effective des points d'eau ne concernent qu'un nombre non significatif d'ouvrages. Cette exploitation varie d'ailleurs considérablement en fonction de plusieurs critères. Aussi, il a été choisi d'estimer l'exploitation actuelle de manière indirecte sur la base de consommations unitaires moyennes et des chiffres du recensement de la population et du bétail extrapolés pour 1989 sur la base du recensement provisoire de 1987 [SDM/GNL/7, SDM/HPL/1]. Cette méthode globale d'estimation fournit des ordres de grandeur dont la précision est de même niveau que ceux concernant les ressources en eau.

8.3.1.1. Consommation humaine et usages domestiques

a) Villages

Deux normes de consommation unitaire ont été définies sur la base de quelques enquêtes villageoises selon que le village (moins de 2.000 hab) dispose de points d'eau traditionnels ou modernes :

- dans les villages dont les besoins en eau sont couverts uniquement par les points d'eau traditionnels une consommation moyenne de 15 l/j/hab a été adoptée ;

- dans les villages disposant d'au moins 1 forage équipé de pompe ou d'un puits moderne et dont les besoins en eau sont couverts à la fois par les points d'eau traditionnels et par tout ou partie du débit de la pompe (l'eau pompée étant souvent

utilisée aussi pour d'autres activités), une consommation moyenne de 25 l/j/hab a été adoptée.

b) Centres urbains, semi-urbains et ruraux

Les eaux souterraines sont actuellement utilisées pour alimenter les réseaux d'adduction d'eau de 14 centres dont 6 urbains (plus de 10.000 hab), 5 semi-urbains (de 5.000 à 10.000 hab) et 3 ruraux (2.000 à 5.000 hab). Ces réseaux ne couvrent en général que partiellement les besoins en eau des populations avec un nombre très réduit de branchements privés et quelques bornes fontaines. Une large fraction des habitants continue donc d'utiliser des puits de concession. De ce fait, on a adopté une consommation moyenne tenant compte de la consommation des habitants desservis par les réseaux (31 l/j/hab) et d'une consommation de 15 l/j/hab pour la partie de population non desservie.

Pour les autres centres dépourvus d'un réseau de distribution, les mêmes normes de consommation que pour les villages ont été utilisées : 15 l/j/hab pour ceux qui ne possèdent pas de forage et 25 l/j/hab pour ceux qui disposent de forages équipés de pompe à motricité humaine.

8.3.1.2. Elevage

Une consommation moyenne de 30 l/j/UBT (*) représentant 75 % de la norme habituelle a été retenue afin de prendre en compte une diminution de la consommation normale du fait du nombre insuffisant de points d'eau permanents dans le domaine pastoral et de leur répartition irrégulière. Les eaux souterraines ne constituent qu'une partie des eaux consommées par le bétail, les eaux de surface permanentes ou temporaires en constituant l'autre partie. La proportion entre eaux souterraines et eaux de surface varie suivant les saisons et les régions ; aussi les estimations ont été faites sur les bases suivantes :

- pendant les 4 mois d'hivernage, de juillet à octobre, on estime que 60 % des besoins en eau du bétail sont couverts par les eaux de surface, celles-ci étant alors disponibles dans la plupart des zones d'élevage et de pâturage;
- durant les 8 mois de la saison sèche, les eaux de surface se réduisent rapidement aux seules rivières et plans d'eau permanents et à quelques mares semi-pérennes ; elles ne couvrent plus alors que 20 % des eaux consommées par le bétail.

Sur ces bases et en valeur moyenne pondérée pour une année, les eaux souterraines fourniraient environ les 2/3 des volumes d'eau consommés par le bétail. Les estimations globales ont été faites en appliquant un taux uniforme à toutes les régions sauf à la zone du delta intérieur (Cercles de Ténenkou, Mopti, Youvarou et Goundam) où il a été ramené à 50 % afin de prendre en compte la plus grande disponibilité en eau de surface dans cette zone.

(*) UBT : Unité de Bétail Tropical

8.3.1.3. Irrigation

Les superficies irriguées à partir des eaux souterraines sont disséminées généralement en très petites unités et très mal connues. Des enquêtes ponctuelles et des observations faites durant les inventaires villageois et lors de l'évaluation des programmes de forages d'hydraulique dans plusieurs zones de projet ont cependant permis de disposer de quelques éléments d'estimation.

En moyenne, on peut considérer qu'une pompe manuelle sur 5 est utilisée, entre novembre et mars, pour le jardinage avec environ 1 m³/j affecté à l'arrosage. La superficie totale ainsi irriguée serait de 150 ha au maximum. De petits périmètres maraîchers de quelques ares jusqu'à 2 ou 3 ha ont été développés autour de la plupart des pompes solaires. Leur superficie totale serait aussi de l'ordre de 150 ha.

Quelques vergers sont irrigués à partir de forages équipés de groupes motopompes submersibles totalisant une superficie de quelques dizaines d'hectares seulement.

En fait, l'eau souterraine utilisée pour le maraîchage provient essentiellement des aquifères superficiels exploités dans les puits traditionnels et dans les zones de puisards, en fond de vallée. Etant donné le nombre considérable de ces points d'eau et sur base d'enquêtes locales, on peut estimer qu'environ 1.500 ha seraient ainsi mis en valeur.

Les superficies totales irriguées au Mali à partir des eaux souterraines représenteraient donc approximativement 1.800 à 2.000 ha.

8.3.1.4. Usages industriels

Quelques usines s'alimentent en eau à partir de forages équipés de pompes submersibles : usines CMDT de traitement du coton et huilerie HUICOMA à Koutiala, Brasserie BRAMALI et usine de tissage ITEMA à Bamako. Au total, les débits pompés représentent environ 2.500 m³/j pour ces quatre usines. L'industrie minière utilise aussi sur certains sites des eaux souterraines, mais aucune donnée d'exploitation n'est disponible ; elle est toutefois peu importante.

8.3.2. Volumes exploités

L'exploitation totale estimée pour 1989 est de 106 million de m³ (290.000 m³/j). Les pompages dans les points d'eau modernes : forages et puits, ne représentent qu'environ 21 millions de m³ (58.000 m³/j), soit environ 20 % de l'exploitation totale se répartissant approximativement entre :

- . 13 millions de m³ (36.000 m³/j) par les forages équipés de pompes manuelles (débit moyen par pompe : 6,5 m³/j [SDM/GNL/12]),
- . 1,2 millions de m³ (3.400 m³/j) pour les adductions d'eau,
- . 0,9 millions de m³ (2.500 m³/j) pour les usages industriels,
- . 1,1 millions de m³ (3.100 m³/j) par les forages équipés de pompes solaires (consommation humaine et irrigation),
- . 4,8 millions de m³ (13.000 m³/j) par les puits modernes.

En dépit des efforts d'équipement en ouvrages modernes durant la dernière décennie, les puisages dans les points d'eau traditionnels constituent encore, comme on le voit, le principal mode d'exploitation des eaux souterraines avec ce que cela implique sur la médiocre potabilité des eaux de consommation, les risques de pollution externe et la précarité des ressources disponibles selon les saisons et les années.

La figure 8.5 récapitule les volumes annuels prélevés dans les différents aquifères tandis que la figure 8.6 montre la répartition des taux d'exploitation par aquifère.

Tableau 8.1 - Exploitation des eaux souterraines estimée pour 1989, par aquifère et selon l'usage (en milliers de m³/an)

Aquifère	Usage	Consommation usages domestiques	Bétail	Irrigation et autres usages	Total	%
Continental terminal/Quaternaire		11.800	11.000	5.900	28.700	27,1
Crétacé sup./ Eocène inf.		400	650	250	1.300	1,2
Continental intercalaire		300	800	250	1.350	1,3
Cambrien	(1)	4.000	3.950	2.000	9.950	9,3
Infracambrien tabulaire	(1)	20.400	12.400	8.600	41.400	38,9
Infracambrien plissé	(1)	1.950	3.100	1.200	6.250	5,9
Socle	(1)	7.150	6.800	3.400	17.350	16,3
TOTAL		46.000	38.700	21.600	106.300	100

(1) y compris les aquifères superficiels surmontant les aquifères profonds.

Les aquifères fissurés et les aquifères d'altérites qui leur sont associés couvrent plus de 70 % des prélèvements (205.000 m³/j environ). Parmi ces systèmes aquifères, l'Infracambrien tabulaire des plateaux gréseux soudano-sahéliens est le principal réservoir souterrain exploité avec plus de 110.000 m³/j. C'est aussi celui où les débits ponctuels exploités par forage sont les plus importants (*voir chapitre 4*).

Le seul aquifère généralisé où l'exploitation représente des volumes importants est celui du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger (plus de 78.000 m³/j) presque exclusivement à partir de points d'eau traditionnels. Les prélèvements y sont concentrés surtout dans les secteurs rechargés par les eaux de surface où la surface de la nappe est peu profonde : delta intérieur et plaines alluviales bordant le Niger et le Bani.

Les chiffres mentionnés ne sont que des ordres de grandeur étant donné la méthode d'estimation sommaire utilisée. Ils peuvent cependant être considérés comme significatifs et font bien apparaître, comparés aux ressources exploitables (*voir chapitre 7*), l'exploitation actuelle négligeable comparativement à l'énorme potentiel de développement existant à partir de la mise en valeur des eaux souterraines.

SYNTHÈSE HYDROGÉOLOGIQUE DU MALI

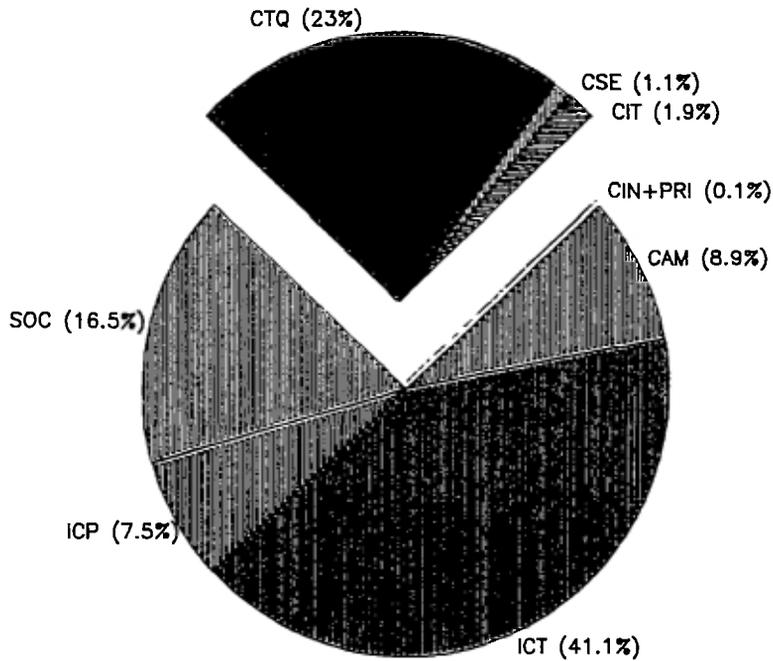
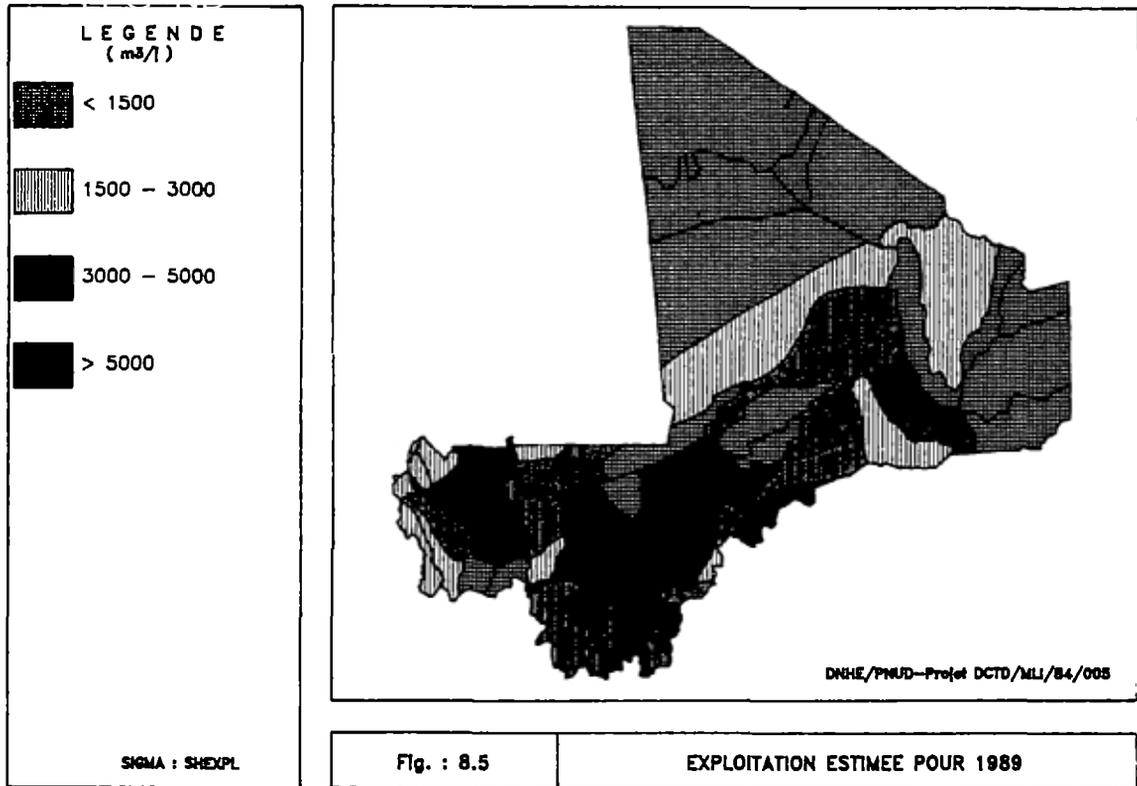


Fig. 8.6 : Répartition de l'exploitation actuelle estimée des eaux souterraines par aquifère

8.3.3. Couverture des besoins en eau potable

Le volume annuel prélevé sur les ressources en eau souterraine pour la consommation humaine et les usages domestiques est, en 1989, de l'ordre de 46 millions de m³ sur un total de 56 millions de m³ pour le Mali, les 10 millions de m³ restants provenant de captages sur les eaux de surface [SDM/GNL/12]. Sur ce total, 38 millions de m³/an sont utilisés par les populations rurales (villages de moins de 2.000 hab et centres ruraux de 2.000-5.000 hab) et 8 millions de m³/an par les centres semi-urbains (de 5.000 à 10.000 hab) et les villes (> 10.000 hab).

8.3.3.1. Couverture actuelle en milieu rural

Sur les 38 millions de m³/an, environ 17 millions proviennent des points d'eau modernes, forages et puits cimentés. Ils fournissent en général des eaux de qualité acceptable (celle-ci pouvant toutefois être très variable pour les puits) et disponibles tout au long de l'année, mais ne couvrent que 38 % des besoins. Une large majorité de ruraux continue donc de consommer l'eau des puits traditionnels (21 millions de m³/an) très souvent polluée et extrêmement sensible aux variations climatiques comme on a pu le constater durant les deux dernières décennies.

Le tableau 8.2 récapitule, par Région, la situation actuelle de l'approvisionnement en eau du milieu rural sur la base d'une norme de 20 l/j/hab et une projection de la population rurale en 1989 [SDM/GNL/7]). La figure 8.7 représente le taux de couverture par Arrondissement pour les cinq premières Régions du Mali.

On constate une forte disparité régionale : la couverture des besoins atteint des valeurs supérieures à 40 % dans les quatre premières Régions du Mali (avec un maximum de 54,6 % pour la Région de Ségou) alors que la population des trois Régions du centre et de l'est du Mali n'est couverte qu'à 15 % (4,5 % pour la Région de Gao).

8.3.3.2. Couverture à moyen terme

Les villes et les centres urbains de plus de 10.000 habitants dont les besoins globaux sont estimés à 42,7 millions de m³/an en 2001, seront en majorité alimentés par les eaux de surface; il ne sera donc considéré ci-après que la satisfaction des besoins en eau potable pour le milieu rural d'une part (villages de moins de 2.000 hab et centres ruraux de 2.000 à 5.000 hab) et les centres semi-urbains de 5.000 à 10.000 hab d'autre part.

Les besoins en eau des populations en 2001 ont été estimés à partir de la projection des chiffres de population de 1989 [SDM/GNL/7] et sur une norme de consommation de 20 l/j/hab. pour les villages et de 31 l/j/hab. pour les centres ruraux et semi-urbains [SDM/AEP/6 et Schéma Directeur]. Globalement, ces besoins seraient de 65,5 millions de m³/an en 2001. Comparés aux volumes exploités en 1989 par les points d'eau modernes (17 millions de m³/an), un débit supplémentaire de 48,5 millions de m³/an devra être prélevé sur les aquifères, dont 26 millions de m³/an pour les villages et 22,5 millions de m³/an pour les centres ruraux et semi-urbains.

Pour produire cette quantité d'eau, 8.900 points d'eau nouveaux, forages ou puits modernes, seront nécessaires pour couvrir les besoins en eau potable des quelques 10.000 villages de moins de 2.000 habitants que comptera le Mali en 2001.

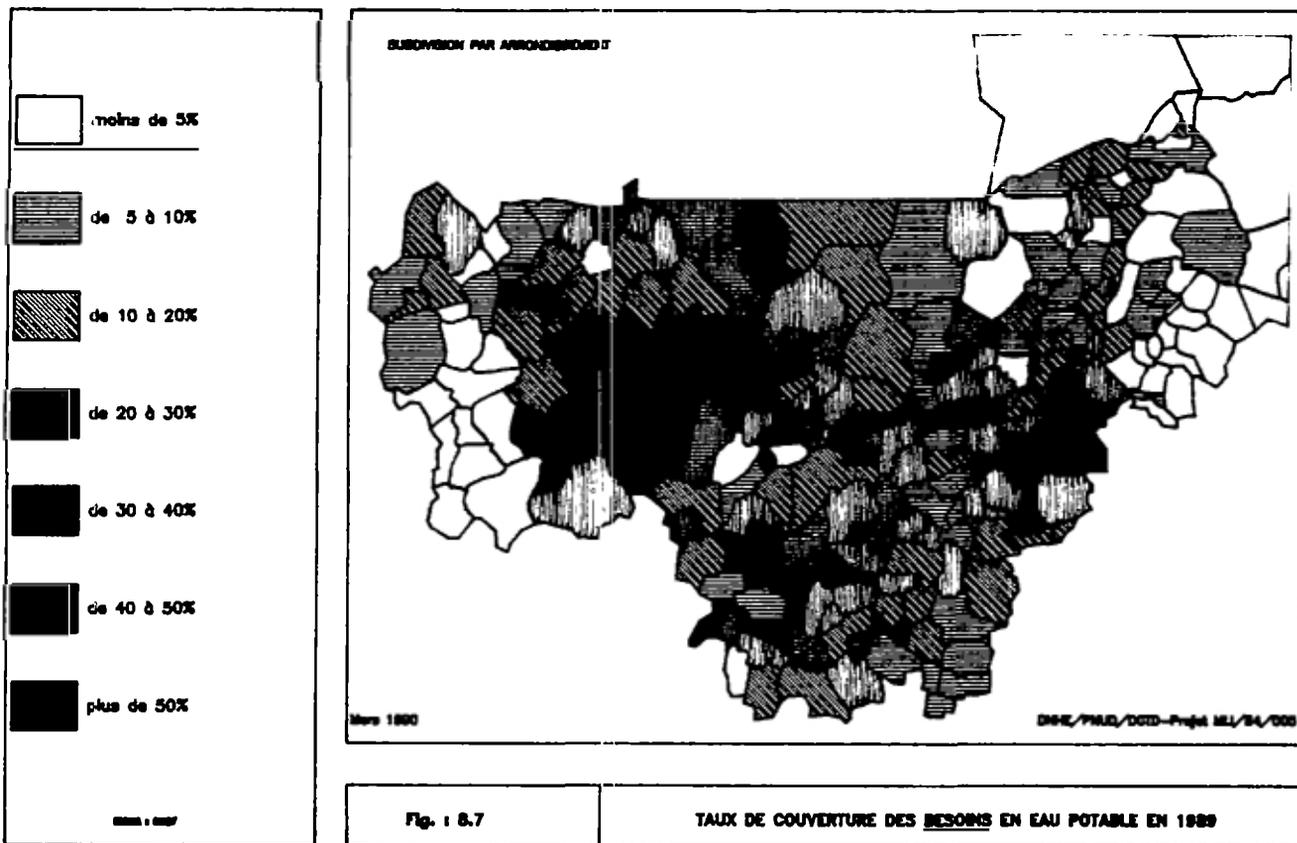
Pour ce qui concerne les centres ruraux et semi-urbains, 70 % des 413 centres actuels sont dotés d'au moins un forage de type hydraulique villageoise, dont 187 (45 %) disposent d'un ouvrage de débit exploitable égal ou supérieur à 5 m³/h permettant d'envisager une exhaure mécanisée. Les données hydrogéologiques disponibles

Tableau 8.2 - Situation actuelle de l'approvisionnement en eau du milieu rural par Région

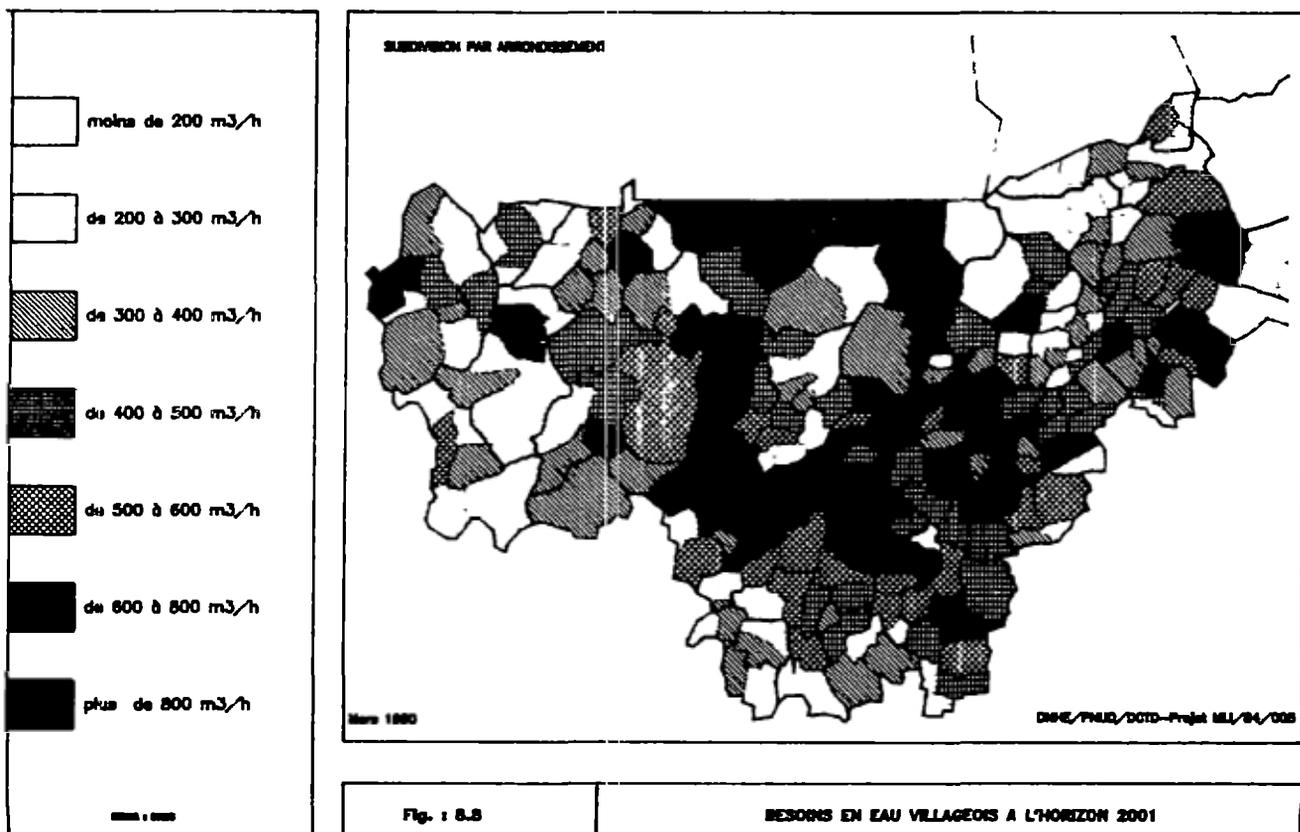
REGIONS	COUVERTURE DES BESOINS EN EAU PAR LES PUITES MODERNES ET LES FORAGES EQUIPES (Normes : 20 l/j/hab) (Débits en milliers de m ³ /an)									COUVERTURE DES BESOINS EN EAU PAR POINTS D'EAU TRADITIONNELS (15 l/j/hab)					
	CENTRES RURAUX (2.000 - 5.000 ht)			VILLAGES < 2.000 ht			ENSEMBLE			CENTRES RURAUX		VILLAGES		ENSEMBLE	
	DEBIT (10 ³ m ³ /an)	POPULATION COUVERTE	% (1)	DEBIT (10 ³ m ³ /an)	POPULATION COUVERTE	% (1)	DEBIT (10 ³ m ³ /an)	POPULATION COUVERTE	% (1)	POPULATION COUVERTE (arrondie)	DEBIT (10 ³ m ³ /an)	POPULATION COUVERTE (arrondie)	DEBIT (10 ³ m ³ /an)	POPULATION COUVERTE (arrondie)	DEBIT (10 ³ m ³ /an)
1. KAYES	560	77.000	35	2.390	328.000	43,4	2.950	405.000	41,6	142.000	780	427.000	2.340	569.000	3.120
2. KOULIKORO	410	57.000	36	3.870	530.000	57,4	4.280	587.000	54,2	103.000	560	393.000	2.150	496.000	2.710
3. SIKASSO	470	65.000	32	3.050	417.000	43,6	3.520	482.000	41,6	138.000	760	540.000	2.960	678.000	3.720
4. SEGOU	410	56.000	39	4.190	574.000	56,8	4.600	630.000	54,6	87.000	480	437.000	2.390	524.000	2.870
5. MOPTI	100	14.000	99	1.000	138.000	14,1	1.100	152.000	13,5	137.000	750	840.000	4.600	977.000	5.350
6. TOMBOUCTOU	110	15.000	26	340	45.000	14,6	450	60.000	16,4	43.000	230	264.000	1.440	307.000	1.670
7. GAO	30	4.000	4	70	10.000	4,5	100	14.000	4,4	92.000	500	214.000	1.170	306.000	1.670
TOTAUX (MOYENNES)	2090	288.000	(28)	14.910	2.047.000	(39,6)	17.000	2.330.000	(37,7)	742.000	4.060	3.115.000	17.050	3.857.000	21.110

(1) Pourcentage par rapport à la population correspondante de la Région estimée pour 1989

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



[SDM/GNL/8] ont par ailleurs montré que près des 3/4 des centres sont situés dans des zones favorables (312 sur 413) disposant de ressources exploitables suffisantes pour fournir des débits minima de 5 m³/h sans difficulté. Avec une moyenne de deux forages équipés par centre (de 1 à 4 forages suivant le débit des forages et le nombre d'habitants), 825 nouveaux forages de capacité supérieure à 5 m³/h devront être réalisés d'ici 2001.

C'est donc au total 9.725 nouveaux points d'eau modernes qui devront être exécutés d'ici à l'an 2001 pour couvrir des besoins en eau potable du milieu rural tel que projeté.

Pour ce faire, les ressources exploitables ne constituent pas une contrainte puisqu'elles sont très largement supérieures aux besoins.

Il faut cependant retenir que, localement dans les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali, des conditions hydrogéologiques défavorables peuvent être rencontrées dans lesquelles le faible développement du milieu fissuré et le cloisonnement des zones perméables peuvent limiter les débits exploitables ponctuellement ou ne pas permettre leur exploitation à long terme. Des solutions de recharge devront alors être trouvées telles que : forages plus éloignés des villages, petits aménagements d'eau de surface, exploitation dispersée de l'aquifère superficiel. S'il est réalisé des adductions d'eau sommaires dans les centres ruraux et semi-urbains tel que prévu par le Schéma Directeur, des études hydrogéologiques détaillées seront nécessaires afin de vérifier l'importance des ressources exploitables localement, les conditions de leur mobilisation et de leur exploitation à long terme.

8.3.3.3. Coût de l'eau suivant les systèmes d'alimentation en milieu rural

Les coûts moyens calculés pour différents types d'aménagement les mieux adaptés à la taille des localités sont récapitulés dans le tableau 8.3.

Pour les villages de moins de 150 hab, c'est-à-dire au-dessous de la norme d'équipement par forage avec pompe manuelle (taille minimum retenue : 200 hab/village), l'alimentation en eau potable pourrait se faire à partir de puits traditionnels améliorés (approfondissement des ouvrages, soutènement sommaire et protection en surface), donc à un coût très faible.

Pour les localités intermédiaires, entre village et centre rural (1.000 à 3.000 hab), il est recommandé des systèmes d'adduction très simplifiés : forage, pompe solaire ou à moteur diésel, petit réservoir sur l'abri de la pompe et 2 bornes-fontaines au maximum (postes autonomes).

La comparaison des coûts de l'eau fait apparaître une économie d'échelle avec une eau pratiquement moitié moins chère pour un habitant d'un centre semi-urbain de 10.000 hab par rapport à celui d'un centre rural de 2.000 hab. Le coût de l'eau à la pompe manuelle est du même ordre de grandeur que celle du poste autonome et nettement inférieur à celui du puits moderne qui est grévé par les prix élevés de construction. A l'opposé, les puits traditionnels améliorés permettent d'atteindre des coûts très bas.

Il faudrait donc accorder la priorité, si l'on s'en tient aux seuls critères économiques, aux localités disposant déjà de forages à gros débit et à celles où l'habitat est concentré. L'amélioration des puits traditionnels est aussi à encourager, au moins comme solution transitoire durant la période d'exécution des nouveaux points d'eau, en raison des faibles investissements nécessaires et des techniques simples pouvant être mises en oeuvre par les populations elles-mêmes.

Tableau 8.3 - Coûts moyens de l'eau selon différents systèmes d'alimentation en eau et en fonction de la taille des localités

		HYDRAULIQUE VILLAGEOISE			POSTES AUTONOMES/ADDUCTION		ADDUCTION D'EAU SOMMAIRE			
		PUITS TRADITIONNEL (150 hab)	PUITS MODERNE (400 hab)	FORAGE + POMPE MANUELLE (400 hab)	VILLAGES (1000 - 2000 hab)	CENTRES RURAUX (2000 - 3000 hab)	CENTRES RURAUX		CENTRES SEMI-URBAINS	
							3000-4000 hab	4000-5000 hab	5000-7500 hab	7500-10000 hab
A. NORMES										
1	NORMES SCHEMA DIRECTEUR (l/j/hab)	15	20	20	20	31	31	31	31	31
2	CONSUM. MAX. (m ³ /j)	2.25	8	8	40	90	120	150	230	310
3	NB. MOY. HEURES POMPAGE	-	-	8	10	12	16	18	16	16
4	DEBIT MAX. POMPE (m ³ /h)	-	-	1	4	7.5	7.5	10	15	20
5	NB. FORAGES Q = 1 à 3 m ³ /h	-	-	1	2	3	-	-	-	-
	ou Q = 5 m ³ /h	-	-	-	1	2	2	2	3	4
	ou Q = 10 m ³ /h	-	-	-	-	1	1	1	2	2
6	CAPACITE RESERVOIR (m ³)	-	-	-	10	30	50	50	75	100
7	NB BORNES FONTAINES	-	-	-	2	6	8	10	12	15
8	LONGUEUR UNITAIRE CONDUITE (km)	-	-	-	1	1.5	2	2.5	4	6

B. INVESTISSEMENTS (en millions de F.CFA)

1	PUITS OU FORAGE(S)	1.0	10.0	5.0	10.0	10.0	12.5	12.5	12.5	15.0
2	POMPE MAN./MOTEUR DIESEL	-	-	0.35	1.2	2.4	2.8	3.0	3.2	3.5
3	GROUPE ELECTROGENE	-	-	-	1.0	2.0	2.0	2.5	2.5	3.5
4	RESERVOIR	-	-	-	5.0	13.5	15.0	15.0	17.5	25.0
5	CONDUITES	-	-	-	2.0	3.0	4.0	5.0	8.0	10.0
6	BORNES FONTAINES	-	-	-	0.6	2.0	2.5	3.0	3.6	4.5
7	ABRI/CUVE GASOIL/CLOTURE	-	-	-	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
TOTAUX		1.0	10.0	5.35	21.3	34.9	40.8	43.0	49.3	63.5
COUT PER CAPITA (F.CFA)		6.700	25.000	13.375	10.650	11.630	10.200	8.600	6.580	6.350

C. COUTS DE L'EAU (en millions de F.CFA) (extraits du rapport [SDM/ECO/2])

1	AMORTISSEMENT ET FRAIS FINANCIERS	0.1	0.9	0.6	2.5	4.1	4.8	5.1	5.8	8.2
2	ENTRETIEN/REPARATION	-	-	0.1	0.8	1.0	1.2	1.5	1.8	2.1
3	MAIN D'OEUVRE	-	-	-	0.5	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
4	CARBURANTS, LUBRIFIANTS	-	-	-	0.3	0.5	0.6	0.8	1.2	2.2
TOTAUX		0.1	0.9	0.7	4.1	7.1	8.6	9.9	11.8	16.0
VOLUME CONSOMME (m³/an)		820	2.920	2.920	14.600	33.950	45.260	56.575	84.860	113.150
COUTS DE L'EAU (F.CFA)	avec amortissement	120	310	240	280	210	190	175	140	140
	sans amortissement	-	-	20	110	90	85	85	70	70

COUTS UNITAIRES (en millions de F.CFA)

- Puits : 10 - Forage : 5
- Pompe manuelle : 0.35 - Pompe à moteur : 1.2 à 1.75 (HT)
- Groupe électrogène : 1 à 1.25 (HT)
- Conduite : 1 par km
- Borne fontaine : 0.3

8.3.4. Activités de développement à partir des eaux souterraines

Les volumes estimés des ressources exploitables et leur répartition permet d'envisager de les utiliser pour de multiples activités de développement intéressant toutes les Régions du Mali. Elles ont aussi l'avantage, par rapport aux eaux de surface, d'être plus régulièrement distribuées et plus constantes dans le temps. Elles sont aussi mobilisables plus rapidement et avec des investissements échelonnés.

Toutefois, la quantification des besoins en eau pour l'élevage, l'irrigation et les activités industrielles qui dépendent de multiples contraintes, notamment économiques, ne sera abordée que d'une manière très générale et pour faire ressortir la part que pourraient y prendre les eaux souterraines.

8.3.4.1. Elevage

Le troupeau national est estimé en 1989 à un équivalent de 5.300.000 UBT [SDM/HPL/1]. Sur la base d'une norme moyenne de 30 l/j/UBT, il consommerait 58 millions de m³/an dont 39 proviennent des eaux souterraines et 19 des eaux de surface.

L'estimation des effectifs du cheptel en 2001 à partir des tendances d'évolution observées entre 1970 et 1987 et en tenant compte d'une croissance probable du troupeau de bovins supérieure pour la période 1991-2001, serait de l'ordre de 6.700.000 UBT et donc les besoins en eau d'environ 73,5 millions de m³/an.

Les 15,5 millions de m³/an supplémentaires par rapport à la consommation en 1989 ne seront qu'en partie prélevés sur les eaux souterraines, les éleveurs préférant l'utilisation des eaux de surface lorsque celles-ci sont disponibles.

Les projets d'hydraulique pastorale prévus ou programmés à court terme, jusqu'en 1996, permettront de mobiliser 4,5 millions de m³/an sur les eaux souterraines et 3 millions de m³/an sur les eaux de surface. Pour couvrir les besoins restants (environ 8 millions de m³/an), 4 millions de m³/an proviendront d'aménagements d'eau de surface non pérenne (mares artificielles, petits barrages et barrages souterrains) et 3 millions de m³/an devront être extraits sur environ 200 forages et puits.

8.3.4.2. Irrigation

Tous les grands périmètres du Mali sont irrigués à partir des eaux de surface (190.000 ha aménagés et 128.000 effectivement irrigués). Les petits périmètres d'irrigation à partir des eaux de surface non pérennes ont une superficie totale estimée d'environ 5.000 ha [SDM/ENP/1]. Les superficies, très dispersées, irriguées à partir des eaux souterraines représenteraient en 1989 de l'ordre de 1.800 ha, dont environ 150 ha à partir des surplus d'eau non consommés fournis par les pompes manuelles, 150 ha à partir des pompes solaires et 1.500 ha à partir des points d'eau traditionnels.

Les contraintes sont multiples pour le développement d'une petite irrigation intensive à partir des eaux souterraines, en particulier celles liées au coût de l'eau et aux limitations du marché. Pour une mise sous irrigation à partir d'un forage équipé d'une pompe submersible, le prix moyen de l'eau à la sortie de la pompe varie entre 98 et 178 F.CFA/m³ en incluant le coût du forage et entre 34 et 71 F.CFA/m³ sans compter l'investissement du forage [SDM/ECO/2]. Les coûts de l'eau supportables pour la plupart des produits maraîchers étant au maximum de 50 F.CFA/m³, la rentabilité économique de la petite irrigation ne peut en général être atteinte qu'en ne prenant pas en compte le coût d'investissement du forage ou en utilisant les surplus d'eau non consommés des systèmes d'approvisionnement en eau potable.

La conjonction de facteurs très favorables : débits exploitables supérieurs à 10 m³/h avec un niveau dynamique à moins de 15 m de profondeur et la garantie d'un marché pour l'écoulement des produits, se rencontre assez rarement.

Le Schéma Directeur propose, pour la période 1990-2001, la mise sous irrigation d'environ 2.500 ha avec deux types d'aménagement :

- micropérimètres d'irrigation de $\frac{1}{2}$ ha max. à partir de pompes à motricité humaine,
- petits périmètres d'irrigation de 1 à 5 ha alimentés principalement par des pompes à traction animale, des pompes solaires ou des pompes diesel pouvant débiter de 6 à 30 m³/h.

La mise en oeuvre de ce programme de 2.500 ha intéresserait 2.320 villages et centres ruraux et mobiliserait de l'ordre de 27 millions de m³ d'eau souterraine à raison de 6.000 m³/ha/cycle et de 2 cycles cultureux par an pour les cultures maraîchères).

8.3.4.3. Usages industriels

Les principales usines existant au Mali s'approvisionnent à partir des eaux souterraines en raison surtout de leur disponibilité sur place qui réduit donc les coûts d'adduction et d'aménagement. Bien que les ressources exploitables localement soient très variables ainsi que la capacité des forages, le développement de l'exploitation des eaux souterraines pour les besoins industriels doit être favorisé sous réserve d'études hydrogéologiques et de travaux de reconnaissance pour vérifier la disponibilité à long terme des volumes recherchés. Les aquifères généralisés, en particulier celui du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger, et l'aquifère fissuré de l'Infracambrien tabulaire sont les plus favorables pour ce type de développement en raison de l'importance des ressources en eau disponibles et des débits ponctuels élevés qui peuvent être exploités. Selon les conditions hydrogéologiques, l'approvisionnement en eau des unités industrielles peut se faire à partir de quelques forages à gros débit ou par des champs de captage comportant un réseau de forages de faible capacité exploitant un aquifère superficiel dans des alluvions (solution adoptée pour couvrir les besoins en eau de la mine d'or de la Bagoé).

8.4. CONDITIONS D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

Les données statistiques sur les points d'eau et sur les variables hydrogéologiques par secteur présentées dans les chapitres précédents fournissent une vue d'ensemble sur les conditions d'exploitation des eaux souterraines au Mali.

Une représentation plus synthétique peut en être faite sous la forme d'une carte de potentialité des ressources en eau souterraine telle que définie dans une publication du CIEH⁽¹⁾ à partir d'une étude conjointe du BRGM⁽²⁾ et de la société Géohydraulique. Cette carte qui intègre trois indicateurs : l'accessibilité, l'exploitabilité et la pérennité des ressources en eau souterraine (chacun étant défini par la combinaison de deux paramètres physiques), a été conçue comme un outil d'aide à la décision pour l'identification et la préparation des projets d'hydraulique. La catégorisation des différents facteurs proposée dans cette publication a été conservée moyennant quelques ajustements sur certaines limites de classe pour tenir compte des conditions hydrogéologiques particulières au Mali. La représentation cartographique a par contre été modifiée afin de l'adapter aux moyens informatiques dont disposent la DNHE. La discrétisation des données a été faite sur la base d'un découpage géographique régulier par quart de carte topographique au 1:200.000 sauf pour les aquifères généralisés de l'est et du nord du Mali où la subdivision par secteur hydrogéologique a été conservée faute de données suffisamment denses.

8.4.1. Accessibilité

L'accessibilité (*figure 8.9*) représente un indicateur des coûts d'investissement pour la création de nouveaux points d'eau. Elle est définie par la combinaison de deux paramètres : la profondeur moyenne des forages et le taux de réussite en forages productifs.

Les classes utilisées sont les suivantes :

<u>Classe</u>	<u>Prof. forages</u> (m)	<u>% réussite</u>	<u>% superficie Mali</u>
Classe I	> 85	< 50	18
Classe II	85 - 65	50 - 65	21
Classe III	65 - 45	65 - 80	32
Classe IV	< 45	> 80	9
Secteurs indéterminés			20

Il n'a pas été fait de distinction entre les aquifères fissurés et les aquifères généralisés ceux-ci étant libres ou semi-libres, et les profondeurs des forages d'exploitation étant du même ordre de grandeur.

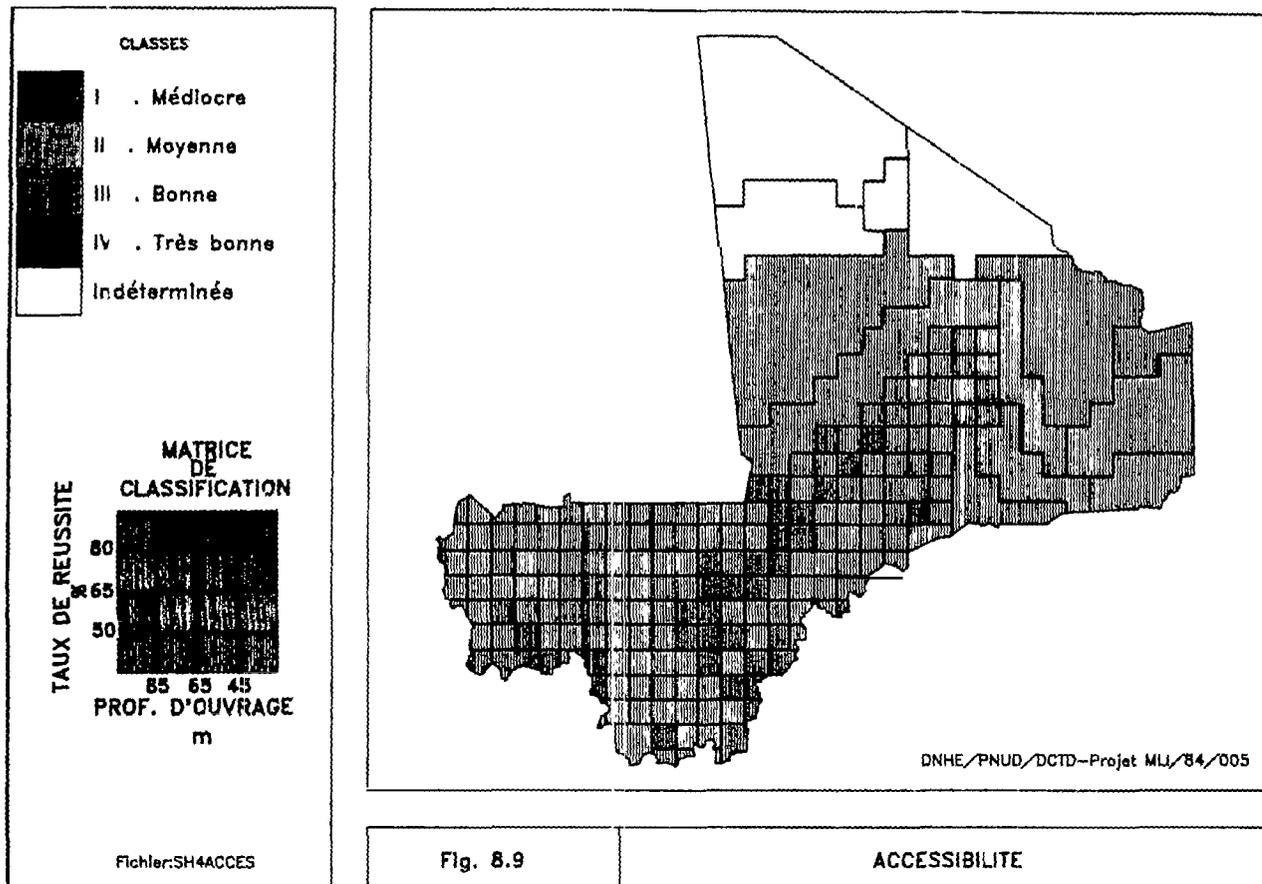
La classe I est celle où le coût d'investissement est le plus élevé soit en raison d'une profondeur élevée des forages, soit à cause du risque d'avoir à exécuter plusieurs forages pour l'obtention d'un seul ouvrage productif, soit des deux.

La classe IV caractérise les conditions d'investissement minimum avec de faibles profondeurs d'ouvrage et des risques limités de forage négatif.

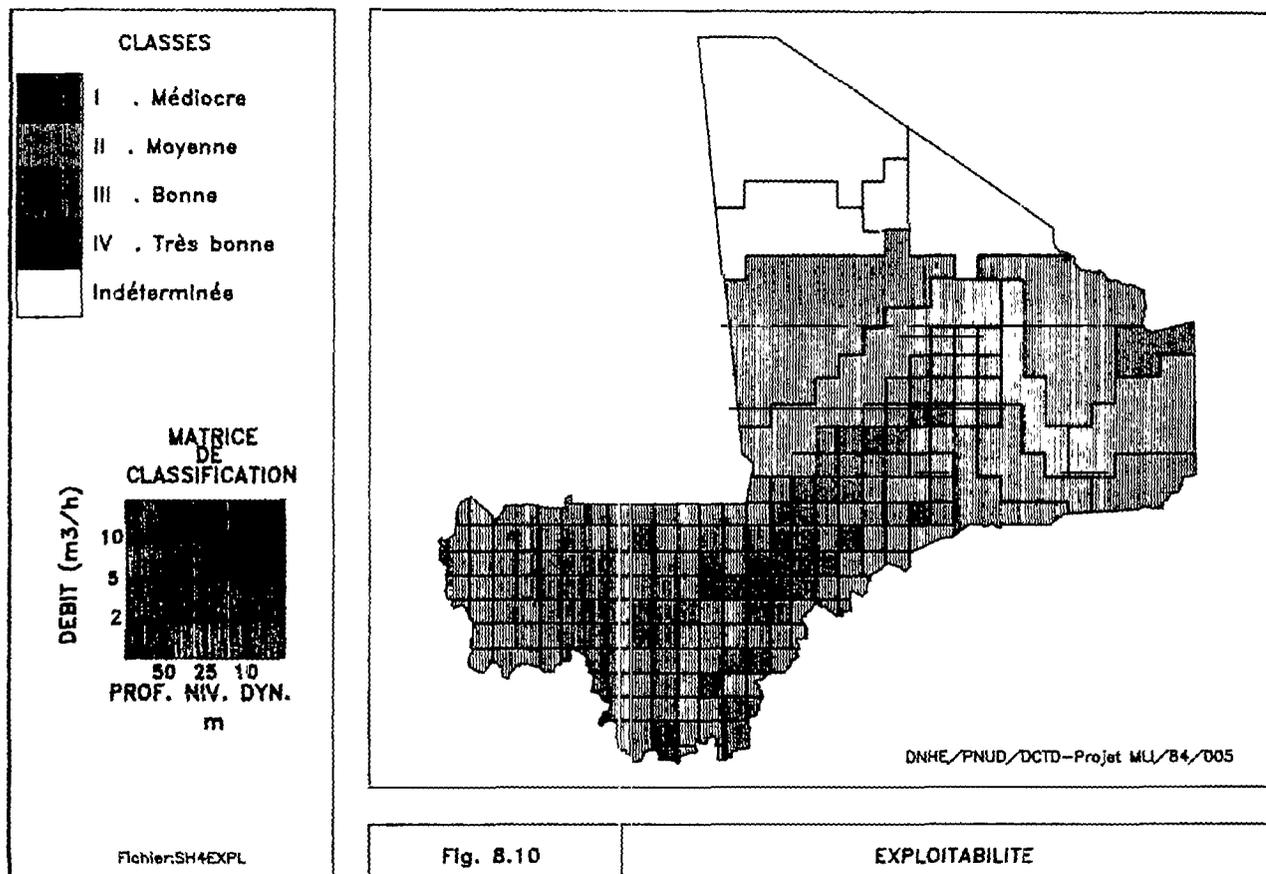
(1) CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

(2) BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France)

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



Les aquifères généralisés du centre du Mali présentent les meilleures conditions d'accessibilité en particulier celui du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger. De bonnes conditions sont aussi rencontrées dans certains secteurs d'aquifères fissurés de l'ouest du Mali, notamment dans celui de l'Infracambrien tabulaire. Par contre, l'exploitation des aquifères du Cambrien et de l'Infracambrien plissé requiert des investissements plus élevés pour la création d'ouvrages productifs en raison, principalement, des faibles taux de réussite qui caractérisent ces aquifères.

8.4.2. Exploitabilité

L'exploitabilité (figure 8.10) est un indicateur des coûts d'exploitation et des systèmes d'exhaure à utiliser. Elle est liée aux caractéristiques hydrauliques et piézométriques des aquifères. L'exploitabilité est définie à partir du débit des forages et de la profondeur des niveaux rabattus en régime d'exploitation.

Les classes suivantes ont été adoptées :

<u>Classe</u>	<u>Débit (m³/h)</u>	<u>Pro. Niv. dyn.(m)</u>	<u>% superficie Mali</u>
Classe I	< 2	> 50	1
Classe II	2 - 5	10 - 25	19
Classe III	5 - 10	25 - 50	49
Classe IV	> 10	< 10	11
Secteurs indéterminés			20

. La classe I caractérise des zones où l'exploitation des eaux souterraines par des points d'eau modernes est peu justifiée et où il serait en général préférable d'améliorer les points d'eau traditionnels;

. La classe II couvre principalement le domaine d'intervention de l'hydraulique villageoise avec des forages équipés de pompes manuelles;

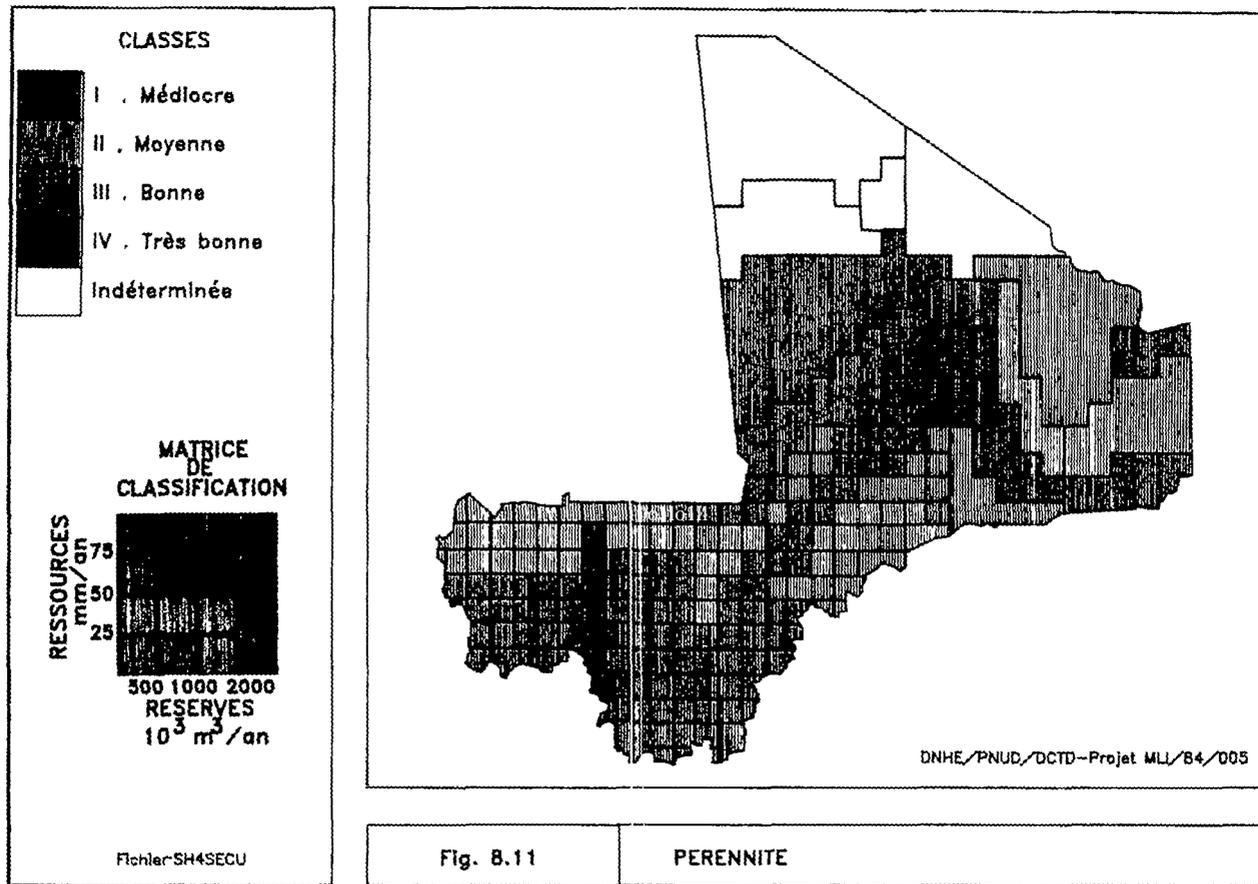
. La classe III permet une exhaure mécanisée et l'obtention de débits suffisants et à un coût acceptable notamment pour des adductions d'eau sommaires, des petits périmètres d'irrigation villageois ainsi que pour l'hydraulique pastorale;

. La classe IV avec des faibles hauteurs de refoulement et des débits élevés, se prête à des exploitations importantes pour alimenter des réseaux d'adduction urbains, des unités industrielles ou des périmètres d'irrigation.

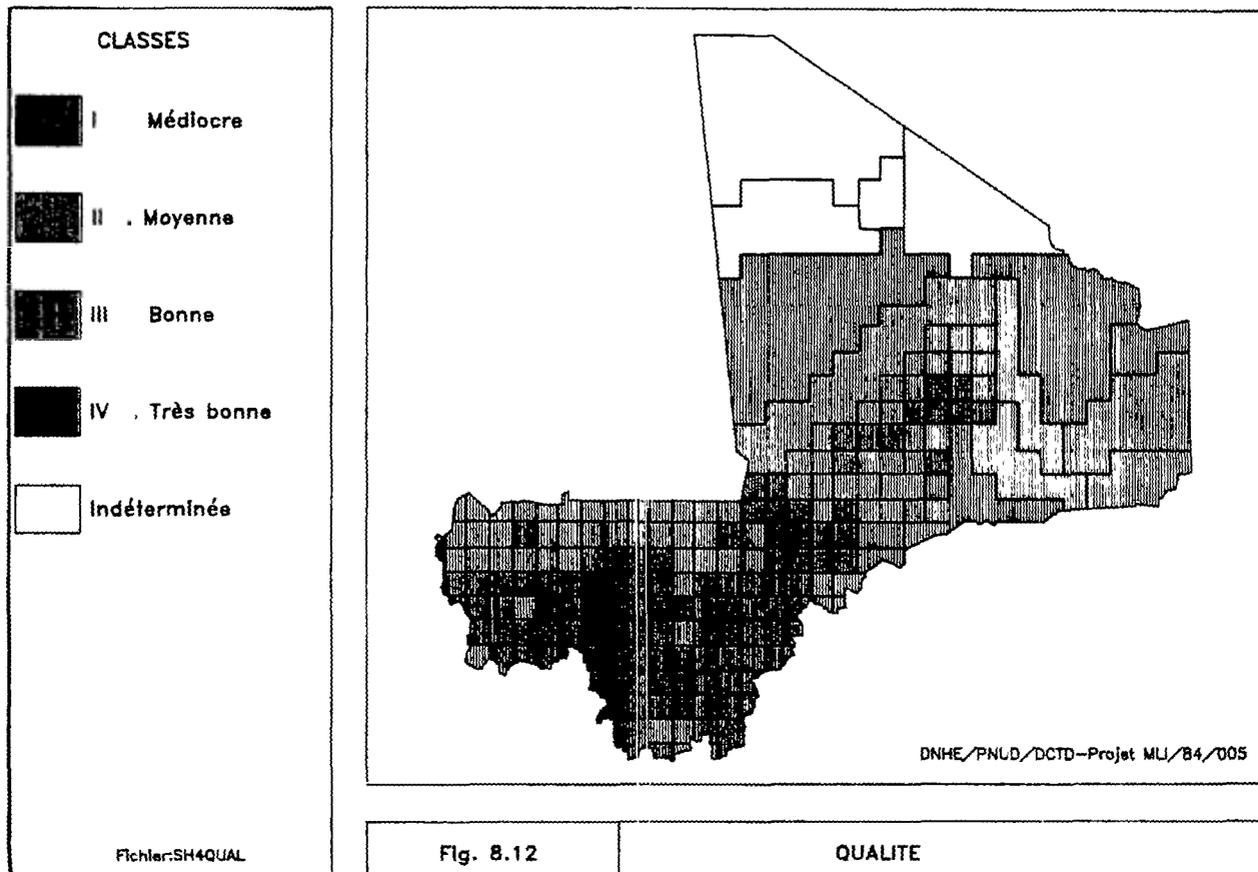
Pour la majeure partie du Mali, l'exploitation moyenne entre dans les catégories III et IV. Ce n'est que dans quelques zones d'aquifères fissurés que des conditions d'exploitation médiocres ou mauvaises sont rencontrées. Il faut toutefois signaler que pour les aquifères généralisés de l'est du Mali les moyennes représentées par secteur hydrogéologique sont peu significatives du fait de la répartition irrégulière et du nombre limité de données disponibles.

Bien qu'il n'en soit pas tenu compte, il faut noter qu'une fraction importante des eaux entrant dans les classes III et IV a des pH acides et est agressive [voir chapitre 6, figure 6.4 et 6.5]. Ce cas est surtout fréquent dans les séries gréseuses de l'Infracambrien de l'Unité de San - Koutiala, des secteurs de Sikasso et de la boucle du Baoulé et dans les formations sédimentaires du secteur du Bani - Niger. Dans le secteur de Gao, les eaux sont agressives mais également saumâtres. Bien que l'agressivité ne constitue pas, en général, un facteur limitant pour leur utilisation, elle nécessite néanmoins la mise en place de systèmes d'exhaure résistant à la corrosion et entraîne donc un surcoût d'exploitation.

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



8.4.3. Pérennité

La pérennité (*figure 8.11*) est fonction de l'importance des ressources exploitables localement à moyen et long terme, soit sous la forme de ressources renouvelables dans les aquifères fissurés à faible capacité d'emménagement, soit comme réserves fossiles exploitables pour la majorité des aquifères généralisés. Pour les aquifères fissurés, il a été considéré que seulement 50 % de la recharge moyenne calculée était pratiquement exploitable (*voir chapitre 7*).

Les classes suivantes, différentes de celles définies dans l'étude BRGM/CIEH, ont ainsi été retenues :

<u>Classes</u>	<u>Recharge</u> (mm/an) ou $10^3\text{m}^3/\text{km}^2/\text{an}$	<u>Réserves</u> (10^3 m^3)	<u>% superficie Mali</u>
Classe I	< 5	< 500	14
Classe II	5 - 50	500 - 1.000	6
Classe III	50 - 90	1.000 - 2.000	10
Classe IV	> 50	> 2.000	50
Secteurs indéterminés		> 2.000	20

Les ressources en eau dans les zones des classes I et II sont précaires ou vulnérables à la sécheresse et ne permettent pas en général d'envisager d'exploitation importante à long terme.

Pour la classe III, les ressources en eau sont à même de couvrir la plupart des activités de développement en milieu rural à moyen et long terme avec un risque acceptable même durant les périodes de sécheresse.

La classe IV permet une exploitation intensive des eaux souterraines dans les zones où les caractéristiques hydrauliques des aquifères le permettent.

La pérennité de l'exploitation des eaux souterraines est assurée pour les aquifères généralisés et les aquifères fissurés situés dans les zones climatiques soudano-sahélienne et soudanienne qui bénéficient d'une recharge saisonnière importante. Les ressources en eau sont par contre plus vulnérables à la sécheresse en zone sahélienne (aquifère du Cambrien) et peuvent même y devenir précaires (aquifère de l'Infracambrien plissé du Gourma).

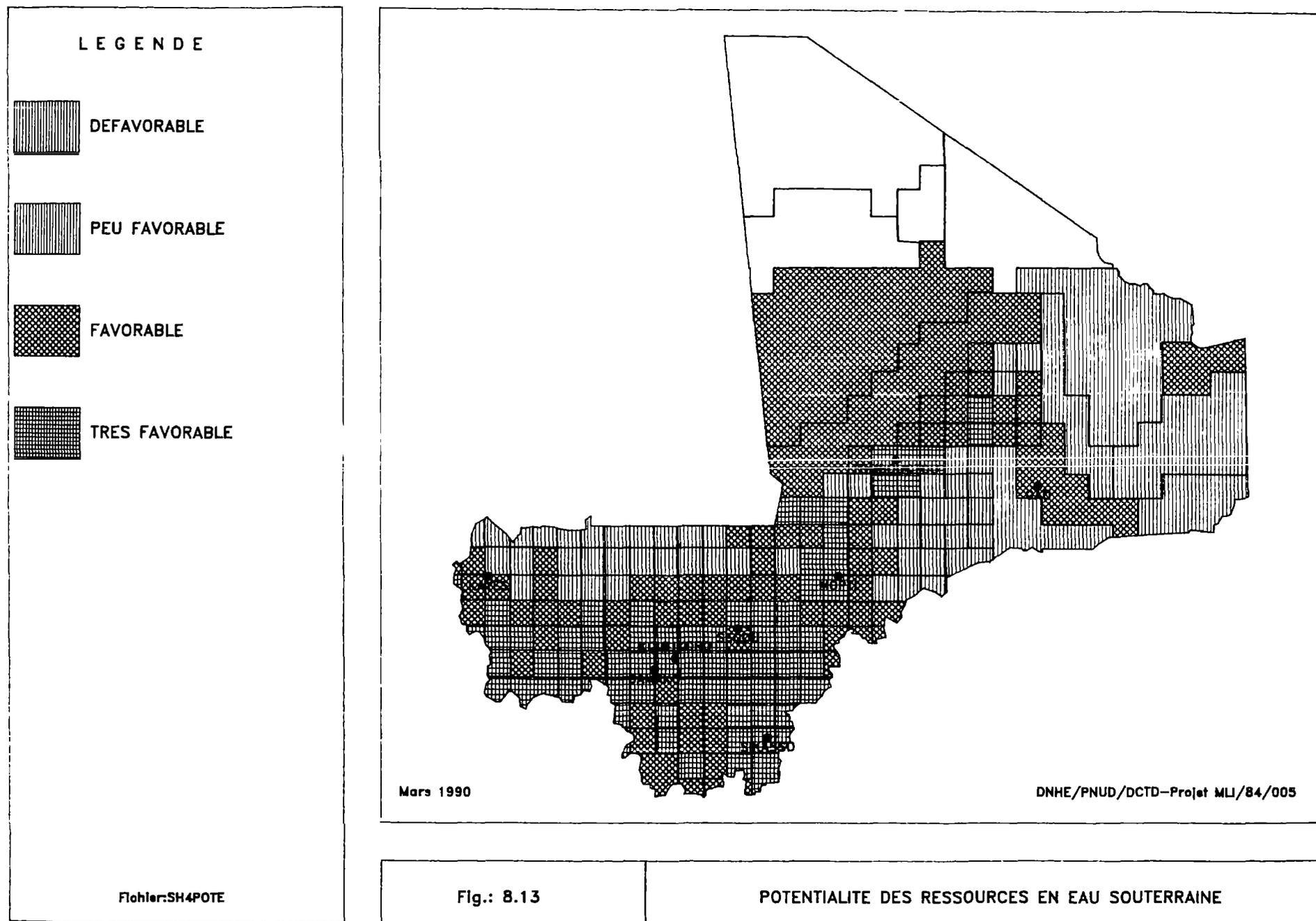
8.4.4. Qualité

Ce quatrième indicateur a été introduit car la salinité des eaux (*figure 8.12*) peut devenir un facteur limitant pour certaines utilisations même si par ailleurs les aquifères présentent des conditions d'exploitation favorables.

Les eaux ont été aussi classées selon 4 classes de conductivité :

<u>Classes</u>	<u>Conductivité</u> ($\mu\text{mhos}/\text{cm}$)	<u>% superficie Mali</u>
Classe I	> 2.000	21
Classe II	1.000 - 2.000	14
Classe III	500 - 1.000	20
Classe IV	< 500	25
Secteurs indéterminés		20

SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI



Les classes III et IV dans lesquelles s'inscrivent les eaux de la plupart des aquifères du Mali peuvent couvrir tous les usages sans traitement ni précautions particulières. Des limitations apparaissent pour l'utilisation des eaux de la classe II, notamment pour l'irrigation, et elles deviennent très contraignantes pour celles de la classe I. Ces classes ne se rencontrent toutefois que dans la zone désertique du nord du Mali et dans quelques secteurs limités d'aquifères fissurés et généralisés en zone sahélienne.

8.4.5. Potentialité des ressources en eau souterraine

La carte de synthèse (*figure 8.13*) obtenue par combinaison des différents indicateurs en additionnant, pour chaque unité élémentaire, les valeurs de classes qui y ont été définies pour chacun des quatre indicateurs fait bien ressortir les conditions globales d'exploitation des eaux souterraines. Elles sont en général favorables à très favorables dans la majeure partie des régions ouest et sud du Mali où sont localisés les aquifères fissurés de l'Infracambrien tabulaire et du socle ainsi que pour l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger et celui du Continental intercalaire. Les conditions d'exploitation se dégradent dans la zone sahélienne pour l'aquifère du Cambrien et surtout pour celui de l'Infracambrien plissé du Gourma ainsi que dans le socle de l'Adrar des Iforas.

Le pourcentage de la superficie occupée par chaque classe par rapport à la superficie totale du Mali s'établit ainsi :

- Classe I	-	Défavorable	:	1,9 %
- Classe II	-	Peu favorable	:	26,7 %
- Classe III	-	Favorable	:	38,5 %
- Classe IV	-	Très favorable	:	16,2 %
- Indéterminée			:	16,7 %

soit près de 55 % de zones favorables (66 % si on excepte les zones indéterminées).

La carte présentée à cette petite échelle ne donne qu'une idée globale sur les conditions d'exploitation des eaux souterraines au Mali. Au niveau régional, le traitement des données de la banque SIGMA devra être fait sur un découpage en unités de superficie plus réduite et permettra d'obtenir une image beaucoup plus détaillée pouvant servir de base à la préparation de projets d'hydraulique.

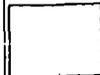
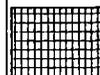
8.4.6. Implantation des forages d'exploitation

8.4.6.1. Aquifères fissurés

Le compartimentage des zones perméables dans les aquifères fissurés impose un mode d'exploitation par des points d'eau disséminés afin de limiter les risques de surexploitation locale. Toutefois la densité du réseau fissuré, ses caractéristiques hydrauliques et l'importance des réserves et des ressources renouvelables disponibles localement peuvent faire varier considérablement les conditions d'exploitation d'un site à l'autre. Dans ce type d'aquifère, les études préalables à l'implantation des forages dépendront principalement du débit recherché et de l'exploitation prévue.

Pour les forages d'hydraulique villageoise destinés à être équipés d'une pompe manuelle avec la recherche d'un débit cible de 1 m³/h, la méthode classique d'implantation par interprétation photogéologique complétée par des observations sur le terrain a fait ses preuves. Pour ce type d'ouvrage, les prospections géophysiques

LITHOLOGIE

-  Faciès gréseux
-  Faciès grésos-schisteux
-  Jaspes, calcaires, schistes
-  Limons sableux, latérites
-  Zone d'extension des intrusions doléritiques

PIEZOMETRIE

-  Eaux de surface
-  300 Courbe isopièze et altitude en m

DEBIT DES FORAGES

-  1 5 m³/h
-  5 - 10 m³/h
-  > 10 m³/h

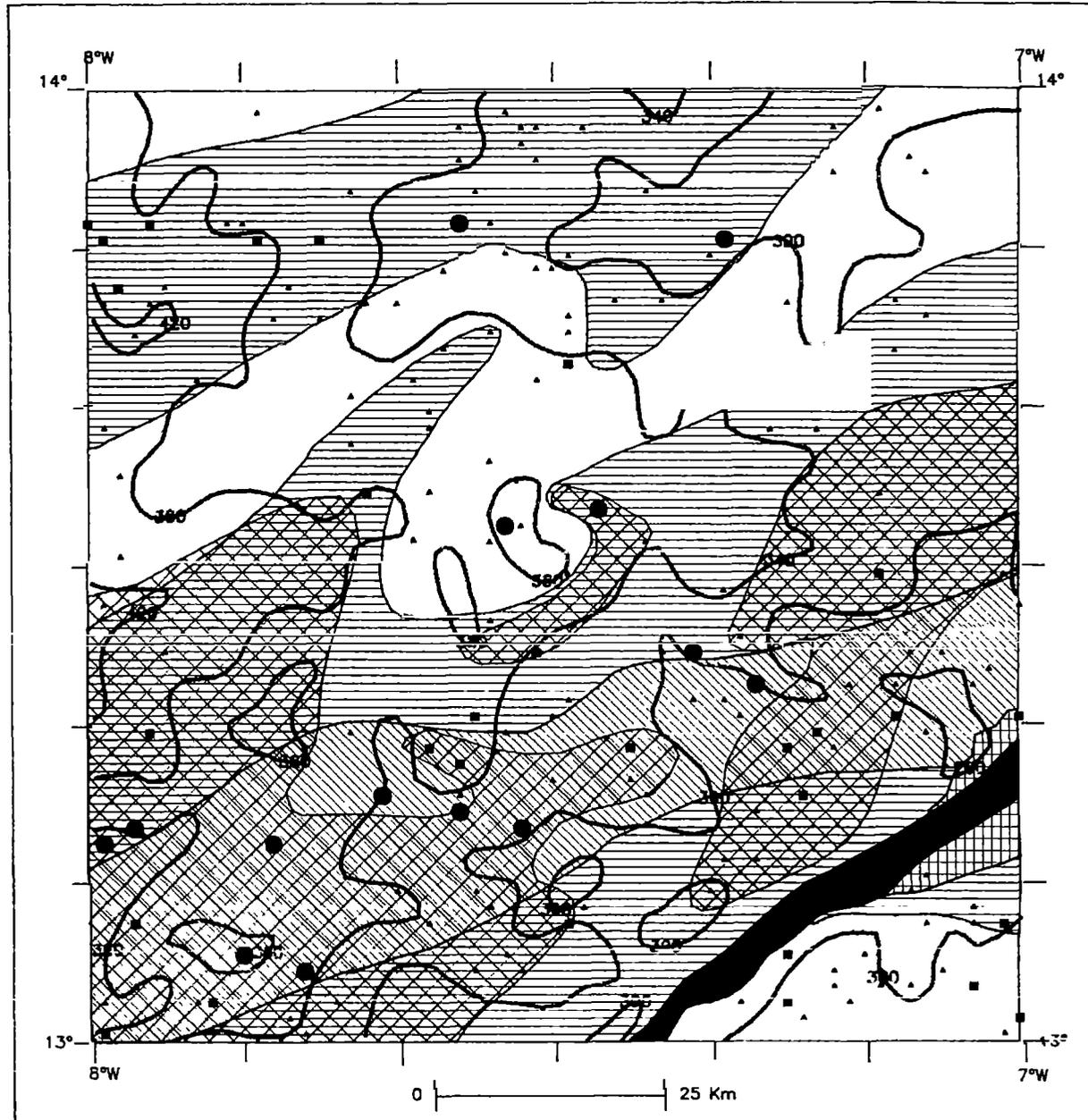


Fig. 8.14

CARTE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI : Feuille de BANAMBA

devraient être limitées aux zones pour lesquelles les conditions hydrogéologiques apparaissent peu favorables : lithologie à dominante schisteuse ou quartzitique, intrusion doléritique massive, socle granitique sous faible couverture d'altérites. Les cartes hydrogéologiques de base préparée par le projet MLI/84/005 à l'échelle du 1:400.000 pourront aider à l'identification de ces zones et à la définition des programmes de reconnaissance. La figure 8.14 donne un exemple à échelle réduite de ces cartes hydrogéologiques.

Pour les forages destinés à des adductions d'eau sommaires et à des activités de développement où les débits recherchés sont supérieurs à 5 m³/h et les volumes d'exploitation importants, les prospections géophysiques seront indispensables, souvent avec combinaison des différentes méthodes, afin de localiser les zones de meilleure perméabilité, de définir les profondeurs à atteindre et d'identifier d'éventuelles conditions aux limites pouvant affecter l'évolution des niveaux rabattus en régime d'exploitation à long terme. Des pompages d'essai de longue durée à débit constant avec des observations sur au moins un piézomètre devront aussi être systématiquement exécutés sur les forages pour la détermination précise des caractéristiques hydrauliques locales de l'aquifère.

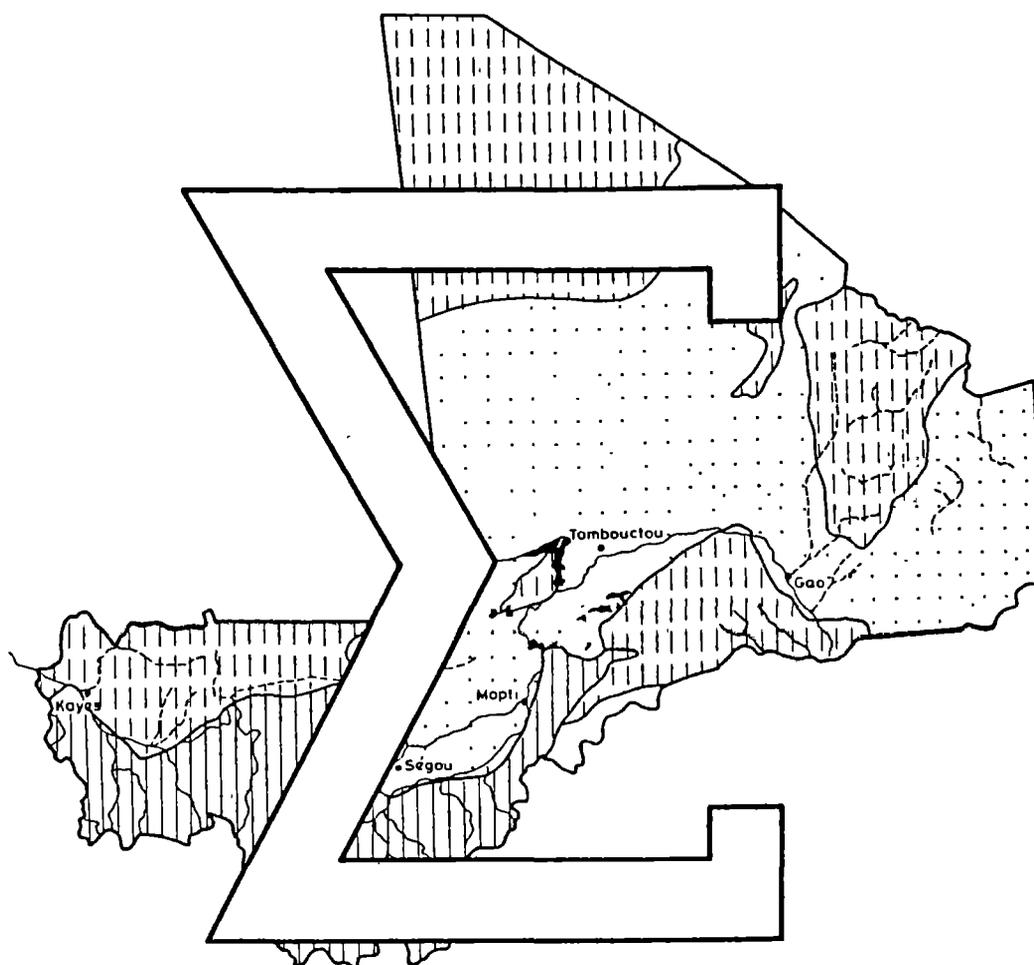
8.4.6.2. Aquifères généralisés

L'implantation des forages d'exploitation pour l'hydraulique villageoise ne requiert, en général, des études préalables que dans les secteurs de bordure de ces aquifères où leur épaisseur saturée se réduit dans des formations qui deviennent de plus en plus argileuses. Par contre, une exploitation concentrée par champs de captage nécessitera des reconnaissances par géophysique et sondages afin de localiser et délimiter les horizons les plus perméables et identifier les variations latérales de faciès qui peuvent les affecter. Des diagraphies géophysiques et des logs granulométriques dans la zone saturée seront très utiles, sinon indispensables, pour obtenir une production optimale des forages d'exploitation en crépinant les forages en face des horizons les plus perméables et en installant un massif filtrant conforme à la granulométrie des terrains captés. Des pompages d'essai de longue durée à débit constant avec des mesures sur piézomètres seront aussi nécessaires pour déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère qui permettront de simuler, par modèle mathématique, l'exploitation à long terme et de définir, dans le cas de plusieurs forages d'exploitation sur un même site, la géométrie optimale du champ de captage (espacement et débit des forages).

CHAPITRE 8

Référence bibliographique hors projet

- [8.1] - BRGM, GEOHYDRAULIQUE - Notice d'explication et d'utilisation de la carte de potentialité des ressources en eau souterraine de l'Afrique occidentale et centrale - CCE-CIEH - 1986.



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS



CHAPITRE 9

TABLE DES MATIERES

TEXTE

9.1. CONCLUSIONS.....	1
9.2. RECOMMANDATIONS.....	5
9.2.1. Programmation, coordination, planification.....	5
9.2.2. Standardisation, vérification, informatisation, traitement et diffusion des données.....	6
9.2.3. Ouvrages d'exploitation et de reconnaissance.....	7
9.2.3.1. Ouvrages d'hydraulique villageoise.....	7
9.2.3.2. Ouvrages d'hydraulique urbaine, industrielle, pastorale ou agricole.....	7
9.2.3.3. Autres ouvrages d'exploitation.....	8
9.2.4. Moyens d'exhaure.....	8
9.2.5. Réseaux de surveillance des eaux souterraines.....	9
9.2.5.1. Réseau de suivi piézométrique.....	10
9.2.5.2. Réseau de suivi hydrochimique.....	10
9.2.5.3. Réseau de suivi de l'exploitation.....	10
9.2.6. Etudes complémentaires.....	11
9.2.6.1. Etudes hydrogéologiques régionales.....	11
9.2.6.2. Etudes thématiques.....	12

TABLEAUX

9.1a. Aquifères fissurés : récapitulation des données par aquifère, unité et secteur hydrogéologiques.....	3
9.1b. Aquifères généralisés : récapitulation des données par aquifère, unité et secteur hydrogéologiques.....	4



CHAPITRE 9

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La synthèse hydrogéologique du Mali intègre toutes les données collectées sur les eaux souterraines jusqu'en Décembre 1988. Elle s'appuie sur une masse considérable d'informations obtenues essentiellement à partir des quelques 12.000 forages réalisés depuis les années 50 et à partir des essais, mesures et analyses dont ils ont fait l'objet. L'informatisation et le stockage en mémoire d'ordinateur de ces centaines de milliers d'informations gérées par SIGMA constituent un outil et un capital uniques pour le Mali que la DNHE est en mesure de mettre au service de tous : planificateurs, décideurs, utilisateurs, ingénieurs et techniciens tant des secteurs public et privé que des organismes extérieurs.

Cette synthèse, bien entendu, ne met pas un point final à la connaissance des eaux souterraines du Mali. Bien au contraire, elle met en évidence tout ce qu'il faudra encore préciser, détailler et collecter pour l'améliorer. Elle montre cependant qu'à l'échelle du pays et pour la partie la plus peuplée du Mali, les connaissances actuelles sont suffisantes pour caractériser les ressources en eau souterraine de façon fiable et en établir un premier bilan.

9.1. CONCLUSIONS

Considérées globalement, les ressources en eau souterraine du Mali sont abondantes, accessibles et de bonne qualité, mais très largement sous-exploitées et sous-utilisées comparativement à leur taux de renouvellement, à leurs réserves et aux débits exploitables disponibles. C'est là la conclusion majeure que l'on peut tirer de la présente synthèse.

Au niveau régional, la connaissance des ressources en eau souterraine est très inégalement répartie, notamment entre le nord et le sud et entre les différents systèmes aquifères. Cependant, les régions du nord, les moins reconnues, sont majoritairement occupées par des systèmes aquifères généralisés sur lesquels il n'est pas, de ce fait, nécessaire de disposer de données aussi denses que sur les systèmes aquifères fissurés.

Au niveau local, une connaissance détaillée n'est rendue nécessaire que pour les aquifères fissurés étant donné la forte variabilité spatiale des conditions et des caractéristiques hydrogéologiques qui y prédominent, notamment en ce qui a trait à la densité et à l'extension horizontale et verticale des réseaux fissurés, à l'existence ou non de filons doléritiques et de nappes superficielles, etc...

Quelques faits et chiffres significatifs sont à retenir :

- le taux de réussite des forages, tous aquifères confondus, est de 66,5 % avec des valeurs moyennes de 70 à 85 % (83 % en moyenne) dans les 4 aquifères généralisés et de 45 à 70 % (64,5 % en moyenne) dans les 5 aquifères fissurés, pour des forages profonds de 63 m en moyenne;
- le débit moyen des forages, tous aquifères confondus, est de 6,2 m³/h, avec des valeurs de 13 m³/h en moyenne pour les aquifères généralisés et de 6 m³/h pour les aquifères fissurés, pour des profondeurs de niveau d'eau respectivement de 10 à 50 m et de 10 à 20 m en moyenne;

- près de 40 % des forages productifs pourraient être exploités à plus de 5 m³/h (considérés comme débit minimum d'exploitation pour un développement) dont 16 % à plus de 10 m³/h et 5 % à plus de 20 m³/h alors que plus de 90 % des forages productifs sont exploités à moins de 1 m³/h (pompes manuelles);
- les débits spécifiques des forages sont en moyenne de 3 à 13 m³/h par mètre de rabattement dans les aquifères généralisés (transmissivités de 1 à 5.10⁻³ m²/s) et de 1 à 3 m³/h/m dans les aquifères fissurés (transmissivités de 1 à 8.10⁻⁴ m²/s);
- les aquifères les plus productifs et les plus fiables sont contenus dans les formations sédimentaires du Continental terminal/Quaternaire du delta intérieur du Niger pour les aquifères généralisés (16,5 % de la superficie du Mali) et dans les grès de l'Infracambrien tabulaire de la frange Soudano-sahélienne (surtout s'ils sont associés à des intrusions doléritiques) pour les aquifères fissurés (14 % du Mali);
- les aquifères les moins favorables du point de vue de la réussite et des débits exploitables sont situés dans les formations marno-calcaires du Crétacé supérieur/Eocène de l'Adrar des Iforas pour les aquifères généralisés (11 % de la superficie du Mali) et dans les schistes plissés de l'Infracambrien du Gondo et du Gourma oriental pour les aquifères fissurés (13 % du Mali);
- les eaux souterraines du Mali sont en moyenne de bonne qualité chimique avec des salinités très inférieures à 1 g/l sur plus de 60 % de la superficie du territoire, les secteurs les plus minéralisés étant ceux d'Araouane nord, de Gao et du Tilemsi pour les aquifères généralisés et ceux de Taoudenni et du Gourma pour les aquifères fissurés;
- il existe par contre des secteurs où l'agressivité des eaux souterraines nécessite des équipements résistant à la corrosion : il se situent essentiellement dans les aquifères fissurés du socle et de l'Infracambrien tabulaire;
- les réserves exploitables sont d'environ 2.000 milliards de m³ dans les aquifères généralisés contre 265 milliards de m³ dans les aquifères fissurés, tandis que le renouvellement actuel de ces réserves par infiltration des eaux de pluie et de ruissellement représente un débit d'alimentation continue théorique d'environ 300 m³/s dans les aquifères généralisés et de 1.800 m³/s dans les aquifères fissurés, débits qui sont presque en totalité repris par l'évapotranspiration;
- comparativement, le débit prélevé actuellement par l'homme sur les eaux souterraines est de l'ordre de 3,4 m³/s au total, c'est-à-dire à peine 0,16 % du débit d'infiltration, sans compter les réserves exploitables globalement, pratiquement inépuisables même en multipliant par 1.000 le débit prélevé actuellement;
- les seules limitations à l'exploitation de la grande majorité des aquifères du Mali résident en fait d'une part dans la productivité ponctuelle des ouvrages de captage et de leur exploitation à un coût socio-économique acceptable (surtout dans les aquifères fissurés), d'autre part dans la qualité chimique de l'eau qui, on l'a vu, n'est un facteur limitant que dans quelques secteurs généralement les moins favorables par ailleurs à un développement important (population peu élevée, faible aptitude des sols à la culture).

Les tableaux 9.1a et 9.1b ci-après récapitulent par système aquifère, unité et secteur hydrogéologiques les différentes données de base et résultats sur les ressources en eau souterraine présentés dans les chapitres précédents.

TABLEAU 9.1b - AQUIFERES GENERALISES : récapitulation des données par aquifère, unité et secteur hydrogéologiques.
 * L'Unité 11 (Gondo) n'est pas indiquée car ne correspondant pas à un aquifère généralisé mais à une série de petites nappes perchées, localisées et indépendantes les unes des autres
 (1) B = Entartante, N = Neutre, A = Agressive (2) DS = Zone désertique, SH = Zone sablienne

SYSTEME AQUIFERE (Code et nom)	UNITE HYDROGEOLOGIQUE (Code et nom)	SECTEUR HYDROGEOLOGIQUE (Code et nom)	SUPERFICIES		ALT MOY (m)	HAUT PLOI MOY (mm/an) (2)	NOMBRE ET (%) FORAGES (au 31/12/88)							DEBITS (ep m³/h)		PROF. EAU (m)	PIEZOMETRIE			TRANSMISSIVITES en m²/s			CORPUSC. D'EMAGAST. (x10⁻⁴)			CARACTERISTIQUES HYDROCELIQUES			CARACTERIS. ISOTOPIQUES (Nombre analyses et teneurs moyennes)					RESERVES EXPLI-TABLES			RESSOURCES RENOUVELABLES			EXPL. ACT. (m³/g) ET % INFIL.	DEB. EXPL. POMC (m³/g)	CLAS -SE				
			Secteur (km²)	Unité (km² et % Mali)			Total	Pro-duc-tifs	par tranche de débit en m³/h					noy.	max		noy.	max	Site	Pr.	Ampl. FLUC. MOY. (± m)	Min X 10⁻³	Max X 10⁻³	Moy X 10⁻³	Min	Max	Moy	Nomb. anal.	Cond. moy. (µmho/cm)	pH moy (1)	TRI-TIUM (UT)	¹⁸O (‰)	DEU-TER. C 13 (‰)	C 14 (‰)	en mm	en 10⁴ m³	INF. P+R (m³/m)	ETP (m³/m)	BI-LAN (1/m)							
									< 5	5 à 10	10 à 20	20 à 30	30 à 50																														>50			
1 CONTINENTAL TERMINAL/ QUATERNAIRE (CTQ)	12 FOSSE DE GAO	12a Gao 12b Menaka	31.940 27.240	59.180 (4.8)	280	230	56	48 (87)	17 (36)	11 (23)	19 (40)	0 (0)	1 (2)	0 (0)	9	37	28	78	-	-	-	0,28	0,27	0,34	-	-	1,0	1,1	9	3.210 490	7,6	E	-	-	-	-	3.880 2.600	124 71	0,2	0,2	-70	0,91	10	FAV.		
	13 AZAOUAD SUD		61.620	(5,0)	270	100	75	68 (91)	9 (13)	15 (22)	23 (34)	8 (12)	8 (12)	5 (7)	18	72	23	72	2	4	-	±2 (2&6)	1,8	5,0	5,6	-	-	6,2	9,9	10	250	7,0	N	-	-	6	6	5	5.080	313	0				0,1	-140
	14 GOURMA NORD-OUEST		24.360	(2,0)	265	280	51	45 (88)	4 (9)	14 (31)	9 (20)	6 (13)	8 (18)	4 (9)	23	100	7	10	-	-	-	-	-	50	2,0	6,1	-	-	-	10,5	-	-	-	-	-	-	6.130	149	148	148	+373					
	15 DELTA INTERIEUR	15a Nioua-Diouara 15b Macina-Diaka 15c Bani-Wiger	18.350 16.140 23.180	57.670 (4,7)	280	550	1.150	568 (83)	517 (54)	240 (25)	125 (13)	29 (3)	38 (4)	9 (1)	8	100	17	86	10	12	10	±2 (2&6)	0,02	2,0	0,7	1,0	1,4	1,2	4,3	13 21 27	696 280 219	7,3 7,2 6,8	E	8	41	16	8	1.350 6.830 5.470	25 110 127	147	147				-49	
2 CRET. SUP. EOC INF (CSE)	21 BORDURE ADRAR	21a Azaoak 21b Filesssi-Telat. 21c bord Adrar	48.790 27.280 62.840	138.910 (11,2)	295	120	82	59 (72)	27 (46)	22 (37)	9 (15)	0 (0)	0 (0)	1 (2)	7	32	51	113	-	-	-	190	1,0	1,9	-	-	-	2,7	10 11	1.020 3.950	7,4	E	-	-	-	-	1.890 1.600	92 44	0,3	0,5	+20	0,04 (12,5)	1 2	FAV.		
3 CONTINENTAL INTERCAL/ TERMINAL (CIT)	31 AZAOUAD N.	31a Sud Azaoouane 31b N. Azaoouane	84.950 103.370	166.320 (15,2)	265	<10	37	32 (87)	6 (25)	10 (31)	12 (38)	1 (3)	1 (3)	0 (0)	9	34	44	66	-	-	-	12	4,0	2,0	-	-	-	36,4	7 7	360 290	6,7 7,0	A	8	17	17	12	2.970 4.000	337 414	0	0,5	-165	0,04	1 40	FAV.		
	32 FOSSE NARA		20.550	(1,7)	265	350	60	44 (73)	13 (30)	11 (25)	14 (31)	3 (7)	2 (5)	1 (2)	12	50	45	92	-	-	-	-	-	13	0,32	0,1	-	-	-	5,4	6	270	6,5	A	(0,8)	13 (-3)	13 (30)	11 (56)	4.290	88	0				0,1	-104
4 CONTINENTAL INTERC. (CIN)	41 TAKESMA		17.920	(1,4)	325	<100	5	4 (60)	1 (25)	0 (0)	3 (75)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	13	18	39	68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	600	7,5	E	-	-	-	-	5.490	98	0,1	0,1	+5	(85,6)	1 5	PRO FAV.		
	42 IERACHICH	42a Ouest Iben. 42b Est Iben.	51.200 13.200	64.400 (5,2)	380	<100	2	0 (0)	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	-	-	-	±3 (2&6)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
TOTAUX (Moyennes)	4 AQUIFERES (Moyennes)	10 UNITES HYDROGEOLOGIQUES 17 SECTEURS HYDROGEOLOGIQUES	632.950 (51,2)	-	-	-	1.518	1.258 (83)	596 (47)	323 (26)	214 (17)	47 (4)	58 (4)	20 (2)	13	-	[30]	-	13	17	10	-	-	-	-	-	-	-	[10]	134	-	-	11	77	52	36	-	1.992	296	296	-134	0,99	-			
AQUIFERES SUPERFICIELS OU DU RECOUVREMENT (QAT)			Indéterminées et dispersées	Varia bles	LA FLOPART DES FORAGES RECOUVRENT CES AQUIFERES MAIS NE LES CAPTENT PAS SEPAREMENT												0 à 10	(33)	105	0	(1&7)	-	-	-	720	530	7,0	N	-	-	-	-	-	AVEC AQUIP	-	-	-	AVEC AQUIP.	<5	PRO FAV.						
TOTAL MALI (Moyennes)			9 SYSTEMES AQUIFERES 23 UNITES HYDROGEOLOGIQUES 61 SECTEURS HYDROGEOLOGIQUES	1.240.000	-	12.751	8.480 (67)	5.225 (61)	1.865 (22)	971 (12)	197 (2)	157 (2)	65 (1)	16	-	[20]	-	70	210	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.416	-	-	238	334	257	76	-	2.257	2.096	1.810	-30	3,37	-			

Dans la perspective d'un développement intégré planifié à long terme, le facteur Eau en général, et eau souterraine en particulier, constitue un élément essentiel qui conditionne de fait l'ampleur que l'on peut donner à ce développement.

L'eau souterraine présente un avantage majeur par rapport aux autres ressources, c'est son ubiquité. C'est aussi souvent son inconvénient car, bien que présente partout, elle n'est pas partout exploitable dans les mêmes conditions. L'extrême variabilité de ses caractéristiques intrinsèques, notamment dans les formations fissurées, met en évidence les limites mais aussi l'intérêt de la présente synthèse et la nécessité de pousser plus loin la connaissance et le suivi de cette ressources dès lors qu'on prévoit d'en développer la mise en valeur dans le cadre d'une gestion appropriée de ce précieux capital que constitue l'eau souterraine.

9.2. RECOMMANDATIONS

La synthèse hydrogéologique est avant tout destinée à faire le point des connaissances sur les eaux souterraines au Mali en intégrant les très nombreuses informations acquises depuis les 20 dernières années. A ce titre, elle constitue une source d'information à la fois par excès, c'est à dire à partir de laquelle des activités d'un développement mieux adapté peuvent être planifiées et programmées et aussi par défaut, c'est à dire à partir de laquelle des programmes d'études complémentaires et d'activités spécifiques peuvent être identifiés afin de combler les lacunes ou vérifier les hypothèses et améliorer ainsi les connaissances sur les aquifères du Mali pour une meilleure gestion des ressources en eau souterraine.

9.2.1. Programmation, coordination, planification

Les données de base stockées dans la banque SIGMA et les résultats statistiques qu'elles ont permis d'établir selon leur répartition et distribution géographiques constituent un outil précieux pour l'identification et la programmation de nouveaux projets de mise en valeur des eaux souterraines compatibles avec les ressources disponibles. Elles sont suffisamment nombreuses et fiables pour permettre aussi de définir les caractéristiques techniques des ouvrages d'exploitation prenant en compte les conditions hydrogéologiques spécifiques à chaque zone concernée.

On sait par exemple que, dans les aquifères généralisés et dans la plupart des aquifères fissurés, les ressources exploitables sont suffisantes pour mettre en oeuvre des projets de développement à court et moyen termes, mais que, dans certains secteurs de l'aquifère de l'Infracambrien plissé et du Cambrien notamment, les ressources en eau souterraine sont moins abondantes, plus difficiles à mobiliser ponctuellement et elles peuvent être localement précaires nécessitant de sélectionner les projets sur des critères plus stricts. Dans les régions ouest et sud du Mali, les projets d'aménagement à partir des eaux de surface non pérenne doivent absolument être coordonnés avec les projets de mise en valeur des eaux souterraines afin d'utiliser d'une manière combinée et complémentaire toutes les ressources en eau disponibles, prenant ainsi en compte le fait que ces aménagements de surface constituent le plus souvent des zones préférentielles de réalimentation des aquifères fissurés. Les ressources en eau souterraine et de surface étant interdépendantes à l'échelle locale, leur mobilisation devra donc se faire sur des critères économiques et en fonction de l'utilisation prévue de manière à exploiter les ressources garantissant la plus grande pérennité du projet et la meilleure rentabilité des investissements.

Enfin, les projets d'exploitation par forage des aquifères profonds ne devront pas négliger les répercussions possibles sur le niveau phréatique de l'aquifère superficiel exploité par les points d'eau traditionnels qui resteront encore longtemps la principale source d'approvisionnement des populations rurales.

Dans tous les cas, la coordination dans le cadre d'une programmation planifiée de mise en valeur des ressources en eau est la condition et le préalable absolu à toute gestion saine et cohérente de ces ressources.

9.2.2. Standardisation, vérification, informatisation, traitement et diffusion des données

L'amélioration des connaissances sur les aquifères du Mali passe par l'archivage systématique sous une forme standardisée de toutes les données nouvelles devant être impérativement fournies par les projets d'hydraulique afin d'actualiser et d'exploiter périodiquement les fichiers de la banque SIGMA. Chaque responsable de projet doit être conscient que le non respect des standards établis par la DNHE pour la collecte et la présentation des données constitue un handicap sérieux pour la gestion des ressources en eau.

- Les données hydrogéologiques (par village ou par site d'exploitation) doivent être constituées et archivées en fin de projet à la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie et inclure toutes les données de base présentées sous forme standardisée : fiche d'inventaire avec plan de localisation, schéma d'interprétation photogéologique, données de la géophysique et des essais de production avec diagrammes d'interprétation, logs techniques et hydrogéologiques détaillés des forages, fiches d'analyse chimique et d'installation de pompe. Ces dossiers permettant l'actualisation et/ou la création des fichiers de la banque SIGMA (fichier géophysique et lithologique à créer notamment), constituent ainsi une source inestimable d'informations pour la gestion des ressources en eau souterraine ainsi que pour la programmation de nouveaux projets.
- La banque de données SIGMA devra donc être régulièrement actualisée grâce aux fiches de saisie de l'Unité informatique de la DNHE qui seront préparées par les projets en même temps que les dossiers. Ces fiches seront remises périodiquement (tous les mois si possible) à l'Unité informatique de la DNHE qui, après divers contrôles, les intégrera aux données existantes. Les projets équipés d'ordinateurs IBM compatibles pourront fournir ces données sous forme de disquettes directement utilisables par SIGMA après vérification. Les lacunes, les erreurs ou les omissions constatées sur les données anciennes devront être corrigées dans les fichiers existants.

Des annuaires par type de données devront être édités à la fin de chaque année, accompagnés de récapitulatifs statistiques et illustrés de cartes thématiques actualisées.

9.2.3. Ouvrages d'exploitation et de reconnaissance

9.2.3.1. Ouvrages d'hydraulique villageoise

Bien que les forages d'hydraulique villageoise soient en principe destinés à être équipés de pompes manuelles, ils ne devraient pas être systématiquement arrêtés dès l'obtention d'un débit de 1 m³/h et tubés en diamètre 5" 1/2. Lorsque ces forages intéressent des villages importants, notamment avec 1.000 habitants et plus, il est indispensable de se réserver la possibilité, si elle existe, de construire des ouvrages de plus grande capacité permettant d'envisager dans l'avenir une valorisation de ce potentiel. Par ailleurs, autre avantage, ceci permettrait également d'acquérir des données hydrogéologiques complémentaires précieuses dans le cadre du Schéma directeur. Ainsi les contrats d'exécution des forages devraient tenir compte de cette alternative et prévoir des profondeurs minimales de 60 à 80 m et des équipements en tubages de diamètre adapté au débit exploitable des ouvrages, c'est à dire permettant de mettre en place, si nécessaire, des pompes submersibles ou à traction animale. Lorsque des filons-couches doléritiques seront rencontrés par les forages, cas très fréquents dans les aquifères de l'Infracambrien tabulaire et du Cambrien, les forages devront être foncés jusqu'au mur des intrusions où se situe généralement une zone de perméabilité préférentielle de forte productivité. Le gain technique et économique justifie amplement l'investissement supplémentaire. Dans les contrats de forage, il est impératif qu'un pompage d'essai de 3 à 4 paliers de 1 heure chacun à débits croissants et séparés par un palier de remontée (paliers non enchaînés) soit systématiquement exécuté sur chaque ouvrage productif et que, sur les forages débitant 5 m³/h et plus, un essai à débit constant de 8 à 12 heures minimum de pompage soit prévu avec observations du rabattement dans les piézomètres ou forages voisins, s'il y en a.

9.2.3.2. Ouvrages d'hydraulique urbaine, industrielle, pastorale ou agricole

Les forages destinés aux adductions d'eau, aux usages industriels, pastoraux ou à l'irrigation doivent mobiliser des débits élevés, au moins supérieurs à 5 m³/h. Etant donné leur finalité, il sera nécessaire et justifié de réaliser des études géophysiques couvrant toute la zone de l'aquifère susceptible d'être affectée par une exploitation à gros débit. Elles permettront de définir les secteurs les plus favorables et les profondeurs optimales à atteindre pour obtenir les meilleurs débits. Les forages devront être équipés d'une colonne de captage en grand diamètre sur toute leur hauteur et comportant des sections crépinées de longueur suffisante pour limiter au maximum les pertes de charge. L'espace annulaire devra être rempli d'un massif filtrant de graviers ayant une granulométrie adaptée à celle de la formation aquifère captée. L'exécution systématique, préalablement à la mise en place de la colonne de captage, de carottages géophysiques, notamment d'un log Gamma-Ray, permettrait de localiser avec précision les horizons les plus perméables dans les aquifères de type intergranulaire et donc de localiser avec précision les parties à crépiner de la colonne de captage. Pour ce type d'ouvrage, les pompages d'essai en paliers non enchaînés et de longue durée à débit constant avec observations sur piézomètres sont une nécessité absolue, car la détermination des caractéristiques hydrauliques locales des aquifères est indispensable pour prévoir l'évolution à long terme des rabattements en phase d'exploitation et donc établir les conditions d'exploitation des ouvrages.

9.2.3.3. Autres ouvrages d'exploitation

Sur le plan méthodologique et technologique, si la méthode du forage au marteau fond-de-trou (appliquée aux aquifères fissurés) et celle au rotary (appliquée aux aquifères généralisés) sont les plus couramment utilisées, il existe d'autres techniques, plus lentes mais beaucoup moins onéreuses, qui n'ont pas été développées au Mali, notamment le forage au battage dans les zones alluviales et sédimentaires.

Les aquifères superficiels alluviaux, exploités essentiellement à partir des puits traditionnels et des puisards avec tous les inconvénients cités au chapitre 8 (notamment leur faible durée de vie), constituent une ressource en eau trop longtemps négligée par les projets et les techniques modernes. Or il s'agit d'une ressource disponible presque partout à faible profondeur, certes souvent en quantité limitée nécessitant la multiplicité des points de captage. Dans ces bas-fonds, pourraient être développées des techniques modernes comme le forage au battage ou le puits par forage en grand diamètre (type Benauto), mais surtout, lorsque l'eau est à quelques mètres sous le sol, des points filtrants d'installation simple, rapide et peu coûteuse donc facilement accessible aux villageois.

9.2.4. Moyens d'exhaure

En ce qui concerne les pompes à motricité humaine, outre les problèmes largement cités dans la littérature et repris dans le Schéma directeur (multiplicité des marques, difficultés d'entretien et d'approvisionnement en pièces de rechange, entre autres), le principal problème lié directement à l'eau souterraine est celui de la corrosion ; il a une forte incidence non seulement sur les investissements, mais aussi sur les coûts récurrents.

Le caractère souvent agressif des eaux des aquifères fissurés a ainsi amené les projets à mettre en place, dans les zones réputées à eaux agressives, des pompes équipées systématiquement de colonnes de refoulement en inox résistant à la corrosion ce qui a eu pour conséquence une augmentation significative des coûts d'aménagement. Or, ce caractère agressif des eaux est en général lié à certaines séquences lithologiques particulières à dominante gréseuse et quartzitique et aux roches granitiques ; il n'est donc pas présent partout. Ainsi l'équipement des forages avec des pompes résistantes à la corrosion ne devrait être décidé qu'après détermination de l'agressivité à partir de mesures de pH sur le terrain et d'analyses chimiques en laboratoire. L'économie ainsi réalisée justifiera largement le coût de ces mesures et analyses.

En ce qui concerne le choix du moyen d'exhaure, il doit faire l'adéquation entre plusieurs éléments d'appréciation :

- tout d'abord, le débit exploitable et le niveau dynamique correspondant. Ils déterminent les types de pompes techniquement et économiquement utilisables. Ainsi, si le débit est inférieur à 5 m³/h seule la pompe à motricité humaine (PMH) peut être envisagée et à la limite la pompe à traction animale et la pompe à énergie éolienne. Si le débit est supérieur à 5 m³/h, tous les types de pompes peuvent être installés depuis la PMH jusqu'à la moto-pompe en passant par la pompe à traction animale et la pompe à énergie solaire ou éolienne. Le choix devra alors être fait sur la base du second élément ;
- l'utilisation de l'eau pompée. Cet élément conditionne la rentabilité économique de l'investissement en fonction des différents types de pompe. Il ne s'applique en fait qu'aux cas de valorisation de l'eau à des fins commerciales (agriculture, élevage, industrie essentiellement) ;

- la capacité des bénéficiaires d'assurer la gestion du moyen d'exhaure. Le fonctionnement et l'entretien des pompes (quelquefois le remboursement de l'investissement) étant à la charge des bénéficiaires, le choix de la pompe doit tenir compte, outre l'élément précédent, du niveau (existant ou potentiel) d'organisation des bénéficiaires susceptible de garantir la pérennité de l'investissement sur le plan technique mais surtout sur le plan financier par le recouvrement des coûts auprès des utilisateurs (paiement de l'eau) ;
- enfin, la fiabilité technique et commerciale du type et de la marque de pompe. Il constitue également un critère déterminant pour la pérennité de l'investissement (durabilité de la pompe, approvisionnement en pièces de rechange, facilités locales de réparation) liée à la représentativité régionale du vendeur.

Concernant ce dernier élément, la situation au Mali est préoccupante, surtout au niveau des pompes à motricité humaine. L'Etat a essayé tant bien que mal de créer et de maintenir des réseaux d'entretien /réparation, de les privatiser progressivement et d'impliquer de plus en plus les bénéficiaires, sans que la réussite soit à la hauteur des efforts. Le taux de pompes en fonctionnement n'est pas connu, mais il est facile de constater que le plus souvent, lorsqu'un projet d'hydraulique villageoise est achevé, la situation des pompes se dégrade rapidement, l'Etat n'ayant ni le personnel, ni les moyens financiers et matériels pour assurer la couverture complète de l'entretien de ces pompes. La privatisation totale de ce secteur est la seule alternative susceptible d'apporter une solution durable à ce problème. Encore faut-il que cette solution soit "attrayante", c'est-à-dire rentable, si l'on veut que les opérateurs économiques s'y intéressent. Avant toutes choses, l'Etat doit instituer le libre-jeu de la concurrence et s'opposer à toute situation de monopole. Ensuite, l'Etat doit mettre en oeuvre des mesures incitatives sur les plans administratif et financier, telles que l'exonération des droits de douane sur l'importation des pompes et des pièces, l'obligation des projets de recourir au marché local par appel d'offres, seule manière de garantir le marché, la création d'un Fonds de l'Eau donnant la possibilité aux communautés de s'équiper selon leur propre volonté et possibilités, la mise en place d'un système d'aide à la création d'entreprise privées pour la fabrication locale des pièces de pompes, sinon des pompes elles-mêmes, pour la mise en place de réseaux de distribution et de réparation fortement décentralisés. Tous ces avantages devraient se traduire, en contre-partie, par une définition précise, contractuelle, des droits et obligations de chaque partie : Etat, Secteur privé et Bénéficiaires. Enfin, pour intéresser d'avantage le Secteur Privé, la vente, l'installation et l'entretien des pompes devraient être associés à d'autres activités commerciales relatives notamment au secteur de l'eau, telles les équipements et travaux de forages et de puits, les équipements d'adduction d'eau, les équipements d'irrigation.

9.2.5. Réseaux de surveillance des eaux souterraines

La gestion rationnelle d'une ressource et la planification de son exploitation passent impérativement par une amélioration constante de la connaissance de cette ressource, tant sur le plan quantitatif que qualitatif. L'eau souterraine étant une ressource renouvelable mais épuisable, le suivi continu de son évolution en fonction des entrées et des sorties naturelles ou provoquées constitue une obligation fondamentale et une responsabilité formelle de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie.

9.2.5.1. Réseau de suivi piézométrique

Le réseau de 220 points d'observation mis en place et géré par les projets PNUD/DCTD depuis le début des années 80 avec la collaboration d'autres projets d'hydraulique villageoise reste encore incomplet. Il devra être étendu et, dans certaines zones, spécialisé. D'une manière générale, le réseau aura pour objectifs :

- a) de suivre l'évolution des niveaux piézométriques sur tous les sites où les pompes sont importants (adductions d'eau et industries en particulier) afin d'identifier à temps une éventuelle surexploitation locale,
- b) d'étudier la recharge naturelle ou artificielle, permanente ou périodique, des aquifères par les eaux de surface le long des rivières, en bordure des plaines d'inondation, à l'aplomb des ouvrages de retenue, autour des lacs et mares et à partir des zones de grande irrigation (Office du Niger par exemple),
- c) d'établir périodiquement, par les moyens de l'informatique, un état des ressources en eau souterraine sur l'ensemble du Mali et leur bilan.

Pour ce faire, la DNHE doit imposer à tout projet d'hydraulique de quelque envergure la création de piézomètres d'observation dont la densité sera à fixer en fonction de la situation existante et des besoins de contrôle et de suivi.

9.2.5.2. Réseau de suivi hydrochimique

Mis à part le suivi bactériologique des eaux de consommation, les analyses chimiques périodiques exécutées sur quelques forages exploitant les aquifères fissurés ont montré des variations saisonnières et annuelles naturelles des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines. En outre, le développement de l'exploitation pourrait aussi entraîner des modifications de la composition chimique soit en mobilisant des eaux anciennes ou plus profondes et plus minéralisées, soit au contraire en recyclant une part plus importante des eaux de recharge actuelle peu minéralisées. Des analyses chimiques périodiques sur un réseau de forages d'observation couplé avec le réseau d'observation piézométrique et celui du suivi de l'exploitation permettraient une meilleure compréhension des transferts hydrauliques dans les milieux fissurés et entre aquifères fissurés et aquifères superficiels. Le suivi de l'agressivité des eaux est également un impératif économique.

9.2.5.3. Réseau de suivi de l'exploitation

L'exploitation est l'un des éléments importants du bilan des aquifères et de leur gestion. Il est donc essentiel d'en connaître le mode et le volume le plus précisément possible. Ainsi, les principaux utilisateurs exploitant les eaux souterraines à partir de forages équipés de pompes à gros débit (plus de 100 m³/j par exemple) devraient avoir l'obligation d'installer des compteurs et de remplir et transmettre à la DNHE des fiches d'exploitation aux fins d'informatisation. Pour les autres exploitations, des enquêtes sur les débits effectivement exploités seront faites à partir de mesures sur le terrain et des informations données par les exploitants. Notamment, en ce qui concerne les pompes manuelles, l'actualisation régulière des fichiers d'installation et d'entretien de ces pompes dans la base SIGMA complétée par des enquêtes ponctuelles sur les volumes et les durées journalières de pompage, permettra de suivre l'évolution de ce mode d'exploitation. Enfin, lors des inventaires villageois, une attention plus grande devra être accordée au régime d'exploitation des points d'eau traditionnels sur un certain nombre de villages représentatifs afin d'arriver, par extrapolation, à des valeurs plus significatives que celles estimées jusqu'à présent de façon très schématique.

9.2.6. Etudes complémentaires

La préparation de la synthèse hydrogéologique a mis en évidence d'une part les régions et aquifères, d'autre part les domaines de connaissance où les données de base sont insuffisantes, ce qui a nécessité de formuler des hypothèses ou d'introduire des approximations qui demandent à être contrôlées ou précisées par des études régionales et thématiques ou spécifiques qui concernent en définitive le potentiel des eaux souterraines effectivement exploitable à long terme.

9.2.6.1. Etudes hydrogéologiques régionales

Bien que les données sur les ressources en eau souterraine des zones désertiques peu peuplées du nord-est et du nord du Mali soient très fragmentaires, incomplètes ou même inexistantes, le coût des reconnaissances dans ces régions est tel qu'on se limitera à des études de faisabilité à exécuter dans le cadre et la zone des projets de développement envisagés dans ces régions.

Par contre, dans les aquifères fissurés de l'ouest et du sud du Mali et bien que les nombreux forages d'hydraulique villageoise aient permis d'atteindre un bon niveau de connaissance sur la partie supérieure du milieu fissuré et de ses relations avec l'aquifère superficiel, il serait très utile d'exécuter des forages de reconnaissance profonde pour étudier les zones fissurées au-delà de 80 - 100 m sur lesquelles les données sont rares. Quelques forages de 150 à 200 m de profondeur devraient être ainsi réalisés dans les différentes unités d'aquifères fissurés afin de recouper les séquences lithologiques représentatives des principaux faciès. Cette reconnaissance devra comporter la mesure des niveaux piézométriques correspondant aux principales venues d'eau observées, ce qui permettrait d'avoir des informations plus précises sur les transferts hydrauliques au sein du milieu fissuré profond. Les caractéristiques hydrochimiques et isotopiques des principales venues d'eau devront également être déterminées afin d'estimer les taux de renouvellement à différentes profondeurs. Quelques forages de reconnaissance pourraient aussi être exécutés sur les grandes fractures d'extension régionale pour vérifier l'hypothèse, basée sur les données actuellement disponibles, selon laquelle les accidents ne constituent pas des axes de perméabilité préférentielle.

En ce qui concerne les aquifères généralisés du centre et de l'est du Mali, les zones où les eaux souterraines sont susceptibles d'être développées à court ou moyen terme, ont déjà été pour la plupart reconnues et les données sont suffisantes pour l'identification et la préparation des programmes s'y rapportant. Des reconnaissances complémentaires ne seraient nécessaires que sur les aquifères des formations continentales de la région de Gao où, en raison de la variabilité de la salinité, de l'irrégularité spatiale des eaux et de l'hétérogénéité de la lithologie des niveaux, la densité des données disponibles est encore insuffisante.

9.2.6.2. Etudes thématiques

Trois types d'étude mériteraient d'être menées :

- l'étude de l'évapotranspiration à partir des nappes,
- l'étude des relations eau de surface - eau souterraine,
- l'étude des aquifères des formations de recouvrement (aquifères superficiels).

Ces trois thèmes d'étude sont, dans une certaine mesure, interdépendants et devraient être abordés de façon intégrée. La méthodologie proposée comporte deux volets d'activités :

- des études détaillées sur des secteurs types représentatifs de la diversité des conditions climatiques, géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques des aquifères du Mali;
- une généralisation des résultats à partir du traitement et de l'interprétation des images satellitaires de différents types prises à des époques caractéristiques et calées à partir des données générées par les études de terrain.

Cette approche, de type semi-quantitatif, implique un volume de travaux de terrain relativement réduit, bon nombre d'information étant accessibles à partir des données de base archivées à la DNHE ou pouvant être rassemblées sur le terrain sans investissements importants. Le suivi régulier des réseaux d'observation tels qu'ils ont été définis précédemment est toutefois indispensable. Elle requiert, par contre, la participation active d'organismes de recherche scientifique et universitaires, notamment de ceux qui ont déjà des programmes de recherche dans les domaines d'étude qui sont proposés.

a) Etudes de l'évapotranspiration à partir des nappes

Les recherches concernent principalement l'étude des mouvements d'eau sous forme liquide ou à l'état de vapeur dans la zone dénoyée des aquifères. Le choix des secteurs types pour les études détaillées devra être fait de manière à représenter notamment différentes profondeurs de la surface piézométrique et la diversité des caractéristiques des formations de recouvrement et de celles de la zone dénoyée en général.

Les techniques d'études isotopiques, hydrochimiques et pédologiques seront utilisées avec des mesures et des prélèvements "in situ", complétées par des analyses de laboratoire et la préparation de modèles mathématiques de simulation.

b) Etudes des relations eau de surface - eau souterraine

Elles concerneront en priorité le secteur du delta intérieur et l'aquifère du Continental terminal/Quaternaire de la vallée du Niger. Une réinterprétation des données hydrologiques permettra une nouvelle évaluation des pertes d'écoulement du fleuve et de leurs variations saisonnières et interannuelles. L'importance des pertes par évaporation sur les plans d'eau à surface libre ou par évapotranspiration à travers les cultures sera estimée à partir des superficies délimitées sur les images satellitaires.

Des prospections géophysiques complémentaires et quelques forages de reconnaissance ainsi qu'une campagne de pompages d'essai devront être exécutés dans les secteurs d'étude afin de préciser les caractéristiques granulométriques et hydrauliques des formations continentales et leurs variations latérales et verticales de faciès.

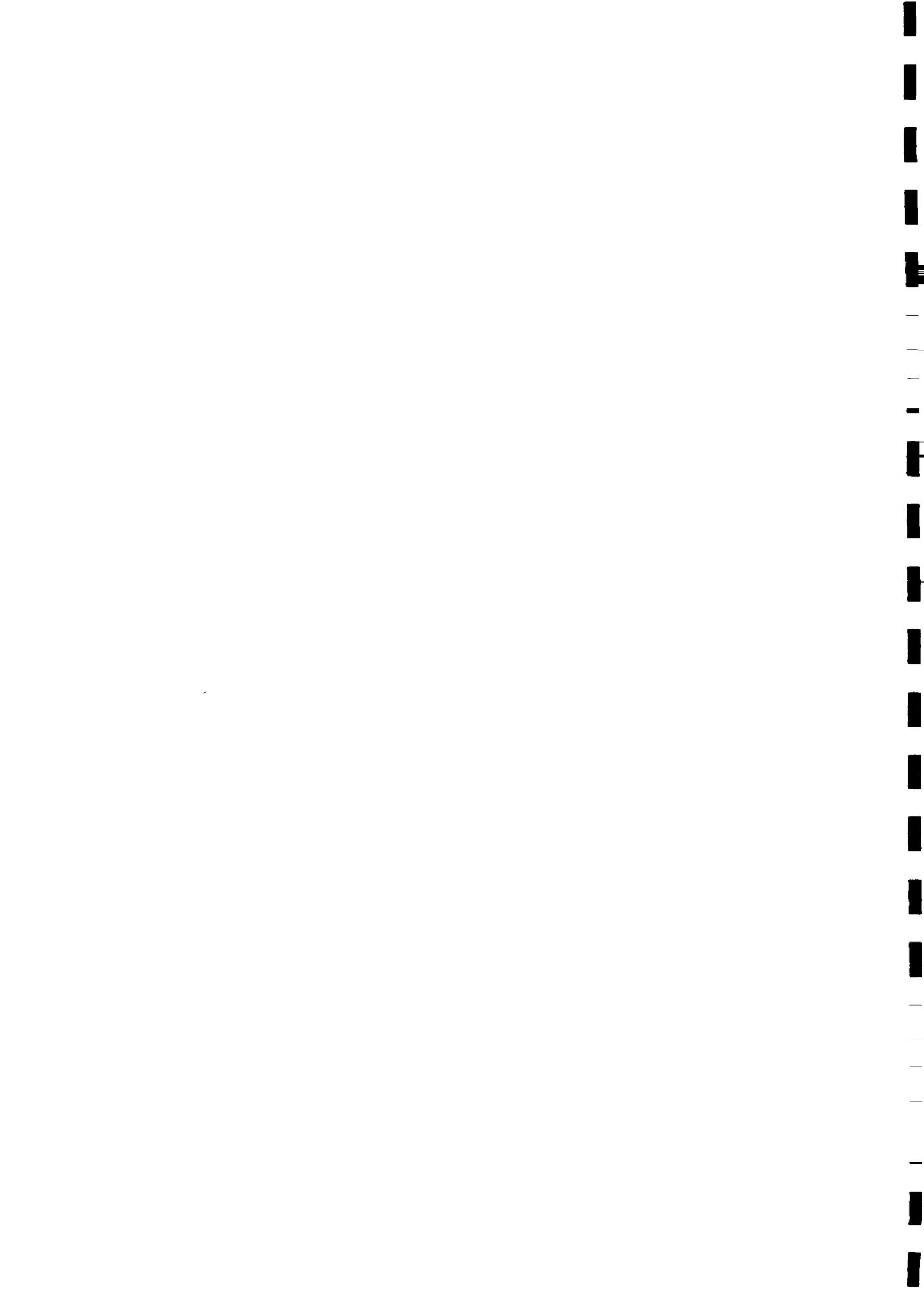
Des analyses isotopiques supplémentaires devront être faites afin de vérifier les vitesses moyennes de transfert de l'eau dans la zone saturée.

Enfin des études locales seront réalisées en combinaison avec les études hydrologiques de bassins versants représentatifs réalisées dans le cadre des projets d'aménagement d'eau de surface. Elles devraient permettre d'évaluer l'apport des nappes à l'écoulement de surface dans les secteurs où le réseau hydrographique est en situation de drainage (aquifère du socle de la zone soudanienne) ainsi que la recharge locale des nappes par infiltration de l'écoulement de surface saisonnier dans les zones où le réseau hydrographique est perché au-dessus du niveau piézométrique des aquifères (aquifères de l'Infracambrien tabulaire et du Cambrien de la zone soudano-sahélienne).

c) Etude des aquifères des formations de recouvrement

Ces aquifères superficiels ont jusqu'à présent été peu étudiés bien qu'ils supportent la majeure partie de l'exploitation actuelle des eaux souterraines (points d'eau traditionnels) et participent d'une manière indirecte à celle des aquifères fissurés sous-jacents. Les secteurs d'étude devront être répartis dans les différentes zones climatiques et être représentatifs des principaux types de formations lithologiques du substratum.

La réinterprétation des nombreuses données géophysiques disponibles et des coupes de forage d'hydraulique villageoise devrait permettre de définir l'épaisseur et la nature des formations de recouvrement dans les secteurs d'étude. Ces informations seront complétées par des levés sur le terrain, par l'interprétation des photographies aériennes pour délimiter leur extension et par des pompages d'essai dans les points d'eau traditionnels pour estimer leurs caractéristiques hydrauliques. Quelques forages de reconnaissance peu profonds seront aussi nécessaires ainsi que des analyses de laboratoire sur des échantillons pour déterminer les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau. Le choix et le suivi régulier de points d'observation piézométrique et hydrochimique sera aussi nécessaire pour permettre une meilleure connaissance des relations hydrauliques entre ces aquifères superficiels et les aquifères profonds sous-jacents.

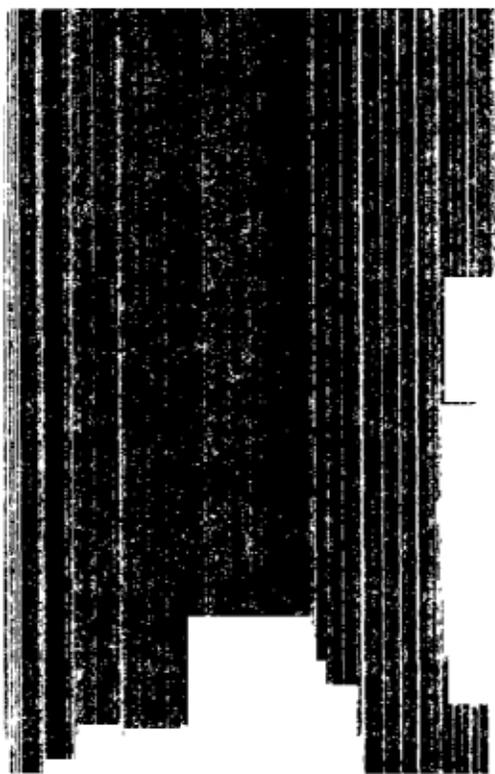


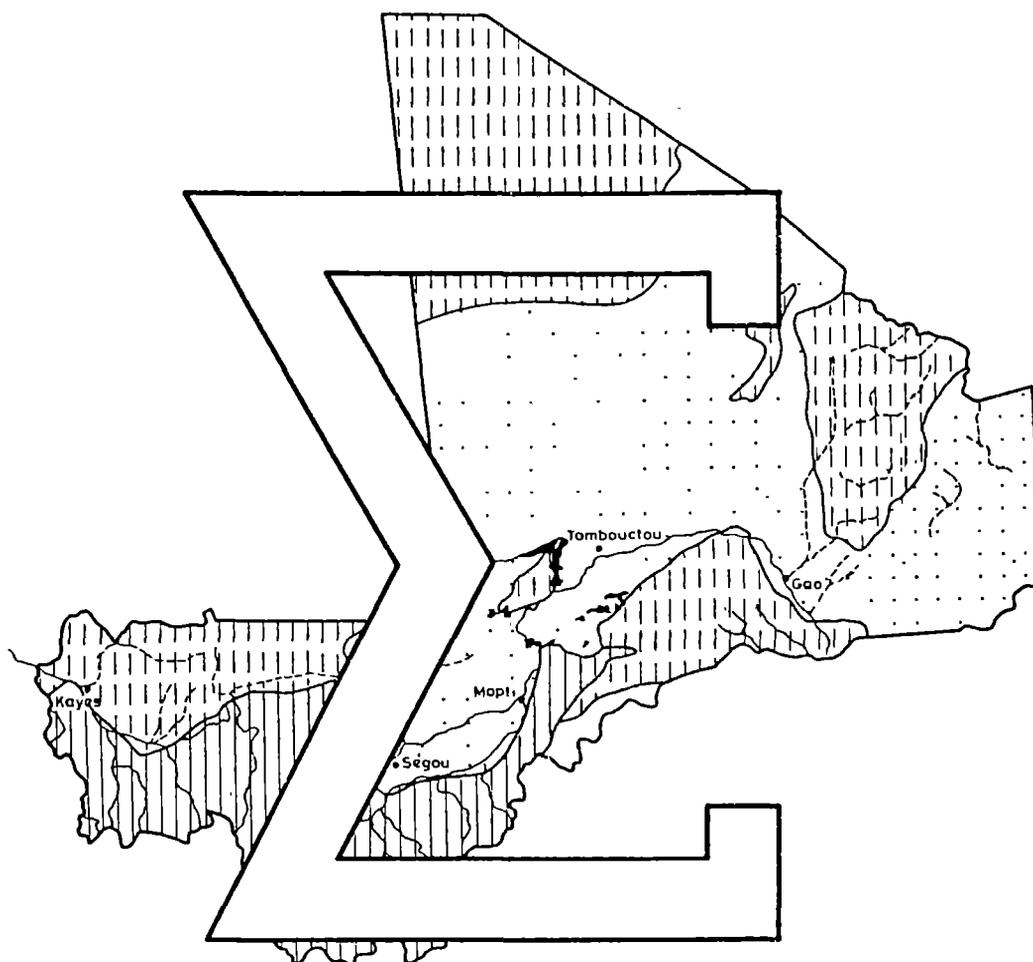




[Redacted text]

[Redacted text]



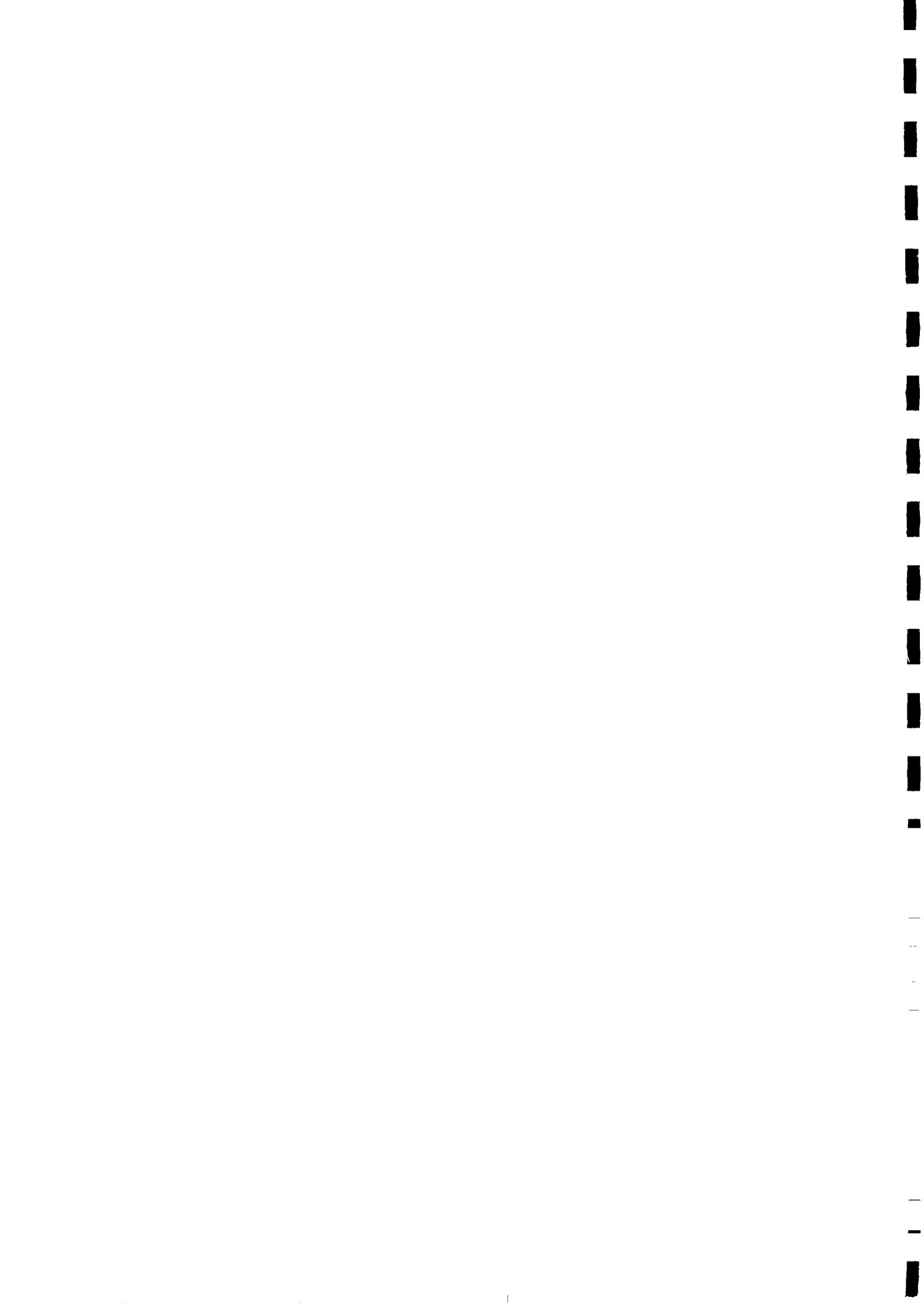


SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

ANNEXE 1

BIBLIOGRAPHIE

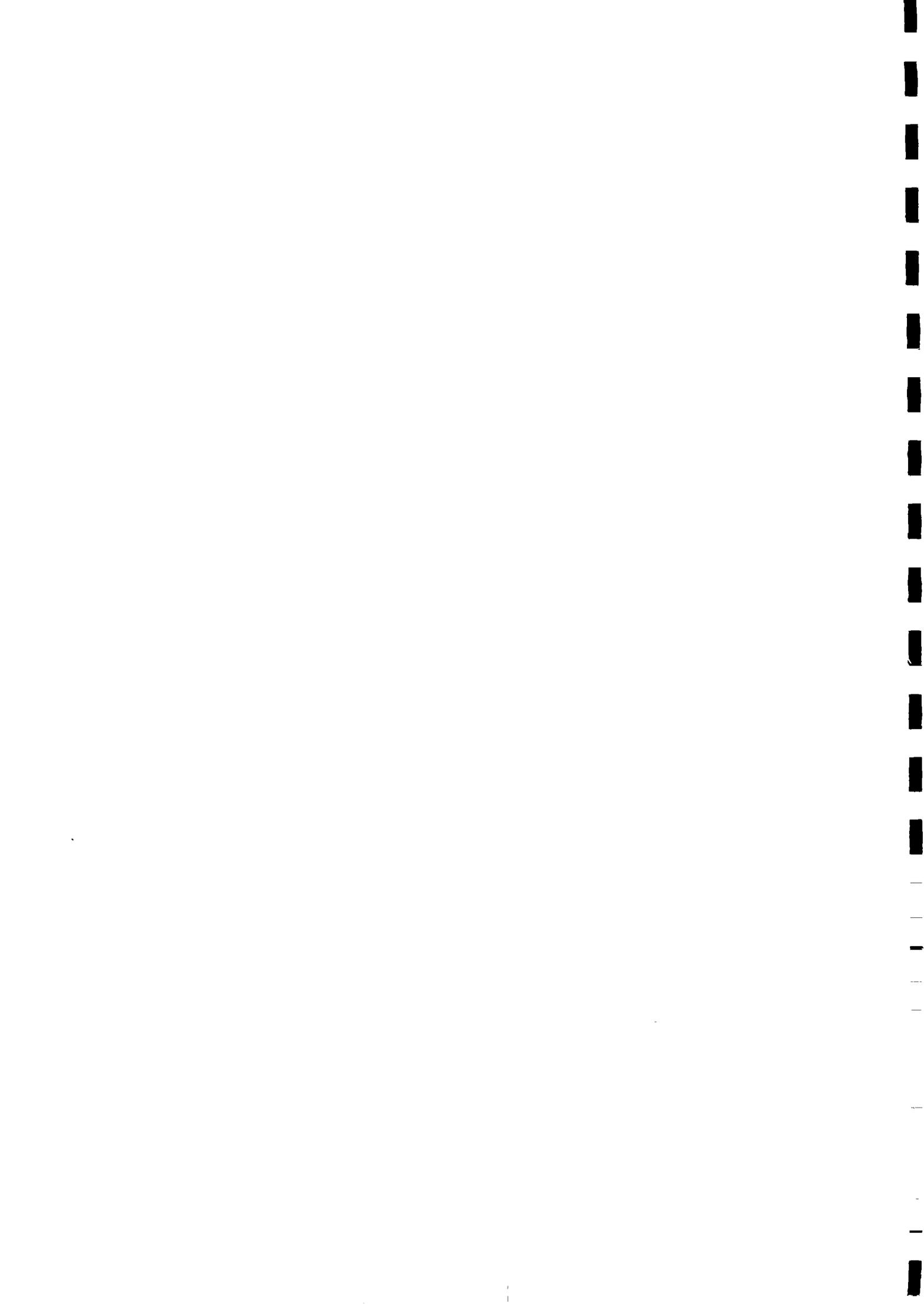
RAPPORTS ET DOCUMENTS
ELABORES ET DIFFUSES
PAR LE PROJET MLI/84/005
ENTRE OCTOBRE 1984 ET JUILLET 1990



ANNEXE 1

TABLE DES MATIERES

- SYSTEME DE CODIFICATION.....	1
- Rapports HDG/NTL/1 à 22.....	2
- Rapports HDG/RGL/1 à 21.....	3
- Rapports INF/ANN/1 à 6.....	5
- Rapports INF/RPT/1 à 5.....	5
- Rapports INF/STA/1 à 6.....	6
- Rapports INF/PRG/1 à 3.....	6
- Rapports INF/FMT/1 à 4.....	6
- Rapports SDM/GNL/1 à 14.....	7
- Rapports SDM/ENP/1 à 5.....	8
- Rapports SDM/AEP/1 à 6.....	8
- Rapport SDM/HPL/1.....	8
- Rapport SDM/IRG/1.....	9
- Rapports SDM/ECO/1 et 2.....	9
- Rapports SDM/SOC/1 à 5.....	9
- Rapports DIV/1 à 8.....	10



ANNEXE 1

BIBLIOGRAPHIE

SYSTEME DE CODIFICATION DES DOCUMENTS PAR CATEGORIE ET SPECIALITE

CODE

- HDG/ : Rapports essentiellement hydrogéologiques :
 - . NTL : - concernant l'ensemble du Mali ou thématiques
 - . RGL : - concernant des études/travaux localisés

- INF/ : Rapports essentiellement informatiques :
 - . ANN : - annuaires de données
 - . RPT : - répertoires de données
 - . PRG : - programmes informatiques/logiciels
 - . FMT : - formation, cours et programmes
 - . STA : - traitements statistiques des données

- SDM/ : Rapports établis dans le cadre du Schéma Directeur :
 - . GNL : - rapports généraux
 - . ENP : - eaux de surface non pérennes
 - . AEP : - alimentation en eau potable
 - . IRG : - irrigation
 - . HPL : - hydraulique pastorale
 - . ECO : - aspects économiques
 - . SOC : - aspects sociologiques

- DIV/ : Rapports divers

Remarque :

Les références des documents sont citées dans le texte de la synthèse hydrogéologique entre crochets [], classées selon la codification indiquée ci-dessus et numérotées dans l'ordre chronologique pour chaque code.

HDG / N° L

- 1 - Interprétation des variations piézométriques et évaluation des ressources renouvelables. Avril 1984
- 2 - Recherche d'eaux souterraines en zones doléritiques. Octobre 1984
- 3 - Note sur les observations piézométriques au Mali. Juin 1985
- 4 - Essais de simulation de la recharge du système aquifère Infra-Cambrien sur micro-ordinateur. Juin 1985
- 5 - Une analyse des pompages d'essai à l'aide du logiciel LOTUS 123. Janvier 1987
- 6 - Les eaux souterraines du Mali dans "Les Eaux Souterraines de l'Afrique Septentrionale et Occidentale" Publication Nations Unies. ST:TCD:5 Série Eau n° 18. 1987
- 7 - Surveillance des nappes du Mali : réseau piézométrique national 1981-1988. Octobre 1988
- 8 - Carte piézométrique du Mali et notice explicative. Novembre 1988
- 9 - Essai d'interprétation des fluctuations du niveau des nappes observées sur le réseau piézométrique du Mali durant la période 1981-1988. Février 1989
- 10 - Résultats et interprétation des analyses isotopiques réalisées au Mali jusqu'au 31 Décembre 1988. Août 1989
- 11 - Inter-régional seminar and Study tour on water resources planning and management in arid areas (16 - 25 october 1989) : malian contribution paper-Soungalo TOGOLA. September 1989
- 12 - Caractéristiques hydro-chimiques des aquifères du Mali. Septembre 1989
- 13 - Review on the available data collected by the différent drilling projects in Mali and the significance of the estimated well and aquifer characteristics. Octobre 1989.
- 14 - Investigation of the effect of the use of different pumping test methods on the calculation of the transmissivity and storage coefficient. Octobre 1989
- 15 - Données sur les relations "eau de surface/eau souterraine" au Mali. Octobre 1989
- 16 - Synthèse hydrogéologique : essais de simulation de la recharge de différents systèmes aquifères du Mali par le modèle SIMERO. Novembre 1989

- 17 - Synthèse hydrogéologique : simulation globale par modèle mathématique des aquifères du Mali en régime permanent. Février 1990
- 18 - Synthèse hydrogéologique : simulation par modèle mathématique des aquifères de 5 secteurs hydrogéologiques caractéristiques du Mali. Avril 1990
- 19 - Caractéristiques hydrauliques des aquifères du Mali (document de travail non édité). Juin 1990
- 20 - Evolution piézométrique observée sur quelques sites de forages d'exploitation (document de travail non édité). Juin 1990
- 21 - Ressources exploitables et exploitation des eaux souterraines (document de travail non édité). Juin 1990
- 22 - Données générales et statistiques sur les aquifères du Mali (document en préparation).

HDG / RGL

- 1 - Evolution piézométrique dans le réseau d'observation de la région du projet PNHU D MLI/84/005, entre 1984 et Mars 1985. Avril 1985
- 2 - Rapport de mission (6 au 20 Juin 1985) : exemple d'étude de ressources en eau d'un bassin versant du plateau mandingue sur modèle mathématique de simulation d'écoulement - Philippe PALLAS. Juin 1985
- 3 - Rapport sur les travaux exécutés à Sansanding - Niono - Nampala dans le cadre du programme UNICEF-OMS. Mars 1986
- 4 - Rapport d'avancement (15 Janvier - 15 Avril 1986) du Programme d'Urgence d'Hydraulique Villageoise UNICEF-USAID. Mai 1986
- 5 - Projet d'adduction d'eau de Koutiala : rassemblement des données pour l'étude hydrogéologique complémentaire. Mai 1986
- 6 - Réalisation de 64 forages d'hydraulique villageoise dans les Cercles de Niono, Niafunké et Tenenkou dans le cadre du Programme d'Urgence UNICEF-USAID : rapport final. Novembre 1986
- 7 - Etude et suivi des nappes d'eau souterraine dans la zone du delta intérieur du Niger : rapport d'avancement. Janvier 1987
- 8 - Projet UNICEF "Mopti-Tombouctou" : rapport intérimaire sur les travaux de forage réalisés entre Janvier 1984 et Juillet 1986. Février 1987

- 9 - Rapport sur l'exécution de 13 forages dans l'Arrondissement de Moninnpé (Cercle de Macina) dans le cadre du Programme d'Urgence complémentaire d'hydraulique villageoise de l'UNICEF-USAID. Avril 1987
- 10 - Etude hydrogéologique pour l'adduction d'eau de la ville de San : note récapitulative sur les études et travaux de reconnaissance réalisés par le projet MLI/84/005. Mai 1987
- 11 - Etude hydrogéologique complémentaire pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de san - Contrat DNHE/BAD. Août 1987
- 12 - Etude hydrogéologique complémentaire pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Bougouni - Contrat DNHE/BAD. Novembre 1987
- 13 - Etude hydrogéologique pour l'adduction d'eau de la ville de Goundam : rapport technique (Financement ACIDI - Canada). Décembre 1987
- 14 - Projet UNICEF "Mopti-Tombouctou" : rapport final. Janvier 1988
- 15 - Etude hydrogéologique de la Région de San : simulation de l'écoulement souterrain sur modèle mathématique. Mai 1988
- 16 - Etude géoélectrique du détroit soudanais : rapport de stage - Mlle B. SALZMANN. Juillet 1988
- 17 - Note récapitulative sur l'état des connaissances sur les ressources en eau souterraine dans la zone de Koutiala. Février 1989
- 18 - Rapport final DCTD des projets "Route du Sel" MLI/80/005 et MLI/84/027 : conclusions et recommandations. Juin 1989
- 19 - Reconnaissance hydrogéologique préliminaire sur les sites de cultures oasiennes identifiés dans le Cercle de Kidal - Région de Gao (rapport de mission 2 - 15 Mars 1990) Mars 1990
- 20 - Supervision et interprétation de la campagne de travaux de reconnaissance sur les sites de cultures oasiennes identifiés dans le Cercle de Kidal - Région de Gao (rapport de mission 7 Mai - 3 Juin 1990). Juin 1990
- 21 - Maintenance des pompes manuelles couvertes par la base de Niono (projet DNHE/UNICEF/W-022) : statistiques et synthèse. Juin 1990

INF / ANN

- 1 - Annuaire des forages du Mali exécutés depuis 1956 jusqu'en Juillet 1985. Décembre 1985
- 2 - Atlas des cartes au 1/400.000 de localisation des forages du Mali : fascicule I (1956 - Juillet 1985). Décembre 1985
- 3 - Annuaire des forages du Mali - Fascicule n° 1 : forages réalisés entre Octobre 1985 et Septembre 1987. Décembre 1987
- 4 - Annuaire des forages du Mali - Fascicule n° 2 : forages réalisés entre Octobre 1986 et Septembre 1987. Décembre 1987
- 5 - Annuaire des forages du Mali - Fascicule n° 3 : forages réalisés entre Octobre 1987 et Septembre 1988. Décembre 1988
- 6 - Atlas des cartes 1/400.000 de localisation des forages du Mali actualisé au 31 Décembre 1988. Août 1989

INF / RPT

- 1 - Répertoire des villages du Mali (au 31/12/89). Février 1989
- 2 - Répertoire des forages du Mali au 31/12/88. Mai 1989
- 3 - Répertoire des pompages d'essai réalisés au Mali jusqu'au 31/12/88 : données et résultats. Mai 1989
- 4 - Répertoire des pompes manuelles et solaires du Mali au 31 Décembre 1988. Juillet 1989
- 5 - Répertoire des analyses chimiques sur les ressources en eaux du Mali au 31 Décembre 1988. Août 1989

INF / STA

- 1 - Etude statistique sur les forages hydrauliques du Mali. Février 1988
- 2 - Note de synthèse sur le traitement statistique des forages hydrauliques du Mali. Février 1988
- 3 - Données statistiques sur les forages d'hydraulique actualisées au 31 Juillet 1988 - Récapitulation par Circonscription Administrative. Février 1989
- 4 - Données statistiques sur les pompes installées au Mali au 31 Décembre 1988. Août 1989
- 5 - Report on statistical analysis of pumping test data collected in Mali through 31 December 1988. September 1989
- 6 - Report on the verification of the transmissivity and storage coefficient values entered in the Database SIGMA. Octobre 1989

INF / PRG

- 1 - Notice d'utilisation du Logiciel OMEGA "Système Opérationnel de Maintenance des Equipements et de Gestion Administrative". Février 1988
- 2 - Notice d'utilisation du Logiciel SIGMA "Système Informatique de Gestion des ressources en eau du Mali". Mars 1988
- 3 - SIGMA : actualisation de la Banque de données sur les ressources en eau. Présentation de la fiche de saisie "Forage, pompage d'essai et pompes". Octobre 1989

INF / FMT

- 1 - Propositions pour la formation des cadres locaux de l'Unité d'Informatique. Octobre 1988
- 2 - Programme de formation des Ingénieurs DNHE affectés à l'Unité d'Informatique - Pierre WALRAEVENS. Octobre 1989
- 3 - Formation en informatique (1ère partie). Décembre 1989
- 4 - Formation en informatique : présentation du Réseau Artisanal de Transfert (RAT). Décembre 1989.

SDM / GNL

- 1 - Dossiers techniques pour la réunion thématique sur l'hydraulique villageoise des 24 - 25 Septembre 1985. Avril 1985
- 2 - Rapport de mission sur l'hydraulique villageoise (6 - 20 Juin 1985) : document de synthèse préparé pour la réunion des Bailleurs de Fonds des 24 - 25 Septembre 1985 - Philippe PALLAS. Août 1985
- 3 - Proposition de réorganisation de la DNHE en vue d'institutionnaliser et de structurer la gestion et la planification des ressources en eau du Mali. Décembre 1986
- 4 - Rapport de mission de consultation en planification du 12 Février au 12 Mars 1987 - N'Guyen Quang TRAC. Mars 1987
- 5 - Rapport de mission sur l'identification préliminaire d'un Schéma Directeur de Mise en Valeur des Ressources en Eau du Mali, du 3 au 23 Avril 1988- François MORTIER. Avril 1988
- 6 - Rapport de la 1ère mission pluridisciplinaire du Schéma Directeur de mise en Valeur des Ressources en Eau du Mali, du 10 au 30 Novembre 1988- François MORTIER. Décembre 1988
- 7 - Estimation de la population rurale en 1987, 1992, 1995 et 2000 - Répartition suivant la taille des localités. Février 1989
- 8 - Potentiel d'exploitation des eaux souterraines dans les Centres Ruraux du Mali. Mars 1989
- 9 - Données de base sur les forages existants au 31/12/88 dans les Centres ruraux (Annexe du rapport "Potentiel d'exploitation des eaux souterraines dans les Centres Ruraux du Mali"). Mars 1989
- 10 - Rapport de la 2e mission pluridisciplinaire du Schéma Directeur de Mise en Valeur des Ressources en Eau du Mali, du 30 Mars au 13 Mai 1989 - François MORTIER. Mai 1989
- 11 - Rapport de la 3e mission pluridisciplinaire du Schéma Directeur de Mise en Valeur des Ressources en Eau du Mali, du 27 Juillet au 23 Août 1989- François MORTIER. Août 1989
- 12 - Rapport de la 4e mission pluridisciplinaire du Schéma Directeur de Mise en Valeur des Ressources en Eau du Mali, du 5 Octobre au 15 Novembre 1989- François MORTIER. Novembre 1989
- 13 - Schéma Directeur de mise en valeur des ressources en eau du Mali. Rapport et annexe (document provisoire). Février 1990
- 14 - Conférence Nationale sur le Secteur de l'Eau au Mali : Bamako, 25-28 Juin 1990. Communications, conclusions et recommandations. Juin 1990

SDM / ENP

- 1 - Rapport de mission (10 - 30 Novembre 1988) : mise en valeur des ressources en eau non-pérennes au Mali - Jean MARION. Novembre 1988
- 2 - Rapport de mission (10 - 29 Avril 1989) : ressources en eau de surface non-pérennes - Jacques CLAUDE. Avril 1989
- 3 - Rapport de mission (12 Avril - 3 Mai 1989) : mise en valeur des ressources en eau non pérennes au Mali - Michel COURTAUD. Mai 1989
- 4 - Rapport de mission (9 Octobre - 15 Novembre 1989) : utilisation des ressources en eau de surface non pérennes au Mali - Rapport final - Jacques CLAUDE et Michel COURTAUD. Octobre/Novembre 1989
- 5 - Etude des eaux de surface non pérennes : proposition pour le choix et l'équipement des bassins versants caractéristiques pour les campagnes 1990 et 1991. Avril 1990

SDM / AEP

- 1 - Note de présentation d'un projet d'adductions d'eau sommaires à partir des eaux souterraines pour les Centres Ruraux. Janvier 87
- 2 - Rapport de mission (10 - 30 Novembre 1988) : alimentation en eau des villages - François MORTIER. Novembre 1988
- 3 - Rapport sur l'approvisionnement en eau en milieu rural préparé pour le 3e Atelier National de la Décennie Internationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (DIEPA). Conclusions et Recommandations. Décembre 1988
- 4 - Rapport de mission (13 Avril - 2 Mai 1989) : alimentation en eau des Centres Ruraux de 2.000 à 5.000 habitants - Mamadou DIOP. Mai 1989
- 5 - Rapport de mission (3 - 23 Août 1989) : rapport final sur l'alimentation en eau potable et l'assainissement des Centres Ruraux de 2.000 à 10.000 habitants - Mamadou DIOP. Août 1989
- 6 - Alimentation en eau des villages (Document de travail) - François MORTIER. Octobre 1989

SDM / HPL

- 1 - Rapport de mission (13 Avril - 11 Mai 1989) : élevage et hydraulique pastorale - Pierre PONSARDIN. Mai 1989

SDM / IRG

- 1 - Rapport de mission (30 Mars - 13 Mai 1989) : irrigation à partir des eaux souterraines - François MORTIER. Mai 1989

SDM / ECO

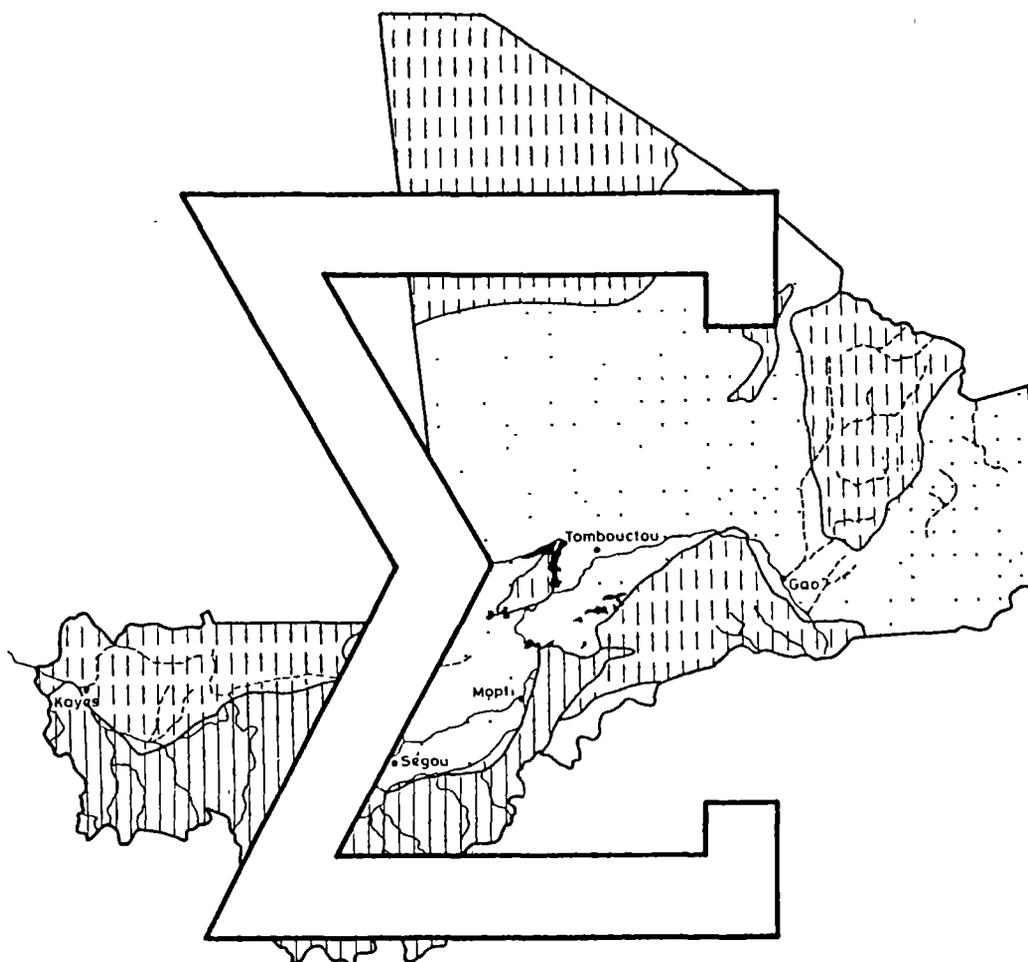
- 1 - Rapport de mission (10 - 30 Novembre 1988) : conditions et contraintes agro-économiques d'utilisation de l'eau - Jacques GUILLAUMAUD. Novembre 1988
- 2 - Rapport de mission (31 Juillet - 21 Août 1989) : note sur divers aspects économiques de l'utilisation des eaux pour la consommation humaine et l'agriculture - Jacques GUILLAUMAUD. Août 1989

SDM / SOC

- 1 - Rapport de mission (30 Mars - 13 Avril 1983) : enquête sur les moyens d'exhaure villageois - René Marceau ROCHETTE. Avril 1989
- 2 - Rapport de mission intermédiaire (31 Mai - 15 Juin 1989) pour l'enquête sur les moyens d'exhaure - René Marceau ROCHETTE. Juin 1989
- 3 - Rapport de mission (31 Mai - 15 Juin 1989) : évaluation du rôle des femmes dans l'utilisation et la gestion des moyens d'exhaure villageois - Marie MONIMART. Juin 1989
- 4 - Rapport de mission (23 Juillet - 17 Août 1989) : résultats et interprétation de l'enquête sur les moyens d'exhaure - René Marceau ROCHETTE. Septembre 1989
- 5 - Enquête sur les moyens d'exhaure : rapport final - René Marceau ROCHETTE. Octobre 1989

DIV

- 1 - Rapport de mission de consultation (Avril - Mai 1985) et proposition de révision du projet - Jean-Claude FAHY. Juin 1985
- 2 - Garage PNUD/DNHE : système d'organisation et de gestion mis en place par le projet MLI/ 84/005. Juin 1988
- 3 - Rapport d'évaluation du Laboratoire des Eaux de la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE) - Mathias SILGA. Juillet 1988
- 4 - Rapport de mission (31 Juillet au 11 Août 1988) : le droit et l'administration des eaux au Mali - Dante CAPONERA. Août 1988
- 5 - Rapport de la mission d'évaluation du projet MLI/84/005 (9 - 30 Octobre 1988) - Ismaël NAJJAR, Jean-Marie DESCHAMPS, Pierre JUTRAS. Octobre 1988
- 6 - Rapport d'avancement du projet au 15 Mai 1989. Mai 1989
- 7 - Rapport d'avancement du projet au 30 Septembre 1989. Octobre 1989
- 8 - Rapport d'avancement du projet au 30 Juin 1990. Juin 1990



SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

ANNEXE 2

BANQUE DE DONNEES SIGMA

DESCRIPTION SOMMAIRE DU
SYSTEME INFORMATIQUE DE GESTION
DES RESSOURCES EN EAU DU MALI



ANNEXE 2

TABLE DES MATIERES

TEXTE

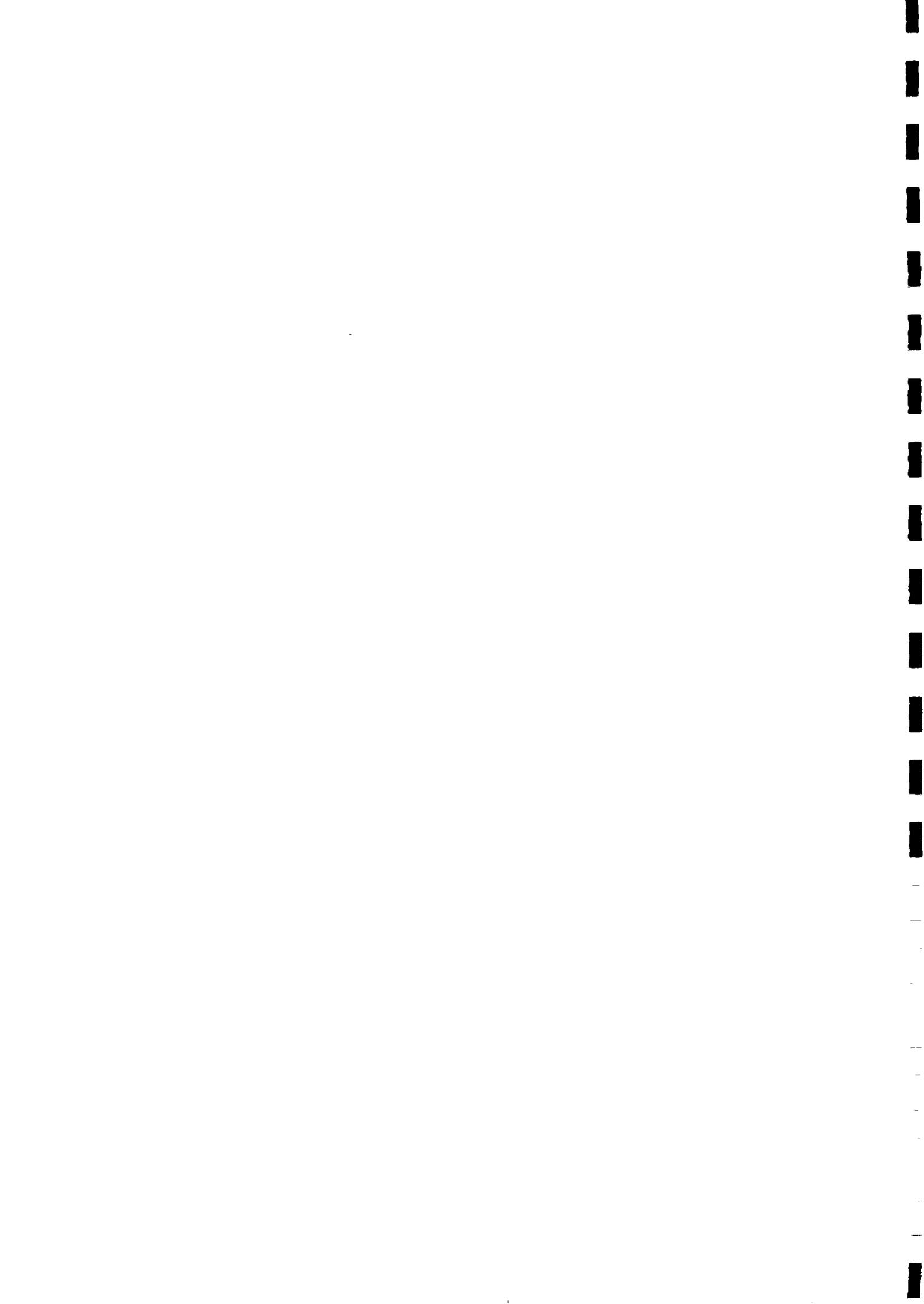
1.	INTRODUCTION.....	1
2.	CONCEPTION.....	1
3.	GESTION DE LA BANQUE DE DONNEES	2
4.	STRUCTURE ET UTILISATION DU LOGICIEL SIGMA.....	6
5.	ASPECTS INFORMATIQUES.....	10
5.1.	Base de données.....	10
5.1.1.	Fichiers de données.....	10
5.1.2.	Fichiers de codes.....	11
5.1.3.	Fichiers index.....	11
5.2.	Programmation.....	15
5.3.	Edition.....	15

FIGURES

Fig.1.	Modalités d'élaboration de la Banque de données SIGMA.....	3
Fig.2.	Modèle de fiche de saisie.....	4/5
Fig.3.	Exemples d'écrans SIGMA : a) menu, b) écran - marque, c) menu 7/8/9	

TABLEAUX

Fichiers de code.....	11
Fichiers de données.....	12/13/14
Modèle fiche récapitulative de village.....	16
Modèle d'édition du fichier Forages.....	17



ANNEXE 2

BANQUE DE DONNEES SIGMA

1 - INTRODUCTION

La DNHE, avec l'assistance du Projet PNUD/DCTD/MLI/84/005, a constitué une banque de données informatisée rassemblant les données existantes nécessaires aux différents utilisateurs et intervenants potentiels du Secteur Eau de manière à pouvoir orienter les travaux ultérieurs à l'échelle nationale, régionale ou locale et obtenir, par divers traitements (statistique, cartographie), une vision globale ou sectorielle des ressources en eau du Mali en vue de leur gestion et la planification de leur mise en valeur.

Cette banque a été communément dénommée SIGMA en référence à "Système Informatique de Gestion des ressources en eau du Mali." Elle est développée sur micro-ordinateur compatible IBM-XT à partir du logiciel dBase III (ASHTON-TATE).

2 - CONCEPTION

Le choix du matériel (compatible IBM), du logiciel (dBase III) et de la structure des fichiers et programmes (programmation structurée, banque de données relationnelle) a été fait en vue d'intégrer la banque dans un environnement standard pouvant s'adapter à l'évolution prévisible du matériel informatique et des logiciels commerciaux et permettant, en outre, une utilisation conviviale de SIGMA.

Le choix du logiciel dBase III a été fait pour les raisons suivantes :

** Standard*

Le logiciel dBase est le standard mondialement connu et adopté dans le domaine des Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBD) fonctionnant sur compatible IBM. Plus répandu que d'autres logiciels, peut-être plus performants, il permettra à une majorité d'utilisateurs de pouvoir communiquer avec SIGMA sans problème de transfert. De plus, les programmes de saisie de données peuvent être utilisés sur disquette, ce qui permet aux projets travaillant sur le terrain d'entrer directement leur données.

** Programmation*

Le logiciel dBase est très facile à manipuler, ce qui permet à la plupart des utilisateurs de SIGMA de créer leurs propres fichiers et programmes spécifiques tout en restant compatibles avec la banque centrale.

3 - GESTION DE LA BANQUE DE DONNEES

SIGMA étant principalement destiné à gérer la totalité des renseignements concernant les ressources en eau du pays, une certaine rigueur dans son utilisation est indispensable. Dans cette optique, il est proposé ci-après un schéma de gestion de la Banque de données :

** Modalités d'entrée, de vérification, de saisie et de sauvegarde des données*

La collecte, la saisie et la vérification des données constituent le processus le plus important dans l'élaboration d'une banque de données. Il doit être réalisé en chaîne (figure 1) :

- . les techniciens de terrain remplissent les fiches de saisie codifiées recto-verso (voir modèle de la fiche en pages 4 et 5) ;
- . l'ingénieur responsable vérifie ces fiches et les remet à l'opérateur de saisie ;
- . l'opérateur de saisie entre les différentes fiches selon les masques de saisie ⁽¹⁾ apparaissant à l'écran et les stocke ensuite dans des fichiers transitoires ⁽²⁾ de l'ordinateur ;
- . l'opérateur édite ensuite un listing des données ainsi mémorisées et le remet au responsable de la banque de données ;
- . le responsable vérifie le listing, le corrige et le rend à l'opérateur ;
- . l'opérateur effectue les corrections éventuelles des données dans le fichier correspondant de l'ordinateur ;
- . l'opérateur transfère les fichiers transitoires dans le fichier opérationnel correspondant de SIGMA chaque fois que nécessaire et le plus souvent possible ;
- . l'opérateur effectue régulièrement une copie (Backup) des fichiers opérationnels sur disquettes et sur bande magnétique.

** Traitement*

Le traitement des données est accessible par le biais des menus de SIGMA qui permettent les opérations suivantes :

- consultation à l'écran,
- modification de données,
- édition de données.
- traitements statistiques.

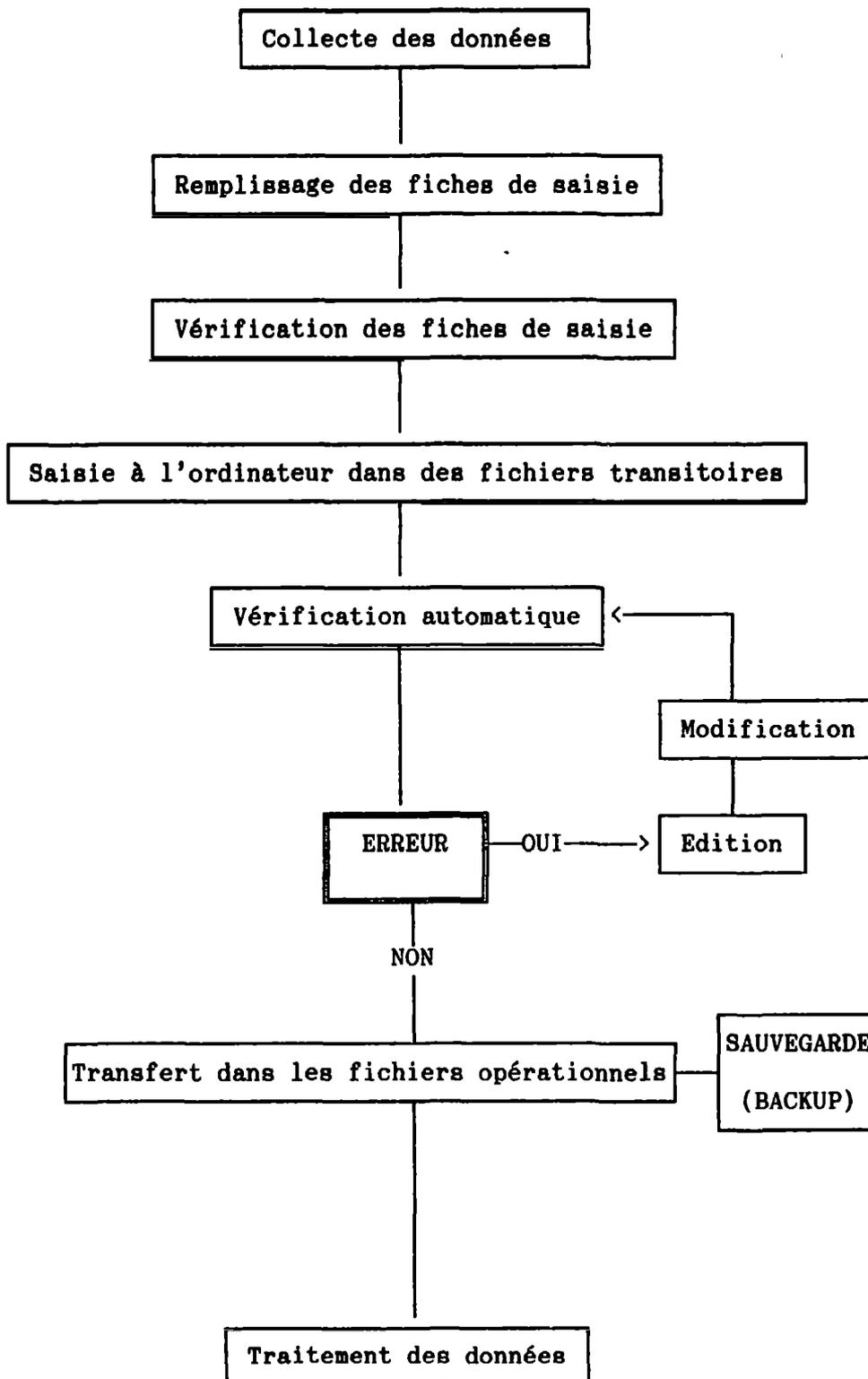


Figure 1 : Modalités d'élaboration de la Banque de Données SIGMA

BANQUE DE DONNEES
SIGMA

FICHE DE SAISIE

DNHE / PNUD
PROJET DCTD/MLI/84/005
Unité d'Informatique

1- LOCALISATION

REGION *	CERCLE *	ARDT *	NOM ADMINISTRATIF COMPLET DU VILLAGE
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
CARTE *	LONGITUDE	LATITUDE	ALTITUDE
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
QUARTIER, LIEU-DIT OU HAMEAU (si existant)			<input type="text"/>

2- FORAGE

COUPE LITHOLOGIQUE

		PROF (m)	LITHOLOGIE	ETAT *	FACIES *
NUMERO DE FORAGE	<input type="text"/>				
ETAT FINAL* (+/-/A/E)	<input type="text"/>				
PROJET *	<input type="text"/>				
DATE EXECUTION (MM/AA)	<input type="text"/>				
PROF TOT. (m)	<input type="text"/>				
LONG TUBEE (m)	<input type="text"/>				
Ø TUB (mm/pouces) ET NATURE	<input type="text"/>				
PROF. CREP SUP (m)	<input type="text"/>				
PROF CREP INF (m)	<input type="text"/>				
LONG. CREPINE (m)	<input type="text"/>				
NIV STAT (m)	<input type="text"/>				
VENUE D'EAU PRINC (m)	<input type="text"/>				
VENUE D'EAU SUP (m)	<input type="text"/>				
VENUE D'EAU INF (m)	<input type="text"/>				
DEBIT DE SOUFFLAGE (m ³ /h)	<input type="text"/>				
CONDUCTIVITE (µmhos/cm)	<input type="text"/>				
PROF SUBSTRATUM (m)	<input type="text"/>				
ETUDE GEOPHY (O/N)	<input type="text"/>				
SECTEUR HYDROGEOLOG *	<input type="text"/>				

* Données codées. se référer à la liste des codes fournie par l'Unité d'Informatique de la DNHE

4 - STRUCTURE ET UTILISATION DU LOGICIEL SIGMA

La structure de SIGMA est montrée dans la figure 1.1 du chapitre 1 de la présente synthèse hydrogéologique, avec tous les fichiers qui la constitue et leurs interconnexions. Elle est constituée par un noyau central de fichiers dBase articulés autour du "VILLAGE" qui est l'unité administrative de base. SIGMA est complété par une série de fichiers satellites en LOTUS 123. L'ensemble des fichiers peut être traité sous forme statistique avec calcul des moyennes, maxima, minima, distributions, écarts-type, les données obtenues donnant des fichiers statistiques utilisables sous forme de graphiques et de cartes thématiques par les logiciels ATLAS*DRAW et ATLAS*GRAPHICS.

Le logiciel SIGMA se présente comme une succession de menus déroulants dans lesquels l'utilisateur effectue son choix selon ses besoins, et d'écrans-masque servant à éditer les données suivant le format désiré. Des exemples d'écrans sont montrés par les figures 3a à 3c.

Les fichiers de SIGMA sont gérés par tout un ensemble de programmes superposés à la base de données et établis par l'Unité d'Informatique au fur et à mesure et en fonction des besoins de consultation, édition, modification, rajout, traitement statistique, sélection de données, etc...

-
- (1) Masque de saisie : la fiche de saisie reproduit l'écran de l'ordinateur ce qui facilite le travail de l'opérateur de saisie et évite des erreurs de transcription.
 - (2) Fichier transitoire : permet un accès et un traitement plus rapide et plus facile, mais a une taille limitée et contient des informations redondantes.

Fig. 3a - Exemple de menu

SIGMA	
MLI 84/005	
PROCEDURES STATISTIQUES	
STATISTIQUES DES FORAGES	1
DES PUITES	2
DES DONNEES SOCIO ECO	3
DES ANALYSES CHIMIQUES	4
DES POMPES	5
DES POMPAGES D'ESSAI	6
FIN DE TRAITEMENT	0

VOTRE CHOIX	0

Cet écran permet de sélectionner les données sur lesquelles sera réalisé le traitement statistique.

- 1 - Forages : traitement statistique des caractéristiques des forages
- 2 - Puits : traitement statistique des caractéristiques des puits
- 3 - Données socio-économiques : traitement statistique des données socio-économiques
- 4 - Analyses chimiques : traitement statistique des analyses hydrochimiques
- 5 - Pompes : traitement statistique des pompes installées
- 6 - Pompages d'essai : traitement statistique des résultats des pompages d'essai

Le choix se fait en tapant le chiffre correspondant.

Fig. 3b - Exemple d'écran-masque

R	C	AR	NOM ADMINISTRATIF	CARTE	LONG	LAT	ALT			
.....°..'	..°..'	0			
FORAGE: QUARTIER, LIEU-DIT OU HAMEAU									
NUM. FORAGE						PROP. (m)	ETAT	FACIES	
ETAT FINAL			.							
PROJET						0	.	..	
DATE EXB						0	.	..	
PROP. TOT			0				0	.	..	
LONG. TUB			0				0	.	..	
TUBAGE						0	.	..	
CREP. SUP			0				0	.	..	
CREP. INF			0				0	.	..	
CREP. LONG			0				0	.	..	
NIV. STAT.			0.0				0	.	..	
VENUE PRI.			0				0	.	..	
VENUE SUP.			0				0	.	..	
VENUE INF.			0					.	..	
DEBIT			0.0							
COND			0							
PROP. SUBS			0							
GEOPHY.			Y							
SECTEUR									

DONNEES CORRECTES ? O/N

N

Après avoir sélectionné l'option 1 de l'écran 1 (fiches de forage), l'écran 1.1 s'affiche et permet de rentrer les données concernant les forages dans un fichier transitoire nommé IRHFORTR.

Cet écran est subdivisé en 2 parties :

- localisation du village regroupant toutes les informations nécessaires sur le village,
- caractéristiques du forage.

Le masque de saisie est similaire à la fiche de saisie.

Fig. 3c - Exemple de menu

```
SIGMA
MLI 84/005

SELECTION DES DONNEES A EDITER :

par region ----- 1
par cercle ----- 2
par ardt ----- 3
par coordonnees ---- 4
par commande ----- 5
pas de condition --- 6

votre choix -----
```

Cet écran permet d'éditer sélectivement des données suivant les options :

- | | | |
|----------------------|---|--|
| 1 par Région | : | données concernant une Région administrative |
| 2 par Cercle | : | données concernant un Cercle |
| 3 par Arrondissement | : | données concernant un Arrondissement |
| 4 par coordonnées | : | données concernant une zone géographique rectangulaire définie par ses coordonnées X_1Y_1 , X_2Y_2 |
| 6 pas de condition | : | toutes données correspondant au choix du menu précédent (Village, Forage, Chimie, Pompage d'essai, Données socio-économiques, Ressources et besoins en eau). |

5 - ASPECTS INFORMATIQUES

A la différence des banques de données commerciales, les sources de SIGMA sont accessibles aux utilisateurs ce qui permet aux organismes ou institutions qui gèrent une banque de données, de modifier les programmes SIGMA de manière à les adapter à leurs besoins spécifiques.

Le logiciel SIGMA est composé de deux parties essentielles :

- la première regroupe l'ensemble des données sous forme de fichiers interconnectés par l'intermédiaire de leurs champs communs. Cette partie constitue la base de données.
- la seconde regroupe l'ensemble des programmes gérant les fichiers de manière à offrir à l'utilisateur un environnement convivial.

5.1. Base de données

Cette entité est constituée par les fichiers de données, les fichiers de code et les fichiers index correspondants.

5.1.1. Fichiers de données

Ces fichiers contiennent les informations, codées dans la plupart des cas, et sont de trois types :

a) Fichiers transitoires *IRH???TR.DBF*

Ils contiennent les données nouvellement acquises et qui n'ont pas encore été vérifiées et transférées.

b) Fichiers de sauvegarde *???BAK.DBF*

Ils contiennent les données sauvegardées automatiquement à partir du fichier *IRH???TR.DBF* correspondant.

c) Fichiers de données *IRH???DBF*

Ces fichiers constituent le noyau de la banque de données. Ils sont liés entre eux suivant leurs champs communs.

Il est à noter que les liaisons entre fichiers constituent le point névralgique de la banque de données.

5.1.2. Fichiers de codes

Ces fichiers COD ??? .DBF contiennent les codes et leur explication en clair. Ils sont utilisés pour décoder les informations contenues dans les fichiers de données, par exemple :

Fichiers codes	Contenu
CODLIT	Code de la lithologie
CODETH	Code des ethnies
CODJAR	Code du jardinage
CODART	Code des artisans
CODMAL	Code des maladies endémiques
CODINF	Code des infrastructures
CODACT	Code des autres activités
CODCUL	Code des cultures

5.1.3. Fichier index

Ces fichiers *.NDX sont utilisés pour indexer les fichiers de données suivant certains champs. Leur nom est composé de 2 lettres du fichier de données (p. ex. FO pour IRHFOR) et la première lettre du ou des champs indexés (p.ex. CVN CODE-VIL + VILLAGE + NUM).

En exemple, le contenu de trois fichiers de données est montré ci-après.

Exemple 1

FICHER IRHFORTR

CONTENU DONNEES CONCERNANT LES FORAGES
FICHER TRANSITOIRE A TRANSFERER DANS IRFFOR

DESCRIPTION DES CHAMPS

NOM	TYPE	TAILLE	DEC	SIGNIFICATION
CODE_VIL	CARACTERE	5		CODE ADMINISTRATIF DE L'ARRONDISSEMENT
VILLAGE	CARACTERE	20		NOM DU VILLAGE (CARTE OU RECENSEMENT)
NUM	CARACTERE	1		NUMERO (VILLAGE DE MEME NOM DANS MEME ARDT)
CARTE	CARACTERE	4		CODE DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE 1/200000
LONG	NUMERIQUE	1		LONGITUDE (DEGRES, DECIMALES)
LAT	NUMERIQUE	1		LATITUDE (DEGRES, DECIMALES)
ALT	NUMERIQUE	1		ALTITUDE EN M
EXTENSION	CARACTERE	12		LOCALISATION DANS LE VILLAGE (p.e. ECOLE)
NOF	CARACTERE	4		NUMERO DU FORAGE DONNE PAR LE PROJET FOREUR
EXPL	CARACTERE	7		REUSSITE (+, -, E, A)
PROJ	CARACTERE	3		CODE PROJET FOREUR
DATE	CARACTERE	5		DATE DE REALISATION (MM/AA)
ATEL	CARACTERE	4		ATELIER DE FORAGE
PF	NUMERIQUE	4		PROFONDEUR TOTALE DU FORAGE
PT	NUMERIQUE	4		LONGUEUR DE TUBAGE
TUBAG	CARACTERE	6		TYPE DE TUBAGE (N.NN"AA en pouces ou NNN-AA en Cm)
CREPSUP	NUMERIQUE	3		PROFONDEUR DU SOMMET DE LA CREPINE SUPERIEURE
CREPINF	NUMERIQUE	3		PROFONDEUR DE LA BASE DE LA CREPINE INFERIEURE
CREPLONG	NUMERIQUE	3		LONGUEUR DE TUBE CREPINE
AQUIF	CARACTERE	6		CODE AQUIFERE (AAA-AA)
UNIT	CARACTERE	3		CODE SOUS-UNITE HYDROGEOLOGIQUE
NS	NUMERIQUE	5		PROFONDEUR DU NIVEAU STATISTIQUE/SOMMET TUBAGE
VES	NUMERIQUE	3		PROFONDEUR DES VENUES D'EAU SUPERIEURES
VEP	NUMERIQUE	3		PROFONDEUR DES VENUES D'EAU PRINCIPALES
VEI	NUMERIQUE	3		PROFONDEUR DES VENUES D'EAU INFERIEURES
Q_AL	NUMERIQUE	5		DEBIT AIR LIFT (M3/H)
Q_BP	NUMERIQUE	5		DEBIT DU POMPAGE D'ESSAI (M3/H)
ND	NUMERIQUE	5		PROFONDEUR DU NIVEAU DYNAMIQUE LORS DU POMPAGE
COND	NUMERIQUE	5		CONDUCTIVITE (UMHOS/CM)
LITHO	CARACTERE	8		CODE DE LA LITHOLOGIE TRAVERSEE (A/A/A/A/A)
ERA	NUMERIQUE	3		EPAISSEUR RECOUVREMENT + ALTERATION
GEOPH	LOGIQUE	1		FORAGE IMPLANTE SUR GEOPHYSIQUE Y/N

Exemple 2

FICHER IRHPOMTR

CONTENU POMPES INSTALLEES
FICHER TRANSITOIRE A TRANSFERER SUR IRHPOM

DESCRIPTION DES CHAMPS

NOM	TYPE	TAILLE	DEC	SIGNIFICATION
CODE_VIL	CARACTERE	5		CODE ADMINISTRATIF DE L'ARRONDISSEMENT
VILLAGE	CARACTERE	20		NOM DU VILLAGE (CARTE OU RECENSEMENT)
NUM	CARACTERE	1		NUMERO (VILLAGE DE MEME NOM DANS MEME ARRD)
CARTE	CARACTERE	4		CODE DE LA CARTE TOPOGRAPHIQUE 1/200000
LONG	NUMERIQUE	7	3	LONGITUDE (DEGRES, DECIMALES)
LAT	NUMERIQUE	6	3	LATITUDE (DEGRES, DECIMALES)
ALT	NUMERIQUE	3	0	ALTITUDE EN M
NOF	CARACTERE	4		NUMERO DU FORAGE
PROJ	CARACTERE	4		PROJET FOREUR
MARQUE_POM	CARACTERE	10		MARQUE DE LA POMPE
TYPE_POMPE	CARACTERE	6		TYPE DE POMPE
AMEN_POMPE	CARACTERE	4		AMENAGEMENTS EFFECTUES AUTOUR DE LA POMPE
CON_AMEN	CARACTERE	2		CONDITION DES AMENAGEMENTS
DATE_INSTA	CARACTERE	5		DATE D'INSTALLATION DE LA POMPE
PROJ_INST	CARACTERE	4		PROJET INSTALLATEUR
DATE_OUT	CARACTERE	5		DATE DE RETRAIT DE LA POMPE
CAUSE_RET	CARACTERE	3		CODE DE LA CAUSE DU RETRAIT
PRO_CREP	NUMERIQUE	4		PROFONDEUR DES CREPINES DE LA POMPE
UTIL	CARACTERE	5		CODE DES UTILISATIONS DE LA POMPE
REM	CARACTERE	50		REMARQUES

Exemple 3

FICHIER IRHSOC

CONTENU DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES DES VILLAGES

DESCRIPTION DES CHAMPS

NOM	TYPE	TAILLE	DEC	S I G N I F I C A T I O N
CODE_VIL	CARACTERE	5		CODE ADMINISTRATIF DE L'ARRONDISSEMENT
VILLAGE	CARACTERE	20		NOM DU VILLAGE (CARTE OU RECENSEMENT)
NUM	CARACTERE	1		NUMERO (VILLAGE DE MEME NOM DANS MEME ARRD)
POP_ACT	NUMERIQUE	5		POPULATION RESIDENTE ACTUELLE
ORIG	CARACTERE	1		CODE DE L'ORIGINE DU CHIFFRE DE POPULATION
POP_NOMAD	NUMERIQUE	5		POPULATION NOMADIC RATACHEE AU VILLAGE
POP_76	NUMERIQUE	5		POPULATION RESIDENTE RECENSEE EN 76
BOVINS	NUMERIQUE	5		NBRE DE BOVINS SEDENTAIRES
CAMELINS	NUMERIQUE	3		NBRE DE CAMELINS SEDENTAIRES
ASINS	NUMERIQUE	3		NBRE D'ASINS SEDENTAIRES
EQUINS	NUMERIQUE	3		NBRE D'EQUINS SEDENTAIRES
OV_CAPRINS	NUMERIQUE	5		NBRE D'OVINS ET CAPRINS SEDENTAIRES
GROS_BET	NUMERIQUE	5		BOVINS + EQUINS + CAMELINS + ASINS
PETIT_BET	NUMERIQUE	5		OVINS + CAPRINS
BET_TRANSM	NUMERIQUE	5		BETAIL TRANSHUMANT(EQUIV.GROS BETAIL SEDENTAIRE/J)
ETHNIES	CARACTERE	6		CODE DES 3 ETHNIES PRINCIPALES DU VILLAGE
EXODE	CARACTERE	2		CODE DU MOUVEMENT DES POPULATIONS HORS DU VILLAGE
INFSTR	CARACTERE	4		CODE DES INFRASTRUCTURES
CULT	CARACTERE	4		CODE DES 4 PRINCIPALES CULTURES IND. OU VIVRIERES
JARD	CARACTERE	3		CODE DES CULTURES SOUS PETITE IRRIGATION LOCALE
AUTR_ACT	CARACTERE	3		CODE DES AUTRES ACTIVITES EXERCES
ARTISAN	CARACTERE	4		CODE DES ARTISANS RESIDENT DANS LE VILLAGE
MAL_END	CARACTERE	4		CODE DES PRINCIPALES MALADIES ENDEMIQUES
PARTICP	CARACTERE	4		CODE DES DISPOSITIONS A PARTICIPER A L'AMENAGEMENT
AN_INV	CARACTERE	2		ANNEE DE L'INVENTAIRE
ACCES	CARACTERE	1		CODE DES CONDITIONS D'ACCES AU VILLAGE
HAMBAUX	CARACTERE	1		NBRE DE HAMBAUX ADMINISTRATIFS DU VILLAGE

INDEX

CHAMPS INDEX	FICHIER
CODE_VIL+VILLAGE+NUM	SOCVN

Il faut noter que le projet MLI/84/005 a également mis au point un logiciel dénommé OMEGA (Système Informatique Opérationnel de Maintenance des Equipements et de Gestion Administrative) suivant le même principe que SIGMA mais appliqué à la gestion et au traitement de fichiers de pièces détachées, de réparations, de coûts, d'équipements, etc...

Le logiciel OMEGA est utilisé par SIGMA notamment avec le fichier POMPES pour la gestion des pannes, des réparations et des pièces détachées des diverses pompes manuelles installées au Mali.

5.2. Programmation

L'ensemble des programmes SIGMA a été réalisé de manière à permettre une utilisation automatique et conviviale des données.

Ainsi, certaines parties de programme qui auraient pu être raccourcies par l'utilisation du contenu des variables (fonction &), ont été en fait répétées de manière à faciliter leur compréhension et donc leur utilisation.

La conception générale de programmation a été faite sur la base d'un programme principal (SIGMA.PRG) qui gère l'ensemble des fichiers de procédure, lesquels rassemblent les routines nécessaires à l'accomplissement d'un type déterminé de tâches.

Fichier de procédure	Tâches réalisées
SAISI	Saisie des données
MODIF	Modification/consultation
EDITI	Edition
STATI	Statistiques
UTILI	Utilitaires

Chaque fichier de procédure débute par une procédure du même nom (par exemple : le fichier de procédure "SAISI" possède une procédure nommée "SAISI") qui gère les autres procédures internes au fichier.

5.3. Edition

Un exemple d'édition de la "FICHE RECAPITULATIVE DE VILLAGE" et d'une page du répertoire des Forages est donné ci-après pages 16 et 17.

Unite de
Planification

FICHE RECAPITULATIVE DE VILLAGE
Village BLA 4SEKA

Projet
MLI 84/005

1 - LOCALISATION

Region : SEGOU Longitude : 5° 9"W Carte au 1/200000 : KEMA
 Cercle : SEGOU Latitude : 13°18" Photo aeriene :
 Ardt : KATIENA Altitude : 275

2 - DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES

Population Recensements 1976 : 996 1987 1248
 Betail (en UBT) villageois : 343 transhumant : 800 (equivalent sedentaire)
 Infrastructure : = Acces : FACILE
 Cultures : MIL SORGHO ARACHIDE Jardinage : ?0?
 Ethnies : BAMBARA Exode : FAIBLE-> MALI EXT.
 Artisans : FORGERON Autres activites : AUTRES
 Participation : 1T NB Hameaux : 6

3 - RESSOURCES EN EAU EXPLOITEES

Puits villageois - Nombre : 8 Debit total : 16.0 m3/j
 Puits modernes - Nombre : 1 Debit total : 5.0 m3/j
 Forages equipes - Nombre : 2 Debit total : m3/j
 DEBIT TOTAL : m3/j

Ressources fin saison seche: 10.0 hors saison seche 21.0
 Ressources en eau additionnelles :
 Puisards :
 Eau de surface : Type : Distance : 0.0Km Tariesement :

4 - SCHEMA DIRECTEUR

Besoins en eau : population : 24.8m3/h Betail : 44m3/h Totaux: 88.1 m3/h
 Taux de couverture population : 84 % Total : 23 % Priorite: 1
 Possibilite de developpement : NEANT

6 - CARACTERISTIQUES DES POINTS D'EAU MODERNES

Puits		Projet(s) :				
Nom	Date	Profondeur	Diametre	NS (m)	Q (m3/h)	
CIMENT KOLON	06/17/86	16.0	1.2	15.2	5.0	

Forages : Projet : FSI
 Nb forages productifs : 2 forages negatifs : 0 Taux de reussite : 100

Num	Proj	Date	Prof	NS	Q(m3/h)	Pompe	date INSTA	RETRAIT	prof	crep
40V1	FSI	01/87	46	15.7	1.3					0
40V3	FSI	01/87	49	15.6	1.5					0

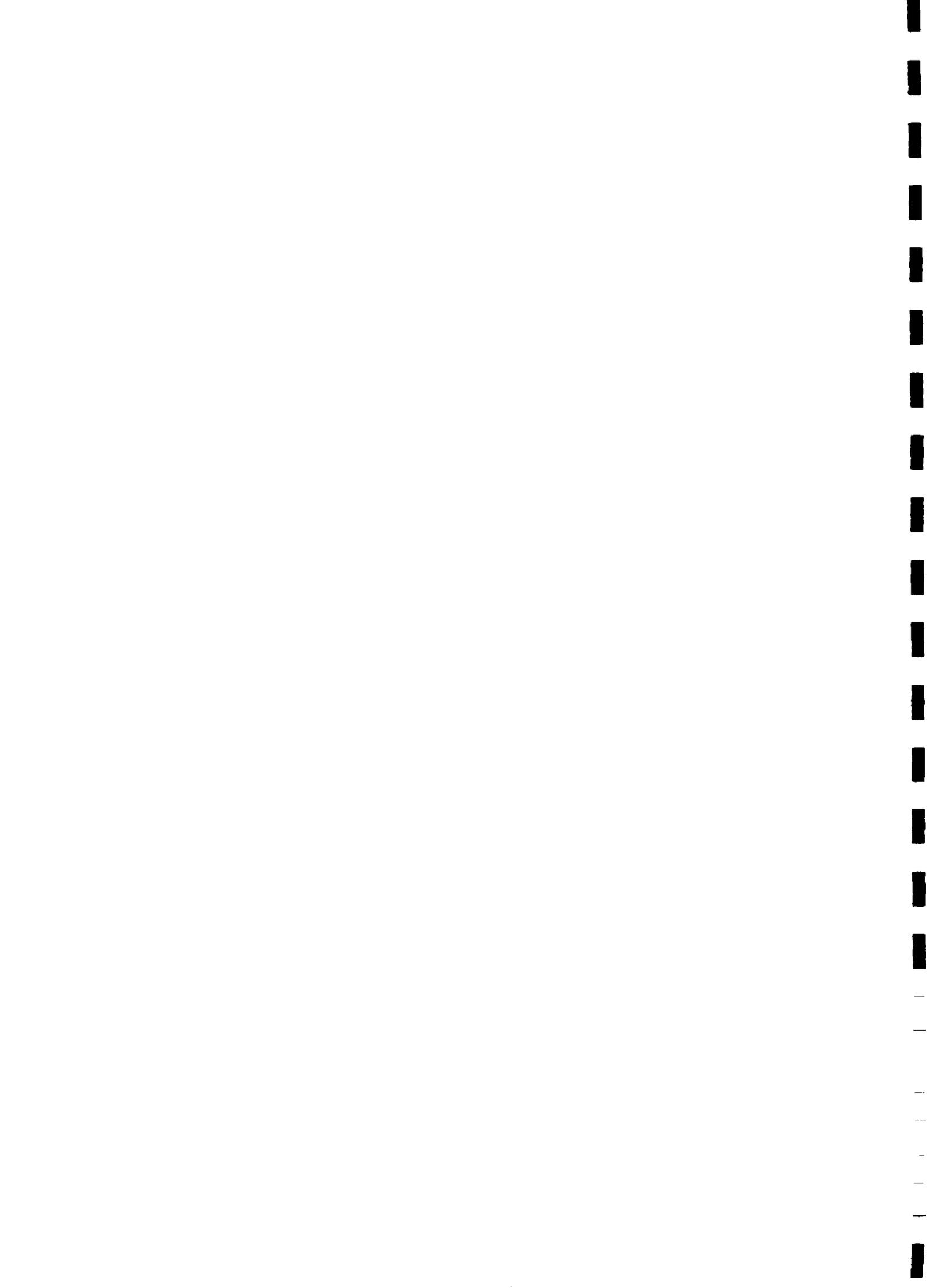
Région: KAYES

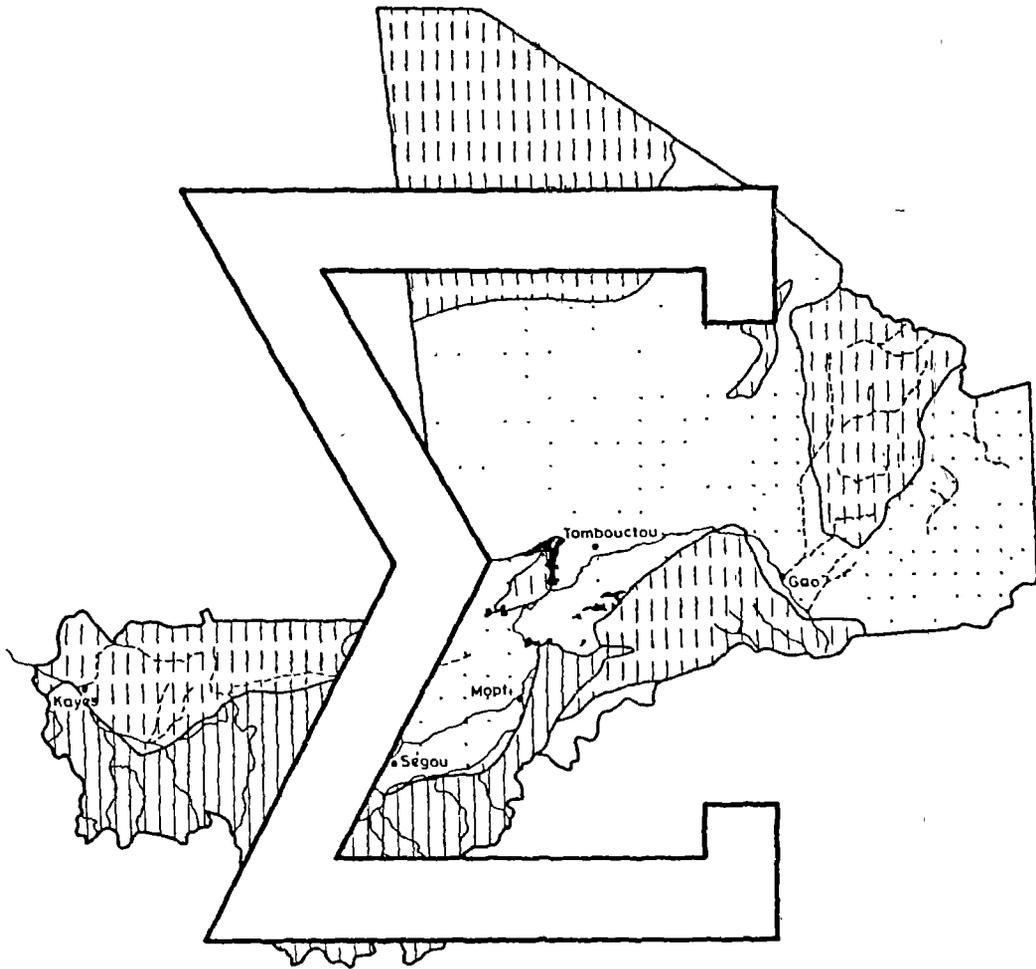
- 17 -
Cercle: BAFOULABE

1BF

ARRONDISSEMENT DE BAFOULABE				1BFBF												POP 89	2439			
BAFOULABE				CARTE	BAFOULABE	LONG.	10°50'W	LAT.	13°48'	ALT.	104					POP 89	2439			
47	-	BMK	04/85	115	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ICT-77a	GS/GR	12		
48	-	BMK	04/85	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ICT-77a	GS/GR	12		
49	-	BMK	04/85	61	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ICT-77a	GS/GR	9		
618	+	BMK	3/88	50	50	4.5°PC	24	71	24	29	29	29	16.3	0.6	0.8	24.8	102	ICT-77a	GR	29 *
706	+	BMK	11/88	56	56	4.5°PC	19	55	12	49	22	49	7.1	15.0	10.1	11.9	325	ICT-77a	GS/GR	15 *
707	+	BMK	11/88	65	65	4.5°PC	15	48	18	57	18	57	8.7	6.0	3.6	16.1	206	ICT-77a	GR	14 *
708	+	BMK	11/88	74	74	4.5°PC	15	71	15	18	18	18	6.7	0.8	0.9	11.9	450	ICT-77a	GS/GR	15 *
709	+	BMK	11/88	61	61	4.5°PC	21	59	15	28	21	28	8.4	5.4	3.6	13.1	547	ICT-77a	GS/GR	15 *
F1	+	NU11	06/86	58	25	5.0°PP	-	-	-	-	-	-	15.0	4.5	-	-	20	ICT-77a	GS/GQ/SC	24
F2	+	NU11	07/86	58	25	5.0°PP	-	-	-	-	-	-	15.0	4.2	-	-	20	ICT-77a	GR/GS/GQ	24
GANGONTY				CARTE SANDARE		LONG.	10°56'W	LAT.	14° 4'	ALT.	180					POP 89	467			
F1	A	BRG	05/74	36	1	6.0°PP	-	-	-	-	-	-	7.9	2.6	-	-	560	CAN-62b	SC/GR/SC	1
KOLINGUEMU				CARTE SANDARE		LONG.	10°52'W	LAT.	14° 1'	ALT.	134					POP 89	751			
F2	-	BRG	05/74	33	-	-	-	-	-	-	-	-	8.0	0.5	-	-	850	CAN-62b	SC/DL/SC	17 *
SELINKEGNY				CARTE SANDARE		LONG.	10°47'W	LAT.	14° 6'	ALT.	161					POP 89	1191			
F3	+	BRG	05/74	34	33	4.0°PC	-	-	-	-	-	-	9.4	10.3	10.3	14.2	610	CAN-62b	GR/SC	16
SITAPOULA				CARTE		LONG.	0° 0'E	LAT.	0° 0"	ALT.	0					POP 89	0			
710	+	BMK	11/88	51	51	4.5°PC	39	47	9	40	28	40	11.1	10.0	7.1	21.1	468	ICT-77a	GR	2 *
ARRONDISSEMENT DE BAMAFELE				1BFBM												POP 89	0			
BADEKA				CARTE BAFOULABE		LONG.	10°28'W	LAT.	13° 8'	ALT.	300					POP 89	0			
P5	+	USM	06/88	50	-	-	-	-	-	18	44	8.4	49.8	-	-	-	-	ICT-77a	GR/GQ	2
BANGASSI				CARTE BAFOULABE		LONG.	10°30'W	LAT.	13°16'	ALT.	162					POP 89	2026			
F1	+	NU4	03/83	76	31	5.0°PP	-	-	-	61	56	-	20.7	11.6	11.6	32.3	-	ICT-77a	GR	15
F1	+	NU4	02/83	82	31	5.0°PP	-	-	-	70	61	-	3.1	1.8	-	-	-	ICT-77a	GR/SC	31
F2	+	NU4	03/83	76	31	5.0°PP	-	-	-	44	36	-	15.3	2.6	-	-	-	ICT-77a	GR	11
F2	+	NU4	02/83	91	31	5.0°PP	-	-	-	90	83	-	5.2	4.3	-	-	-	ICT-77a	GR/SC/GR	18
F3	+	USM	06/86	44	44	5.0°PP	-	-	-	38	36	-	15.7	8.1	-	-	-	ICT-77a	GR	2
F3	+	USM	12/87	64	64	5.5°PC	30	58	11	56	31	56	2.5	3.6	1.9	-	-	ICT-77a	GR/SC/GQ	11
F4	+	USM	06/86	50	50	5.0°PP	-	-	-	45	39	-	16.7	6.5	-	-	-	ICT-77a	GR	1
F5	+	USM	06/86	49	49	5.0°PP	-	-	-	44	41	-	18.6	8.1	-	-	-	ICT-77a	GR	3
F5	+	USM	02/88	43	42	5.5°PC	28	39	11	35	28	35	4.0	8.1	5.4	-	-	ICT-77a	GR/SC/GQ	9
F6	+	USM	06/86	48	48	5.0°PP	-	-	-	43	43	-	19.2	6.5	-	-	-	ICT-77a	GR	4
BERETE-KOUNDA				CARTE BAFOULABE		LONG.	10°37'W	LAT.	13°20'	ALT.	160					POP 89	0			
F	+	USM	12/86	55	55	5.0°PC	34	51	10	51	36	51	12.4	7.2	-	-	-	ICT-77a	GR	5 *
F1	+	USM	03/86	40	40	5.0°PC	34	37	3	36	36	36	13.4	23.0	-	-	-	ICT-77a	GR	4
F3	+	USM	12/86	65	65	5.0°PC	42	56	10	54	42	54	12.2	4.6	-	-	-	ICT-77a	GR	10 *
F4	+	USM	06/87	47	47	5.0°P	-	-	-	39	39	39	16.4	4.3	-	-	-	ICT-77a	GR	11
DALAFARA KMK				CARTE		LONG.	0° 0'E	LAT.	0° 0"	ALT.	0					POP 89	0			
F1	+	USM	12/85	60	60	5.0°PP	-	-	-	52	45	-	15.2	17.9	-	-	-	ICT-77a	GR	3
F2	+	USM	02/86	70	70	5.0°PP	-	-	-	63	62	-	12.6	3.6	-	-	-	ICT-77a	GR	9
F3	+	USM	02/86	60	60	5.0°PP	-	-	-	53	38	-	18.1	4.1	-	-	-	ICT-77a	GR	5
F4	+	USM	02/86	64	64	5.0°PP	-	-	-	60	33	-	18.0	8.1	-	-	-	ICT-77a	GR	4
DALAFARA KRM				CARTE BAFOULABE		LONG.	10°38'W	LAT.	13°14'	ALT.	192					POP 89	0			
F6	+	USM	03/86	39	39	5.0°PP	-	-	-	33	31	-	17.0	8.1	-	-	-	ICT-77a	GR	4
F7	+	USM	05/86	35	35	5.0°PP	-	-	-	33	31	-	13.9	10.8	-	-	-	ICT-77a	GR	4
F8	+	USM	05/86	52	52	5.0°PP	-	-	-	39	32	-	16.2	8.1	-	-	-	ICT-77a	GR	5
DALAFARA SRP				CARTE BAFOULABE		LONG.	10°33'W	LAT.	13°17'	ALT.	230					POP 89	0			
F5	+	USM	02/86	70	70	5.0°PP	-	-	-	65	22	-	14.2	1.0	-	-	-	ICT-77a	GR	4

N°	EX	PRO	DATE	PROP	LOM	T	SUP	INF	LONG	P	S	I	NS	A-L	RSS	ND	COND	AQUIFERE	LITHOLOGIE	ERA	GPH
FORAGE				TUBAGE			CREPINE			VENUE D'EAU			DEBITS								
SIGMA:REPERTOIRE DES FORAGES																		- 1 -		DNHE-PWUD-DCTD: MLI/84/005	

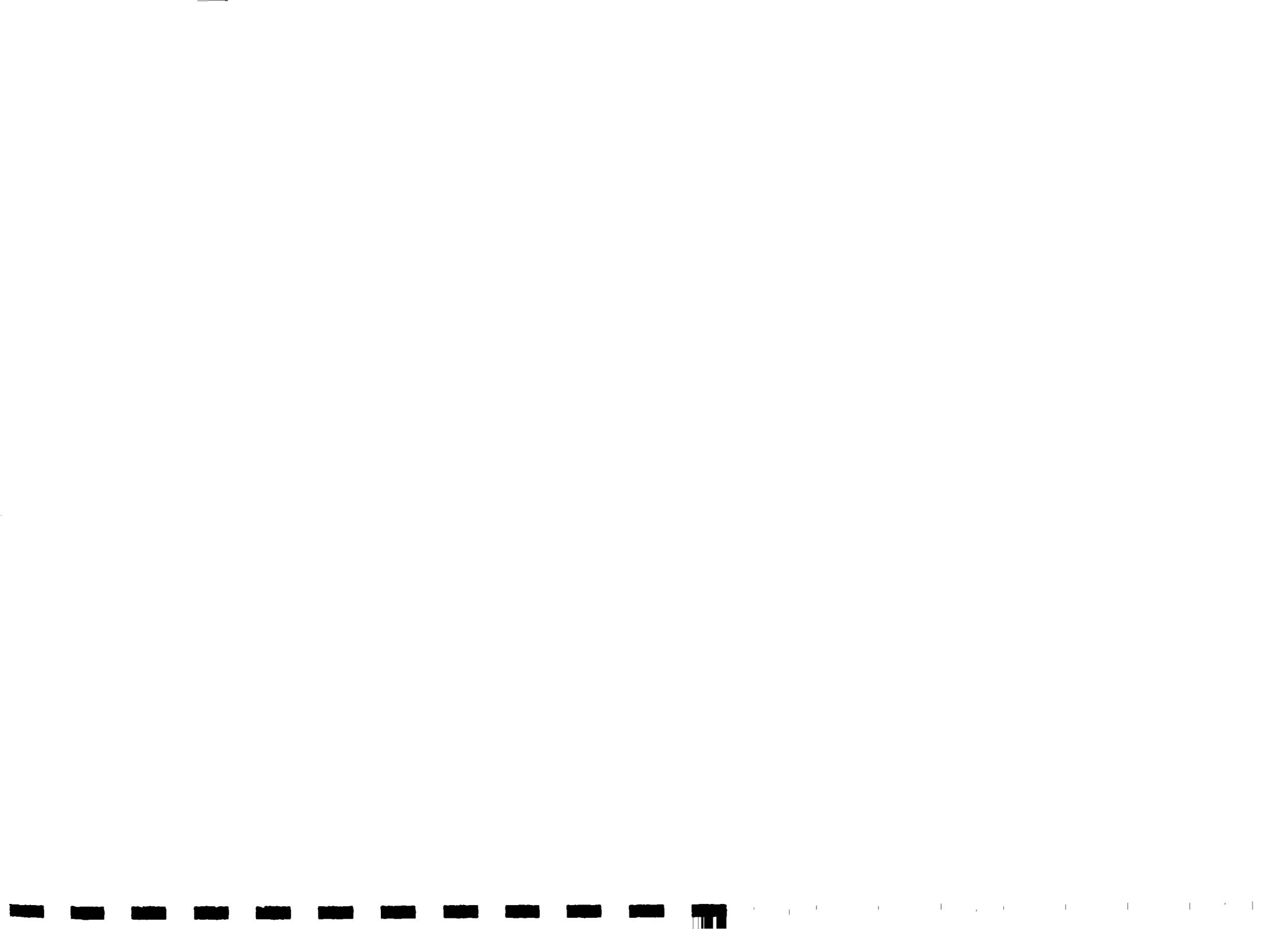




SYNTHESE HYDROGEOLOGIQUE DU MALI

ANNEXE 3

DONNEES STATISTIQUES



ANNEXE 3

TABLE DES MATIERES

1. DONNEES STATISTIQUES SUR LES FORAGES.....	1
2. NOMBRE ET DISTRIBUTION DES DEBITS.....	2
3. DISTRIBUTION DES NIVEAUX STATIQUES ET VENUES D'EAU.....	3
4. DONNEES STATISTIQUES SUR LES POMPAGES D'ESSAI	
- Tableau 1.....	4
- Tableau 2.....	5
5. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES.....	6



- 1 -

1. DONNEES STATISTIQUES SUR LES FORAGES

CODE AQUIF	CODE SECTEUR HYDRO	NBRE DE FORAGES	NBRE I DE I PROD I >1 m3/h I	PROF . MOY	FORAGE . ECART TYPE	I MAX I I	PROF MOY	N . S . ECART TYPE	. . I MAX I I	DEBIT (m3/h)	. I MAX I I
**											
CTQ	12a	53	46	91.4	46	254	27.7	21.2	78.0	8.8	36.8
CTQ	12b	3	2	153.3	35	202	38.1	6.6	46.5	7.2	9.9
CTQ	13	75	68	79.7	34	200	23.2	17.8	71.6	18.0	72.0
CTQ	14	51	45	64.6	19	116	6.9	2.0	10.9	23.1	99.0
CTQ	15a	130	104	66.1	28	151	25.3	17.7	86.0	8.1	52.3
CTQ	15b	127	120	54.9	16	99	12.8	8.8	56.9	16.1	100.0
CTQ	15c	893	734	58.0	24	162	16.4	8.8	44.2	6.2	48.2
CSE	21a	40	31	163.4	119	518	57.2	22.3	113.0	8.4	72.0
CSE	21b	42	28	110.4	50	350	44.9	13.1	70.5	6.0	18.0
CIT	31a	25	20	101.1	34	189	43.5	9.4	58.1	8.5	18.0
CIT	31b	12	12	92.7	21	143	45.6	4.0	51.0	11.9	33.6
CIT	32	60	44	82.2	27	171	44.7	16.9	92.3	11.6	50.0
CIN	41	5	4	455.0	329	999	39.0	25.9	67.8	12.8	18.0
CIN	42a	2	0	48.0	18	66	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PRI	51	11	5	107.1	101	340	12.9	12.4	34.5	16.6	50.0
CAM	61a	450	145	48.3	25	242	18.4	11.0	63.8	5.6	30.0
CAM	61b	271	136	66.9	26	182	13.6	7.1	42.7	7.5	90.0
CAM	61c	154	75	78.9	30	138	16.6	6.4	35.9	7.8	60.0
CAM	62a	460	227	55.2	33	190	10.8	5.1	29.4	8.0	72.0
CAM	62b	663	316	56.0	21	127	13.8	9.4	77.1	4.4	51.4
ICT	71a	503	284	65.1	25	145	13.9	11.2	88.0	5.6	36.0
ICT	71b	123	70	65.7	33	135	17.3	18.7	95.2	4.7	20.0
ICT	72a	728	608	65.1	21	156	11.3	5.2	28.8	4.7	100.0
ICT	72b	776	536	62.1	18	151	12.4	4.9	41.0	5.5	72.6
ICT	72c	124	84	60.4	14	96	12.2	4.2	24.0	4.2	50.0
ICT	73a	835	639	65.0	23	166	13.1	39.5	999.9	5.1	40.0
ICT	73b	197	170	74.7	29	201	9.3	5.7	27.5	10.7	158.0
ICT	73c	348	297	59.5	21	135	15.8	6.3	44.4	4.7	43.0
ICT	73d	141	112	53.9	19	135	10.8	3.3	19.5	4.8	30.0
ICT	74a	716	403	63.0	23	148	17.7	8.3	52.1	3.6	20.0
ICT	74b	758	529	60.3	23	152	15.0	7.8	53.7	5.6	52.2
ICT	74c	59	43	76.2	30	195	33.3	12.4	61.2	3.2	20.0
ICT	75a	401	276	61.8	20	124	15.8	5.7	34.5	4.7	47.0
ICT	75b	140	90	54.0	24	141	12.7	5.1	25.8	4.3	27.8
ICT	76a	337	236	68.5	18	115	12.5	4.0	25.4	7.9	120.0
ICT	76b	97	57	64.0	19	106	12.0	5.0	27.9	12.8	90.0
ICT	77a	301	235	59.2	17	115	10.8	4.7	22.1	8.4	64.8
ICT	77b	62	42	58.0	20	130	9.2	4.7	22.8	7.1	24.0
ICT	77c	51	40	63.2	19	97	11.1	4.3	23.6	9.5	72.0
ICP	81	39	30	71.5	22	135	12.5	6.2	30.5	8.5	28.0
ICP	82a	75	17	102.9	32	158	65.6	15.9	96.5	3.0	7.6
ICP	82b	94	50	84.3	31	208	39.2	24.4	89.8	8.7	34.3
ICP	82c	19	12	102.1	28	150	29.4	21.5	77.7	6.1	18.0
ICP	82d	47	31	107.7	33	153	38.9	22.7	92.5	5.5	18.9
ICP	83	65	31	90.7	27	196	47.4	18.0	78.3	6.5	27.7
SOC	91a	40	16	81.1	76	542	20.4	11.9	54.9	4.3	12.6
SOC	92a	275	168	54.0	16	109	7.2	3.1	26.0	4.1	20.0
SOC	92b	171	133	67.2	21	165	8.3	3.2	22.7	7.4	60.0
SOC	92c	58	49	64.1	22	162	8.6	3.2	19.4	4.9	30.0
SOC	93a	449	308	61.4	19	175	8.8	4.1	29.5	4.0	25.2
SOC	93b	158	108	57.3	18	120	8.7	3.9	24.9	5.0	25.0
SOC	94a	287	200	59.6	16	120	9.2	3.4	20.7	3.8	16.0
SOC	94b	277	196	61.1	22	150	6.9	6.2	47.5	7.9	100.0
SOC	95	86	51	56.0	13	85	14.6	5.3	27.8	4.4	45.0
SOC	96a	188	64	50.6	18	135	12.7	8.1	39.0	4.9	18.0
SOC	96b	123	43	45.3	14	99	13.4	6.6	28.0	5.3	14.4
SOC	96c	76	60	44.2	16	103	12.7	3.3	21.0	9.2	100.0
TOT	MOY.	12751	8480	62.8	0	0	14.9	0.0	0.0	6.2	0.0

2 NOMBRE ET DISTRIBUTION DES DEBITS

CODE	N O M B R E							P O U R C E N T A G E S						
	0.5	1	5	10	20	30	50	50	30	20	10	5	1	0.5
	< 0.5	à 1	à 5	à 10	à 20	à 30	à 50	> 50	> 30	> 20	> 10	> 5	> 1	> 0.5
12a	5	2	16	10	19	0	1	0	35	22	41	0	2	0
12b	1	0	1	1	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0
13	6	1	9	15	23	8	8	5	13	22	34	12	12	7
14	6	0	4	14	9	6	8	4	9	31	20	13	18	9
15a	21	5	60	17	15	6	4	2	58	16	14	6	4	2
15b	6	1	28	32	34	6	14	6	23	27	28	5	12	5
15c	118	41	434	190	76	13	21	0	59	26	10	2	3	0
21a	9	0	14	10	6	0	0	1	45	32	19	0	0	3
21b	12	2	13	12	3	0	0	0	46	43	11	0	0	0
31a	4	1	6	5	9	0	0	0	30	25	45	0	0	0
31b	0	0	2	5	3	1	1	0	17	42	25	8	8	0
32	14	2	13	11	14	3	2	1	30	25	32	7	5	2
41	1	0	1	0	3	0	0	0	25	0	75	0	0	0
42a	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	6	0	2	0	2	0	0	1	40	0	40	0	0	20
61a	261	44	93	28	17	6	1	0	64	19	12	4	1	0
61b	111	24	86	30	9	3	5	3	63	22	7	2	4	2
61c	67	12	41	16	12	2	2	2	55	21	16	3	3	3
62a	193	40	138	36	31	10	5	7	61	16	14	4	2	3
62b	277	70	227	51	32	2	3	1	72	16	10	1	1	0
71a	185	34	162	74	39	6	3	0	57	26	14	2	1	0
71b	39	14	42	22	5	1	0	0	60	31	7	1	0	0
72a	78	42	429	118	44	10	6	1	71	19	7	2	1	0
72b	164	76	351	114	49	10	7	5	65	21	9	2	1	1
72c	25	15	60	19	4	0	0	1	71	23	5	0	0	1
73a	150	46	402	166	61	5	5	0	63	26	10	1	1	0
73b	21	6	91	35	21	7	9	7	54	21	12	4	5	4
73c	39	12	214	58	17	5	3	0	72	20	6	2	1	0
73d	24	5	80	17	11	2	2	0	71	15	10	2	2	0
74a	235	78	307	70	24	2	0	0	76	17	6	0	0	0
74b	169	60	325	117	73	9	4	1	61	22	14	2	1	0
74c	11	5	35	7	0	1	0	0	81	16	0	2	0	0
75a	86	39	170	88	16	1	1	0	62	32	6	0	0	0
75b	42	8	60	20	9	1	0	0	67	22	10	1	0	0
76a	81	20	141	46	25	14	7	3	60	19	11	6	3	1
76b	36	4	29	11	8	2	4	3	51	19	14	4	7	5
77a	46	20	109	76	23	14	11	2	46	32	10	6	5	1
77b	14	6	22	9	9	2	0	0	52	21	21	5	0	0
77c	11	0	23	7	5	2	2	1	58	18	12	5	5	2
81	6	3	13	8	6	3	0	0	43	27	20	10	0	0
82a	55	3	14	3	0	0	0	0	82	18	0	0	0	0
82b	39	5	19	12	16	0	3	0	38	24	32	0	6	0
82c	6	1	6	3	3	0	0	0	50	25	25	0	0	0
82d	12	4	17	9	5	0	0	0	55	29	16	0	0	0
83	31	3	17	9	2	3	0	0	55	29	6	10	0	0
91a	23	1	10	5	1	0	0	0	62	31	6	0	0	0
92a	80	27	122	27	18	1	0	0	73	16	11	1	0	0
92b	35	3	72	24	27	7	2	1	54	18	20	5	2	1
92c	6	3	30	15	2	1	1	0	61	31	4	2	2	0
93a	109	32	228	54	25	1	0	0	74	18	8	0	0	0
93b	38	12	70	21	15	2	0	0	65	19	14	2	0	0
94a	53	34	147	41	12	0	0	0	74	20	6	0	0	0
94b	67	14	108	30	42	3	12	1	55	15	21	2	6	1
95	29	6	40	6	4	0	1	0	78	12	8	0	2	0
96a	114	10	43	9	12	0	0	0	67	14	19	0	0	0
96b	73	7	21	17	5	0	0	0	49	40	12	0	0	0
96c	15	1	26	20	10	0	3	1	43	33	17	0	5	2
MOY.	3367	904	5243	1870	965	181	161	60	62	22	11	2	2	1

3. DISTRIBUTION DES NIVEAUX STATIQUES ET VENUES D'EAU (m)

SECTEUR HYDRO.	% DE NIVEAUX STATIQUES						% DE VENUES D'EAU						EPAISSEUR I RECOUVREMENT MOYENNE m	
	<10	10-20	20-30	30-40	40-50	>50	I <20	20-40	40-60	60-80	80-100	>100		I
	m	m	m	m	m	m	I	m	m	m	m	m		I
12a	22	29	12	8	12	18	0	18	9	45	27	0	62	
12b	0	0	0	67	33	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	15	55	5	6	6	12	0	100	0	0	0	0	75	
14	89	11	0	0	0	0	17	0	83	0	0	0	48	
15a	19	32	15	16	6	12	1	41	30	18	5	5	42	
15b	56	30	11	2	1	1	0	56	37	7	0	0	49	
15c	30	37	23	10	0	0	4	40	38	13	3	2	35	
21a	6	0	0	17	14	63	0	0	0	11	56	33	60	
21b	0	0	9	24	33	33	0	0	0	40	40	20	67	
31a	0	4	0	29	42	25	0	0	0	0	100	0	67	
31b	0	0	0	18	73	9	0	0	0	0	0	0	53	
32	4	6	8	10	31	41	0	18	18	36	27	0	63	
41	33	0	0	0	33	33	0	0	0	0	0	0	19	
42a	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	18	
51	50	0	17	17	0	0	25	25	0	0	50	0	22	
61a	20	51	18	6	4	2	8	47	34	10	1	0	7	
61b	34	50	13	1	2	0	11	40	23	16	9	1	13	
61c	18	48	31	3	0	0	6	33	25	18	11	6	10	
62a	51	43	5	0	0	0	14	46	19	10	6	5	11	
62b	36	52	9	1	0	2	19	46	24	9	2	0	13	
71a	44	36	13	3	1	1	6	20	38	25	9	2	11	
71b	36	46	7	4	1	6	18	23	36	21	1	0	13	
72a	43	50	7	0	0	0	5	35	39	15	4	2	14	
72b	31	63	5	1	0	0	8	40	33	16	3	0	13	
72c	26	69	5	0	0	0	8	36	38	16	2	0	10	
73a	49	43	7	1	0	1	2	32	41	16	6	2	24	
73b	62	33	5	0	0	0	3	27	35	21	9	5	17	
73c	16	62	19	2	1	0	1	36	44	15	3	2	23	
73d	43	57	0	0	0	0	15	50	21	12	1	1	18	
74a	14	54	23	8	1	0	5	31	36	22	6	0	17	
74b	27	52	15	4	1	0	3	35	40	16	5	0	22	
74c	5	7	30	39	9	11	0	10	38	33	13	5	16	
75a	13	65	21	1	0	0	2	27	46	21	3	0	20	
75b	33	61	6	0	0	0	7	43	34	9	7	0	19	
76a	28	69	4	0	0	0	2	36	40	18	4	0	18	
76b	47	45	8	0	0	0	3	41	48	8	0	0	22	
77a	47	50	4	0	0	0	4	39	44	11	2	0	10	
77b	70	28	2	0	0	0	0	50	34	11	5	0	13	
77c	38	55	8	0	0	0	10	46	27	15	2	0	19	
81	54	34	9	3	0	0	0	43	33	19	5	0	30	
82a	0	0	0	3	14	83	0	0	25	25	50	0	36	
82b	17	21	1	4	13	44	3	18	20	30	15	13	32	
82c	31	12	6	12	25	12	0	0	17	33	33	17	47	
82d	3	18	26	10	10	33	6	17	11	8	36	22	46	
83	0	13	2	17	19	49	0	3	32	38	15	12	35	
91a	0	72	11	6	6	6	7	33	40	13	0	7	12	
92a	88	11	1	0	0	0	3	52	38	5	1	0	31	
92b	77	22	1	0	0	0	0	28	30	25	13	4	40	
92c	69	31	0	0	0	0	2	25	46	25	0	2	39	
93a	66	31	2	0	0	0	2	35	44	15	3	0	33	
93b	72	25	3	0	0	0	0	34	53	9	4	0	32	
94a	64	34	1	0	0	0	1	24	49	23	4	0	33	
94b	88	8	1	1	2	0	2	31	33	25	7	2	43	
95	13	74	13	0	0	0	9	45	34	12	0	0	26	
96a	37	50	7	6	0	0	11	60	22	7	1	0	14	
96b	14	48	14	0	0	0	20	59	16	6	0	0	10	
96c	20	77	3	0	0	0	8	81	8	2	0	0	13	
MOY.	37	45	10	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	

4. DONNEES STATISTIQUES SUR LES POMPAGES D'ESSAI
TABLEAU 1

CODE AQUIF	CODE SECTEUR	NB ESS	NB PAL	NB CST	Q MOY	S P MAX	E C MIN	ECART TYPE	T R A MOY	N S M MAX	MIN
CTQ	12a	33	22	21	1.21	5.50	0.10	1.43	380.4	2700	3
CTQ	13	28	23	28	10.43	76.50	0.20	16.10	5806.0	50000	18
CTQ	14	18	17	18	7.69	25.90	0.40	7.91	6792.9	20000	800
CTQ	15a	61	38	27	3.71	31.20	0.10	6.14	1302.1	18000	2
CTQ	15b	78	54	59	10.74	131.0	0.10	22.88	3923.0	22000	4
CTQ	15c	391	255	151	2.80	70.50	0.10	6.04	200.3	14000	1
CSE	21a	1	1	1	0.30	0.30	0.30	0.00	30.0	30	30
CSE	21b	10	9	10	2.65	14.50	0.10	4.55	1956.7	12000	7
CIT	31a	5	4	5	44.72	70.00	1.10	23.24	18024.0	40000	120
CIT	31b	4	3	4	10.47	21.20	1.00	7.55	5125.0	12000	500
CIT	32	13	6	13	5.40	10.30	1.10	2.61	1146.2	3200	130
PRI	51	1	1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0
CAM	61a	30	27	7	0.78	5.20	0.10	1.25	168.3	800	4
CAM	61b	68	59	25	0.60	6.60	0.10	1.03	127.7	2500	1
CAM	61c	44	29	33	1.57	10.20	0.10	2.32	304.0	2500	1
CAM	62a	48	33	27	1.67	22.20	0.10	4.07	325.9	2400	4
CAM	62b	257	151	157	0.50	15.00	0.10	1.16	195.2	5000	1
ICT	71b	4	4	4	1.45	3.30	0.30	1.22	1341.0	4800	55
ICT	72a	106	22	86	0.72	20.50	0.10	2.26	99.7	1500	1
ICT	72b	1	1	0	0.20	0.20	0.20	0.00	46.0	46	46
ICT	73a	312	75	256	1.46	46.70	0.10	3.82	195.3	5900	1
ICT	73b	59	20	54	1.94	22.20	0.10	4.16	841.6	9200	1
ICT	73c	212	49	159	2.26	128.0	0.10	9.87	150.5	2800	1
ICT	73d	27	9	24	8.77	75.00	0.10	20.94	619.7	10000	1
ICT	74a	104	82	22	0.70	8.80	0.10	1.37	229.5	5000	2
ICT	74b	119	35	75	1.67	15.70	0.10	2.82	417.2	3900	10
ICT	74c	4	3	1	1.00	2.00	0.10	0.82	205.8	500	31
ICT	75a	44	21	27	1.13	7.60	0.10	1.52	253.4	2000	4
ICT	75b	40	29	6	0.63	3.00	0.10	0.66	344.4	1000	42
ICT	76a	234	214	33	0.53	17.10	0.10	1.62	179.4	3800	1
ICT	76b	58	56	2	0.78	6.40	0.10	1.33	269.1	3300	2
ICT	77a	67	60	12	0.91	6.10	0.10	1.27	271.0	4000	5
ICT	77b	7	2	5	1.40	6.40	0.10	2.24	358.3	2000	6
ICT	77c	40	35	3	0.76	12.00	0.10	1.99	340.7	5000	2
ICP	81	14	7	14	1.56	4.30	0.20	1.28	233.7	1000	5
ICP	82b	5	0	5	12.70	43.70	1.00	16.24	0.0	0	0
ICP	82c	3	3	3	0.57	1.50	0.10	0.66	70.0	190	10
SOC	91a	4	3	4	2.23	3.30	0.10	1.51	114.8	220	5
SOC	92a	66	30	66	0.38	2.40	0.10	0.37	34.6	200	1
SOC	92b	54	19	50	0.38	1.70	0.10	0.38	38.9	250	3
SOC	92c	5	1	3	0.17	0.40	0.10	0.13	17.0	40	7
SOC	93a	135	54	128	0.41	2.90	0.10	0.49	45.5	410	1
SOC	93b	44	26	43	0.45	2.70	0.10	0.54	76.2	710	2
SOC	94a	119	74	17	0.29	1.60	0.10	0.29	386.9	720	150
SOC	94b	70	51	67	0.51	3.60	0.10	0.60	62.6	580	5
SOC	95	15	12	2	0.57	3.30	0.10	0.85	471.5	3600	2
SOC	96a	9	9	0	0.63	1.20	0.10	0.41	288.8	1000	11
SOC	96b	3	3	0	0.63	1.20	0.30	0.40	561.0	1300	33
SOC	96c	7	7	0	0.54	1.20	0.20	0.34	252.3	710	43

4. DONNEES STATISTIQUES SUR LES POMPAGES D'ESSAI
TABLEAU 2

CODE	NB SS	NB ST	NB TR	Q S P E C					T R A N S M					*10E-6 >100000
				<1	1-5	5-10	10-20	>20	<10	10 100	100 1000	1000 10000		
12a	7	11	8	58	38	4	0	0	0	20	43	17	20	
13	0	24	3	14	32	21	21	11	0	0	7	15	78	
14	0	14	3	11	50	6	28	6	0	0	0	7	93	
15a	3	24	25	51	25	12	8	3	0	33	36	17	14	
15b	3	58	15	21	39	19	9	12	0	5	14	43	39	
15c	14	285	86	53	31	10	4	2	0	37	46	16	2	
21a	0	0	1	100	0	0	0	0	0	0	100	0	0	
21b	2	8	0	70	10	10	10	0	0	10	50	20	20	
31a	0	5	0	0	20	0	0	80	0	0	0	20	80	
31b	0	4	0	0	25	25	25	25	0	0	0	25	75	
32	0	8	3	0	38	54	8	0	0	0	0	62	38	
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
61a	1	4	24	79	18	4	0	0	0	13	47	40	0	
61b	9	6	43	87	12	2	0	0	0	22	48	28	1	
61c	4	15	25	53	38	6	3	0	0	31	26	29	14	
62a	7	12	22	73	20	2	2	2	0	13	38	38	11	
62b	37	59	111	87	12	0	0	0	0	19	49	26	5	
71b	0	3	1	50	50	0	0	0	0	0	50	25	25	
72a	16	65	10	87	11	1	0	1	0	37	42	19	2	
72b	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	0	0	
73a	44	193	48	70	23	3	2	1	0	32	45	17	6	
73b	5	27	20	67	22	7	0	4	0	24	30	28	18	
73c	12	126	37	72	20	4	1	2	0	28	48	21	4	
73d	2	16	4	67	17	0	4	12	0	28	50	17	6	
74a	5	12	86	83	15	2	0	0	0	18	42	34	6	
74b	2	38	32	60	31	5	4	0	0	0	26	59	14	
74c	0	0	4	50	50	0	0	0	0	0	50	50	0	
75a	0	2	34	68	27	5	0	0	0	7	39	50	5	
75b	0	6	2	81	19	0	0	0	0	0	25	62	12	
76a	13	9	142	92	7	0	1	0	0	15	50	33	3	
76b	0	2	43	79	17	4	0	0	0	9	45	41	5	
77a	4	2	37	76	23	2	0	0	0	6	53	33	8	
77b	1	1	3	83	0	17	0	0	0	14	29	43	14	
77c	0	6	28	83	14	0	3	0	0	5	48	42	5	
81	1	0	9	45	55	0	0	0	0	20	30	40	10	
82b	0	4	1	0	60	0	20	20	0	0	0	0	0	
82c	0	3	0	67	33	0	0	0	0	0	67	33	0	
91a	1	1	2	33	67	0	0	0	0	25	25	50	0	
92a	18	30	15	92	8	0	0	0	0	20	73	8	0	
92b	10	22	19	92	8	0	0	0	0	25	64	11	0	
92c	0	2	1	100	0	0	0	0	0	40	60	0	0	
93a	36	58	29	91	9	0	0	0	0	28	60	12	0	
93b	6	24	10	88	12	0	0	0	0	20	66	14	0	
94a	0	17	0	96	4	0	0	0	0	0	0	100	0	
94b	19	20	24	85	15	0	0	0	0	19	61	20	0	
95	0	2	13	85	15	0	0	0	0	27	40	20	13	
96a	0	1	8	78	22	0	0	0	0	0	33	56	11	
96b	0	0	3	67	33	0	0	0	0	0	33	33	33	
96c	0	0	7	86	14	0	0	0	0	0	43	57	0	

5 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

CODE AQUIF	CODE SECT.	nb	Ca		Mg		Na		K		Fe						
			mg/l	max	ET	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET			
CTQ	12a	4	44.1	88	39	24.7	54	22	2.3	2	0	2.3	2	0	9.6	10	0.0
CTQ	13	26	29.5	282	52	15.4	117	22	14.8	62	19	12.5	38	12	2.5	17	4.6
CTQ	14	44	27.1	480	70	9.4	51	9	20.9	210	55	0.0	0	0	6.5	28	7.5
CTQ	15a	14	26.2	63	17	27.1	107	29	67.0	102	40	4.8	10	4	0.4	1	0.4
CTQ	15b	22	21.4	45	12	16.1	70	17	0.7	2	0	4.2	4	0	1.1	2	0.6
CTQ	15c	30	13.6	42	11	12.9	87	18	0.8	1	0	4.2	11	4	0.7	3	0.9
CIT	31a	34	61.4	179	44	46.8	115	29	22.4	22	0	188.6	291	92	1.0	2	0.5
CIT	31b	11	241.4	465	117	170.2	452	146	0.0	0	0	0.0	0	0	1.9	6	1.8
CIT	32	12	53.1	142	44	62.3	194	60	304.5	689	286	3.4	3	0	0.9	1	0.2
CIN	41	1	340.0	340	0	57.0	57	0	0.0	0	0	55.0	55	0	0.0	0	0.0
CIN	42a	2	208.7	250	41	91.5	120	28	0.0	0	0	0.0	0	0	0.3	0	0.0
PRI	51	6	700.0	865	111	156.6	226	52	0.0	0	0	0.0	0	0	2.1	4	1.3
CAM	61a	43	86.1	651	136	39.6	260	43	1.9	5	2	11.5	66	18	7.2	20	9.0
CAM	61b	30	41.1	122	29	21.3	52	15	75.7	453	117	2.4	12	2	1.1	5	1.1
CAM	61c	32	67.4	281	69	56.0	108	27	30.4	89	35	2.3	4	1	0.9	1	0.3
CAM	62a	152	76.1	570	88	47.5	853	77	23.7	210	44	3.8	9	2	2.0	24	5.2
CAM	62b	276	113.9	786	105	23.5	219	23	45.1	300	56	3.5	16	2	0.7	2	0.4
ICT	71a	1	20.8	21	0	14.5	14	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0.0
ICT	71b	4	38.5	58	12	12.3	16	4	1.6	2	1	143.0	143	0	0.2	0	0.0
ICT	72a	93	5.8	30	5	2.9	27	5	1.2	5	1	3.2	19	5	0.1	0	0.0
ICT	72b	52	10.3	54	13	9.4	68	15	0.3	4	1	17.1	120	28	3.7	9	3.7
ICT	73a	143	20.5	109	19	16.6	184	21	2.4	60	9	1.9	4	1	1.0	3	0.5
ICT	73b	57	16.8	219	31	13.9	78	18	0.8	2	0	2.6	19	4	1.3	12	2.3
ICT	73c	66	28.3	401	55	18.7	286	42	5.6	30	7	2.1	7	1	0.8	2	0.6
ICT	73d	17	46.5	165	42	36.5	88	26	1.1	2	1	2.9	3	0	0.5	1	0.6
ICT	74a	477	21.6	266	26	12.3	102	12	5.7	75	14	6.4	107	10	1.1	38	3.2
ICT	74b	641	26.9	314	22	15.1	100	12	4.3	74	10	3.4	43	4	0.8	12	1.4
ICT	74c	5	95.3	238	107	126.9	266	108	255.9	1000	430	0.0	0	0	1.2	1	0.0
ICT	75a	471	19.4	332	21	11.2	107	10	16.1	41	15	5.0	26	5	1.0	11	1.6
ICT	75b	48	25.6	60	13	14.5	45	8	7.0	31	8	2.4	4	1	0.3	1	0.2
ICT	76a	239	31.5	156	29	11.4	54	8	11.1	70	12	5.1	36	5	0.3	2	0.4
ICT	76b	47	25.4	51	14	12.3	40	9	15.2	54	15	3.5	8	2	0.1	0	0.0
ICT	77a	62	33.9	90	22	25.3	89	20	5.0	15	5	4.6	7	2	0.5	1	0.3
ICT	77b	12	43.9	100	32	27.5	64	15	4.3	11	4	0.0	0	0	0.7	1	0.4
ICT	77c	35	27.9	117	21	17.7	56	13	4.4	10	4	4.5	7	1	0.1	0	0.1
ICP	81	72	40.5	653	77	30.2	250	35	65.1	300	101	8.0	12	3	1.5	6	1.3
ICP	82a	1	41.6	42	0	21.4	21	0	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0.0
ICP	82b	6	40.6	81	23	14.4	36	12	0.0	0	0	1.5	2	0	0.7	1	0.1
ICP	82d	23	66.9	321	70	55.7	160	44	0.0	0	0	12.1	62	21	0.9	1	0.2
ICP	83	3	82.2	138	39	95.2	128	47	0.0	0	0	0.0	0	0	0.0	0	0.0
SOC	91a	1	22.4	22	0	6.0	6	0	0.0	0	0	4.0	4	0	1.6	2	0.0
SOC	92a	105	25.0	127	16	14.8	69	10	4.7	100	13	0.9	6	1	1.1	2	0.6
SOC	92b	63	22.5	72	12	14.9	43	8	2.8	26	5	3.5	16	5	0.9	2	0.6
SOC	92c	26	14.1	34	8	10.1	35	8	1.0	2	1	0.0	0	0	0.7	1	0.2
SOC	93a	192	17.7	50	9	12.3	38	8	3.0	17	3	4.9	18	5	0.8	12	1.7
SOC	93b	68	18.6	43	10	10.5	33	6	5.7	65	8	3.9	64	9	0.5	2	0.4
SOC	94a	73	17.6	41	8	13.8	29	6	5.9	34	8	2.2	14	2	0.3	1	0.3
SOC	94b	46	20.5	43	11	10.2	30	7	4.8	17	4	5.9	9	2	0.7	1	0.0
SOC	95	40	38.5	94	21	32.5	88	18	4.8	25	6	7.8	10	2	1.0	3	1.1
SOC	96a	35	63.7	264	58	31.3	189	42	50.9	161	51	29.0	162	47	4.1	26	11.9
SOC	96b	12	43.5	176	45	55.4	157	46	0.0	0	0	0.0	0	0	7.0	22	9.2
SOC	96c	54	26.0	102	22	40.5	166	35	16.7	52	13	12.9	27	8	2.0	4	1.0

5 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

code	Cl			SO4			CO3		CO3H			NO3			
	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET	mg/l	max	ET
12a	63.9	157.0	65.9	2.0	2.0	0.0	0.0	0	0.0	152.0	297.0	120.9	1.1	1.8	0.7
13	19.0	190.0	45.1	46.5	864.0	164.2	0.0	0	0.0	140.2	280.0	64.1	8.3	16.3	5.1
14	11.6	64.0	20.0	16.3	87.0	22.7	0.0	0	0.0	93.8	222.0	46.5	0.0	0.0	0.0
15a	30.5	218.0	54.7	57.2	232.5	74.7	6.0	6	0.0	174.1	342.0	96.9	0.1	0.1	0.0
15b	8.3	56.0	13.4	7.0	30.0	7.5	1.8	2	0.0	137.6	336.0	82.1	5.6	5.6	0.0
15c	32.3	697.0	128.2	15.7	90.0	21.0	0.0	0	0.0	121.2	565.0	126.9	0.2	0.3	0.0
31a	1040	2574	804.3	225.4	490.0	149.2	9.0	9	0.0	211.2	315.0	52.1	0.6	1.3	0.3
31b	986.8	2998	1116	378.9	675.0	210.2	9.6	10	0.0	328.1	858.0	277.5	0.7	1.6	0.5
32	155.7	970.0	311.0	147.0	850.0	268.7	0.0	0	0.0	324.9	865.0	244.2	14.1	25.9	11.8
41	274.5	274.5	0.0	340.0	340.0	0.0	0.0	0	0.0	165.0	165.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42a	23.0	25.5	2.5	700.0	700.0	0.0	0.0	0	0.0	351.0	352.0	1.0	6.5	11.5	5.1
51	2467	5548	2146	271.2	600.0	228.6	0.0	0	0.0	105.5	115.0	8.7	12.3	19.6	8.6
61a	114.9	897.0	174.5	74.8	475.0	114.1	0.0	0	0.0	324.8	602.0	118.7	8.3	69.9	15.2
61b	19.8	63.0	20.0	33.9	202.5	50.0	0.0	0	0.0	288.1	626.0	138.7	1.8	8.8	2.7
61c	118.0	288.0	67.8	63.5	375.0	97.8	0.0	0	0.0	296.1	458.0	90.1	5.9	10.2	4.3
62a	74.4	2100	198.5	71.0	1120	130.1	17.2	22	3.1	312.9	605.0	112.8	40.1	264.0	54.5
62b	19.9	444.0	42.8	24.1	345.0	34.5	76.8	78	1.2	280.5	611.0	114.4	33.4	132.0	39.3
71a	4.0	4.0	0.0	1.7	1.7	0.0	0.0	0	0.0	305.0	305.0	0.0	0.0	0.0	0.0
71b	14.8	50.5	20.7	1.8	1.8	0.0	0.0	0	0.0	160.5	275.0	100.2	0.0	0.0	0.0
72a	2.6	20.0	2.6	1.1	5.2	1.2	0.0	0	0.0	25.5	101.0	18.5	0.4	1.8	0.4
72b	6.2	27.0	7.5	11.3	134.0	28.5	0.0	0	0.0	60.4	457.0	101.1	10.2	29.1	13.3
73a	3.6	30.0	5.6	19.3	625.0	74.4	0.0	0	0.0	127.0	559.0	110.6	1.2	2.2	0.7
73b	1.8	33.0	5.7	6.6	75.0	17.5	0.0	0	0.0	114.8	303.0	101.7	0.0	0.0	0.0
73c	3.3	28.0	6.3	68.4	1125	230.4	0.0	0	0.0	108.2	392.0	103.8	3.6	11.2	3.3
73d	3.9	16.5	5.6	32.0	212.5	56.6	0.0	0	0.0	157.9	316.0	82.2	0.0	0.0	0.0
74a	19.4	417.0	40.1	18.4	391.0	32.9	2.9	6	2.3	133.2	428.0	88.5	2.7	42.0	5.3
74b	33.2	4224	224.2	10.2	197.0	15.8	16.1	176	36.2	167.0	432.0	98.0	4.1	357.0	23.1
74c	246.3	798.0	291.8	1139	3225	1243	0.0	0	0.0	286.8	593.0	195.3	0.7	0.9	0.2
75a	13.0	300.0	31.3	22.6	1225	80.9	10.8	11	0.0	113.8	314.0	78.4	2.3	40.0	4.7
75b	3.9	30.0	5.5	18.4	270.0	41.4	28.6	48	17.9	139.0	287.0	63.6	6.9	69.0	12.7
76a	2.9	35.0	4.5	12.1	120.0	19.5	2.4	2	0.0	125.3	296.0	67.3	6.3	44.0	7.9
76b	1.4	7.0	1.1	9.6	37.0	7.9	0.0	0	0.0	115.0	205.0	61.1	9.3	26.4	5.1
77a	7.7	50.0	10.0	19.4	100.0	24.4	8.1	24	11.2	240.6	600.0	143.8	5.0	11.0	3.5
77b	11.3	32.5	9.9	13.0	42.5	12.4	0.0	0	0.0	270.6	382.0	93.2	1.1	3.0	1.3
77c	2.2	20.0	3.4	23.4	125.0	33.4	0.0	0	0.0	138.1	320.0	67.8	10.3	22.4	5.4
81	42.9	748.0	124.0	170.0	3850	484.3	0.0	0	0.0	176.7	624.0	127.8	5.9	21.0	7.2
82a	0.0	0.0	0.0	61.0	61.0	0.0	0.0	0	0.0	190.0	190.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82b	10.9	32.0	10.9	44.2	96.2	30.9	0.0	0	0.0	158.5	391.0	117.0	0.2	0.3	0.1
82d	411.8	1514	555.3	151.1	820.0	199.3	0.0	0	0.0	404.7	650.0	167.2	0.8	1.4	0.6
83	37.3	53.0	11.1	36.8	97.5	42.9	0.0	0	0.0	384.7	406.0	15.1	1.1	1.1	0.0
91a	28.0	28.0	0.0	2.5	2.5	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	3.4	0.0
92a	8.9	334.0	43.2	5.4	238.0	27.9	0.0	0	0.0	153.6	231.0	43.6	0.2	0.3	0.1
92b	3.0	25.5	5.7	4.2	40.0	7.1	0.0	0	0.0	167.8	364.0	64.9	0.0	0.0	0.0
92c	0.7	1.5	0.4	3.8	28.0	7.4	0.0	0	0.0	95.0	211.0	55.5	0.0	0.0	0.0
93a	3.1	32.0	4.8	4.3	88.7	9.2	20.0	20	0.0	119.5	374.0	59.3	1.8	8.8	2.3
93b	4.8	22.0	5.8	0.8	10.2	1.6	0.0	0	0.0	126.1	275.0	56.2	1.7	5.7	2.1
94a	4.2	19.3	4.6	10.4	26.3	5.3	8.1	8	0.0	121.8	243.0	45.1	2.9	40.0	6.2
94b	1.4	5.0	1.2	2.4	24.5	6.7	0.0	0	0.0	142.0	257.0	69.7	0.0	0.0	0.0
95	14.1	120.0	26.4	8.4	48.0	12.2	7.7	12	3.0	276.6	479.0	98.2	0.7	1.6	0.5
96a	122.8	980.0	196.3	113.1	1000	211.0	0.0	0	0.0	349.7	727.0	120.1	2.2	6.1	2.8
96b	66.0	268.0	84.2	24.4	97.5	32.9	0.0	0	0.0	256.8	479.0	125.7	1.3	1.7	0.6
96c	53.1	523.0	103.9	80.9	3325	450.4	18.0	18	0.0	270.7	514.0	106.1	1.5	3.0	1.2

5 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

code	Ph			RYZNAR		SAR				TAC			Cond		
	max	ET		max	ET	max	ET	mg/l	max	ET	mmhos	max	ET		
12a	6.8	7.2	0.5	13.6	14.3	1.0	0.0	0.0	0.0	156.0	243.0	94.9	702	1392	626
13	7.2	8.1	0.6	8.7	10.6	0.9	0.0	0.0	0.0	111.0	229.0	56.9	381	2790	507
14	7.0	8.2	0.7	9.7	17.5	1.6	0.8	5.9	1.6	79.0	182.0	41.7	253	761	192
15a	7.3	8.5	0.6	8.6	13.8	1.8	2.4	4.0	1.6	143.3	280.0	79.4	664	2400	642
15b	7.2	8.4	0.5	8.9	10.9	1.4	0.0	0.0	0.0	111.8	275.0	68.3	282	1288	263
15c	6.8	8.5	0.9	10.3	14.8	2.2	0.0	0.0	0.0	99.2	462.0	103.9	224	1400	259
31a	7.3	8.6	0.4	7.7	10.0	1.0	0.0	0.0	0.0	164.4	258.0	56.5	1444	6720	1326
31b	7.5	8.4	0.7	5.7	9.7	1.7	0.0	0.0	0.0	424.0	963.0	320.9	5660	12023	4050
32	7.4	8.4	0.4	7.5	8.8	1.2	1.6	3.0	1.4	241.7	705.0	189.8	1294	4460	1512
41	7.8	7.8	0.0	5.7	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	135.0	135.0	0.0	12740	12740	0
42a	7.3	7.7	0.4	5.9	6.4	0.5	0.0	0.0	0.0	291.0	292.0	1.0	3500	3500	0
51	7.4	7.8	0.3	5.9	6.1	0.2	0.0	0.0	0.0	87.0	94.0	7.1	12719	23323	7515
61a	7.2	8.7	0.8	9.3	17.8	4.1	0.1	0.2	0.0	260.8	656.0	110.5	1077	3871	836
61b	7.7	8.4	0.6	7.4	12.5	1.5	3.4	28.5	6.6	237.9	512.0	111.0	693	2050	450
61c	7.6	8.1	0.3	7.8	15.8	2.3	0.9	2.0	0.8	270.1	375.0	64.5	1164	3700	840
62a	7.6	12.3	0.5	7.0	9.7	1.1	0.8	7.8	1.4	254.3	497.0	87.9	966	6140	755
62b	7.4	10.7	0.4	6.6	10.6	0.9	2.1	15.0	3.1	242.5	523.0	89.7	587	2323	322
71a	8.0	8.0	0.0	7.3	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	250.0	250.0	0.0	534	534	0
71b	7.2	8.1	0.7	8.6	11.6	2.0	0.1	0.1	0.0	131.8	225.0	81.9	385	612	144
72a	6.4	64.0	6.1	13.2	19.0	1.5	0.2	0.6	0.1	20.2	83.0	15.1	58	389	49
72b	6.0	8.2	0.9	12.6	19.0	2.7	0.0	0.0	0.0	47.5	374.0	81.7	159	848	213
73a	6.7	8.3	0.8	10.0	15.6	2.4	0.3	2.0	0.5	104.4	467.0	91.1	236	1666	244
73b	6.6	11.7	1.0	10.1	16.0	2.5	0.1	0.2	0.0	74.3	248.0	83.4	161	853	180
73c	6.5	11.8	1.3	10.5	14.6	2.6	0.3	1.7	0.4	79.9	305.0	80.1	243	1985	361
73d	7.2	7.9	0.9	8.6	15.6	2.4	0.0	0.0	0.0	129.2	259.0	67.3	420	1012	295
74a	6.7	9.0	0.8	9.8	17.4	1.9	0.7	5.5	1.2	108.3	350.0	71.8	320	4100	403
74b	7.0	12.3	0.9	9.0	17.3	2.0	0.3	2.4	0.4	137.0	356.0	80.6	291	1978	198
74c	7.2	7.9	0.9	8.4	13.9	3.2	5.6	10.8	5.2	234.6	485.0	159.7	3736	7712	3228
75a	6.6	8.7	0.8	10.2	18.1	2.1	0.6	1.7	0.6	92.9	257.0	64.3	247	2156	209
75b	7.4	9.7	0.7	8.4	14.3	1.5	0.5	2.4	0.5	131.7	280.0	60.2	278	580	115
76a	7.1	8.6	0.5	9.7	13.4	2.2	0.7	2.9	0.6	41.0	85.0	28.6	252	734	146
76b	7.1	7.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.7	2.6	0.7	0.0	0.0	0.0	265	426	120
77a	7.3	8.6	0.7	8.1	13.1	1.9	0.3	0.8	0.2	239.9	537.0	131.4	422	1122	237
77b	7.7	8.3	0.5	7.2	8.1	0.5	0.2	0.3	0.1	238.6	313.0	56.0	597	1471	288
77c	7.2	7.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	357	1065	212
81	6.8	8.3	1.1	8.8	12.7	1.6	1.4	5.7	1.8	141.9	511.0	102.0	714	5380	816
82a	7.8	7.8	0.0	7.2	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	156.0	156.0	0.0	362	362	0
82b	7.0	8.1	0.8	8.8	12.6	2.1	0.0	0.0	0.0	129.8	320.0	95.7	418	800	230
82d	7.5	8.2	0.5	7.0	8.6	0.8	0.0	0.0	0.0	330.6	532.0	132.9	1372	2900	653
83	8.1	8.2	0.0	5.9	6.2	0.4	0.0	0.0	0.0	312.7	332.0	13.7	1017	1026	7
91a	6.9	6.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	178	178	0
92a	7.2	8.3	0.6	8.6	12.1	1.0	0.2	2.1	0.3	125.9	189.0	35.6	271	1430	166
92b	7.1	8.2	0.6	8.7	11.8	1.2	0.2	0.9	0.2	137.7	298.0	52.8	279	846	118
92c	6.8	8.4	0.6	10.0	14.7	1.6	0.1	0.1	0.0	85.5	210.0	51.2	178	446	98
93a	6.8	8.3	0.5	9.5	13.3	1.3	0.2	0.9	0.2	101.9	306.0	49.7	216	611	96
93b	6.9	8.0	0.6	9.4	15.4	1.4	0.3	2.7	0.4	103.4	225.0	46.0	225	473	91
94a	7.3	8.6	0.6	8.7	13.5	1.2	0.4	1.7	0.4	134.7	427.0	67.3	226	480	93
94b	7.3	8.3	0.8	9.0	14.9	2.0	0.3	0.9	0.2	115.7	210.0	57.0	222	399	107
95	7.9	8.8	0.6	7.3	11.7	1.1	0.3	1.2	0.3	233.3	392.0	83.7	474	833	178
96a	7.8	8.3	0.3	7.0	14.1	1.4	1.8	8.8	2.6	288.2	595.0	96.4	1786	12600	2650
96b	7.3	7.8	0.5	8.1	13.3	1.8	0.0	0.0	0.0	209.8	392.0	102.9	866	2237	746
96c	7.6	8.6	0.5	8.0	11.4	1.1	0.8	2.4	0.7	221.7	423.0	88.3	679	3102	511







