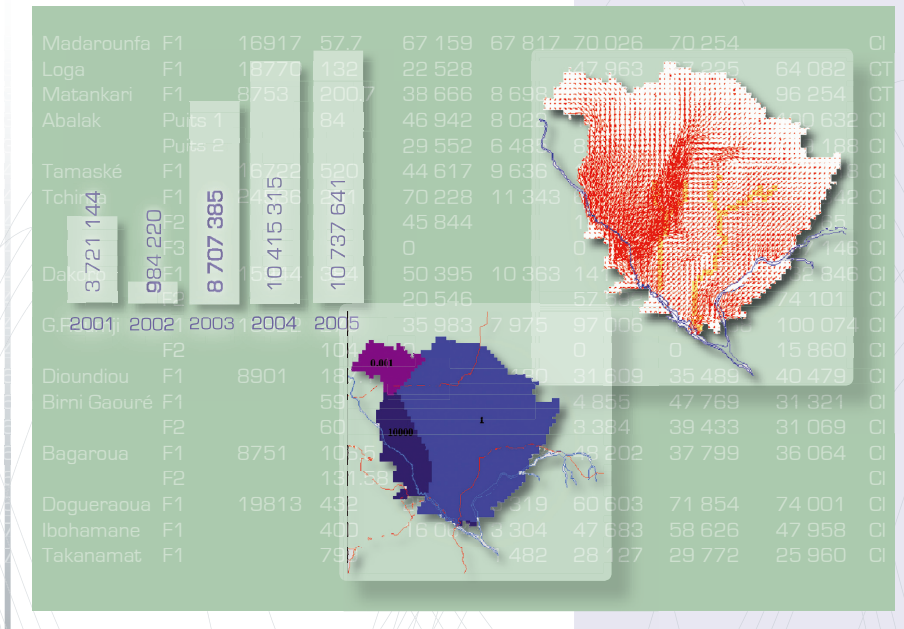


Systeme Aquifere d'Iullemeden

Mali - Niger - Nigeria

Tome III

● MODÈLE HYDROGÉOLOGIQUE



OSS OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL

Systeme Aquifere d'Iullemeden

Mali - Niger - Nigeria

Tome III

MODELE

HYDROGEOLOGIQUE

Tunis, 2011

Autres ouvrages (SAI)

Tome I : Analyse diagnostique transfrontalière

Tome II : Base de données commune

Tome IV : Gestion participative des risques transfrontaliers : éléments stratégiques

Tome V : Suivi-évaluation des aquifères transfrontaliers

Copyright © Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), 2011

Edité à Tunis avec le soutien financier de l'Unesco/PHI et de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

ISBN : 978-9973-856-43-2

Remerciements

Ce document a été relu et édité sous la supervision de M. Chedli FEZZANI, Administrateur du Secrétariat exécutif de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Il émane du travail conséquent mené de janvier 2004 à juin 2009, par l'équipe permanente du projet « Système aquifère d'Iullemeden » de l'OSS, en partenariat avec le Mali, le Niger et le Nigeria, sous la coordination scientifique technique de M. Mohamedou Ould Baba Sy, expert en base de données, SIG et modélisation hydrogéologique, Ahmed Mamou conseiller scientifique et Abdel Kader Dodo coordinateur régional du projet.

Ce travail est l'aboutissement de leurs efforts conjugués à ceux des experts des trois pays concernés à travers notamment leur participation aux sessions de formation en base de données, SIG et Modèle mathématique animé par Mohamedou Ould Baba Sy.

A cette oeuvre, ont contribué des personnalités à qui nous exprimons notre profonde gratitude, tout particulièrement:

MALI

- /// M. Seidou Maiga, Hydrogéologue, point focal national, DNH
- /// Damassa Bouaré, Ingénieur Hydrogéologue, Responsable Base de données, DNH,
- /// M. Luc Diakité, Ingénieur hydrogéologue, DNH
- /// Pr Amadou Zanga TRAORE, Ecole nationale d'ingénieurs

NIGER

- /// Abdou Moumouni MOUSSA, Hydrogéologue, Point focal national
- /// Sanoussi RABE, Hydrogéologue
- /// Hassoumane Hassane, Ingénieur géomètre adj hydraulique
- /// Hassane Adamou, Hydraulicien
- /// Bako Mamane Hydraulicien informaticien

NIGERIA

- /// John Chabo, National focal, Deputy Director, FMWR, Abuja
- /// M. Stephan Margima Jabo, Hydrogeologist FMWR, Abuja
- /// M. S. Mukaile Babarinde, Prin. Hydrogeologist, FMWR, Abuja
- /// M. Hussaini Sunday Ushe, Hydrogeologist, FMWR
- /// Simon O. Okpara, Hydrogeologist, FMWR, Abuja

CONSULTANTS INTERNATIONAUX

- /// Dr PIZZI Giuseppe, Spécialiste en modélisation
- /// Abdous Belcacem, Expert Base de données

PARTENAIRES DE COOPERATION

- /// Takehiro Nakamura, PNUE/GEF
- /// Alice Aureli, Unesco

Nous remercions également l'Unesco/PHI et la GIZ pour leur soutien financier à l'édition de ce document, ainsi que la France, la Suisse, la FAE/BAD et l'ABN pour leur soutien constant au programme Eau de l'OSS.

Nous sommes aussi redevable à Mme Tharouet Elamri qui a assuré la conception de la maquette et la mise en forme finale de ce document sans oublier l'équipe administrative et financière qui n'ont ménagé aucun effort pour la bonne mise en œuvre de toutes les activités de ce projet.

Le Coordinateur du Programme Eau

Abdelkader Dodo



Le Secrétariat exécutif

Dr Chedli Fezzani



Table des matières

I. CADRE ET LIMITES DE L'ETUDE	13
I.1. Cadre de l'étude	13
I.2. Limites de l'étude	14
I.3. Approche de l'étude	15
II. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES	17
II.1. Outils de travail	17
II.2. La base de données commune du SAI	17
II.3. Le système d'informations géographiques (SIG)	19
II.4. Le logiciel utilisé (PM5)	20
III. CONCEPTUALISATION DU MODELE	23
III.1. Configuration structurale du SAI	23
III.2. Extension et délimitation des couches	38
III.3. Calcul des réserves du CT et du Ci	44
IV. CONSTRUCTION DU MODELE	47
IV.1. Schéma hydrogéologique du modèle	47
IV.2. Discrétisation de l'espace et construction de la grille du modèle	47
IV.3. Les conditions aux limites	48
IV.4. Données hydrodynamiques	50
IV.5. Données sur les niveaux piézométriques	51
IV.6. Données sur les prélèvements et leur évolution	52
IV.7. Conclusion	61
V. CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT	63
V.1. Définition d'un état de référence	63
V.2. Définition des critères de référence pour le calage en permanent	64
V.3. Les étapes du calage	65
V.4. Evaluation du calage en régime permanent	65
V.5. Résultats du calage en régime permanent	68
VI. CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE	77
VI.1. Définition des historiques de référence et des critères de calage	77
VI.2. Degré de connaissance des historiques de prélèvements	77

VI.3. Les chroniques de niveaux piézométriques de référence	79
VI.4. Les étapes du calage en transitoire	80
VI.5. Résultats du calage en régime transitoire	81

VII. CONCLUSION

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

ABN	Autorité du bassin du Niger
ABV	Autorité du bassin de la Volta
ACDI	Agence canadienne de développement international
ACMAD	African Centre of Meteorological Application for Development
ADB	Banque asiatique de développement
ADT	Analyse diagnostique transfrontalière
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AMCOW	African Ministers' Council on Water
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
BAD	Banque africaine de développement
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles)
BRGM	Bureau des recherches géologiques et minières
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies pour les changements climatiques
CCRE	Centre de coordination des ressources en eau de la CEDEAO
CEDEAO	Communauté économique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CEN-SAD	Communauté des Etats sahélo-sahariens
CI	Continental intercalaire
CILSS	Comité inter-Etats de lutte contre la sécheresse au Sahel
CNCS	Comité national de coordination et de suivi des activités
CRA	Centre régional Agrhymet
CT	Continental Terminal
DDC-SUISSE	Direction du développement et de la coopération - Suisse
DSRP	Document de stratégie de réduction de la pauvreté
ENVISAT	ENVironment SATellite
EBRD	Banque européenne pour la reconstruction et le développement
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)
FAE	Facilité africaine de l'eau
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEM	Fonds pour l'environnement mondial
FFEM	Fonds français pour l'environnement mondial
FIDA	Fonds international pour le développement agricole
GEF	Global Environment Facility
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
GICRESAIT	Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères

GIS	d'Iullemeden, de Taoudéni /Tanezrouft et du fleuve Niger Geographical Information System
GTZ	Agence de coopération technique allemande pour le développement
IDB	Banque inter-américaine pour le développement
IGAD	Inter Governmental Authority for Development
JRC	Joint Research Center
MCA-WEAP	Multi-Criteria Analysis tool - Water Evaluation and Planning System
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEPAD	New Partnership for Africa Development
OMVS	Organisation de mise en valeur du fleuve Sénégal
ONUDI	Organisation des Nations unies pour le développement industriel
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PANA	Plan d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques
PAS	Programme d'action stratégique
PHI	Programme hydrologique international
PNUD	Programme des Nations unies pour le développement
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
PO	Programme opérationnel du GEF
SAI	Système aquifère d'Iullemeden
SAR	Synthetic Aperture Radar
SASS	Système aquifère du Sahara Septentrional
SAT	Système aquifère de Taoudeni/Tanezrouft
SEI	Stockholm Environment Institute
SIG	Système d'information géographique
SRTM	Shuttle RADAR Topographic Mission
UMA	Union du Maghreb arabe
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WEAP	Water Evaluation and Planning System

I. CADRE ET LIMITES DE L'ETUDE

I.1. Cadre de l'étude

L'activité de modélisation hydrogéologique entreprise dans le cadre du projet « Gestion des risques hydrogéologiques du système aquifère d'Iullemeden, (SAI) » (GF/2713-03-PMS :GF/1030-03) fait partie de l'activité « Analyse diagnostique transfrontière » (ADT) dans l'objectif de mieux évaluer les ressources en eau de ce système aquifère et d'identifier les risques hydrogéologiques auxquels est associé leur développement.

Initialement prévue comme une formation complémentaire en modélisation aux scientifiques et techniciens des pays appelés à assurer la gestion des ressources en eau, cette activité a conduit après les premières analyses diagnostiques des risques hydrogéologiques transfrontaliers, à une première modélisation du système aquifère en question en vue d'estimer une évaluation des ressources exploitables à travers l'analyse de l'information disponible.

En effet, les risques hydrogéologiques qui menacent les ressources en eau du système aquifère d'Iullemeden (SAI) ou ceux qui résulteraient de l'utilisation de ces ressources, ne peuvent être identifiés que dans la mesure où le fonctionnement hydrodynamique de ce système aquifère est bien maîtrisé et que ses échanges avec son environnement sont bien connus. Or, les synthèses hydrogéologiques entreprises jusqu'à ce jour dans les pays sur le SAI, n'ont été abordées que dans les limites des frontières nationales et portent assez souvent sur la description/identification des aquifères beaucoup plus que sur leurs bilans et leurs composantes.

Sous cet angle, la conception des gestionnaires et décideurs du devenir des ressources en eau du SAI dans chacun des trois pays concernés (Mali, Niger, Nigeria), n'est pas forcément la même, notamment, en ce qui concerne le fonctionnement hydrodynamique des aquifères et les liaisons qu'ils entretiennent avec les aires de recharge (cas du fleuve Niger qui était soupçonnée comme zone d'alimentation des nappes) et les exutoires (Dallols). Il est donc impératif d'avoir une vision commune sur ce fonctionnement hydrodynamique, en même temps qu'il est nécessaire de comparer les différentes évaluations des disponibilités en eau.

De ce fait, la configuration structurale des différents niveaux aquifères est largement influencée, dans chacun de ces pays, par l'état des connaissances sur la géologie des formations en affleurements et à travers les sondages. L'importance relative de ces niveaux aquifères d'un pays à l'autre, a fait que l'intérêt qu'on accorde à leurs ressources en eau, varie également en fonction de l'extension géographique et on est loin d'avoir une vision d'ensemble sur le système aquifère dans sa globalité.

L'extension géographique des formations aquifères du SAI dans chacun des trois principaux pays qui se partagent ce système aquifère (Mali, Niger et Nigeria) peut être considérée, à priori, comme un indicateur élémentaire de l'importance des ressources en eau souterraines du pays par rapport aux ressources en eaux globales de ces pays. Avec une superficie de l'ordre de 525 000 km² ce système aquifère, s'étend sur 31 000 km² (6 %) au Mali, 434 000 km² (83 %) au Niger et 60 000 km² (11 %) au Nigeria. Il en résulte que pour le Niger, notamment, le SAI est la principale structure sédimentaire recelant les eaux souterraines du pays et intéressant la majeure partie de la population tant urbaine que rurale. Cet aspect démographique en liaison avec les eaux souter-

raines est également important dans le cas du Nigeria dont le sous bassin de Sokoto, concernée par le SAI, est également une zone à forte densité démographique.

C'est dans ce cadre que la réunion du comité du pilotage du projet (Abuja-Nigeria, 25-26 février 2006) a décidé l'élaboration du modèle hydrogéologique du SAI. Le modèle hydrogéologique adéquat, est celui qui éclaire le fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble des niveaux aquifères et leur interaction avec leur environnement (les eaux de surface du fleuve du Niger) et avec les conditions climatiques (variabilité largement marquée par des sécheresses récurrentes).

L'OSS s'est proposé de réaliser ce modèle avec la contribution des équipes nationales et ce, dans la perspective de doter les trois pays concernés d'un outil performant pour la gestion de cette ressource en eau partagée, tout en présentant une analyse critique de l'information disponible et en dégageant ses limites pratiques dans l'amélioration des connaissances sur le comportement du système aquifère et dans l'identification des risques hydrogéologiques qui sont associés à l'exploitation de plus en plus intensive des ressources en eau souterraines.

1.2. Limites de l'étude

Cette opération de modélisation est menée dans le cadre de l'étude relative à l'identification des risques hydrogéologiques qui menacent ces ressources en eau et répond aux objectifs primordiaux suivants :

- /// l'harmonisation des données des pays concernés en vue d'avoir une conception partagée sur le fonctionnement hydrodynamique des niveaux aquifères du système ;
- /// l'élaboration d'un bilan hydrogéologique du système aquifère avec le maximum de précision de ses différentes composantes :
 - entrées : alimentation, recharge,
 - caractéristiques hydrogéologiques : structure, piézométrie, qualité chimique,
 - sorties : exploitation, drainance,
- /// l'utilisation du modèle comme outil de simulation du système aquifère en vue d'élaborer des scénarios de développement de ces ressources en eau répondant aux objectifs de la planification dans les trois pays et permettant de dégager l'impact de ces prélèvements sur le comportement du système aquifère et des tendances des risques.

La réalisation de ces objectifs est en fait, largement tributaire de l'état des connaissances disponibles dans les pays et permettant de bien simuler le comportement réel du SAI. En fait, cet aspect a fini par s'avérer comme étant la base de l'Analyse Diagnostique Transfrontière (ADT), du fait que les spécialistes des trois pays avaient chacun, dans les limites des données dont il dispose, une conception particulière sur l'importance des ressources exploitables et leur répartition géographique, mais qui reste limitée aux frontières du pays.

Aucun des trois pays n'était en mesure de présenter une évaluation rationnelle des ressources en eau exploitables à partir de ce système, sur la base de données de suivi de son comportement. De même qu'aucun des trois pays n'était en mesure de mettre en évidence les risques liés à l'effet conjugué de l'exploitation dans l'ensemble du bassin. Même si les objectifs ci-dessus énumérés ne peuvent être complètement atteints par cette modélisation, cette étape d'évaluation de la ressource présente l'avantage de mettre en évidence les besoins en information pour œuvrer à la mise en place d'un outil performant assurant l'évaluation affinée des ressources en eau partagées du SAI, ainsi que les conditions de leur gestion prévisionnelle.

1.3. Approche de l'étude

Ce rapport est la synthèse de l'effort fourni par l'équipe du projet et les experts nationaux associés à la collecte et la mise en forme des données nécessaires pour la modélisation. Il donne également les résultats de la réflexion menée collégalement avec les experts nationaux pour la conceptualisation du fonctionnement de ce système hydraulique et ses liaisons avec le milieu environnant.

D'autre part, ce rapport rend compte également des différentes étapes consacrées à la construction du modèle, à son calage, à la vérification de sa représentativité pour simuler le fonctionnement du système aquifère naturel et pour servir d'outil de prévision pour d'autres situations envisagées à travers les quelques scénarii développés.

L'ensemble de cette activité a pu être mené en travail d'équipe, avec deux sessions de formation en modélisation au profit des techniciens des pays appelés à assurer ultérieurement la gestion du modèle du SAI, et deux sessions de formation sur la conception et l'implémentation de la Base de données commune⁶. Les deux sessions de formation sont :

- première session de formation du 18-29 avril 2006 (OSS-Tunis) ayant groupé deux représentants par pays⁷. Elle a principalement porté sur les notions élémentaires de modélisation hydrogéologique dans la perspective d'élaborer le bilan du système aquifère et d'en faire un outil de gestion de la nappe. Cette session a permis de ramener les représentants des trois pays à se mettre d'accord sur les limites des aquifères, leur extension verticale et leur configuration structurale. Il a été ainsi possible d'élaborer l'ébauche du modèle conceptuel du SAI et de s'accorder sur les données à collecter pour les besoins du modèle. Sur cette base, les équipes des pays ont été chargés de contribuer à la collecte et la mise en forme des données nécessaires à cette modélisation⁸ ;
- deuxième session de formation du 28/11 au 9/12 décembre 2006 (OSS-Tunis) : lors de cette session qui a réuni les mêmes participants à la précédente session, l'accent a été mis sur l'aspect pratique de l'élaboration du modèle du SAI et à l'analyse critique des données collectées pour son élaboration. Les besoins effectifs en données ont révélé les limites de l'information disponible pour la construction d'un modèle multicouche comme le souhaitaient les gestionnaires des eaux du SAI. Les représentants des trois pays ont été amenés à concevoir un modèle d'ensemble avec un nombre de couches aquifères limité mais assez représentatif de l'ensemble du système. Sur cette base ont été arrêtées les conditions aux limites du modèle et le choix de la période de calage du régime permanent. De même, qu'il a été possible de mettre en évidence les lacunes en données nécessaires⁹. Les représentants des pays ont été chargés de faire de leur mieux pour combler ces lacunes. L'équipe OSS du projet s'est activée pour cette tâche. Une mission fut programmée au Niger vers le milieu du mois de décembre 2006, dans cette perspective.

Sur la base de ces éléments et des différentes tentatives de modélisations abordées précédemment dans les trois pays¹⁰, l'élaboration du modèle du SAI a été entreprise avec la perspective de

⁶. Les deux sessions consacrées à la base de données commune sont les ateliers du 26-30/4/2004 (OSS, Tunis) et du 26 avril - 6 mai 2005 (Niamey, Niger).

⁷. Mali : S. Maïga et D. Bouaré ; Niger : M. Abdou Moumouni et S. Rabé et Nigeria : J. Chabo et S. Jabo

⁸. Rapport de l'atelier : « Session de Renforcement des capacités des représentants des pays en modélisation mathématique du Système aquifère d'Iullemeden. OSS-Tunis, Avril 2006, 13 p

⁹. Rapport de l'atelier : « Deuxième Session de Renforcement des capacités des représentants des pays en modélisation mathématique du Système d'Iullemeden (SAI) ». OSS, Tunis, Déc. 2006, 16 p.

¹⁰ Parmi ces tentatives de modélisation, il y a lieu de citer : Carmen (2001) et Guero (2003). Il est à noter que les travaux de Carmen n'ont pas abouti.

simuler le comportement hydrodynamique d'ensemble du système aquifère et l'évaluer son bilan en eau ainsi que les différentes composantes de ce bilan, particulièrement celles qui influencent les échanges transfrontaliers.

Ce modèle est conçu comme un élément d'un ensemble d'outils inter-communicants (BD-SIG-Modèle) permettant d'apporter l'aide à la décision au gestionnaire des nappes en fonction des modifications qu'elles subissent. Ce modèle est donc appelé à la longue à devenir un outil de gestion des aquifères du SAI.

II. COLLECTE ET TRAITEMENT DES DONNEES

II.1. Outils de travail

Les précédentes tentatives de modélisation du SAI ont buté contre le problème de **l'indisponibilité ou de l'insuffisance de l'information hydrogéologique nécessaire**. C'est particulièrement les connaissances précises sur la structure géologique, les historiques de la piézométrie, de l'exploitation et de la chimie de l'eau qui font défaut. Cet aspect devient plus crucial avec l'objectif d'élaborer un modèle à l'échelle de l'ensemble du bassin sédimentaire, qui traduit le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère et permet d'avancer une évaluation quantitative de ses ressources en eau.

Le manque d'harmonisation de l'information géologique relative à l'aspect physique du système aquifère se révèle dans ce cas, une des premières priorités à traiter pour pouvoir concevoir l'ensemble des aquifères du SAI à travers leurs relations naturelles au sein d'une entité d'ensemble.

Ainsi, donc, la disponibilité des données est un des principaux problèmes et l'harmonisation de ces données est une difficulté du fait que peu d'études hydrogéologiques précédentes se sont penchées sur les logs lithologiques et stratigraphiques des forages pour les traiter de manière systématique.

L'analyse de cette information géologique et son interprétation dans la perspective d'une étude structurale, est un aspect indispensable à prendre en compte pour comprendre la structure souterraine du bassin du SAI.

C'est dans ce cadre qu'a été décidée **la création de la base de données commune au SAI** dont les fonctionnalités et le contenu sont largement influencés par les besoins du modèle à élaborer. Ainsi, cette base de données, essentiellement dédiée aux données hydrogéologiques, contient également certaines tables (données) complémentaires comme la table « géologie » qui rassemble les données lithostratigraphiques des sondages mécaniques et la table « maillage » qui permet le passage direct (transfert des données) de la base de données vers le modèle hydrodynamique.

D'autre part, cette **base de données** est **associée à un Système d'information géographique (SIG)** qui permet de localiser géographiquement les points d'eau traités, de refléter la répartition spatiale des données et le degré de leur homogénéité.

Il est clair que la simulation du fonctionnement hydrodynamique des aquifères du SAI ne peut se faire sans l'emploi d'un logiciel spécifique permettant la discrétisation de l'espace physique en « domaines » de calcul, suivant les lois de l'hydrodynamique souterraine.

Il en est résulté que les outils nécessaires à cette modélisation sont principalement :

- /// la base de données dont la structure est orientée vers les besoins du modèle (voir Tome II: Bae de données commune du SAI) ;
- /// le Système d'information géographique permettant de spatialiser l'information et de la présenter en couches thématiques ;
- /// un logiciel de simulation de l'hydrodynamique souterraine.

II.2. La base de données commune du SAI

Cette partie rappelle les éléments saillants de la base de données du SAI, largement détaillée dans le Tome II. La base de données commune au SAI regroupe les données collectées dans les trois pays et qui se rapportent à la climatologie, à l'hydrologie, à la géologie et à l'hydrogéologie du SAI. Cette base de données est principalement gérée par le logiciel « ACCESS ». Le traitement et la mise en forme de l'information sont faits par le biais d'autres outils tels que « Rockworks » et « Photoshop » pour les données géologiques, Arcview et « Mapinfo » pour les données hydrogéologiques, etc.

Les principales tables qui constituent cette base de données commune, sont les suivantes (figure 1) :

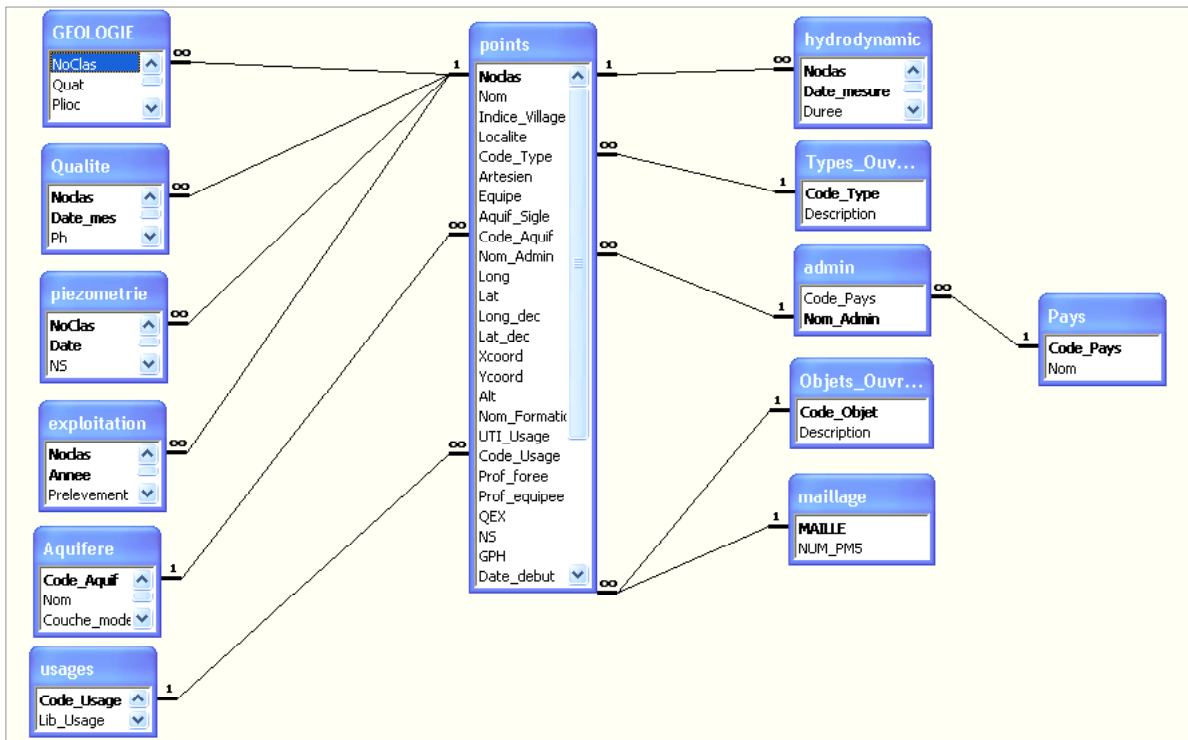


FIGURE 1 : Schéma de la base de données du SAI

Le schéma de la base de données est une représentation logique du modèle de données élaboré durant la phase de conception. Ce schéma fait apparaître le rôle central de la table « points » qui est reliée d'un côté aux tables d'identification (pays, Hydrodynamic, Type _Ouvrage, Admin, Objet_Ouvrage, maillage...) et de l'autre côté aux tables de variables (Géologie, Qualité, Piézométrie, exploitation, aquifère, usages...). Les relations qui rattachent la table « Points » aux autres tables peuvent être univoques (1 à 1) ou multiples (1 à plusieurs) (OSS, 2007).

II.2.1. Base de données géologiques

La base de données géologiques, faisant partie de la base de données commune, est **spécifique aux données des sondages** utilisés pour l'étude de la configuration structurale du SAI. Elle regroupe les logs lithostratigraphiques des sondages existants découpés suivant un log « litho-stratigraphique type » adopté par les trois pays et qui fait apparaître les principales formations aquifères et aquicludes du SAI ainsi que les couches qui constituent son substratum ou base.

L'ensemble de cette information géologique est employée dans :

- /// l'élaboration de corrélations litho-stratigraphiques reliant les sondages à travers le bassin du SAI ;

/// l'élaboration des principales cartes structurales utilisées pour l'identification des couches aquifères et de leurs épontes (cartes d'épaisseur, du mur et du toit de chaque formation).

Les logiciels suivants ont été utilisés : « Access » pour la construction de la base de données, « ArcView » et « Mapinfo » pour le positionnement géographique des sondages à travers le bassin et « Rockworks » et « Photoshop » pour l'élaboration des corrélations géologiques et les cartes structurales.

L'utilisation de Rockworks a permis de mieux visualiser la répartition géographique des forages dans le SAI et de s'assurer de la bonne représentation des données litho-stratigraphiques disponibles. Vu la description de ces sondages par des géologues différents à des époques s'étendant sur plus de **50 ans**, la terminologie employée ainsi que les limites des séries géologiques ne sont pas forcément homogènes. Il en est résulté un travail d'harmonisation et de critique de ces données (particulièrement de part et d'autre des frontières entre les trois pays) pour faire apparaître à travers les corrélations établies, la structure en cuvette du bassin. Plusieurs corrélations ont été ainsi tracées dans toutes les directions avant d'aboutir à un schéma d'ensemble relativement homogène.

II.2.2. Base de données climatologiques, hydrologiques et hydrogéologiques

La base de données contient également des tables qui sont principalement axées sur les structures de gestion des ressources en eau et non sur celles spécifiques à l'analyse de données physiques (hydrologie et hydrogéologie) et climatologiques (pluies, infiltration, évaporation), dans le cadre de la modélisation. Ces données, récupérées à partir des bases de données nationales et des cartes des ressources en eau numérisées (Niger et Mali), nécessitent le géo-référencement de chaque point d'eau et leur intégration dans les autres tables spécifiques. De ce fait, dans son état actuel, la base de données commune du SAI nécessite une restructuration complète en vue d'intégrer les nouvelles tables (données), dont la plupart sont relatives à l'exploitation de la ressource en eau et ses usages, dans des tables permettant de les ajouter aux historiques du modèle (OSS, 2007).

II.3. Le système d'information géographique (SIG)

Le système d'information géographique du SAI (SISAI) est un ensemble de logiciels qui permet de disposer d'une représentation cartographique des données existant dans la base de données commune. Il permet aussi de récupérer les résultats du modèle hydrodynamique pour les combiner avec les autres données disponibles et en faire des éléments d'aide à la décision, sur la répartition de la ressource en eau et de ses différentes utilisations. Le support de cartes numérisées nécessaires à cette représentation, a été élaboré dans le cadre du projet comme activité à part. Cette activité a été considérée comme l'étape préliminaire permettant cette intégration de l'information.

Le SIG utilisé pour représenter le SAI est donc conçu comme une partie intégrante du Système d'Information global (conçu pour des besoins très larges), en ce sens que toutes les informations descriptives des objets géographiques sont prévues dans la structure de la base de données. Le but primordial est que chaque information soit stockée à un seul endroit (non-redondance). Cet ensemble d'outils sert pour l'harmonisation des données, leur analyse et leur mise en forme.

Le second objectif concerne les liens entre la Base de Données et le modèle d'un côté, le SIG et le modèle d'un autre côté. Ces liens doivent être établis de façon automatique et transparente pour l'utilisateur. Ces liens peuvent être établis ultérieurement, après la mise en place de la base de données, mais avant l'alimentation du modèle en données spécifiques. Le système d'information

du SAI comporte deux éléments principaux qui sont : la base de données et le SIG. Cet ensemble est couplé au maillage du modèle, qui est en même temps une table de la BD et une couche du SIG, permettant ainsi d'assurer le lien entre BD – modèle et SIG. Ce lien permet d'exporter les données de la BD sous un format lisible par le modèle.

C'est à travers cette complémentarité entre les outils développés dans le cadre du projet, pour le traitement des données sur les ressources en eau du SAI, qu'il a été possible d'assurer la synthèse de l'information à l'échelle du bassin aquifère et d'en produire des résultats qui traduisent un comportement d'ensemble.

II.4. Le logiciel utilisé (PM5)

Le choix du logiciel de modélisation hydrogéologique du SAI, a la même importance que celle des logiciels employés pour l'élaboration de la base de données commune ou pour la gestion du SIG. Il était très important dès le départ, de disposer d'un logiciel à usage « libre », et dont l'actualisation ne pose pas de problèmes de coût pour les pays. De même qu'il était important de disposer d'un logiciel qui accepte une « densité » variable de l'information, suivant un maillage de taille variable. Ceci est imposé par le fait que l'étendue du SAI est importante et que la répartition géographique des points d'eau n'est pas homogène. A ceci, s'ajoute également le fait que le système aquifère est multicouche, mais avec une dominance d'écoulement horizontal sur les liaisons verticales qu'il y a lieu de bien identifier et préciser le fonctionnement.

Ainsi donc, le choix du logiciel simulant le fonctionnement hydrodynamique de ce système aquifère doit répondre à différentes contraintes dont principalement :

- /// la disponibilité de cet outil dans le domaine public et sa large utilisation permettant d'assurer périodiquement l'initiation/formation des gestionnaires des ressources en eau dans les trois pays ;
- /// La simulation du système aquifère sur la base d'une information géographique répartie de manière hétérogène ;
- /// La possibilité de faire fonctionner uniquement les modules nécessaires à une étape ou une autre (aspect hydrodynamique), avec l'éventuel besoin d'avoir recours à d'autres modules à mesure que l'information devient plus fournie (Recharge ou simulation de la propagation des solutés...).

Depuis quelques années déjà, le «Processing Modflow» s'est imposé comme l'outil de modélisation des écoulements souterrains permettant de :

- /// admettre également de nouvelles composantes spécifiques aux écoulements de surface et leur connexion avec les aquifères ;
- /// traiter certains aspects spécifiques à l'hydrodynamique des nappes comme le transfert des solutés et la diffusion des sels.

Or, le SAI est particulièrement riche en situations particulières de liaisons avec les eaux de surface (drainage de la nappe par le fleuve Niger et drainance en d'autres endroits de la nappe par ce fleuve).

Des situations particulières de recharge localisée sont également à examiner pour s'assurer de l'impact de certains ouvrages ou cours d'eau sur le comportement de la nappe à travers la frontière (cas du barrage de Kainji au Nigeria et de la nappe de la région de Maradi au Niger). Les anomalies chimiques soulignées comme risques hydrogéologiques localisés méritent bien, à long terme, d'être examinées en vue de déterminer l'ampleur du phénomène et sa zone d'influence.

A la lumière de ces objectifs, le choix s'est fixé sur la version 5 du logiciel Processing Modflow (PM5). Cette version, élaborée par W. H. Chiang et W. Kinzelbach, se base sur le code Modflow mis au point par l'U.S. Geological Survey⁶ en 1988 et qui permet la modélisation des transferts d'eau **dans un système aquifère multicouche** par la méthode **des différences finies**. D'autres codes utilitaires sont incorporés dans PM5. Il s'agit de PMPATH (tracé des lignes de courant et des vitesses d'écoulement), du code PEST (programme d'optimisation), et du module de transport MT3D. PM5 comporte également un interpolateur intégrant les méthodes de Shepard (inverse de la distance), de triangulation d'Akima et de Renka, et le procédé de krigeage.

En plus des conditions aux limites usuelles (potentiel imposé, flux imposé et condition mixte de Cauchy), des conditions particulières peuvent être schématisées : faille, évapotranspiration et échange nappe souterraine et écoulement superficiel dans un réseau de drainage ou dans un canal. D'autres aspects de la modélisation peuvent être traités comme le dénoyage d'une certaine épaisseur de l'aquifère, le déplacement de la limite nappe libre-captive, la subsidence et les écoulements densitaires dus à la salinité ou à la température.

Cette version de Modflow précédemment utilisée par l'OSS dans la modélisation des aquifères du Système aquifère du Sahara Septentrional (SASS), a fait ses preuves. Elle s'est révélée conviviale et bien adaptée pour traiter la simulation des systèmes aquifères multicouches de grande extension et à forte densité localisée d'information hydrogéologique.

⁶ Michael G. McDonald & Arlen W. Harbaugh: A modular three dimensional finite-difference ground water flow model ; USGS , 1988

III. CONCEPTUALISATION DU MODELE

La modélisation hydrodynamique du fonctionnement hydrogéologique des systèmes aquifères est un processus qui est mené en plusieurs étapes, et pour lequel certaines décisions sont prises en fonction des situations, en vue d'arriver à simuler à travers le fonctionnement du modèle mathématique, le comportement physique du système aquifère. Plusieurs cas de figure sont étudiés en vue d'opter pour l'hypothèse qui semble la mieux répondre à la réalité du terrain. Un va-et-vient est nécessaire entre l'hypothèse et le résultat donné par le modèle pour s'assurer de sa bonne représentativité du milieu naturel physique.

Ainsi, les différentes étapes de la modélisation sont principalement :

- /// **la conception du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère** comme entité naturelle soumise à des impacts externes à travers les échanges d'eau (entrées et sorties) avec son milieu naturel et les transformations qui se produisent au sein du système aquifère ;
- /// **la construction du modèle mathématique** reproduisant le fonctionnement physique des aquifères et capable de simuler des situations prévisionnelles, sur la base des données ou hypothèses admises pour les variables ;
- /// **la préparation des données nécessaires, leurs traitements, leur analyse et leur mise en forme** en vue de les adapter au format du fonctionnement du modèle ;
- /// **l'introduction des données nécessaires pour le fonctionnement du modèle** afin d'assurer la similitude de son fonctionnement avec la réalité physique du système aquifère (calage du modèle) ;
- /// **l'analyse et la validation des différents résultats obtenus**, ses sorties (résultats du modèle).

Il en résulte que la conceptualisation du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère, est une étape capitale et décisive dans la construction et le fonctionnement du modèle (simulation). Elle conditionne de près les résultats obtenus et permet, en les comparant au comportement réel du système aquifère, d'évaluer la représentativité du modèle et sa sensibilité à chaque variable. Cette conceptualisation s'intéresse aussi bien aux aspects physiques du système (structure et extension), qu'à son hydrodynamique interne, et ce, en affinant les différents aspects à traiter à l'aide d'une simplification garantissant la similitude du comportement du modèle avec le système physique.

Le modèle conceptuel d'une entité hydrogéologique doit faire apparaître en premier lieu, les aspects suivants :

- /// la configuration structurale ;
- /// les conditions aux limites (horizontales et verticales) ;
- /// les fonctions de transferts au sein du système.

III.1. Configuration structurale du SAI

L'aspect structural du système aquifère d'Iullemeden s'est révélé sujet de discordance entre les représentants des trois pays du fait que l'extension de ce système dans chacun des trois pays est variable et que ses ressources en eau n'ont pas la même importance stratégique. En effet, la

structure en cuvette synclinal du système n'est perçue qu'à l'échelle de l'ensemble du bassin. Par contre dans un pays comme le Mali ou le Nigeria, les aquifères rattachés à cette cuvette, sont d'extension limitée et parfois leurs ressources en eau ne répondent qu'à des utilisations sectorielles limitées (AEP, abreuvement du cheptel, irrigation). Ceci est d'autant plus net que la demande sur les ressources en eau dans les trois pays du SAI a été à l'origine, beaucoup plus orientée vers les eaux de surface (fleuve Niger) que vers celles souterraines du SAI. Celles-ci ne deviennent incontournables que dans les limites des zones climatiques sahéniennes et sahariennes.

Sur la base des corrélations litho-stratigraphiques établies en se référant aux formations géologiques, recoupées par les sondages et aux études géophysiques disponibles, il a été admis que la configuration structurale du SAI est celle d'une cuvette sédimentaire dont les affleurements des couches les plus profondes du Précambrien cristallin, se localisent sur les bordures (Margat, 1982) (figure 2). Dans les limites de cette cuvette, les séries sédimentaires s'étalant entre le Crétacé inférieur et le Quaternaire, sont largement dominées par des formations d'origine continentale, admettant ainsi des variations notables de faciès et d'épaisseur.

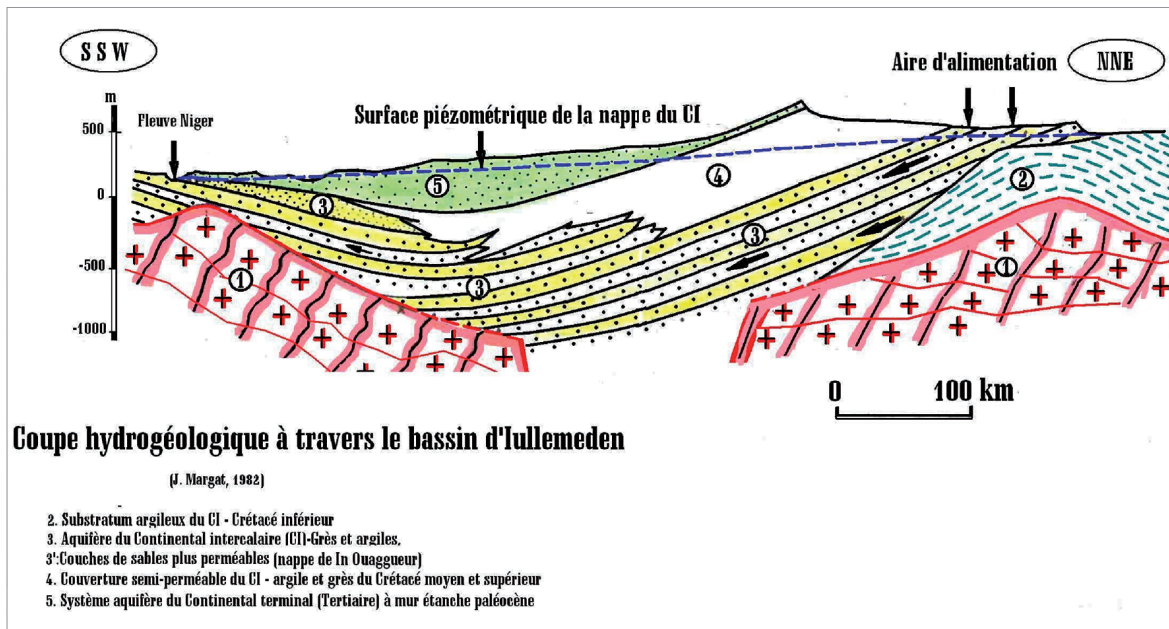


FIGURE 2 : Coupe SSW-NNE à travers le bassin d'Iullemeden

Cette structure n'a été accessible à la schématisation qu'à travers la synthèse des données des prospections géophysiques (relativement modestes) et des sondages hydrauliques (nombreux, mais à profondeur limitée) et pétroliers (en nombre limité), du fait que les variations latérales de faciès et la tectonique cassante ont largement influencé l'allure de l'enfouissement des couches géologiques.

Ainsi, les données des sondages constituent le complément des cartes géologiques des affleurements pour la mise en évidence des particularités de la structure du bassin, ainsi que pour sa délimitation.

En effet, le passage vers les deux bassins limitrophes (bassin du Lac Tchad à l'Est et bassin de Taoudéni à l'Ouest), se fait dans des conditions sédimentaires et structurales qui ne sont pas toujours bien évidentes.

De même que le fond de cette cuvette, théoriquement constitué par un substratum sous forme de socle (Roches primaires et précambriennes) n'est pas partout avec une profondeur bien évaluée. La sédimentation continentale constituant l'essentiel des couches du bassin fait que l'épaisseur de

chacune de ces formations est également sujette à des variations, de même qu'il y a changement latéral des faciès.

De ce fait, la base des données géologiques s'est vite révélée comme un outil de base pour la conceptualisation de la structure du SAI. Une attention particulière a été accordée à l'évolution structurale du bassin, particulièrement aux failles d'extension régionale, pour mieux saisir l'évolution paléogéographique de cette cuvette sédimentaire bien cadrée par des boucliers du socle (Ahaggar des Iforas et l'Air au Nord et au NE).

Ce schéma simplifié d'une cuvette plus ou moins dissymétrique, s'avère insuffisant dès qu'on aborde la conceptualisation du système aquifère en multicouche. En effet, comme ces couches ne se superposent pas parfaitement sur l'extension de l'ensemble du bassin du fait que :

- /// leurs épaisseurs varient ;
- /// le pendage géologique n'est pas constant ;
- /// seules des données denses, relatives à la profondeur et à l'épaisseur de chacune de ces couches, sont en mesure de rendre compte avec le maximum de précision possible, de la structure d'ensemble des différentes couches de ce système.

La structure d'ensemble du SAI est déduite d'une analyse fine des données des prospections géophysiques, des cartes structurales et des données des sondages. Elle est menée suivant un processus d'analyse des données géologiques dans les trois pays en vue d'établir un « **log stratigraphique type** » qui traduit de manière satisfaisante la structure l'ensemble du bassin.

L'élaboration de ce log stratigraphique type est obtenue à l'aide de l'harmonisation des données géologiques du système aquifère d'lullemeden (SAI, particulièrement les données des sondages.

Cette harmonisation est entreprise conformément à la démarche suivante :

- /// élaboration d'un log stratigraphique représentatif de l'ensemble des couches géologiques (dénomination par étage géologique) et lithologiques (dénomination par formation lithologique) sur la base d'un log stratigraphique par pays, en vue de l'adopter dans la description des logs des sondages et leur découpage en séries lithologiques géologiquement corrélables ;
- /// description de l'ensemble des logs des sondages pris en considération et la saisie de leurs données dans la base des données (table « Géologie ») ;
- /// traçage de corrélations géologiques pouvant être complétées dans une phase ultérieure, par les données hydrogéologiques (Niveau piézométriques, Captage, Résidu sec, etc.), ainsi que des cartes structurales (cartes d'épaisseur, du toit et du mur de chaque formation considérée) afin de bien préciser la structure de l'ensemble du bassin et sa conceptualisation pour les besoins de la modélisation en tant qu'une entité hydrogéologique au sein de laquelle la continuité hydraulique est assurée.

III.1.1. Log stratigraphique représentatif

Sur la base de la description litho-stratigraphique adoptée dans chacun des trois pays, dans les limites du bassin d'lullemeden, l'élaboration d'un log stratigraphique représentatif de l'ensemble du SAI, est menée en étapes conformément au processus suivant:

- /// l'identification des formations aquifères et aquicludes entre le socle et la surface du sol dans chacun des trois pays ;
- /// la comparaison des formations considérées en les rapportant à l'échelle stratigraphique générale ;
- /// l'établissement de subdivisions élémentaires en principales formations aquifères, séparées par des aquicludes ;

/// identification du substratum et du toit de chaque formation.

Sur la base de ce log litho-stratigraphique type, l'ensemble des sondages réalisés dans chacun des trois principaux pays qui se partagent le bassin (Mali, Niger et Nigeria), sont analysés en vue d'établir dans chaque cas, le log litho-stratigraphique correspondant. Dans chacun de ces trois pays, la tradition adoptée pour décrire les formations recoupées par les sondages est scrupuleusement respectée dans le souci de refléter la spécificité de la structure ; mais la nécessité de traiter l'ensemble du bassin en une entité structurale et hydrogéologique, exige un effort de simplification et d'harmonisation qui est fourni par la suite, de manière à ramener l'ensemble à une vision globale.

III.1.2. Log stratigraphique adopté au Mali

La partie du bassin d'Iullemeden appartenant au Mali est de l'ordre de **31 000 km²** (6 % de la superficie du bassin). Elle se situe vers le Nord et chevauche sur les monts de l'Adrar d'Iforas et le sous-bassin de Tamesna où affleurent les séries géologiques primaires et précambriennes. Par cette position, le Mali est principalement intéressé dans le bassin d'Iullemeden, par le « détroit de Gao » (ou fossé soudanais) qui est la zone de transition entre les bassins d'Iullemeden et de Taoudeni, et une partie du Ténéré largement dominée par les affleurements du Continental intercalaire. Trois coupes types de sondages font référence dans cette partie du bassin :

1. Coupe du sondage de Tahabanat n° 1 représentative du bassin d'Iullemeden

Ce forage (figure 3) a traversé 2011 m de couches tertiaires et secondaires avec une partie dans le socle précambrien. Il donne la succession lithologique suivante :

0 - 70 m : Tertiaire (Eocène et Paléocène marin) : marnes avec calcaires et grès.

70 - 1965 m : Mésozoïque (Crétacé et Jurassique) :

70 - 455 m : Crétacé supérieur marin

- **Sénonien** : calcaires, grès et marnes.
- **Turonien supérieur** : argiles et argilites à passées de gypses et de grès et de marnes,
- **Cénomaniens supérieur - Turonien inférieur** : argiles et argilites à passées de gypse et de marnes,

455 - 1740 m : Crétacé inférieur :

- **Albien inférieur** (455 - 760 m) : grès à passées d'argiles,
- **Aptien** (760 - 1140 m) : avec du haut vers le bas, des argiles compactes à passées de grès, des grès à passées de calcaires et des aleurolites calcaireuses.
- **Néocomien** (1140 - 1575 m) : aérolites avec des grès et calcaires.
- **membre basal du Crétacé** (1575 - 1750 m) : argiles compactes calcareuses à passées de grès et de marnes.
- **Jurassique** (1750 - 1965 m) : grès micacé et conglomérat à la base.

1965 - 2011 m : Précambrien : Schiste quartzeux à biotite.

2. Coupe du sondage Tamat n°1 représentative du sous-bassin de Tamesna

Pour cette partie septentrionale du grand bassin d'Iullemeden, les couches mésozoïques et paléozoïques sont prépondérantes. Seules celles rattachées au Mésozoïque sont prises en considération dans l'étude du système aquifère d'Iullemeden. La succession lithologique qui a pu être recoupée, de haut en bas, par les sondages dans cette partie du bassin est, comme le donne le

COLONNE STRATIGRAPHIQUE

BASSIN D'JULLEMEDEEN

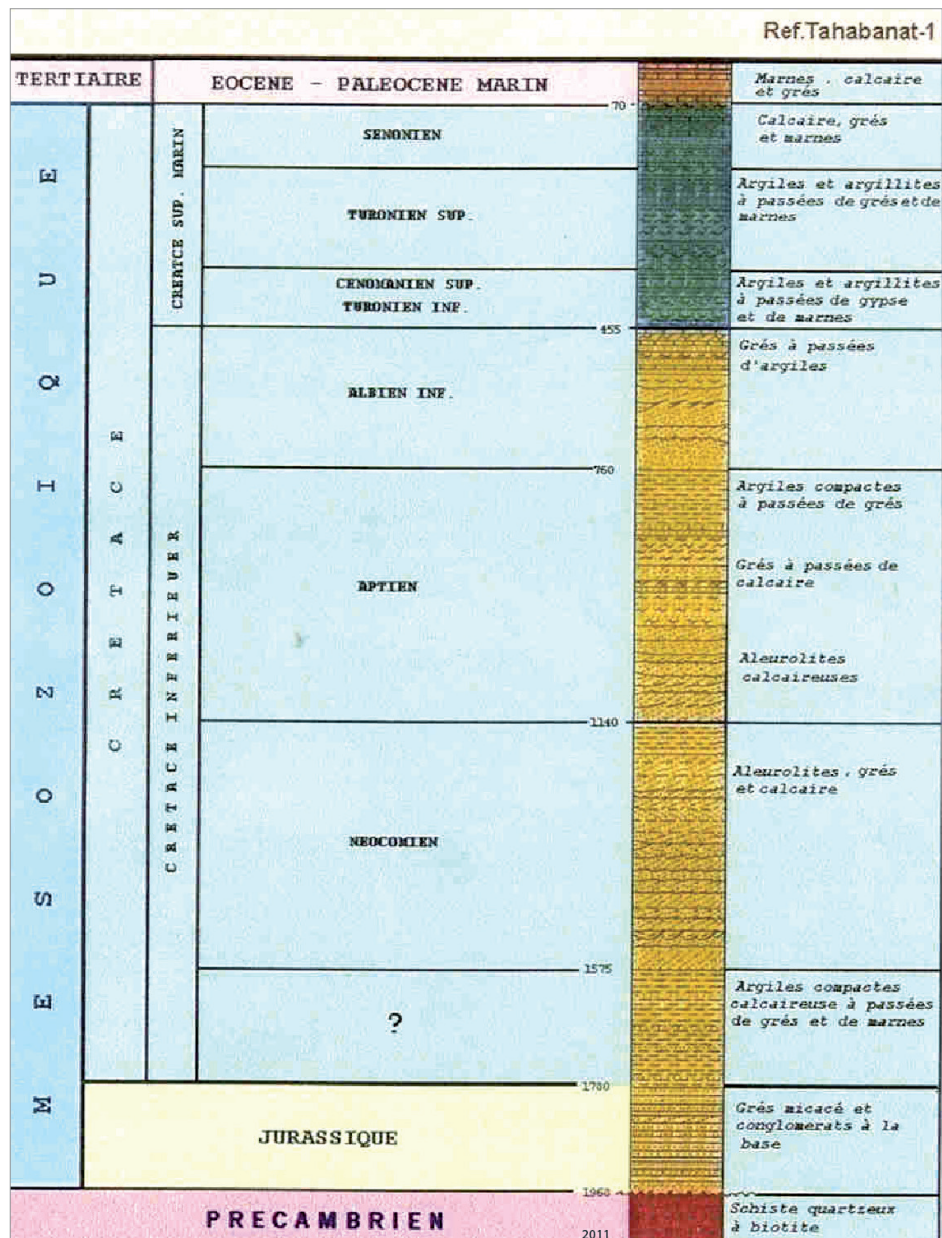


FIGURE 3 : Coupe du sondage de Tahabanat n°1

forage de Tamat n°1, la suivante (figure 4, voire page 28) :

- 0 - 208 m : Crétacé inférieur : grès bariolés et argiles bariolées (grès de Tégama).
- 208 - 336 m : Crétacé inférieur - Jurassique supérieur : argiles calcaires bariolées rouges et vertes avec lits de silts (argiles de l'Irhazer).
- 336 - 451 m : Jurassique moyen : grès bariolés à stratification oblique devenant argileux à la base avec ciment calcaire (grès d'Agadez).
- 451 - 544 m : Trias - Permien [?] : grès arkosiques et argiles (Série d'Isegouadane), avec un conglomérat et brèche de base.
- 544 - 597 m : Carbonifère supérieur : argillites (de Tagora)
- 597 - 631 m : Dévonien : grès.

631 – 800 m : Gothlandien : schistes (631-697m), schistes gris sombre pyriteux contenant des graptolites.

800 – 1141 m : Cambro-Ordovicien : grès hétérogènes blancs à gris avec minces couches de silts argileux (équivalent unité I et II des grès inférieurs).

1141 – 1170 m : Précambrien : schistes cristallins

COLONNE STRATIGRAPHIQUE

BASSIN DE TAMESNA

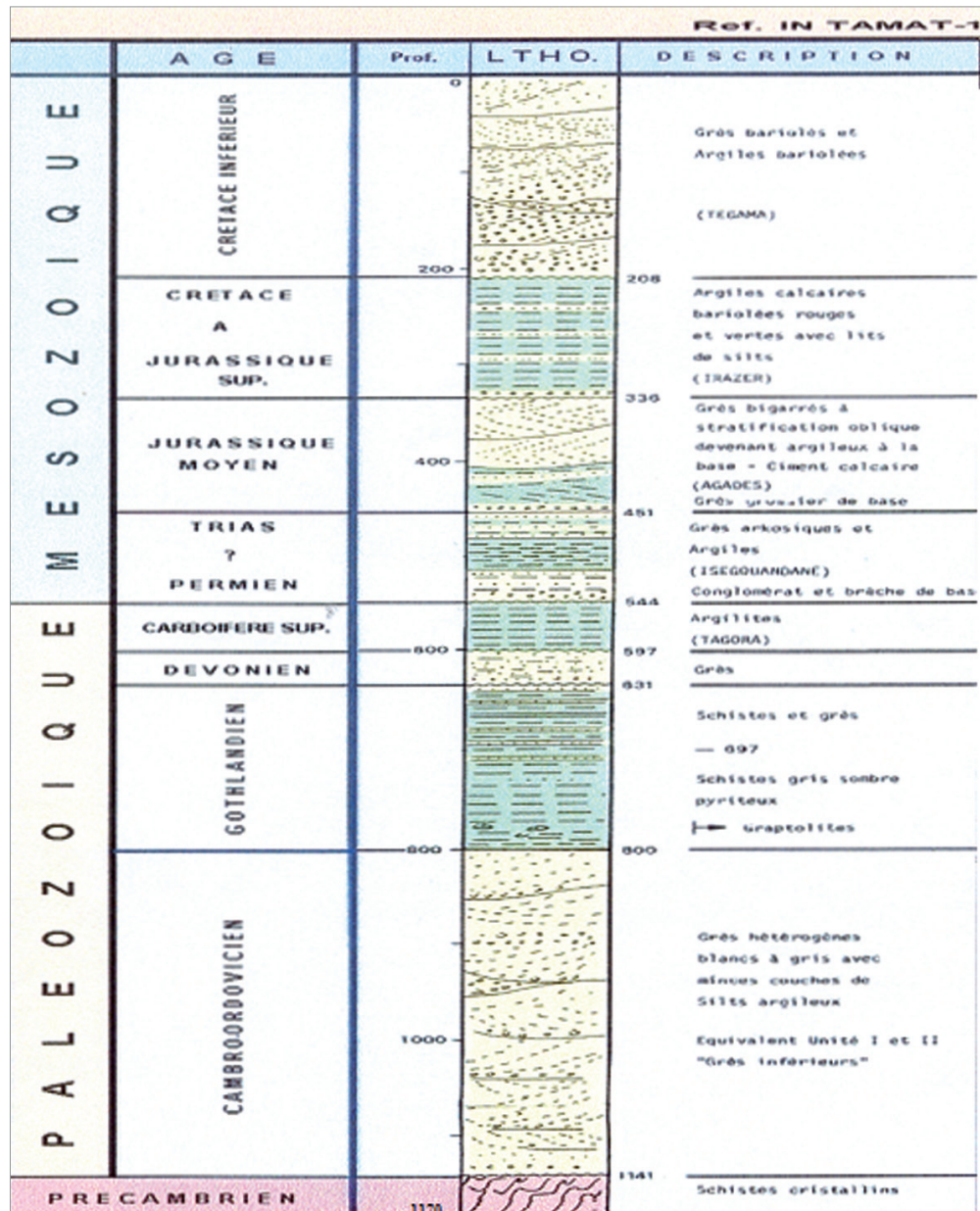


FIGURE 4 : Coupe du sondage Tamat n°1

3. Coupe du sondage Ansongo n° 1 représentative du fossé de Gao

Dans le fossé de Gao qui est une zone de transition entre les bassins d'Iullemeden et de Taoudéni, les séries géologiques du Crétacé supérieur et du Tertiaire subissent une nette réduction d'épaisseur. Celles qui sont plus anciennes que le Crétacé inférieur sont complètement absentes et le Continental intercalaire repose directement sur le socle précambrien. La coupe du sondage d'Ansongo de près de 1697 m de profondeur, illustre bien cette situation (figure 4). Ce sondage

a recoupé – de haut en bas – les formations stratigraphiques suivantes :

0 – 56 m : Tertiaire : Argiles bariolées à passées de grès micacés.

56 – 116 m : Crétacé supérieur : argiles

116 – 645 m : Crétacé inférieur : essentiellement argileux vers le sommet et de plus en plus sablo-argileux vers la base, les limites stratigraphiques sont difficiles à préciser vu l'absence d'éléments de datation faunistique.

La coupe de ce sondage a permis d'y établir au sein du Crétacé inférieur, les subdivisions stratigraphiques suivantes :

116 – 295 m : Albien à Cénomanién inférieur : argiles bariolées silteuses à passées de grès fins,

295 – 385 m : Albien : argiles bariolées silteuses à passées de grès fins,

385 – 480 m : azoïque : argiles bariolées silteuses à passées de grès fins,

480 – 815 m : Albien inférieur – Aptien supérieur : argiles bariolées à passées de grès, sables et calcaires,

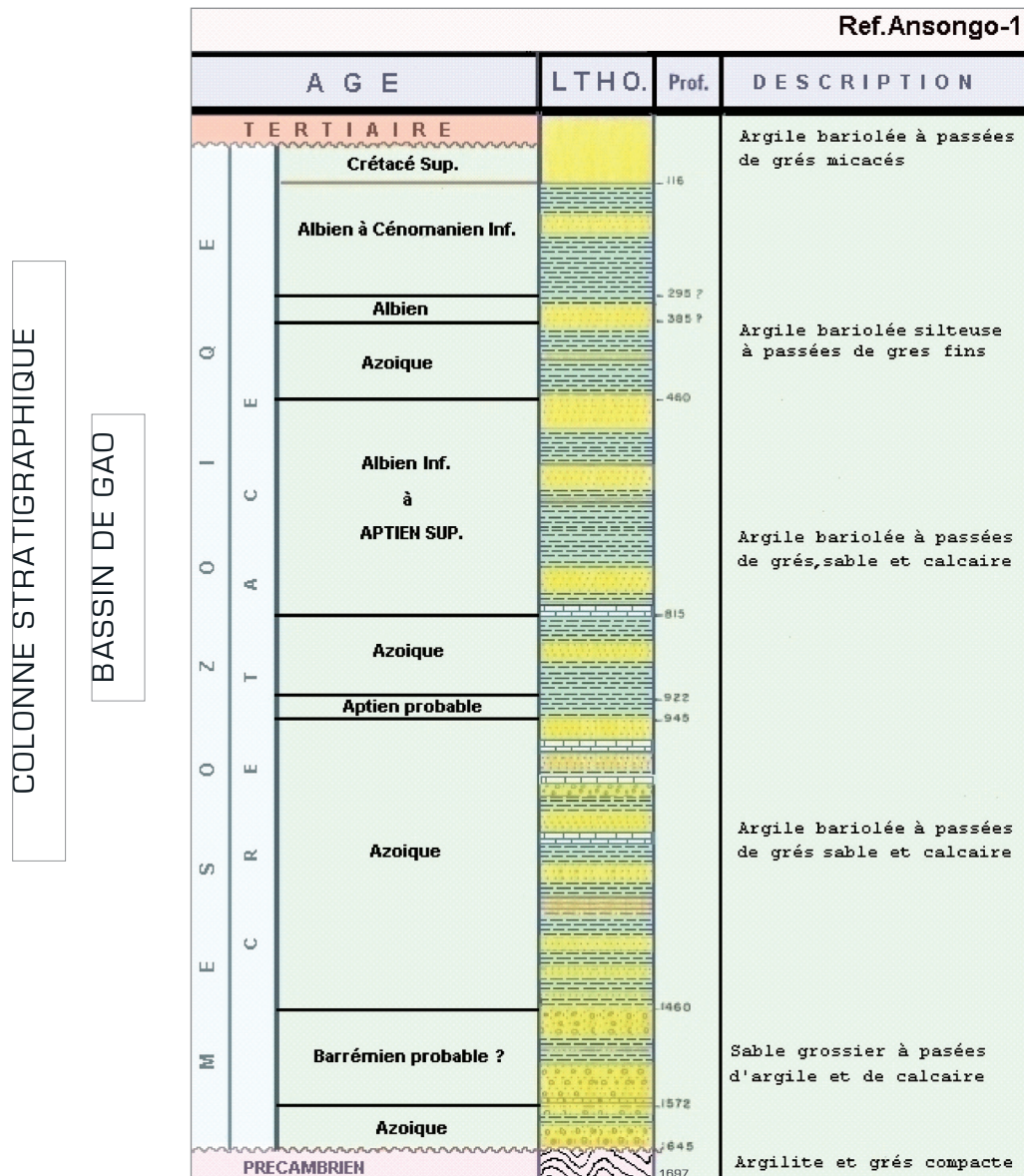


FIGURE 5 : Coupe du sondage Ansongo n° 1

815 – 922 m : azoïque : argiles bariolées à passées de grès, sables et calcaires,
 922 – 945 m : Aptien (?) : argiles bariolées à passées de grès,
 945 – 1460 m : azoïque : argiles bariolées à passées de grès, sables et calcaires,
 1460 – 1572 m : Barrémien (?) : sable grossier à passées d'argile et de calcaire,
 1572 – 1645 m : azoïque : sable grossier à passées d'argile et de calcaire,
 1645 – 1697 m : Précambrien : argillites et grès compacte.

Sur la base de cette description adoptée au Mali, le log stratigraphique représentatif des couches sédimentaires prises en considération dans le cadre de la configuration structurale du bassin d'Iullemeden, dans ce pays, est de bas en haut, comme suit :

- /// substratum constitué par les séries du socle précambrien ou par les formations non aquifères du Trias-Jurassique- Crétacé inférieur ;
- /// nappe du Continental intercalaire essentiellement logée dans les grès de Tégama et accessoirement dans les sables du continental hamadien ;
- /// un semi- imperméable constitué du paléocène et de l'Eocène séparant les nappes du continental intercalaire et du Continental Terminal ;
- /// nappe du continental Terminal incluant les niveaux phréatiques alluvionnaires.

Age		Mali	
		Groupe	Formation
Quaternaire		Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère
Tertiaire	Pliocène	Continental Terminal	sablo – gréseux et argileux
			Aquifère
	Miocène		
	Oligocène		
	Eocène	Eocène moyen	schistes
	Paléocène	Paléocène terminal	calcaire et marno – sableux avec niveau phosphaté
Paléocène inférieur		calcaire - sable	
Crétacé - Jurassique	Crétacé Supérieur	Maestrichtien - Cénomaniens	grès – argileux Aquifère
	Crétacé Inférieur	Continental intercalaire	Grès quartzitique, micro conglomératique, arkoses, sable, argiles Tégama
Aquifère			
Trias-Jurassique - Précambrien			
Paléozoïque		Précambrien	Birimien

III.1.3. Log stratigraphique adopté au Niger

Près de **83 %** de la superficie du bassin d'Iullemeden se trouve localisée à l'intérieur du **territoire nigérien**. Dans cette partie du bassin, les principales formations lithologiques du Secondaire,

Tertiaire et Quaternaire affleurent localement en allant des bordures vers le centre et des plus anciennes vers les plus récentes. Un grand nombre de sondages hydrauliques pour l'essentiel, recoupent ces formations en profondeur, soulignant ainsi les variations latérales d'épaisseur et de faciès.

Trois sondages relativement profonds, sont sélectionnés pour représenter la variation lithologique des séries géologiques recoupées. Ces sondages sont : Combretoum n°1 (sondage pétrolier, Sun Oil, Niger), Takanamat et Dogon Doutchi.

- **Sondage de Combretoum n° 1 :**

Ce sondage de 1186 m de profondeur, a recoupé les séries lithologiques du Tertiaire, Secondaire et Précambrien.

de 0 à 166 m : **Continental Terminal** indifférencié sablo-argileux,
de 166 à 198 m : **Eocène – Paléocène marin**, calcaire et argileux,
de 198 à 407m : **Crétacé supérieur continental** (Continental Hamadien), essentiellement sablo-argileux avec des grès, graviers et marnes,
de 407 à 1154 m : **Crétacé inférieur à Jurassique** (Continental intercalaire) sables avec argiles, et grès.
de 1154 à 1186 m : **Socle précambrien.**

- **Sondage de Takanamat :**

Ce sondage de 850 m de profondeur, a été continué jusqu'aux premières séries du Continental intercalaire. Il a recoupé les formations suivantes :

de 0 à 10 m : **Quaternaire** sablo-argileux,
de 10 à 20 m : **Continental Terminal** (CT₁ ?) argileux,
de 20 à 100 m : **Continental Terminal**, série sédiolithique sablo-gréseuse,
de 100 à 181 m : **Eocène – Paléocène** argileux très peu calcaire,
de 181 à 582 m : **Faciès marin du Crétacé supérieur** essentiellement argilo-marneux avec peu de calcaires plus ou moins marneux,
de 582 à 760 m : **Série des calcaires blancs du Crétacé supérieur** essentiellement calcaire et marneuse,
de 760 à 850 m : **Continental intercalaire** sablo-gréseux.

Cette coupe montre le développement au sein du Crétacé supérieur de faciès marins de plus en plus marneux et calcaires, passant latéralement au Continental hamadien à faciès plus gréseux et sableux.

- **Sondage de Dogon Doutchi :**

de 0 à 9 m : **Quaternaire** sableux,
de 9 à 370 m : **Continental terminal** sablo-argileux ; on y distingue :
 ▶▶ 9 à 192 m : CT₃
 ▶▶ 192 à 288 m : CT₂
 ▶▶ 288 à 370 m : CT₁
de 370 à 451 m : **Paléocène**, avec :

- ▶▶ 370 à 400 m : Série argileuse,
- ▶▶ 400 à 432 m : Série calcaire (terme VII),
- ▶▶ 432 à 451 m : série argilo-calcaire (termes VI et V)

de 451 à 753 m : **Continental hamadien** (Continental intercalaire).

Dans cette partie du bassin d'Iullemeden située au Niger, les séries du Crétacé supérieur, du Paléocène et du Continental terminal accusent un développement d'épaisseur notable faisant qu'elles deviennent importantes avec des faciès argileux et marneux admettant des séquences détritiques dont l'épaisseur est variable.

L'évolution du Paléocène du Nord vers le Sud du bassin dénote la constance des termes supérieurs (termes V à VII) avec passage progressif des faciès marins vers les continentaux (à partir de Dogon Doutchi 300 km).

Age	Niger		Formations simplifiées	
	Groupe	Formation		
Quaternaire	Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère	Quaternaire	
Tertiaire	Pliocène	Continental Terminal CT ₃	Série des grès argileux du Moyen Niger (Aquifère)	CT3
			Aquitard	
	Miocène	Continental Terminal CT ₂	Série argilo-sableuse à lignite - Aquifère	CT2
			Aquitard	
	Oligocène	Continental Terminal CT ₁	Série Sidérolithique - Aquifère	CT1
	Eocène		Schistes papyracés supérieurs - Aquitard	
	Paléocène	Formation de Garadawa -	Calcaires - Aquifère	Paléocène
		Paléocène marin	Schistes papyracés inférieurs - Aquitard	
	Crétacé - Jurassique	Crétacé Supérieur	Grès supérieurs	Grès d'Im Wouagar
Sénonien Moyen			Argiles de Doutchi Zana - Aquitard	
Sénonien Moyen (Grès Inférieur)			Silts de Bouza	
Sénonien inférieur			Argiles du Sénonien Inférieur - Aquitard	
Turonien			Calcaires blancs	Calcaires blancs
Cénomano-Turonien		Argiles Sénomano-turonniens - Aquitard		
Crétacé Inférieur		Continental intercalaire (Jurassique-Albien)	Continental Hamadien	CH
		Aquifère	Argiles du Farak	
		Grès de Tégama	Ci	
Trias-Jurassique - Précambrien	Trias-Jurassique - Précambrien / Aquitard	Argile de l'Irhazer / Socle	Substratum	
Paléozoïque				

Log stratigraphique adopté pour la description structurale du système aquifère d'Iullemeden

Le toit du Continental hamadien passe progressivement du Turonien inférieur, au Turonien supérieur puis au Maestrichtien, dénotant ainsi un mouvement positif d'exondation du Sud vers le Nord et des séries détritiques plus grossières vers les bordures nord et sud du bassin.

Au Sud du parallèle 12°, le soubassement du Paléocène est constitué par des séries détritiques grossières (Illo group équivalent de Rima group au Nigéria). A la lumière de ces changements de faciès et de l'atténuation du Nord au Sud, de la présence des séries maritimes remplacées progressivement par des séries continentales, le log stratigraphique adopté au Niger est le suivant :

III.1.4. Log stratigraphique adopté au Nigeria

Le log stratigraphique adopté au Nigeria est celui donné par la carte hydrogéologique de Sokoto⁷. Ce log est décrit comme suit :

Ere géologique	Série	Groupe	Formation	Epaisseur (m)	Lithologie	
Quaternaire	Actuel et Pleistocène			0 - 15	Silts et sables avec graviers (vallées)	
Tertiaire	Post-Eocène et Eocène		Gwandu	0 - 300+	Sables et argiles semi consolidés avec argile marneuse noire	
	Paléocène	Sokoto	Kalambaina	0 - 50+	Calcaire argileux semi consolidé avec argile plastique	
			Dange	0 - 40+	Argiles bleue à grise avec nodules de phosphate et minces bancs de calcaires	
Crétacé	Crétacé supérieur	Rima	Wurno	0 - 45+	sables peu consolidés stratifiés avec argiles et marnes	
			Dukamaje	0 - 30	Marnes fossilifères de coloration noirâtre avec de minces couches de calcaires	
			Taloka	0 - 200+	Sables fins à moyens semi-consolidés avec argile et conglomérat et admettant du lignite	
	Discordance					
		Crétacé inférieur		Gundumi & Illo	0 - 300+	Sables et grès peu consolidés avec argile et conglomérat à la base
Anté - Crétacé	Discordance					
	Socle					Granite-gneiss, phillites et quartzite

La description lithologique de ces formations permet de mieux saisir leurs particularités hydrogéologiques qui servent à leur classification en formations aquifères et en aquitards.

- /// **Dépôts superficiels** (Quaternaire) correspondent aux formations géologiques les plus récentes. Ces dépôts sont le résultat d'une sédimentation par charriage hydraulique (milieu fluvial et lacustre) ou d'évolution locale (latérisation). Ils se présentent sous forme de couches deltaïques et alluvionnaires plus ou moins stratifiées avec interconnexions latérales. Localement où leur épaisseur excède 15 m, ces niveaux sont généralement aquifères.
- /// **Tertiaire** (Paléocène et Post-Eocène et Eocène); correspond au Continental terminal qui est bien représenté par la **Gwandu Formation** qui constitue un niveau aquifère sableux. Ces sables sont souvent fins à grossiers cimentés par endroits par la limonite et en alternance avec

⁷ JICA (1990) : The Study Groudwater Development in Sokoto State, 1990

des couches de nodules de limonite. Ces couches admettent du lignite en couches noires argileuses. La base du tertiaire est constituée par « Sokoto group » constitué de :

- **Kalambaina Formation** (Poste Paléocène) se présente sous forme de calcaires marneux semi-consolidés avec des argiles et des marnes plastiques. Cette formation est aquifère et elle est captée par puits et donne lieu à des sources sur l'aire d'affleurement,
 - **Dange Formation** (Paléocène) est formée par des grès semi-consolidés bleuâtres avec argiles plastiques et nodules de phosphates et minces couches calcaires ; niveau aquifère à faible débit spécifique.
- /// **Crétacé supérieur** correspond à « **Rima Group** » qui est représentée par les trois formations suivantes :
- **Wurno Formation** (Crétacé supérieur ; Maestrichtien ?) : d'une épaisseur ne dépassant pas 50 m, cette formation est aquifère et souvent captive avec jaillissement ;
 - **Dukamje Formation** (Crétacé supérieur) : Marnes fossilifères de coloration noirâtre avec de minces couches de calcaires. Son épaisseur ne dépasse pas les 30 m.
 - **Taloka Formation** (Crétacé supérieur) : Sables fins à moyens semi-consolidés avec argile et conglomérat et admettant du lignite. Son épaisseur peut aller jusqu'à 200 m.
- /// **Crétacé inférieur** correspond au Continental intercalaire/Continental hamadien. Il est constitué de Gundumi & Illo Formation qui se présente sous forme sables fins à grossiers avec argiles et conglomérat vers la base. Son épaisseur peut aller jusqu'à 300 m.

Dans cet ensemble sédimentaire dont l'essentiel est continental, s'individualisent deux ensembles :

- ▶▶ **un groupe de base** (Crétacé – Jurassique), au sein duquel se distinguent les trois niveaux aquifères suivants (de bas en haut): Gundumi & Illo Formation, Taloka Formation et Wumo Formation dont l'importance varie en fonction de l'extension de la formation et de son épaisseur. Dans ce groupe, les deux niveaux aquifères (Taloka et Wumo Formations) groupés dans « Rima Group » ont une importance particulière dans le bassin de Sokoto. Ainsi donc, le Crétacé supérieur qui constitue au Niger et au Mali un niveau aquifère de moindre importance, est au Nigéria vital pour la région de Sokoto.
- ▶▶ **Un groupe supérieur** (Tertiaire – Quaternaire) correspondant aux formations post-éocènes, il englobe les deux niveaux aquifères de Gwandu Formation et les alluvions quaternaires. Ce groupe aquifère est séparé de celui de la base par les séries sédimentaires du « Sokoto Group » (Paléocène-Eocène).

Les deux principaux aquifères du SAI (Continental intercalaire et Continental Terminal) sont séparés au Nord du bassin, au Mali, par une épaisse série sédimentaire essentiellement marine du Crétacé supérieur. Cette série admet au centre du bassin (Niger) et dans le Sud (Nigeria), des niveaux aquifères intermédiaires, mais d'une importance secondaire par rapport aux principaux aquifères. Il en résulte que l'épaisseur de l'aquiclude qui est général à l'ensemble du bassin et qui sépare ces deux nappes, est par endroits, relativement réduite au point d'admettre à long terme, des échanges hydrauliques par drainance.

▶▶▶ **LOG STRATIGRAPHIQUE ADOPTÉ POUR LE SAI**

Le log stratigraphique type du SAI accuse ainsi des variations notables dans l'épaisseur et la nature lithologique des formations constituant les niveaux aquifères ou leurs aquitards. Vu le besoin d'assurer la continuité hydraulique entre les différentes parties du bassin lors du passage d'un pays à l'autre au sein du SAI, le schéma d'ensemble le mieux indiqué pour représenter ce système aquifère, est d'admettre la configuration suivante :

Age	Mali		Niger		Nigeria		
	Groupe	Formation	Groupe	Formation	Groupe	Formation	
Quaternaire	Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère	Quaternaire	Alluvions, dunes Aquifère	Quaternary	Alluvium Aquifère	
		Continental Terminal	sablo - gréseux et argileux Aquifère	Continental Terminal CT ₃	Série des grès argileux du Moyen Niger (Aquifère)	Continental Terminal	Gwandu
	Continental Terminal		Aquifère	Continental Terminal CT ₂	Série argilo-sableuse à lignite - Aquifère		Aquifère
				Continental Terminal CT ₁	Série Sidérolithique - Aquifère		
	Tertiaire	Eocène moyen	schistes		Schistes papyracés supérieurs - Aquitard		Kalambaina
			calcaire et mamo - sableux avec niveau phosphaté	Formation de Garadawa -	Calcaires - Aquifère	Sokoto	
		Paléocène terminal	calcaire - sable	Paléocène marin	Schistes papyracés inférieurs - Aquitard		Dange
			Maestrichtien - Cénonomanien	grès - argileux Aquifère	Grès supérieur	Grès d'Im Wouagar	
		Crétacé supérieur		Sénonien Moyen	Sénonien Moyen	Argiles de Doutchi Zana - Aquitard	
	Sénonien Moyen (Grès Inférieur)				Silts de Bouza	Rima (Maestrichtien)	Taloka
Sénonien inférieur			Argiles du Sénonien Inférieur - Aquitard			Aquifère	
Crétacé - Jurassique	Continental intercalaire	Grès quartzitique, micro conglomératique, arkoses, sable, argiles Tégama Aquifère	Turonien	Calcaires blancs			
			Cénomano-turonien	Argiles Sénomano-turoniens - Aquitard			
	Continental intercalaire	Aquifère	Continental intercalaire (Jurassique-Albien)	Continental Hamadien		Continental intercalaire / Continental Hamadien	Gundumi & Illo
				Argiles du Farak	Grès de Tégama		Aquifère
Trias-Jurassique - Précambrien			Trias-Jurassique - Précambrien / Aquitard	Argile de l'Irazer / Socle	Précambrien		
Paléozoïque	Précambrien	Birimien					

- /// un premier niveau aquifère généralisé du Continental Terminal (CT) groupant les séries aquifères du Tertiaire, (CT₁, CT₂ et CT₃) et intégrant également les nappes phréatiques logées dans les alluvions quaternaires (figure 6),
- /// un aquitard principalement constitué des formations paléocènes et éocènes et qui englobe localement (au Mali par exemple) une partie du Crétacé supérieur,
- /// un second niveau aquifère inférieur correspondant au Continental intercalaire (Ci) et groupant localement le niveau supérieur du Crétacé inférieur (Ci₃ ou Continental hamadien)

Ainsi, le système aquifère d'Iullemeden sera ramené, en première phase de sa conceptualisation, à un «bi-couche» d'une extension régionale à structure en cuvette avec épaissement des couches au centre du bassin et réduction d'épaisseur vers les bordures. Cette configuration en bi-couche peut être détaillée par la suite, en « multi-couche » en fonction de la disponibilité des données dans chaque pays.

La base de ce système aquifère est constituée par le socle birrimien au Mali, les argilites de l'rhazer (au nord) et du socle indifférencié (au sud) au Niger, le socle précambrien au Nigeria.

Les deux principales formations aquifères ainsi individualisées, sont séparées par des formations peu perméables (schistes, calcaire marneux, calcaires argileux) du Crétacé supérieur (Cénomaniens - Maestrichtien), Paléocène, Eocène et Oligocène dont le rôle aquifère n'est pas de règle et la continuité latérale n'est pas toujours assurée. C'est pour cette raison qu'il a été décidé de les traiter en première étape, comme un semi-imperméable ou aquiclude assurant le toit du niveau aquifère inférieur et le mur du niveau aquifère supérieur.

Dans le même sens de la simplification de la structure d'ensemble, à cause du manque de données spécifiques, il a été décidé pour le Maestrichtien au Nigeria (Rima group) qui se présente avec deux niveaux aquifères (Wurno et Taloka) séparés par endroits, par les argiles lenticulaires de Dukamaje Formation, de l'intégrer dans le Continental intercalaire, comme c'est le cas du Continental hamadien au Niger.

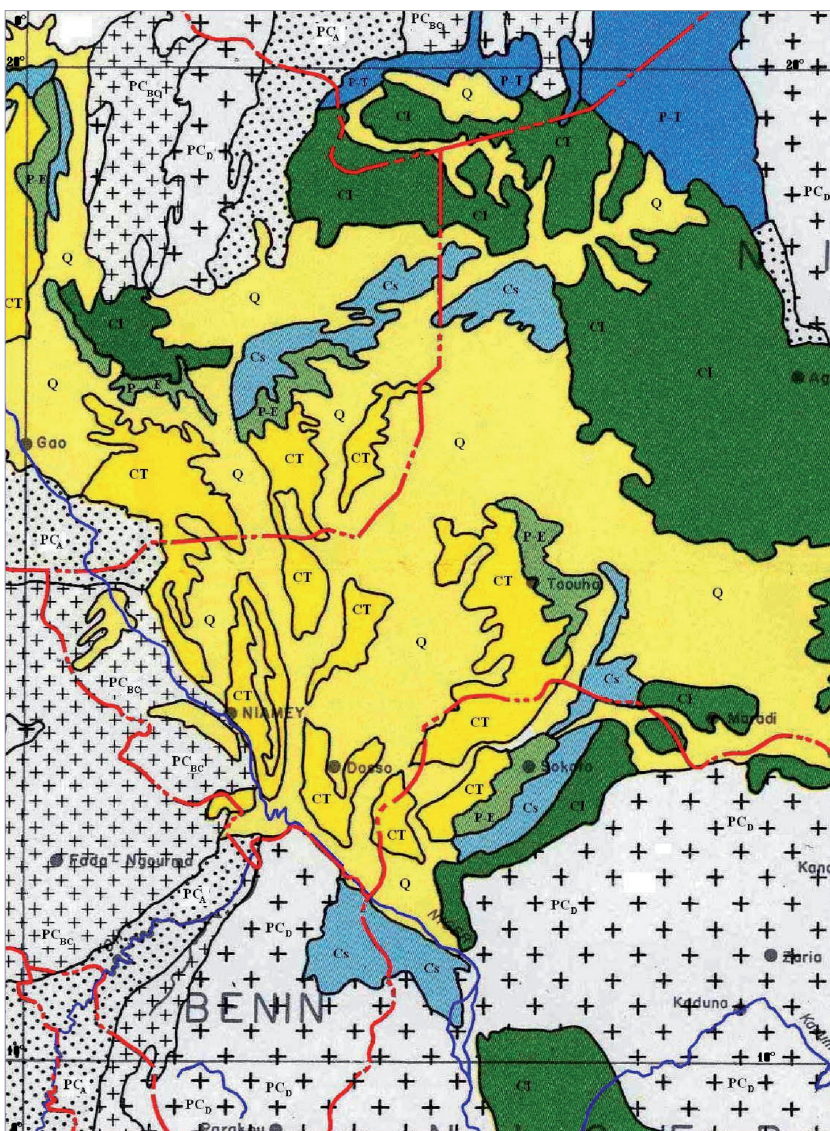


FIGURE 6 : Affleurement des principales formations géologiques du SAI

Ce souci de simplification concerne également le Continental Terminal qui est subdivisé au Niger, en trois couches aquifères et en une seule couche aquifère au Mali et au Nigeria (Gwandu).

ORIENTATIONS POUR LA MODÉLISATION DU SAI

Vu la disponibilité limitée des données spécifiques à chaque niveau aquifère du SAI et le besoin de se placer à cette étape, à l'échelle de l'ensemble du bassin, la modélisation hydrogéologique du SAI est conçue en deux étapes :

- **PREMIÈRE ÉTAPE** : Modèle global bi-couche (Continental intercalaire et Continental Terminal) dont la continuité est assurée à travers les trois pays. Ce modèle servira de base pour l'établissement du bilan hydrodynamique du système et des inter-influences ou échanges de part et d'autre des frontières. Dans la mesure où des besoins l'imposent, il constituera la référence pour les modèles locaux pour tout ce qui est conditions aux limites.
- **DEUXIÈME ÉTAPE** : Modèles multi-couches locaux pour prendre en considération les spécificités des aquifères dans chaque pays. Ainsi, le Continental Terminal sera détaillé au Niger, les aquifères secondaires du Crétacé supérieur seront pris en compte au Mali, au Niger et au Nigeria.

Dans le cas du bassin de Sokoto, l'option d'individualiser trois niveaux aquifères (Gundumi, Rima et Gwandu) est largement tributaire de la disponibilité d'une information spécifique à chaque niveau aquifère.

Il est évident que ce processus dans la schématisation du fonctionnement hydraulique du SAI est dicté par l'insuffisance de l'information nécessaire à la réalisation d'un modèle hydrodynamique multicouche qui fait ressortir les spécificités de chaque niveau dans les trois pays. Cet objectif lui-même ne semble pas réalisable dans la mesure où la continuité des couches aquifères n'est pas assurée et on est contraint à passer par une certaine schématisation de l'ensemble.

A ce stade de l'étude, la schématisation adoptée assure l'aboutissement à un bilan hydrogéologique assez fiable qui traduit les principales variables du système, à savoir les entrées, les sorties et les réserves théoriques. Or, la précision de ces éléments du bilan est en lui-même un objectif de première importance pour mieux dégager la répartition des ressources du système aquifère entre les trois pays.

D'autre part, le modèle ainsi élaboré est en mesure de donner avec une précision acceptable, les principaux éléments du bilan de manière à mieux appréhender la sensibilité du modèle aux variations de chaque terme du bilan. Cet aspect est également d'une grande importance et permet de mieux apprécier les tendances de l'évolution des termes du bilan sous l'effet du développement des prélèvements.

Ces données ont permis de mieux définir la géométrie des aquifères et de définir le modèle conceptuel du SAI. La structure générale du modèle adoptée au terme de l'élaboration du modèle conceptuel (figure 7) comprend deux couches aquifères séparées par un aquitard.

Partant de cette structure d'ensemble relativement simple et réaliste, il reste à préciser les conditions d'échange du modèle avec son environnement. Ces conditions sont principalement liées à l'extension géographique de chacune des couches aquifères et aquicludes, aux entrées du système, particulièrement son alimentation localisée (fleuve Niger et



FIGURE 7 : Structure générale du modèle du SAI

Dallols), ses sorties naturelles principalement représentées par les échanges avec le fleuve Niger et les échanges au sein du système aquifère sous l'effet de la drainance et des pressions différentielles. Ces différents aspects ont fait l'objet d'hypothèses largement discutées avec les experts hydrogéologues des pays et également de tentatives de calage répétées en vue d'aboutir à la situation la plus réaliste.

III.2. Extension et délimitation des couches

La délimitation des couches géologiques dans le bassin d'Iullemeden est faite sur la base de leur extension sur les cartes géologiques représentant les zones d'affleurement de ces couches. Dans le cas où les limites de la couche ne sont pas affleurantes, ou que leur continuité est interrompue par une faille, le recours aux corrélations géologiques est très usité pour faire des hypothèses plausibles sur cette délimitation.

Cette extension spatiale englobe également la dimension « épaisseur » de la couche et ses « passages latéraux de faciès ». Pour ceci, les cartes structurales (toit, mur et épaisseur des couches) sont d'une grande utilité. Elles permettent de montrer les variations d'épaisseur ainsi que les limites d'extension.

Cette délimitation spatiale n'est pas faite uniquement sur la base du critère lithologique uniquement, mais également de celui de la différenciation de la couche en « aquifère » ou « aquiclude ». Ceci est particulièrement le cas des séries du Continental intercalaire individualisé dans la zone d'étude en trois principales formations qui sont :

- /// les grès d'Agadès (C_{i_1}) à la base dont l'extension est limitée à la partie orientale du bassin (Niger),
- /// les argilites de l'Irhazer (C_{i_2}) considérées comme étant le substratum du Continental intercalaire dans la partie orientale du bassin (Niger)
- /// les grès de Tégama (C_{i_3}) constituant la formation aquifère proprement dite du Continental intercalaire dans le bassin d'Iullemeden.

DÉLIMITATION DE L'EXTENSION DES PRINCIPAUX NIVEAUX AQUIFÈRES

Cette délimitation est analysée à l'aide de corrélations litho-stratigraphiques passant par plusieurs sondages ayant recoupé les nappes logées dans les formations sédimentaires du SAI. Cette analyse est faite en s'appuyant sur les coupes géologiques que nous avons réalisées (figure 8) et celles présentées dans les études antérieures.

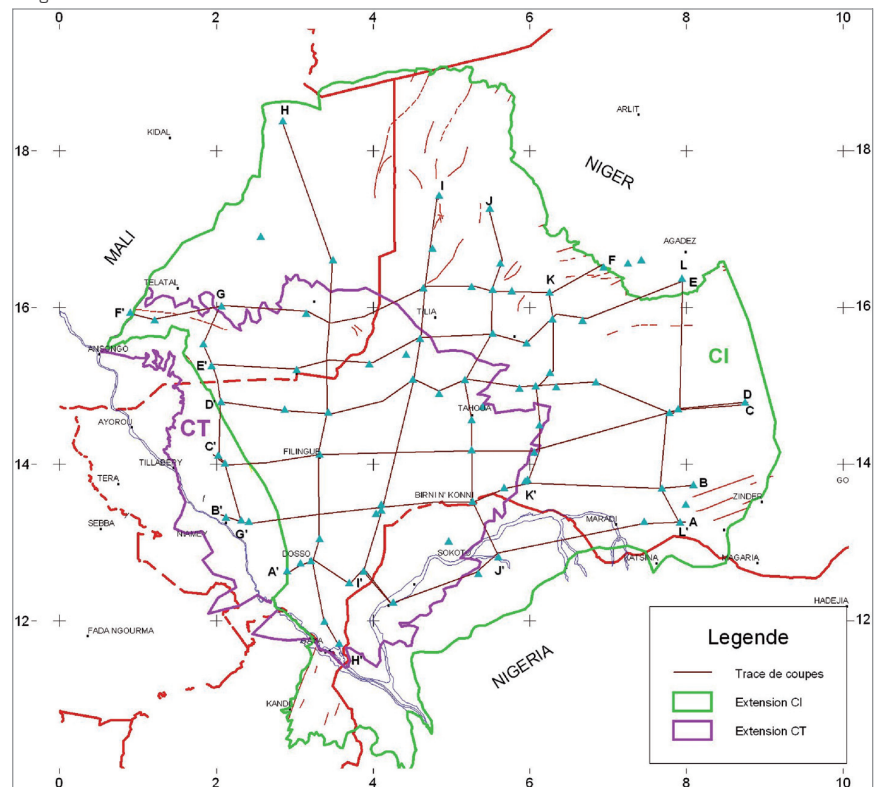


FIGURE 8 : Tracé des coupes géologiques

► Corrélations litho-stratigraphiques W-E entre le fleuve Niger et Zinder

Ces corrélations, partant de l'Ouest des affleurements du socle (figure 9a), s'ouvrent vers l'Est sur l'élargissement en surface des affleurements du Continental intercalaire (particulièrement les grès d'Agadès et les argiles de l'Irhazer, entre Maradi et Zinder) (figure 9a, b, c). La falaise d'Adrar Douchi souligne bien la limite orientale et septentrionale du Continental terminal (figure 9a). Cette coupe met en évidence le rôle de la tectonique dans l'affaissement du socle (Gourma) sous la sédimentation des différents niveaux du SAI ainsi que la difficulté d'estimer l'épaisseur du Continental intercalaire (Grès de Tégama) au centre du bassin (figure 9a, b, c), où les forages ne traversent pas toute son épaisseur.

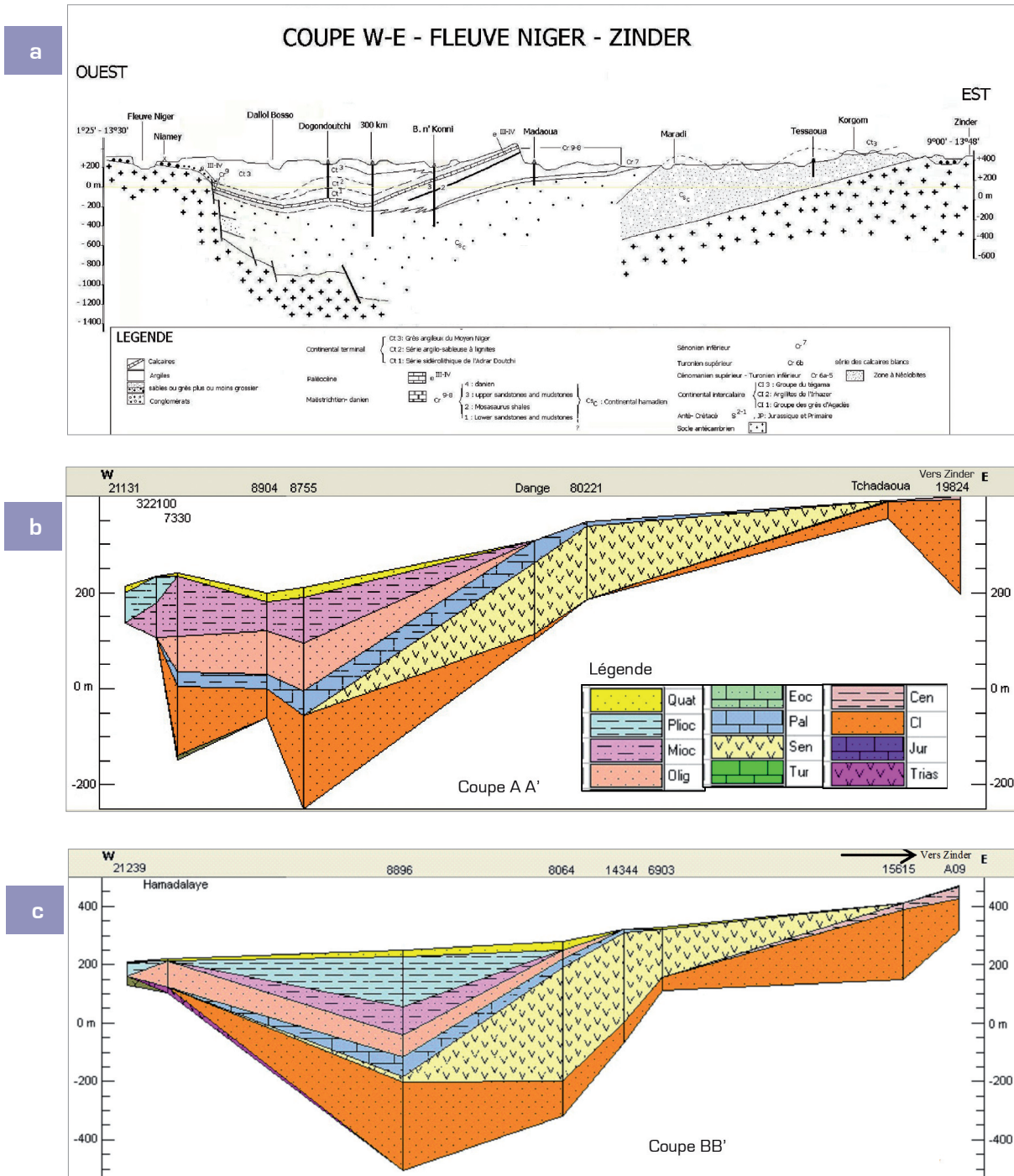


FIGURE 9 : (a, b, c) Coupe W-E entre le fleuve Niger et Zinder

► **Corrélation litho-stratigraphique SW-NE entre le fleuve Niger et Agadès**

Cette corrélation traduit au mieux l'aspect en cuvette du SAI et montre que le Crétacé supérieur se développe au centre du bassin, mais pratiquement absent dans la partie occidentale. Le Continental Terminal est lenticulaire et se développe entre les deux Dallols Maouri et Bosso (figure 10).

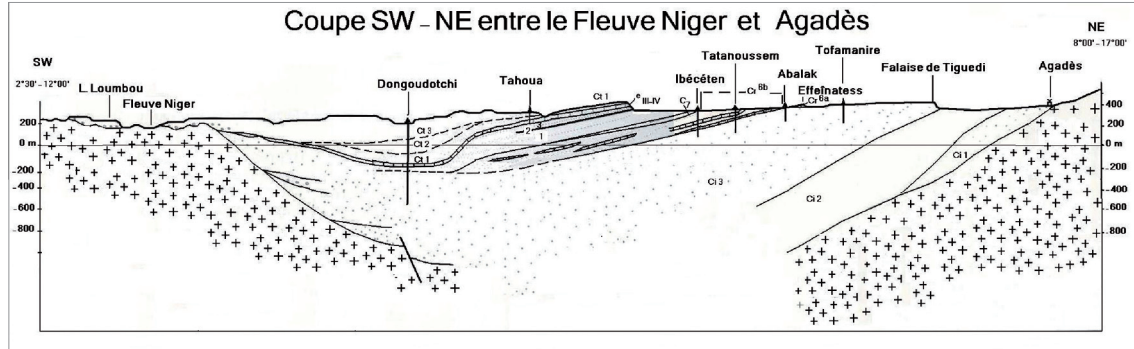


FIGURE 10 : Coupe SW-NE entre le fleuve Niger et Agadès

► **Corrélations litho-stratigraphiques W-E entre le fleuve Niger et Gournache (forage 23882)**

Ces deux coupes illustrent aussi la morphologie en cuvette du SAI reproduite par la figure 10. Les formations du Crétacé supérieur disparaissent vers l'Est du bassin où le Ci est en affleurement (figure 11 a et b). Les données récentes apportent plus de précision sur l'épaisseur du Ci dans cette partie Ouest du bassin, le forage combretom traversant le Ci dans toute son épaisseur (figure 11 b). Les formations du Cénomaniens et du Turonien, absentes vers le Sud (figure 11 a), font leur apparition, vers le Nord, à partir du tracé de la coupe W-E3 (figure 11 b).

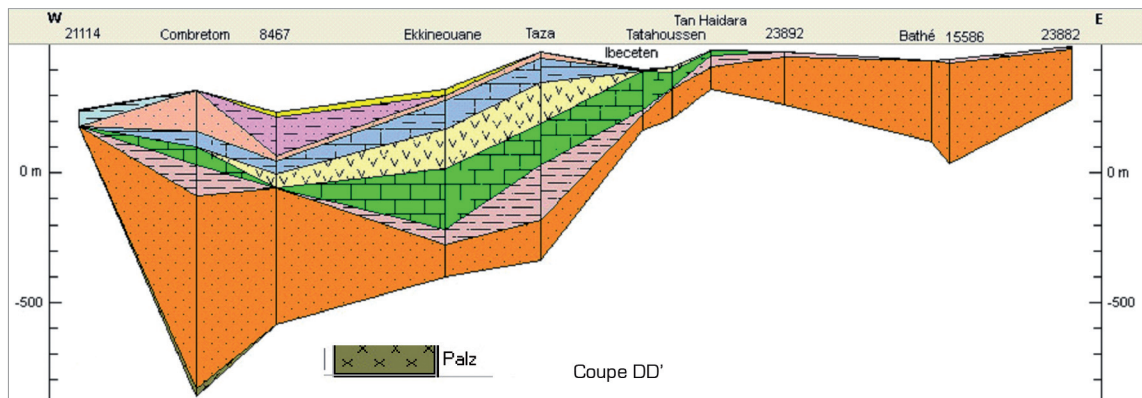
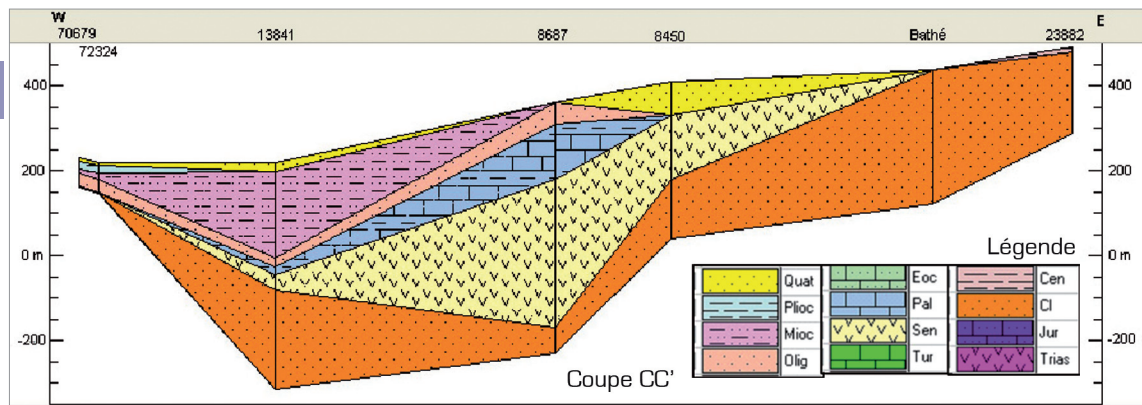


FIGURE 11 : (a et b) Coupe W-E entre le fleuve Niger et Agadès

► **Corrélations litho-stratigraphiques SW-NE et W-E entre le fleuve Niger et l'Irhazer**

Ces corrélations confirment la structure en cuvette du SAI et montrent que les grès de Tégama, vu leur épaisseur importante, constituent l'essentiel de la sédimentation aquifère du bassin (figure 12a, b, c). Elle souligne également l'importance relative de la sédimentation marine du Crétacé supérieur [Continental hamadien] entre les deux falaises de Tigueddi et de l'Adrar Douchi (figure 12a). L'effet de la faille régionale parallèle à l'affleurement du socle dans la partie occidentale du bassin se traduit par une limite pratiquement étanche entre les aquifères du SAI et ce socle (figure 12a). Le bassin est limité dans sa partie Est par les affleurements du Jurassique (figure 12b et c).

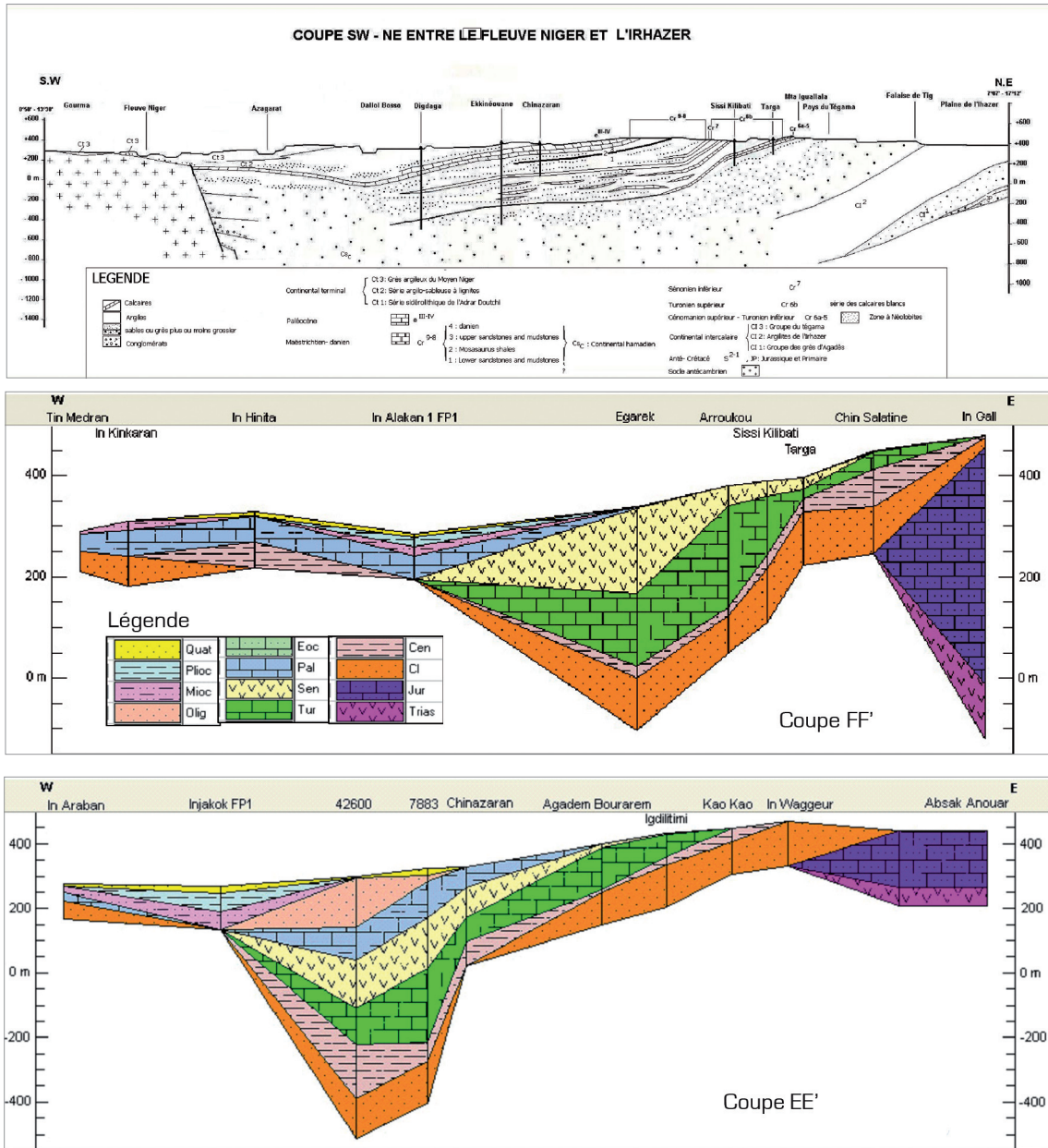


FIGURE 12 : (a; b et c) Coupe SW-NE et W-E entre le fleuve Niger et l'Irhazer

► **Corrélations litho-stratigraphiques S-N entre le fleuve Niger et le Ténééré**

Ces corrélations soulignent la continuité des séries du Continental intercalaire (Grès de Tégama) sur le pourtour du bassin en même temps qu'elles montrent la disparition des séries du Crétacé

supérieur vers le Sud et leur épaisseur vers le Nord (figure 13a, b, c). Le tracé de figure 12a ceux des coupes N-S 4 et N-S 5. Elles dégagent parfaitement la structure en cuvette du système aquifère. Dans la partie occidentale du bassin, la limite entre le Continental intercalaire et le Continental Terminal est marquée sur la coupe N-S 6 par la disparition des formations du Ci vers le Sud, où les couches du CT sont directement superposées au socle précambrien (Gourma) (figure 13d).

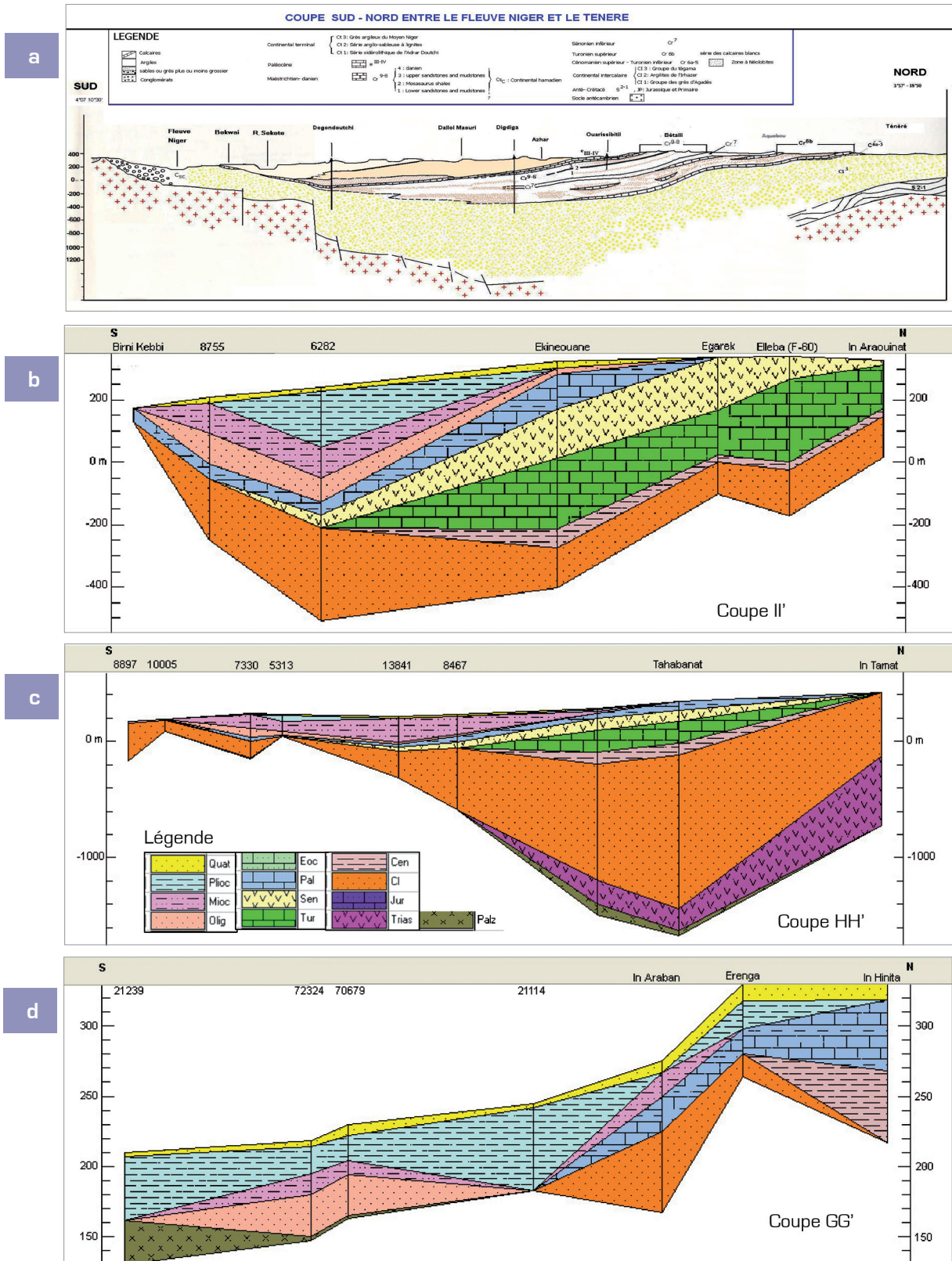


FIGURE 13 : (a, b, c et d) Coupes S-N entre le fleuve Niger et le Ténére

► **Corrélations litho-stratigraphiques S-N entre la rivière Rima et les localités de Tessa-takoret et Chin Salatine**

La structure en cuvette est aussi mise en exergue dans cette partie du bassin (figure 14a). Les limites entre les formations du Continental intercalaire et celles du Continental Terminal est marquée par la limite d'extension des couches du CT vers le Nord (figure 14a et b). Dans la partie Est du bassin, les formations du Continental Terminal sont absentes. La limite d'extension du Ci est marquée par les affleurements des couches du Jurassique (figure 14c).

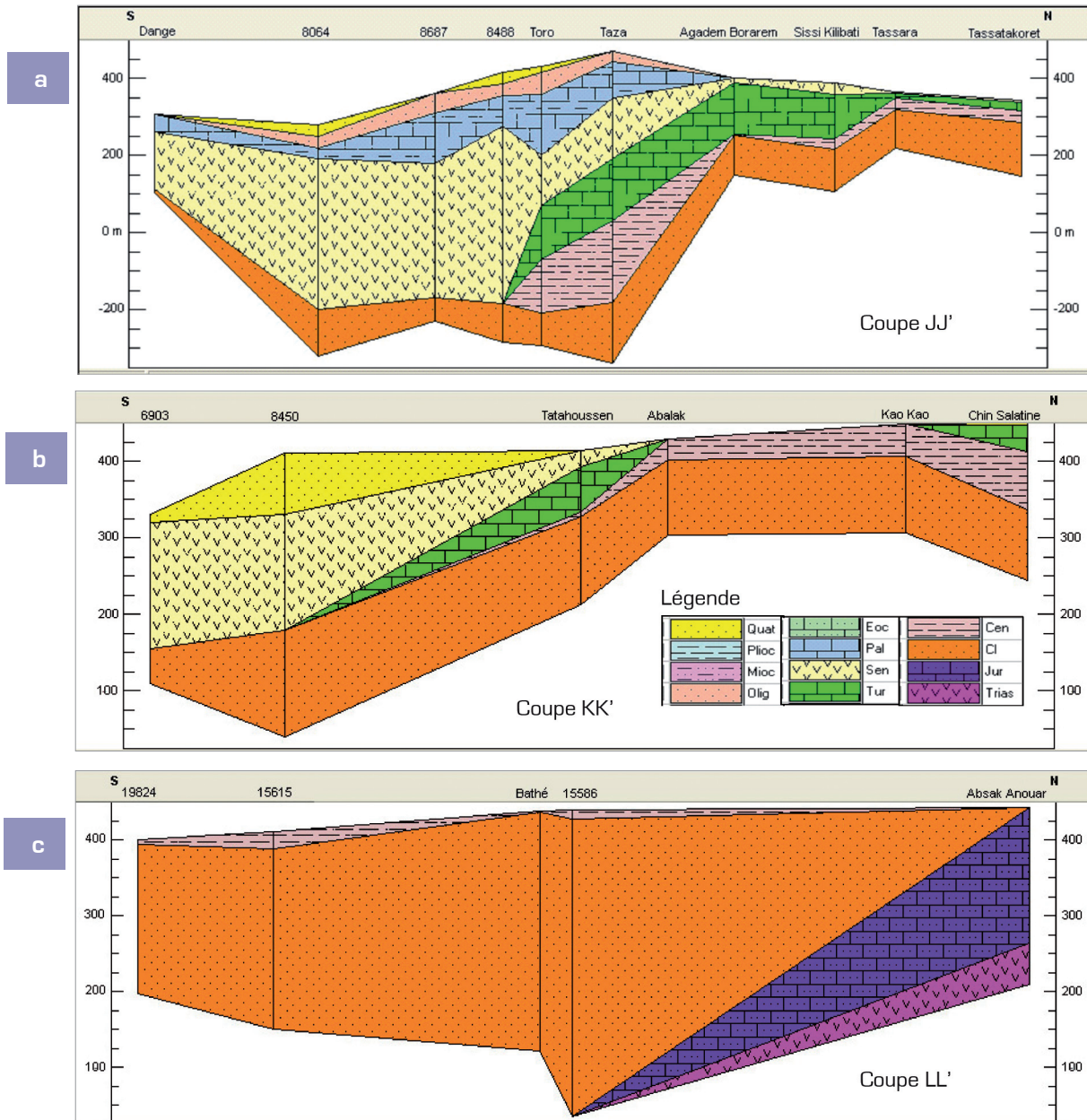


FIGURE 14: (a, b et c) Coupes S-N entre la rivière Rima et les localités de Tessa-takoret et Chin Salatine

De l'ensemble de ces corrélations, il se dégage que la cuvette synclinale du SAI est un synclinal tectonique, dont le flanc occidental est largement affecté par une faille régionale dont le tracé est parallèle au cours d'eau du fleuve Niger. Les trois séries du Crétacé inférieur [Grès d'Agadès, argiles de l'Irhazer et grès de Tégama] ne contribuent à l'écoulement souterrain de la nappe du Continental intercalaire qu'à travers les grès de Tégama. Sous la partie orientale du bassin, les argiles de l'Irhazer constituent le substratum du système aquifère du SAI.

Les formations du Crétacé supérieur (Continental hamadien) n'acquièrent une certaine importance hydrogéologique qu'au Niger et au Mali où elles deviennent épaisses et étendues. Vers le Sud (Nigeria), elles ne jouent aucun rôle hydrogéologique. De même le rôle des séries aquifères du Continental terminal est essentiellement limité à la partie centrale du bassin (Niger) et accessoirement au Nord (Mali).

Sur la base de cette analyse structurale, l'extension géographique des deux principaux aquifères du SAI est établie sur une carte (figure 14). La **superficie du CT** est de l'ordre de **203 000 km²** et celle du **Ci** de l'ordre de **486 000 km²**. L'ensemble du système aquifère couvre un domaine de l'ordre de 500 000 km². Dans la partie occidentale du bassin, les couches du CT sont directement superposées au socle précambrien (Gourma).



FIGURE 15 : Extension des deux couches du Ci et du CT

III.3. Calcul des réserves du CT et du Ci

Sur la base d'une centaine de coupes géologiques sélectionnées dans la Base de données géologique, il a été possible d'estimer les épaisseurs des formations du CT et du Ci. Les épaisseurs du CT résultent de la soustraction des cotes du mur à celles du toit du CT lues sur les logs stratigraphiques. Ainsi, l'**épaisseur moyenne** de la formation du **CT** a été évaluée à **130 m**. La même démarche a permis d'estimer l'**épaisseur du Ci** de l'ordre de **200 m**.

Sachant que l'aire du domaine du CT est de 203 296 km², le produit de l'épaisseur moyenne et de la surface du domaine fournit un volume de $2,64285 \times 10^{13}$ m³ (soit 26 000 milliards de m³). L'aire du domaine du Ci étant de 486 443 km², le volume d'eau contenu dans cet aquifère s'établit à $9,72886 \times 10^{13}$ m³ (soit 97 000 milliards de m³).

La porosité efficace reste un facteur méconnu et apparemment fortement variable, du moins dans le secteur aquifère Kori-Dantiandou, à l'est de Niamey. Les deux seules mesures de porosité efficace existantes, déduites de pompages d'essai, sont de 1 % à Banikane (2°37'29"E, 13°35'10"N) et 15 % à Banizoumbou. Ces valeurs laissent une certaine liberté quant à l'appréciation d'un ordre de grandeur de la porosité efficace. Il est par conséquent difficile de conclure s'il s'agit d'une expression de la variabilité extrême de l'aquifère, ou s'il s'agit de mesures erronées (Massuel, 2005).

Par ailleurs, « L'estimation des réserves peut être faite par le calcul du déstockage par rabattement : c'est la contribution des réserves qu'exprime dans les équations de l'écoulement et du bilan le terme $[S.dh/dt]$ en nappe captive, ou $[e.dh/dt]$ en condition de nappe libre. La contribution des réserves est donc proportionnelle à la vitesse de rabattement, et à rabattement égal, elle dépend du coefficient d'emmagasinement. On comprend aisément que la contribution des réserves soit prépondérante dans les régions où l'aquifère renferme une nappe à surface libre : en effet, le rapport entre les ordres de grandeurs des coefficients

d'emmagasinements captifs et des porosités se trouve généralement dans des rapports de 1 à 500 ou même plus » OSS (2002).

Il est alors considéré qu'en nappe libre le coefficient d'emmagasinement équivaut à la porosité efficace. La carte des coefficients d'emmagasinement du modèle du SAI affiche, dans les parties à nappe libre des valeurs de l'ordre de 4 % dans la nappe du CT et du Ci (figures 16 a et b). Nous adopterons dans nos calculs cette valeur de 4 % comme valeur de la porosité efficace.

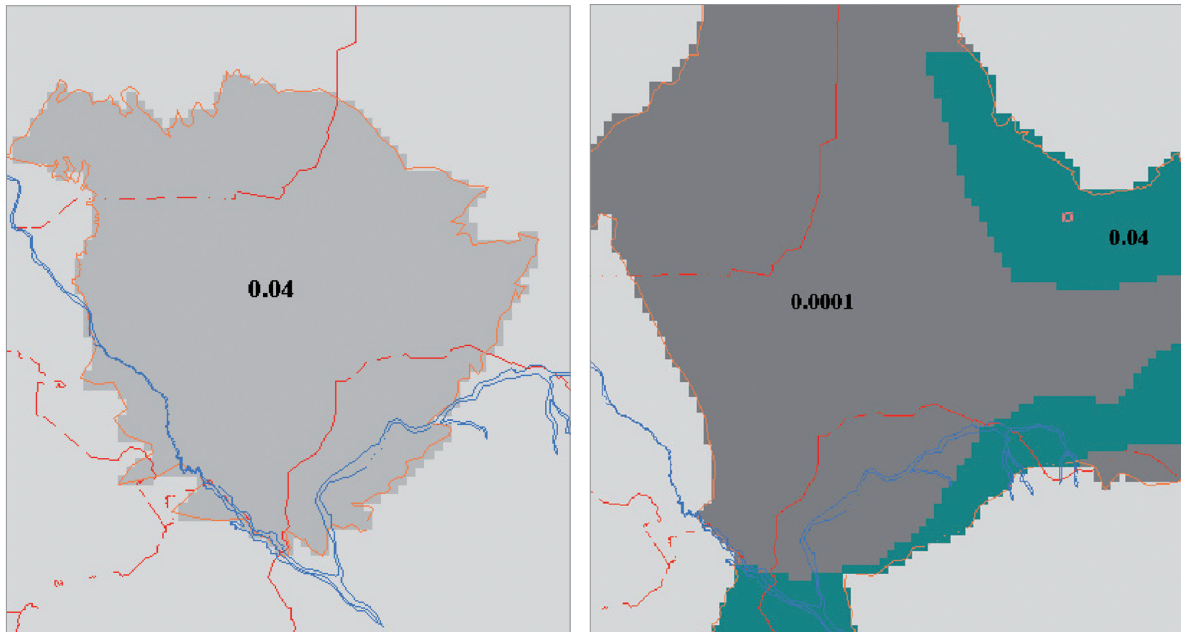


FIGURE 16 : Coefficients d'emmagasinements du CT(a) et du Ci(b) après calage du modèle

Considérant une porosité efficace de 4 %, nous pouvons estimer les réserves du Ci à $(9,72886 \times 10^{13} \text{ m}^3 \times 4/100) = 3\,891 \times 10^9 \text{ m}^3$. Avec un flux moyen annuel de recharge naturelle de $0,05 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$, le taux de renouvellement de la nappe du Ci s'établit à $1,28 \cdot 10^{-5}$; soit une durée de 77 820 ans environ.

Pour la même valeur de porosité efficace (4 %), les réserves du CT sont estimées à $(2,64285 \times 10^{13} \text{ m}^3 \times 4/100) = 1\,057 \times 10^9 \text{ m}^3$. Avec un flux moyen annuel de recharge naturelle de $0,103 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{an}$, le taux de renouvellement de la nappe du Ci s'établit à $9,74 \cdot 10^{-5}$; soit une durée de 10 262 ans environ.

Ces résultats sont résumés sur le tableau 1 ci-dessous.

Réservoir aquifère	Volume d'eau moyen (10^9 m^3) S	Flux moyen (10^9 m^3) Q	Durée de renouvellement (années) S / Q	Taux de renouvellement Q / S
Continental intercalaire	3 891	0.05	77 820	$1,28 \cdot 10^{-5}$
Continental terminal	1 057	0.103	10 262	$9,74 \cdot 10^{-5}$

TABLEAU 1 : Calcul des réserves du SAI

IV. CONSTRUCTION DU MODELE

La construction du modèle mathématique pour la simulation du comportement des aquifères souterrains, est un processus qui passe par les étapes suivantes :

- /// discrétisation de l'espace à simuler et la construction de la grille représentative ;
- /// définition des données physiques (couches, conditions aux limites, liaisons...);
- /// préparation des données hydrogéologiques (alimentation, piézométrie, exploitation...).

La discrétisation de l'espace à simuler est faite conformément à la procédure imposée par le logiciel « PM5 », en se référant à une carte géo-référenciée dont la projection permet de distinguer la grille du modèle du quadrillage de la carte.

La préparation des données physiques et hydrogéologiques est entreprise suivant la procédure « PM5 » qui spécifie des formats propres pour chaque paramètre. La mise en forme de cette information est entreprise au sein de la base de données. Le passage de la base de données vers le modèle, est régi par des liaisons d'importation de données et de restitution des résultats.

IV.1. Schéma hydrogéologique du modèle

La structure générale du modèle adoptée après élaboration du modèle conceptuel comprend deux couches aquifères (le complexe terminal et le continental intercalaire) séparées par un aquitard. L'extension des couches est définie dans les limites hydrogéologiques des formations aquifères. La géométrie des entités du modèle est définie par l'épaisseur du semi-perméable et les toits et murs des aquifères.

IV.2. Discrétisation de l'espace et construction de la grille du modèle

Le domaine d'étude a été discrétisé en une grille représentant un maillage carré régulier de 10x10 km, représentant pour chacune des couches :

Coontinental Terminal : 2 030 mailles

Continental intercalaire : 4 860 mailles

Soit un total de 6 890 mailles représentant une superficie modélisée de près de 689 000 km². Le maillage des deux couches du modèle est porté sur les figures 15 et 16 (voir page 48).

Quant aux couches semi-perméables, elles sont représentées par les flux verticaux qui les traversent sous l'effet des différences de charges entre couches aquifères superposées : ce sont les flux de Drainance. Nous utilisons en effet un Modèle quasi-tridimensionnel utilisant « l'hypothèse du Multicouche », hypothèse selon laquelle les écoulements dans les couches semi-perméables (aquitards) sont strictement verticaux lorsque l'on considère que les écoulements dans les aquifères principaux sont horizontaux. On démontre que cette hypothèse se trouve amplement vérifiée lorsque le contraste des perméabilités entre formations adjacentes (aquifère/aquitard) est important : un rapport de 104 est suffisant. Cela est bien le cas dans le SAI où les études réalisées (au Niger) situent les perméabilités verticales du Cénomanién - Eocène Moyen vers les $2,5 * 10^{-10}$ m/s (ETH, 1999). Dans ces conditions, l'équation générale de l'écoulement dans

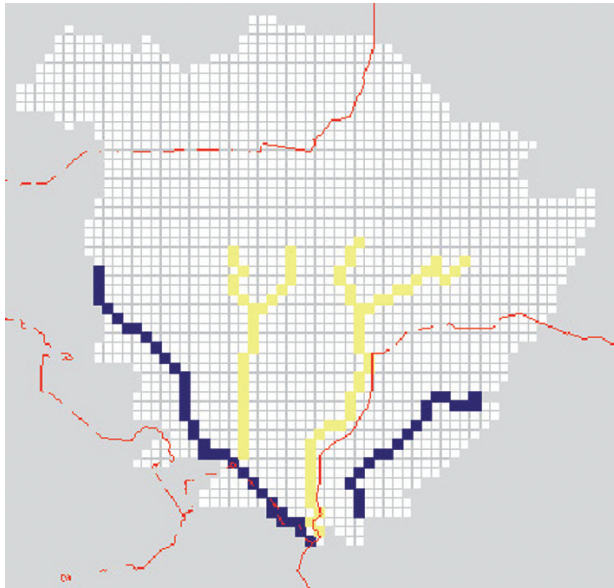


FIGURE 17 : Maillage du CT

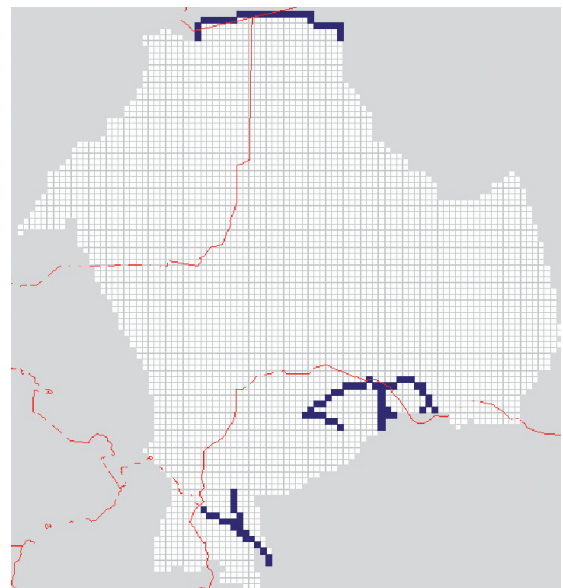


FIGURE 18 : Maillage du Ci

le multicouche, qui constitue le Modèle Mathématique du SAI, est donnée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q_H + q_B = S \frac{\partial h}{\partial t} + q$$

$$q_H = K_v \frac{H_H - H_C}{e_H}$$

$$q_B = K_v \frac{H_B - H_C}{e_B}$$

T_x est la Transmissivité de l'aquifère selon Ox
 T_y est la Transmissivité de l'aquifère selon Oy
 Ox et Oy sont les axes principaux d'anisotropie
 q_H est le Flux spécifique de Drainance vers le Haut
 q_B est le Flux spécifique de Drainance vers le Bas
 h est la Charge hydraulique dans l'aquifère
 H_H est la charge hydraulique dans l'aquifère supérieur
 H_B est la charge hydraulique dans l'aquifère inférieur
 K_v est la perméabilité verticale de la couche semi-perméable

IV.3. Les conditions aux limites

Les aquifères souterrains sont conçus du point de vue de la modélisation de leur fonctionnement hydrodynamique, comme des entités qui sont en contact avec leur milieu environnant à travers les échanges qu'ils entretiennent avec ce milieu. Ces échanges sont soit des « entrées » [alimentation, recharge] ou des « sorties » [exploitation, évaporation, évapo-transpiration]. Les transferts qui se produisent au sein du système lui-même se traduisent également par des échanges latéraux et verticaux (drainance) de flux ou de solutés. C'est à travers l'ensemble de ces échanges que sont définies les conditions aux limites qui caractérisent le système aquifère.

Les trois types classiques de conditions aux limites adoptés dans notre modèle sont :

- /// le potentiel imposé (condition de Dirichlet) ;
- /// le flux imposé nul ou non nul (condition de Neumann) ;
- /// le drain ou le potentiel imposé à travers une résistance (condition de Cauchy).

Dans cette perspective, la condition de potentiel imposée a été appliquée au SAI dans le fleuve

Niger où les charges hydrauliques ont été fixées pour évaluer les échanges entre le fleuve et les aquifères. Cette condition est aussi appliquée au Nord du bassin dans la nappe du Ci pour évaluer la contribution des aquifères paléozoïques limitrophes.

- ⚡ La condition de « drain » ou « de potentiel imposé à travers une résistance » est assez souvent celle des émergences qui apparaissent en surface sous l'effet du comportement hydrodynamique de la nappe. Dans le cas du SAI, la condition de drain a été appliquée dans les dallols qui drainent la nappe sous-jacente du CT dont la piézométrie coïncide à leurs niveaux avec le plan d'eau.
- ⚡ La condition de « flux imposé nul » est admise le long des limites des couches aquifères étanches où le système aquifère ne reçoit aucune alimentation latérale. C'est également le cas à travers les épontes (toit et mur) de l'aquifère si aucune alimentation n'est admise. Dans le cas du SAI, ceci est le cas du Ci et du CT qui ne reçoivent aucune alimentation à partir du substratum (Socle, argiles de l'Irhazer et Paléocène pour le Ci et socle, paléocène-Eocène pour le CT.
- ⚡ La condition de « flux imposé non nul » est utilisée dans le cas de la modélisation du SAI, sur les zones d'alimentation du Ci, comme artifice de calcul de cette alimentation. Ces flux ont été calculés à travers les potentiels imposés dans cette zone au cours du calage..

IV.3.1. L'alimentation des nappes

L'alimentation des nappes est une caractéristique principale des « entrées » du système aquifère. Elle doit être spécifiée suivant son mode (naturelle par infiltration ou artificielle en étant induite) et sa durée (continue, intermittente ou temporaire).

Dans le cas du Système aquifère d'Iullemeden, l'alimentation des différents niveaux aquifères est à considérer dans sa dimension géologique pour rendre compte des grands changements climatiques ayant permis la mise en place de grandes réserves en eau dans le système à des époques caractérisées par un climat plus pluvieux que celui de nos jours.

L'alimentation actuelle de ce système se fait à deux cadences :

- ⚡ une alimentation intermittente à l'occasion des pluies et du ruissellement qui en résulte, sur l'ensemble des affleurements des couches perméables aquifères et au niveau des mares temporaires ;
- ⚡ une alimentation permanente le long des cours d'eau à écoulement pérenne (Fleuve Niger, rivière Rima et ses affluents qui sont en écoulement permanent).

L'évaluation de l'alimentation des aquifères du SAI est estimée à partir des chroniques de la pluviométrie et de l'extension des zones d'infiltrations perméables. La base de données « climatologie » est sollicitée à travers les mesures pluviométriques disponibles pour mieux clarifier cet aspect. L'alimentation par infiltration directe des eaux de pluies a été imposée dans la couche du CT.

IV.3.2. Les Exutoires Naturels

Les exutoires naturels des aquifères souterrains sont constitués par les émergences naturelles (sources) et les plans d'eau permanents qui sont en liaison hydraulique avec la nappe. Dans le cas du SAI, les émergences naturelles sont pratiquement inexistantes et les plans d'eau permanents se limitent aux cours d'eau permanents (fleuve Niger). C'est donc à ce niveau qu'il y a lieu d'examiner les « sorties » naturelles du système aquifère.

IV.3.3. Les exutoires artificiels (Prélèvements)

Les exutoires artificiels sont constitués par les points d'eau qui exploitent les nappes. Dans le cas du SAI, ces points d'eau se différencient en :

- ⚡ puits traditionnels ;

- /// puits maçonnés avec contre-puits ;
- /// forages d'eau.

Chaque type de ces points d'eau se caractérise par un régime spécifique d'exploitation qu'il y a lieu d'examiner et d'adopter dans chacun des trois pays, pour évaluer l'exploitation qui s'y pratique.

Cet aspect acquiert une importance particulière dans le cas du SAI du fait qu'on manque d'inventaires et de chroniques de suivi de l'exploitation. Seules les statistiques relatives au nombre de points d'eau et à la cadence de leur création, sont sommairement disponibles. L'évaluation de cette exploitation a été faite suivant des recoupements qui conjuguent le nombre des points d'eau et la demande en eau par secteur (AEP, abreuvement du cheptel, irrigation...). Les prélèvements sont représentés sous forme de potentiel imposé dans le modèle.

IV.4. Données hydrodynamiques

► Transmissivités horizontales initiales :

Les transmissivités qui ont servi à initialiser le calage du modèle sont issues des rares valeurs publiées dans la littérature ou envoyés par les techniciens des pays. Nous avons aussi tenu compte des transmissivités issues du modèle locale de Goulbi de Maradi au Niger.

Selon Massuel (2005) les quelques pompages d'essai réalisés sur des forages captant la nappe phréatique dans le secteur de Kori - Dantiandou, à l'est de Niamey, sont à considérer avec réserve. Les forages ne captent généralement que les dix premiers mètres de l'aquifère et la durée du pompage, effectuée immédiatement après fonçage, est souvent insuffisante. Il est courant d'observer un développement de l'ouvrage au cours de l'essai. Il faut ajouter à ces considérations la nature lithologique extrêmement variable de l'aquifère.

Si régionalement les formations sédimentaires peuvent être considérées comme homogènes, localement la présence de lentilles d'argile ou sableuses peut modifier considérablement les interprétations ponctuelles (uniquement représentatives de la singularité). Les valeurs de transmissivités obtenues au cours des essais sans développement apparent de l'ouvrage, varient entre 5.10^{-4} et 1.10^{-2} m²/s. **Les valeurs des transmissivités** que nous avons rassemblées dans ce secteur **montrent des ordres** de grandeurs de 10^{-3} m²/s. Ces mêmes ordres de grandeurs s'affichent dans la zone de Birnin Kebbi et de Filingué (figure 19).

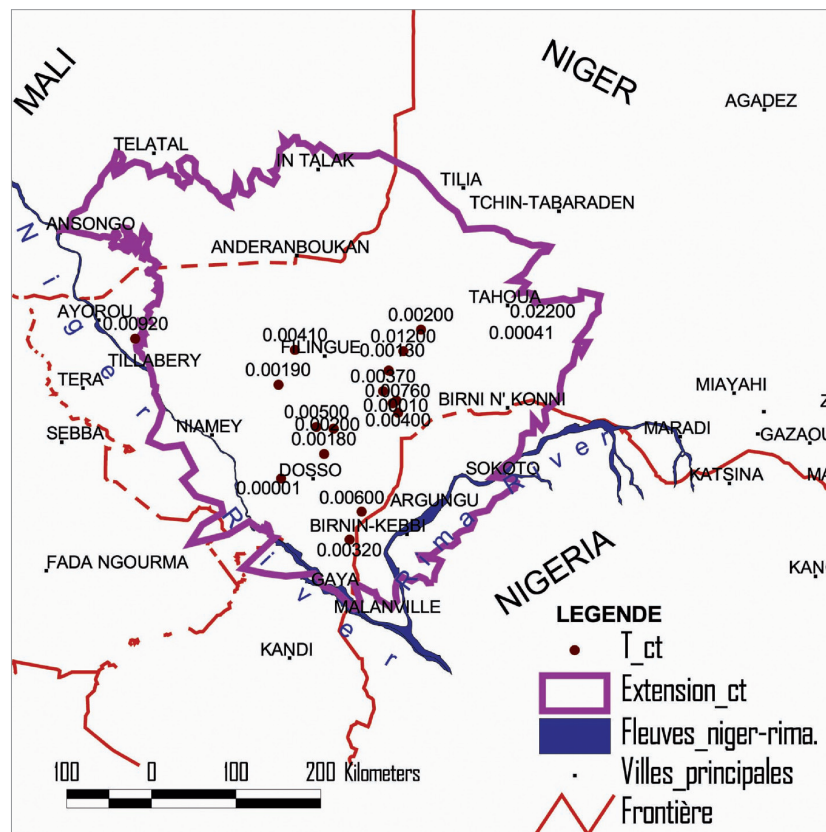


FIGURE 19 : Carte des transmissivités initiales du CT

Concernant les puits, les interprétations d'essais de pompages plus récents et de plus longue durée donnent des transmissivités calculées par la méthode de Theis/Jacob de l'ordre de 6.10^{-5} à $1.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour des perméabilités déduites de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m/s (Favreau, 2000). Considérant une épaisseur saturée variant de 10 à 90 m sur la zone de Kori - Dantiandou, les perméabilités peuvent être évaluées à partir des données disponibles entre 10^{-6} à 10^{-3} m/s (Massuel, 2005).

Ces différentes transmissivités, importées dans la Base de données ont servi de valeur initiales pour le calage du modèle (figures 19 et 20).

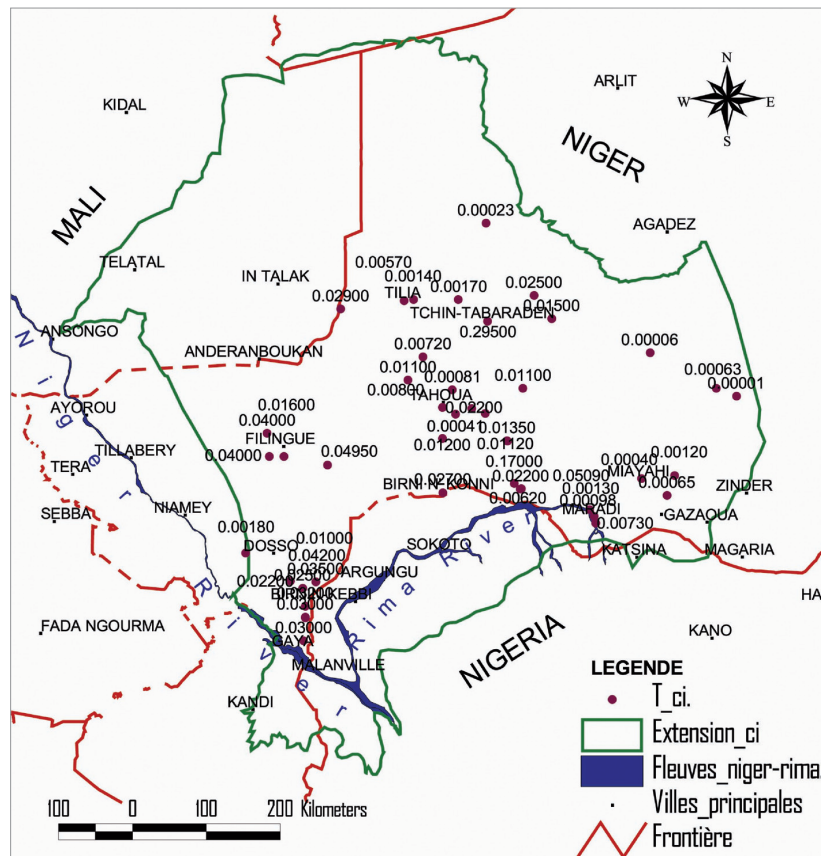


FIGURE 20 : Carte des transmissivités initiales du Ci

» Perméabilités verticales des aquitards :

La transmissivité verticale initiale considérée des aquitards du Cénomaniens - Eocène moyen est de $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

IV.5. Données sur les niveaux piézométriques

La charge hydraulique (niveau piézométrique) constitue la Variable d'état du système modélisé, que le modèle aura pour objet de reconstituer au mieux de ses performances. La bonne connaissance de cette grandeur, de sa distribution dans l'espace et de son évolution dans le temps est donc primordiale pour la réalisation du modèle et la qualité de son calage (OSS, 2003).

Les niveaux piézométriques (datées) les plus anciennes connues sont celles publiées par SAAD (1969) et FAO (1970). Plusieurs autres valeurs sont datées de la fin des années 1970 (GREIGERT, 1978) et des années 1980 (BRGM, 1988).

Pour la construction d'une carte piézométrique que nous sommes convenu d'appeler « Carte piézométrique 1970 », nous avons considéré toutes les valeurs d'avant 1970, mais aussi celles mesurées au début des années 1970, bien que la concordance précise avec cette date ne soit pas partout assurée.

Quant à l'évolution temporelle des hauteurs piézométriques, de 1970 à nos jours, elle est très mal connue. Ainsi, dans la Base de données du SAI, rares sont les points d'observation avec deux mesures piézométriques à des dates différentes.

IV.6. Données sur les prélèvements et leur évolution

IV.6.1. Au Mali

▶▶ MÉTHODE DE CALCUL DIRECTE

Elle se base sur le calcul des volumes prélevés par village et par an à partir des comptes cumulés de points d'eau captant le CT/Ci par village et par an (tableau 2).

Le débit de prélèvement appliqué par point d'eau est de 1m³/heure en raison de 8 heures de pompage par jour, soit 8 m³/jour.

Les valeurs de prélèvement calculées ont été pondérées au taux moyen de fonctionnalité des points d'eau (70 % en 2005) des cercles concernés.

Il n'a été tenu compte que des points d'eau captant le CT/Ci concerné.

Compte tenu de l'interdépendance des questions de disponibilité de pâturage et de pression du cheptel sur les ressources en eau souterraines, il a été tenu compte du temps de séjour (mois/an) du cheptel dans les zones de pâturage en rapport avec les années de grandes sécheresses comme indiqué sur l'historique (tableau 2).

	1955	1959	1961	1966	1968	1974	1978	1980	1985	1990	1995	2000	2004	2005
PEM existants														
PEM_CT	0	3	3	7	9	9	10	11	29	84	99	185	196	196
PEM_Ci	1	3	6	7	7	8	9	9	19	38	55	113	133	139
BF_AEP												24	31	53
Tot_PEM_inv*	22	27	30	35	37	38	40	41	69	143	175	343	381	409
PEM requis														
Pop_sed_pem	53	57	60	66	69	78	85	89	98	109	121	135	147	150
Pop_nomad_pem	42	44	45	48	49	53	55	57	60	64	68	72	76	76
Chep_pem	1298	1350	1377	1448	1477	1097	1142	1165	1041	1094	1150	1208	1257	1270
Tot_PEM_requis	1393	1452	1483	1562	1595	1228	1282	1310	1199	1267	1339	1415	1480	1496
Taux_prelev (%)	2	2	2	2	2	3	3	3	6	11	13	24	26	27
Taux_fonct_PEM (%)	98	98	98	98	95	95	95	90	85	85	80	70	70	70
Temps_sej_chep (mois/an)	7	7	7	7	7	3	4	5	5	5	6	6	6	6

* Il y a 21 forages équipés sans date de création qui ont été intégrés au cumul total ici

TABLEAU 2 : Taux de couverture potentiel des besoins par PEM existant

- /// les points d'eau modernes (PEM) requis pour satisfaire les besoins ont été calculés suivant les normes :
 - 1 PEM pour 400 hbts sédentaires soit 20l/hbt/j ;
 - 1 PEM pour 533 hbts nomades soit 15l/hbt/j ;
 - 1 PEM pour 200 ubt soit 40l/UBT/j ;
- /// Le rapport : (nombre de points d'eau existants)/(nombre de points d'eau requis pour satisfaire les besoins) est un seuil de prélèvement potentiel sur la base des normes sus-citées (figure 21) ;

- /// les besoins des populations sédentaires, nomades et du cheptel calculés ont été pondérés au seuil de prélèvement potentiel et au temps de séjour du cheptel dans les sites pastoraux ;
- /// les prélèvements par CT/Ci calculés ont été pondérés au taux de fonctionnalité des PEM et au temps de séjour du cheptel dans les sites pastoraux.

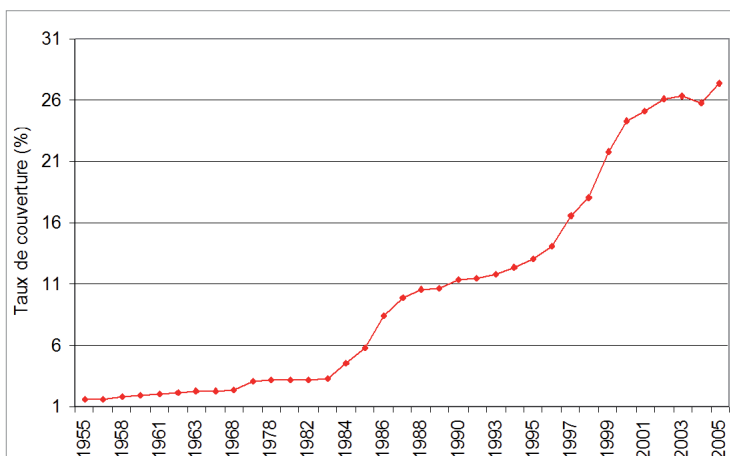


FIGURE 21 : Taux de couverture potentiel des besoins par PEM existant

▶▶ MÉTHODE DE CALCUL INDIRECTE

Calcul de la population sédentaire par village et par an

Les valeurs ont été extrapolées à partir des données du recensement général de 1998. Les taux de croissance annuelle appliqués sont de :

- 2,4 % pour les villages de 2 000 habitants et plus
- 1,2 % pour les villages de moins de 2 000 habitants

Calcul de la population nomade par commune et par an

Les valeurs ont été extrapolées à partir des données du recensement général de 1998. Le taux de croissance annuelle appliqué est de **1,2 %**.

Calcul du cheptel par commune et par an

Les données brutes disponibles sur le cheptel sont ceux issus du recensement général de 1998. A défaut d'avoir de données réelles pour les autres années, un taux de croissance annuelle de 1 % a été appliqué pour calculer les autres valeurs par extrapolation. Aussi, des taux de diminution brusque du cheptel de l'ordre de 30 % et 15 % ont été observés respectivement pour les années 1974 et 1984 pour refléter l'impact des grandes sécheresses de ces années sur le cheptel.

Calcul des besoins de la population sédentaire par village et par an

La norme de consommation appliquée est de 20 litres/personne/jour. Il y est indiqué pour 2005, les nombres cumulés de points d'eau par aquifère (CT/Ci) et par village.

Calcul des besoins de la population nomade par commune et par an

La norme de consommation appliquée est de 15 litres/personne/jour. Il y est indiqué les proportions de sites pastoraux équipés de points d'eau captant le CT/Ci.

Calcul des besoins du cheptel par commune et par an

La norme de consommation appliquée est de 40 litres/UBT/jour. Il y est indiqué les proportions de sites pastoraux équipés de points d'eau captant le CT/Ci. Les valeurs calculées sont pondérées au :

- coefficient de représentativité des points d'eau captant le Ci par rapport au nombre total de point d'eau par village ;
- taux moyen de couverture effective des besoins en eau des populations sédentaires des cercles concernés (tableau 3).

Compte tenu de l'interdépendance des questions de disponibilité de pâturage et de pression du cheptel sur les ressources en eau souterraines, Il a été tenu compte du temps de séjour (mois/an) du cheptel dans les zones de pâturage en rapport avec les années de grandes sécheresses comme indiqué sur le tableau 3.

Année		1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
METHODE DIRECTE												
CT	Prelev_pem	0	5008	12877	15719	8322	13578	31439	91214	119136	195202	207466
	Prod_AEP										54355	127550
Ci	Prelev_pem	2862	6200	14785	15951	15951	19053	42815	81286	116800	183960	221774
	Prod_AEP										16180	26744
TOTAL CT+Ci		2862	11208	27662	31670	24273	32631	74253	172499	235936	449697	583534
METHODE INDIRECTE												
CT	Besoin_pop_sed	2225	2915	3920	4499	6653	7470	15291	33411	43117	89175	112075
	Besoin_pop_nomad	1824	2279	2922	3204	4535	4869	9504	19790	24326	47899	57284
	Besoin_pop_cheptel	32819	40606	51547	55954	23529	41692	68485	141203	206235	402083	476139
Tot CT		36868	45801	58389	63656	34717	54032	93279	194404	273679	539157	645498
Ci	Besoin_pop_sed	180	230	300	333	472	508	1004	2120	2642	5279	6411
	Besoin_pop_nomad	116	145	187	204	289	311	607	1263	1553	3057	3656
	Besoin_pop_cheptel	2095	2592	3290	3572	1502	2661	4371	9013	13164	25665	30392
Tot Ci		2391	2967	3777	4109	2263	3480	5982	12396	17359	34002	40459
TOTAL CT+Ci		39259	48768	62166	67764	36980	57512	99262	206799	291038	573159	685958
SED		2405	3144	4220	4831	7125	7978	16295	35530	45760	94455	118486
NOMAD		1941	2425	3109	3408	4824	5180	10110	21053	25879	50956	60941
CHEP		34914	43198	54837	59525	25031	44354	72856	150216	219399	427748	506530

TABEAU 3 : Calcul des prélèvements (m³/an)

Calcul des besoins de la population sédentaire desservie à partir des points d'eau captant le CT ou le Ci par village et par an

La norme de consommation appliquée est de 20 litres/personne/jour. Il n'a été tenu compte que des populations des villages qui comptent au moins 1 point d'eau captant le CT ou le Ci. Les prélèvements annuels sont portés sur la figure 22.

Les valeurs calculées sont pondérées au :

- coefficient de représentativité des points d'eau captant le CT ou le Ci par rapport au nombre total de point d'eau par village ;
- taux moyen de couverture effective des besoins en eau des populations sédentaires des cercles concernés (tableau 2).

La courbe de prélèvement sur la base des consommations d'eau reflète la part des besoins susceptible d'avoir été couverte à partir des points d'eau souterraine compte tenu du potentiel de production des points d'eau existants en rapport avec les besoins du moment et du temps de séjour du cheptel sur les sites pastoraux.

La courbe de prélèvement sur base des puisages par point d'eau souterraine reflète la part du

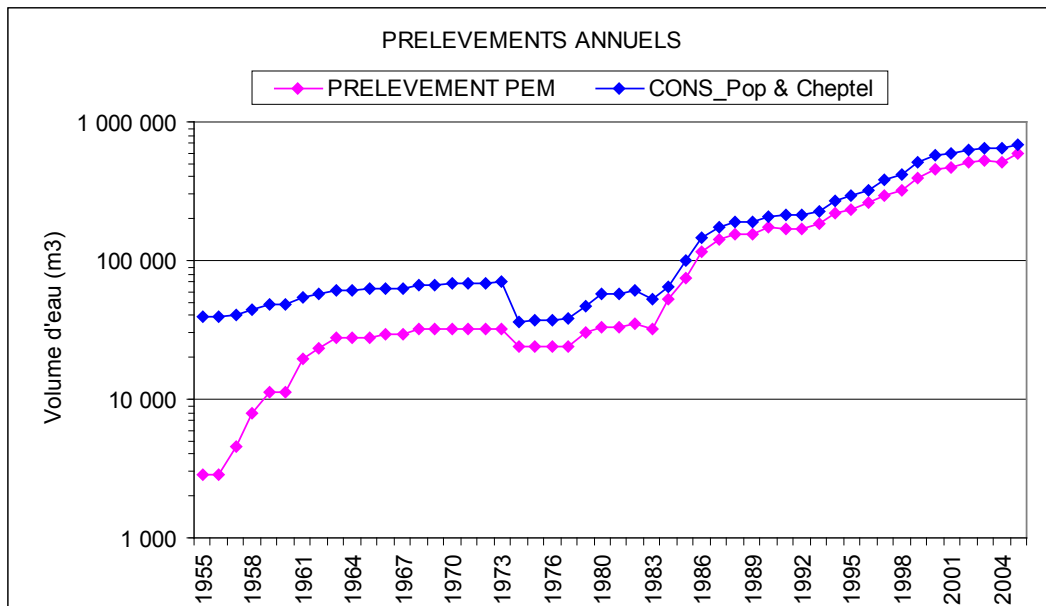


FIGURE 22 : Prélèvements annuels

potentiel de production des points d'eau susceptible d'avoir été prélevée compte tenu de la fonctionnalité des points d'eau et du temps de séjour du cheptel sur les sites pastoraux.

La tendance générale à la hausse des prélèvements à partir de 1984 reflète l'accélération du rythme de création des points d'eau modernes (figure 23).

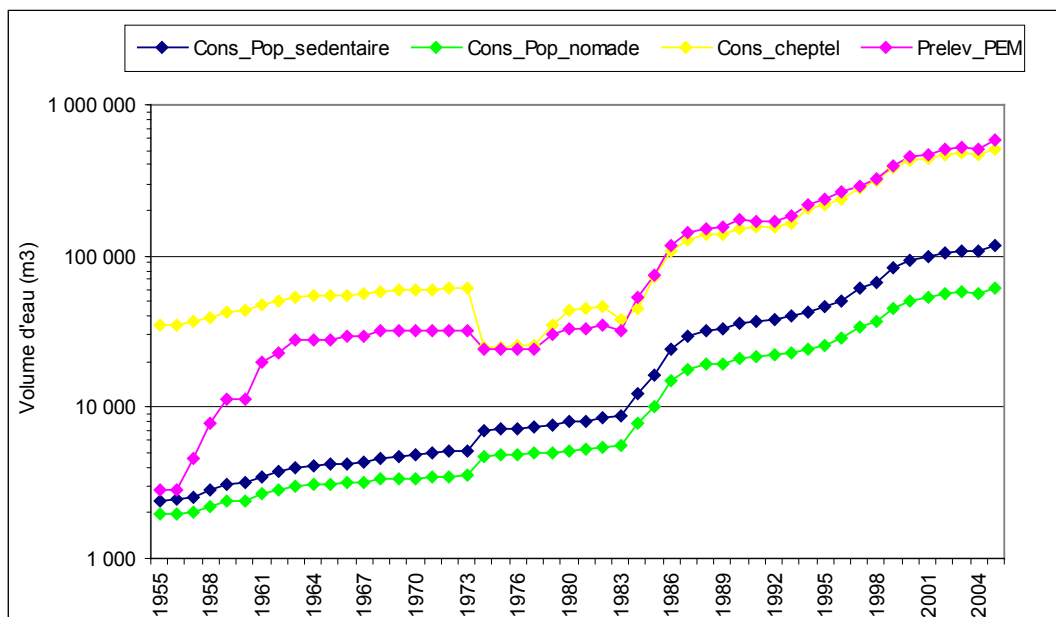


FIGURE 23 : Tendence générale à la hausse des prélèvements

Le prélèvement total à partir des points d'eau semble être contrôlé par les consommations du cheptel. Les tendances brusques à la diminution observée en 1974 et 1983-1984 sur les courbes de consommation du cheptel et prélèvement par PEM reflètent la décimation du cheptel et la réduction du temps de pâturage ces dernières années en rapport avec les déficits pluviométriques.

Les prélèvements sur la base des consommations des différents usages évoluent, plus ou moins, constamment à la hausse en fonction de la croissance démographique et de l'augmentation du nombre des points d'eau.

IV.6.2. Au Niger

Il n'existe pas d'historique de prélèvements exhaustif au Niger. Seuls quelques points d'eau ont fait l'objet d'un suivi pendant 5 ans (2001-2005) par la Société Nationale d'Exploitation des Eau du Niger (SEEN).

▶▶ DÉTERMINATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU À PARTIR DES POINTS D'EAU MODERNES DE L'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE

Il s'agit des puits cimentés et forages avec contre-puits et forages équipés de pompes à motricité humaine. En zone rurale au Niger, la plupart des forages d'eau sont équipés des pompes à motricité Humaine avec un débit de pompage d'environ 1 m³/h et exploités pendant environ 8 heures par jour.

Considérant que la majorité des ouvrages hydrauliques de la base de données sont constitués de forages et sur la base du débit d'exploitation de 1 m³/h pendant 8 heures, le prélèvement d'eau au niveau de chaque point d'eau en zone peut être estimé à 8 m³/ jour. L'évolution des besoins en Point d'Eau Modernes en milieu rural au Niger est portée sur le tableau 4.

Régions	Besoins totaux en PEM 100%			PEM existants 2000	Taux de couverture 2000 (%)	PEM à réaliser pour avoir	
	2000	2004	2010			70 % en 2004	100 % en 2010
Agadez	820	993	1323	418	51	277	628
Diffa	714	746	796	700	98	0	96
Dosso	5781	6659	8233	3212	58	1449	3572
Maradi	7437	8567	10592	3540	48	2457	4595
Tahoua	7335	8483	10549	2923	40	3015	4611
Tilabéri	6935	7685	8964	3969	57	1410	3585
Zinder	7183	8147	9842	4606	64	1097	4139
Niger	36166	41181	50038	19468	53	9459	21211

TABLEAU 4 : Évolution des besoins en Point d'Eau Modernes en milieu rural au Niger

▶▶ DÉTERMINATION DES PRÉLÈVEMENTS D'EAU À PARTIR DES POINTS D'EAU MODERNES DE L'HYDRAULIQUE URBAINE

Il s'agit des forages exploités par la Société Nationale d'exploitation des eaux du Niger (SEEN). Les forages de production exploités par la SEEN pour la distribution d'eau dans les centres urbains et semi urbains sont équipés de compteurs d'eau qui donnent la quantité d'eau pompée pendant un temps de pompage (fonctionnement) donné.

Ainsi le prélèvement journalier de chaque ouvrage est calculé comme étant le produit du débit horaire par le temps de pompage. Étant donné que les relevés sont mensuels, le cumul annuel est déterminé par la sommation des 12 productions d'eau par an pour chaque champ de captage. Des corrections ont été apportées pour les exploitations sollicitant plusieurs systèmes aquifères.

Les différentes productions annuelles corrigées pour les différents centres gérés par la SEEN sont consignées dans le tableau 5 ci-après. La figure 24 porte les productions totales annuelles de tous les centres (Ci & CT). *Notons cependant la faiblesse de la production d'eau en l'an 2002 qui résulte incontestablement d'une erreur de saisie. Cette valeur de 2002 sera revue et corrigée en accord avec la direction de la SEEN.*

N°	Centre	Forage	N° IRH	Prof. (m)	2001	2002	2003	2004	2005	Aquifère
					Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé	
1	Maradi	F1		160	16 496	0	67 683	143 821	116 648	Ci
2		F4		155	46 796	14 805	178 209	220 031	226 940	Ci
3		F5			122 513	13 335	175 240	183 832	141 307	Ci
4		F6			93 580	22 015	249 911	238 957	257 691	Ci
5		F7		160.25	0		117 384	155 346	213 066	Ci
6		F8		159.9	34 648	36 859	310 432	411 698	362 121	Ci
7		F9		159.65	142 630	21 132	239 544	335 568	333 366	Ci
8		F10		196.4	36 366		32 955	65 249	0	Ci
9		F11		192	128 310	43 423	427 488	360 408	469 133	Ci
10		F12		201.5	173 020	33 226	351 300	515 720	634 619	Ci
11		F13		190	186 314	32 448	380 580	496 489	463 220	Ci
12		F14		191.02	0		0	0	3 514	Ci
13	Tahoua	F1	14101	700						Ci
14		F2			203 298	39 220	380 530	329 114	154 987	Ci
15		F3	18769	686.2	159 561	31 184	339 826	364 289	374 358	Ci
16		F4	24885	688	141 864	31 063	382 249	191 296	70 782	Ci
17		F5	80003	690	75 003	14 768	146 019	162 853	167 675	Ci
18		F6		700	0		0	443 450	622 983	Ci
19		F7		701	0		0	37 471	157 715	Ci
20	Dosso	F2	16721	133.4	0		0	0	0	CT
21		F4	15713	126	0		0	23 001	152 692	CT
22		F5	16895	128	58 244	9 390	47 012	0	19 423	CT
23		F6		132	107 802	17 682	188 123	240 888	242 475	CT
24		F7		135	103 833	16 725	180 192	108 302	55 417	CT
25		F8		132	107 517	18 134	197 459	198 705	227 530	CT
26		F9		129.5	0		47 031	65 145	62 685	CT
27		C1				24 391	13 795	222 968	307 956	261 890
28	C2				93 972	12 476	145 398	220 046	267 827	Ci
70		A01		158.39	0		0	0	25 516	Ci
71		A02		142.9	0		0	0	32 650	Ci
72		A03		153.18	0		0	0	24 079	Ci
73		A04		134.1	0		0	0	50 777	Ci
74		A05		123.65	0		0	0	0	Ci
75		A06		113.9	0		0	0	33 461	Ci
76		A07		158.9	0		0	0	34 129	Ci
77		A08		127.24	0		0	0	42 146	Ci
78		A09		150.7	0		0	0	30 206	Ci
79		A10		136	0		0	0	23 460	Ci
80		18783		168.1	0		0	0	36 205	Ci
81		Secours 1			0		0	0	31 490	Ci
82	Filingué		13851	529	36 292	13 928	162 847	196 187	177 508	Ci
89	Konni	F2	80.64	600		57 765	673 811			Ci
90		F3			290 128	57 765	0	761 329	623 351	Ci
91		F4		569	0			0	123 095	Ci
92	Madaoua	F1	6903	227.88	8 042	98	71 802	0	0	Ci
93		F2	13740	259						Ci
94		F3bis				109 943	21 065	178 207	323 562	323 562

N°	Centre	Forage	N° IRH	Prof. (m)	2001	2002	2003	2004	2005	Aquifère	
					Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé	Volume prélevé		
95	Tessaoua	F1		140.4	56 638	14 525	169 126	196 063	152 293	Ci	
96		F2	14655	152.02	72 656	12 229	150 609	178 425	235 096	Ci	
97		F3		154.47						Ci	
98	Doutchi	F1	6882	366	83 665	21 164	221 166	199 828	199 828	CT	
99		F2	24183	339.51	30 442	6 725	89 165	55 006	55 006	CT	
100		F3	321768	163.09	0		0	100 234	100 234	CT	
106	Ouallam	F1	14013	72.95	42 288	8 338	95 664	104 210	115 162	CT	
112	Tanout	F1	4367	404.5	19 520	3 532	26 710	32 608	17 617	Ci	
113		F2	14547	505	16 735	9 221	22 656	0	0	Ci	
114		F3	27016	931	29 023		87 715	129 996	111 608	Ci	
115		F4			0		0	0	9 631	Ci	
121	Bouza	F1	8460	374	33 035	8 038	99 003	108 707	115 251	Ci	
122	Keita	F2 Italy	25799	480	31 120	7 652	91 271	103 643	103 278	Ci	
123	Gazaoua	F1	19824		81 914	75 283	87 740	84 964		Ci	
133	Aguié	F1	19823	173	39 904	8 582	103 943	125 205	133 163	Ci	
134	Illéla	F1	8687	603	67 898	67 198	75 518	75 503		Ci	
135	Madarounfa	F1	16917	57.7	67 159	67 817	70 026	70 254		Ci	
136	Loga	F1	18770	132	22 528		47 963	67 225	64 082	CT	
137	Matankari	F1	8753	200.7	38 666	8 698	89 368	95 323	96 254	CT	
138	Abalak	Puits 1		84	46 942	8 022	100 370	109 881	100 632	Ci	
139		Puits 2			29 552	6 485	81 449	118 489	119 188	Ci	
140	Tamaské	F1	16722	520	44 617	9 636	121 893	138 848	133 418	Ci	
141	Tchinta	F1	24536	251	70 228	11 343	69 308	142 157	103 342	Ci	
143		F2			45 844		134 013	86 536	42 765	Ci	
144		F3			0		0	57 853	107 146	Ci	
145	Dakoro	F1	15944	384	50 395	10 363	141 522	95 135	132 846	Ci	
146		F2			20 546		57 582	79 983	74 101	Ci	
147	G.Roumji	F1	19822	270	35 983	7 975	97 006	132 168	100 074	Ci	
148		F2		104.1	0		0	0	15 860	Ci	
161	Dioundiou	F1	8901	187.1	12 718	3 180	31 609	35 489	40 479	Ci	
162	Birni Gaouré	F1		59			4 855	47 769	31 321	Ci	
163		F2		60			3 384	39 433	31 069	Ci	
167	Bagaroua	F1	8751	106.5	19 127	4 167	48 202	37 799	36 064	Ci	
168		F2		131.58						Ci	
169	Dogueraoua	F1	19813	432	25 283	5 319	60 603	71 854	74 001	Ci	
170	Ibohamane	F1		400	16 064	3 304	47 683	58 626	47 958	Ci	
171	Takanamat	F1		799		1 482	28 127	29 772	25 960	Ci	
172	Gazaoua	F								Ci	
173	Illéla	F								Ci	
174	Madarounfa	F								Ci	
175	Tassara	F1		147	6 835	3 719	49 230	54 805	67 082	Ci	
176	Tillia	F1		760	5 586	6 494	63 677	84 981	102 729	Ci	
Volume total annuel						3 663 474	972 792	8 562 356	10 249 485	10 566 237	

TABLEAU 5 : Productions annuelles corrigées pour les différents centres gérés par la SEEN

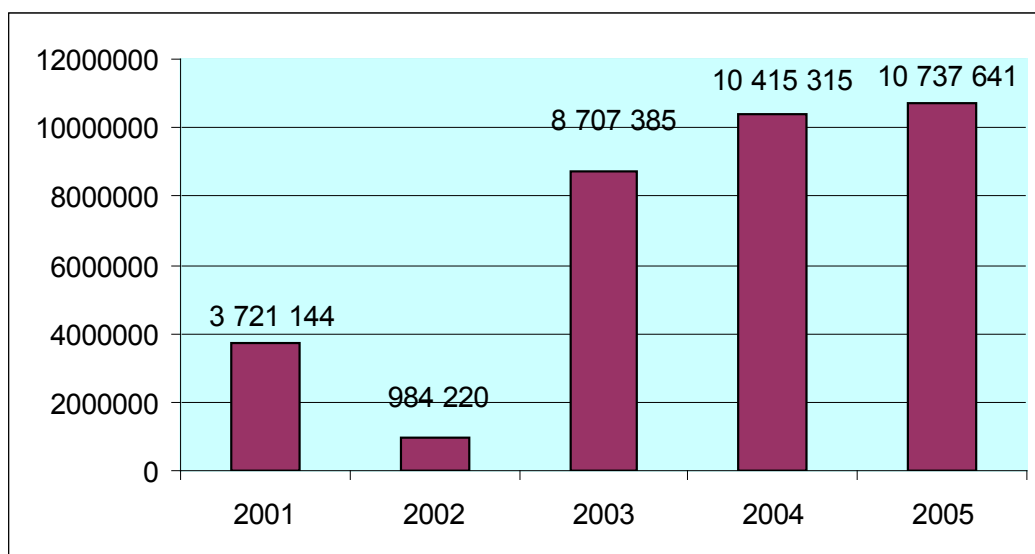


FIGURE 24 : Productions totales annuelles de tous les centres (Ci & CT)

►► DÉTERMINATION DES BESOINS EN EAU

Les besoins journaliers en eau "B" sont définis en appliquant les hypothèses ci-après :

Consommation spécifique égale à 15 l/hbt/j (séminaire de Kollo) ;

Pertes de 5 % au niveau des réseaux d'adduction et de distribution ;

Taux d'accroissement annuel de la consommation nul, pour éviter le surdimensionnement des ouvrages ;

Consommation animale de 40 l/UBT/j.

Ainsi : $B = 1,05 [P_{2003} \times Cs + CH_{2003} \times Ca]$

Avec:

B : Besoins journaliers en m³/j ;

P₂₀₀₃ : population actualisée à la fin 2003 ;

Cs : Consommation spécifique en l/hbt/j ;

CH₂₀₀₃ : cheptel pris en compte à la fin 2003* ;

Ca : Consommation animale en l/UBT/j.

* Le cheptel n'est pris en compte que dans la mesure où les ressources en eau disponibles sont suffisantes, et où la volonté de payer est affirmée.

Source : CIMA International 2003 : Étude d'un programme d'Hydraulique rurale au Niger

Ces besoins en eau en 1997 de la zone pastorale (sens strict) du Niger seraient les suivants (Tableau 6) :

Département	Arrondissement	Milliers d'UBT	Besoins en eau (m ³ /j)
Tahoua	Tchintabaraden	251	7530
Agadez	Tchirozérine	134	4020
Diffa	Diffa	243	7290
	Mainé Soroa	162	4860
	N'guigmi	125	3750
Maradi	Dakoro	62	1860
Zinder	Gouré	192	5760
	Tanout	116	3480
Tillabéri	Filingué	97	2910
	Ouallam	66	1980
	Tillabéri	52	1560
TOTAL		1500	45000

TABLEAU 6 : Besoins en eau Maxima journaliers en 1997 du bétail de la zone pastorale du Niger

IV.6.3. Au Nigeria

Nous ne disposons pas d'historique de mesure des prélèvements. Nous étions amenés à les estimer à partir du recensement en 2004 des populations des principales localités situées dans le bassin [Kebbi, Sokoto, Zamfara (Etat de Sokoto) et Katsina] (tableau 7).

Les estimations des populations urbaines et rurales (dans le bassin d'lullemeden) des quatre états ci-dessus sont obtenues (tableau 8) en considérant les hypothèses suivantes :

- /// Etat de Sokoto : 100 % de la population totale réside dans le bassin : 20 % est urbaine et 80 % est rurale ;
- /// Etat de Kebbi : 70 % de la population totale vit dans le bassin d'lullemeden, 20 % en zones urbaines et 80 % en zones rurales ;
- /// Etat de Zamfara : 20 % de la population vit dans le bassin, 20 % est urbaine et 80 % rurale ;
- /// Etat de Katsina : 10 % de la population vit dans le bassin d'lullemeden, 20 % en zones urbaines et 80 % en zones rurales.

S/N°	Etat	Population totale
1.	Katsina	5,479,413
2.	Kebbi	3,019,971
3.	Sokoto	3,499,538
4.	Zamfara (Sokoto)	3,026,68
Total		15,025,602

TABLEAU 7 : Population totale des états du Nigeria dans le bassin

S/N°	Etat	Population urbaine	Population rurale	Total
1.	Kebbi	602 194	2 416 977	3 019 171
2.	Sokoto	599 908	2 799 630	3 399 538
3.	Zamfara (Sokoto)	605 535	726 345	1 331 880
4.	Katsina	109 588	438 363	547 951

TABLEAU 8 : Population urbaine et rurale dans le bassin

Quant au cheptel, les estimations de la population totale dans les états sont portées sur le tableau 9 ci-dessous :

S/N°	Etat	Population totale du cheptel
1.	Sokoto	6 311 184
2.	Kebbi	5 716 500
3.	Katsina	3 621 800
4.	Zamafara (Sokoto)	5 716 000
Total		21 365 484

TABLEAU 9 : population totale du cheptel dans les Etats

Les estimations des populations du cheptel dans le bassin sont obtenues (tableau 10) en considérant les hypothèses suivantes :

- /// La population totale du cheptel de l'Etat de Sokoto vit dans le bassin d'lullemeden ;
- /// 70 % de la population totale du cheptel de l'Etat de Kebbi vit dans le bassin d'lullemeden ;
- /// 1 % de la population totale du cheptel de l'Etat de Katsina vit dans le bassin ; 20 % de la population totale de l'Etat de Zamfara vit dans le bassin ;
- /// 20 % de la population totale de l'Etat de Zamfara vit dans le bassin.

Les types de bétail considérés sont les suivants : moutons, chèvre, chameau et âne.

S/N°	Etat	Population totale du cheptel dans le bassin d'Iullemeden
1.	Sokoto	6 311 184
2.	Kebbi	4 001 550
3.	Katsina	36 218
4.	Zamafara (Sokoto)	1 143 200
Total		11 818 114

TABLEAU 10 : Population du cheptel dans le bassin d'Iullemeden

Pour le calcul des prélèvements, la norme de consommation appliquée est de 20 litres/personne/jour pour la population urbaine, 15 litres/personne/jour pour la population rurale et 20 litres/UBT/jour pour le cheptel (tableau 11).

Etat	Population urbaine	Population rurale	Cheptel	Exploitation (Urbaine) (l/jour)	Exploitation (Rurale) (l/jour)	Exploitation (Elevage) (l/jour)	Exploitation (Urbaine) (m ³ /an)	Exploitation (Rurale) (m ³ /an)	Exploitation (Elevage) (m ³ /an)
Kebbi	602194	2 416 977	4 001 550	12 043 880	36 254 655	80 031 000	4 396 016	13 232 949	29 211 315
Sokoto	599908	2 799 630	6 311 184	11 998 160	41 994 450	126 223680	4 379 328	15 327 974	46 071 643
Zamfara (Sokoto)	605 535	726 345	1 143 200	12 110 700	10 895 175	22 864 000	4 420 406	3 976 739	8 345 360
Katsina	109588	438 363	36 218	2 191 760	6 575 445	724 360	799 992	2 400 037	264 391
Total	1 917 225	6 381 315	11 492152	38 344 500	95 719 725	229 843040	13 995 743	34 937 700	83 892 710

TABLEAU 11 : Prélèvements estimés au Nigeria

IV.7. Conclusion

Il se dégage dans les trois pays un manque d'historique des mesures des débits ou des volumes exploités pour des usages spécifiques (Alimentation en Eau Potable (AEP), irrigation, cheptel, industrie). Cette lacune principale dans le suivi des aquifères du SAI rend le calage du modèle relativement fastidieux, du fait qu'on est amené à utiliser des méthodes de recoupement pour évaluer cette exploitation.

C'est donc un recoupement basé sur l'**effectif** (population ou animaux) et la «**demande**» sectorielle (besoins en eau/hab/j, besoins en eau/TB, besoins en eau/ha irrigué, etc.), ou l'**effectif** et la «**production** en eau» (production journalière des centres communaux) que cette exploitation est approchée d'une manière très sommaire. D'autres hypothèses sont prises en considérations dans cette évaluation chaque fois que des éléments d'appréciation sont disponibles en vue de présenter des estimations de l'exploitation par aquifère et par pays qui soient les plus plausibles.

V. CALAGE DU MODELE EN REGIME PERMANENT

V.1. Définition d'un état de référence

L'analyse des données collectées à partir de contributions diverses : Données envoyés par les pays, Bases de données Nationales, bibliographie (Boeckh, 1965, Saad, 1969 ; FAO, 1970 ; Greigert, 1978 ; Margat, 1982 ; BRGM, 1988 ; JICA, 1990 ; Bonnier et al., 1992 ; Dodo, 1992 ; Favreau, 2000 ; BCEOM-CE, 2000 ; Guero, 2003) ont permis de fixer le choix de l'année **1970** comme état de référence piézométrique ou « **Etat initial** » caractérisant l'état d'équilibre du système aquifère non perturbé par les prélèvements.

En fait, cette année peut être considérée comme étant la fin d'une période et le début d'une autre, vu qu'elle a coïncidé avec la généralisation de la sécheresse dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest faisant ainsi réduire les eaux de surface et poussant les populations à se rabattre sur les eaux des aquifères souterrains. Cette date est ainsi celle de la mise en place des principaux projets d'hydraulique villageoise dans la région.

Sur la base des travaux antérieurs et des données nouvellement acquises, les cartes piézométriques de l'état initial (1970) de chacune des deux couches Ci et CT ont été établies (figures 25 et 26).

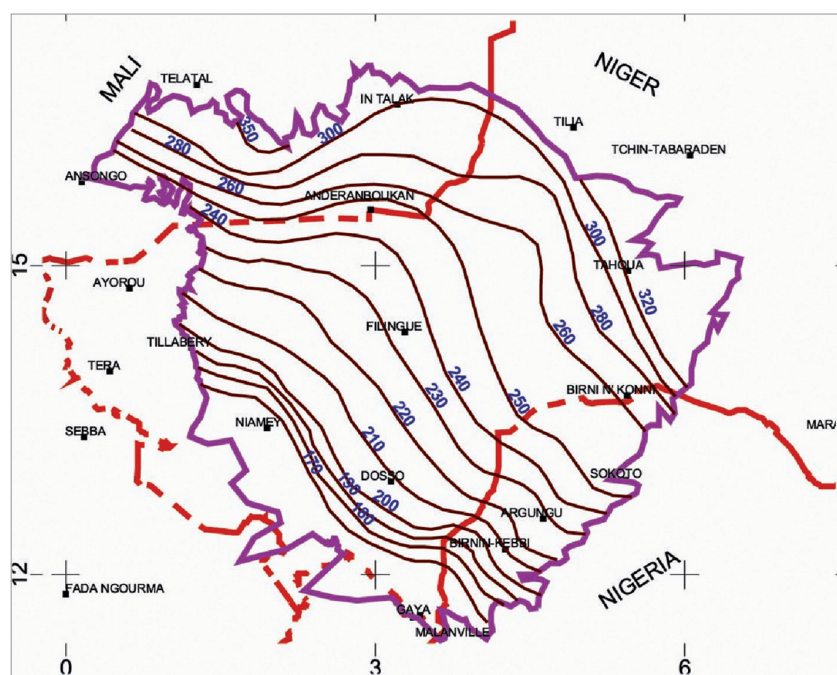


FIGURE 25 : Carte piézométrique du CT (Etat initial 1970)

L'examen de la carte piézométrique du CT (figure 25) met en évidence les principaux axes de drainage des nappes orientés NW-SE et NE-SW. Le module d'espacement des isopièzes décroît du NE vers le SE. Les zones d'alimentation des nappes du CT se localisent dans :

- /// la périphérie Nord-Est,
- /// la périphérie Nord-Ouest,
- /// certaines localités de la rivière Rima.

Les zones exutoires sont principalement le fleuve Niger et la rivière Rima.

L'examen de la carte piézométrique du Ci [figure 26] montre que les principales zones d'alimentation des nappes du Ci sont :

- /// les massifs du Hoggar au nord,
- /// la rivière Rima.

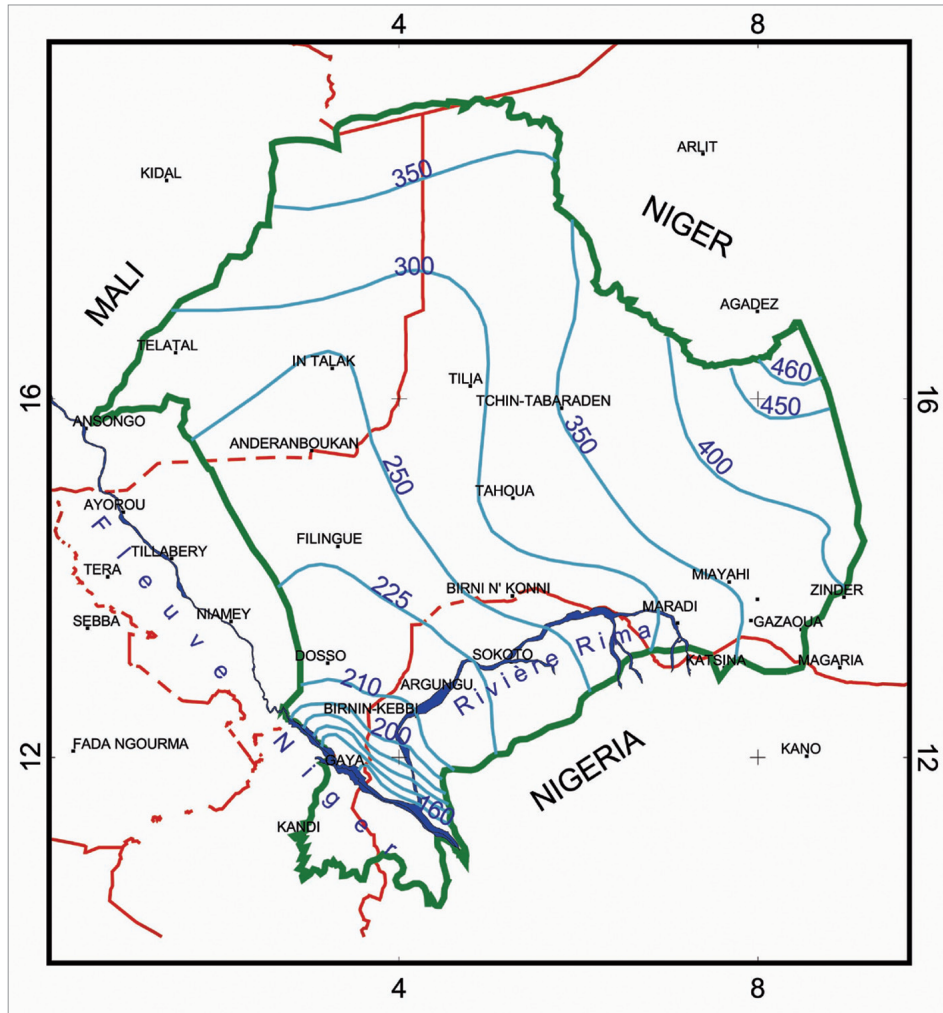


FIGURE 26 : Carte piézométrique du Ci (Etat initial 1970)

L'exutoire naturel principal de la nappe du Ci est constitué par le fleuve Niger qui est drainant et vers lequel les eaux convergent. Certaines mailles de la rivière Rima servent aussi de drains du Ci

V.2. Définition des critères de référence pour le calage en permanent

Les critères du calage préalablement définis consistent à reconstituer aussi fidèlement que possible :

- /// les cartes piézométriques de référence du Ci et du CT, correspondant à un régime d'équilibre daté d'environ 1970 ;
- /// les valeurs piézométriques ponctuelles observées ou estimées récoltées dans la bibliographie ;
- /// le débit des exutoires [le fleuve Niger et la rivière Rima] jaugé à cette date.

V.3. Les étapes du calage

Les principales étapes du calage et les modifications des paramètres de calage par rapport aux valeurs initiales adoptées peuvent être décrites comme suit :

- /// la condition de rivière initialement imposée sur la rivière Rima a été remplacée par une condition de potentiel imposée ;
- /// sur la bordure est de l'aquifère du Ci, correspondant à la ligne de partage des eaux entre le bassin d'Illemeden et celui du lac Tchad, la condition de charge imposée a été remplacée par une condition de flux nul ;
- /// les transmissivités horizontales ont été augmentées le long des dallols, notamment dans la nappe du Ci, identifiant ainsi un couloir d'écoulement ;
- /// la carte piézométrique de référence de la nappe du CT montre un faible gradient hydraulique au sud-ouest et au nord-est. La transmissivité horizontale a été augmentée dans ce secteur ;
- /// une recharge comprise entre 0,1 à 0,6 mm/an a été imposée dans les parties où les aquifères (CT ou Ci) sont phréatiques ;
- /// la transmissivité verticale du Crétacé supérieur, initialement égale à 10^{-12} m²/s, a été légèrement diminuée au centre et à l'est du bassin (10^{-15} m²/s), fortement diminuée au niveau du détroit de Gao, à l'ouest (10^{-18} m²/s) et très légèrement augmentée à l'ouest du bassin (10^{-11} m²/s) ;
- /// la valeur de la recharge calculée dans le bilan en eau du système (4,8 m³/s) nous a paru faible dans un premier temps. Par conséquent, nous avons procédé à quelques tentatives pour l'augmenter. Mais les résultats se sont révélés incompatibles avec la piézométrie observée et les valeurs des transmissivités mesurées. C'est ainsi qu'il a été conclu que cette recharge calculée par le modèle est la quantité maximale compatible avec la piézométrie observée et les transmissivités mesurées. D'autant plus que cette valeur de la recharge est comparable avec l'infiltration estimée à partir des eaux de pluies (Dodo, 1992).

V.4. Evaluation du calage en régime permanent

V.4.1. Reconstitution des cartes piézométriques d'ensemble du Ci et du CT

L'évaluation de l'aptitude du modèle à reproduire assez fidèlement la piézométrie de référence, se fait en comparant la piézométrie observée à celle calculée par le modèle. La superposition des courbes isopiézométriques observées et calculées permet de mesurer la capacité du modèle à reproduire l'allure des courbes dessinées par l'hydrogéologue.

V.4.2. Reconstitution des hauteurs piézométriques aux points de contrôle

▶▶▶ RÉPARTITION SPATIALE DES POINTS DE CONTRÔLE :

Les points de contrôle de la piézométrie sont assez bien répartis dans le domaine de la nappe du Ci au centre du bassin. A l'est et au Nord, on observe des lacunes dues soit à une absence de mesure ou au non disponibilité des données d'observation (figure 27). Pour la nappe du CT (figure 28), les points d'observations piézométriques se trouvent essentiellement aux zones d'exploitation (Dallols, fleuve Niger, rivière Rima).

▶▶▶ DISPERSION TEMPORELLE DES MESURES :

Dans le SAI, les premières mesures piézométriques datent du début des années 1950 et s'étalent sur toute la période 1950-1970, alors que le modèle est censé reconstituer un état observé

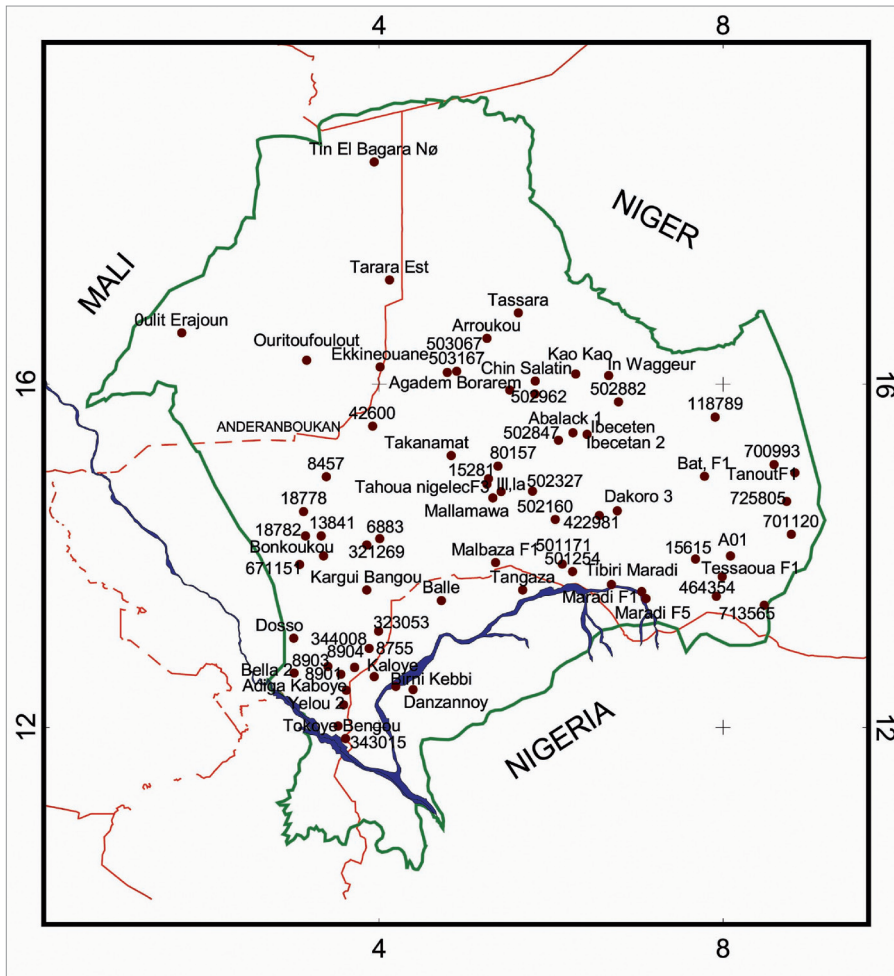


FIGURE 27 : Points de contrôle piézométrique du Ci

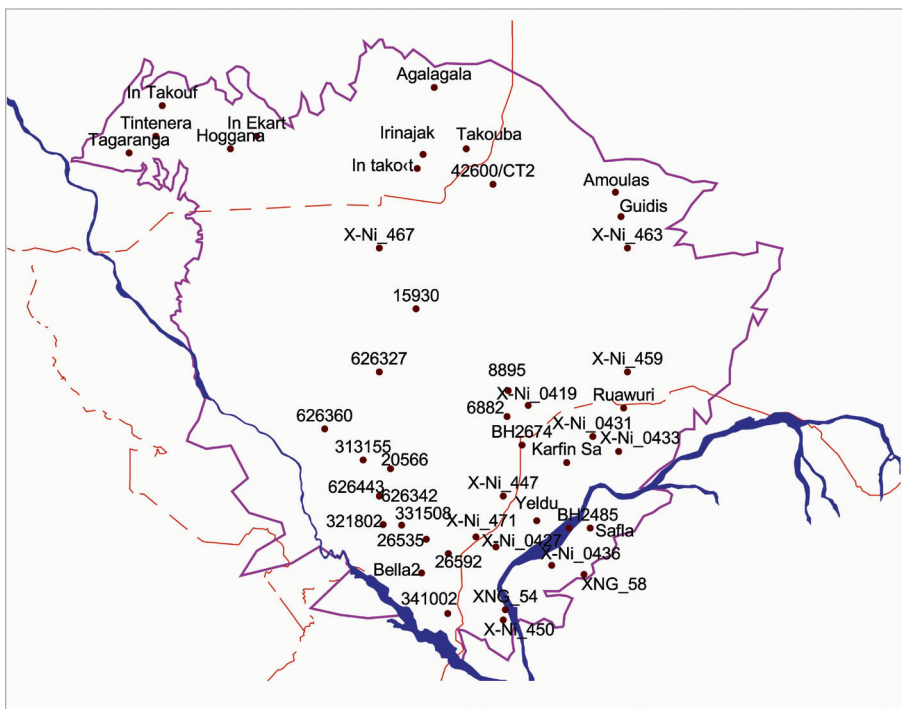


FIGURE 28 : Points de contrôle piézométrique du CT

en 1970. A cette période, les prélèvements sur les nappes du Ci et du CT étaient pratiquement inexistants. L'année 1970 a donc été raisonnablement considérée comme représentative de l'état d'équilibre des nappes.

►► **ANALYSE DES ÉCARTS DE CALAGE SUR LES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES PONCTUELS:**

D'une manière générale, les écarts de calage sont faibles. L'examen des cartes (figures 29 et 30) montre que les valeurs ponctuelles mesurées s'insèrent assez correctement entre les courbes observées.

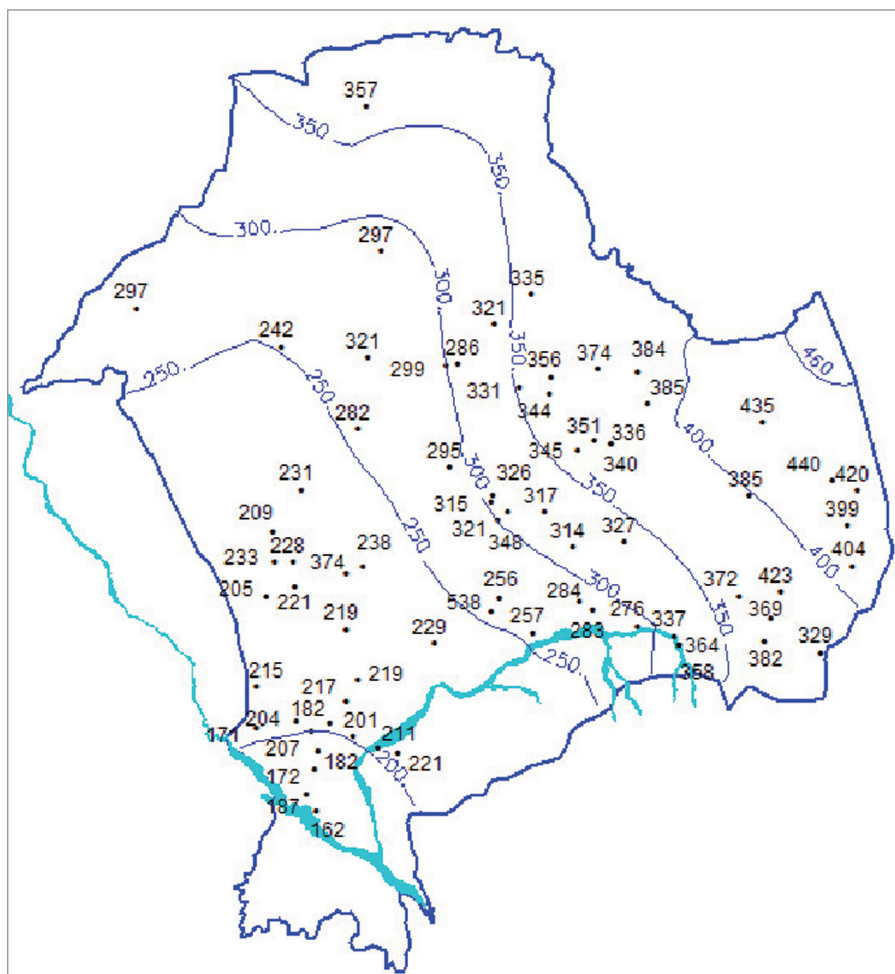


FIGURE 29 : Ecart de calage sur les niveaux piézométriques du Ci

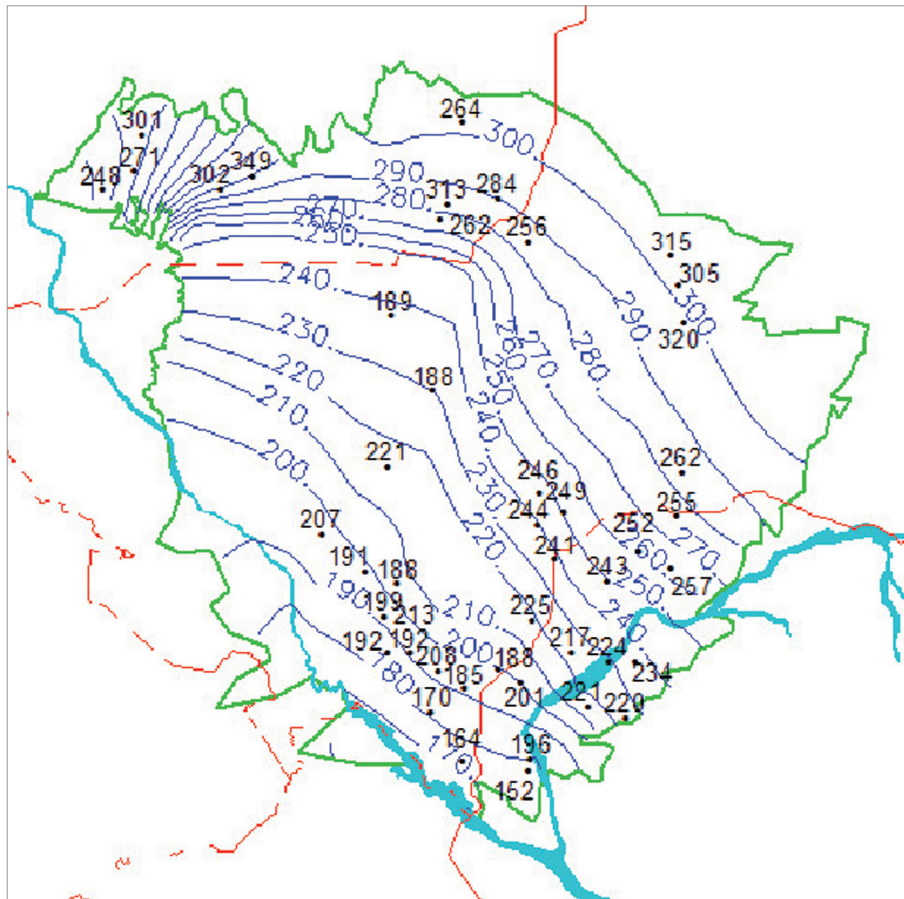


FIGURE 30 : Ecart de calage sur les niveaux piézométriques du CT

V.5. Résultats du calage en régime permanent

V.5.1. L'allure générale des écoulements calculés par le modèle

Les figures 29 et 30 présentent l'allure générale des courbes piézométriques calculées pour le Ci et le CT. Les figures 31 et 32 montrent les vecteurs vitesses d'écoulement, déduites des cartes ci-dessus, dont la direction et la taille une indiquent le sens et l'importance des écoulements.

Aussi bien pour le Ci que pour le CT, nous avons pu reconstituer l'allure générale des écoulements observés. Il se dégage de l'examen des cartes le constat que les eaux convergent vers le fleuve Niger qui draine les nappes. La rivière Rima constitue un autre drain pour les nappes du système.

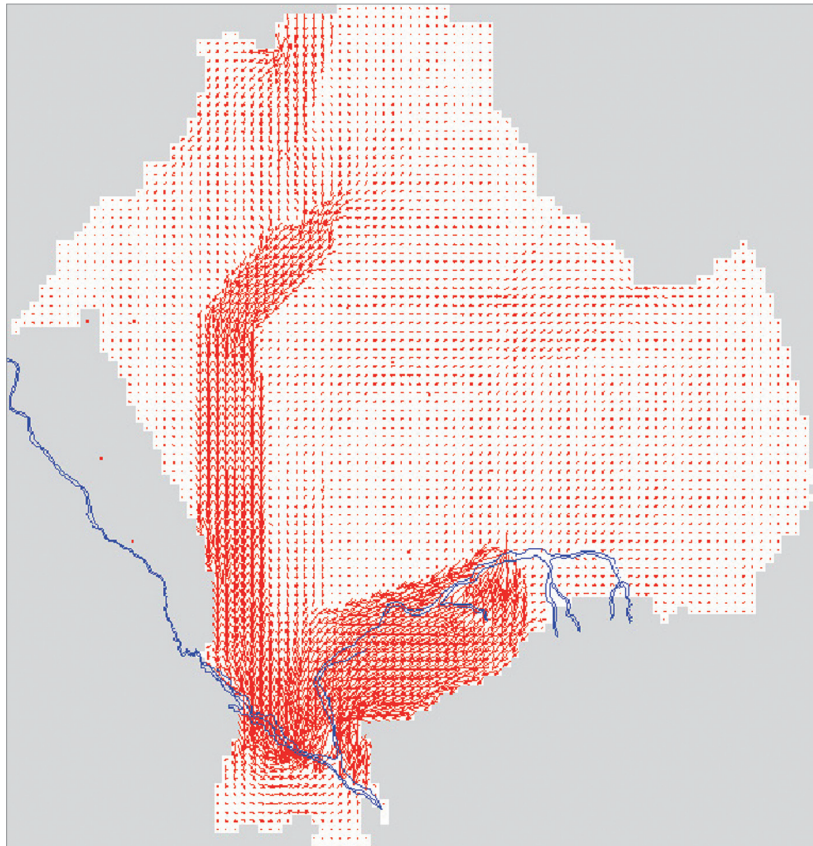


FIGURE 31 : Vitesses d'écoulement dans le Ci

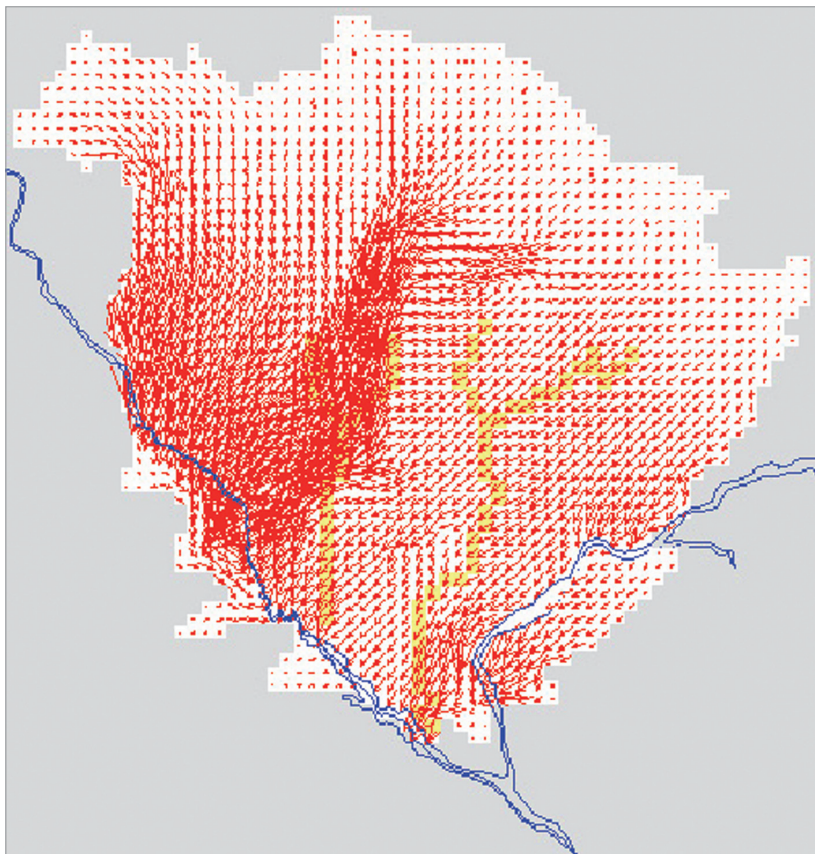


FIGURE 32 : Vitesses d'écoulement dans le CT

V.5.2. Les paramètres hydrodynamiques du modèle

La répartition des transmissivités après calage du modèle est portée sur les figures 33 et 34. Elles sont en générale dans les ordres de grandeur des transmissivités mesurés.

Les figures 35 et 36 indiquent la répartition des coefficients de drainage (K_v /épaisseur du semi-perméable) à travers le semi-perméable.

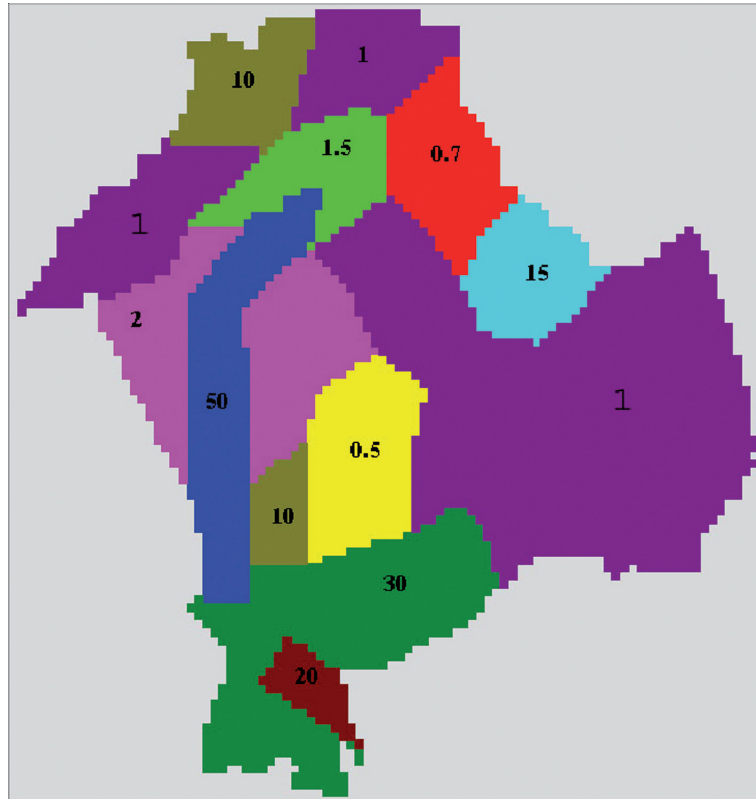


FIGURE 33 : Transmissivités dans le Ci après calage ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

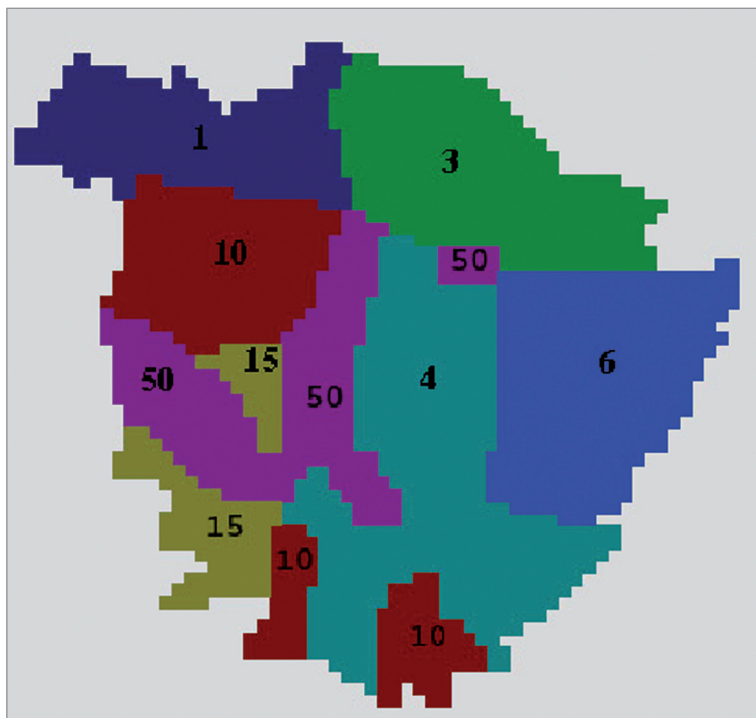


FIGURE 34 : Transmissivités dans le CT après calage ($10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$)

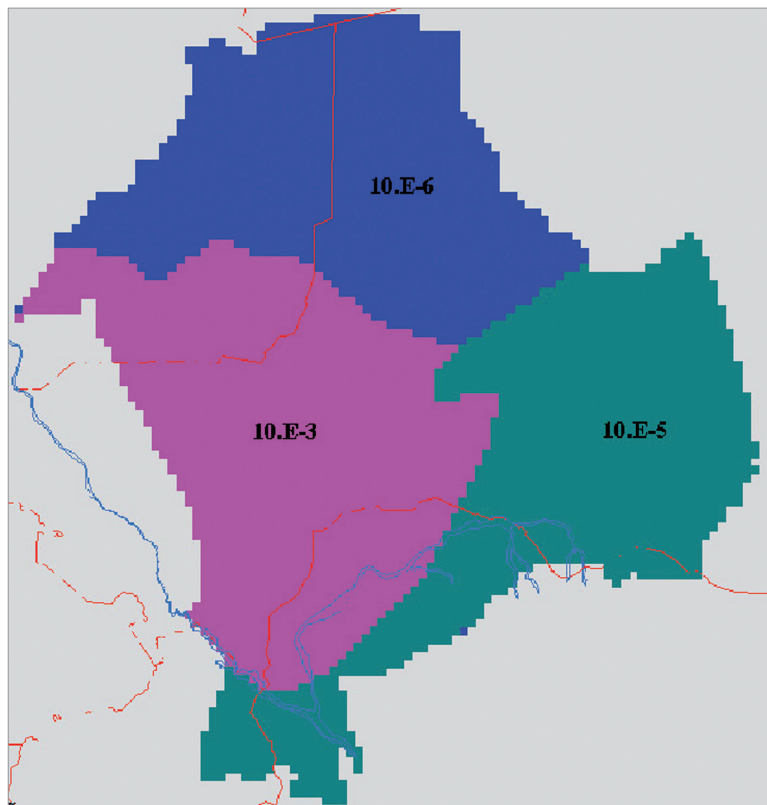


FIGURE 35 : Transmissivités verticales dans le CT après calage (m^2/s)

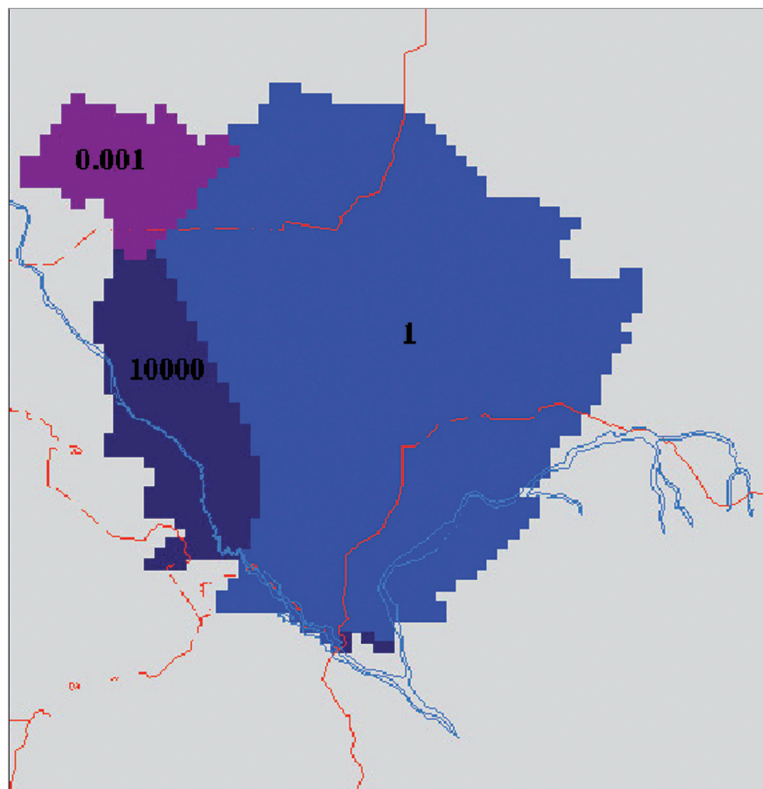


FIGURE 36 : Transmissivités verticales dans le Ci après calage (m^2/s)

V.5.3. Le bilan en eau du multicouche saharien

Le tableau 12 ci-dessous porte le bilan en eau détaillé du système, calculé par le modèle au terme du calage en régime permanent. L'examen de ce tableau montre que la grande part de l'alimentation provient de l'infiltration directe des eaux de pluies. Le fleuve Niger constitue un drain du système avec des débits évalués à 2,5 m³/s pour le CT et 1,6 m³/s pour le Ci. La rivière Rima se révèle comme un exutoire naturel du CT, mais alimente le Ci avec un débit de l'ordre de 770 l/s. La ressource globale du système s'établit à environ 5 m³/s, soit 150 millions de m³/an, dont 82 % soutiennent les écoulements du fleuve Niger.

En première approximation, ce volume a été jugé faible, comparé aux 70 m³/s préconisés préalablement comme ressource du SAI (dans le document du projet), estimation non fondée sur une étude précise. Plusieurs tests menés au cours du calage nous ont amenés à conclure que le SAI ne pouvait pas contenir un tel volume. L'évaluation de la ressource donnée par le modèle (5 m³/s) nous paraît plausible, comparée à celle du SASS (30 m³/s), qui est un système deux fois plus grand (1 000 000 km²), dont les épaisseurs moyennes des formations (350 m) sont plus importantes que celles du SAI (75 à 200 m) et dont les perméabilités sont aussi plus importantes que celles observées dans le SAI.

Continental terminal			
Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Infiltration directe de la pluie	3.29	Fleuve Niger	2.50
Drainance Ci	0.013	Dallols	0.45
		Rivière Rima	0.35
TOTAL Entrées	3.30	TOTAL Sorties	3.30
Continental intercalaire			
Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Infiltration directe de la pluie	0.55	Fleuve Niger	1.60
Apports Bordure Nord	0.29	Drainance CT	0.013
Rivière Rima	0.77		
TOTAL Entrées	1.61	TOTAL Sorties	1.61

TABLEAU 12 : Bilan du système en régime permanent

V.5.4. Répartition des débits par tronçon le long du fleuve Niger et de la rivière Rima

La figure 37 ci-dessous montre les localités situées le long du fleuve Niger et de la rivière Rima dont les populations exploitent les eaux de ces cours d'eaux. Les débits calculés sur les mailles du fleuve Niger et de la rivière Rima (figure 38 pour le CT et figure 39 pour le Ci), ainsi que ceux calculés par tronçon entre localités sur les cours d'eau (figure 37, en bleu), sont portés sur les tableaux 13 et 14.

Le tableau 13 montre que pour la nappe du CT, les débits sont globalement sortants (2.5 m³/s pour le fleuve Niger et 0.35 m³/s pour la rivière Rima. Mais, dans le détail, certaines mailles de la rivière Rima sont des mailles d'alimentation (valeurs positives).

Par contre, pour le Ci, les débits sont tous sortants au niveau du fleuve Niger (1.6 m³/s) et globalement entrants au niveau de la rivière Rima (0.77 m³/s) (tableau 14).

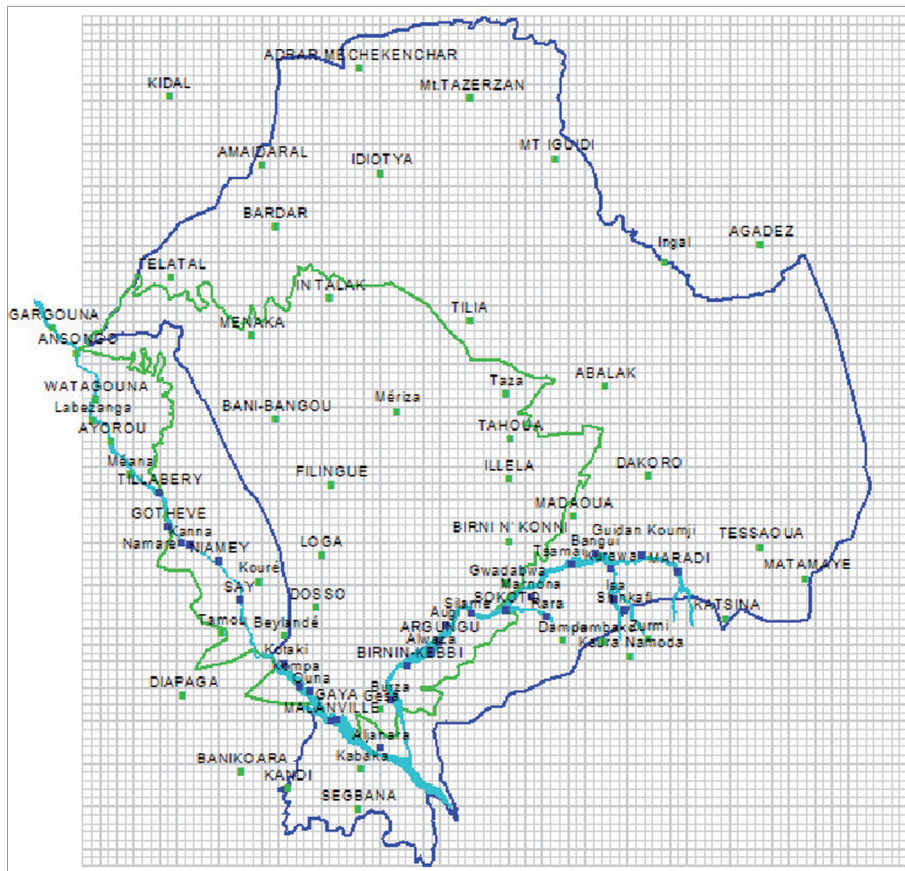


FIGURE 37 : Localités le long du fleuve Niger et de la rivière Rima

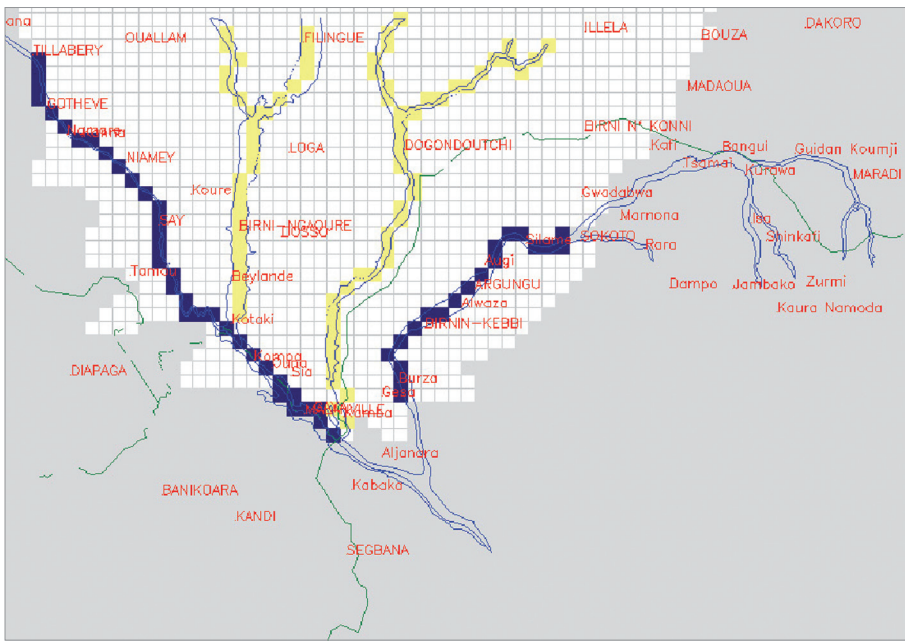


FIGURE 38 : Maillages de drains à potentiels imposés dans le CT

Maille	Débit par maille fleuve Niger	localité	Débit au tronçon	Maille	Débit par maille Rima	localité	Débit au tronçon
1	-1.607E-01	Tillabery		1	-7.240E-02	Sud Burza	-7.240E-02
2	-3.500E-02			2	-4.651E-02	Burza	-4.651E-02
3	-2.608E-02			3	-1.110E-01		
4	-1.635E-02			4	-6.798E-02		
5	-5.768E-02	Gotheye	-2.958E-01	5	7.165E-02		
6	-1.023E-01			6	2.231E-02	Ouest Birnin kebbi	-8.501E-02
7	-8.084E-02	Namaré	-1.832E-01	7	2.505E-02	Nord Birnin kebbi	
8	-9.689E-02	Kanna		8	1.969E-02		
9	-1.153E-01			9	-4.540E-03	Alwaza	4.020E-02
10	-7.125E-02	Niamey	-2.834E-01	10	-2.001E-02	Argungu	-2.001E-02
11	-1.542E-01			11	-2.937E-02		
12	-2.603E-01			12	1.529E-02	Augi	-1.407E-02
13	-3.030E-01			13	-1.366E-02		
14	-6.693E-02	Say	-7.844E-01	14	-3.683E-02		
15	-7.473E-02			15	-6.232E-02	Silame	-1.128E-01
16	-6.659E-02			16	1.526E-02		
17	-6.331E-02			17	-6.694E-03		
18	-8.928E-02			18	4.537E-03		
19	-2.397E-02			19	-5.018E-02	Ouest Sokoto	-3.707E-02
20	-8.728E-02						
21	-2.561E-02						
22	-3.657E-02						
23	-5.545E-02						
24	-5.787E-02	Kotaki	-5.807E-01				
25	-5.748E-02						
26	-3.655E-02	Kompa	-9.403E-02				
27	-3.721E-02	Ouna	-3.721E-02				
28	-3.426E-02						
29	-1.800E-07						
30	-2.919E-02						
31	-1.600E-07						
32	-1.738E-02	Malanville	-8.082E-02				
33	-6.733E-02	Gaya	-6.733E-02				
34	-1.983E-02						
35	-8.191E-02		-1.017E-01				
Total	-2.509E+00		-2.509E+00	Total	-3.477E-01		-3.477E-01

TABLEAU 13 : Débits par mailles du fleuve Niger et de la rivière Rima pour le CT (m³/s)

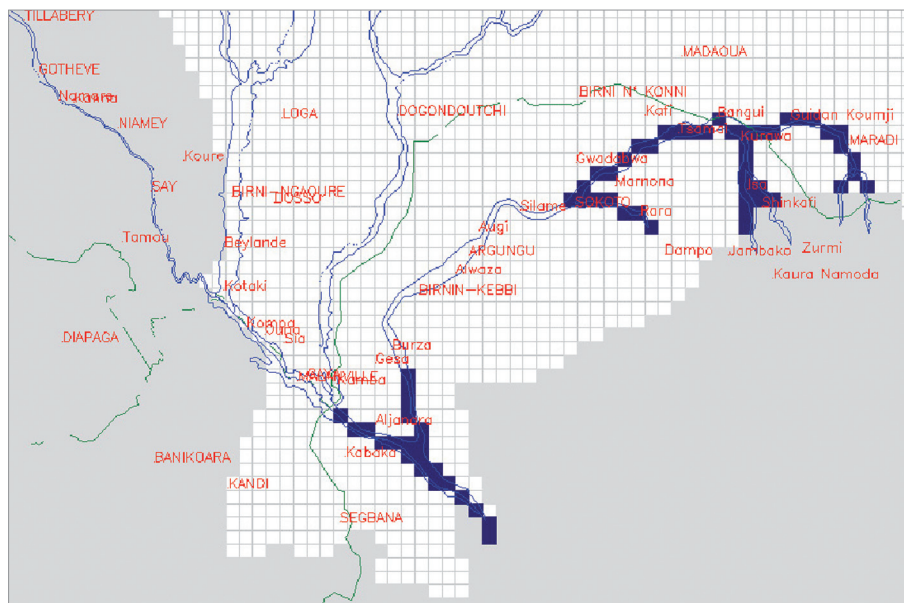


FIGURE 39 : Mailles de drains à potentiels imposés dans le Ci

Maille	Débit par maille Rima (Sokoto-Maradi)	localité	Débit au tronçon	Maille	Débit par maille Rima (Sokoto-Rara)	localité	Débit au tronçon Sokoto-Rara	Maille	Débit par maille Rima (Kurawa-Sud Isa)	localité	Débit au tronçon Kurawa-Sud Isa
1	2.507E-02	Sokoto		1	2.159E-02	Sokoto		1	-9.324E-04	Kurawa	
2	-4.690E-02			2	-4.906E-02			2	4.052E-04		
3	1.102E-01			3	-4.744E-02			3	3.904E-03		
4	1.031E-01	Nord Marmona	1.915E-01	4	8.942E-02			4	9.407E-03	Isa	1.278E-02
5	-4.961E-03			5	-3.788E-02	Rara	-2.336E-02	5	-8.504E-03	Est Isa	-8.504E-03
6	5.302E-02			6	-3.257E-02		-3.257E-02	6	0.000E+00		
7	3.330E-02							7	-5.719E-03	Shinkafi	-5.719E-03
8	2.557E-01							8	1.033E-02	Sud Isa	
9	2.190E-01	Tsamai	5.560E-01					9	1.304E-02		
10	2.610E-02							10	1.857E-02		4.194E-02
11	9.427E-03										
12	-4.277E-03	Bangui	3.125E-02								
13	-3.722E-04										
14	-5.675E-03	Nord Kurawa	-6.047E-03								
15	-6.259E-03										
16	-1.380E-02										
17	-1.217E-02	Guidan Koumji	-3.222E-02								
18	-1.366E-02										
19	-2.045E-02										
20	8.213E-03										
21	-1.313E-02										
22	-1.165E-03	Ouest Maradi	-4.019E-02								

TABEAU 14 : Débits par mailles du fleuve Niger et de la rivière Rima pour le Ci (m³/s)

Maille	Débit par maille Rima (Sokoto-Maradi)	localité	Débit au tronçon	Maille	Débit par maille Rima (Sokoto-Rara)	localité	Débit au tronçon Sokoto-Rara	Maille	Débit par maille Rima (Kurawa-Sud Isa)	localité	Débit au tronçon Kurawa-Sud Isa
23	-4.393E-03	Sud Maradi	-4.393E-03								
24	-4.477E-04										
25	8.791E-03										
26	-1.278E-02		-4.433E-03								
Total	6.915E-01		6.915E-01		-5.593E-02		-5.593E-02		4.050E-02		4.050E-02

Tableau 14 : Débits par mailles du fleuve Niger et de la rivière Rima pour le Ci (m³/s)

Maille	Débit par maille fleuve Niger	localité	Débit Tronçon	Maille	Débit par maille Rima au sud de Burza	localité	Débit Tronçon
1	-4.954E-01			1	-9.224E-02	Sud Burza	
2	-2.164E-01			2	6.524E-02		
3	-2.202E-01	Aljanara		3	1.021E-01		
4	-1.169E-01			4	4.623E-02		
5	-1.227E-01			5	4.297E-02		
6	-1.475E-01			6	-7.215E-02		
7	-2.519E-02						
8	-4.715E-02						
9	-2.302E-02						
10	-7.726E-02						
11	-2.918E-02						
12	-5.203E-02						
13	-2.452E-02						
14	-3.276E-03						
15	-1.583E-04						
16	0.000E+00						
Total	-1.601E+00		-1.601E+00	Total	9.217E-02		9.217E-02

Tableau 14 (suite) : Débits par mailles du fleuve Niger et de la rivière Rima pour le Ci (m³/s)

VI. CALAGE DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE

VI.1. Définition des historiques de référence et des critères de calage

VI.1.1. Conditions initiales et historiques de référence

Les conditions initiales correspondent à l'état piézométrique calculé en 1970, situation assimilée à un régime permanent. Sur la limite d'alimentation du Ci, au nord du bassin, les conditions de potentiels imposés ont été remplacées par des débits équivalents calculés aux mêmes mailles.

En ce qui concerne la période de référence adoptée pour le calage du modèle en régime transitoire, nous avons simulé le comportement du système pour la période allant de la situation initiale de 1970 [année de référence] à l'année 2004 parce que les données des prélèvements des pays (le Mali et le Nigeria) se limitent à l'année 2004. Or, il aurait été souhaitable que cette simulation s'étale de l'année de référence à l'année de réalisation du modèle (c'est-à-dire 2006) si les données nécessaires et suffisantes étaient disponibles, ce qui n'était pas le cas. Le consensus qui s'est dégagé entre les pays sur la formulation des hypothèses relatives aux prélèvements, est d'**arrêter la période de simulation à l'année 2004**.

VI.1.2. Les Paramètres structuraux d'initialisation du calage

La répartition des coefficients d'emmagasinement initiaux a été faite en se basant sur les limites «nappe libre – nappe captive» et en s'appuyant sur les rares valeurs ponctuelles données par les forages. Ces données sont issues de la littérature ou des fichiers fournis par les pays.

Les cartes d'affleurements des formations géologiques du CT et du Ci ont aussi été d'une grande utilité dans la répartition des coefficients d'emmagasinement initiaux. Ainsi, dans les zones où la nappe est libre, une porosité de 10 % est initialement fixée. Dans les zones où la nappe est captive, une valeur initiale de 1.10^{-4} a été adoptée.

VI.1.3. Les critères du calage en Transitoire

C'est d'abord la bonne restitution des séries de niveaux historiques de référence. Comme c'est aux variations de niveau des nappes que nous nous intéressons le plus, nous comparerons les rabattements observés aux points de contrôles, aux rabattements calculés correspondants.

Les critères de calage consisteraient ensuite à bien restituer les séries de débits mesurés aux exutoires (Fleuve Niger, Rima et Dallols), mais nous ne disposons d'aucune série de mesures.

VI.2. Degré de connaissance des historiques de prélèvements

Vu l'absence d'historique de prélèvement au niveau des trois pays, nous étions amenés à élaborer des hypothèses sur la base des données existantes avec l'aide des techniciens des pays.

VI.2.1. Historique d'exploitation au Mali

Pour le Mali, c'est le résultat de calcul par la méthode directe qui a été jugé plus proche de la réalité (cf. Chapitre IV, section 6.1) et a donc été retenue pour le calage du modèle (tableau 15).

Année		1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005
CT	Prelev_pem	15719	8322	13578	31439	91214	119136	195202	207466
	Prod_AEP							54355	127550
Ci	Prelev_pem	15951	15951	19053	42815	81286	116800	183960	221774
	Prod_AEP							16180	26744
TOTAL		31670	24273	32631	74253	235936	449697	583534	

TABLEAU 15 : Historique des prélèvements au Mali (m³/an)

VI.2.2. Historique d'exploitation au Niger

Les données des cinq années (2001-2005) ont été jugés insuffisantes pour reconstituer l'historique des prélèvements (cf. Chapitre IV, section 6.2). Cet historique a été calculé à partir des points d'exploitation intégrés dans la base de données du SAI. En considérant que le débit moyen unitaire est de 1 m³/heure et que l'on pompe 8 heures/jour, c'est-à-dire 8 m³/heure/jour, l'historique calculé dans la Base de Données est porté sur le tableau 16 ci-dessous.

Aquifère	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Ci	23 855 271	28 605 820	33 046 606	39 393 934	49 569 672	57 167 479	65 290 015	72 729 834
CT	26 556 271	30 919 658	36 143 021	44 356 116	81 371 668	94 753 742	105 019 515	112 902 876
Total	50 411 542	59 525 478	69 189 627	83 750 050	130 941 340	151 921 222	170 309 531	185 632 710

TABLEAU 16 : Historique des prélèvements au Niger (m³/an)

VI.2.3. Historique d'exploitation au Nigeria

Le calcul des historiques d'exploitation au Nigeria est fait en partant de l'état des prélèvements en 2004 (cf. Chapitre IV, section 6.3) et en considérant que le taux de croissance de la population de 1970 à 2004 est de 3% (tableau 17).

En conclusion, les hypothèses formulées de concert avec les techniciens des pays ont permis d'aboutir à l'histogramme ci-dessous (figure 40) qui montre clairement qu'à partir de 1995, les prélèvements estimés à **152 millions m³** excèdent la recharge moyenne (ligne rouge) évaluée par le modèle mathématique à **150 millions m³** en 1970.

Exploitation (Urbaine) (m ³ /an)	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Sokoto	1844628	2148079	2501448	2912949	3392143	3950167	4599989	5196009
Kebbi	1554700	1810455	2108284	2455107	2858984	3329301	3876988	4379328
Katsina	1569282	1827437	2128059	2478136	2885801	3360530	3913353	4420406
TOTAL	4968610	5785971	6737791	7846191	9136928	10639998	12390330	13995743

Exploitation (Rurale) (m ³ /an)	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Sokoto	5549846	6462823	7525989	8764051	10205781	11884682	13839771	15632987
Kebbi	5441564	6336728	7379151	8593057	10006658	11652802	13569745	15327974
Katsina	1411777	1644021	1914471	2229410	2596159	3023240	3520578	3976739
TOTAL	12403186	14443572	16819610	19586519	22808598	26560724	30930094	34937700

TABLEAU 17 : Historique d'exploitation au Nigeria

Exploitation (Elevage) (m ³ /an)	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Sokoto	19318508	22496498	26197283	30506864	35525394	41369496	48174982	54417003
Kebbi	10370270	12076231	14062830	16376235	19070206	22207349	25860567	29211315
Katsina	93861	109302	127283	148221	172604	200999	234064	264391
TOTAL	29782640	34682030	40387395	47031321	54768204	63777843	74269613	83892710

Exploitation Totale (m ³ /an)	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Sokoto	26712982	31107399	36224719	42183864	49123317	57204345	66614741	75245998
Kebbi	17366534	20223414	23550265	27424400	31935848	37189452	43307300	48918618
Katsina	3074920	3580760	4169812	4855767	5654565	6584769	7667995	8661536
TOTAL	47154436	54911573	63944797	74464031	86713730	100978566	117590037	132826152

Tableau 17 (suite) : Historique d'exploitation au Nigeria

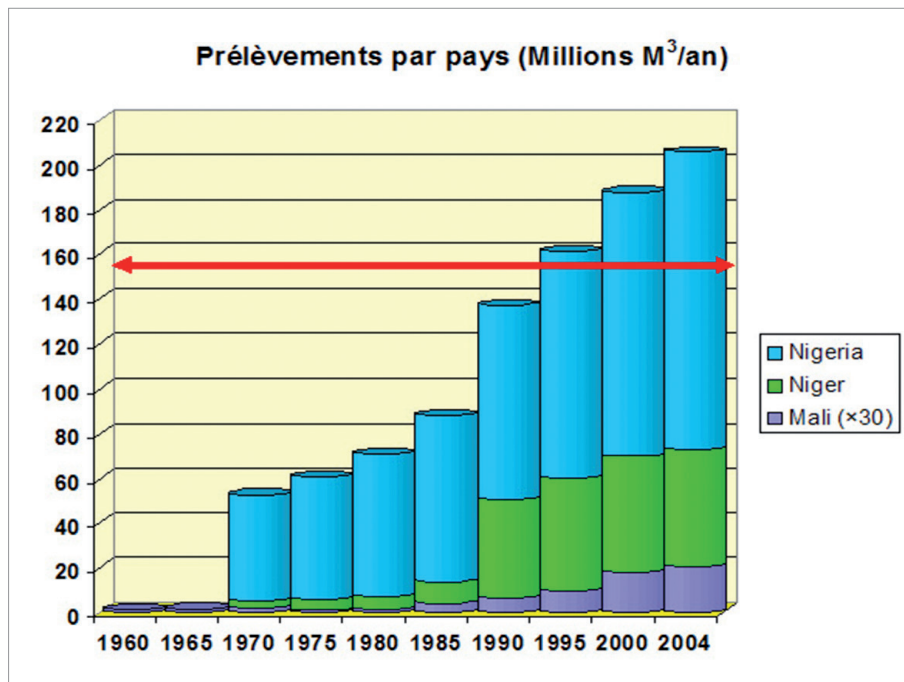


FIGURE 40 : Evolution des prélèvements dans le SAI

VI.3. Les chroniques de niveaux piézométriques de référence

Nous ne disposons pas de points d'eau ayant un historique exhaustif des niveaux piézométriques, faute de suivi au niveau des pays. Dans la Base de Données du SAI, il n'y a pratiquement aucun point d'eau avec plus de deux mesures piézométriques au Mali et au Nigeria. Cependant au Niger quelques mesures piézométriques sont disponibles dans la région des Dallols. Les séries sélectionnées pour le calage du modèle en régime transitoire sont présentées en annexe.

VI.4. Les étapes du calage en transitoire

VI.4.1. Ajustement des paramètres du modèle

Les principales modifications effectuées au cours du calage ont concerné le passage des coefficients d'emmagasinement initiaux à ceux retenus au terme du calage. Ce sont :

- /// la diminution progressive des coefficients d'emmagasinement du CT de 10 % à 4 % ;
- /// l'augmentation des coefficients d'emmagasinement dans les parties libres de la nappe du Ci, de 1.10^{-4} à 4.10^{-2} . Les valeurs de 1.10^{-4} adoptées initialement ont été maintenues car compatibles avec la partie captive de la nappe.

VI.4.2. Evaluation du Calage en Transitoire

La restitution des historiques piézométriques et des débits aux exutoires du système constituent des critères de calage en régime transitoire. Le manque de données nous limite à la présentation des résultats de l'évolution des hauteurs piézométriques et des débits aux exutoires.

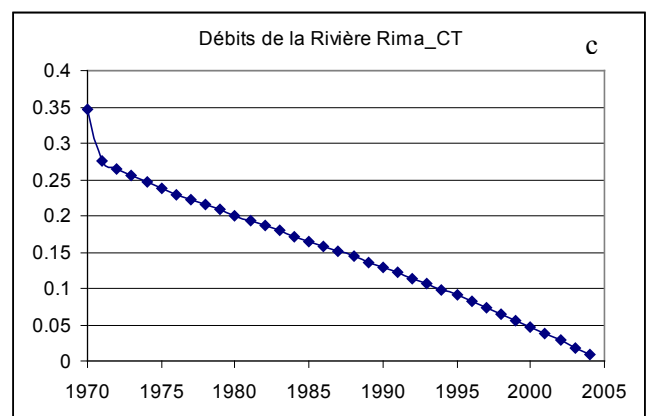
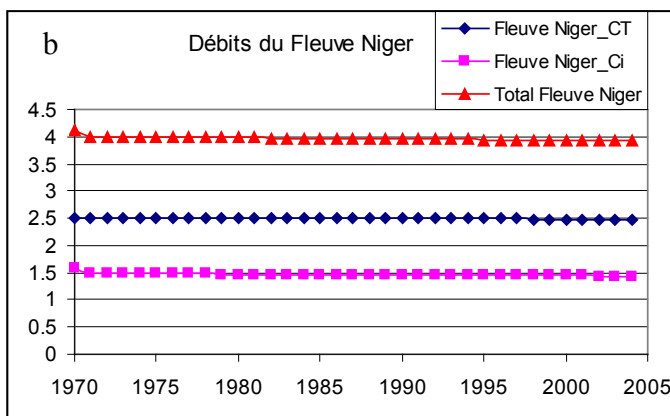
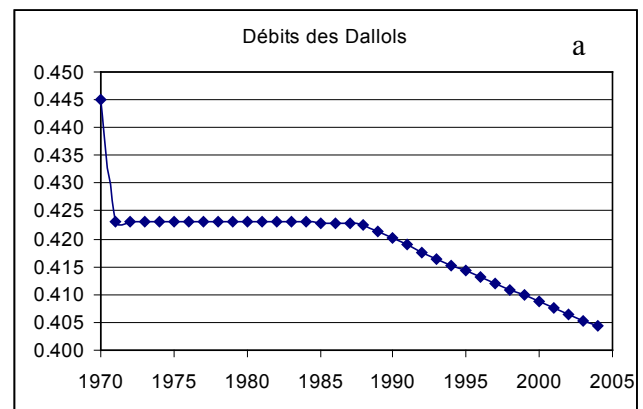
▶▶ EVOLUTION DES HISTORIQUES PIÉZOMÉTRIQUES

Nous n'avons pas, dans la Base de Données d'historiques de surveillance piézométriques pouvant servir de point de contrôle de l'évolution de la piézométrie dans le système pour le calage final en transitoire. Toutefois, nous portons sur les figures, ci-dessous, l'évolution des hauteurs piézométriques calculées par le modèle, dans certaines localités.

▶▶ EVOLUTION DES DÉBITS AUX EXUTOIRES

Faute de mesures disponibles, nous n'avons pas d'élément de comparaison des débits sortants aux exutoires. Ceux calculés par le modèle sont portés sur les figures 41 (a, b et c) ci-dessous pour apprécier leur évolution dans le temps. Il s'agit des débits au niveau des Dallols, du fleuve Niger et de la rivière Rima.

FIGURE 41 : (a, b et c) Evolution des débits aux exutoires du système



VI.5. Résultats du calage en régime transitoire

VI.5.1. Distribution des coefficients d'emmagasinement

Les coefficients d'emmagasinement après calage se répartissent généralement comme suit : 1.10^{-4} en nappe captive et 0.04 en nappe libre (figures 42 a et b). Cette distribution a été jugée représentative pour mieux reconstituer l'évolution des niveaux piézométriques au niveau des exutoires naturels.

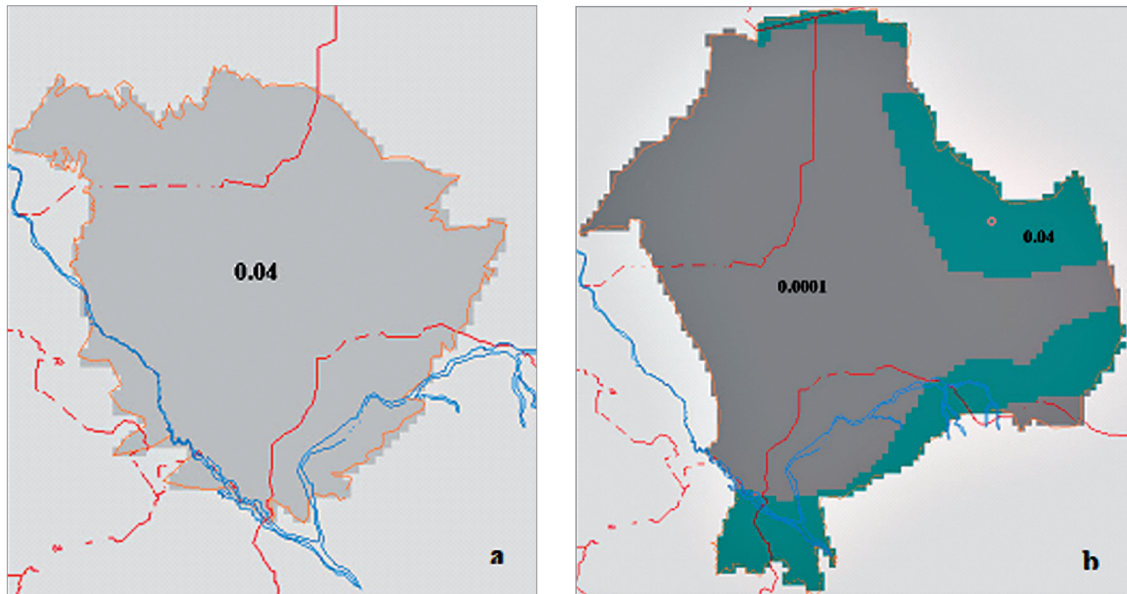


FIGURE 42 : (a et b) Coefficients d'emmagasinement du CT(a) et du Ci(b) après calage du modèle

VI.5.2. La Carte des rabattements 1970-2004

L'élaboration des historiques d'exploitation a rendu possible la construction d'un modèle mathématique et la simulation du comportement du système sur la période 1970- 2004. Ces simulations ont dégagé les résultats suivants :

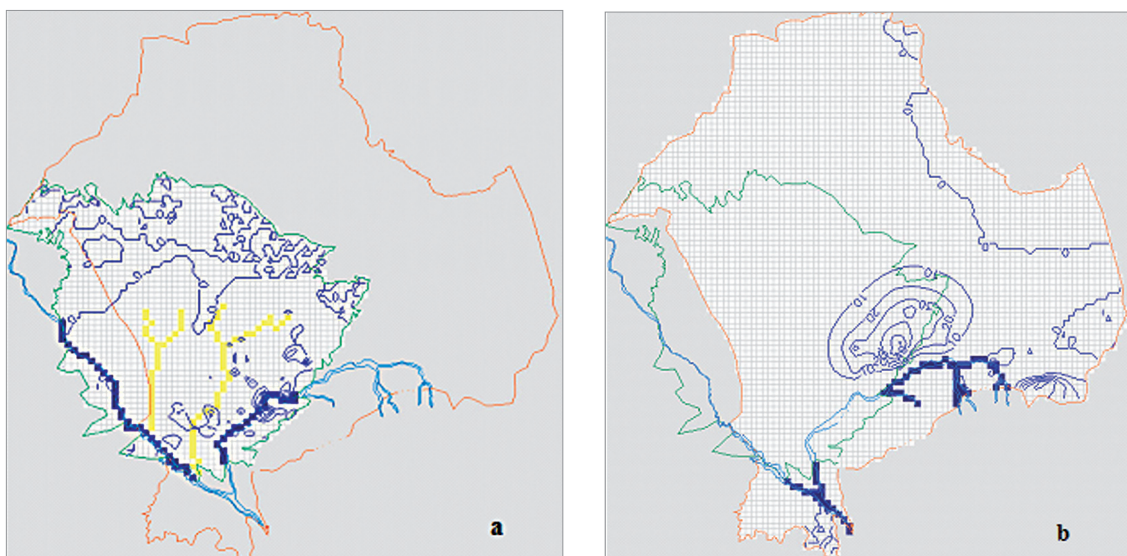


FIGURE 43 : Rabattements dans le CT (a) et dans le Ci (b) en 2004

- /// pour le Continental Terminal, les rabattements sont négligeables avec un maximum de 5 mètres localisé dans le secteur du Goulbi de Maradi (figure 43a). Ces faibles rabattements s'expliquent par l'infiltration directe des eaux de pluies et l'alimentation à partir du réseau hydrographique.
- /// Pour le Continental intercalaire (Ci), les rabattements les plus importants se localisent dans la partie orientale du bassin centré sur la localité de Birni N'Konni (au Niger) avec un maximum de 62 mètres de rabattement pour la même période (figure 43b). Les ressources de cette nappe confinée sont peu renouvelables ; elle est donc menacée d'une exploitation minière.

VI.5.3. Les Cartes piézométriques calculées en 2004

La lecture des figures 44 (a et b) ci-dessous montre que l'allure générale des courbes isopièzes est conservée. Toutefois, dans la région de Birni Konni (Ci), au Niger, les écoulements sont fortement marqués par les prélèvements supposés où l'on note les débits maximums.

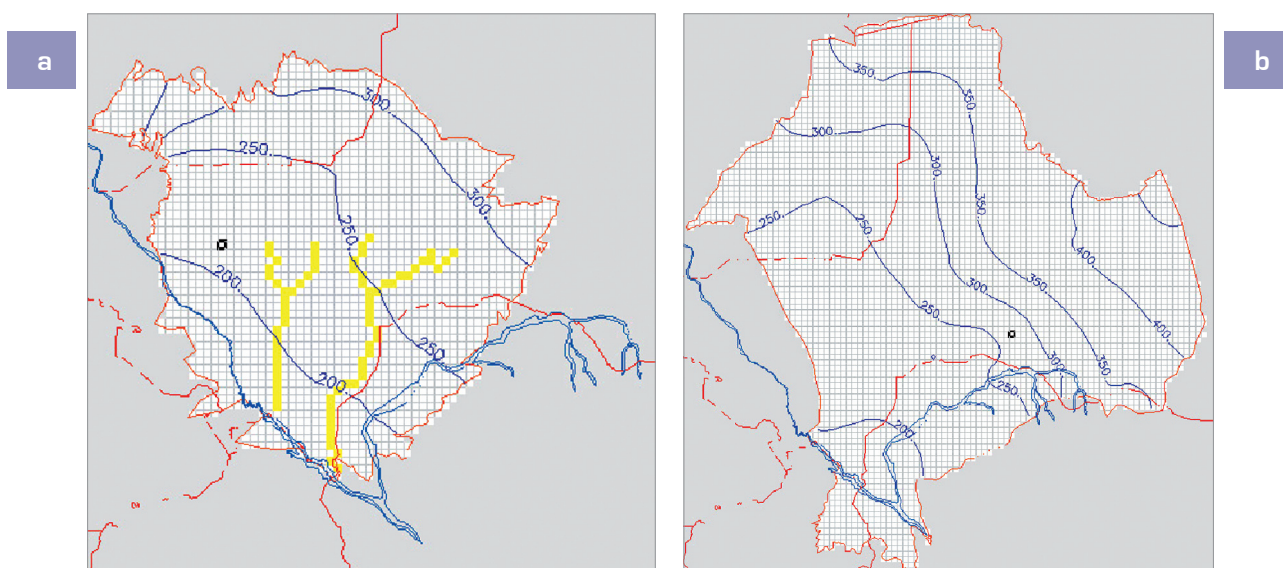


FIGURE 44 : Cartes piézométrique du CT (a) et du Ci (b) calculées par le modèle en 2004

VI.5.4. Le bilan 2004

Le bilan du système en 2004 est porté par le tableau 18 ci-dessous.

Continental terminal			
Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Recharge	3.294	Fleuve Niger	2.477
Drainance Ci	0.011	Dallois	0.404
réserves	2.092	Rivière Rima	0.008
TOTAL Entrées	5.397	Pompages	2.516
		TOTAL Sorties	5.405
Continental intercalaire			
Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Recharge	0.548	Fleuve Niger	1.438
Apports Bordure Nord	0.298	Drainance CT	0.011
Rivière Rima	1.576	Pompages	1.979
réserves	1.302		
TOTAL Entrées	3.724	TOTAL Sorties	3.428

TABLEAU 18 : Bilan en eau du système en 2004

L'examen des résultats montre que :

- /// la somme des recharges du système est de $4,15 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 92 % du total des prélèvements par forages ($4,49 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- /// la contribution des réserves (« apport par rabattement ») est évaluée à $3,39 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 75 % des prélèvements par forages.

A la lumière de ces résultats, on peut d'ores et déjà prévoir que les rabattements continueront d'augmenter même si l'on décidait de maintenir les pompages à leur niveau actuel. L'amplitude de cette progression, dans le temps et dans l'espace, reste à préciser. Ce calcul constituera précisément l'objet de la simulation prévisionnelle zéro, la première à envisager sur le modèle.

VI.5.5. Simulations exploratoires

Suite à ces résultats, le comportement du système a été simulé sur la période 2004-2025, sur la base d'une hypothèse nommée « **hypothèse zéro** ». Cette hypothèse consiste à maintenir constants les prélèvements de 2004 et simuler leur **impact** sur la ressource à l'**horizon 2025**. Les prévisions du modèle en 2025 font état d'un maximum de 2 mètres de rabattements additionnels pour le CT (figure 45a) et de 10 mètres pour le Ci (figure 45b).

Ce qui a permis d'identifier, les zones vulnérables caractérisées par des rabattements importants causées par une exploitation de plus en plus croissante. Ces zones à risques sont localisées au Niger dans la région de Birni N'Konni (Usine de Malbaza), au Nigeria dans la région de Sokoto et au Mali dans la partie nord. (figures 45a et b).

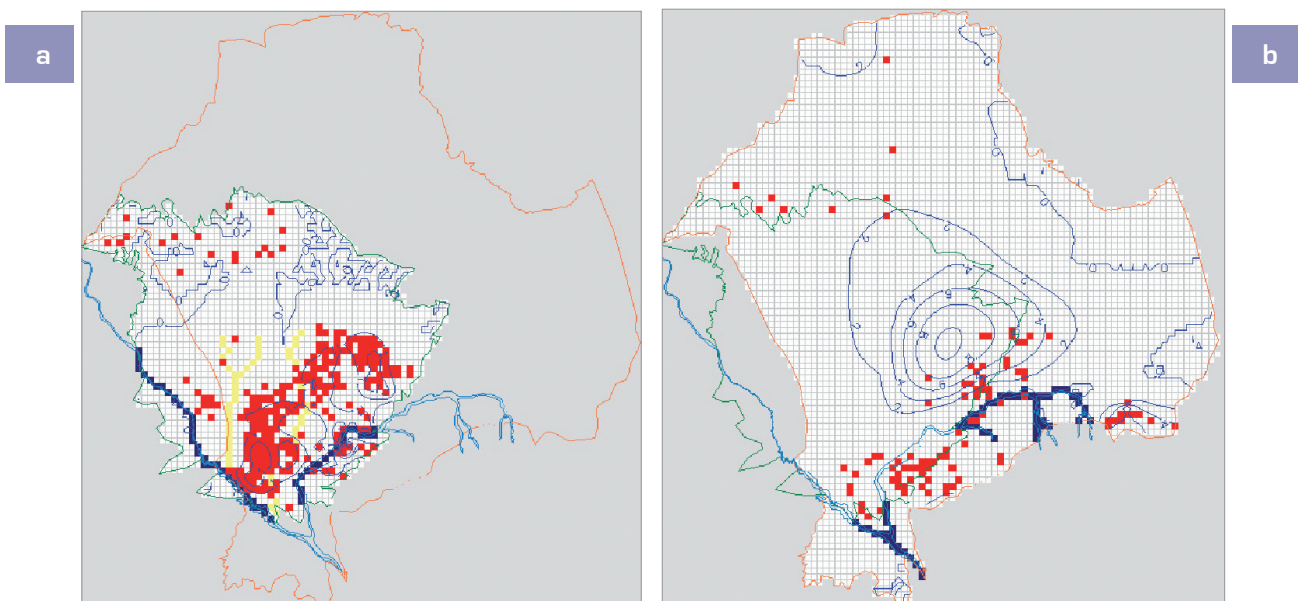
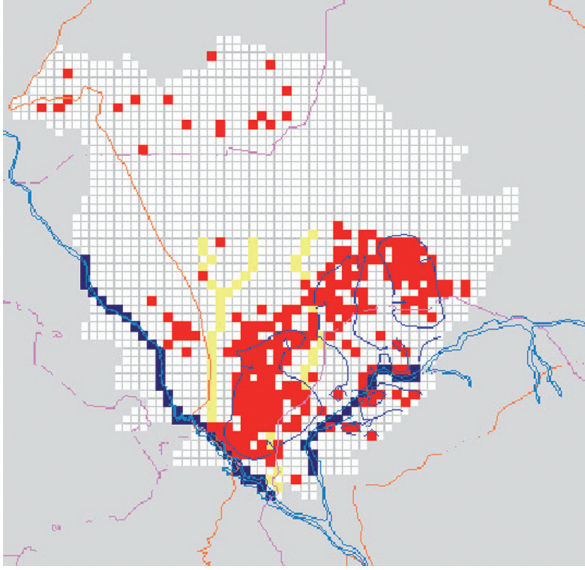


FIGURE 45 : Rabattements additionnels dans le CT (a) et dans le Ci (b) à l'horizon 2025

Considérant la même période (l'horizon 2025), la simulation ci-dessus a été reprise en divisant la recharge par 3. Les prévisions montrent, grossièrement, les mêmes ordres de grandeurs de rabattements : un maximum de 2,25 mètres de rabattements additionnels pour le CT (figure 46a) et de 10,8 mètres pour le Ci (figure 46b). Il faut cependant noter que pour le Ci où l'impact de cette diminution de la recharge est plus significatif, la disparition de la courbe isovaleur 0 vers le nord-est et une ouverture de la courbe isovaleur 2, témoignant d'une augmentation généralisée des rabattements.

a



b

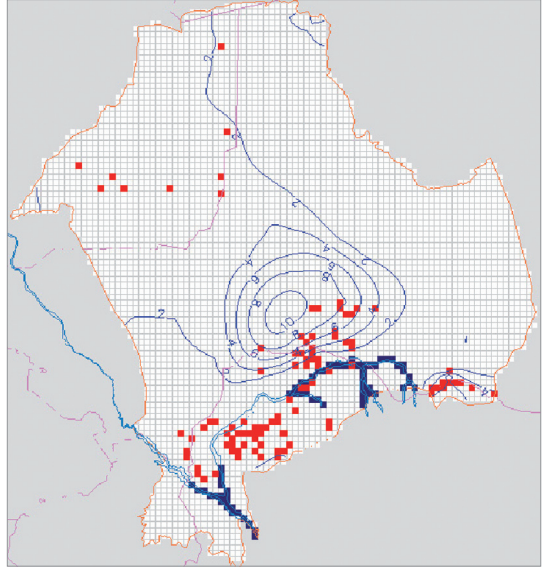


FIGURE 46 : Rabattements additionnels dans le CT (a) et dans le Ci (b) à l'horizon 2025, avec la recharge divisée par 3

VII. CONCLUSION

Le système aquifère d'Iullemeden est une cuvette sédimentaire dont les différents niveaux aquifères, localisés entre le socle précambrien à la base et la surface du sol, sont différemment sollicités dans les trois pays (Mali, Niger et Nigeria) qui se partagent ce système.

La conceptualisation du fonctionnement hydrodynamique de ce système multi-couche a été entreprise sur la base d'une bonne synthèse des données géologiques disponibles dont principalement la carte géologique des affleurements et plusieurs dizaines de sondages pétroliers et hydrauliques.

L'élaboration de corrélations entre les différents sondages à partir de cette masse de données géologiques a permis d'aboutir à une schématisation acceptable de l'extension des couches aquifères séparées par des aquicludes et assurant la continuité de l'écoulement souterrain sur l'ensemble du système aquifère.

Sur cette base, et à l'aide de cartes du toit, du mur et d'épaisseur de chaque couche, il a été possible d'affiner la structure physique du système aquifère et d'adopter une certaine configuration en bi-couche permettant de regrouper les différents niveaux aquifères.

Le calage du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère est fait en se référant à sa situation piézométrique datée de **1970**, époque jugée comme étant celle qui traduit le mieux, à travers l'information piézométrique disponible, l'état du système aquifère non encore influencé par l'exploitation. Cette date coïncide avec le début de l'installation dans la région de la grande sécheresse ayant sévi dans le Sahel jusqu'au milieu des années 80. Cette sécheresse a largement perturbé l'écoulement de surface des principaux cours d'eau de la région dont le fleuve Niger, conséquence d'une réduction des précipitations..

Il a été noté dans les trois pays un manque d'historique des mesures des débits ou des volumes exploités pour des usages spécifiques (Alimentation en eau potable (AEP), irrigation, cheptel, industrie). Les historiques obtenus ont été élaborés sur la base d'hypothèses formulés avec le concours des pays. Cette lacune principale dans le suivi des aquifères du SAI a rendu le calage du modèle relativement fastidieux.

Le modèle a été, au fur et à mesure que l'on acquiert de nouvelles données, reconfiguré pour intégrer toutes les nouvelles informations. Cela a nécessité, au cours de l'élaboration du modèle, une reconfiguration des limites du système et de certaines conditions aux limites et un «recalage» en régime permanent, puis en transitoire.

Le calage du modèle fait ressortir un bilan en eau qui est de l'ordre de **5 m³/s** (CT : 3,3 m³/s et Ci : 1,6 m³/s). Cette valeur traduit l'essentiel des entrées du système sous forme d'infiltration. La drainance au sein du système était à cette époque relativement faible. Dans ce bilan une importance particulière est accordée aux échanges entre le fleuve Niger et ses affluents (Rima River).

Le calage du fonctionnement du système aquifère en régime transitoire, durant la période 1971-2004, s'est référé à une piézométrie acceptable et à un historique d'exploitation qui a été reconstitué avec beaucoup de difficultés vu l'absence de mesures suffisantes jalonnant l'exploitation durant cette période.

Le bilan du système aquifère fait apparaître à partir du milieu des années 1990, un accroissement sensible des prélèvements qui dépassent ainsi ses ressources régulatrices. Les valeurs de

rabattements calculées (maximum de 62 m dans le Ci) sont à prendre avec beaucoup de réserves, car elles sont induites par les prélèvements qui restent hypothétiques. Cette exploitation est appelée à devenir plus forte et à entraîner des baisses piézométriques de plus en plus sensibles au sein des aquifères du SAI. Ceci est particulièrement le cas du CT qui est artésien dans les dalols et où cette baisse se traduira par un affaiblissement de l'artésianisme.

Les simulation prévisionnelles du développement de l'exploitation principalement basées sur certaines hypothèses avancées par les pays, confirment cette tendance vers la baisse et font apparaître des influences débordant les frontières des pays. Ceci est particulièrement le cas entre le Niger et le Nigeria.

A la lumière de ces premiers résultats de modélisation, on peut retenir que le SAI se présente avec les ressources en eau relativement plus modestes que celles admises auparavant sur des hypothèses approximatives. Ce système est entré en début de surexploitation de ses réserves géologiques, phénomène qui est appelé à devenir avec le temps, plus accentué.

Tenant compte de l'état de l'exploitation du SAI et des conditions d'élaboration de ce modèle, il est fortement recommandé, pour disposer d'un bon outil de gestion du système aquifère, d'envisager l'élaboration d'un modèle hydrogéologique qui traduit avec plus de précision sa configuration structurale et d'avantage de données de bases relatives à la piézométrie et aux prélèvements en eau.

BIBLIOGRAPHIE

BOECKH E. (1965). Contribution à l'étude hydrogéologique de la zone sédentaire de la république du Niger. Ministère des Travaux publics et des Mines de la république du Niger. Rapport technique BRGM / BFBH, DAK 65-A 20. Dakar, Sénégal ; in GUERO (2003).

BCEOM-CE, (2000). Etude complémentaire de vulnérabilité à la pollution des aquifères et des mesures de préservation de l'environnement dans les communes de Maradi et de Zinder. Hydro-conseil, BCEOM, CEH-Sidi ; DRE.

DRE/MH (1999). Schéma Directeur de Mise en Valeur et de Gestion des Ressources en Eau- Ministère de l'Hydraulique et de l'environnement. Niamey, Niger, Juin 1999.

DODO A. (1992). Etude des circulations profondes dans le grand bassin sédimentaire du Niger : Identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements. Thèse, Université de Neuchâtel, 101p. 44 fig., 14 tabl., 15 ann.

ETH (1999). Evaluation des Ressources en Eaux Souterraines et Risques de Pollution dans le Dallol Maouri.

FAO (1970). Etudes en vue de la mise en valeur du Dallol Maouri, Niger : les eaux souterraines. Rome, Italie - 162p. ; cart., graph.. PROJET FAO/SF: 281/NIR 8, 1970.

FAVREAU G. (2000). Caractérisation et Modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger. Thèse de doctorat Univ. Paris XI, Orsay, France.

GREIGERT J. (1978). Atlas des eaux souterraines de la République du Niger. Etat des connaissances. Rapport BRGM, 79 AGE001. Orléans, France.

GUERO A. (2003). Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure Sud-Ouest du bassin des lullemeden (Niger) : Approche géochimique et hydrodynamique. Thèse de Doctorat. Univ. Paris XI. 257p.

JICA (1990). The Study Groudwater Development in Sokoto State.

MARGAT J. (1982). Aquifère du Continental intercalaire du bassin sédimentaire du Niger (Mali, Niger, Nigeria). Bull. BRGM, Hydrogéologie, n°2.

OSS (2002). Système aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie. 58p.

OSS (2003). Modèle mathématique du Système aquifère du Sahara Septentrional.

OSS (2006A) Première Session de Renforcement des capacités des représentants des pays en modélisation mathématique. Système aquifère d'lullemeden (SAI). Atelier ; OSS-Tunis, Avril 2006, 13p.

OSS (2006B) Deuxième Session de Renforcement des capacités des représentants des pays en modélisation mathématique. Système aquifère d'lullemeden (SAI). Atelier ; OSS-Tunis, Décembre 2006, 16p.

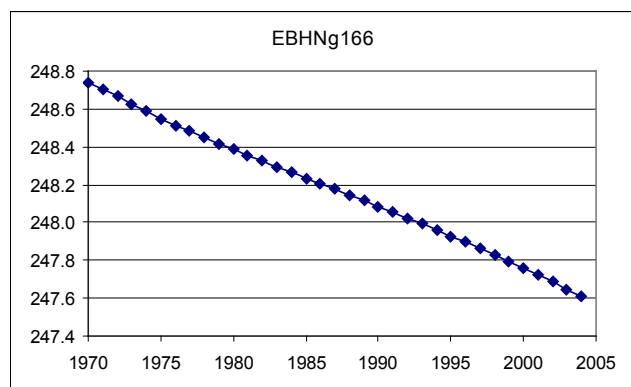
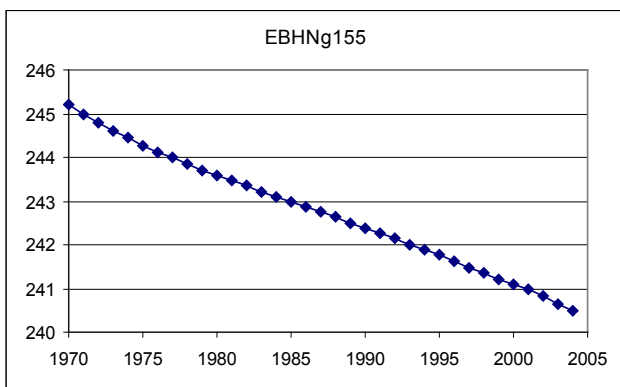
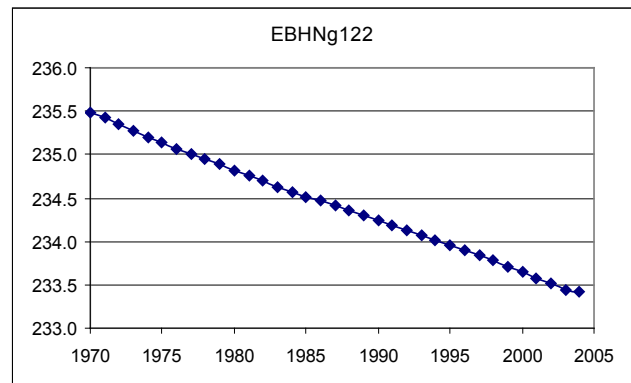
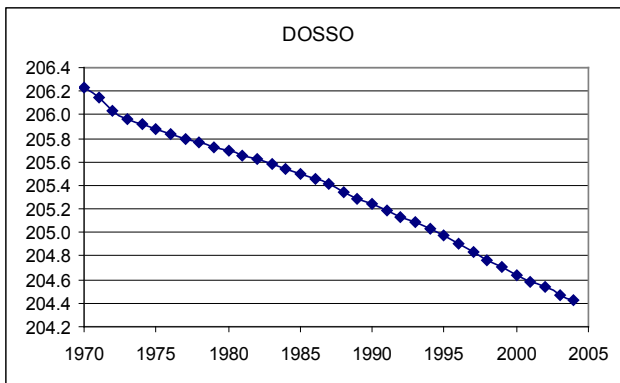
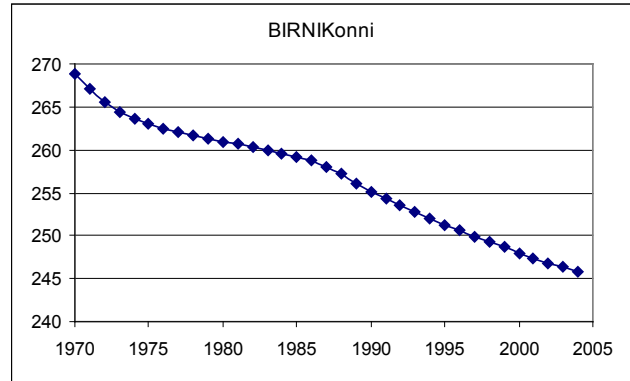
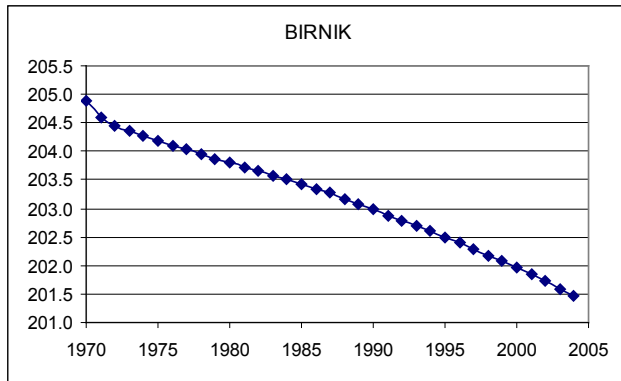
OSS (2007). Base de données du Système aquifère d'Iullemeden.

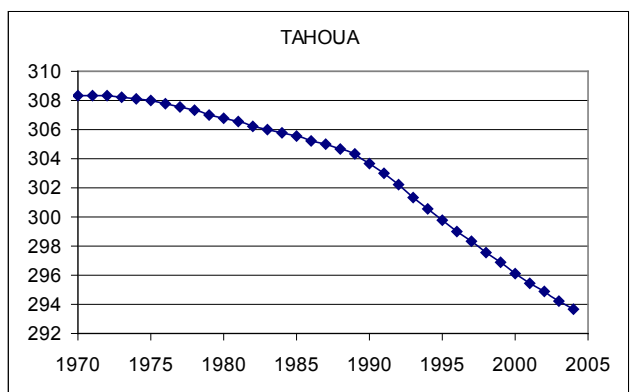
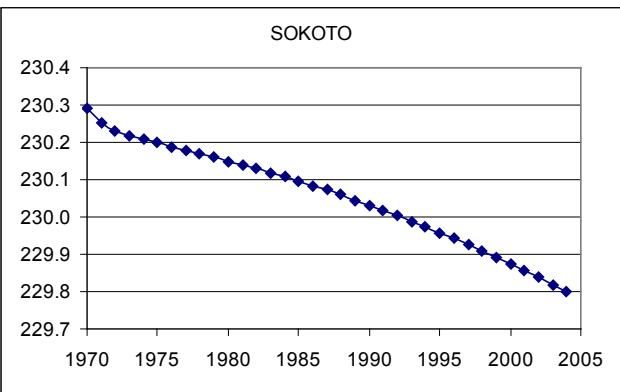
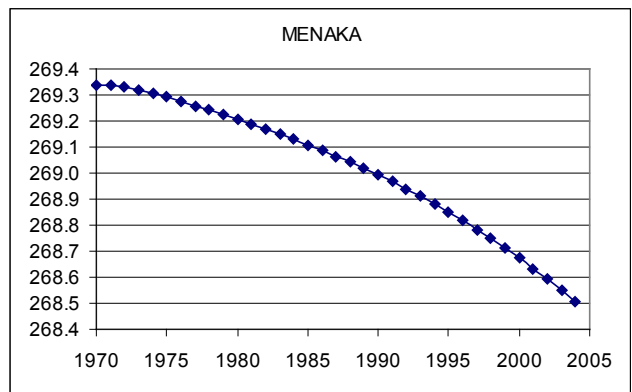
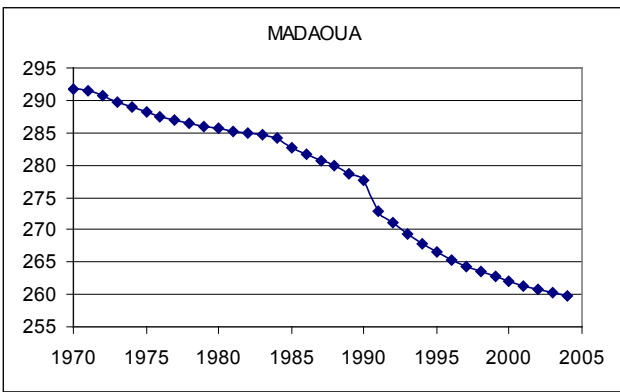
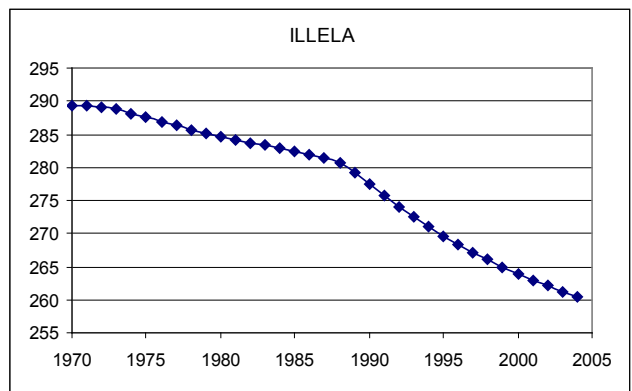
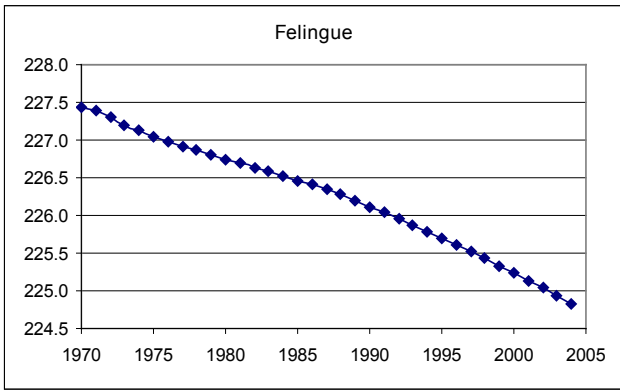
SAAD K. F. (1969). Étude hydrogéologique de l'est du Mali, Rapport 1856/BMS.RD/SCF, 55 pp., UNESCO, Paris.

USGS (1988). Michael G. McDonald & Arlen W. Harbaugh: A modular three dimensional finite-difference ground water flow model

Annexe

CHRONIQUE DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES DE RÉFÉRENCE





Système Aquifère d'Iullemeden

Tome III – Modèle hydrogéologique

L'activité de modélisation hydrogéologique entreprise dans le cadre du projet « Gestion des risques hydrogéologiques du système aquifère d'Iullemeden, (SAI) » fait partie de l'activité Analyse diagnostique transfrontière (ADT). Son objectif est de mieux évaluer les ressources en eau de ce système aquifère et d'identifier les risques hydrogéologiques auxquels est associé son développement.

L'OSS s'est proposé de réaliser ce modèle avec la contribution des équipes nationales et ce, dans la perspective de doter les trois pays concernés d'un outil performant pour la gestion de cette ressource en eau partagée. Il s'agit de faire une analyse critique de l'information disponible et de dégager ses limites pratiques dans l'amélioration des connaissances sur le comportement du système aquifère et dans l'identification des risques hydrogéologiques associés à une exploitation de plus en plus intensive de la ressource.

Ce document présente un bilan hydrogéologique du système aquifère avec ses différentes composantes : recharge, caractéristiques hydrogéologiques (structure, piézométrie, qualité chimique), exploitation et drainance.

L'utilisation du modèle comme outil de simulation du système aquifère permet d'élaborer des scénarios de développement de ses ressources en eaux. Elle permet de répondre aux objectifs de planification dans les trois pays et de dégager l'impact des prélèvements sur le comportement du système aquifère et les tendances des risques.

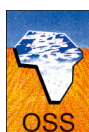
Ce document est la synthèse de l'effort fourni par l'équipe du projet à l'OSS et les experts nationaux associés à la collecte, la mise en forme des données nécessaires pour la modélisation et à la conceptualisation du fonctionnement hydrodynamique de ce système et de ses liaisons avec le milieu environnant ●

- Tome I : Analyse diagnostique transfrontalière
- Tome II : Base de données commune
- Tome IV : Gestion participative des risques transfrontaliers
- Tome V : Suivi-évaluation des aquifères transfrontaliers

Partenaires



Edité avec le soutien financier de



Observatoire du Sahara et du Sahel

Bd du Leader Y. Arafat, BP 31, 1080 Tunis Carthage, Tunisie
Tél. : [+216].71.206.633 - Fax : [+216].71.206.633
URL : www.oss-online.org - Email : boc@oss.org.tn