

OBSERVATOIRE
DU SAHARA
ET DU SAHEL



SAHARA
AND SAHEL
OBSERVATORY

GICRESAIT | GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES
EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'ILLEMEDEN, DE TAODÉNI-
TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER

HYDROGEOLOGIE ET ZONES À FORT POTENTIEL



Mai 2017

**PROJET DE «GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES
EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D’IULLEMEDEN, TAODÉNI
TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER»
(ALGÉRIE, BÉNIN, BURKINA FASO, MALI, MAURITANIE, NIGER, NIGERIA)**

«GICRESAIT»

HYDROGEOLOGIE ET ZONES À FORT POTENTIEL

Mai 2017

Observation du Sahara et du Sahel © 2017

GICRESAIT | Hydrogéologie et zone à fort potentiel / OSS. _ OSS, Tunis : 2017. _ 56 p.

ISBN : 978-9938-933-11-6

Réalisation et impression : Simpact

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS	5
1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE	7
2. CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	8
2.1. Étendue de la zone intéressée par le GICRESAIT	8
2.2. Cadre géographique et climatique	9
2.2.1. Géographie	9
2.2.2. Géomorphologie	9
2.2.3. Climat	9
2.3. Contexte géologique sous-régional	9
3. GÉOLOGIE DES AQUIFÈRES D'ILLEMEDEN -TAOUDENI/TANEZROUFT	12
3.1. Élaboration de la carte géologique numérique	12
3.2. Les formations du Continental intercalaire (Ci)	12
3.3. Les formations du Continental Terminal (CT)	13
4. HYDROGÉOLOGIE	14
4.1. Approche hydrogéologique adoptée	14
4.2. Unités hydrogéologiques distinguées	15
4.2.1. Le bassin de Taoudéni/Tanezrouft	15
4.2.2. Le bassin d'Illemeden	19
4.2.3. Le fossé de Gao, lien entre les aquifères des bassins de Taoudéni/ Tanezrouft et d'Illemeden	20
4.3. Géochimie des eaux	23
4.4. Secteurs identifiés à fort potentiel en eaux souterraines	23
4.4.1. Avec ressources renouvelables abondantes	24
4.4.2. Avec ressources renouvelables limitées	35
5. CONCLUSION	45
6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS

ABN	Autorité du Bassin du Niger
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AMCOW	African Ministers' Council on Water
Ci	Continental intercalaire
CT	Continental Terminal
FAE	Facilité Africaine de l'Eau
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GICRESAIT	Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni /Tanezrouft et du Fleuve Niger
GIS	<i>Geographical Information System</i>
IRD	Institut de la Recherche pour le Développement (anciennement ORSTOM)
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
SAI	Système Aquifère d'Illemeden
SAT	Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft
SIG	Système d'Information Géographique

LE PROJET GICRESAIT «GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'IULLEMEDEN, DE TAOUDENI-TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER»

La gestion intégrée et concertée de toutes les ressources en eau de la région constitue un levier de développement des pays de la sous-région.

Le projet GICRESAIT, financé par la FAE et le FFEM (montant global de 1728 K) a été mené par l'OSS entre 2010 et 2016, avec la participation des sept pays (Algérie, Bénin, Burkina Faso, Mali, Mauritanie, Niger, Nigéria).

Il a permis de :

- Améliorer significativement la connaissance des ressources en eau : Iullemeden et Taoudéni-Tanezrouft forment un seul et unique Système Aquifère transfrontalier
- Identifier des zones à fort potentiel en eaux souterraines
- Construire une base de données régionale
- Traiter de nombreuses thématiques : hydrogéologie, occupation des sols, recharge des nappes, piézométrie des nappes, vulnérabilité au changement du climat, pollution des nappes.

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'Afrique de l'Ouest est dotée de ressources en eau partagées entre plusieurs États, tant au niveau des bassins hydrologiques (Niger, Sénégal, ...) que des systèmes aquifères transfrontaliers tels ceux d'Iullemeden (SAI), de Taoudéni/Tanezrouft (SAT) et le système Sénégal-mauritanien (SASM). Si les bassins hydrographiques ont fait l'objet depuis plusieurs décennies d'une attention particulière en matière de connaissance et de règles communes de gestion, il n'en est pas de même pour les systèmes aquifères transfrontaliers. Leurs ressources sont souvent très mal connues et de plus en plus menacées par l'augmentation de : la demande en eau, la variabilité climatique, la dégradation de leur qualité à cause de pollutions d'origines diverses et de l'appel d'eaux profondes parfois très minéralisées.

De plus, la gestion de ces ressources en eau partagées par deux ou plusieurs pays n'est pas concertée. Une première initiative en la matière a vu le jour en 2004, avec l'étude pour une gestion concertée des deux principaux aquifères transfrontaliers (le Continental intercalaire et le Continental Terminal) constituant le Système Aquifère d'Iullemeden (SAI), partagé dans sa majeure partie par le Mali, le Niger et le Nigeria sur 500.000 km².

Ces ressources en eau souterraines et celles des eaux de surface du fleuve Niger constituent une ressource stratégique de la sous-région de l'Afrique de l'ouest, appelée à jouer un rôle déterminant dans le développement économique et social des pays de la Région. Une étude de l'ensemble des systèmes s'avère nécessaire pour mieux appréhender leurs fonctionnements hydrauliques ainsi que les risques transfrontaliers qui peuvent compromettre les efforts de développement des pays concernés. La connaissance des relations hydrodynamiques et hydrauliques entre les différents aquifères et entre ces aquifères et le delta intérieur du fleuve Niger sont fondamentales pour améliorer la gestion du système hydraulique dans son ensemble, aussi bien au niveau de l'exploitation des ressources de surface que des ressources souterraines.

2. CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. ÉTENDUE DE LA ZONE INTÉRESSÉE PAR LE GICRESAIT

La zone intéressée est comprise entre les longitudes 10° Ouest et 10° Est et les latitudes 10° et 27° Nord (Fig. 1). Elle couvre une superficie de près de 2,6 millions de km² (2 629 303 km²) partagée entre sept (7) pays que sont l'Algérie (450.925 km², 17%), le Bénin (57.338 km², 2%), le Burkina Faso (130.174 km², 5%), le Mali (1.089.407 km², 41%), la Mauritanie (256.374 km², 10%), le Niger (524.813 km², 20%) et le Nigéria (120.272 km², 5%).

Le Système aquifère d'Illemeden et de Taoudéni / Tanezrouft est le second plus grand aquifère du Continent africain, du même ordre d'étendue que le Système aquifère des Grès de Nubie (2,6 millions de km²) partagé par l'Égypte, la Libye, le Soudan et le Tchad.

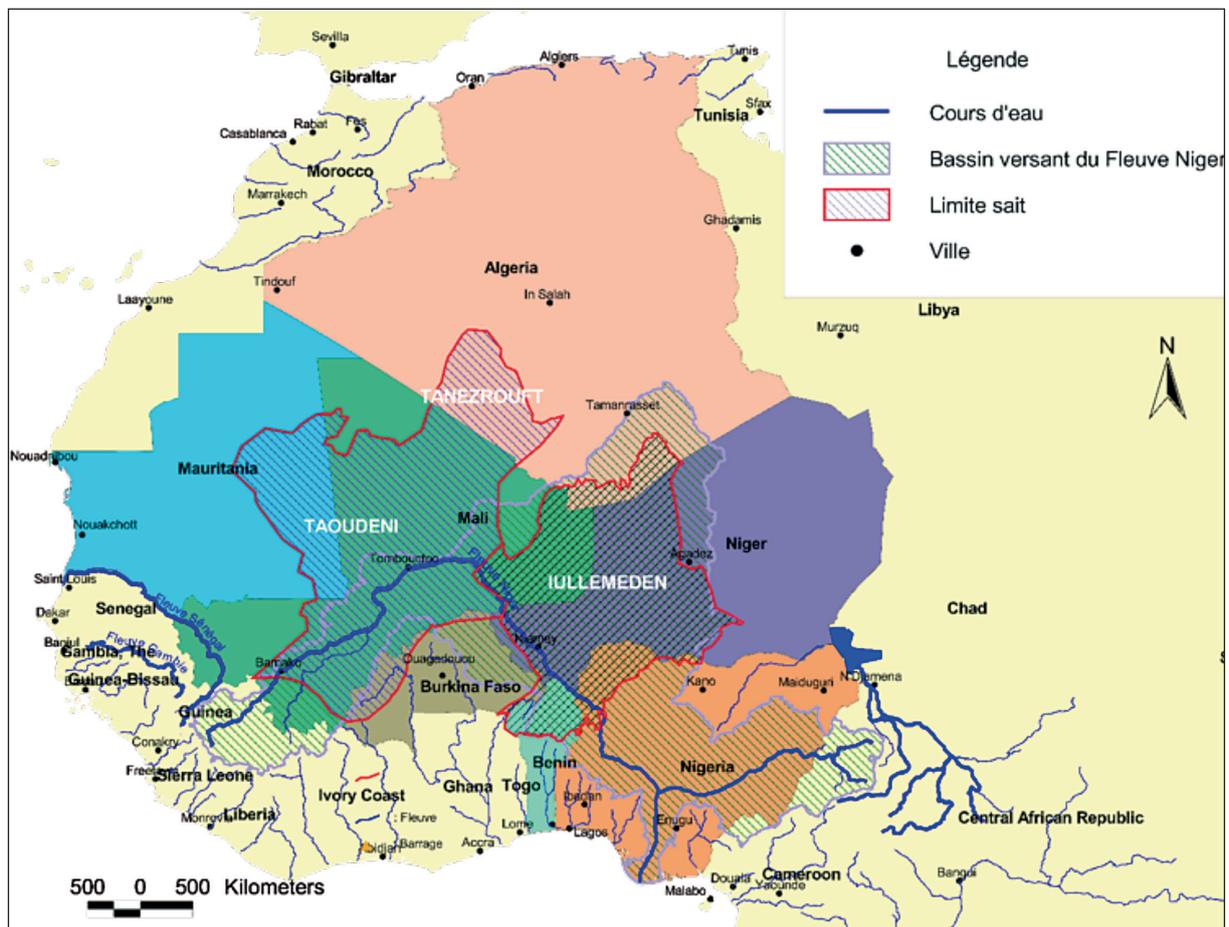


Figure 1 : Zone d'intervention du projet GICRESAIT

Ce domaine ne se limite pas aux seules formations géologiques mais intègre les conditions environnementales qui peuvent interférer sur la qualité des eaux des nappes souterraines.

2.2. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

2.2.1. Géographie

Le relief de ces bassins est constitué de vastes plaines, occupées par des cordons dunaires dans la partie nord, et de plateaux très étendus. Les bordures sont plus accidentées, avec des falaises gréseuses en conformes aux auréoles concentriques des dépôts sédimentaires, surplombant le socle cristallin ou les formations plus anciennes, avec la présence de nombreuses buttes-témoins sous forme de «bowé¹» coiffées par des cuirasses latéritiques ou de pics isolés.

Les altitudes sont modestes et s'étagent d'environ 500 m sur les bordures nord (Tanezrouft en Algérie) voire 600 m et plus dans le pays Dogon (Plateau de Bandiagara au Mali) à 150 m environ dans la vallée du fleuve Niger en aval de la confluence avec la Sokoto River au Nigéria.

2.2.2. Géomorphologie

Parmi les traits marquants de la géomorphologie de cette région, on peut citer :

- la vallée du fleuve Niger qui la traverse en totalité d'ouest en est et assure un lien géographique et économique très fort, dans la partie sa plus peuplée,
- le delta intérieur du fleuve Niger au Mali
- les vallées fossiles des dallols au Niger (Bosso, Maouri, Tarka), et au Mali (Tilemsi)
- de très vastes plaines et plateaux peu élevés (Taoudéni, Tanezrouft, Tamesna, Gondo, Dhar de Néma...).

2.2.3. Climat

La région est subdivisée en quatre zones, dont les limites apparaissent sur les cartes isohyètes :

- la zone soudanienne avec un climat de type guinéen et des précipitations supérieures à 1200 mm par an et parfois 1500 mm,
- la zone soudano sahélienne avec un climat de type tropical et des précipitations comprises entre 700 et 1200 mm,
- la zone sahélienne avec un climat de type sahélien et des précipitations comprises entre 700 et 200 mm, et
- la zone sub-saharienne avec un climat de type subdésertique et des précipitations variant de 200 à moins de 50 mm.

2.3. CONTEXTE GÉOLOGIQUE SOUS-RÉGIONAL

L'Ouest africain est constitué schématiquement par un vaste craton précambrien stable depuis environ 1600 Ma, ceinturé par des zones mobiles qui furent le siège de phénomènes tectoniques importants au Précambrien supérieur, et au Paléozoïque. Ces zones sont : la chaîne panafricaine des Rokelides et la chaîne calédonno-hercynienne des Mauritanides à l'Ouest, la dorsale de Réguibat au Nord et bouclier Touareg du Hoggar au Nord-Est, les chaînes panafricaines des Pharusides et des Dahomeyides à l'Est. Vers le sud, la limite des

¹ Bowé : Plateau cuirassé ferrallitique, fréquent dans l'Ouest africain, limité par une corniche de haut de versant.

Le bassin sédimentaire est constituée par les massifs cristallins anciens que sont la dorsale du Man-Léo et le massif du Gourma (étendus sur la Guinée, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso et le Niger en partie), le Liptako-Gourma (dorsale de Man-Léo, massif du Gourma) et le bouclier nigérien au Nigeria (Fig. 2a et 2b).

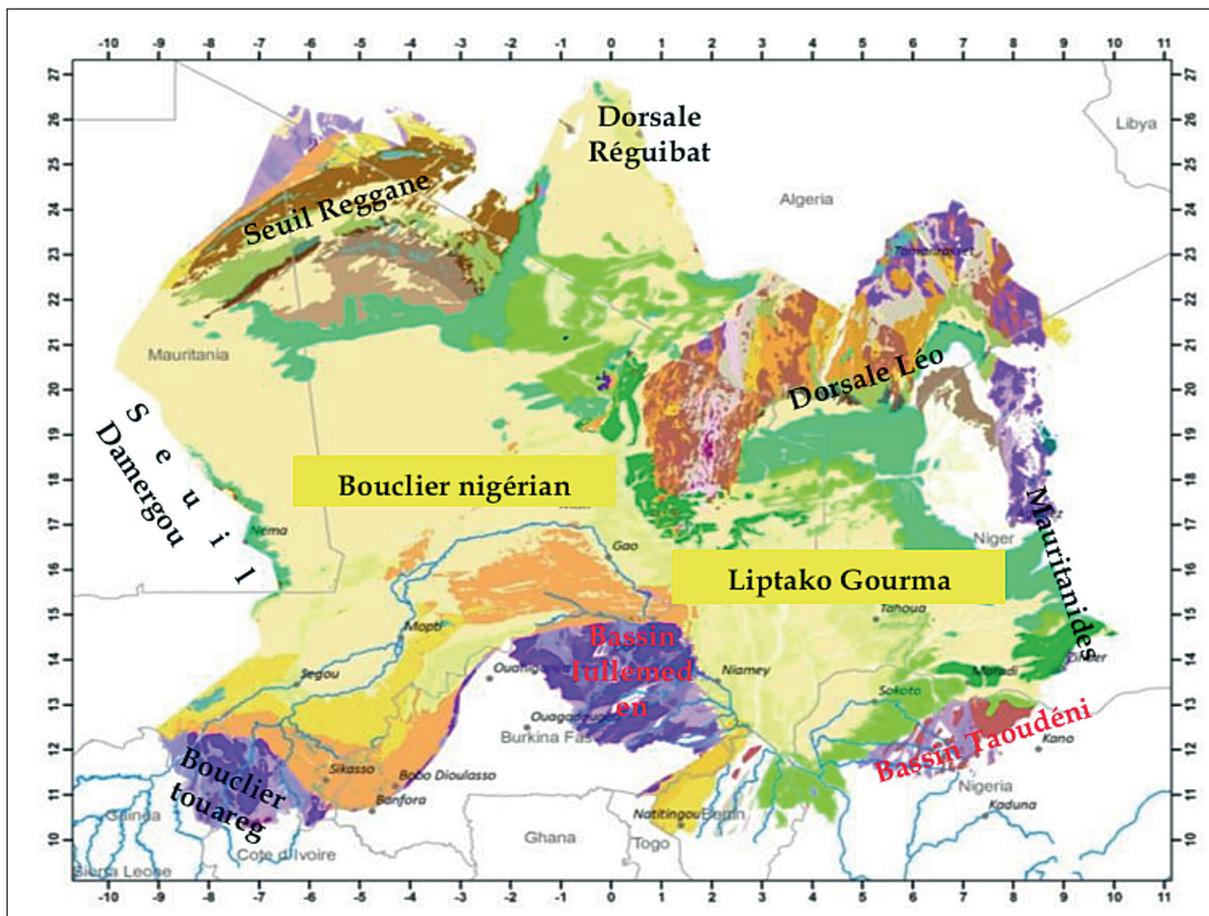


Figure 2 a : Carte géologique des bassins aquifères d'Illemeden et Taouéni/Tanezrouft.

Au sein du craton précambrien de l'ouest africain, les bassins d'Illemeden et de Taouéni/Tanezrouft se sont développés dans de vastes structures tectoniques d'effondrement dans lesquelles se sont accumulés plusieurs milliers de mètres de sédiments détritiques déposés en milieu principalement continental, depuis le Paléozoïque jusqu'au Tertiaire. Des épisodes marins ou lagunaires sont pourtant présents dans les différents termes de la série, matérialisés par des calcaires et marnes.

Le bassin sédimentaire de Taouéni/Tanezrouft est limité au Nord, par la dorsale de Réguibat, au Sud par le craton du bouclier ouest-africain. Il couvre une superficie de 2.000.000 km² dont 1.140.000 km² au Mali et au Burkina Faso, 500.000 km² en Mauritanie et 360.000 km² en Algérie. **Le bassin de Taouéni/Tanezrouft** englobe en Mauritanie les zones de l'Assaba, du Tagant, de l'Adrar, de l'Affolé, de Khat, du Hank et d'El Hodh, au Mali le plateau d'Akennich au Nord, le bassin d'Azaouad, le Delta intérieur du fleuve Niger et le fossé du Nara au centre, et en Algérie la zone méridionale du Tanezrouft, séparée du bassin de Tindouf situé au nord, par le seuil est-ouest proche de Reggane entre le Hoggar et le massif de l'Eglab.

Le bassin sédimentaire d'Iullemeden couvre une superficie d'environ 500 000 km². Il est encadré au Nord par le bouclier touareg qui est constitué par les massifs du Hoggar en Algérie, de l'Aïr au Niger et de l'Adrar des Iforas au Mali, au Sud par le plateau cristallin de Jos (au Nigeria), et à l'ouest par le bombement précambrien du Liptako-Gourma au Burkina Faso et au Niger. A l'est, il est séparé du bassin du lac Tchad par une dorsale subméridienne dénommée « le seuil de Damergou ». **Le bassin d'Iullemeden** comprend, dans sa partie Nord, le bassin du Tamesna, avec ses sous-bassins de l'Azaouak et de Tin Séririne et Tim Mersoï, appuyé à l'Est sur l'Aïr ; les plaines de l'Irhazer et du Tégama au centre, et au sud le bassin de Sokoto, qui est limité au sud par les reliefs cristallins du *Basement Complex* au Nigeria et de l'Atakora au Bénin.

Légende

	Quaternaire sédimentaire
	Quaternaire & Plio-quaternaire sédimentaire continental
	Paléogène-Néogène sédimentaire marin
	Paléogène-Néogène sédimentaire continental
	Mésozoïque sédimentaire continental - ("Grès Nubiens supérieurs")
	Crétacé supérieur sédimentaire
	Crétacé supérieur sédimentaire continental
	"Dolérites", volcano-plutonisme et plutonisme (carbonatite & syénite), Mésozoïque
	Cambrien-Ordovicien sédimentaire
	Néoprotérozoïque 3 à Cambrien inférieur sédimentaire ("Limite Protérozoïque-Paléozoïque") continental localement à dépôts glaciaires
	Plutonisme ("Older Granites") & volcano-plutonisme, Néoprotérozoïque à Cambrien
	Tonalites-Trondjhemites, Néoprotérozoïque 2 à Cambrien
	Néoprotérozoïque 2-3 sédimentaire à volcano-sédimentaire ("marge active")
	Néoprotérozoïque 2 à Cambrien sédimentaire à dépôts glaciaires (NP2-E) puis interglaciaires (NP3) ("bassins d'avant-chaîne")
	Néoprotérozoïque 1-2 sédimentaire à volcano-sédimentaire et plutonisme associé
	Néoprotérozoïque 1-2 sédimentaire ("bassins d'avant-chaîne")
	Plutonisme, volcano-plutonisme & "Dolérites", Néoprotérozoïque 1-2
	"Ceinture mobile" du Néoprotérozoïque à complexes métamorphiques, anatectiques & plutoniques et à reliques de terrains archéens à protérozoïques
	Paléoprotérozoïque 3-4 sédimentaire
	Plutonisme, volcano-plutonisme & complexes charnockitiques ("éburnéens" finaux), Paléoprotérozoïque 3-4
	Plutonisme et complexes anatectiques ("éburnéens" précoces), Paléoprotérozoïque 1-3
	Tonalite-Trondjhemite Paléoprotérozoïque 1-3
	Leucogranite Paléoprotérozoïque 1-3
	Paléoprotérozoïque 2-3 sédimentaire à volcano-sédimentaire indifférencié
	Plutonisme et complexes métamorphiques, Paléoarchéen-Mésoarchéen
	Quaternaire sédimentaire lacustre
	Carbonifère supérieur sédimentaire
	Carbonifère inférieur sédimentaire
	Dévonien sédimentaire indifférencié continental ou marin
	Ordovicien-Silurien sédimentaire continental
	Ordovicien-Silurien sédimentaire marin
	Complexes gneissiques indifférenciés, Paléoarchéen
	Paléoprotérozoïque 2-3 - Ceintures de roches vertes "bimodales" tardives
	Paléoprotérozoïque 2-3 - Ceintures de roches vertes à dominante tholéitique précoces, ("ghanéennes")
	Paléoprotérozoïque 2-3 sédimentaire "Tarkwaïen" ("Bassins d'avant-chaîne" tardifs)
	Paléoprotérozoïque 2-3 sédimentaire "flyschoïde" ("Bassins d'avant-chaîne" précoces)
	Domaine tectonométamorphique composite (localement en marge du craton archéen), constituée de terrains paléoprotérozoïques et archéens accolés
	Complexes gneissiques, Néoarchéen à Paléoprotérozoïque 1
	Plutonisme Paléoprotérozoïque indifférencié
	Volcano-plutonisme et plutonisme, Dévonien à Permo-Carbonifère

Figure 2 b: Légende de la carte géologique des bassins sédimentaires d'Iullemeden -Taoudénit Tanezrouft

La puissance de la couverture sédimentaire est nulle en bordure des *bassins d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft*, comme sur le versant de l'Adrar des Iforas, du Hoggar, ou du Gourma ; et peut atteindre plusieurs milliers de mètres au centre des bassins comme le montrent les forages d'exploration pétrolière dans le bassin de Taoudéni/Tanezrouft (Ouasa, Yarba el Mrayer) ou d'Iullemeden (elle est d'environ 2000 m dans le forage de Tahabanat au sud-est de l'Adrar des Iforas). Cette couverture est composée essentiellement de roches détritiques qui se sont déposées du Secondaire au Quaternaire, principalement en milieu continental.

Enfin, *les bassins d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft* sont traversés par le fleuve Niger sur plus de 2300 km dont 1750 km au Mali et 700 km au Niger). Le fleuve Niger, long de près de 4200 km (le 3^e d'Afrique et le 9^{ème} du monde) issu des reliefs guinéens, draine une superficie de l'ordre de 2.100.000 km², soit un tiers de la superficie totale de la région ouest-africaine.

3. GEOLOGIE DES AQUIFERES D'ILLEMEDEN -TAOUDENI/TANEZROUFT

3.1. ÉLABORATION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE NUMÉRIQUE

Sur la base des données et informations recueillies dans le cadre du projet GICRESAIT, la carte géologique des bassins aquifères d'Iullemeden et Taoudéni/Tanezrouft a été réalisée à l'échelle 1/1.500.000^e (Fig. 2a et 2b). Elle couvre les deux principales formations aquifères des bassins d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft que sont le Continental intercalaire (Ci) et le Continental Terminal (CT). Elle couvre aussi les formations sédimentaires qui leur sont interconnectées à savoir : les formations paléozoïques sous-jacentes et certaines formations infracambriennes.

Pour la réalisation de la carte géologique dans le bassin de Taoudéni-Tanezrouft, les formations intrusives doléritiques, granitiques et métamorphiques de Adrar des Iforas du socle, du Primaire indifférencié du Gourma (Burkina et Mali) et de Mauritanie (Hank, Hodh) et de la plupart des formations de l'Infracambrien plissé et tabulaire, ont été éliminées. Les formations intrusives doléritiques, bien que très aquifères, n'ont pas été considérées car elles constituent des poches calcaréo-dolomitiques isolées qu'on rencontre dans la zone de Niore du Sahel.

Certaines formations sédimentaires du Quaternaire bien qu'en continuité avec les formations du Ci et du CT ont été éliminées à l'ouest (dans la zone de Niore du Sahel) parce qu'elles sont sèches.

Certaines formations ont été conservées en raison de leur potentialité de continuité hydraulique avec les formations du Ci et CT, dans une logique de «Système Aquifère». Enfin toutes les formations à dominantes généralisées calcaires ou dolomitiques sont conservées.

3.2. LES FORMATIONS DU CONTINENTAL INTERCALAIRE (Ci)

Le Continental intercalaire (Ci) est représenté par les formations du Crétacé supérieur. L'épaisseur du Ci dépasse les 1500 m dans la partie à l'est et au sud de l'Adrar des Iforas.

Au Mali et au Niger, les formations du Crétacé supérieur- Éocène représentent des séries marines qui comprennent le Cénomaniens-Turonien indifférencié, le Sénonien et le Danien-Maëstrichtien indifférencié. Ces formations sont caractérisées comme suit :

- *Cénomaniens* : argiles, argilites et schistes avec des intercalations de minces couches de marne et de calcaire.
- *Turonien supérieur* : argiles et minces couches de calcaires
- *Sénonien* : argiles, argilites avec intercalations de minces couches de sables argileux.
- *Danien* : argiles, marnes et calcaires
- *Paléogène inférieur et moyen* : argiles, marnes et calcaires.

L'épaisseur du Crétacé dans l'ensemble est de l'ordre de 300 à 400 m dans la partie à l'est de l'Adrar des Iforas et de 100 m dans la partie à l'ouest de l'Adrar des Iforas.

Dans le bassin du Tanezrouft, c'est-à-dire dans le prolongement nord du bassin de Taoudéni en Algérie, seul le Continental intercalaire est présent, avec une épaisseur pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres. Ces formations rapportées au Crétacé supérieur sont aquifères et assez bien connues en forages ; elles sont subdivisées en trois assises, de bas en haut :

- Assise continentale terrigène à dominante gréseuse ;
- Assise lagunaire comportant des calcaires, dolomies et des niveaux de gypse ;
- Assise marine avec alternance de calcaires, argiles, dolomies et quelques niveaux gréseux.

Ces formations sont caractérisées par de fortes variations latérales de faciès liées à une l'évolution du bassin sous l'influence de mouvements structuraux du socle.

Les formations primaires et le Crétacé inférieur sous-jacentes n'ont pas été intégrés à la zone d'étude dans le Tanezrouft car elles sont très peu connues en forage et on ne dispose d'aucune donnée hydrogéologique les concernant.

3.3. LES FORMATIONS DU CONTINENTAL TERMINAL (CT)

Les formations du Continental Terminal (CT) se sont déposées principalement au Tertiaire, au Miocène et au Pliocène. Au Mali, leur aire d'accumulation déborde, vers le Sud, celle du Continental intercalaire, constituant ainsi le remplissage de nouvelles zones déprimées où les dépôts reposent directement sur le substratum précambrien : cuvette du Delta intérieur du Niger, bassin de l'Azaouad sud, fossé de Gao (ou «détroit soudanais») et plaine du Gondo. La lithostratigraphie des dépôts est très variable avec des alternances de niveaux sableux de différentes granulométries, souvent en lenticulaire, et d'argiles.

L'épaisseur du Continental Terminal est d'une centaine de mètres en moyenne dans le delta intérieur et peut atteindre 2000m dans le fossé de Gao.

4. HYDROGÉOLOGIE

4.1. APPROCHE HYDROGÉOLOGIQUE ADOPTÉE

Deux approches très sensiblement différentes ont été pratiquées entre les systèmes aquifères d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft :

- **cas du bassin des Iullemeden**, les deux grands aquifères du Continental intercalaire et du Continental Terminal ont été pris en compte de manière séparée, à l'exclusion des formations sous-jacentes, cela a débouché sur une modélisation bicouche ;
- **cas du bassin de Taoudéni/Tanezrouft**, prise en compte des aquifères du Continental intercalaire et du Continental Terminal et de certaines formations sédimentaires sous-jacentes en continuité, sous la forme d'une seule entité. La complexité sédimentaire et structurale, et la rareté des données dans certaines régions, amène à envisager une modélisation monocouche de ces aquifères.

Cette différence d'approche s'explique par des conditions hydrogéologiques et structurales contrastées entre les deux bassins :

Dans le système aquifère d'Iullemeden :

La structure géométrique du bassin est relativement simple. La série sédimentaire qu'il contient :

- Structure en vaste et profonde cuvette, de forme relativement simple, fermée au nord par des reliefs (Aïr, Hoggar et Adrar des Iforas) et ouverte au sud dans la zone structurale d'effondrement du Parc du W, à l'endroit où le fleuve Niger draine les aquifères du Ci et du CT vers un exutoire unique majeur représenté par la vallée du fleuve Niger à son entrée au Nigeria, dans le secteur de convergence des frontières du Bénin et du Burkina Faso (branche Ouest du West African Rift Sub-system) ;
- Série sédimentaire d'âge primaire sous-jacente présentant relativement peu de discontinuités de dépôt, et comprenant de grandes séquences argileuses isolant efficacement le Ci et le CT des aquifères profonds du Primaire dont les nappes sont en charge, et l'eau généralement saumâtre ;
- Les niveaux aquifères du Ci et du CT, bien qu'ils présentent des variations de faciès et d'épaisseur, sont en général bien séparés par une séquence intermédiaire argileuse (argiles de l'Irhazer, schistes papyracés...), d'où une piézométrie qui peut être individualisée et incite à les modéliser sous la forme de deux couches distinctes.

Dans le système aquifère de Taoudéni/Tanezrouft :

La très grande étendue, et la structure géométrique complexe de l'ossature du bassin due à son histoire tectonique, entraînent une forte variabilité de la couverture sédimentaire. Les aquifères du Ci et du CT ne sont pas nettement séparés et se trouvent fréquemment en continuité avec des formations sous-jacentes très variées poreuses ou fissurées à grande échelle :

- La structure d'ensemble du bassin Mésozoïque et Cénozoïque du Ci et du CT est perturbée par une tectonique cassante, active lors des dépôts à différentes époques géologiques, et qui est responsable de cloisonnements à toutes les échelles, de très fortes variations d'épaisseur et de faciès, et de structures d'effondrement de grande ampleur (fossé de Nara, fossé de Gao) ou de seuils (seuil de Bamako, d'Abolag et Ouasa, dorsale d'Azoulad etc.). On est en présence de plusieurs sous-bassins dans lesquels les conditions hydrogéologiques peuvent être très différentes. Il n'existe pas un exutoire unique, mais plusieurs non encore complètement définis: fleuve Niger via le fossé de Gao, diffluence vers le bassin de la Volta (bassin du Gondo, secteur sud-est du bassin de Taoudéni au Burkina Faso) ;
- La série sédimentaire d'âge primaire du bassin présente une variabilité de faciès et d'épaisseur qui reflète les conditions perturbées de la sédimentation et les effets des mouvements tectoniques. Les formations profondes du Primaire, qui correspondent à des aquifères poreux ou fissurés en grand, sont en continuité hydraulique fréquente avec les terrains du Ci et du CT sus-jacents, avec une qualité d'eau satisfaisante, ce qui fait considérer l'ensemble comme contenant une nappe commune. A l'échelle du système aquifère de Taoudéni/Tanezrouft, ce critère pragmatique de continuité de la ressource en eau amène donc à prendre en compte une seule couche à modéliser sur le plan hydrodynamique.

4.2. UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES DISTINGUÉES

4.2.1. Le bassin de Taoudéni/Tanezrouft

Le territoire malien est très majoritaire dans ce bassin, et l'hydrogéologie locale a fait l'objet de synthèses remarquables et détaillées depuis les années 1970 ; il a servi de référence centrale par rapport aux apophyses de ses principales formations dans les pays voisins : Algérie (Tanezrouft), Mauritanie (Dhar de Néma), Burkina (Gondo et Gourma) et Niger (Azaouak, Tamesna).

A. Aquifères discontinus

a. Les calcaires du Viséen

Les calcaires du Viséen affleurent dans le secteur central de la cuvette de Taoudéni. Ils sont fracturés et karstifiés en surface, et sont surmontés par plusieurs centaines de mètres d'épaisseur d'argiles rouges du Namurien qui sont stériles et constituent le **mur imperméable de l'aquifère généralisé du Continental intercalaire de l'Azaouad**.

Les formations de l'Infracambrien, du Cambro-silurien et du Dévonien qui affleurent sur le flanc nord de la cuvette de Taoudéni dans l'Erg Chech et le Kreb en Naga, comportent des séries de grès et de calcaires fissurés. Ces formations sont probablement aquifères avec des eaux moins salines que celles du Carbonifère, mais il s'agit de nappes discontinues et sur lesquelles aucune donnée hydrogéologique n'est disponible.

b. Les intrusions doléritiques dans les formations cambriennes (zone de Nioro du Sahel)

Les intrusions doléritiques se sont principalement mises en place au Trias. Elles recoupent les formations du socle et de l'Infracambrien sous la forme de dykes subverticaux et de sills interstratifiés dans les séquences pélitiques de l'Infracambrien. L'épaisseur des filons,

variable, peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et leur extension longitudinale, plusieurs dizaines de kilomètres lorsqu'ils sont associés à des linéaments structuraux majeurs. Les filons couches peuvent constituer dans certains secteurs des plateaux Mandingues des laccolites qui s'étendent sur plusieurs centaines de km².

Cependant **ces formations sont discontinues ; elles n'assurent aucune continuité hydraulique avec les autres formations sédimentaires**. De ce fait, elles n'ont pas été retenues dans le cadre de l'étude régionale du projet GICRESAIT, même si elles représentent localement des potentialités hydrogéologiques très intéressantes avec des forages pouvant fournir 30 à 50 m³/h en moyenne.

B. Aquifères généralisés

Les principaux aquifères généralisés du Mali, de la Mauritanie et du Burkina Faso sont le Continental intercalaire et le Continental Terminal (et, à un moindre degré, le Crétacé supérieur/Éocène inférieur).

Ces aquifères sont caractérisés par une perméabilité de type intergranulaire et par des nappes continues couvrant la majeure partie des régions sahéennes et désertiques de l'est et du nord pour une superficie totale de plus de 630.000 km² (51 % de la superficie du Mali). Ils sont constitués par des formations essentiellement détritiques et d'origine continentale qui se sont accumulées, depuis le Secondaire, dans trois vastes bassins sédimentaires : (1) le bassin de Taoudéni/Tanezrouft - partie centrale et méridionale, (2) le Detroit soudanais et (3) le bassin du Niger - partie malienne.

L'épaisseur de ces formations essentiellement sablo-argileuses varie en fonction des mouvements orogéniques qui se sont produits dans leur aire de sédimentation durant la fin du Secondaire et au début du Tertiaire d'où des couches lenticulaires où alternent des argiles et des sables de granulométrie variée et plus ou moins grésifiés.

a. Aquifère du Continental intercalaire

Dans le secteur nord du bassin de Taoudéni/Tanezrouft où affleure le Continental intercalaire, la nappe est libre avec des profondeurs de niveau supérieures à 40 m. Vers le sud, et même dans certains secteurs du Tanezrouft, elle est mise en charge par les couches du Crétacé supérieur et, du fait de l'abaissement de la topographie, les niveaux piézométriques deviennent peu profonds et localement artésiens. La profondeur des couches aquifères du Continental intercalaire dépasse alors 300 m. L'épaisseur totale de la série n'est souvent pas connue par manque de forages suffisamment profonds.

b. Aquifère du Continental intercalaire/Continental Terminal

Il occupe les parties centrale et nord du bassin de l'Azaouad, ainsi que le fossé de Nara avec une superficie totale de près de 210.000 km². Les similitudes de faciès des formations du Continental intercalaire et du Continental Terminal ne permettent pas de les distinguer. Ces séries continentales anciennes sont couvertes par des dunes quaternaires et, localement, par des dépôts lacustres de l'Holocène qui affleurent dans les creux inter-dunaires. En raison de la piézométrie déprimée qui caractérise ce système aquifère, les formations du Continental Terminal et du Quaternaire sont en général dénoyées et **les ressources en eau sont, en fait, contenues essentiellement dans l'aquifère du Continental intercalaire**.

L'Unité de l'Azaouad nord comprend la partie du bassin de l'Azaouad située au nord de la dorsale de l'Azaouad jusqu'au plateau du Khenachich. Vers l'est, elle vient au contact des formations du Crétacé supérieur/Éocène inférieur du Tanezrouft en Algérie. Vers l'ouest, elle se poursuit en Mauritanie dans la région du Dhar de Néma. L'épaisseur moyenne des formations continentales est de l'ordre de 150 à 200 m ; elle se réduit à moins de 100 m à Foum el Alba en bordure du plateau du Khenachich ainsi qu'au voisinage de la dorsale de l'Azaouad où le substratum affleure.

En revanche, son épaisseur croît vers l'Ouest et pourrait atteindre 500 m près de la frontière Est de la Mauritanie, avant de décroître encore plus à l'ouest près de la bordure du bassin, où le Continental intercalaire est affecté d'un large biseau sec le long de la cuesta gréseuse de la «falaise du Dhar» près de la ville de Néma. La limite ouest de l'aquifère en Mauritanie correspond à l'intersection de deux plans : (1) la base du réservoir gréseux au contact du substratum précambrien schisteux, et (2) le niveau piézométrique. Au-dessus de la surface piézométrique, le réservoir gréseux est vide car dénoyé, ce qui entraîne la présence d'un biseau sec particulièrement étendu, qui est un trait marquant de l'hydrogéologie de l'est de la Mauritanie.

Le mur de l'aquifère est constitué au nord par les séries schisto-gréseuses de l'Infracambrien (pélites du Hodh) et par les formations calcaires et argileuses du Carbonifère et du Cambro-ordovicien dans la partie sud. La limite entre les deux secteurs est constituée par la «flexure d'Araouane» qui correspond à une zone d'accidents d'orientation OSO-ENE provoquant le plongement des couches infracambriennes et primaires. Les formations aquifères sont constituées de sables et de grès localement grossiers avec des intercalations d'argiles plus ou moins sableuses. L'ensemble constitue une nappe libre multicouche.

L'Unité du fossé de Nara est circonscrite au fossé d'effondrement situé sur la bordure Sud-Ouest du bassin de l'Azaouad, entre Nara et le lac Faguibine. L'épaisseur des formations continentales dépasserait 500 m dans la zone axiale du fossé et se réduit sur ses bordures à moins de 50 m par suite d'un système de failles en gradins faisant remonter le substratum.

Le Continental intercalaire est composé principalement de sables et de grès de granulométrie et d'induration variables, les niveaux argileux étant peu fréquents. La couche aquifère supérieure est libre et exploitée par de nombreux puits traditionnels avec un niveau statique entre 45 et 60 m de profondeur. Sur les bordures, une épaisse séquence argileuse la sépare d'un horizon aquifère inférieur captif associé à un niveau de grès grossiers et conglomératiques marquant la base de la série continentale.

c. Aquifère du Crétacé supérieur / Éocène inférieur

Cet aquifère est localisé à la périphérie occidentale de l'Adrar des Iforas. Il est caractérisé par des épaisseurs très variables de moins de 100 m à plus de 400 m. Les formations sont constituées principalement d'argilites, de schistes et de grès argileux avec des intercalations de niveaux calcaires. A l'ouest et au sud de l'Adrar, elles reposent directement sur le socle précambrien tandis qu'au nord et au sud-est, elles sont en contact avec le Continental intercalaire. Considérées globalement, les formations du Crétacé supérieur et de l'Éocène inférieur constituent un aquifère de qualité médiocre.

d. Aquifère du Continental Terminal / Quaternaire

Cet aquifère est lié au fleuve Niger dont il contient la nappe d'accompagnement. Il couvre les vastes plaines alluviales qui s'étendent de part et d'autre du fleuve Niger à l'aval de Ségou jusqu'à Gao ainsi que le sud de l'Azaouad et les glacis de la bordure sud de l'Adrar des Iforas.

Sa superficie totale est proche de 200.000 km² et il est situé essentiellement en zone climatique sahélienne et subdésertique avec des précipitations annuelles allant de 600 mm dans les secteurs les plus méridionaux à moins de 100 mm sur la limite nord. Les caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère sont liées à la présence d'eaux de surface permanentes et à l'extension des zones d'inondation couvertes par les crues du fleuve Niger.

Dans le bassin de Taoudéni au Mali, la nappe d'accompagnement est extrêmement étendue et repose sur le Système Aquifère constitué par les formations du Ci et du CT avec lequel elle est en continuité.

Dans le bassin d'Illemeden, en aval du «fossé de Gao» (voir ci-après), c'est à dire entre Ansongo et la confluence du Dallol Bosso très en aval de Niamey, le cours du fleuve Niger est largement indépendant des aquifères du Ci et du CT, car il coule sur les formations de socle sous-jacentes.

Quatre unités dans cet aquifère se distinguent au Mali :

- ***L'Unité du Delta intérieur*** avec un secteur ouest correspondant à la zone du Delta fossile ou delta mort du fleuve Niger avec des formations relativement peu épaisses (30 à 80 m). Un secteur central qui couvre le delta vif actuel constitué par le réseau des différents bras du fleuve Niger, par les lacs qu'ils alimentent et par les plaines d'inondation saisonnière. L'épaisseur moyenne des formations continentales est de l'ordre de 100 m. Le secteur sud s'étend entre Ségou et Mopti sur les plaines alluviales situées entre le Niger et le Bani et au sud jusqu'à la bordure des plateaux gréseux de San et de Bandiagara. Les dépôts continentaux, souvent très argileux, ont des épaisseurs variant de 30 à 80 m.
- ***L'Unité de Azaouad sud*** est limitée au nord et au sud par les affleurements de schistes infracambriens plissés de la dorsale de l'Azaouad et du Gourma. Vers l'ouest, elle est en continuité hydraulique avec celle du Gourma nord-ouest. L'épaisseur du Continental Terminal croit de l'ouest vers l'est et dépasse 300 m dans les compartiments déprimés. Les formations sont sablo-argileuses avec des horizons grésifiés, la partie inférieure des dépôts étant plus argileuse.
- ***L'Unité du fossé de Gao*** s'étend sur la majeure partie du détroit soudanais et sur le flanc sud-est de l'Adrar des Iforas. Dans le secteur du fossé de Gao, le Continental Terminal est très épais. Il comble un compartiment effondré de l'Infracambrien. Sur les flancs ouest et sud de l'Adrar, son épaisseur se réduit progressivement de 200 m à moins de 30 m et il repose sur les couches de l'Éocène inférieur. Les faciès sont essentiellement argileux dans le secteur du fossé de Gao, mais des niveaux sableux grossiers ont été recoupés en profondeur par le forage de reconnaissance pétrolière d'Ansongo. En bordure de l'Adrar, des niveaux de sables, de sables argileux et de grès à oolithes ferrugineuses ainsi que des horizons de lignite sont interstratifiés dans les séries argileuses. Les horizons aquifères, associés aux lentilles sableuses, sont d'épaisseur très variable. Au sud de l'Adrar, les caractéristiques hydrochimiques des eaux du Continental Terminal sembleraient indiquer l'existence de transferts en provenance de l'aquifère du Crétacé supérieur / Éocène inférieur.

- **L'Unité du Gourma nord-ouest** couvre la partie avale du delta intérieur, à l'Est d'une ligne Niafouké-Korientzé, ainsi que la bordure nord-ouest du Gourma où les alluvions anciennes sont recouvertes par des systèmes dunaires. Les surfaces temporairement inondées sont d'extension réduite sauf dans la zone des lacs de Bambara Maoundé. L'aquifère est essentiellement sableux, son épaisseur ne dépasse pas quelques dizaines de mètres en raison de la remontée du substratum infracambrien.
- **Les terrasses alluviales** d'âge quaternaire bordant le fleuve Niger sont constituées de limons argileux et des lentilles sableuses. Ces alluvions, dont l'épaisseur est de l'ordre de 20 m ne sont aquifères qu'en bordure du fleuve et s'intègrent alors au système aquifère multicouche à nappe libre du Continental Terminal.

e. Aquifères du recouvrement ou aquifères superficiels

Des formations récentes, en général meubles ou peu consolidées, d'âge et d'origine variés, couvrent des surfaces étendues. Elles ont un rôle hydrogéologique important car elles constituent le premier réservoir interceptant les eaux d'infiltration générées par les précipitations et le ruissellement local. Elles ne forment toutefois des aquifères exploitables que lorsqu'elles sont suffisamment perméables et bénéficient d'une recharge périodique suffisante pour compenser les pertes importantes par évapotranspiration dues à leur faible profondeur.

4.2.2. Le bassin d'Iullemeden

La couverture sédimentaire du bassin d'Iullemeden peut être divisée en 5 entités :

- Séries de l'Infracambrien**, recouvrant horizontalement le socle, sont déposées au cours du Primaire, lorsque le bassin d'Iullemeden est composé par un golfe marin ouvert vers le Nord. La sédimentation est à dominante détritico-deltaïque sur les bordures.
- Formation du Continental intercalaire** : sédimentation détritico-deltaïque à caractère continental reposant en discordance sur les séries sous-jacentes, déposée du Permien au Cénomaniens inférieur, durant plus de 150 MA, cet ensemble est recouvert par la première transgression du Cénomaniens supérieur.
- Formations du «Continental Hamadien»** déposées entre le Crétacé supérieur (Cénomaniens supérieur) et l'Éocène inférieur, au cours d'une série de cycles sédimentaires commandée par le soulèvement de la marge nord-est du bassin. Les dépôts montrent en auréoles concentriques le tracé du bassin d'Iullemeden. Ils sont divisés en :
 - gypse et carbonates sablo-argileux consolidés (Cénomaniens supérieur - Turonien inférieur),
 - Calcaire et marnes (Turonien supérieur),
 - Calcaire et argilite marins (Sénonien moyen et inférieur),
 - Grès, argilite et argiles (Sénonien supérieur),
 - Carbonates et argilites marins de l'Éocène inférieur et dépôts indifférenciés du Continental Hamadien, composés d'argilite, grès, calcaire et conglomérats.
- Formations du «Continental Terminal»** de l'Éocène au Pliocène, qui couvrent la partie centrale du bassin d'Iullemeden. Elles n'ont que quelques dizaines de mètres d'épaisseur

aux abords du Birrimien, mais atteignent 450 m de puissance dans le centre du bassin. La sédimentation est à dominante gréso-argileuse mais comprend aussi des dépôts chimiques et biochimiques : calcaires, phosphates et attapulgites.

e) *Dépôts alluviaux, Regs, dunes* et dépôts sableux quaternaires.

On distingue plusieurs types de dépôts alluviaux :

- dépôts alluviaux récents de compositions diverses présents le long du fleuve Niger et de ses affluents, disposés en plusieurs niveaux de terrasses,
- dépôts argileux représentant d'anciennes vallées du fleuve du Pléistocène, originaires de l'Air et du Hoggar, recouverts plus tard de pélites,
- plaines alluviales du Pléistocène avec des graviers de quartz, comme par exemple dans la région sud de Maradi.

La fréquence des dunes mobiles, dunes fixes, et autres couvertures sableuses augmente avec la latitude. Ces formations datent des phases arides du Pléistocène et de l'Holocène et couvrent à présent de larges superficies du bassin d'Illemeden et du socle. Elles constituent un remplissage des vallées fossiles.

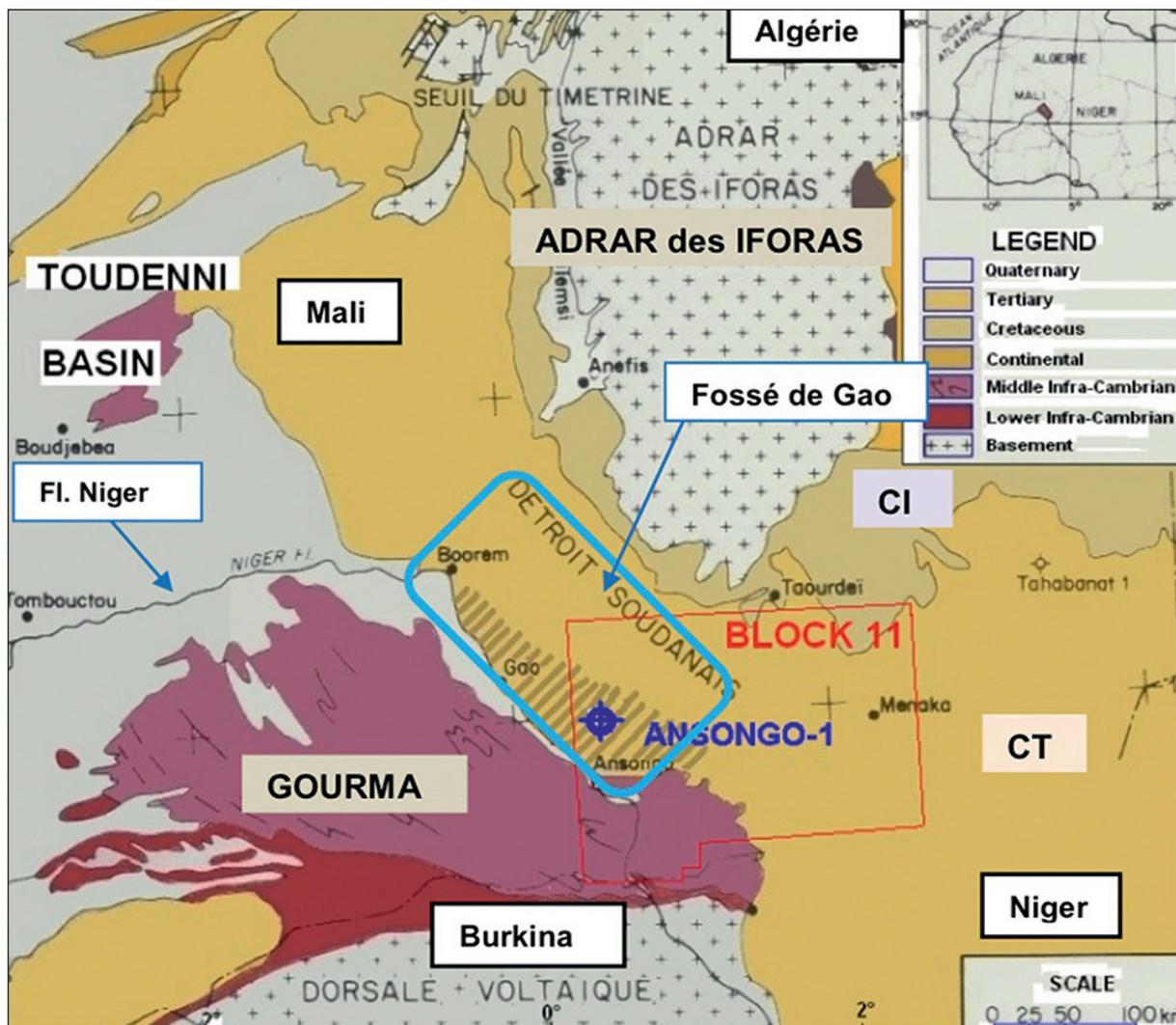
4.2.3. Le fossé de Gao, lien entre les aquifères des bassins de Taoudéni/Tanezrouft et d'Illemeden

La liaison entre les grands systèmes aquifères de Taoudéni/Tanezrouft à l'Ouest et d'Illemeden à l'Est est assurée par un étroit couloir sédimentaire, le «Détroit Soudanais» aussi dénommé «fossé de Gao» qui correspond géographiquement à un tronçon de la vallée du fleuve Niger dans la région de Gao, au Mali, entre le massif de l'Adrar des Iforas au nord et le Gourma au sud.

En dehors d'un éventuel potentiel pétrolier qui a motivé certaines investigations géophysiques et par forage (Ansongo 1), les questions posées par cette structure sont de différents ordres : rôle hydrogéologique réel de communication entre les deux bassins, rapports entre le fleuve Niger et la nappe contenue dans les formations sédimentaires présentes, potentialités quantitatives et qualitatives en eaux souterraines.

A. Contexte structural et géologique du Fossé de Gao

Il s'agit d'une structure géologique d'effondrement allongée suivant une direction nord-ouest-sud est, affectant le socle précambrien. Sa superficie est de 15.000 km² environ, avec une longueur de 400 km et une largeur variant de 15 à 100 km (Fig. 3). Sur la base de données de prospections géophysiques gravimétrique, aéromagnétique et sismique pétrolière (permis du «block 11»), sa profondeur a été estimée à plus de 3.000 mètres. Le forage d'exploration pétrolière d'Ansongo 1, foré en 1979, a reconnu une série sédimentaire épaisse de 1645 m. Ce forage a identifié le socle sous-jacent jusqu'à 1897 m. La limite sud-ouest de cette structure, qui s'apparente à un demi-rift, est matérialisée par la faille majeure d'effondrement du Niger, qui la sépare du socle précambrien cristallin et métamorphique du Gourma. La limite nord-est correspond à la remontée du socle précambrien de la terminaison sud de l'Adrar des Iforas.



Source: P. Laroche 2005. Evaluation of the oil and gas potential of the GAO graben sub basin. Exploration permit Block 11

Figure 3 : Contexte géologique du fossé de Gao, position du forage d'ANSONGO 1 et permis d'exploration pétrolière associé.

Le remplissage de ce fossé très profond est de nature terrigène, d'âge Mésozoïque à Tertiaire, avec des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables fins à grossiers, souvent en disposition lenticulaire et localement indurés. Des niveaux de lignite ou à graviers de quartz et des horizons latéritiques argileux ou concrétionnés sont fréquemment intercalés dans les parties moyennes et inférieures des formations continentales, mais la série est dans son ensemble à dominante argileuse (P. Laroche, 2005).

En surface, les alluvions d'âge Quaternaire dans l'emprise du lit mineur, et sur les banquettes inondables constituant le lit majeur du fleuve Niger, sont représentées par des limons argileux et des lentilles sableuses.

B. Contexte hydrogéologique et liaison des nappes du fossé de Gao avec le fleuve Niger

Le fleuve Niger longe la bordure sud du fossé de Gao entre Bourem en amont et Ansongo en aval, sur 150 km environ. Ses formations alluviales épaisses d'une vingtaine de mètres

contiennent une nappe d'accompagnement en continuité hydraulique avec la nappe multicouche contenue dans la série argilo-gréseuse sous-jacente du Continental Terminal, du Crétacé supérieur et du Jurassique, qui constitue le remplissage du fossé.

La preuve de cette relation est donnée par les variations du niveau d'eau observées dans les puits et forages proches du fleuve : dans le segment Ké-Macina («delta intérieur») - Gao et pour les années (1954-1967), la moyenne annuelle de fluctuation pour 6 stations était de l'ordre de 5 m (moyenne de demie-amplitude calculée 2,45m) sous l'influence évidente des variations de niveau dans le fleuve. (Saad K., 1970). Les fluctuations de niveau dans les points d'eau suivent celles du fleuve, avec une atténuation et un décalage dans le temps qui croissent avec la distance fleuve-point d'eau.

C. Qualité physicochimique des eaux

Entre le massif de l'Adrar des Iforas au nord et le fossé de Gao, les eaux souterraines contenues dans le Continental Terminal sont peu minéralisées (résidus secs variant entre 0,2 et 0,7 g/l), de faciès bicarbonaté calcique ou sodique pour les eaux les plus minéralisées, mais avec des teneurs en chlorure et en sulfate relativement faibles.

Dans la plaine alluviale en bordure du fleuve Niger, les eaux douces de surface, à faciès bicarbonaté rechargent la nappe alluviale et la partie superficielle de celle du Continental Terminal qui sont en continuité : la salinité décroît à moins de 1 g/l. Les eaux conservent toutefois un faciès sulfaté calcique alors que celles du fleuve sont bicarbonatées ce qui pourrait montrer que la part de la recharge par les eaux de surface est limitée, peut-être du fait de la forte proportion d'argiles, qui limite la perméabilité des formations.

Dans le remplissage du couloir de Gao, les horizons aquifères sableux souvent lenticulaires, contiennent des eaux saumâtres avec des résidus secs pouvant atteindre 5 g/l et des eaux de faciès sulfaté calcique et magnésien (teneurs en sulfate variant entre 0,5 et 2 g/l). Il est probable qu'en profondeur les teneurs seront encore plus élevées, même si la grande épaisseur de la série peut laisser espérer des productivités intéressantes s'il y a présence de niveaux grossiers sableux ou conglomératiques comme signalé dans la série géologique.

Conclusion : rôle hydrogéologique probable du fossé de Gao

Les systèmes aquifères de Taoudéni/Tanezrouft et d'Iullemeden sont à l'évidence mis en communication par l'important fossé d'effondrement de Gao.

On ne dispose pas de données sur le gradient d'écoulement de la nappe d'accompagnement des alluvions du fleuve Niger, ni sur celui de la nappe multicouche qui occupe le fossé de Gao, sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur, mais ils ne peuvent être que faibles, en raison de la topographie très atténuée de ce secteur.

La nature majoritairement argileuse de la série d'âge secondaire et tertiaire de remplissage **du fossé, du moins pour ce qui en est actuellement connu**, et la forte minéralisation des eaux souterraines en certains points, suggèrent une faible perméabilité et une tendance au confinement. Dans **cette hypothèse et en l'état actuel des connaissances, les échanges amont-aval au travers du fossé de Gao seraient très réduits.**

L'évaluation précise des échanges entre les bassins de Taoudéni et d'Iullemeden devra donc se baser sur des données de transmissivité de la série, obtenues par pompage d'essai sur des forages de reconnaissance profonds. *Si des projets importants faisant appel aux eaux*

souterraines se développent de part et d'autre de la frontière Nigéro-Malienne, en aval du fossé de Gao, une étude hydrogéologique devra être menée pour évaluer les incidences transfrontalières afin de gérer cette ressource commune.

4.3. GÉOCHIMIE DES EAUX

Les eaux des nappes du Continental intercalaire, du Continental Terminal et des aquifères continus qui leurs sont connectés sont en général de très bonne qualité physicochimique.

Cela est dû à la nature essentiellement gréseuse et continentale des réservoirs : la faible solubilité de la silice du squelette rocheux permet à l'eau de conserver une faible minéralisation, malgré l'existence de plusieurs facteurs favorables à la mise en solution des matériaux : forte évaporation ambiante, température élevée et temps de séjour prolongé dans la nappe en raison de la faible recharge par les précipitations.

En dehors des conséquences de l'activité humaine, les secteurs où l'eau a une qualité intrinsèquement dégradée sont ceux dans lesquels les séries aquifères comportent des formations d'origine lagunaire, lacustre comportant des évaporites (gypse, halite), ou ceux où la série géologique est à très faible perméabilité, on est alors en présence d'un confinement qui augmente le temps de séjour de l'eau dans la nappe, et donc sa minéralisation.

Les analyses chimiques disponibles ne sont représentatives que des couches aquifères supérieures, qui sont les seules à être exploitées par forages.

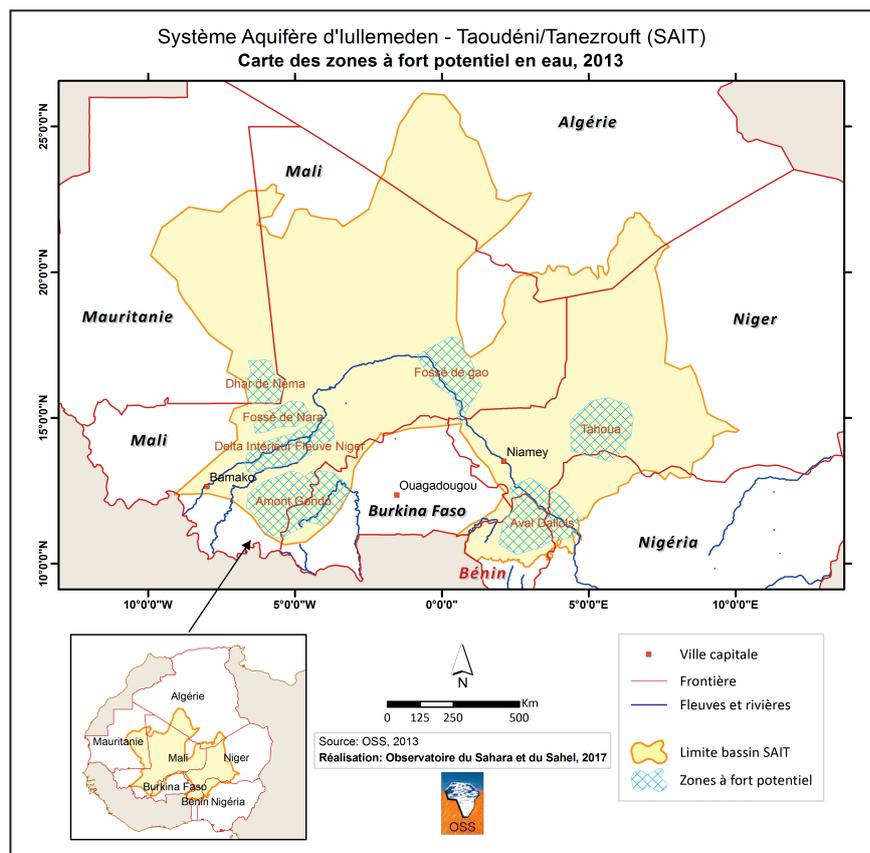
Sur le plan du suivi de la qualité des points d'eau souterraine, il n'existe pas de réseaux nationaux actifs de contrôle de la qualité de l'eau des aquifères. Seules des mesures occasionnelles et à la demande sont réalisées, en général sur des forages exploités pour l'eau potable à destination de collectivités. De nombreux éléments d'origine naturelle ne sont pas analysés systématiquement, alors qu'ils peuvent constituer un risque pour la santé publique. Il s'agit notamment du fluor, de l'arsenic, du sélénium, des métaux lourds.

4.4. SECTEURS IDENTIFIÉS À FORT POTENTIEL EN EAUX SOUTERRAINES

Les investigations hydrogéologiques ont mis en évidence la présence de secteurs qui paraissent receler un potentiel particulier d'exploitation des eaux souterraines (Fig. 4) :

- soit du fait d'une liaison avec les eaux de surface, ce qui assure une alimentation régulière qui soutient la ressource en eau, même durant des épisodes de déficit pluviométrique du fait de variations climatiques (il s'agit du Delta intérieur du fleuve Niger, du secteur aval des Dallols au Niger et au Nigeria, du bassin du Mouhoun au Burkina Faso en amont de la plaine du Gondo, et du Fossé de Gao) ;
- soit du fait de la forte puissance des formations aquifères et de leur perméabilité, qui entraînent la possibilité de débits unitaires élevés dans les ouvrages de captage (il s'agit du secteur de Tahoua au Niger, du secteur sud du Dhar de Néma en Mauritanie, et du Fossé de Nara au Mali).

Leurs principales caractéristiques sont décrites ci-après.



4.4.1. Avec ressources renouvelables abondantes

A. Delta intérieur du fleuve Niger au Mali

Il s'agit du secteur couvrant les vastes plaines alluviales qui s'étendent au Mali de part et d'autre du fleuve Niger à l'aval de Ségou jusqu'au Lac d'Ebo (Fig. 5). Le Delta intérieur du fleuve Niger se situe dans une zone climatique sahélienne et sub-désertique avec des précipitations annuelles allant de 600 mm dans les secteurs les plus méridionaux à 300 mm environ dans la partie avale, au nord.

Les caractéristiques hydrogéologiques particulières de ce secteur sont :

- la présence de deux aquifères superposés, en continuité hydraulique : le Continental Terminal et les formations quaternaires alluviales qui le surmontent,
- la présence d'eaux de surface permanentes et de zones d'inondation très étendues couvertes par les crues du fleuve Niger.

L'unité hydrogéologique du Delta intérieur du fleuve Niger comporte trois secteurs définis suivant la répartition des eaux de surface :

- **Le secteur ouest** correspondant à la zone du Delta fossile ou delta mort du Niger, où les formations continentales sont relativement peu épaisses (30 à 80 m) en raison d'une remontée d'un haut-fond gréseux du substratum infracambrien, et à dominante argileuse. Dans ce secteur, la profondeur du niveau piézométrique croît régulièrement de 5 à 40 m de manière non linéaire au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone inondée.

- **Le secteur central** couvrant le Delta vif actuel constitué par le réseau des différents bras du Niger, et les lacs et plaines d'inondation saisonnière alimentés par le fleuve. L'épaisseur moyenne des formations continentales est de l'ordre de 100 m, voire 150 m et plus dans le secteur le plus déprimé. Les faciès sableux prédominants et les niveaux graveleux confèrent une excellente productivité à ce secteur. Dans le delta vif où le niveau d'eau est inférieur à 5 m, l'amplitude moyenne des fluctuations saisonnières est de l'ordre du mètre. La remontée significative du niveau piézométrique apparaît en août-septembre avec un maximum atteint en novembre-décembre lors de l'étalement de crue du fleuve Niger. La recharge principale apparaît liée à la percolation des eaux de surface, la remontée s'amorçant toutefois vers le milieu de l'hivernage grâce à l'infiltration directe de la pluie.
- **Le secteur sud** compris entre Ségou et Mopti (Fig. 6) sur les plaines alluviales situées entre le Niger et le Bani et au sud du Bani jusqu'à la bordure des plateaux gréseux de San et Bandiagara près de la frontière du Burkina Faso. Les dépôts continentaux ont des épaisseurs variant de 30 à 80 m, avec des faciès souvent très argileux.

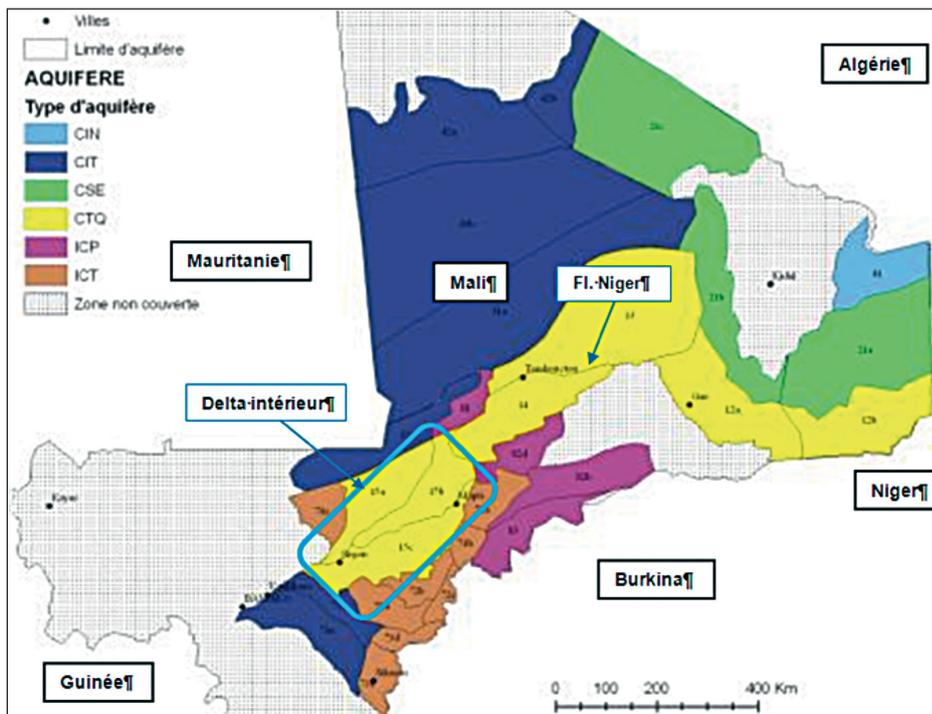


Figure 5 : Localisation de l'unité hydrogéologique du delta intérieur du fleuve Niger au Mali

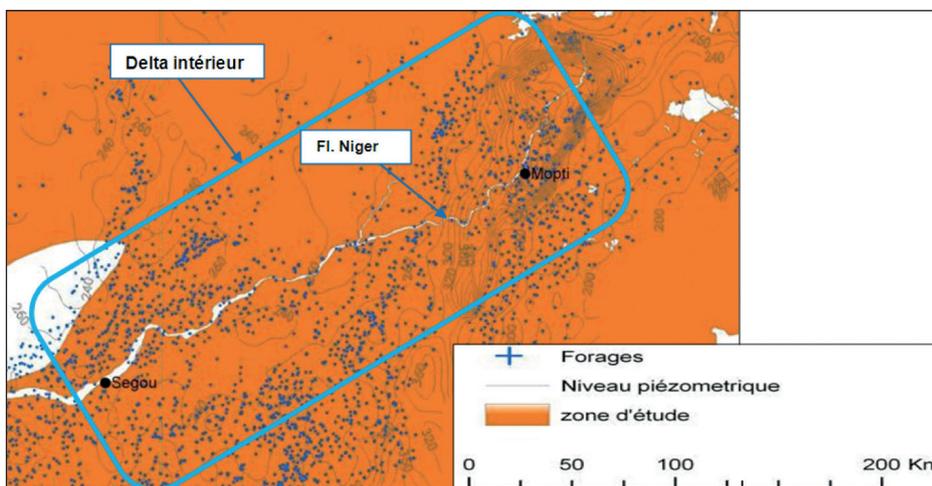


Figure 6 : Points d'eau et esquisse piézométrique entre Mopti et Ségou

Les secteurs central et nord (domaine lacustre) ont les meilleures caractéristiques hydrodynamiques, avec des transmissivités supérieures de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, probablement grâce à une plus forte présence du lit mineur du fleuve Niger, et des sédiments grossiers associés, au cours du Tertiaire et du Quaternaire.

Dans le secteur méridional, plus argileux, elles n'atteignent que $2.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ suivant les données disponibles.

AQUIFERE		UNITE HYDROGEOLOGIQUE			SECTEUR HYDROGEOLOGIQUE		
NOM	SIGLE/ CODE	NOM	CODE	Superficie (Km ²)	NOM	CODE	Superficie (Km ²)
Continental Terminal / Quaternaire	CTQ1	Gondo	11		Gondo/Koro	83	13 499
		Fossé de Gao	12	59 354	Gao	12a	31 937
					Ménaka	12b	27 417
		Azaouad Sud	13	61 416	Azouad Sud	13	61 416
		Gourma Nord-Ouest	14	24 261	Gourma Nord-Ouest	14	24 261
		Delta intérieur	15	57 467	Niono-Dioura	15a	18 300
				Macine-Diaka	15b	16 077	
				Bani-Niger	15c	23 090	

Tableau 1 : Le Delta Intérieur dans les unités et secteurs hydrogéologiques de la zone d'étude

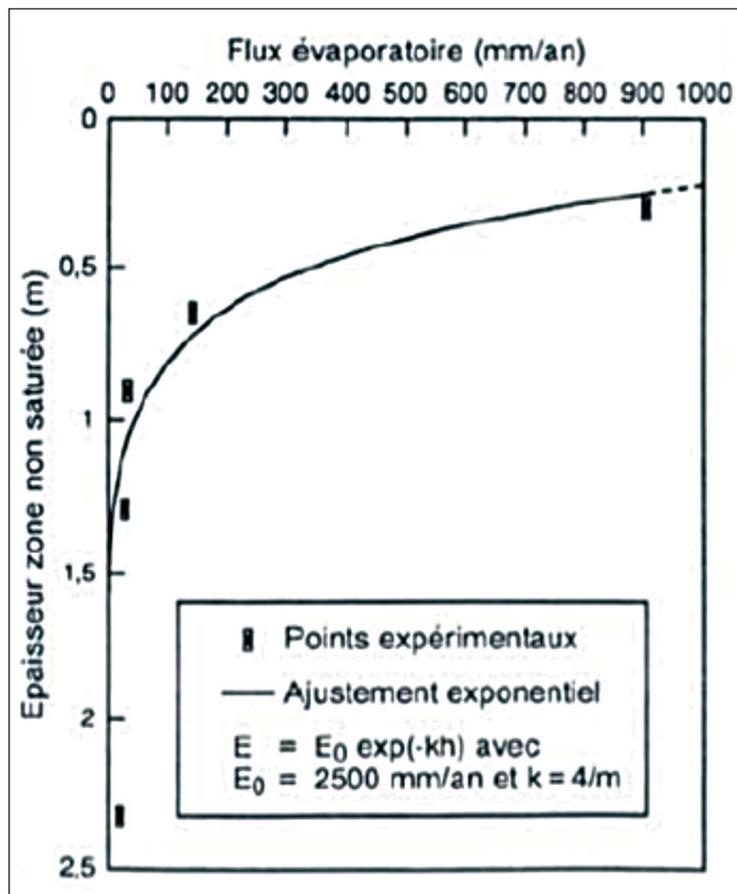
De très nombreux points d'eau sont présents, souvent peu profonds, à petit débit et à destination essentiellement d'eau potable.

L'irrigation utilise les eaux de surface, parfois dérivées à grande échelle comme dans le cas des périmètres d'irrigation de l'Office du Niger alimentés par les eaux du Canal du Sahel, issu du barrage de Markala, en bordure ouest du secteur.

Les nappes présentes dans les formations quaternaires et le Continental Terminal gréseux sous-jacent sont en relation avec les eaux de surface (fleuve Niger et ses bras affluents, lacs de toute taille) qui participent à leur recharge.

Une évaporation intense des eaux souterraines a lieu du fait des niveaux de nappe très proches du sol (Fig. 7), ce qui entraîne la perte de volumes considérables.

Figure 7 : Calcul du flux évaporatoire à travers la zone non saturée au Niger (source Bulletin AIEA)



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

Dans les différents secteurs du delta intérieur, la salinité moyenne reste cependant faible (de l'ordre de 0,25 g/l). Les eaux sont neutres ou légèrement basiques et bicarbonatées calciques. Les teneurs en nitrate sont faibles (en général inférieures à 1 mg/l) et le fer est souvent présent avec une teneur moyenne de 1,1 mg/l dans la zone lacustre. La salinité croît vers les bordures du delta actif, à l'ouest, dans le Memo Dioura, et surtout à l'est, en bordure du Gourma, où elle peut dépasser localement 1,3 g/l, les eaux s'enrichissant en sulfate et en chlorure.

L'intérêt hydrogéologique du secteur du Delta Intérieur du fleuve Niger vient de la liaison des nappes avec les eaux superficielles – fleuve Niger, Lacs et bras fluviaux - qui soutiennent la ressource ; et du fait qu'en saison sèche le niveau du fleuve Niger est à son maximum.

Un rabattement de plusieurs mètres de la nappe dans le secteur du delta intérieur réduirait considérablement les pertes par évaporation, ce qui permettrait d'exploiter un fort volume d'eau souterraine actuellement perdu dans l'atmosphère, sans nuire aux réserves de la nappe. Cela limiterait en outre les phénomènes, observés localement, d'accroissement de la minéralisation de l'eau lié à l'évaporation. Contrairement aux eaux de surface, ces forages délivreraient une eau d'excellente qualité bactériologique ; ils pourraient être localisés au plus près des aménagements et non à proximité immédiate du fleuve.

La collecte de données complémentaires est nécessaire dans ce secteur du fait du manque d'informations sur l'épaisseur totale des sédiments en certains endroits, et sur la nature lithologique et les caractéristiques hydrodynamiques de ces formations. La mise en place d'un réseau d'enregistrement des niveaux de la nappe est indispensable pour comprendre le fonctionnement de la nappe, en liaison avec les précipitations et les fluctuations de niveaux des eaux de surface, dans une optique de modélisation et d'optimisation de l'exploitation.

Il est important de noter que ces ressources en eau souterraine sont de type renouvelable.

B. Secteur aval des Dallols au Niger et au Nigeria

Ce secteur transfrontalier couvre la partie avale des Dallols Bosso et Maouri au Niger, au sud du 13^e parallèle, et par la plaine alluviale du fleuve Niger et de la Sokoto River près de leur confluence (Fig. 8).

L'aquifère est constitué par le Continental Terminal et le Continental intercalaire (à la base) dans la partie nord, et le Continental intercalaire seul dans la partie sud, au Nigeria et au Bénin.

Les formations de socle au Niger, qui constituent le soubassement imperméable du bassin au Niger, sont situées à plusieurs centaines de mètres sous les Dallols. L'épaisseur précise des formations sédimentaires n'a pas été reconnue à cet endroit. Au Nigeria, le Basement Complex (socle) s'approfondit vers le nord-ouest à partir des reliefs cristallins qui occupent la moitié sud-est de l'état de Sokoto. La série sédimentaire se complète graduellement jusqu'à atteindre une épaisseur de 1200 m près de la frontière Niger-Nigeria (Etat de Kebbi).

Les quatre grandes unités aquifères distinguées de haut en bas dans le système aquifère multicouche (Gwandu terminal, Gwandu basal, Wuruno-Taloka (Rima), Gundumi-Illlo) sont rechargées dans leurs zones d'affleurements, où elles contiennent des nappes libres, voire localement perchées (cas des calcaires de Kalambaina).

Dans la partie nord-ouest du bassin, la nappe de l'unité de Gwandu reste en conditions de nappe libre, mais les nappes des unités inférieures sont majoritairement captives ou semi-captives, sous les horizons argileux d'extension variable contenus dans les unités sus-jacentes.

L'unité d'Illlo, qui est en communication par variation latérale de faciès et discordances-érosions internes avec toutes les autres unités, assure le transit des eaux souterraines vers l'exutoire constitué par le fleuve Niger, qui draine l'ensemble du système aquifère multicouche et correspond au niveau de base de l'ensemble du bassin de Sokoto au Nigeria et de la partie aval des Dallols Bosso et Maouri au Niger.

On peut supposer ainsi que le fleuve joue le rôle d'une barrière hydraulique et qu'il n'y a pas d'échanges significatifs entre les nappes des bassins versants hydrogéologiques des rives droite et gauche du fleuve.

Une petite partie de bassin sédimentaire est située au Nigeria dans l'Etat de Kebbi en rive droite (ouest) du fleuve Niger, et au Bénin dans la zone frontalière Bénin-Nigeria. Elle est constituée de formations grés-argileuses de la Formation de Illlo, est indépendante du reste du bassin de Sokoto : elle est à rattacher à la partie béninoise du Système Aquifère d'Iullemeden, dont elle constitue un exutoire vers le fleuve Niger.

Ce secteur est caractérisé par des niveaux de nappe très proches du sol dans les zones topographiquement basses (vallées), avec de nombreuses mares et tronçons de cours d'eau actifs en saison humide, et par une très forte épaisseur des formations sédimentaires : plus de 1000 m dans l'axe du bassin, que l'on pourrait situer sensiblement sur le méridien 4° Est.

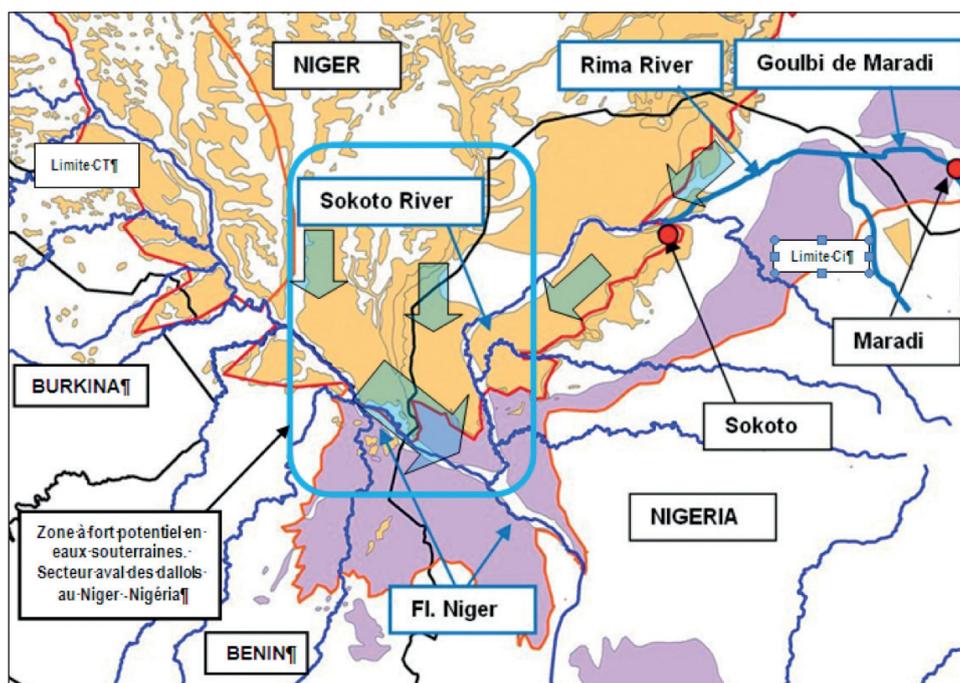


Figure 8 : Secteurs à fort potentiel en eaux souterraines «Aval Dallols» au Niger et au Nigéria

La structure en «gouttière» se prolongerait vers le sud-est au Nigeria par un fossé d'effondrement tectonique de type «graben», en liaison avec un système de «rift» de grande extension (Fig. 9).

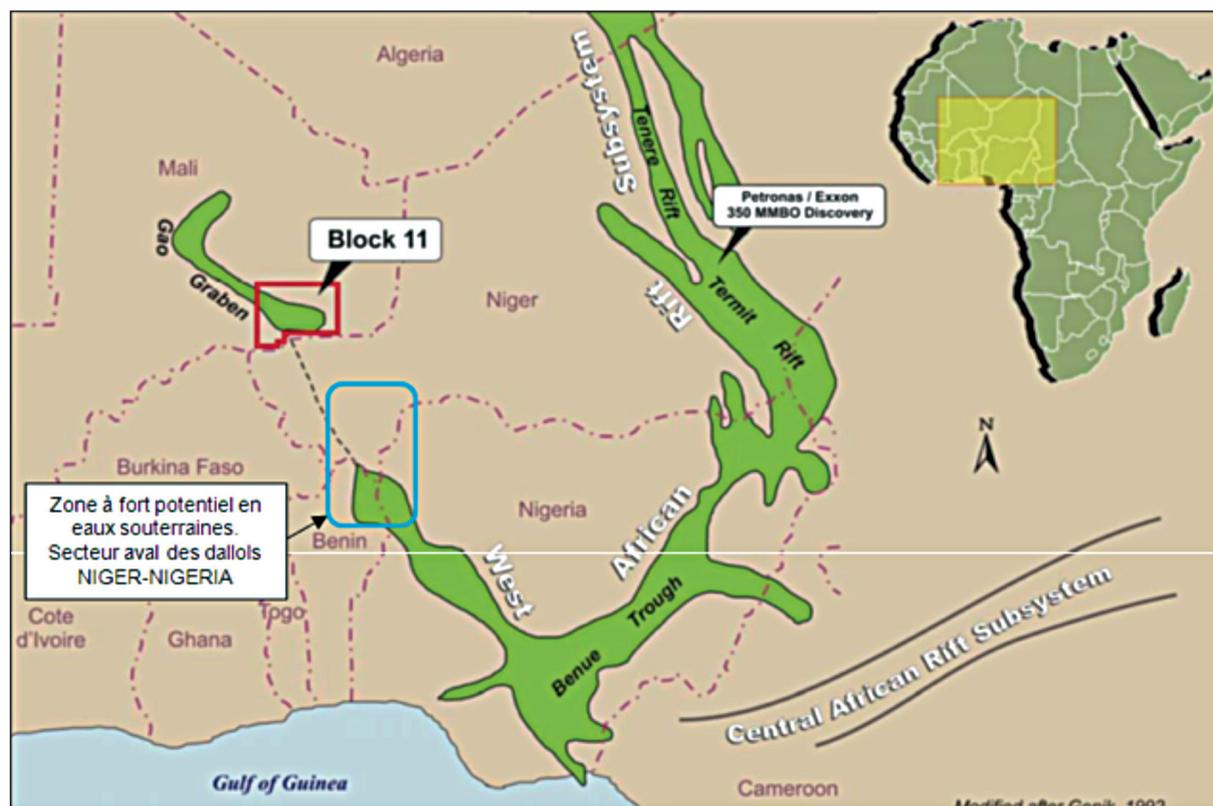


Figure 9 : Raccordement du secteur à fort potentiel «Aval Dallols» avec les fossés d'effondrement au Nigéria

L'intérêt hydrogéologique de ce secteur vient de la liaison des nappes avec les eaux superficielles – fleuve Niger, bas Dallols, Sokoto River – qui soutient la ressource, et du fait qu'en saison sèche le niveau du fleuve Niger est à son maximum.

Par ailleurs, comme dans le delta intérieur du fleuve Niger, un rabattement de plusieurs mètres de la nappe dans les Dallols réduirait considérablement les pertes par évaporation, ce qui permettrait d'exploiter un fort volume d'eau souterraine actuellement perdu dans l'atmosphère, sans nuire aux réserves de la nappe. Cela limiterait en outre les phénomènes, observés localement, d'accroissement de la minéralisation de l'eau lié à l'évaporation.

Des forages de reconnaissance hydrogéologique sont nécessaires dans ce secteur car on manque de données sur l'épaisseur totale des sédiments, et sur la nature lithologique et les caractéristiques hydrodynamiques de ces formations. La mise en place d'un réseau d'enregistrement des niveaux de la nappe est indispensable pour comprendre le fonctionnement de la nappe, en liaison avec les précipitations et les fluctuations de niveaux du fleuve Niger et des cours d'eau affluents, dans une optique de modélisation et d'optimisation de l'exploitation.

Il est important de noter que ces ressources en eau souterraine sont de type renouvelable.

C. Bassin du Mouhoun au Burkina en amont de la plaine du Gondo

La partie sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni/Tanezrouft, située à cheval entre le Burkina Faso et le Mali, forme un système aquifère continu transfrontalier (Fig. 10). Cette région est un pôle de développement des deux pays pour les prochaines décennies. Elle est caractérisée par une forte dynamique démographique et économique. L'essentiel des besoins en eau proviennent des eaux souterraines.

Les formations sédimentaires présentes dans ce secteur ouest et au sud-ouest du Burkina Faso sont à dominante gréseuse et s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches affectées d'un léger pendage vers le Nord-Ouest (2° environ).

Il s'agit en majorité, de grès fins à grossiers alternant avec des argilites et des siltstones. La série s'achève par les grès argileux fins du Continental Terminal. Elle s'épaissit généralement vers l'ouest et atteint plusieurs centaines de mètres. Il n'y a malheureusement pas de forage ayant traversé toute la série dans ce secteur.

Cette série sédimentaire abrite une nappe considérée comme unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche. En effet, les niveaux imperméables séparant différents horizons géologiques sont d'extension limitée et de nombreuses fractures mettent en communication les différents niveaux.

Dans le secteur amont du bassin du Mouhoun, le cours d'eau est pérenne. Il est en équilibre avec la nappe. En aval, approximativement à partir de Dédougou à l'approche de la plaine du Gondo, il semble se décrocher de la nappe.

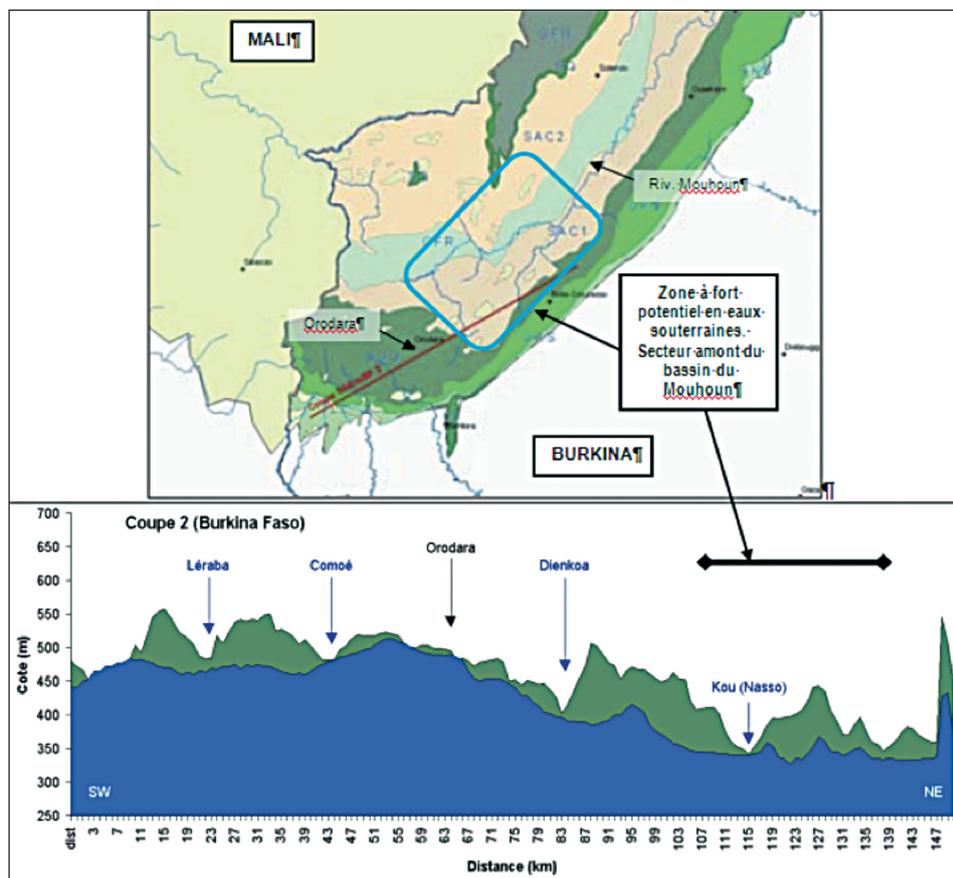


Figure 10 : Localisation du bassin amont du Mouhoun (Burkina Faso). Coupe topographique et piézométrique

Les précipitations dans la région, atteignent jusqu'à 1200 mm/an. La partie amont du bassin versant recèle d'importantes ressources en eau souterraine avec les importantes sources de Nasso-Guinguette, dans la région de Bobo Dioulasso, dont le débit cumulé est de l'ordre de 7.200 m³/h (soit 2 m³/s), ainsi que les sources de Pessou. De nombreux forages ont un débit supérieur à 20 m³/h, parmi lesquels certains produisent plus de 500 m³/h ce qui permet des usages d'alimentation en eau potable ou industriels. Certains forages sont artésiens. Mais dans quelques cas, les forages d'hydraulique villageoise ne sont pas exploitables ou secs car pas suffisamment profonds pour capter des horizons aquifères.

La zone d'alimentation de ce chapelet de sources dépasse vraisemblablement le bassin versant du Kou et devrait s'étendre vers les hauts-bassins (région d'Orodara), (Fig. 11).

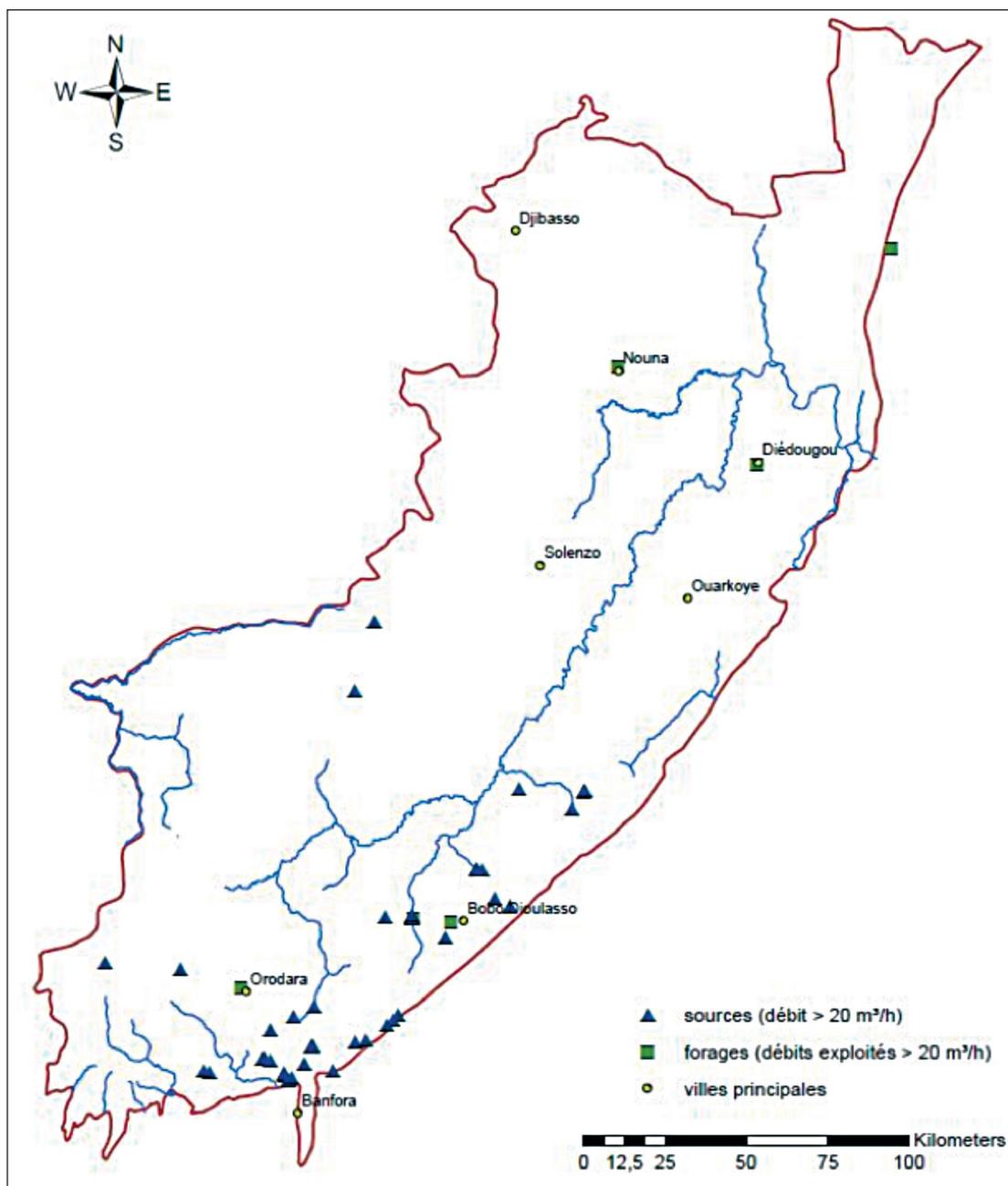


Figure 11 : Localisation du bassin amont du Mouhoun et des sources et forages à fort débit

L'intérêt hydrogéologique de ce secteur vient de la perméabilité exceptionnelle de certains niveaux de la série sédimentaire, et de la liaison de la nappe avec les eaux superficielles [Ile Mouhoun (Volta Noire)] qui est pérenne et constitue une ressource en eau souterraine de type renouvelable. Ce cours d'eau draine la nappe en conditions normales, mais peut l'alimenter si celle-ci est rabattue

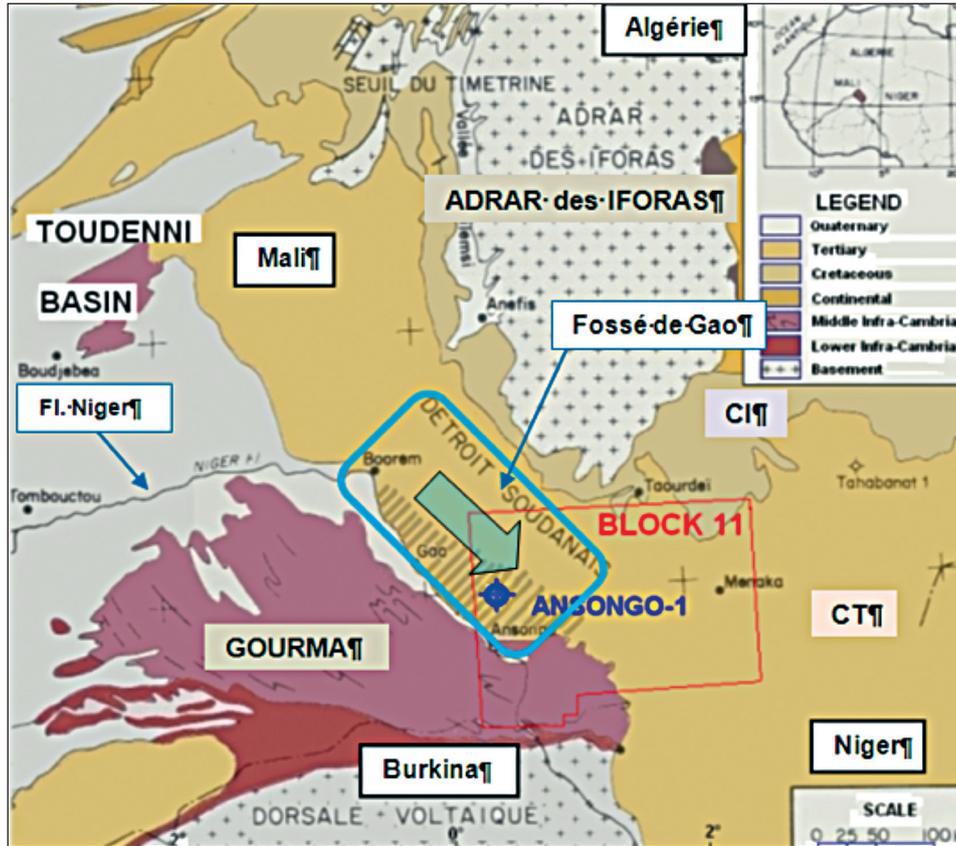
Il est important de noter que la piézométrie dans le bassin sédimentaire burkinabé montre une tendance à la baisse générale des niveaux, de l'ordre de 30 cm/an. Il s'agit d'une fortement peuplée et donc intensément exploitée. La question de la disponibilité des ressources en eau se posera de manière accrue et les enjeux liés aux ressources en eau sont majeurs.

Une optimisation de la gestion des eaux souterraines est donc indispensable dans cette zone à fort potentiel, pour en développer l'exploitation. Cela passe notamment par une meilleure compréhension du fonctionnement de la ressource, au moyen de forages de reconnaissance (l'épaisseur totale de la série aquifère n'est pas connue) et de nivellements permettant d'établir une carte piézométrique précise, et des historiques de niveau, ce qui conduira à une meilleure évaluation de la recharge. Cela permettra d'évaluer la ressource renouvelable afin de mener une exploitation durable de la ressource.

D. Fossé de Gao

En rappel, le fossé de Gao assure la liaison entre les grands systèmes aquifères de Taoudéni/Tanezrouft à l'Ouest et d'Iullemeden à l'Est. Il s'agit d'une structure géologique d'effondrement dans le socle précambrien, d'orientation NW-SE, d'une superficie de 15.000 km² environ, avec une longueur de 400 km environ et une largeur variant de 15 à 100 km (Fig. 12). Sa profondeur a été estimée à plus de 3.000 mètres. Le forage d'exploration pétrolière d'Ansongo 1 a reconnu une série sédimentaire épaisse de 1 645 m et a identifié le socle sous-jacent à environ 1 900 m de profondeur. La structure est bordée au sud-ouest par une faille majeure d'effondrement, axée sur le fleuve Niger, qui la sépare du socle précambrien du Gourma ; au nord-est on est en présence de la remontée du socle précambrien de l'Adrar des Iforas.

Le fleuve Niger longe la bordure sud du fossé de Gao entre Bourem en amont et Ansongo en aval (Fig. 13), sur 150 km environ ; ses formations alluviales épaisses d'une vingtaine de mètres contiennent une nappe d'accompagnement en continuité hydraulique avec la nappe multicouche contenue dans la série argilo-gréseuse sous-jacente du Continental Terminal (Tertiaire) et du Crétacé qui constitue le remplissage du fossé.



Source: P. Laroche 2005. Evaluation of the oil and gas potential of the GAO graben sub basin. Exploration permit Block 11

Figure 12 : Contexte géologique et position du fossé de Gao et du forage d'Ansongo 1

Les fluctuations de niveau dans les points d'eau de la plaine alluviale suivent celles du fleuve, avec une atténuation et un décalage dans le temps qui croissent avec la distance fleuve-point d'eau.

Dans la plaine alluviale en bordure du fleuve Niger, les eaux douces de surface, à faciès bicarbonaté rechargent la nappe alluviale et la partie superficielle de celle du Continental Terminal qui sont en continuité : la salinité décroît à moins de 1 g/l. Les eaux conservent toutefois un faciès sulfaté calcique alors que celles du fleuve sont bicarbonatées ce qui pourrait montrer que la part de la recharge par les eaux de surface est limitée dans les points d'eau échantillonnés, peut-être du fait de la forte proportion d'argile, qui limite la perméabilité des formations.

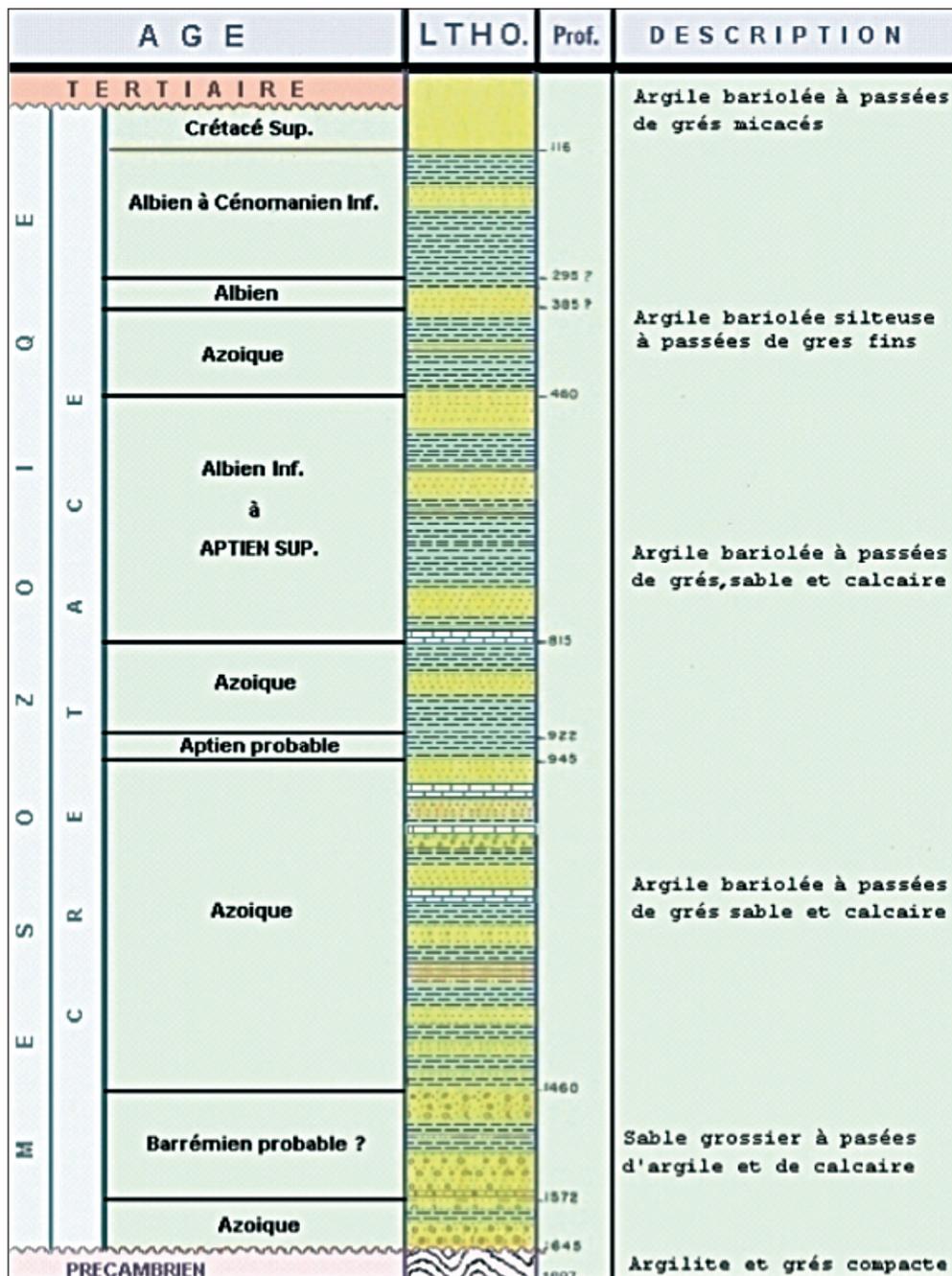


Figure 13 : Coupe géologique du forage Ansongo 1 dans le fossé de Gao

Dans le remplissage du couloir de Gao, des horizons aquifères sableux souvent lenticulaires, contenant des eaux saumâtres ont été identifiés avec des résidus secs pouvant atteindre 5 g/l et des eaux de faciès sulfaté calcique et magnésien (teneurs en sulfate variant entre 0,5 et 2 g/l). Il est possible qu'en profondeur les teneurs soient encore plus élevées.

Les quelques données de transmissivité disponibles montrent des valeurs faibles ($3 \cdot 10^{-6}$ m²/s en moyenne) sans qu'on puisse les rattacher à un niveau particulier. Il est vrai que la partie supérieure de la série est à dominante argileuse. Toutefois, la grande épaisseur de la série peut laisser espérer des productivités intéressantes s'il y a présence de niveaux grossiers sableux ou conglomératiques comme signalé dans la partie inférieure de la série sédimentaire (Jurassique et Crétacé).

Les forages profonds (jusqu'à 800 m) réalisés récemment dans la région de Tahoua, au centre du bassin d'elles lullemeden, montrent que les séries particulièrement épaisses, à dominante argileuse, du Continental Terminal et du Continental Intercalaire peuvent comporter des niveaux minces mais très perméables permettant d'obtenir des débits ponctuels élevés, avec une eau de bonne qualité.

L'intérêt hydrogéologique du fossé de Gao vient de la liaison des nappes qu'il contient avec les eaux superficielles du fleuve Niger, qui les draine et les alimente alternativement suivant les saisons, ce qui donne à la ressource en eau un caractère renouvelable dans cette zone à pluviométrie réduite. L'épaisseur exceptionnelle de la série sédimentaire dans cette structure est un autre atout.

Cependant, on manque de données sur les caractéristiques hydrodynamiques et la qualité de l'eau dans les formations perméables étagées dans la série sédimentaire. Par ailleurs, du fait de son étroitesse relative, et de la présence de bordures étanches, le fossé de Gao constitue une zone vulnérable sur le plan quantitatif car des effets de limites imperméables sont à attendre si cet aquifère multicouche devenait très fortement sollicité.

Une meilleure connaissance de la ressource est à acquérir, au moyen de forages de reconnaissance à différentes profondeurs, assortis de pompages d'essais complets, et de mise en place de relevés de niveau débouchant sur des historiques piézométriques. Des nivellements sont à prévoir pour établir une carte piézométrique précise de la structure, déterminer le gradient d'écoulement et avoir une meilleure estimation de la recharge. Cela permettra une meilleure évaluation de la ressource renouvelable afin de mener une exploitation plus intensive, mais durable, de cette ressource.

4.4.2. Avec ressources renouvelables limitées

A. Secteur de Tahoua au Niger

Un programme récent de réalisation de forages profonds (jusqu'à environ 800 m) dans la région de Tahoua (Fig. 14), a permis de progresser dans la connaissance de la géométrie et des caractéristiques hydrodynamiques du Continental Intercalaire dans la partie centrale du bassin des lullemeden dans la région de Tahoua (DH-AFD-BAD, 2010).

Un résultat essentiel est la mise en évidence de niveaux sableux grossiers très productifs dans une épaisse série à dominante argileuse. De nombreux débits unitaires sont compris entre 80 et 100 m³/h, ce qui est exceptionnel dans un contexte climatique sahélien.

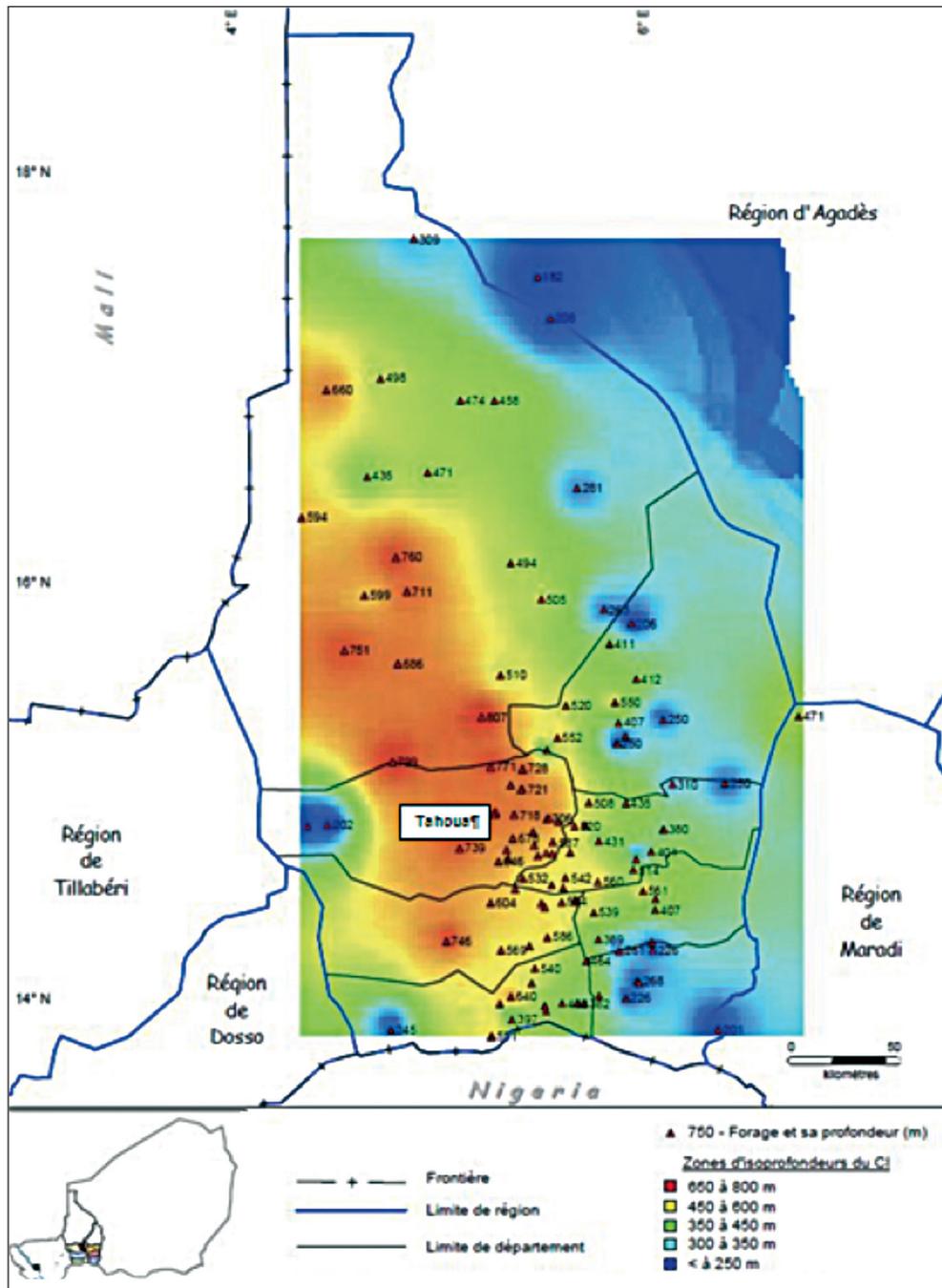
Les transmissivités calculées sont élevées et s'étagent entre 10⁻³ et 10⁻² m²/s. Il faut noter que les perméabilités doivent être très élevées car l'épaisseur productive est faible dans chaque forage. Il n'y a malheureusement pas eu de diagraphies (gamma-ray, flowmeter, PS, et résistivité) permettant de délimiter précisément les niveaux productifs et de faire des corrélations entre forages.



Figure 14 : Localisation des nouveaux forages profonds de Tahoua (2010). En rouge $Q > 80 \text{ m}^3/\text{h}$

Une carte d'iso-profondeur du Continental intercalaire (Ci) par rapport au sol a pu être établie dans la partie médiane du département de Tahoua (Fig. 15). Par manque de nivellement en surface, il n'a pas été établi de carte en isohypses. Cependant, on constate l'approfondissement très net de l'aquifère du Ci dans ce qui constitue la zone axiale du bassin d'Illemeden entre les parallèles 5° et 5°30' E entre la frontière malienne au nord et celle du Nigeria dans l'état de Sokoto au sud.

Il est important de noter que même à cette profondeur, les forages ne captent pas l'ensemble de la série Continentale intercalaire.



Source : Projet d'hydraulique villageoise dans la Région de Tahoua, Réalisation de 24 forages profonds, 2010

Figure 15 : Carte iso-profondeur du CI dans la région de Tahoua au Niger

Les différents horizons perméables recoupés par les forages dans la partie supérieure de l'aquifère ne montrent pas de variations de charge importantes, ce qui témoigne de l'interconnexion hydraulique des niveaux perméables dans ce système aquifère multicouches, à l'échelle régionale comme le plus souvent à l'échelle locale.

L'écoulement d'ensemble est radial convergent vers le sud-ouest, c'est-à-dire vers les bas Dallols et le fleuve Niger à sa confluence avec la Sokoto River où se trouve l'exutoire du système multicouche.

Dans les vallées et les dépressions, le niveau piézométrique est peu profond du fait de la captivité de la nappe : souvent à moins de 20 m. Sur certains sites, toutefois, les contraintes topographiques et peut-être la mauvaise recharge de l'aquifère captif entraînent des niveaux statiques extrêmement profonds (>200 m /sol) qui pénalisent considérablement les conditions d'exploitation de la nappe.

Les forages implantés dans la région de Tahoua sont relativement peu nombreux du fait de leur profondeur. Ils sont utilisés principalement pour l'alimentation en eau potable (AEP) et le pastoralisme. Cependant, *les forts débits ponctuels incitent au développement de l'irrigation dans les fonds de vallées.*

La qualité physico-chimique de l'eau est bonne. La minéralisation est modérée malgré la forte profondeur et la température de 50° environ qui règne dans la ressource.

L'intérêt du secteur de Tahoua est de disposer de forts débits ponctuels (80 à 100 m³/j) d'eau de très bonne qualité, dans un contexte climatique sahélien difficile, affecté par une forte variabilité climatique.

Cependant, d'après les données existantes et les perspectives à venir en matière d'AEP, le débit de prélèvement total est estimé à 86 400 m³/j pour l'ensemble des forages exploités. Or ce chiffre correspond approximativement au débit de renouvellement (96 000 m³/j) de la nappe évalué par modélisation.

La marge d'accroissement de l'exploitation est donc très faible. Au-delà, il faut être conscient que les prélèvements entameront les réserves de la nappe car la recharge est faible en raison des faciès argileux et de la pluviométrie réduite. Les données isotopiques ont confirmé le caractère essentiellement fossile des eaux de cet aquifère (âge de l'ordre de 30 000 ans).

Ce potentiel très intéressant de forts débits dans une zone sahélienne affectée par la désertification et la variabilité climatique, doit être optimisé sur le plan des usages et doit s'accompagner de mesures importantes d'économie d'eau et d'une sensibilisation des usagers pour éviter tout gaspillage.

Une meilleure connaissance de la ressource est à acquérir, par la mise en place de relevés de niveau débouchant sur des historiques piézométriques.

Des nivellements sont à prévoir pour établir des cartes piézométrique et structurale précises du Continental Intercalaire dans cette région, afin déterminer le gradient d'écoulement et avoir une meilleure estimation des réserves et de la recharge.

Cela permettra une meilleure évaluation de la ressource renouvelable afin de mener une exploitation intensive, mais durable, de cette ressource.

B. Secteur sud du Dhar de Néma en Mauritanie

Les études hydrogéologiques récentes ont mis en évidence les potentialités de l'aquifère du Continental intercalaire dans secteur du Dhar de Néma en vue de l'alimentation en eau de villes du sud-est mauritanien (Néma et Timbédra), (Fig. 16).

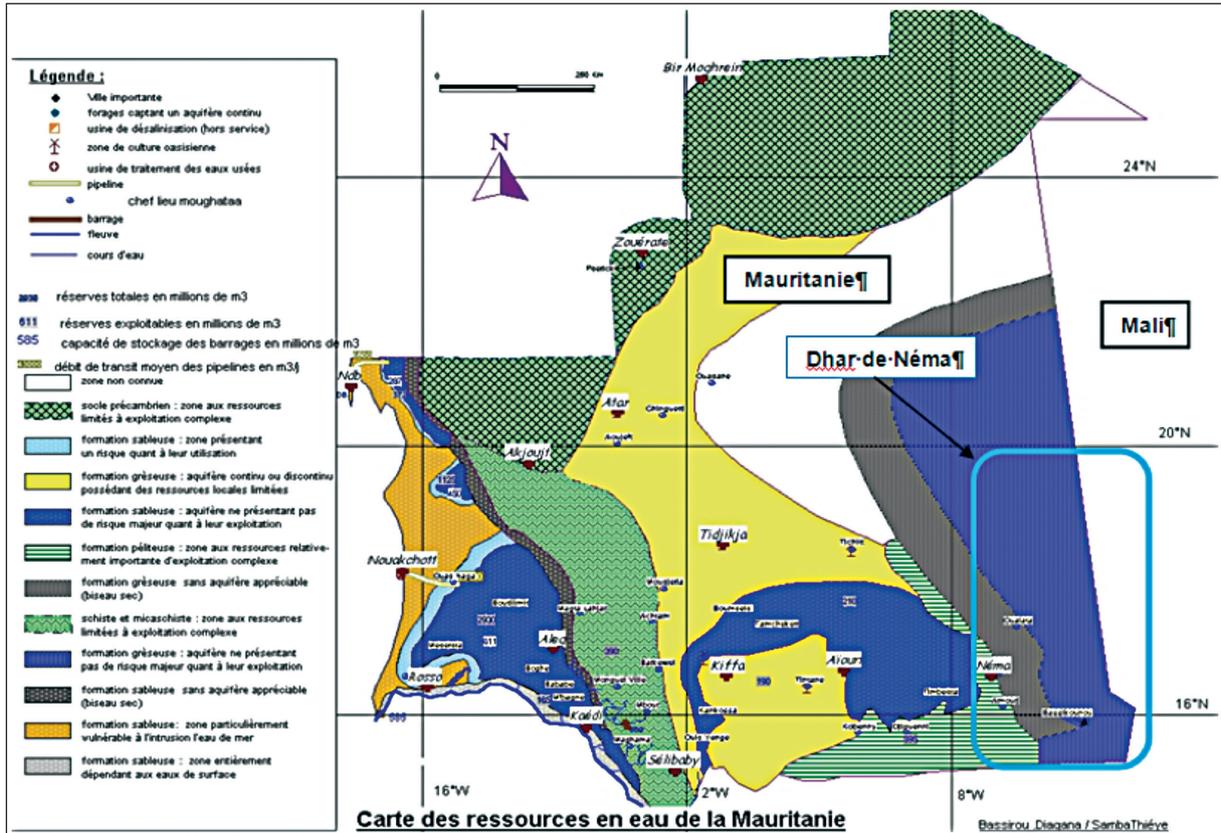


Figure 16 : Localisation du secteur du Dhar de Néma en Mauritanie

La superficie occupée par la nappe des grès du Continental intercalaire en territoire mauritanien est de l'ordre de 16.000 km². Elle correspond à la totalité de la région comprise entre la frontière malienne à l'est, et une limite ouest constituée par la remontée des formations schisteuses du substratum, là où les grès continentaux se terminent brutalement au niveau de la falaise du Dhar.

La limite ouest de la partie aquifère correspond à un important biseau sec à la base du réservoir gréseux, au contact de la remontée du substratum précambrien schisteux (Fig. 17).

Les formations gréseuses contiennent une nappe libre. Leur d'épaisseur augmente en s'enfonçant vers l'est (et donc vers le centre du bassin de Taoudéni) sous un épais recouvrement sableux quaternaire. Ce phénomène est confirmé au Mali près du Lac Faguibine où on dénote une épaisseur de l'ordre de 500 mètres de Continental Intercalaire.

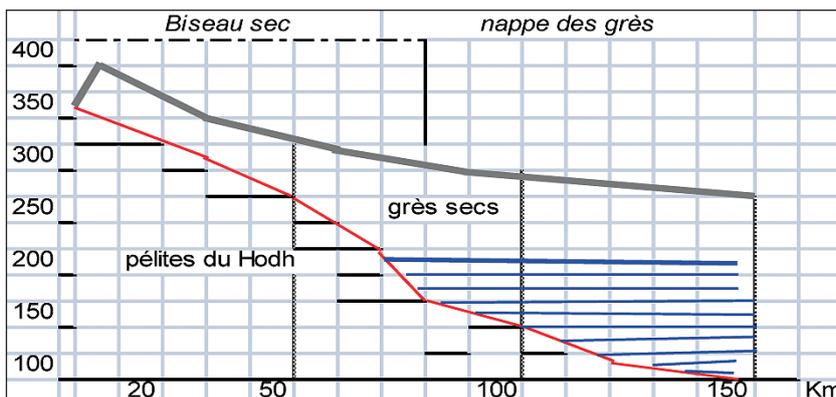


Figure 17 : Schéma de la géométrie de la nappe des grès du Dhar de Néma (coupe ouest-est)

Aucune donnée n'est disponible sur la partie nord de la nappe du Dhar de Néma (Hodh Ech Chargui), qui est inhabitée et pratiquement inaccessible du fait de la présence de grands ergs.

La nappe du Dhar de Néma représente les plus fortes potentialités en eau actuellement connues dans le sud-est du pays. Elle est divisée au sud par une barrière hydraulique naturelle étanche, le horst d'Ouarmachet, où les grès sont dénoyés. Cette structure haute mise en évidence par la prospection géophysique partage localement la nappe en deux compartiments nord et sud, ce qui illustre les risques de cloisonnement du bassin sous les effets de la tectonique cassante tardive.

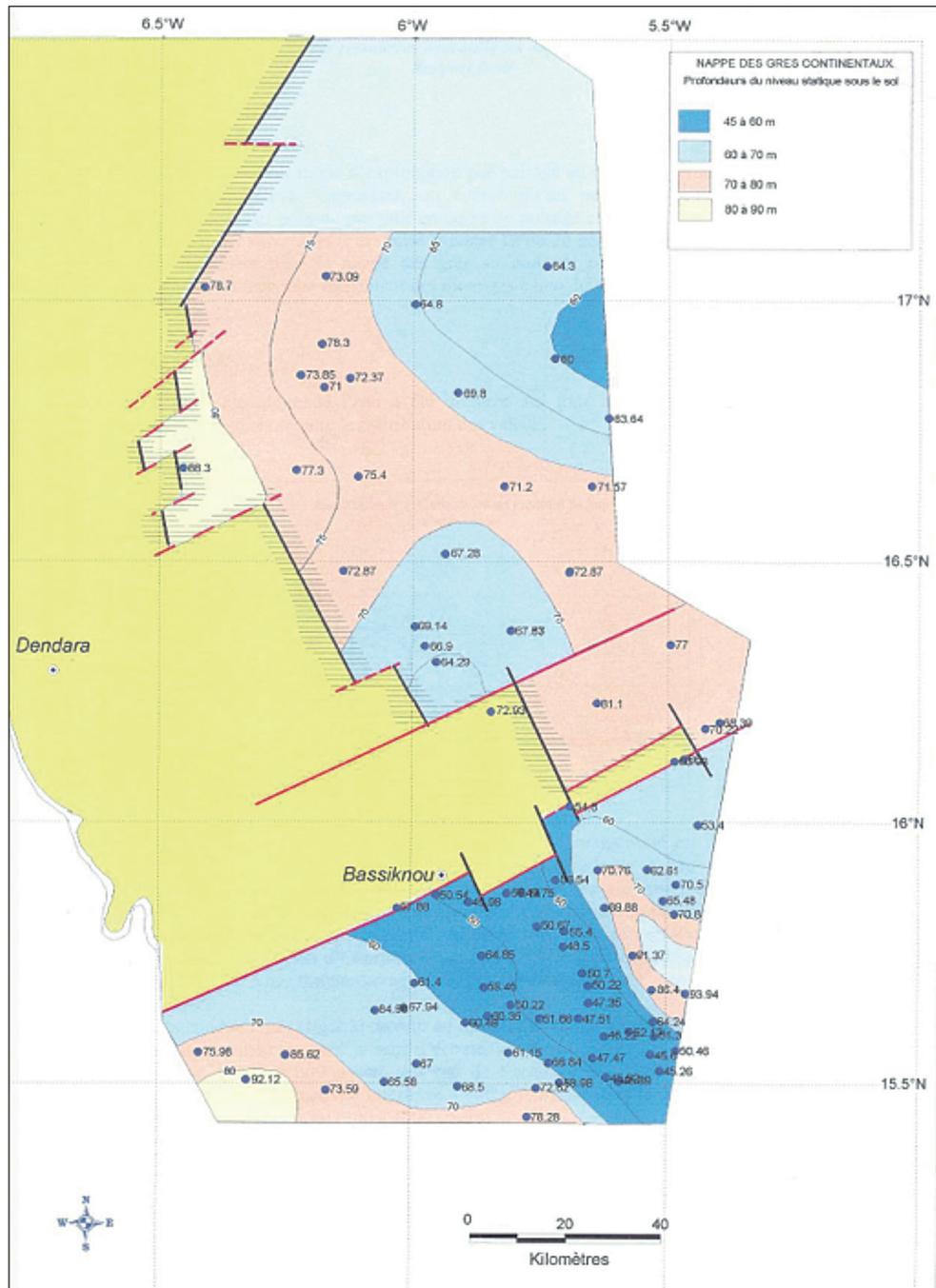
Les formations sont suffisamment perméables et épaisses pour permettre le prélèvement de débits importants au moyen de forages. Les perméabilités de l'ordre de 10^{-5} à 6×10^{-4} m/s déduites des mesures in situ confirment les valeurs trouvées par les essais de puits réalisés au cours des études antérieures. Certains forages d'exploitation dans la zone d'étude présentent des productivités élevées (14 à 45 m³/h/m) :

- Champ captant de Derwich : la nappe a une épaisseur supérieure à 100 m avec une alternance de sable, gravier siliceux et grès avec quelques passages d'argiles. Les forages ont des profondeurs moyennes de 160 m environ. Les débits unitaires instantanés obtenus dépassent les 100 m³/h.
- Champ captant de Boughla, en bordure sud-ouest du fossé d'effondrement d'Ouarmachet : la nappe a une épaisseur relativement réduite, de 30 à 40 m environ ; elle est contenue dans des sables fins, grès et argiles. Les forages sont plus profonds avec des profondeurs moyennes de 160 m ; ils captent deux horizons aquifères : de 110 à 130 m et de 140 à 160 m et les débits obtenus dépassent généralement les 100 m³/h.

La nappe est généralement libre et le niveau se situe entre 50 et 80 m/sol et sa profondeur par rapport au sol diminue globalement vers l'est et le sud.

L'écoulement général de la nappe se fait du nord-ouest vers le sud-est, c'est-à-dire dans le sens de la pente topographique vers le Mali et l'ouverture du bassin de Taoudéni, avec un gradient hydraulique qui serait de 0,2 pour mille environ. La limite du biseau sec à l'ouest serait une limite d'alimentation. L'absence de nivellement ne permet pas de tracer une carte piézométrique précise de cette région.

Des structures hautes comme celle du horst d'Ouarmachet jouent le rôle de barrière étanche locale au sein de la nappe, ce qui peut amener des variations de direction d'écoulement. Cet exemple illustre le risque de cloisonnement et de variations d'épaisseur qui existe au sein du Continental Terminal du bassin de Taoudéni.



Source : ANTEA-PHY 2002

Figure 18 : Carte profondeur du niveau sol dans les grès du Dhar de Néma

La carte des profondeurs du niveau d'eau par rapport au sol (Fig. 18) a été établie par géophysique (Résonance Magnétique Protonique (RMP)), de même que les mesures de perméabilité.

La qualité physico-chimique de l'eau est bonne, avec une minéralisation modérée malgré la faible recharge de cette ressource.

L'intérêt du secteur de du Dhar de Néma est de disposer de forts débits ponctuels (pouvant dépasser 100 m³/j) d'eau de bonne qualité, dans un contexte climatique sahélien difficile, affecté par une forte variabilité climatique.

Une meilleure connaissance de la ressource est à acquérir, par la réalisation systématique de pompages d'essai sur les nouveaux forages et la mise en place de relevés de niveau débouchant sur des historiques piézométriques.

Des nivellements sont à prévoir pour établir des cartes piézométrique et structurale précises du Continental intercalaire dans cette région, afin déterminer le gradient d'écoulement et avoir une meilleure estimation des réserves et de la recharge.

On peut espérer que les récents travaux dans le cadre de l'Alimentation en Eau Potable des centres urbains du Hodh Ech Chargui (une trentaine de forages d'exploitation et 8 piézomètres par la SNDE sur les sites de Derwich et de Boughla) donneront lieu à l'établissement d'un suivi régulier, car il s'agit d'une nappe essentiellement fossile dont il faut surveiller attentivement l'évolution. Cela permettra une meilleure évaluation de la ressource renouvelable, afin de mener une exploitation durable de cette excellente ressource en eau souterraine.

C. Fossé de Nara au Mali

Le fossé de Nara est une structure d'effondrement dans le socle précambrien mise en évidence par géophysique lors de prospections pétrolières près de la frontière mauritanienne, en bordure Sud-Ouest du bassin de l'Azaouad, entre la ville de Nara et le lac Faguibine (Fig. 19). C'est une structure en graben comparable au fossé de Gao à 600 km plus à l'Est.

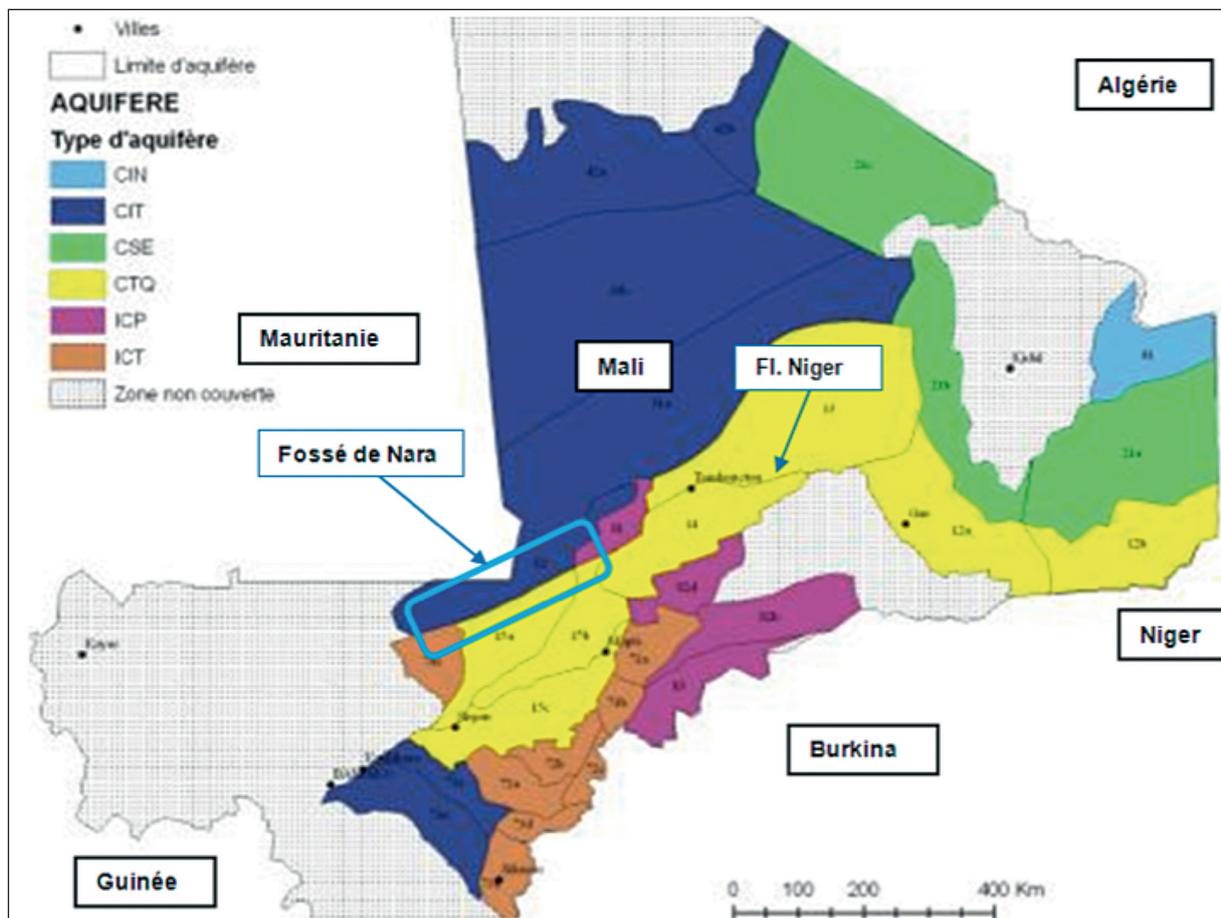


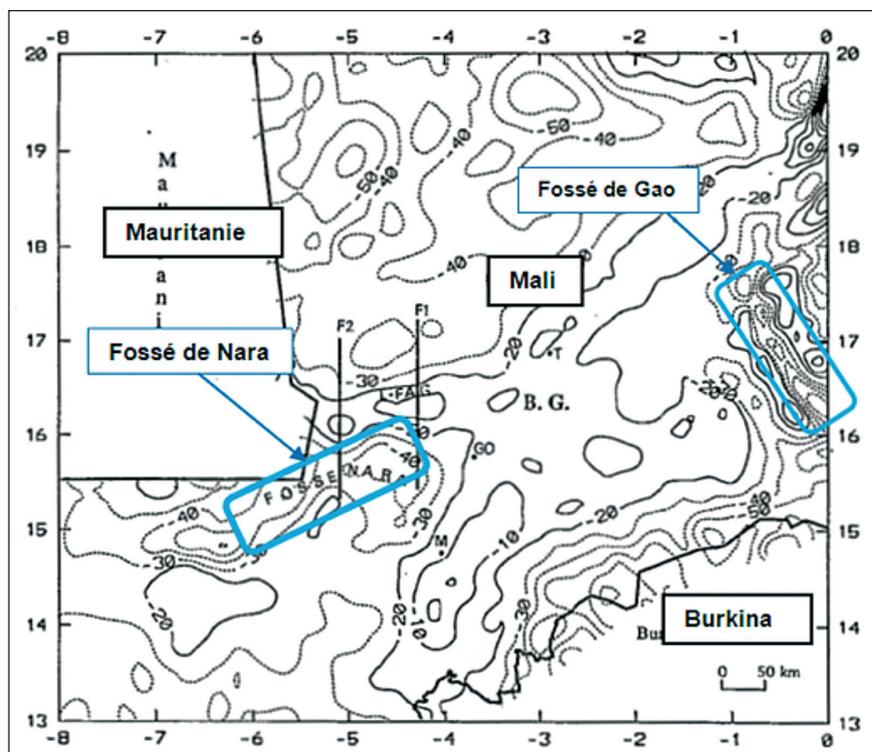
Figure 19 : Localisation de l'unité hydrogéologique du Fossé de Nara au Mali

Dans le fossé de Nara, les similitudes de faciès des formations du Continental intercalaire et du Continental Terminal ne permettent pas de les distinguer. Ces séries continentales anciennes sont couvertes par des dunes quaternaires et, localement, par des dépôts lacustres de l'Holocène qui affleurent dans les creux inter-dunaires.

L'épaisseur des formations continentales dépasserait 500 m dans la zone axiale du fossé et se réduit sur ses bordures à moins de 50 m par suite d'un système de failles en gradins faisant remonter le substratum. Celui-ci est constitué par les schistes et les grès de l'Infracambrien sauf à l'extrémité ouest du fossé où il est représenté par les schistes du Cambrien.

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

L'épaisseur totale de la série sédimentaire n'est pas connue, faute de forage profond. Les données géophysiques indiqueraient une puissance pouvant approcher 1000 m au centre du fossé (Fig. 20). Cette structure commence à intéresser la prospection pétrolière et plusieurs permis de recherche ont été délivrés dans ce secteur.



Légende : T=Tombouctou, GO =Goundam, L. FAG=Lac Faguibine, BG= Bassin du Gourma, M = Mopti.

Source : ORSTOM-CRAS 1993

Figure 20 : Localisation du fossé de Nara sur carte gravimétrique des anomalies de Bouguer de la boucle du Niger

Les données piézométriques sont très fragmentaires. Le piézomètre de Léré, dont le niveau est situé vers 40 m de profondeur, montre des variations annuelles de quelques centimètres seulement, voisines de la précision des mesures. Certains auteurs pensent que cette zone pourrait être affectée par le phénomène de « creux piézométrique » lié à l'évaporation profonde des nappes.

Cette unité contient essentiellement des eaux fossiles. Elle a été probablement rechargée à la fin du Pléistocène et durant l'Holocène entre -3000 et -9000 ans. La recharge actuelle de ces aquifères par infiltration de la pluie est d'importance réduite et limitée aux points d'eau temporaires tels que les mares dans les espaces interdunaires et les tronçons parfois actifs du réseau hydrographique.

Les eaux sont douces au centre de la structure, avec des résidus secs en général inférieurs à 0,4 g/l, un faciès bicarbonaté calcique et de très faibles teneurs en sulfate et en chlorure. La salinité augmente sur la bordure méridionale du fossé ou elle peut atteindre 1 g/l, probablement par contamination à partir de l'aquifère fissuré des grès infracambriens. Elle augmente plus fortement au niveau de la terminaison orientale du fossé, dans le secteur de Gargando, où elle peut dépasser 2 g/l avec des eaux bicarbonatées sodiques et une forte teneur en fluor de 1,7 mg/l.

L'intérêt du secteur du fossé de Nara est de disposer d'une forte épaisseur de sédiments continentaux détritiques, propices à l'obtention de forts débits ponctuels d'eau de bonne qualité, dans un contexte climatique sahélien difficile, affecté par une forte variabilité climatique.

Une meilleure connaissance de cette ressource est à acquérir, sur l'épaisseur totale de la série, la répartition de la productivité des forages suivant les emplacements dans la structure, et l'identification de zones homogènes de qualité physicochimique des eaux.

La réalisation systématique de pompages d'essai sur les nouveaux forages, avec nivellement des ouvrages, et la mise en place de relevés de niveau débouchant sur des historiques piézométriques permettraient d'établir une piézométrie précise du Continental intercalaire dans cette structure, afin déterminer le gradient d'écoulement et avoir une estimation des réserves et de la recharge.

Cela permettra une meilleure évaluation de la ressource renouvelable, afin de mener une exploitation durable de cette excellente ressource en eau souterraine.

5. CONCLUSION

Les bassins d'Iullemeden et de Taoudéni/Tanezrouft sont comblés des formations sédimentaires allant du Cambro-ordovicien au Quaternaire. Ces formations reposent sur un socle précambrien et infracambrien.

Le bassin d'Iullemeden présente une structure en vaste et profonde cuvette, de forme relativement simple, fermée au nord par des reliefs (Aïr, Hoggar et Adrar des Iforas) et ouverte au sud dans la zone structurale d'effondrement du Parc du W, à l'endroit où le fleuve Niger draine les aquifères du Ci et du CT vers un exutoire unique majeur représenté par la vallée du fleuve Niger à son entrée au Nigeria.

Le bassin de Taoudéni/Tanezrouft présente une structure d'ensemble du bassin Mésozoïque et Cénozoïque du Ci et du CT perturbée par une tectonique cassante, active lors des dépôts à différentes époques géologiques, et qui est responsable de cloisonnements à toutes les échelles, de très fortes variations d'épaisseur et de faciès, et de structures d'effondrement de grande ampleur (fossé de Nara, fossé de Gao) ou de seuils (seuil de Bamako, d'Abolag et Ouasa, dorsale d'Azoulad etc.). Ce sont des sous-bassins dans lesquels les conditions hydrogéologiques peuvent être très différentes. Il n'existe pas un exutoire unique, mais plusieurs non encore complètement définis : fleuve Niger via le fossé de Gao, difffluence vers le bassin de la Volta (bassin du Gondo, secteur sud-est du bassin de Taoudéni au Burkina Faso).

Les formations aquifères concernées dans les deux bassins sont le Continental intercalaire (Crétacé supérieur) et le Continental Terminal d'âge tertiaire. Le recouvrement quaternaire touche ces deux aquifères.

Des secteurs à fort potentiel en eaux souterraines ont été mis en évidence. Il s'agit :

- des zones à ressources en eau renouvelables du fait d'une liaison avec les eaux de surface (Delta intérieur du fleuve Niger, du secteur aval des Dallols au Niger et au Nigeria, du bassin du Mouhoun au Burkina Faso en amont de la plaine du Gondo, et du Fossé de Gao),
- des zones à ressources en eau faiblement renouvelables à forte puissance des formations aquifères et de leur perméabilité (secteur de Tahoua au Niger, du secteur sud du Dhar de Néma en Mauritanie, et du Fossé de Nara au Mali).

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABN_Prélèvements_BRL_rapport.pdf.

ABOUBACAR, S. : Etude socio-économique sur l'utilisation des infrastructures hydrauliques exploitant les eaux souterraines en milieu rural au Niger : rapport final.- Niamey : MHE, 1990.- 85p.3137

ADJINACOU C., ONIBON H., 2004. Étude multisectorielle pour le développement durable dans la portion béninoise du bassin du fleuve Niger : analyse des opportunités et des contraintes. Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN)/DG-Eau, COTONOU.

Affaton Journal of African Earth Sciences, Vol. 7, No. 1, pp. 159-166,1988. Printed in Great Britain: Phosphates du Protérozoïque supérieur dans la chaîne des Dahomeyides (circa 600 Ma) de la région de Bassar (Nord-Togo, Afrique de l'Ouest).

ALASSANE A., AZONSI F. et BOUKARI M. (2010) : Résultats préliminaires de l'inventaire détaillé des aquifères transfrontaliers de la République du Bénin (Afrique de l'Ouest) Communication «Aquifères transfrontaliers : défis et nouvelles directions» du 6 au 8 décembre 2010- Paris en France.

Anderson, H.R. (1970): Aquifers in the Sokoto Basin, Northwestern Nigeria, with a Description of the General Hydrogeology of the Regions. USGS Water Supply Paper 1757-L.

ANTEA. Étude de faisabilité d'une station pilote pour l'évaluation des ressources en eau en zone de socle. Janvier 2001.

ANTEA/PHY. Étude des ressources en eau du Dhar de Néma et d'Oualata. Rapport de fin de phase 1. Synthèse des connaissances, version définitive. Février 2001.

ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Atlas hydrologique de la Mauritanie. Ministère de l'Hydraulique et de l'Habitat. Direction de l'Hydraulique. Bureau hydrologie 1981.

Banque Mondiale. Revue du Secteur du Niger. Juin 2001 37 pages.

BRGM notice explicative des cartes à 1/200.000 et 1/500.000 de l'extrême sud de la Mauritanie BRM/RC6542736fr 11 2005.

BRGM, 1975, Notice explicative de carte géologique à 1 000 000 de la Mauritanie, Monographie géologiques Régionales ; Direction des Mines et de la Géologie, Ministère de la Planification et du Développement Industriel, Mauritanie, 255p.

Carte des Prélèvements en eau pour l'agriculture en pourcentage des ressources en eau renouvelables (1998). FAO.

Carte des risques de pollution par les activités minières.

Carte du cadastre minier au 1/1 000 000^{ème} au format ArcGis.

Carte du réseau hydrographique du Burkina Faso au 1/1 000 000^{ème}, IGB.

- Carte géologique et minière du Burkina Faso au 1/1 000 000ème, BUMIGEB.
- Cartes CONEDD (topographie, cours d'eau, villes et villages, végétation) au format ArcGis et Mapinfo.
- Cartes des industries présentes dans la zone du Programme VREO (Valorisation des ressources en eau) au format PDF.
- CARUBA R. et DARS R., 1991. Géologie de la Mauritanie, Université de Nice Sophia Antipolis, Institut supérieur scientifique, Nouakchott, 321 p.
- CIEH Création d'un réseau piézométrique national au Niger juin 1986.
- CIMA, 2003 : Etude d'un programme d'hydraulique rurale au Niger.
- DAKOURE D. « étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali) - essai de modélisation ». Thèse 2003.
- DEMBELE F., GERBE A., KAREMBE M., GAUTIER D. Études des conséquences des modalités d'utilisation des terres sur la dégradation des milieux en zone aride au Mali – projet CSFD – Rapport final Institut d'Économie Rurale 2004.
- Deynoux, M., 1980 : les formations glaciaires du Précambrien terminal et de la fin de l'Ordovicien en Afrique de l'Ouest. Travaux du laboratoire sciences de la terre N° 17, sér. B, Marseille.
- DH/SEP/BG., 1995, Étude géophysique pour l'alimentation en eau potable de site d'Achemim. Rapport, Direction de l'Hydraulique, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 26p.
- DH/SEP/BG., 1997, Dhar de Néma – Synthèse hydrogéologique. Direction de l'hydraulique, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 16p.
- DH-AFD-BAD, 2010. Projet d'hydraulique villageoise dans la Région de Tahoua, réalisation de 24 forages profonds.
- DIARRA A.T. Décembre 2004. Évaluation des Ressources en eaux du Mali. Direction Nationale de l'Hydraulique et Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau.
- DNACPN, DNH, 2007. Stratégie Nationale de gestion des déchets liquides du Mali.
- DNH. Données piézométriques des régions de Kidal, Mopti, Gao, Koulikoro, Ségou, Sikasso, Bamako, 2012.
- DNH. Plan d'action de la Stratégie nationale de suivi et d'évaluation des ressources en eau, 2010.
- DNH. Rapport National sur la mise en valeur des ressources en eau, 2004.
- DNH. Rapport sur la collecte de données hydrogéologiques existantes sur la portion malienne du bassin d'Illemeden 2006.
- Document de Politique et Stratégies pour l'Eau et de l'Assainissement (Plan d'Actions, à court, moyen termes - République du Niger- Ministère des Ressources en Eau- Niamey -Mai 2001.
- DPSC., 2012. La GIRE en Mauritanie, Communication au Séminaire national sur l'État des lieux et Perspectives du secteur de l'Hydraulique et de l'Assainissement, Mauritanie.

- DRH Kidal. Ressources en eau souterraines des régions du Nord du Mali, 2007
- DRH Kidal. Ressources en eau souterraines des régions nord du Mali 2007.
- DRH Mopti. Analyse et interprétation des données « mesures de niveau statique des points d'eau modernes », GWI, commune de Baye, Diallassagou, Ouenkoro et Sokoura 2011.
- Énergie du Mali, DIWI Consult International. Recherche des eaux souterraines – forages d'exploitation, étude des eaux souterraines, contrôle des travaux de forage, Rapport final, 2000
- Énergie du Mali, DIWI Consult International. Recherche des eaux souterraines – forages d'exploitation, modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains Bamako-Rive Droite, 2000.
- Enplan (2004): Review of the Public Irrigation Sector in Nigeria, Federal Ministry of Water Resources.
- Favreau G., 2000. Caractérisation et Modélisation d'une nappe phréatique en hausse dans au Sahel. Thèse de Doctorat, Univ. Paris XI.
- Federal Ministry of Industry (2002): Digest of Statistics 2002.
- Federal Ministry of Solid Minerals (1999): An Inventory of Solid Minerals Potential of Nigeria.
- Géologie – Géophysique (G.G), 1987, Recherche de nappe d'eau souterraine sur le Dhar de Oualata – Étude géophysique et sondages de reconnaissance, Direction de l'Hydraulique, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 34 p.
- GIRE - État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion, Mai 2001
- Greigert, J., 1966. Description des formations crétacées et tertiaires du Bassin des Iullemmenden. BRGM, publication n° 1.
- Guéro, A., 2003. Etude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure sud-ouest du bassin des Iullemmenden (Niger) : Approches géochimiques et hydrodynamique. Thèse de Doctorat, Univ. Paris XI Orsay.
- Hugues Faure, 1966. Reconnaissances Géologiques des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger Oriental.
- IGIP Notice explicative de la carte hydrogéologique du bassin sédimentaire de Kandi à l'échelle du 1/200 000^{ème}.
- IHP/UNESCO, 1998: Soil and groundwater pollution from agricultural activities. Learning material, Technical documents in hydrology/ N° 19 Paris.
- Japan International Cooperation Agency (1990) : The Study for Groundwater Development in Sokoto State.
- JMB_CONSULT, Observatoire Régional de l'Eau en Afrique de l'Ouest - État des Lieux - Rapport pays : Mali, 2007
- Klitzsch, E. H. (1999): Geological Elements for Preparing Regional Hydrogeological Studies, based on the Nubian Aquifer Examples – Regional Aquifer Systems in Arid Zones – Managing Non Renewable Resources International Conference, Tripoli, Libya.

- Maduabuchi, C. (2000): The Project for the Study of Wurno Irrigation Scheme Area in the Rima Hydrological Basin, Sokoto state, Nigeria for Fadama Irrigation and Water Supply, using Isotope Techniques- Federal Ministry of Water Resources.
- MAIGA S. ; BOUARE D. ; BOUBACAR Y. ; BOCOUM D. Direction Nationale de l'Hydraulique - Projet de Gestion des Risques Hydrogéologiques du Système Aquifère Iullemeden SAI - Rapport sur la collecte de données hydrogéologiques existantes sur la portion malienne du bassin d'Iullemeden 2006.
- MELANDRI M. Programme d'Appui aux Collectivités Territoriales pour l'Eau Potable et l'Assainissement (PACTEA) – Exécution des travaux de forage dans les régions de Ségou et Mopti – rapport hydrogéologique 2008.
- Mott Macdonald et all. Évaluation hydrologique de l'Afrique Sub-Saharienne. Pays de l'Afrique de l'Ouest. Rapport pays : Mauritanie. Juillet 1992.
- Nations Unies : Les ressources en eau de l'Afrique septentrionale et occidentale. Collection Ressources Naturelles/série Eau n° 18, ST/TCD/5 ;
- Niger GEF Project Preliminary Transboundary Diagnostics Anal.pdf.
- Nigeria Geological Map.
- Offodile, M. E. (2004): Nigerian Water Development Report, UNECA.
- OSS Aquifères des grands bassins synthèse des connaissances hydrogéologiques des bassins au sud du Sahara ; B. Diagana 1997.
- OSS, 2007. Gestion des Risques Hydrogéologiques dans le Système Aquifère d'Iullemeden (SAI). Rapport Régional Analyse Diagnostique Transfrontalière du Système Aquifère d'Iullemeden (SAI) Mali – Niger – Nigeria.
- OUATTARA O., 2006. Projet de plan d'action national de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE).
- P. Laroche, 2005. Evaluation of the oil and gas potential of the GAO graben sub basin – Exploration permit Block 11 - Republic of Mali.
- PHY – ANTEA, Décembre 2001, Étude des ressources en eau du Dhar de Néma et de Oualata, Rapport fin phase3, Centre National des Ressources en Eau, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 35p.
- PHY – ANTEA, Octobre 2002, Étude des ressources en eau du Dhar de Néma et d'Oualata, Rapport final, Centre National des Ressources en Eau, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 64p.
- PHY – ANTEA, Octobre 2002, Étude des ressources en eau du Dhar de Néma et de Oualata, Rapport fin phase4, Centre National des Ressources en Eau, Ministère de l'Hydraulique et de l'Énergie, Mauritanie, 27p.
- Pitfield P.E.J., J.A. Key R M, Waters C.N., Hawkins M.P.H., Schofield D.I., Loughlin S. et Barnes R.P., 2004. Notice explicative des cartes géologiques et gîtologiques à 1/200 000 et 1/500 000 du Sud de la Mauritanie, Volume 1 – géologie. DMG, Ministère des Mines et de l'Industrie, Nouakchott, 126 p.

- Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau du Burkina Faso (PAGIRE)-mars 2003.
- Projet MLI/84/005 : Synthèse Hydrogéologique du Mali. Département de la Coopération Technique pour le Développement (DCTD).
- Projet PNUD/DCTD/MLI/90/002 - Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie : Atlas Hydrogéologique du Mali.
- Puri, S. (2001): Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management. IHP, UNESCO.
- RABE S. : Analyse Diagnostique Transfrontalière (ADT) du Système Aquifère d'Iullemeden (SAI), Mars 2006.
- Rapport fin de projet Sourou-Nayala, format papier (IGIP).
- Rapport final Assistance Technique pour le projet «Étude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo Dioulasso» (SOGREAH, juillet 1994).
- Rapports DADI des régions des Cascades, de la Boucle du Mouhoun, des Hauts Bassins, de l'Est, du Nord et du Sahel.
- SAAD K. Eude hydrogéologique de la boucle du Niger 1970
- SAAD K. Eude hydrogéologique du sud du Mali (Niger supérieur et Bani) 1970
- SAAD K. Hydrogéologie, Mali, Décembre 1966-Décembre 1970
- Saad K., 1970. Etude hydrogéologique du Nord de la Boucle du Niger.
- SAAD K.F. Janvier 1967-Décembre 1969. Étude hydrogéologique de l'Est du Mali. UNESCO/Mali. N° de série 1856/BMS.RD/SCF Paris, mai 1970.
- Sanyu Consultants Inc. (1995): The Study on the National Water Resources Master Plan. Federal Ministry of Water Resources and Rural Development. Nigeria.
- Schéma Directeur de Mise en Valeur et de Gestion des Ressources en Eau- Ministère de l'Hydraulique et de l'environnement- Juin 1999
- SIDORO M. Gestion des risques hydrogéologiques dans la portion malienne du système aquifère d'Iullemeden - Rapport sur l'analyse diagnostique transfrontalière (ADT) du système aquifère d'Iullemeden (SAI) 2006.
- SOGREAH/SCET – Tunisie (1997) : Étude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin. Rapports R1 à R7. Cotonou, Bénin.
- STUDI I., 2009. Étude hydrogéologique et géophysique de la nappe du continental intercalaire du Dhar de Néma, Tache 2, SNDE, Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement, Mauritanie 74 p.
- STUDI International, 2011. Implantation et contrôle des travaux d'exécution de 30 forages d'exploitation et 8 piézomètres au Dhar de Néma SNDE, mars 2011.
- Synthèse aquifère d'Iullemeden Mali-Niger-Nigéria ; Tunis, 2011.
- TURKPAK INTERNATIONAL-SCET-Tunisie (1991) : Inventaire des ressources en eaux souterraines au Bénin. Rapport final Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin. 1, 284 pp.

Ude, M. O. and Hanidu, J.A. (2004) : Assessment of the Opportunities and Constraints to the Development of the Nigeria's Portion of the River Niger Basin.

UNICEF-Practica-Enterprise Works. Étude de faisabilité des forages manuels. Identification des zones potentiellement favorables. 2009

Wilfrid VISSIN. 2007. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse CNRS.

WWAP/UNESCO, 2006. Mise en valeur des ressources en eau au Mali, Rapport National.

BIBLIOGRAPHIE GICRESAIT - OSS

- OSS, 2017. **Système Aquifère transfrontalier d'Illemeden, Taoudéni-Tanezrouft : atlas des ressources en eau**\OSS. _ Imprimeries Réunies, Tunis : 2017 - 48 pages. _ ISBN : 978-9938-933-03-1
- OSS, 2017. **GICRESAIT | Gestion intégrée et concertée des ressources en eau : synthèse finale**\OSS. _ Tunis, OSS : 2017. _ 20 p. _ ISBN : 978-9938-933-04-8
- OSS, 2017. **La Mobilisation des eaux souterraines du Système Aquifère d'Illemeden - Taoudéni/Tanezrouft - Un élément de solution** ?\OSS . _ OSS : Tunis, 2017 . _ 12p. _ ISBN : 978-9938-933-01-7
- OSS, 2014. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT) [Plaidoyer]**/ OSS. _ OSS : Tunis, 2014. - 16 pp.
- OSS, 2014. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT) [CD ROM Interactif]**/ OSS. _ OSS : Tunis, 2014.
- OSS, 2013. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Base de données**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 43 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Télédétection**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 36p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Hydrogéologie**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 86 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Changement Climatique en Afrique de l'Ouest et Conséquences sur les eaux souterraines**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 41 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse hydro-climatologique**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 25 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Socio-économique**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 53 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Nigeria**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 46 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de**

- synthèse Niger\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 76 p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Mauritanie\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 61p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Mali\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 98 p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Burkina Faso\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 57 p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Bénin\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 38 p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Algérie\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 59 p.
- OSS, 2012. Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport phase de démarrage\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 78 p.
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : analyse diagnostique transfrontalière. Tome I\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 112 p. ; 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-41-8
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Base de données commune. Tome II\ OSS. _ Tunis, 2011. _ 98 p. ; 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-42-5
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Modèle hydrogéologique. Tome III\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 90p. _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-43-2
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Gestion participative des risques transfrontaliers. Tome IV\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 54p. . _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-44-9
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Suivi-évaluation des aquifères transfrontaliers. Tome V\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 46p. _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-45-6
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Éléments de politique pour la réduction des risques transfrontaliers\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 57 p. . _ 15x21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-46-3
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Approche de l'ADT/Pas du FEM appliquée au SAI\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 45 p. . _ 15x21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-47-0
- OSS, 2011. Système Aquifère d'Illemeden : Cadre de Concertation pour la gestion du risque transfrontalier\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 40p. . _ 21x15 cm. _ ISBN : 978-9973-856-48-7
- OSS, 2008. Système aquifère d'Illemeden (Mali, Niger, Nigeria) : gestion concertée des ressources en eau partagées d'un aquifère transfrontalier sahélien\ OSS. _ Collection Synthèse n° 2. _ OSS : Tunis, 2008. _ 33 pp. _ ISBN : 978-9973-856-28-9



CONTACT



Observatoire du Sahara et du Sahel

Boulevard du Leader Yasser Arafat

BP31, 1080 Tunis Carthage, Tunisie

Tél. : +216 206 633 - Fax : +216 206 636

Courriel : boc@oss.org.tn

www.oss-online.org

 twitter.com/OSS_Comms

 facebook.com/osscommunity
facebook.com/sawapbricks

ISBN : 978-9938-933-11-6

PARTENAIRES DE COOPÉRATION

