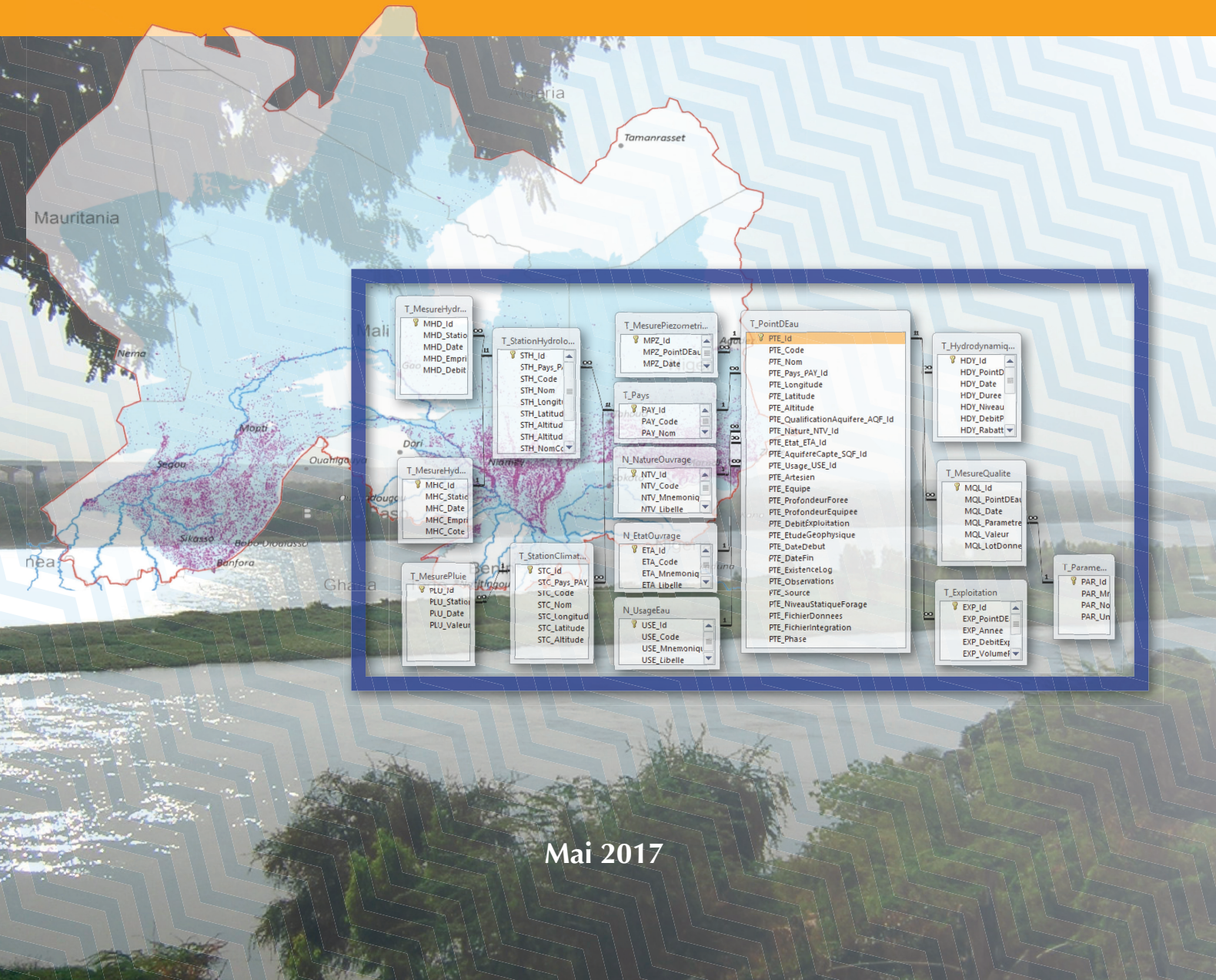




GICRESAIT | GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'ILLEMEDEN, DE TAODÉNI- TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER

MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE



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

«GICRESAIT»

MODELISATION HYDROGEOLOGIQUE

Mai 2017

Observation du Sahara et du Sahel © 2017

GICRESAIT | Modélisation Hydrogéologiques / OSS. _ OSS, Tunis : 2017. _ 96 p.

ISBN : 978-9938-933-10-9

Réalisation et impression : Simpact

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS	5
1. CONTEXTE, OBJECTIFS	8
1.1. Contexte de l'Étude	8
1.2. Etendue de la zone d'étude	9
2. BASE DE DONNEES	11
2.1. Objectifs du Système de Gestion de Base de Données Relationnelle (SGBDR)	11
2.2. Extrait du Modèle Physique des Données (MPD)	11
2.3. Audit et import des données « Pays »	11
2.3.1. Exemples de problèmes rencontrés	13
2.3.2. Assignation des altitudes à partir du MNT	14
2.3.3. Analyse statistique des données	14
3. MODELISATION	16
3.1. Systèmes aquifères	16
3.1.1. Rappel du contexte hydrogéologique	16
3.1.1.1. Typologie des aquifères, mur des systèmes aquifères	16
3.1.2. Communication entre les systèmes aquifères	17
3.1.2.1. Structure du fossé de Gao	17
3.1.2.2. Rôle hydrogéologique du fossé de Gao et liaison des nappes avec le fleuve Niger	18
3.1.3. Piézométrie & caractéristiques hydrodynamiques	19
3.1.3.1. Cartes piézométriques	19
3.1.3.2. Fluctuations piézométriques	20
3.1.4. Prélèvements	21
3.2. Modèle conceptuel	21
3.2.1. Types de modèle	21
3.2.2. Conditions aux limites	22
3.2.3. Modélisation des systèmes aquifères SAI-SAT-SAIT	23
3.2.4. Recharge : méthodologie développée	24
3.3. Construction du Modèle	26
3.3.1. Code de calcul utilisé et préprocesseur	26
3.3.2. Maillage	27
3.3.3. Géométrie	28
3.3.3.1. Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft	28
3.3.3.2. Système Aquifère des lullemeden	30
3.3.4. Relations nappes / rivières	32
3.3.5. Représentation des cours d'eau et des sources	33
3.3.6. Cas particulier : zone d'exfiltration	35

3.4. Calage du Modèle	38
3.4.1. Régime permanent	38
3.4.1.1. Piézométrie de référence	38
3.4.1.2. Recharge	38
3.4.1.3. Prélèvement	40
3.4.1.4. Perméabilité	40
3.4.1.5. Résultats du calage en régime permanent	42
3.4.2. Calage en régime Transitoire	48
3.4.2.1. Piézomètres	48
3.4.2.2. Recharge	49
3.4.2.3. Prélèvements	49
3.4.2.4. Emmagasinement	49
3.4.2.5. Résultats du calage en régime transitoire	50
3.5. Modèle : scénarios	56
3.5.1.1. Recharge	59
3.5.1.2. Prélèvements	59
3.5.1.3. Bilan et tendances	59
3.5.1.4. Recharge	62
3.5.1.5. Prélèvements	62
3.5.1.6. Bilan et tendances	62
3.5.2. Conclusion sur la modélisation	66
4. VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES ET IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	68
4.1. Objectifs et enjeux de la composante, éléments de contexte	68
4.1.1. Vulnérabilité, résilience, stabilité et risque – définition générique	68
4.1.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines	69
4.1.3. Enjeu : Baisse du niveau piézométrique liée aux variations climatiques	69
4.1.4. Enjeu : Pollution des eaux souterraines par la pression d'origine anthropique	75
4.2. Indicateurs de suivi-évaluation	79
4.2.1. Indicateurs de forces motrice «D»	79
4.2.2. Indicateurs de pression «P»	79
4.2.3. Indicateurs d'état «S»	79
4.2.4. Indicateurs d'impact «I»	79
4.2.5. Indicateurs de réponse «R»	80
4.3. Définition d'un réseau de suivi piézométrique régional	80
4.4. Stratégie pour une gestion intégrée et concertée des ressources en eau	81
5. CONCLUSION GENERALE	85
6. RECOMMANDATIONS	87
BIBLIOGRAPHIE	89

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS

ABN	Autorité du Bassin du Niger
ABV	Autorité du Bassin de la Volta
ACDI	Agence Canadienne de Développement International
ACMAD	<i>African Centre of Meteorological Application for Development</i> (Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement)
ADT	Analyse Diagnostique Transfrontalière
AEP	Alimentation en Eau Potable
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AMCOW	African Ministers' Council on Water
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection</i>
BAD	Banque Africaine de Développement
BGR	<i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i> (Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles)
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques
CCRE	Centre de Coordination des Ressources en Eau de la CEDEAO
CEDEAO	Communauté Économique Des États de l'Afrique de l'Ouest
CEN-SAD	Communauté des États Sahélo-Sahariens
Ci	Continental intercalaire
CILSS	Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CNCS	Comité National de Coordination et de Suivi des activités
CRA	Centre Régional AGRHYMET
CT	Continental Terminal
DDC-Suisse	Direction du Développement et de la Coopération - Suisse
DSRP	Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté
ENVISAT	<i>ENVironment SATellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i> (Agence Spatiale Européenne)
FAE	Facilité Africaine de l'Eau
FAO	<i>Food & Agriculture Organisation</i> (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial

FIDA	Fonds International pour le Développement Agricole
GEF	<i>Global Environment Facility</i>
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GICRE	Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau
GICRESAIT	Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni /Tanezrouft et du Fleuve Niger
GIS	<i>Geographical Information System</i>
GiZ (ex GTZ)	Agence de Coopération Technique Allemande pour le Développement
IGAD	<i>Inter Governmental Authority for Development</i>
IRD	Institut de la Recherche pour le Développement (anciennement ORSTOM)
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
MCA-WEAP	<i>Multi-Criteria Analysis tool - Water Evaluation and Planning System</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NEPAD	New Partnership for Africa Development
OMVS	Organisation de Mise en Valeur du Fleuve Sénégal
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PANA	Plan d'Action National pour l'Adaptation aux Changements Climatiques
PAS	Programme d'Action Stratégique
PFN	Points Focaux Nationaux du projet
PHI	Programme Hydrologique International
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SAI	Système Aquifère d'Iullemeden
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
SAT	Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft
SEI	<i>Stockholm Environment Institute</i>
SGBDR	Système de gestion de Base de données relationnelle
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	<i>Shuttle RADAR Topographic Mission</i>
TdR	Termes de Référence
UMA	Union du Maghreb Arabe
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
WEAP	<i>Water Evaluation and Planning System</i>

LE PROJET GICRESAIT « GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'IULLEMEDEN, DE TAODÉNI-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, OBJECTIFS

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

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 Nigéria sur 500.000 km².

Les ressources en eau du SAI, peu renouvelables, constituent une importante source d'alimentation en eau potable pour les populations de la région. Le modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains du système aquifère développé par l'OSS, a permis de mettre en évidence des relations étroites entre le SAI et le fleuve Niger, ainsi qu'avec le Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft (SAT) situé à l'Ouest du SAI. Un protocole d'accord assorti d'une feuille de route pour la création et la mise en place d'un cadre de concertation pour une gestion optimisée de la ressource a été adopté en mai 2009 par les Ministres en charge de l'eau du Mali, Niger et Nigéria.

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.

Les informations disponibles à ce jour sur les Systèmes Aquifères sont disparates, et 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.

Une telle gestion, basée sur des informations scientifiques, permettra aux pays d'une part, de combler les lacunes de connaissance afin de mieux coordonner leurs actions et de maîtriser les risques transfrontaliers, et d'autre part d'entrevoir des options de développement basées sur une exploitation durable et rationnelle de ces ressources aux fins d'assurer des meilleures conditions d'existence aux populations et surtout leur fixation dans leur milieu naturel.

1.2. ÉTENDUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

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 Nigeria (120.272 km², 5%).

Le système aquifère d'Iullemeden 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.

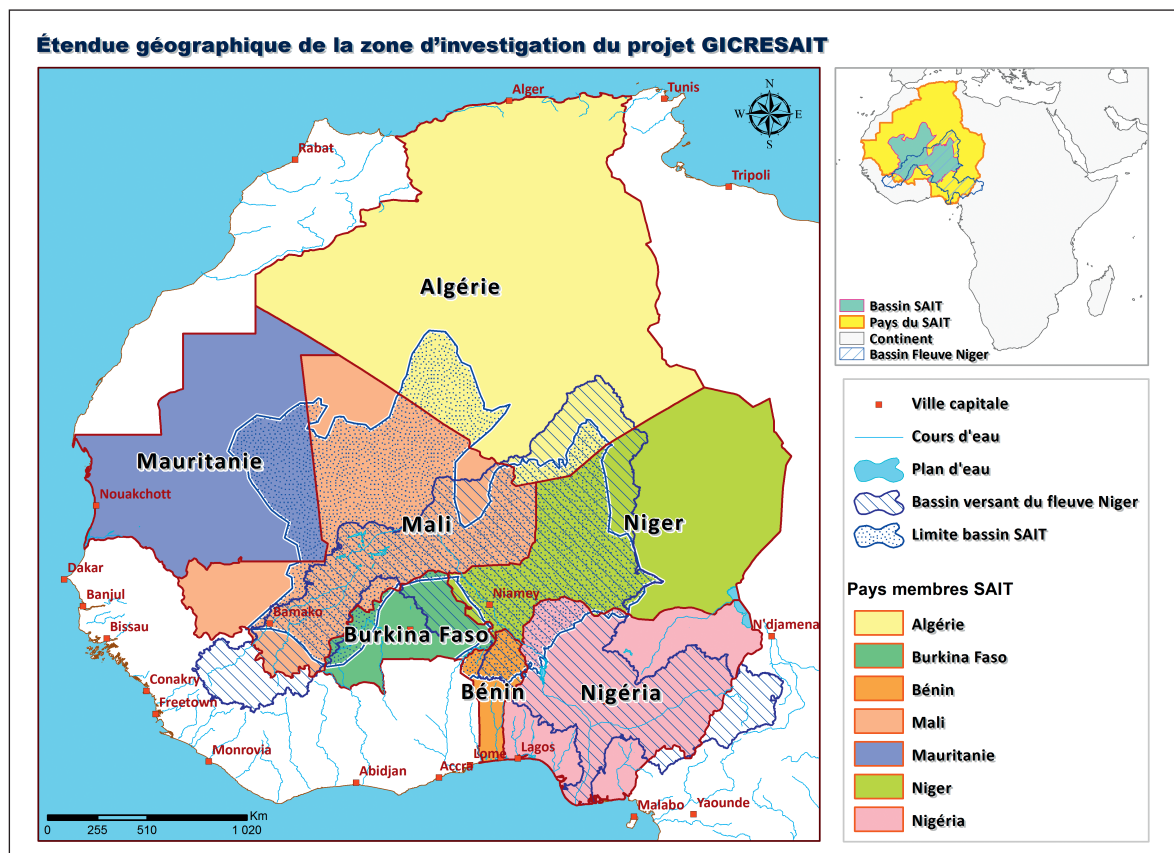


Figure 1 : Zone d'intervention

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. L'approche combinée «ressources en eau souterraine» et «environnement» amène à considérer à la fois :

- La «zone d'étude» est la zone d'extension des nappes des systèmes aquifères des formations géologiques du Ci et du CT. Elle couvre 2,6 millions km².
- La «zone d'intervention» du projet est la zone élargie comprenant l'essentiel des bassins versants en amont des systèmes aquifères (intégrant certaines formations sédimentaires sous-jacentes en continuité hydraulique) dans une logique de «risque d'importation» d'éventuelles pollutions dans les SAI et SAT par les cours d'eau. Elle couvre 3 millions km².

Les bassins versants hydrologiques situés en amont des limites d'extension du Ci et du CT. En effet, l'impluvium sur ces surfaces participe à la recharge des nappes du Ci et du CT par infiltration au niveau des zones d'affleurement, et constitue un important terme du bilan de ces nappes. Sont concernés tous les oueds et fleuves entrant dans le domaine d'extension des aquifères, comme par exemple le fleuve Niger dès son entrée au Mali à l'ouest. Par ailleurs, ces bassins versants «amont» peuvent influencer significativement la qualité de la ressource et la vulnérabilité des nappes du Ci et du CT en cas de présence de sources de pollution qui seraient importées dans le domaine via les cours d'eau. Les sorties des cours d'eau en aval du domaine seront comptabilisées dans les bilans de modélisation.

Le domaine d'extension géographique des formations sédimentaires aquifères sous-jacentes au Ci et au CT : plusieurs études comprenant des suivis et des modélisations de longue durée ont montré l'importance des phénomènes de drainance verticale à partir de nappes profondes si elles sont présentes sous le Ci et le CT. Il en résulte fréquemment des apports qui soutiennent la ressource en eau exploitée, mais qui peuvent risquer de dégrader sa qualité si l'eau des nappes sous-jacentes a une minéralisation défavorable.

Le tracé de la limite nord du domaine d'intervention a été simplifié par rapport au tracé complexe des limites de bassins versants, tout en respectant la logique exposée, car il se situe en milieu extrêmement désertique où les écoulements endoréiques sont mal déterminés.

2. BASE DE DONNEES

2.1. Objectifs du Système de Gestion de Base de Données Relationnelle (SGBDR)

L'objectif est de créer un outil simple d'utilisation et convivial afin de permettre aux gestionnaires de de la Base de données (OSS et pays partenaires) de consulter et de valoriser les données issues des points d'eau dans un contexte transfrontalier.

2.2. Extrait du Modèle Physique des Données (MPD)

Le schéma ci-après présente une partie du MPD de SAIT. Pour des raisons de clarté, seule une sélection de tables est affichée (Fig.2).

Il permet d'illustrer certaines des modifications effectuées : utilisation de mots entiers, préfixes des tables et champs, adjonction de clefs techniques et de clefs étrangères.

2.3. Audit et import des données «Pays»

Les fichiers de données déposés par les différents pays ont pu être étudiés et audités en vue de leur intégration dans la base de données. Cet audit a permis de détecter un certain nombre d'incohérences et d'anomalies.

En général, les données disponibles ne sont pas centralisées pour chaque pays dans un seul fichier par compartiment (qualité, hydrodynamique, piézométrie, exploitation). De plus, des fichiers d'un même pays et pour un même compartiment ont souvent des structures différentes.

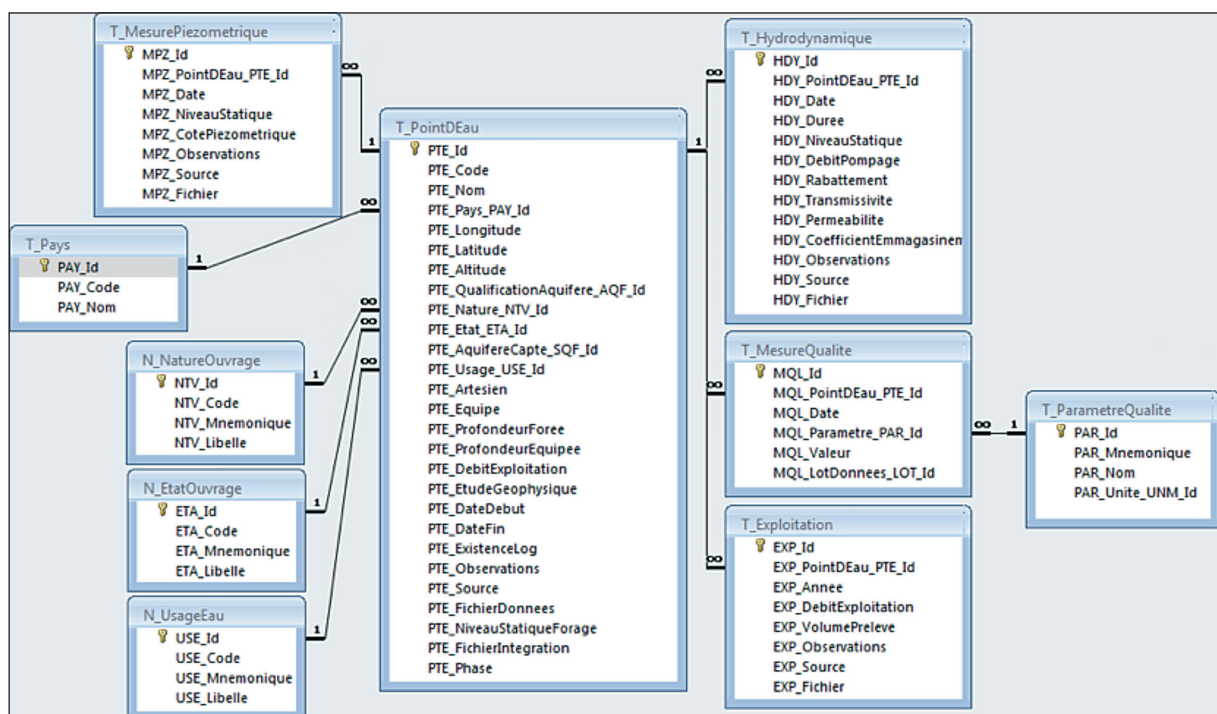


Figure 2 : Extrait du MPD de SAIT

L'identifiant des points d'eau est censé être précisé dans une colonne NoClas. Dans les fichiers renvoyés, plusieurs cas de figure se présentent, mais dès qu'il y a absence d'identifiant unique, l'intégration des fichiers a nécessité des traitements plus ou moins complexes.

Trois cas se distinguent :

- Fichiers avec codes uniques ;
- Fichiers avec codes locaux : une colonne donne un numéro de point d'eau au sein d'une unité administrative ;
- Fichiers sans codes.

Tous ces problèmes ont nécessité, pour chaque fichier, un contrôle visuel et la mise en place de traitements spécifiques, actions **très consommatrices de temps**.

122 518 points d'eau ont été intégrés dans la base de données, tous pays confondus.

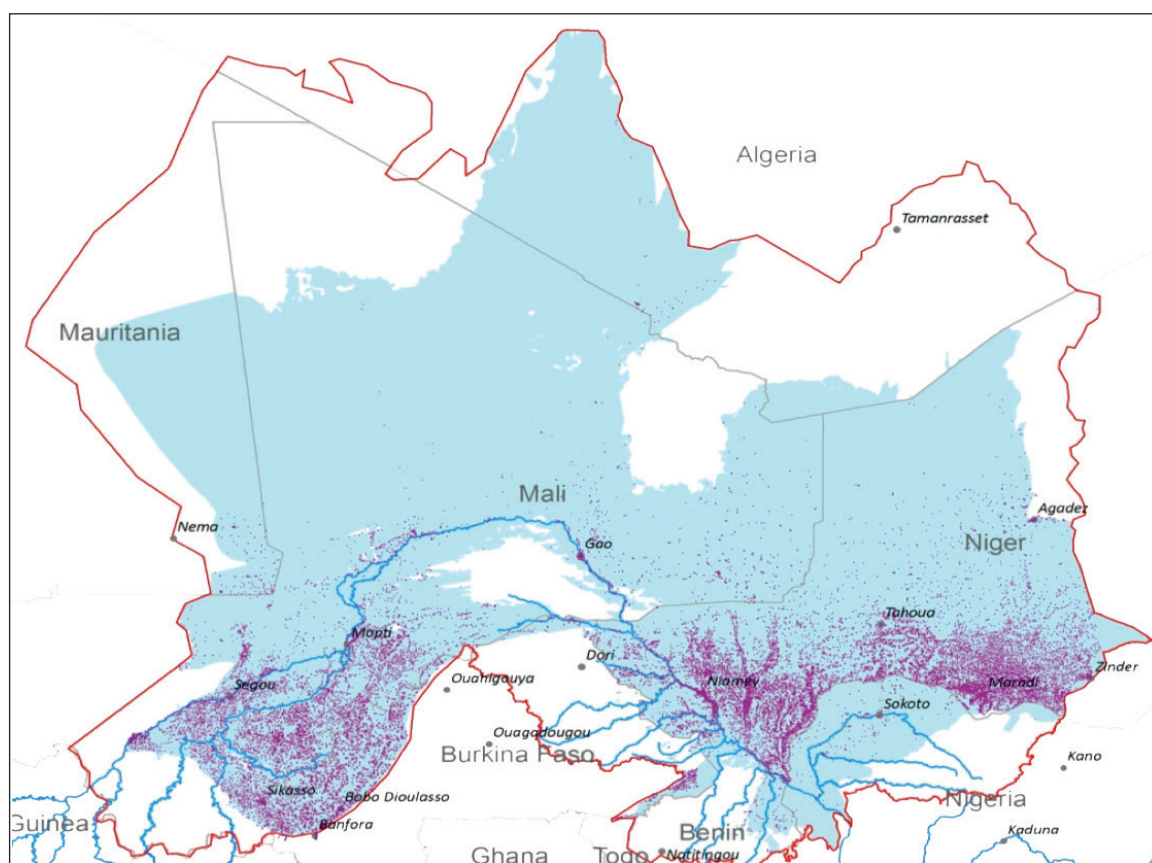


Figure 3 : Exemple de distribution des points d'eau dans la zone d'étude

En sus des données sur les points d'eau (y compris les séries chronologiques de niveaux pour les piézomètres disponibles), les données de pluviométrie (niveaux de précipitations mensuelles de 1960 à 2011 de 50 stations) et d'hydrologie (cotes moyennes trimestrielles et débits moyens mensuels allant de 1960 à 2012 pour 5 stations du fleuve Niger) ont été intégrées à la base dans des tables dédiées à partir des données transmises par AGRHYMET.

2.3.1. Exemples de problèmes rencontrés

Les formats suivants ont été rencontrés pour les données géographiques :

Type	Exemples
Degrés, minutes, secondes	28°35'42"N ; N28°35'42" ; -2°35'42"
Degrés, minutes, secondes «réduit»	283542 (signifie 28°35'42")
Degrés, minutes, secondes «réduit» avec virgule	28,3542 (signifie 28°35'42")
Degrés décimaux	28,62357

Tableau 1 : Différents formats de coordonnées dans les fichiers renvoyés

La fonction de lecture des coordonnées a été adaptée au fur et à mesure pour s'adapter à la diversité des formats rencontrés. Il est toutefois recommandé d'éviter de transmettre les formats «réduits» pour éviter d'éventuelles ambiguïtés.

Diverses erreurs de positionnement, de saisie, de formatage ou d'imprécision nuisent à la qualité du référencement géographique, voire le rendent inexploitable :

- **Erreurs de positionnement :**
 - o Points apparemment regroupés au centre du village,
 - o Certaines erreurs semblent inexplicables (point en dehors de sa zone probable).
- **Erreurs de saisie :**
 - o Absence d'une dizaine devant les coordonnées, facteur 10 manquant pour certaines coordonnées,
 - o Absence de signe ou de spécification Est (symétrie par rapport au méridien de Greenwich).
- **Imprécisions :** dans certains fichiers, les coordonnées sont en degrés et minutes, les secondes ne sont pas précisées, d'où une imprécision d'environ 600 mètres.

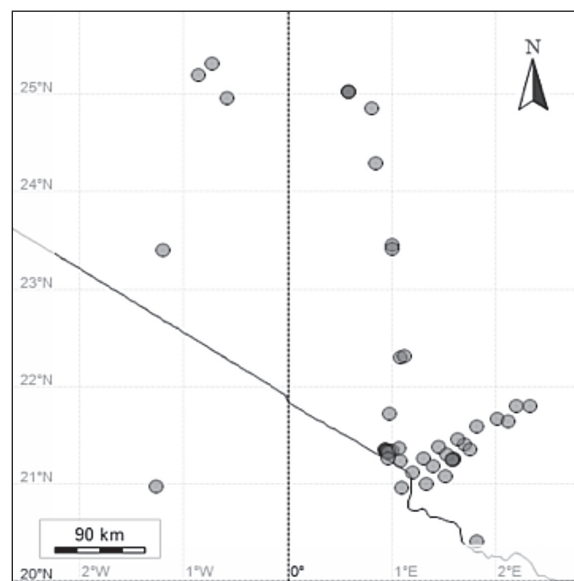


Figure 4 : Exemple d'erreur de signe de longitude

Les champs «Type d'ouvrage» et «Usage de l'eau» ont donné lieu à des remplissages hétérogènes. Par exemple, «Piézomètre» est utilisé dans certains fichiers, «PZ» par d'autres. Cette hétérogénéité montre la nécessité d'établir des listes de valeurs possibles (nomenclatures) communes aux pays concernés.

Le champ Aquif-Sigle a donné lieu à deux interprétations : lithologie, ou système aquifère.

2.3.2. Assignment des altitudes à partir du MNT

Parmi les points d'eau intégrés dans la base de données, certains points ne sont pas renseignés en altitude, d'autres ont une altitude qui peut s'avérer incertaine. En particulier, certains points d'eau ont un niveau statique renseigné mais en l'absence d'altitude, ce niveau ne peut être exploité pour, par exemple, tracer des courbes isopièzes.

L'absence d'altitude peut être palliée par l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT) acquis par satellite, ce qui était le cas dans le cadre de ce projet.

Pour ce faire, un outil spécifique a été développé par l'expert Base de Données pour effectuer cette assignation en quelques secondes. L'outil mis au point permet donc un calcul presque instantané, ce qui est important pour l'intégration de nouveaux points d'eau au fil du temps.

Ces altitudes MNT des points d'eau permettent d'avoir un référentiel unique et pourront ainsi être utilisées pour élaborer des coupes et cartes piézométriques géoréférencées.

2.3.3. Analyse statistique des données

L'analyse statistique de la Base de Données commune est faite par le biais des requêtes qui constituent une approche permettant de sélectionner des champs spécifiques de la Base de Données et de faire leur analyse soit par combinaison, comparaison ou comptage.

Les requêtes réalisées sont relatives aux taux de remplissage des champs des données de première importance. Ce type de requêtes a pour objectif de mettre en évidence les lacunes d'information concernant les principaux champs de la base de données qui sont les suivants :

- Numéro d'identification ou code,
- Nom du point d'eau,
- Nature du point d'eau,
- Coordonnées,
- Date de fin de réalisation ou de réception,
- Altitude du point d'eau...

Analysés dans leur ensemble pour la totalité des points d'eau inclus dans la base de données commune et sans distinction ni d'aquifère ni de pays, les champs répondant aux rubriques propres à l'identification et la localisation du point d'eau s'avèrent mieux instruits que ceux relatifs aux caractéristiques hydrogéologiques, aquifère capté, niveau statique, profondeur équipée, etc. (Tableau 2) :

La dernière situation de la base compte 122 518 points d'eau.

Tableau 2 : Lacunes d'information des champs de la table point d'eau

Rubrique	Champs renseignés	%	Champs non renseignés	%
Pays	122518	100%	0	0%
Longitude	121552	99%	966	1%
Latitude	121552	99%	966	1%
Numéro d'Identification ou Code	119582	98%	2936	2%
Profondeur totale	44855	37%	77663	63%
Nom du point	41324	34%	81194	66%
Nature du points d'eau	40275	33%	82243	67%
Niveau statique	35736	29%	86782	71%
Date de réalisation	32548	27%	89970	73%
Profondeur équipée	22257	18%	100261	82%
Altitude du point d'eau	21228	17%	101290	83%
Aquifère	15873	13%	106645	87%

Les points d'eau auxquels nous avons attribué un numéro de classement fictif sont inclus dans les lacunes relatives à ce champ. Le nombre global de points d'eau importés dans la base de données sera sans doute revu à la baisse et ce pour une raison principale : les points d'eau identifiés de façon provisoire comportent très probablement des doublons. La vérification a permis d'en éliminer certains.

Cet état de la base de données commune révèle une information relativement dense et un taux de collecte rendant la base de données opérationnelle, mais afin d'en tirer pleinement profit, il est recommandé de compléter les données manquantes afin de pouvoir pousser l'analyse de l'état d'information dans le détail en la classant par «aquifère capté» et par «pays» en vue de localiser les lacunes et d'arrêter les tâches complémentaires à effectuer par les équipes nationales.

3. MODELISATION

Dans ce chapitre les informations collectées seront brièvement rappelées dans les deux prochains sous-chapitres avant de discuter de la construction, du calage et de l'exploitation du modèle hydrodynamique.

3.1. SYSTÈMES AQUIFÈRES

3.1.1. Rappel du contexte hydrogéologique

3.1.1.1. Typologie des aquifères, mur des systèmes aquifères

➤ *Aquifères continus ou généralisés*

Les principaux aquifères généralisés dans la zone d'intervention du projet sont le Continental intercalaire et le Continental Terminal (et, à un moindre degré, le Crétacé supérieur/Éocène inférieur à l'ouest et à l'est de l'Adrar des Iforas).

Ces aquifères sont caractérisés par une perméabilité de type inter-granulaire et par des nappes continues couvrant la majeure partie des régions sahéennes et désertiques de l'est et du nord. Ils sont constitués par des formations essentiellement détritiques et d'origine continentale qui se sont accumulées, depuis le Secondaire, dans trois vastes bassins sédimentaires (le bassin de Taoudéni - partie centrale et méridionale, le Détroit soudanais et le bassin d'Iullemeden au Niger).

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 cimentés en grés.

➤ *Aquifères fissurés*

À l'échelle régionale à laquelle s'applique le projet, ces aquifères de ce type ne sont en principe pas pris en compte comme faisant partie des systèmes aquifères, car il n'y a pas continuité de la ressource en eau d'un point à un autre du fait du cloisonnement introduit par le manque de communication entre les fissures.

Toutefois, d'une manière opérationnelle, lorsque les formations du Continental intercalaire et/ou le Continental Terminal reposent en continuité avec un aquifère fissuré, l'ensemble a été considéré comme appartenant à un système aquifère, du fait de la continuité effective de la ressource en eau d'un point à un autre du bassin.

➤ *Mur imperméable du système aquifère de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger*

Le mur imperméable varie suivant les régions, ce qui s'explique par la très grande extension de ce système aquifère :

- *Dans l'Azaouad*, ce sont les argiles rouges du Namurien, stériles et épaisses de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur qui constituent le mur imperméable de l'aquifère généralisé du Continental intercalaire.
- *Dans l'extrême nord et en Mauritanie*, le mur est constitué par les séries schisto-gréseuses de l'Infracambrien (pélites du Hodh) et par les formations calcaires et argileuses

du Carbonifère et du Cambro-ordovicien du Tanezrouft, peu connues sur le plan hydrogéologique.

- *Dans le sud de l'Azaouad*, dans les glacis de la bordure sud de l'Adrar des Iforas et les plaines qui s'étendent de part et d'autre du fleuve Niger à l'aval de Ségou jusqu'à Gao et au Gourma, le mur de l'aquifère correspond au socle précambrien constitué de roches variées, métamorphisées à différents stades et fortement plissées. Toutefois, dans la plaine du Gondo (Burkina Faso) et en rive droite du fleuve Niger en aval de Bamako au Mali, le Précambrien (Birrimien) est aquifère, avec un faciès gréseux et se trouve en continuité avec les formations du Continental Terminal sus-jacentes.

➤ **Mur imperméable du système aquifère d'Iullemeden**

Comme pour le SAT, le mur imperméable du SAI varie suivant les régions, du fait de la très grande extension de ce système aquifère :

- *Dans les parties sud et ouest du bassin*, il s'agit des formations du socle métamorphique («basement complexe» au Nigéria) et cristallin d'âge Infra ou Précambrien sur lesquelles sont transgressives les formations du Continental intercalaire et du Continental Terminal.
- *Dans les parties nord et est du bassin*, il s'agit des formations d'âge primaire transgressives sur le socle de l'Air, du Hoggar et de l'Adrar des Iforas. Ces formations de nature variée comportent d'épaisses séries argileuses les isolant du système aquifère Ci/CT.

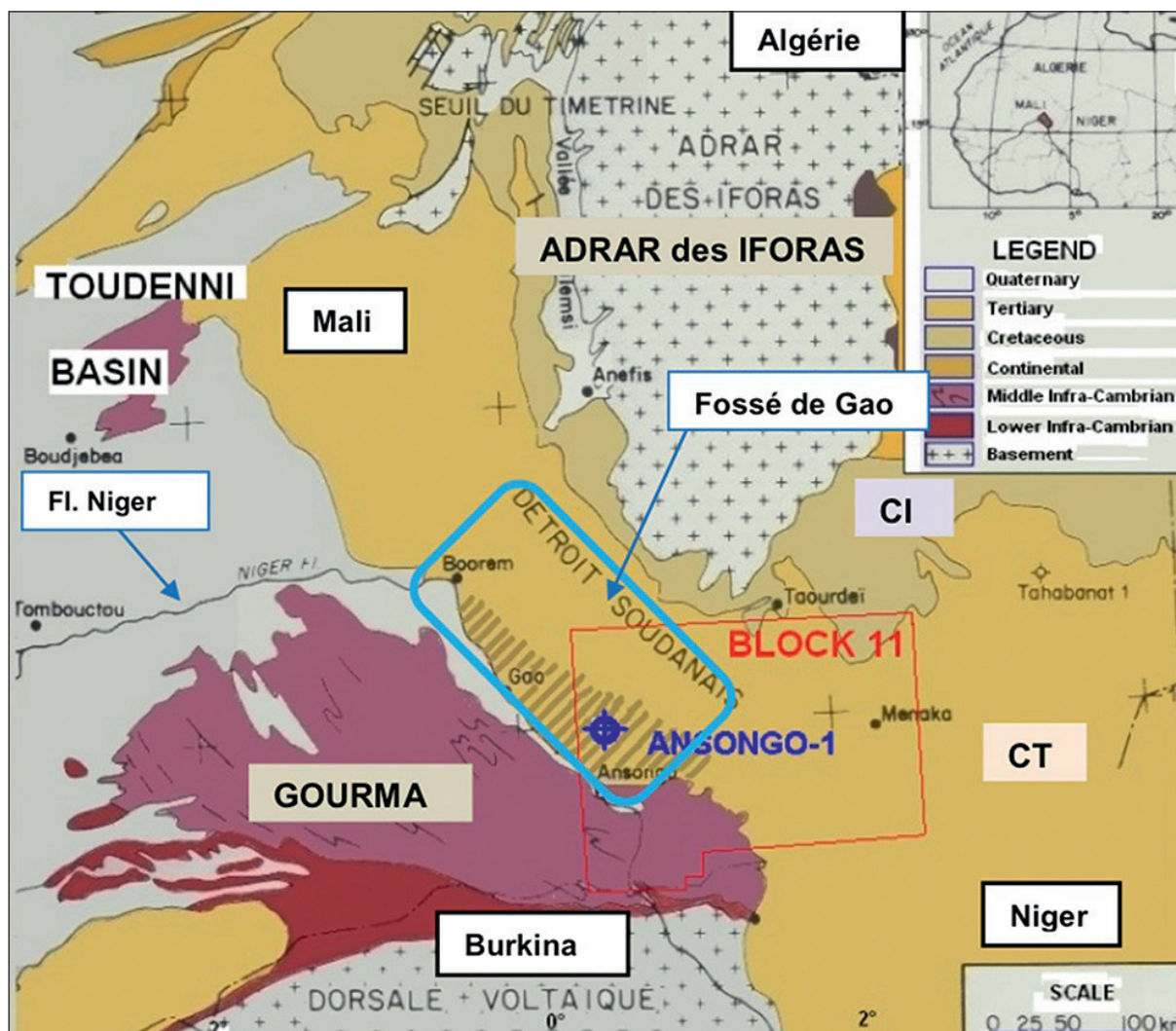
Le système aquifère du Continental intercalaire et du Continental Terminal tel que défini dans la première phase de l'étude («Gestion des risques hydrogéologiques dans le Système aquifère d'Iullemeden (SAI)»), débute au-dessus des épaisses argiles de l'Ighazer par les grès du Tégama d'âge Crétacé Inférieur. Les aquifères sous-jacents (du Cambrien au Trias) correspondent donc à une ressource en eau distincte.

3.1.2. Communication entre les systèmes aquifères

3.1.2.1. Structure du fossé de Gao

La liaison entre les grands systèmes aquifères de Taoudéni/Tanezrouft à l'Ouest et des Iullemeden à l'Est est assurée par un étroit couloir sédimentaire, le «Déroit 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 (Fig. 5).

Cette structure géologique d'effondrement allongée suivant une direction nord-ouest-sud est, affecte le socle précambrien sur une longueur de 400 km et une largeur variant de 15 à 100 km. Sa profondeur pourrait atteindre 3.000 mètres. Le forage d'exploration pétrolière d'Ansongo 1 a reconnu une série sédimentaire épaisse de 1 645 m d'âge Mésozoïque à Tertiaire, constituée d'alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables fins à grossiers.



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

Figure 5 : Contexte géologique du fossé de Gao, position du forage d'ANSONGO 1 et permis d'exploration pétrolière associé

3.1.2.2. Rôle hydrogéologique du fossé de Gao et liaison des nappes avec le fleuve Niger

Le fleuve Niger possède une nappe alluviale 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.

L'esquisse piézométrique établie à partir de la base de données, et les observations de fluctuations de niveau disponibles montrent que le fleuve alimente les aquifères, du fossé de Gao, avec une forte influence de l'évaporation, car ce secteur d'écoulement axial de la nappe d'accompagnement du fleuve correspond également à une zone d'exfiltration intense matérialisée par une vaste dépression piézométrique en rive gauche.

Il en résulte un gradient d'écoulement particulièrement faible, mis en évidence entre Bourèm et Ansongo, jusqu'à la frontière Nigéro-Malienne, où la nappe se maintient sensiblement à la même cote piézométrique sur plus de 150 km.

Les systèmes aquifères de Taoudéni-Tanezrouft et des Iullemeden sont à l'évidence mis en communication par le fossé d'effondrement de Gao, mais les échanges naturels amont-aval au travers du fossé de Gao sont faibles.

3.1.3. Piézométrie & caractéristiques hydrodynamiques

3.1.3.1. Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques utilisées pour la modélisation sont des cartes qui ont été élaborées à partir des points d'eau de la base de données du projet, données qui proviennent de la collecte des bases de données des différents pays et complétées par des informations provenant de divers rapports non intégrés dans les Bases de données nationales.

Dans la base de données, toutes les altitudes des points d'eau ont été déterminées à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT_90m Corrigé) de façon à avoir une homogénéisation des sources d'information. Les cotes piézométriques ont donc été calculées à partir du niveau statique indiqué dans la base de données pour chaque point d'eau et de l'altitude déterminée pour chaque point à partir du MNT. Les données ne sont pas synchrones mais à l'échelle régionale les variations piézométriques temporelles sont très faibles (voir section suivante) et donc on peut considérer que les valeurs estimées pour les cotes piézométriques sont parfaitement acceptables pour la construction de cartes piézométriques. Il faut garder aussi à l'esprit que la précision du MNT_90m est de $\pm 17\text{m}$, et que l'incertitude sur la précision des coordonnées des points d'eau n'est pas connue. À partir de ces cotes piézométriques calculées pour chaque point d'eau, les cartes ont été tracées.

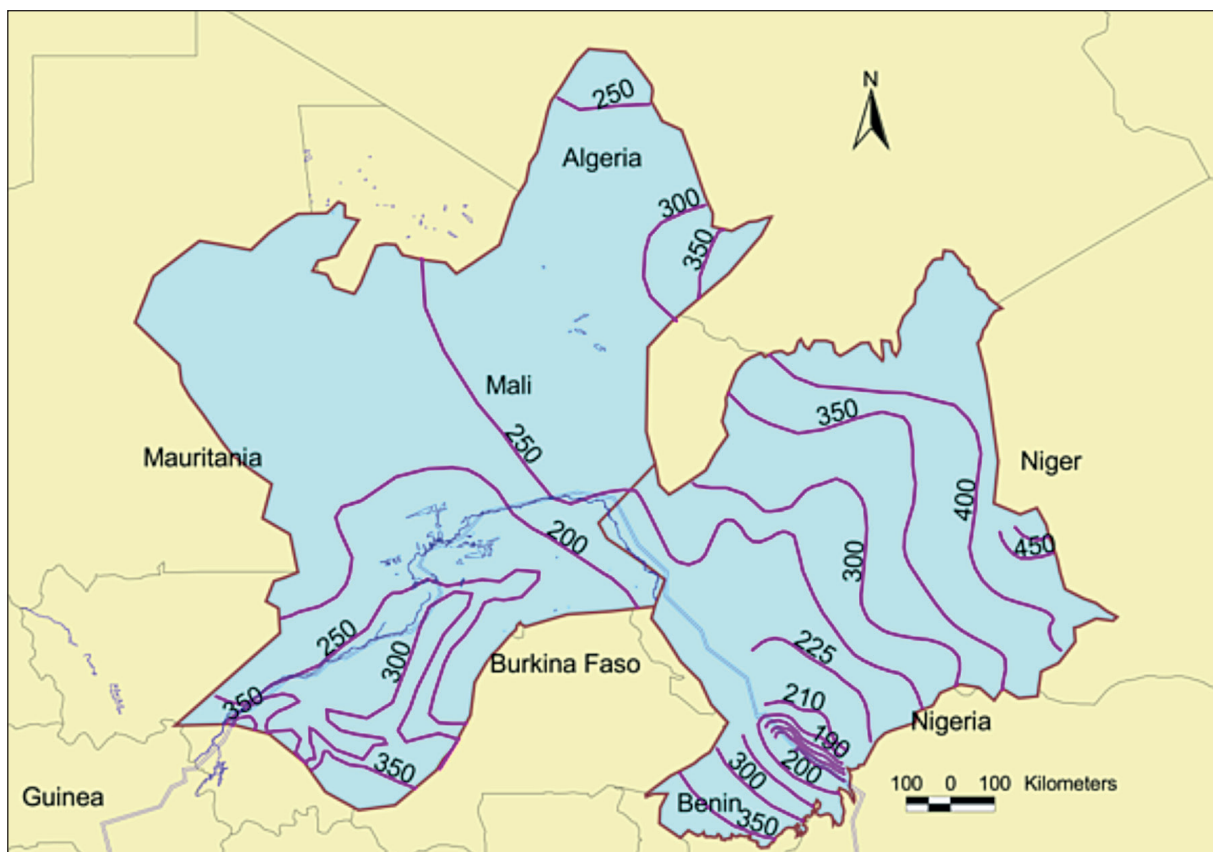


Figure 6 : Carte piézométrique du SAIT

3.1.3.2. Fluctuations piézométriques

Sur toute la zone d'étude il existe peu de piézomètres et leur répartition n'est pas du tout homogène car ces piézomètres ont pour la plupart été installés pour des études spécifiques, ce qui explique que la période de mesures est souvent limitée à quelques années. Il n'existe aucun historique piézométrique pour les années 60 et 70 et dans les années 80 les historiques les plus longs ne dépassent pas 5 ans.

Les figures recueillies présentent un échantillonnage assez représentatif des variations piézométriques observées dans la zone d'étude en fonction des différents contextes, selon que l'on se trouve à proximité d'un potentiel imposé (dans les périmètres irrigués) ou en bordure de bassin (piézométrie de Sikasso).

De l'analyse de ces différents piézomètres, il apparaît clairement que :

- les variations piézométriques sont de faibles amplitudes (1 à 2) en général,
- les tendances ne sont pas constantes (baisse dans certains piézomètres mais hausse dans d'autres),
- l'influence de la saison des pluies est très nette dans les piézomètres avec un retard pour les pics de recharge par rapport à la pluie,
- le piézomètre du CIEH à Ouagadougou est montré à titre de référence, car, bien que situé dans les arènes granitiques, ce piézomètre présente un comportement hydrodynamique proche des grès, et montre une corrélation entre la moyenne mobile des pluies à 10 ans avec les tendances générales de variations de la nappe.

Il faut cependant garder à l'esprit que :

- il n'existe pas de piézomètres dans les nappes captives profondes
- la répartition des piézomètres n'est pas nécessairement représentative des variations des systèmes aquifères pris dans leur globalité, tel que considéré dans la présente étude, où l'unité de surface est représentée par une maille de 10 km de côté.

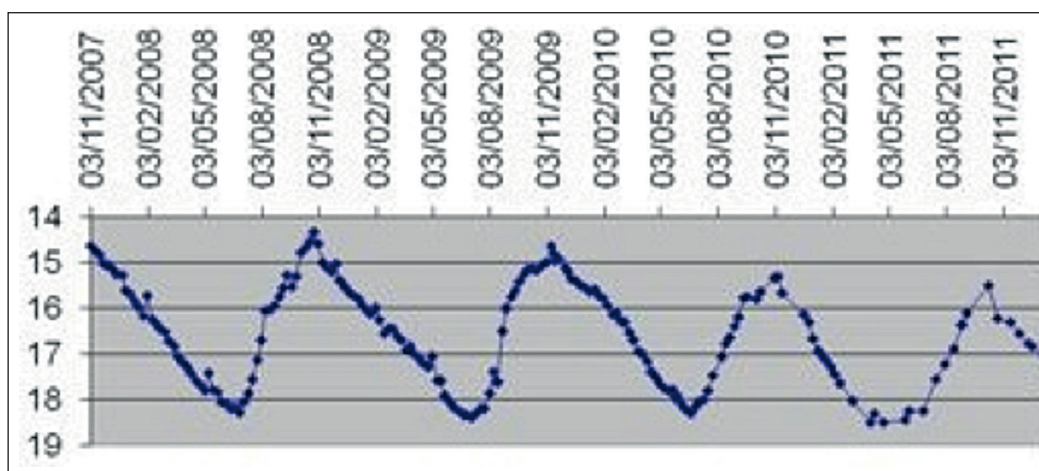


Figure 7 : Piézomètre F15 à Sikasso (2007-2011), Mali

3.1.4. Prélèvements

Globalement, les prélèvements ont été introduits directement à partir des forages de production lorsque les prélèvements étaient mesurés : c'est généralement le cas pour les forages utilisés pour l'alimentation en eau des zones urbaines et centres secondaires urbains, ainsi que pour les industriels. En ce qui concerne les zones rurales, une allocation de 20l/jour/habitant a été attribuée en faisant une péréquation, avec le logiciel ArcGis, avec soit 1) la population généralement connue par commune (cas du Mali) avec une répartition uniforme dans les mailles concernées par la commune, soit 2) à partir des points existants avec le principe d'un point d'eau pour satisfaire une population villageoise de 300 habitants. Les besoins pour le bétail ont également été pris en compte même si bien souvent l'approvisionnement à partir des eaux souterraines n'intervient qu'en fin de saison sèche. En ce qui concerne l'irrigation, elle se fait en très grande majorité à partir des eaux de surface. Dans le cas d'irrigation à partir des eaux souterraines comme dans certaines zones au Niger, les prélèvements ont été introduits si disponibles.

3.2. MODÈLE CONCEPTUEL

3.2.1. Type de modèle

Le modèle de simulation des écoulements souterrains pour les aquifères du Continental intercalaire et du Continental Terminal du système aquifère des lullemeden réalisé en première phase du projet (SAI-2006) a pris en compte deux couches distinctes, correspondant chacune à un de ces deux grands ensembles litho-stratigraphiques, à l'exclusion des formations sous-jacentes.

Dans le cas du Bassin de Taoudéni, les formations du Continental intercalaire et du Continental Terminal, ainsi que des formations aquifères sous-jacentes présentent une continuité hydraulique entre elles à l'échelle régionale – même si, localement, on a à faire à des systèmes aquifères multicouches, pouvant présenter des différences de charges significatives. De plus le CT et le Ci ne sont pas en continuité comme dans les lullemeden et ne sont pas différenciables dans bien des cas. Ceci a conduit à ne considérer qu'un seul aquifère pour le Bassin de Taoudéni.

Ces deux approches très sensiblement différentes qui ont été pratiquées entre les systèmes aquifères lullemeden et Taoudéni-Tanezrouft s'expliquent donc essentiellement par des conditions hydrogéologiques et structurales contrastées entre les deux bassins :

Le système aquifère d'lullemeden a une structure géométrique en bassin unique, et la série sédimentaire qu'il contient est relativement simple :

- ✓ 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 (branche Ouest du West African Rift Subsystem).
- ✓ Les niveaux aquifères du Ci et du CT sont séparés par une séquence intermédiaire argileuse (argiles de l'Irhazer, schistes papyracés...).

Le système aquifère de Taoudéni-Tanezrouft représente un domaine très vaste, avec plusieurs bassins de structure géométrique complexe, entraînant une forte variabilité de l'épaisseur et de la nature 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 géologiques sous-jacentes, de nature très variées, poreuses ou fissurées à grande échelle :

- ✓ La structure d'ensemble du bassin est perturbée par une tectonique cassante, qui est responsable de cloisonnements et de très fortes variations d'épaisseur et de faciès des formations du Ci et du CT, et de structures d'effondrement de grande ampleur (fossé de Nara, fossé de Gao) ou de seuils. Dans les sous-bassins, 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 et la plaine du Gondo, en limite sud-est du bassin de Taoudéni au BurkinaFaso.
- ✓ Les formations profondes du Primaire, qui correspondent à des aquifère 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. À 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.

Dans la partie nord du bassin de Taoudéni-Tanezrouft la densité des informations hydrogéologiques est faible, et il serait illusoire de vouloir renseigner de manière valable, les côtes du toit, du mur et les caractéristiques hydrodynamiques de différentes couches, sachant de plus que l'essentiel des forages ne sont qu'en situation de pénétration partielle des aquifères.

L'épaisseur des formations sédimentaire est très variable et rarement connue dans la plupart des forages qui n'atteignent pas le socle. Des forages ont montré que cette épaisseur peut atteindre jusqu'à 2000m (fossé de Gao) et plus de 400m dans plusieurs autres endroits.

Hormis les secteurs où l'épaisseur des formations sédimentaires est connue, il a été retenu de prendre une valeur moyenne de 200 à 300m pour la modélisation du système aquifère du Taoudéni, quand on ne dispose d'aucune donnée.

Les différents auteurs de modèles mathématiques locaux constatent aussi que les différences de piézométrie entre les couches sont faibles ou inexistantes, du fait de communications verticales introduites par le caractère lenticulaire à grande échelle des dépôts, ou par la fracturation, et, dans tous les cas de modélisation des écoulements souterrains, l'option monocouche a été retenu (Bassin du Gondo, Bamako Rive Droite, modèle du degré carré de Niamey).

Dans l'ensemble, les différences légères de piézométrie entre couches dans la série sédimentaire sont du même ordre de grandeur que l'incertitude sur les niveaux.

3.2.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites spécifiques sont très variées suivant les contextes locaux et seront choisies dans le détail par le modélisateur sur la base des indications fournies dans les différents rapports-pays. Ces conditions spécifiques se résument comme suit :

Flux imposés

Dans le nord et sud-est de la zone d'étude, au niveau des bordures du bassin en climat subdésertique, on constate une recharge sur la zone de piedmont des reliefs constitués de formations de socle et sédimentaires anciennes sur lesquelles se produisent des ruissellements temporaires peu fréquents mais parfois violents (crues d'oued), qui débouchent dans la plaine sédimentaire et s'infiltrent au niveau des affleurements. Cela se traduit par des flux imposés dans certaines mailles. Cela se produit pour le massif de l'Adrar des Iforas, et pour la bordure sud du modèle SAI au Nigeria qui correspond aux affleurements de socle.

Potentiels imposés

Des mailles à potentiel imposés se positionnent sur toutes les rivières pérennes, considérant une relation étroite entre le niveau du fleuve et celui de la nappe.

Potentiels imposés à condition de rivière

Pour les rivières Niger et Sokoto, les plus importantes de la zone d'étude, une condition aux limites «mixte» sera utilisée comme le permet le logiciel MODFOW grâce à son module «RIVER». Ce module prend en compte la cote limnimétrique du cours d'eau, qui rajoutée à d'autres paramètres intrinsèques au lit du fleuve, permet de simuler les échanges nappe/rivières.

Drains

Cette condition aux limites correspond aux sources et aux débordements de nappe.

Zones d'exfiltration

Dans tous les modèles locaux qui ont été examinés, à grande comme à petite échelle, l'introduction de **l'évapotranspiration différenciée par zones géographiques**, a été la seule solution permettant d'équilibrer les bilans et de restituer les grandes lignes du modèle piézométrique, et certaines particularités telles que les **dépressions piézométriques**.

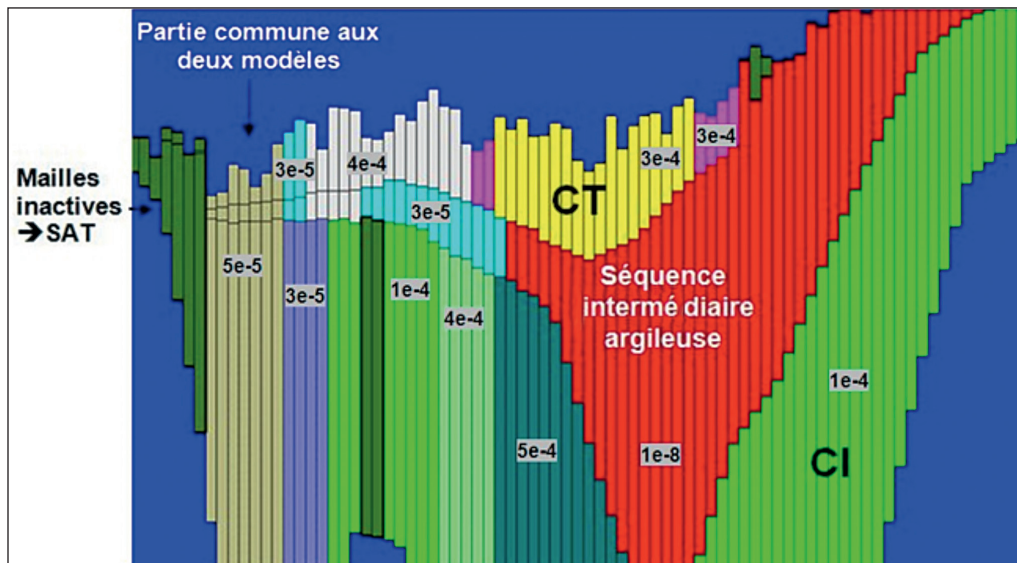
3.2.3. Modélisation des systèmes aquifères SAI-SAT

Le Bassin des Iullemeden et celui de Taoudéni-Tanezrouft sont en continuité géologique à travers le détroit de Gao. Sur le plan hydraulique, les échanges sont très limités voire nuls car les sens d'écoulement sont perpendiculaires à l'axe du fossé.

Modéliser séparément les deux systèmes n'a donc aucune incidence sur l'analyse des comportements hydrodynamiques pris dans leur globalité.

Les Systèmes Aquifères des Iullemeden et de Taoudéni-Tanezrouft ont donc été modélisés selon deux modèles mathématiques distincts.

Cependant, afin de garantir la continuité géologique, la partie occidentale du modèle SAI a été étendue sur la partie orientale du SAT, sur une bande d'environ 5 mailles de large sur 25 mailles de long dans l'axe du fossé, soit 125 mailles communes (125 000 km²) avec des caractéristiques hydrodynamiques identiques. La Figure 8 présente le fossé de Gao vue en coupe dans la partie des Iullemeden.



Légende : les couleurs représentent les classes de perméabilité en m^2/s

Figure 8 : Modèle SAI - Représentation du fossé de Gao

Cette approche permet en outre un gain de temps non négligeable pour le calage et l'exploitation des modèles sans affecter aucunement les résultats.

3.2.4. Recharge : méthodologie développée

L'évaluation de la recharge des systèmes aquifères a été spatialisée et abordée par une approche multicritères en prenant en considération l'occupation des sols et la topographie - qui sont des produits obtenus par télédétection - et de la pluie bien évidemment à partir des séries temporelles des pluviométries disponibles.

La procédure se base sur un arbre de décision qui attribue une valeur de la recharge en mm pour chaque état des paramètres précités, ce qui constitue la matrice de base pour la recharge. Cette matrice est le résultat de la compilation des rapports et publications dans la zone d'étude.

Des produits intermédiaires ont été calculés afin de combiner la morphologie des terrains, la couverture des sols et la pluviométrie. À partir du Modèle Numérique de Terrain à 90m (MNT), les zones de plateaux ont été identifiées et la topographie générale a été répartie en classes de pentes, puis agrégée à la carte d'occupation des sols.

MINI_Plateaux	Non	Non	Non	Non	OUI	OUI	OUI
Pente %	$\alpha < 1\%$	$1\% < \alpha < 3\%$	$6\% < \alpha < 12\%$	$3\% < \alpha < 6\%$	$\alpha < 1\%$	$1\% < \alpha < 3\%$	$6\% < \alpha < 12\%$
Occupation des sols	Sol nu	Couvert végétal	Couvert végétal	Marécages	Sol nu	Couvert végétal	Couvert végétal
Pluie mm	R mm	R mm	R mm	R mm	R mm	R mm	R mm
50	5	3	0	0	3	2	0
100	10	8	1	1	5	4	1
200	15	10	2	2	8	5	1
300	25						2
400	40						3
500	60						4
600	90						5
700	140						8
800	200	150	30	30	100	75	15
900	270	200	60	60	135	100	30
1000	350	250	80	80	175	125	40

Figure 9 : Extrait de la matrice de la recharge

À partir des séries temporelles disponibles, des pluviométries sur quelques stations localisées dans et autour de la zone d'intervention, les évènements ponctuels à l'échelle de toute la zone d'intervention ont été spatialisés afin d'obtenir les valeurs des précipitations à chaque point de la zone d'Intervention avec un maillage carré de 10km correspondant au maillage qui sera utilisé dans le modèle de simulation des écoulements souterrains. On a ainsi obtenu les cartes sous forme raster pour les pluies annuelles.

Calcul de la recharge

Une combinaison des Rasters des pluviométries obtenues par krigeage et du Raster [MorphOccup] (morphologie de l'occupation du sol) permet d'obtenir la recharge spatialisée sur toute la zone du projet à la résolution du maillage choisi pour la modélisation hydrogéologique et ceci pour chaque année de données de pluie disponible (1960 à 2010).

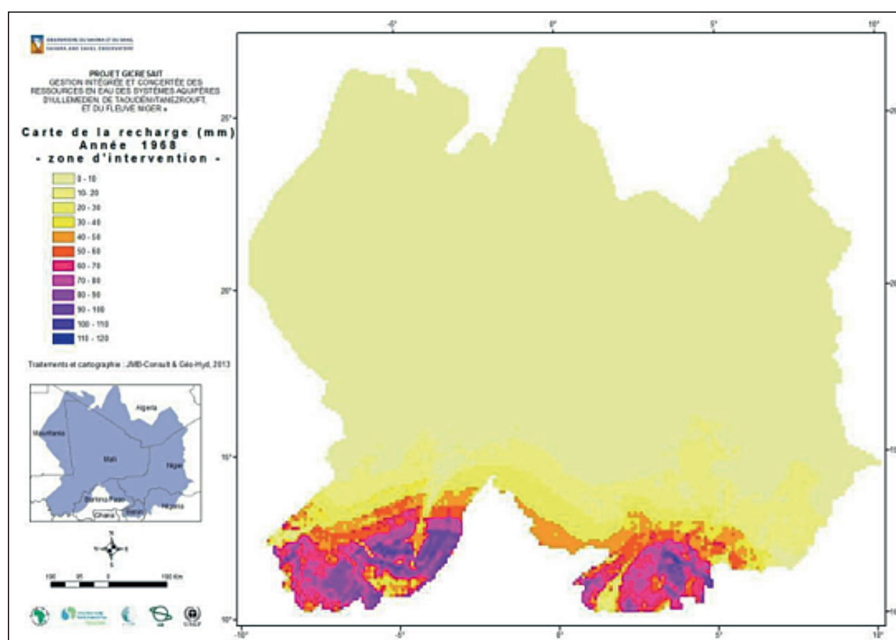


Figure 10 : Carte de la recharge pour l'année la plus humide de la période 1960-2010

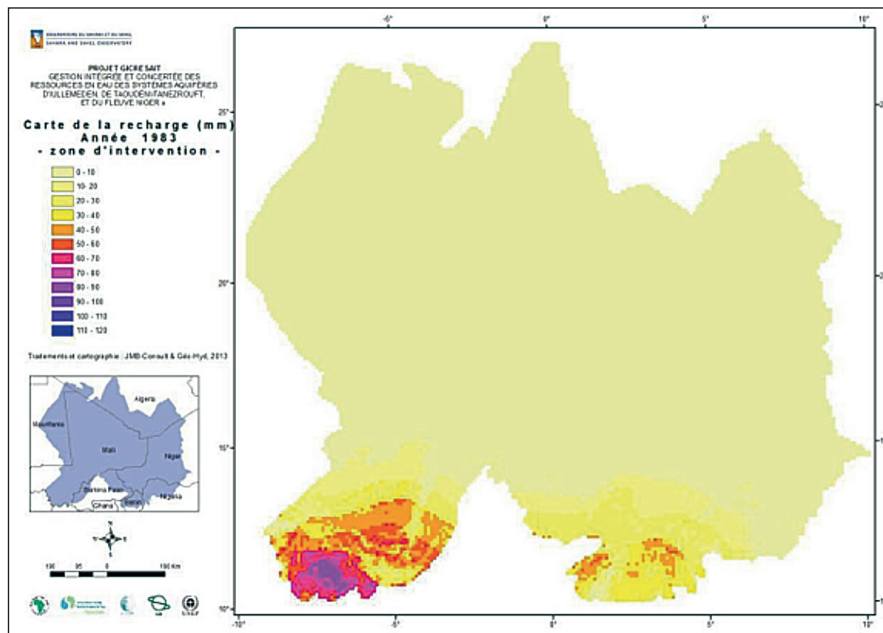


Figure 11 : Carte de la recharge pour l'année la plus sèche de la période 1960-2010

3.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE

3.3.1. Code de calcul utilisé et préprocesseur

Le logiciel utilisé dans le cadre de la modélisation des systèmes aquifères est le logiciel Visual MODFLOW, interface graphique développée par Schlumberger Water Services utilisant le code de calcul MODFLOW développé par l'United States Geological Survey (McDonald and Harbaugh, 1988). MODFLOW est un code de calcul dédié spécifiquement à la simulation des ressources en eau souterraines. Il s'agit d'un code de calcul en différences finies, utilisant un maillage de type « écossais » (colonnes et lignes de largeurs variables), monocouche (en plan ou en coupe verticale), multicouche ou 3D, simulant l'hydrodynamique en régime permanent et en régime transitoire.

Présentation sommaire de MODFLOW

L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MODFLOW pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un aquifère tridimensionnel, poreux, captif, hétérogène et anisotrope est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

avec :

h : la charge hydraulique [L]

K : la conductivité hydraulique [L.T⁻¹],

SS : le coefficient d'emmagasinement spécifique [L⁻¹],

W : le terme source (flux unitaires entrants et sortants dans l'aquifère [T⁻¹])

t : le temps [T]

La résolution de l'équation générale de l'écoulement est effectuée sur un maillage tridimensionnel par la méthode des différences finies, en utilisant les conditions aux limites

du système. Les conditions aux limites correspondent à des données hydrogéologiques réelles traduites numériquement. Il peut s'agir de (Ledoux, 2003) :

- **charges ou de niveaux piézométriques imposés** : il est admis dans ce cas, que le niveau piézométrique le long d'un contour (linéaire ou surfacique) est déterminé par une cause externe. Il peut s'agir à l'échelle locale ou régionale d'un plan d'eau libre (lac, réservoir, cours d'eau, etc.), d'un seuil autorisant le déversement d'une nappe (source), mais encore à l'échelle régionale d'une zone de nappe libre suffisamment alimentée pour que la piézométrie moyenne imposée par le réseau hydrographique drainant puisse être considérée comme invariante.
- **flux imposé** : les échanges avec le milieu extérieur sont dans ce cas réglés par la connaissance a priori du flux d'eau traversant une portion donnée de limite. Diverses configurations relèvent de ce type de condition aux limites : zone d'alimentation de piedmont à l'amont d'un aquifère, infiltration à partir d'un cours d'eau non directement connecté à la nappe, ligne de courant de l'écoulement souterrain suffisamment éloignée de la zone d'intérêt de l'étude pour qu'elle puisse être raisonnablement considérée comme invariante.
- **conditions mixtes** : charge imposée avec limitation du débit. L'existence d'une condition de charge ou piézométrie imposée implique la possibilité d'un échange de flux quelconque entre l'aquifère et le milieu extérieur (ex : source tarie, à débit imposé nul, débit de percolation d'une nappe vers une rivière nul, dans le cas où rivière et nappe sont déconnectées).

Parmi les grandeurs utilisées dans un modèle numérique, on peut distinguer :

- les variables d'entrées et les variables de sortie ;
- les paramètres de l'aquifère correspondant aux perméabilités et coefficients d'emmagasinement.

Les variables d'entrées correspondent aux différentes conditions aux limites, présentées précédemment et aux termes puits/sources. Les variables de sorties sont les charges hydrauliques h calculées. Les grandeurs au sein d'un élément de discrétisation sont supposées constantes (transmissivité, emmagasinement) ou uniformément réparties (pompage).

La géométrie est représentée explicitement, en intégrant pour chaque couche le toit et le mur de la formation considérée.

3.3.2. Maillage

Dans un modèle d'écoulement, la discrétisation spatiale du domaine permet la prise en compte de la géométrie et des limites du système.

Les dimensions affectées aux mailles résultent d'un compromis entre la variabilité spatiale des données disponibles, la taille et la complexité géométrique et hydrogéologique des entités à simuler, le respect des critères numériques assurant la représentativité des calculs, et un nombre de cellules compatible avec une durée de calcul «raisonnable».

Dans ces conditions, le maillage de base adopté sur l'ensemble de la zone d'étude est identique à celui utilisé en phase 1 (maillage carré de 10 kilomètres de côté).

Les mailles situées à l'extérieur des zones d'extension des horizons considérés ont été inactivées pour restituer avec précision la superficie de chaque horizon.

Le nombre de mailles actives du modèle SAT est de 9366 (soit une superficie totale de 936600 km²). Le modèle SAI contient 10264 mailles actives.

3.3.3. Géométrie

En terme de modélisation, la discrétisation verticale d'un système aquifère est extrêmement délicate à appréhender dans le cas où, comme dans le présent projet, la délimitation des aquifères et principalement leur extension verticale est très peu connue et oblige à des hypothèses et à de nombreuses simplifications. C'est principalement le cas pour la connaissance du mur des aquifères, tandis que le toit des horizons aquifères est plus facile à identifier car se confondant avec la surface topographique.

La figure suivante montre les isobathes (cotes des profondeurs) des horizons aquifères les plus profonds modélisés dans cette étude (SAT monocouche et SAI-Ci). Dans les paragraphes suivants seront détaillées quelques techniques développées pour ajuster les profondeurs et éviter ainsi la non-convergence numérique du modèle.

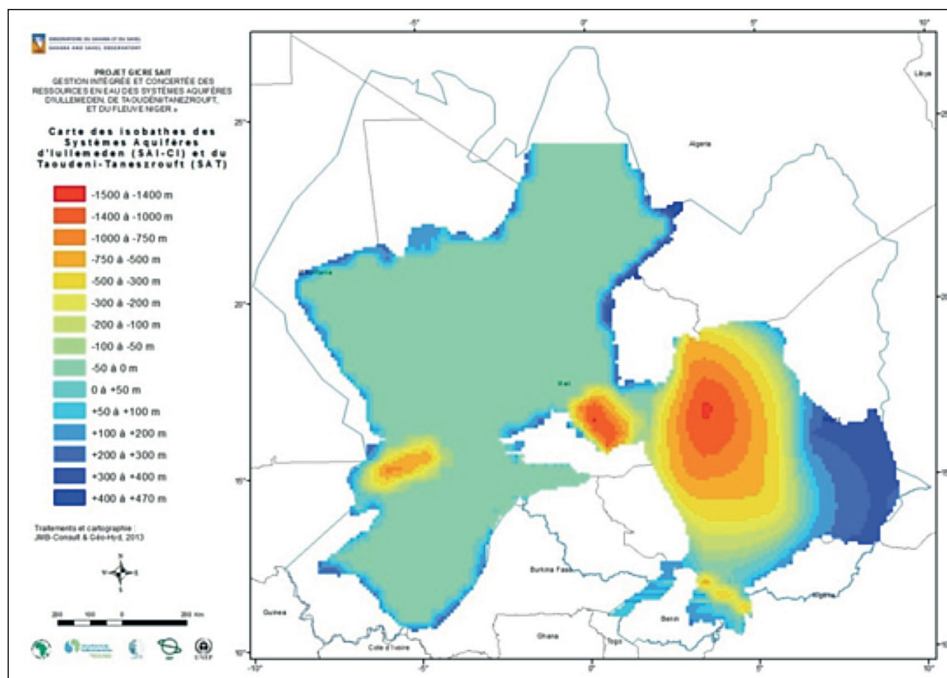


Figure 12 : Modèles SAT & SAI (CI) - Cartes des isobathes

3.3.3.1. Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft

Le SAT a été discrétisé selon un modèle monocouche.

Le sommet du modèle correspond à la surface topographique digitalisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ramené à un pas de 10 km correspondant à la taille des mailles.

L'épaisseur de l'aquifère discrétisé est de l'ordre de 300 mètres pour l'ensemble du modèle, à l'exception des zones du fossé de Gao, du fossé de Nara et du Dhar de Nema, pour lesquelles ont été introduites la cote du socle atteinte au forage d'Asongo (zone du fossé de Gao) et une cote de l'ordre de -700 mètres afin de représenter l'approfondissement du bassin au droit de la zone de Nara.

Afin d'éviter les remontées brutales du substratum dans les zones topographiquement élevées (Falaises du Bandiagara, extrémité sud du modèle au Burkina Faso etc.), la cote du substratum du modèle a été lissée telle que présentée sur le schéma suivant.

Ceci permet d'éviter d'éventuels problèmes de convergence numérique liés à un recouvrement insuffisant entre deux mailles adjacentes :

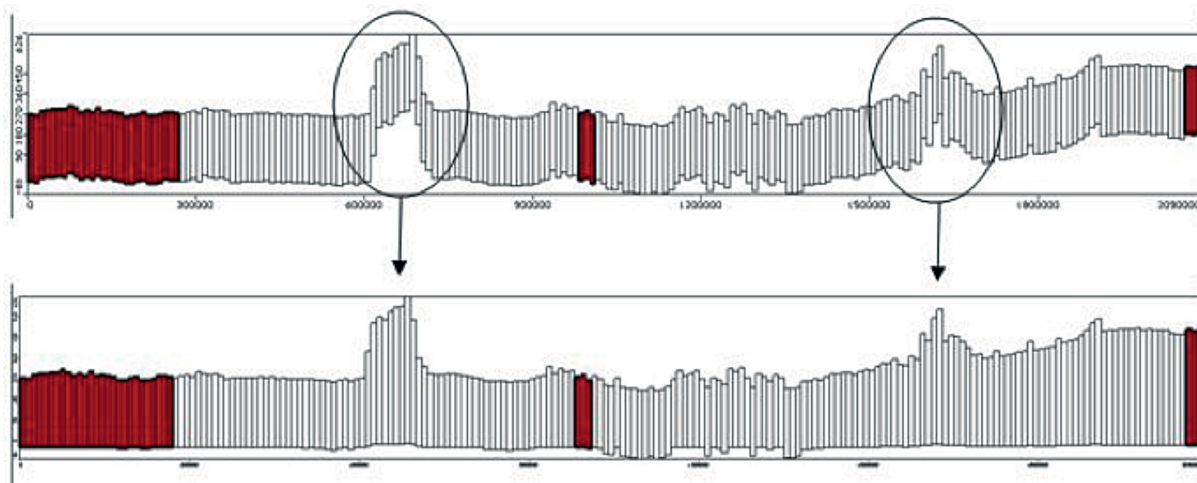


Figure 13 : Exemple de modification du substratum du modèle dans les zones topographiquement élevées

La figure suivante présente les isobathes du mur du modèle SAT.

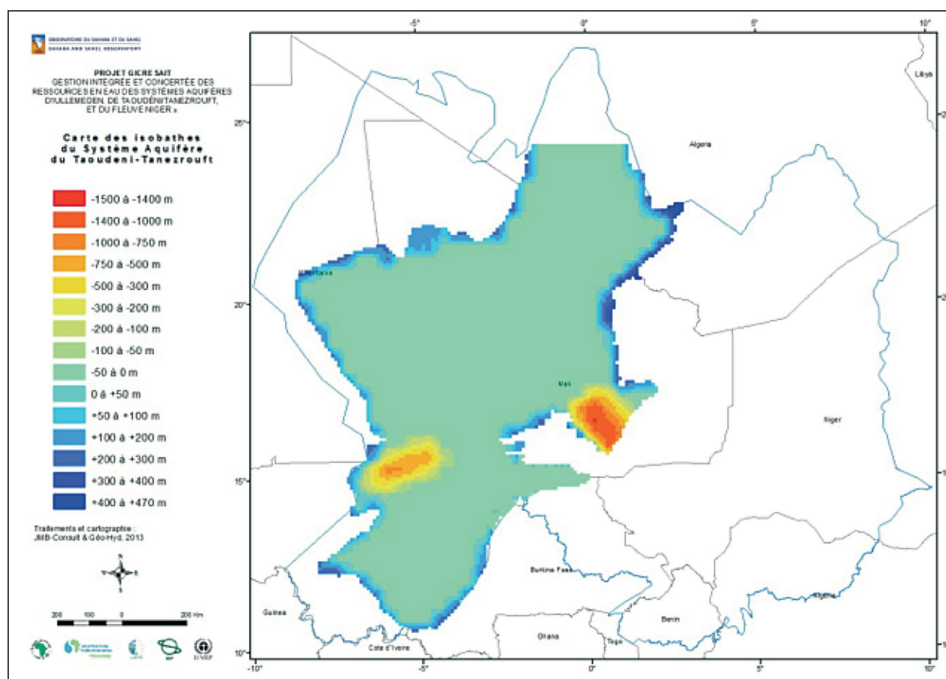


Figure 14 : Modèle SAT - Cartes des isobathes

3.3.3.2. Système Aquifère des Iullemeden

Afin de prendre en compte la présence de la séquence intermédiaire argileuse entre les niveaux aquifères du CI et du CT, un modèle multicouche a été mis en œuvre dans le bassin des Iullemeden.

Le modèle comporte 3 couches :

- couche 1 : Continental Terminal,
- couche 2 : Séquence intermédiaire argileuse,
- couche 3 : Continental intercalaire.

L'extension de chacune des couches reprend les travaux réalisés en Phase 1 et intègre les cotes des murs et toit des formations.

Les murs des couches ont ensuite été interpolés par krigeage et intégrés au modèle numérique.

Le nombre de mailles actives de chaque couche est reporté dans le Tableau 5.

L'extension des couches représentant le CT et le Ci sont présentées en Figure 16, Figure 17 et Figure 18.

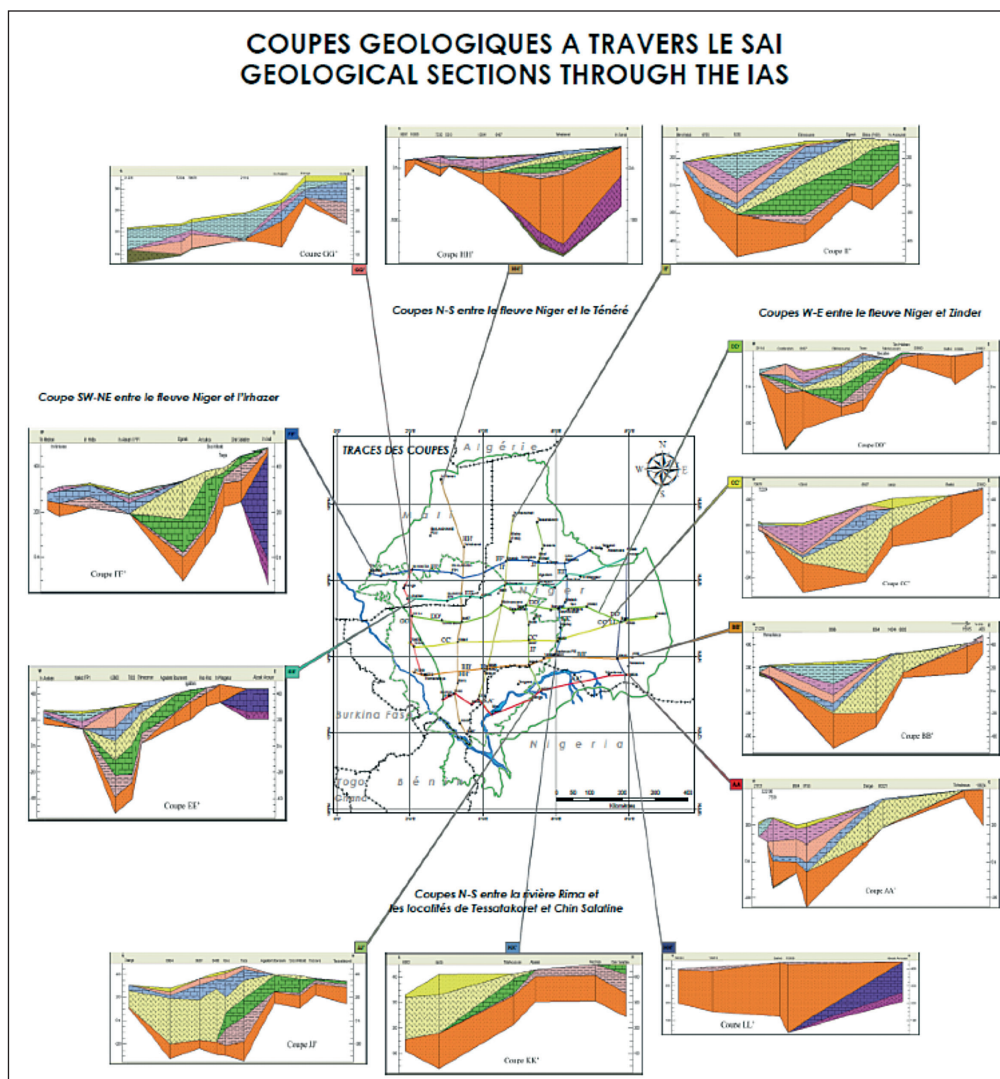


Figure 15 :
Modèle SAI -
Exploitation
des données
des coupes
géologiques
établies en
Phase 1

Tableau 5 : Mailles actives du modèle SAI

	Nombre de mailles actives
CT	1 785
Séquence intermédiaire	3 719
CI	4 760

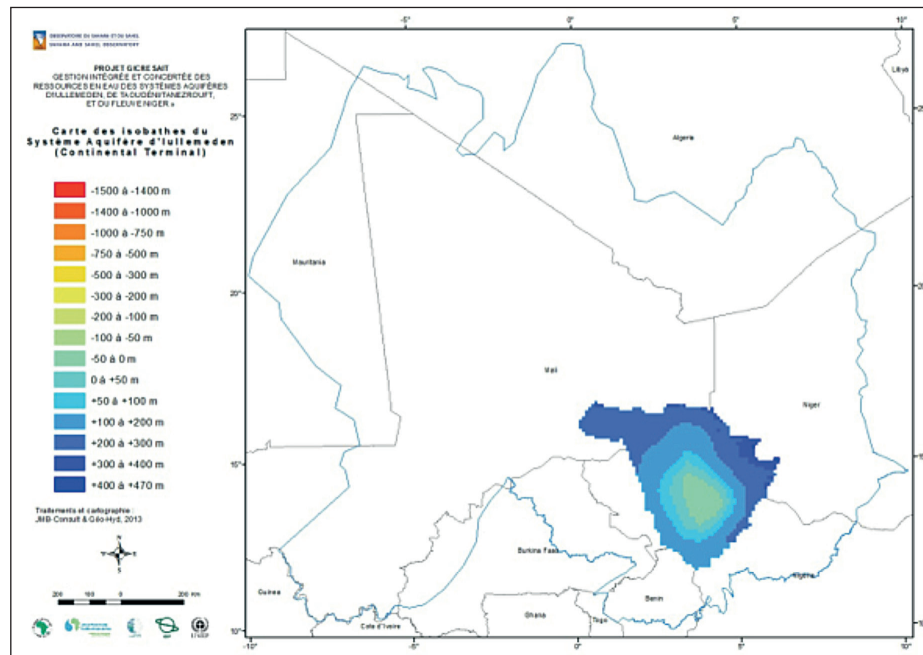


Figure 16 : Modèle SAI - Isobathes du CT

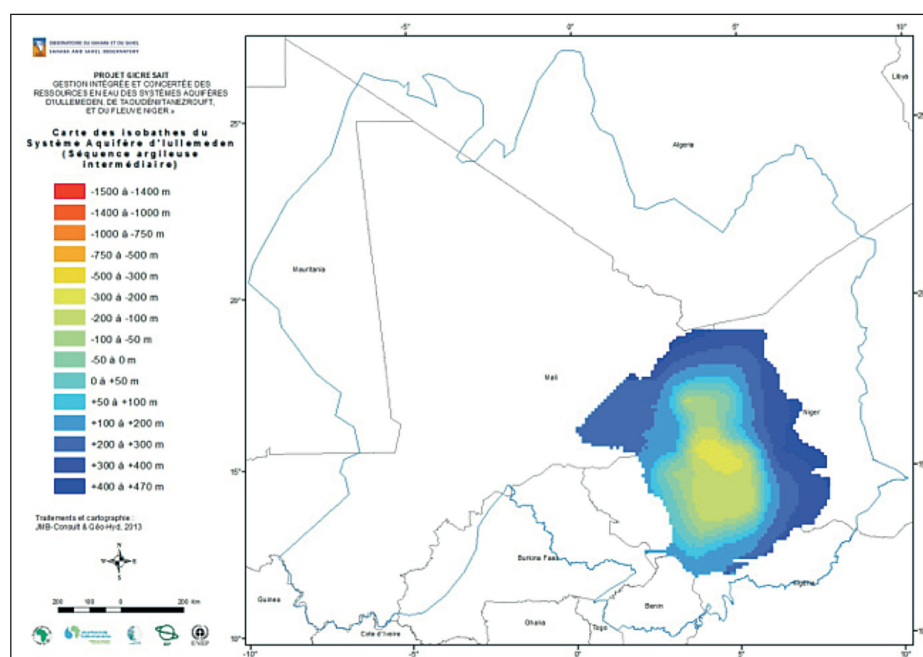


Figure 17 : Modèle SAI - Isobathes de la séquence argileuse intermédiaire

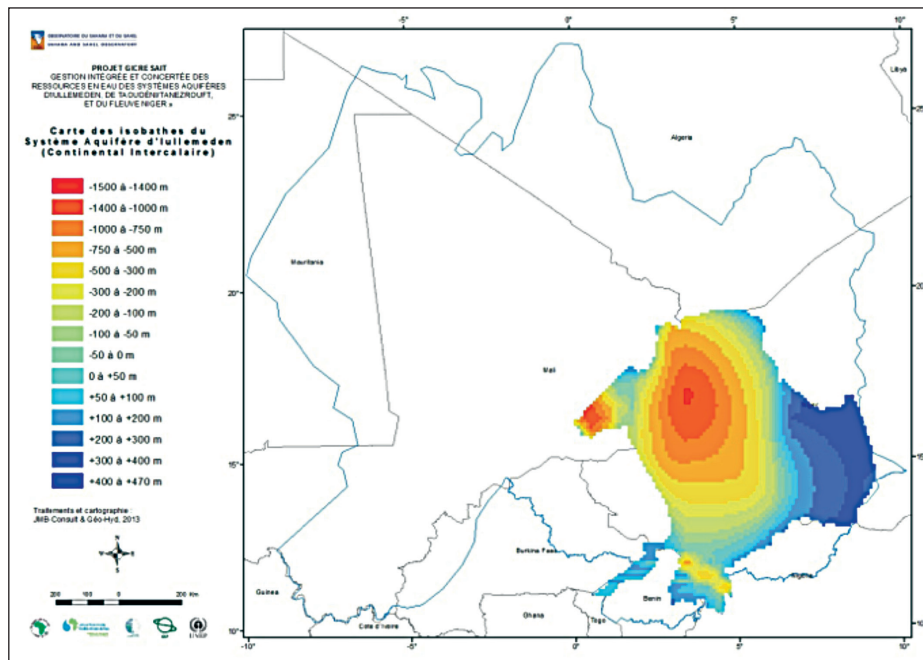


Figure 18 : Modèle SAI - Isobathes du CI

3.3.4. Relations nappes / rivières

Il y a peu de cours d'eau pérennes dans le domaine d'étude. Parmi ceux-ci, le fleuve Niger joue un rôle majeur d'alimentation des nappes dans son cours supérieur et notamment dans le delta intérieur, et de drainage dans son cours inférieur, à partir de la confluence avec les Dallols au Niger, en constituant l'exutoire principal des nappes des deux systèmes aquifères des Illemeden et de Taoudéni-Tanezrouft.

En résumé, les situations qui peuvent se présenter sont les suivantes :

Drainage permanent

Le drainage permanent des systèmes aquifères par le réseau hydrographique ne se produit que dans la zone où la pluviométrie est la plus élevée, c'est-à-dire près de Bamako au Mali et au Niger près de la frontière du Nigéria, au Nigéria même, et au Bénin.

Relations recharge/drainage

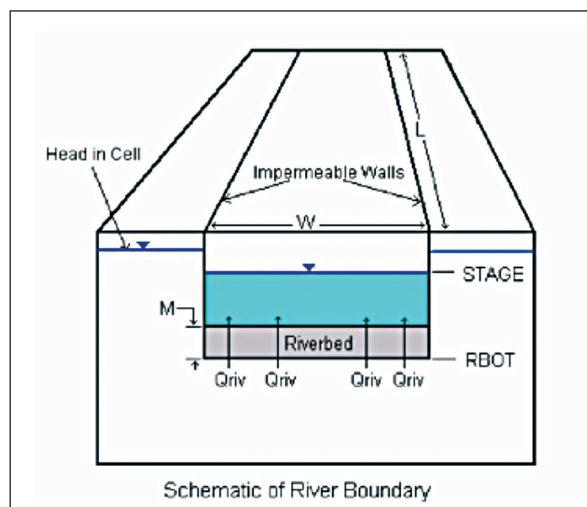
La relation nappe/rivière est presque toujours à double sens : Drainage ET Recharge : cette alternance varie au cours de chaque année et elle est directement liée aux deux saisons d'inégale durée : saison humide, globalement de juillet à septembre, et saison sèche pour les autres mois. Ceci caractérise la zone climatique soudano-sahélienne qui s'étend entre les isohyètes 500 et 1200 mm. Les principaux aquifères concernés sont ceux des grès infracambriens au Mali, du Continental Terminal dans le cours moyen du Niger et du Continental intercalaire dans le bassin de la Volta au nord du BurkinaFaso.

Suivant les saisons, les cours d'eau alimentent (durant l'hivernage) ou au contraire drainent (pendant la saison sèche) les aquifères avec lesquels ils sont en connexion.

3.3.5. Représentation des cours d'eau et des sources

Les principales rivières ont été introduites dans les modèles en utilisant deux packages de MODFLOW :

- **SAI** : le fleuve Niger, la rivière Sokoto et les rivières au Bénin et Burkina Faso ont été représentées par des mailles «*river*», dont est renseignée la cote du fil d'eau, la cote du fond du substratum, la largeur du lit, la largeur de la rivière dans chaque cellule et la conductance de la rivière (en $[L]^2.[T]^{-1}$). Le «*river package*» de MODFLOW simule les interactions nappe/surface du cours d'eau à travers une surface de suintement séparant la surface de l'eau du système aquifère.



(d'après Schlumberger, 2011)

Figure 19 : Représentation schématique du fonctionnement du package «*river*» de MODFLOW

Les échanges nappe/rivière sont dépendants de la conductance du lit de la rivière qui est un paramètre numérique (dimension analogue à la transmissivité) représentant la résistance à l'écoulement entre la surface libre du cours d'eau et les eaux souterraines à travers le lit de la rivière. La formule de la conductance est la suivante :

$$C = \frac{K \times L \times W}{M}$$

avec **K**, la perméabilité du lit de la rivière, **L** la longueur de la rivière dans la maille, **W** la largeur de rivière dans la maille et **M** l'épaisseur du lit de la rivière. Un grand nombre de ces paramètres est souvent inconnu (K, M notamment). La conductance est donc le paramètre de calage qu'il est nécessaire d'ajuster, afin de reproduire les piézométries observées.

Les dallols ont été représentés avec le package «*drain*» de MODFLOW. Celui-ci permet de simuler une sortie d'eau du modèle à un débit proportionnel à la différence entre la charge de l'aquifère et la cote topographique de la maille. Il nécessite de prendre en données d'entrée la cote topographique et un coefficient (conductance) décrivant la perte de charge entre le drain et le système aquifère. Ce coefficient est un paramètre de calage.

- **SAT** : Seules les mailles du fleuve Niger sont représentées en utilisant le package «river». Les autres rivières pérennes sont représentées par des mailles à charge imposée égale à la cote topographique.

Le cas particulier des sources au Burkina Faso a été également traité avec le Package «drain» de Modflow.

Les mailles à charge imposée (marron), «river» (bleu) et drain (gris) sont représentées sur les figures suivantes pour les deux modèles.

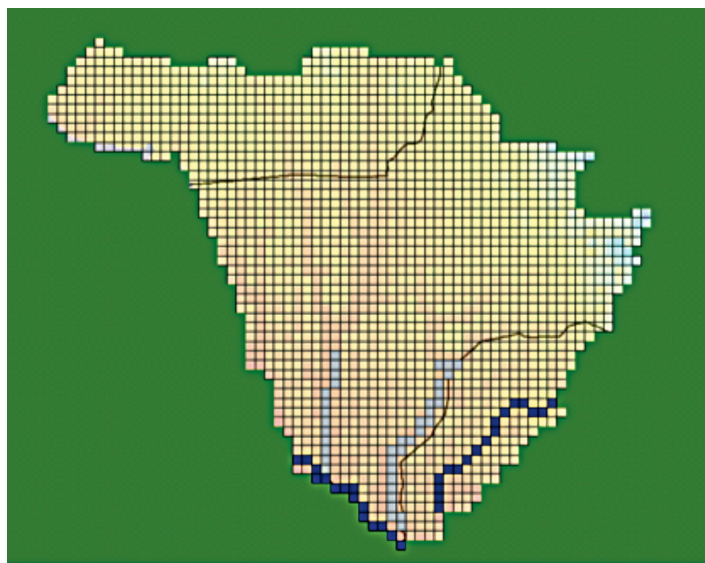


Figure 20 : Modèle SAI - Conditions aux limites (CT)

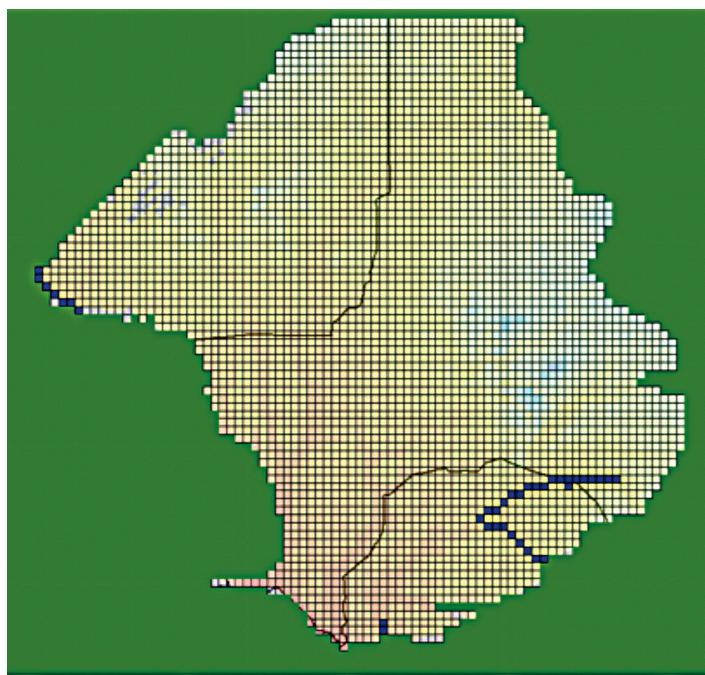


Figure 21 : Modèle SAI - Conditions aux limites (séquence intermédiaire)

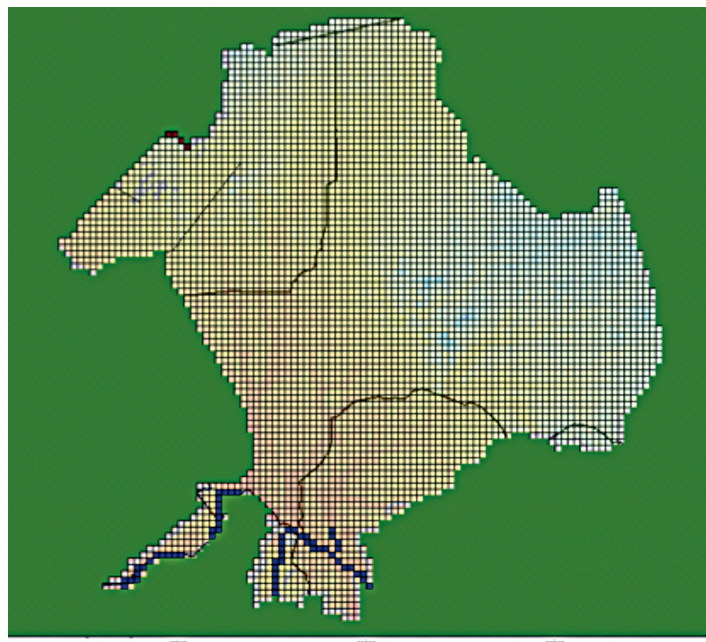


Figure 22 : Modèle SAI - Conditions aux limites (CI)

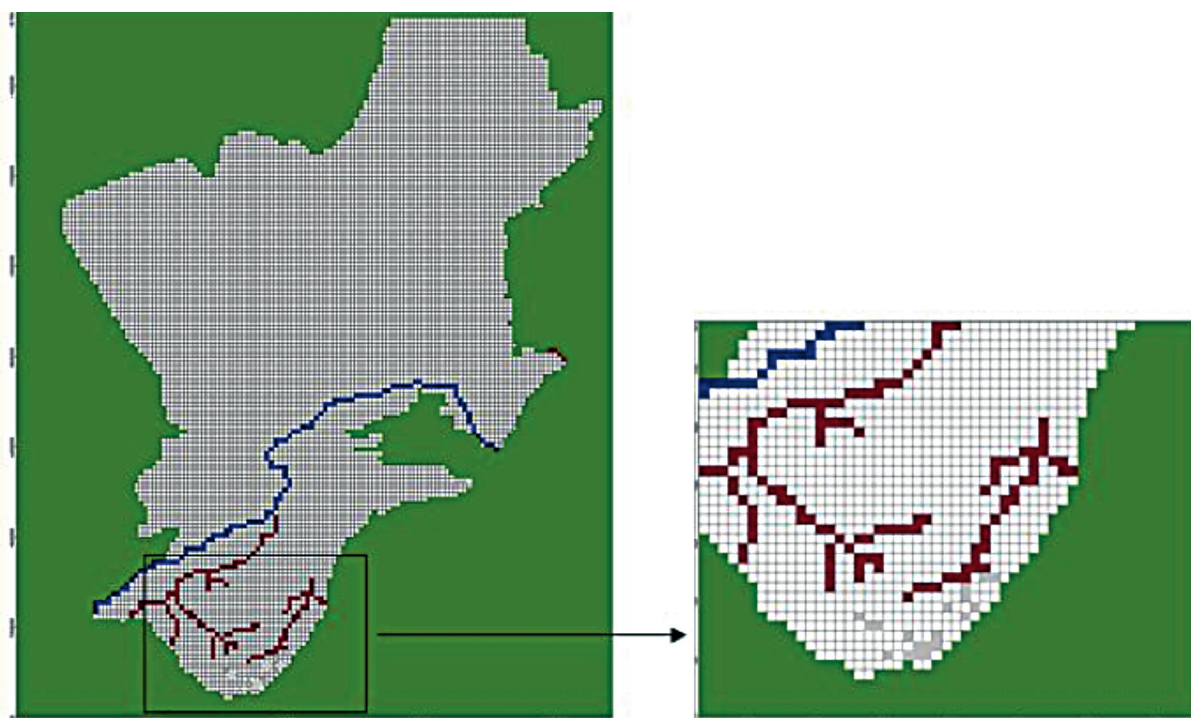


Figure 23 : Modèle SAT - Conditions aux limites

3.3.6. Cas particulier : zone d'exfiltration

Dès les années 50, de grandes dépressions piézométriques ont été mises en évidence dans la zone sahélienne, notamment au Mali : fossé de Nara, Gondo, Azaouad.

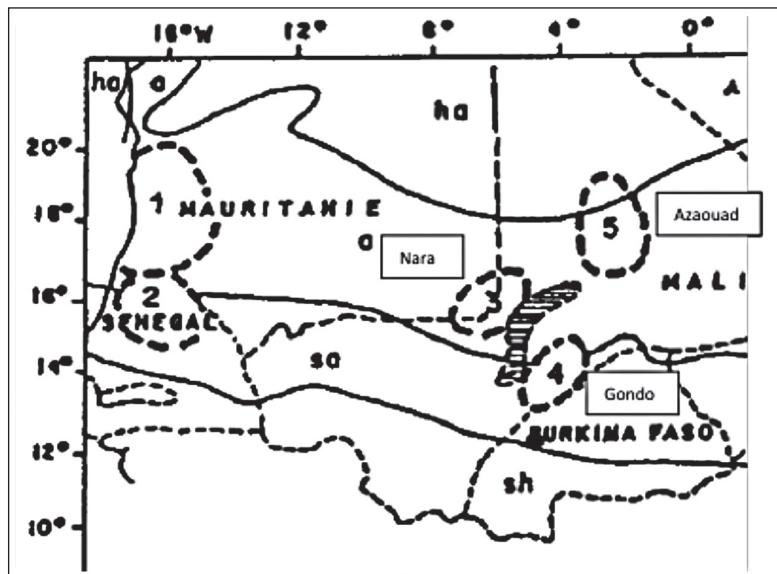
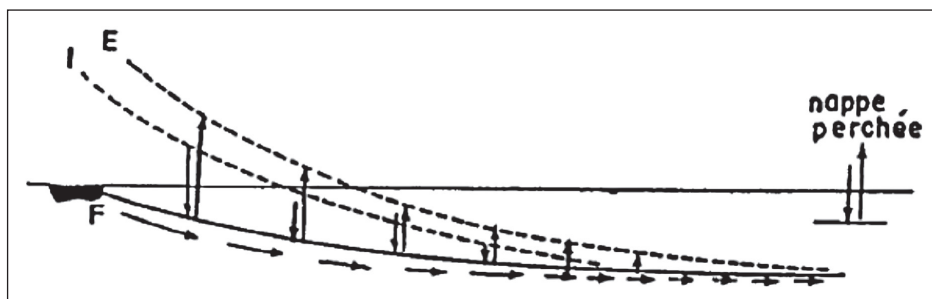


Figure 24 : dépressions piézométriques

Différentes causes ont été envisagées pour expliquer ce phénomène : surexploitation (mais l'exhaure dans ces secteurs est insignifiante par rapport aux réserves des aquifères concernés), drainage profond (mais il manque un exutoire sous-jacent), phénomène de subsidence (mais les rabattements observés sont trop importants), reprise évapotranspiratoire profonde. On est amené à envisager le schéma conceptuel suivant :

- C'est la reprise évaporatoire et évapotranspiratoire profonde (**exfiltration**) qui est la cause d'apparition de ces dépressions, privilégiée par les recherches menées par l'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) et l'IRD (ex ORSTOM) dans les années 80 et 90 (Revue des Sciences de l'Eau 1993 J.F. Araniossy et B. N'Diaye).
- Ces dépressions se sont formées durant la période climatique très déficitaire qui a suivi la dernière période humide de l'holocène. Dans un contexte de faible perméabilité latérale, le flux d'infiltration (I) provenant des bordures du bassin a été insuffisant pour compenser le flux évaporatoire (E), jusqu'à ce qu'un équilibre s'instaure. Les mesures isotopiques corroborent ce phénomène.



- Les creux piézométriques observés sont en général inférieurs à 35 m, même si des dépressions de 80 m ont été observées exceptionnellement.
- La profondeur et l'intensité de l'exfiltration sont fonction de la profondeur, et fonction de la granulométrie des sédiments (l'évapotranspiration est d'autant plus élevée et profonde que les sédiments sont fins, ce qui est le cas au centre de ces dépressions)

- L'exfiltration est accentuée dans les dépressions du fait de l'abondance de la végétation, notamment arbustive (acacias), qui exerce son influence jusqu'à 35-40 m de profondeur.
- De petites nappes perchées temporaires ou des mares parfois étendues apparaissent dans ces dépressions, en saison des pluies, du fait du rassemblement des eaux de ruissellement, mais il n'y a généralement pas de continuité avec la nappe profonde dont le niveau est beaucoup plus profond dans les puits voisins.

Le cas particulier des dépressions piézométriques a été traité en utilisant le package «*évapotranspiration*» (ET) de MODFLOW. Celui-ci permet de simuler l'exfiltration d'eau de la nappe depuis la surface piézométrique par capillarité.

Le package ET nécessite d'implémenter dans le modèle les données suivantes :

- taux d'exfiltration (mm/an) : il s'agit du taux d'exfiltration maximal lorsque la surface piézométrique est égal à la cote topographique ;
- profondeur d'extinction (m) : profondeur (par rapport au sol) au-dessous de laquelle le flux d'exfiltration est nul.

Entre le toit de la maille et la profondeur d'extinction, le flux d'exfiltration décroît linéairement.

Le taux d'exfiltration et la profondeur d'extinction sont des paramètres de calage à ajuster en régime permanent et en régime transitoire.

Les cartes des zones d'exfiltration sont présentées sur les figures suivantes.



Figure 25: Modèle SAI - Zones d'exfiltration

En dehors de la zone des dallols et du fossé de Gao, il n'a pas été introduit d'autres zones d'exfiltration pour le SAI.

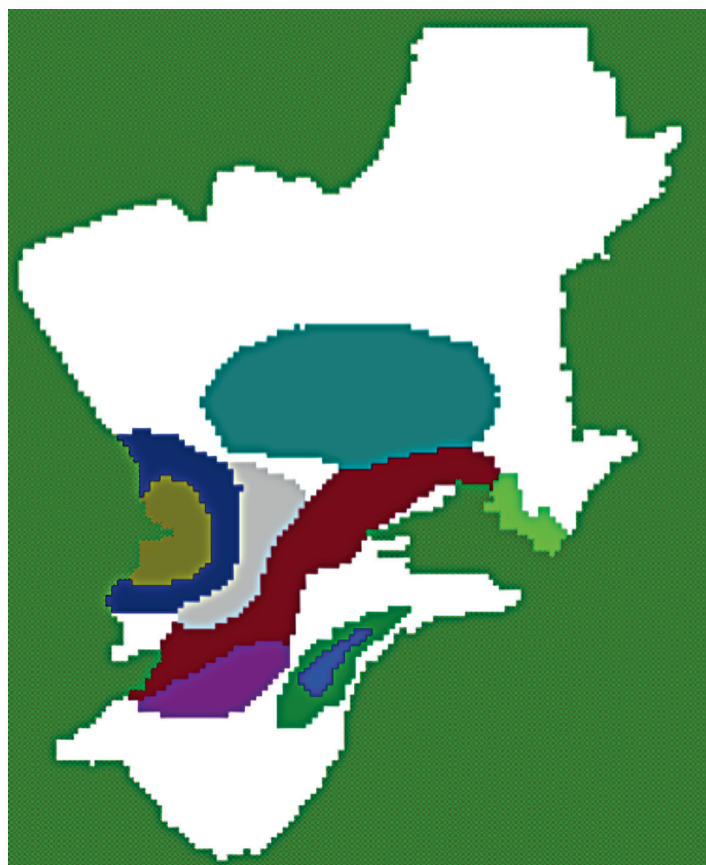


Figure 26 : Modèle SAT - Zones d'exfiltration

Les zones d'exfiltration introduites dans le SAT correspondent aux grandes dépressions piézométriques du système aquifère : Gondo, Azaouad, Delta Intérieur, Fossé de Nara.

3.4. CALAGE DU MODÈLE

La phase de calage en hydraulique consiste à estimer le jeu de paramètres hydrodynamiques (recharge, perméabilité, zones d'exfiltration, conductance des rivières) permettant de restituer au mieux les grandes tendances des écoulements et la « réactivité » de la nappe, telles qu'on peut les appréhender au vu des données portées à notre connaissance. L'ajustement du modèle numérique est effectué dans un premier temps en régime hydrodynamique permanent puis dans un second temps, en régime transitoire.

3.4.1. Régime permanent

3.4.1.1. Piézométrie de référence

Il s'agit ici d'ajuster en régime stabilisé les paramètres du modèle de manière à restituer au mieux la piézométrie de référence établie à partir des points d'eau de la base de données du projet.

La piézométrie de référence est présentée sur la Figure 6.

3.4.1.2. Recharge

La recharge introduite dans le modèle correspond à l'année 2007, année représentative de la décennie 2000-2010.

Elle est issue du traitement décrit au paragraphe 3.2.4. et introduite dans le modèle numérique au format ASCII. La grille de la recharge et la grille du modèle MODFLOW étant identique, un seul fichier de recharge a été créé pour les deux modèles SAT et SAI.

La recharge est appliquée sur la couche active supérieure : si une cellule dans la première couche est sèche (charge hydraulique inférieure au substratum de la maille), la recharge est appliquée sur la maille sous-jacente de la couche 2.

La carte de la recharge 2007 est présentée sur la Figure 27. Au nord du 15ème parallèle, la recharge est inférieure à 10 mm/an. Les valeurs minimales sont rencontrées dans la zone saharienne : le long de la limite nord du CI dans le SAI, la recharge introduite est comprise entre 0,1 et 1,2 mm/an.

Les valeurs de recharge dans le Tanezrouft sont de l'ordre de 0,2 à 0,6 mm. Les valeurs de recharge sont maximales au Burkina Faso et au Bénin, et sont comprises entre 80 et 120 mm environ.

La recharge moyenne introduite sur l'ensemble du modèle SAT est de l'ordre de 10 mm/an. Celle du SAI est de l'ordre de 15 mm/an¹.

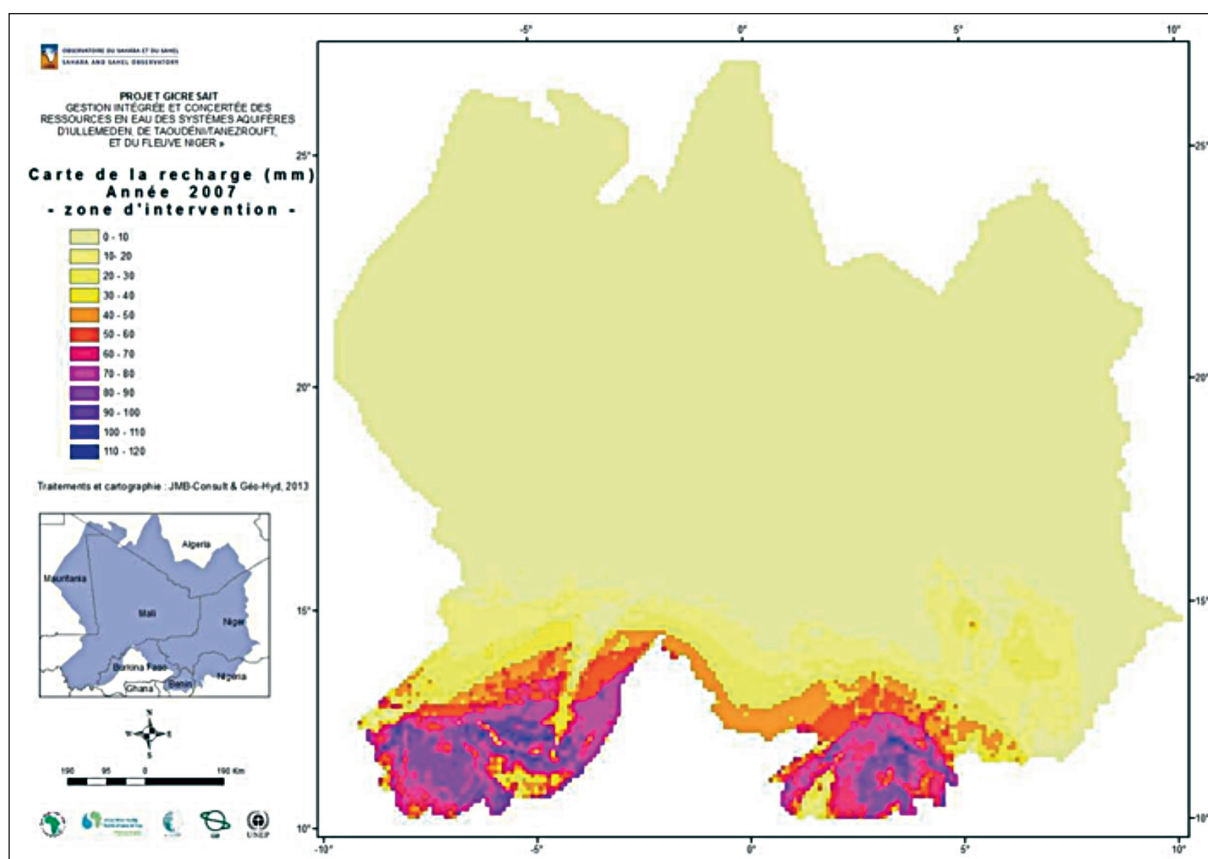


Figure 27 : Carte de la recharge pour toute la zone d'étude

¹ La différence de taux de recharge moyen s'explique simplement par la situation géographique du SAT, s'étendant plus au nord, donc interceptant une plus large superficie que le SAI de zone à taux de recharge très faible. Il en résulte une valeur de recharge moyenne plus faible pour le SAT que pour le SAI.

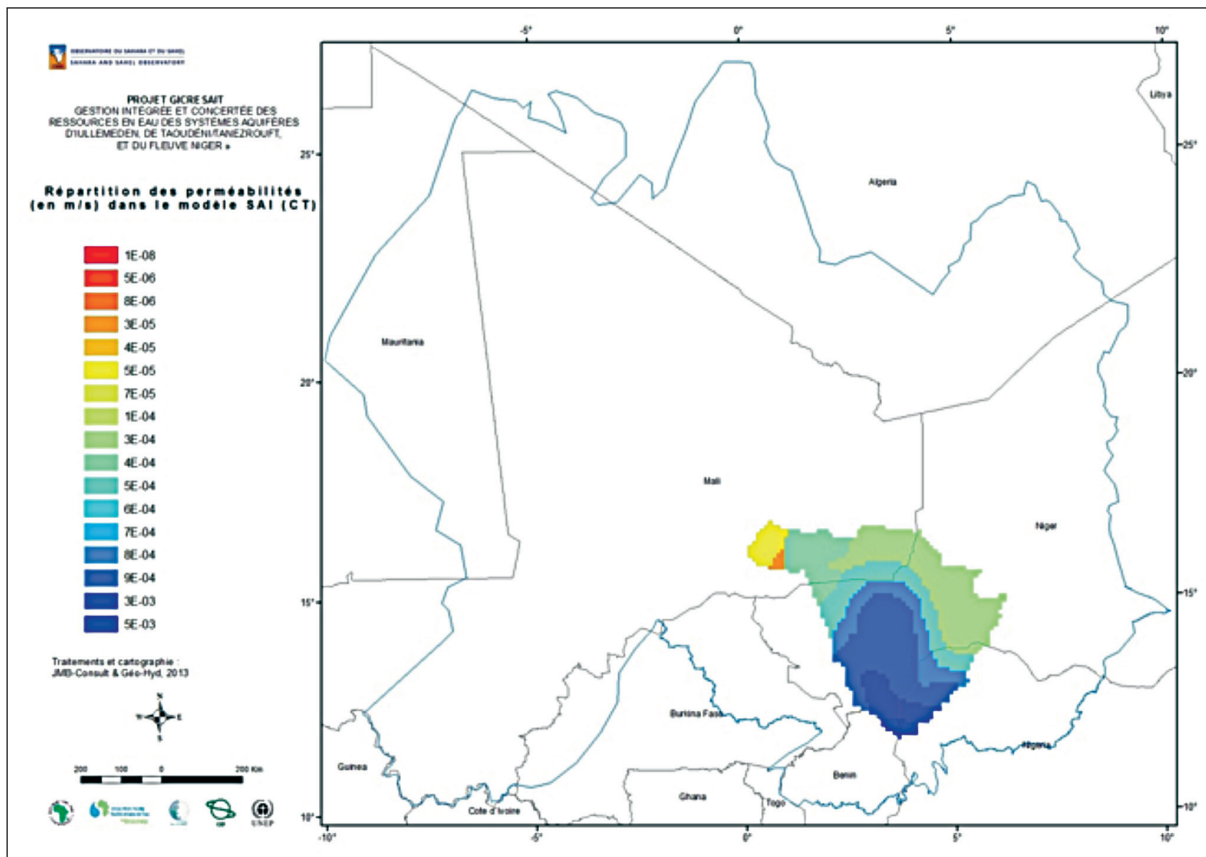


Figure 29 : Modèle SAI - Carte de la répartition des perméabilités (CT)

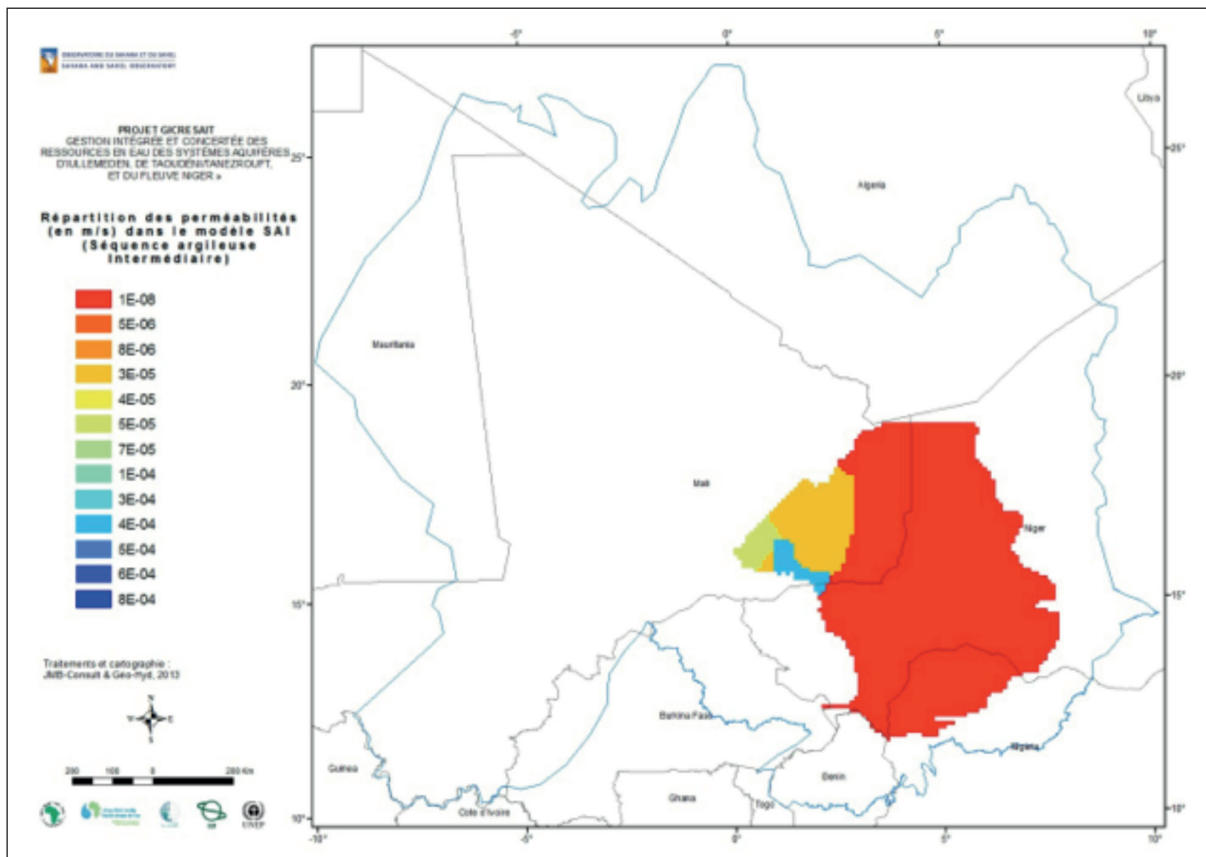


Figure 30 : Modèle SAI - Carte de la répartition des perméabilités (séquence intercalaire)

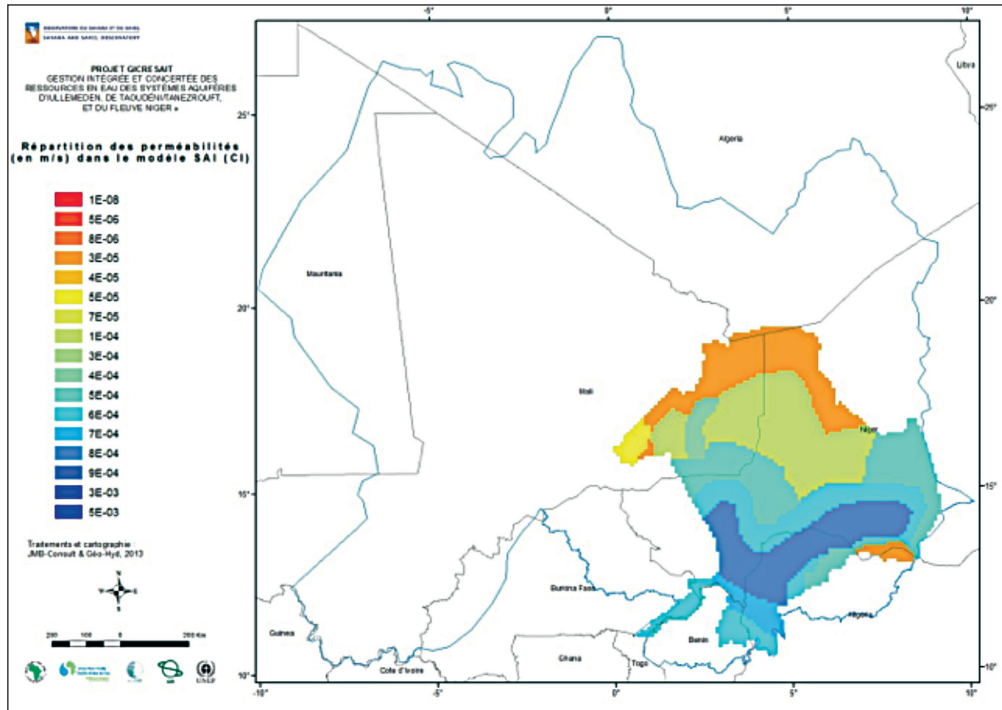


Figure 31 : Modèle SAI - Carte de la répartition des perméabilités (CI)

3.4.1.5. Résultats du calage en régime permanent

A) PIEZOMETRIE

La piézométrie simulée pour l'ensemble des deux modèles est présentée sur la figure suivante et les résultats seront ensuite détaillés pour chaque système aquifère. Sur cette carte, pour le SAI, sont présentées les charges hydrauliques simulées dans la couche du Continental intercalaire, ce dernier étant l'horizon le plus étendu au sein du SAI.

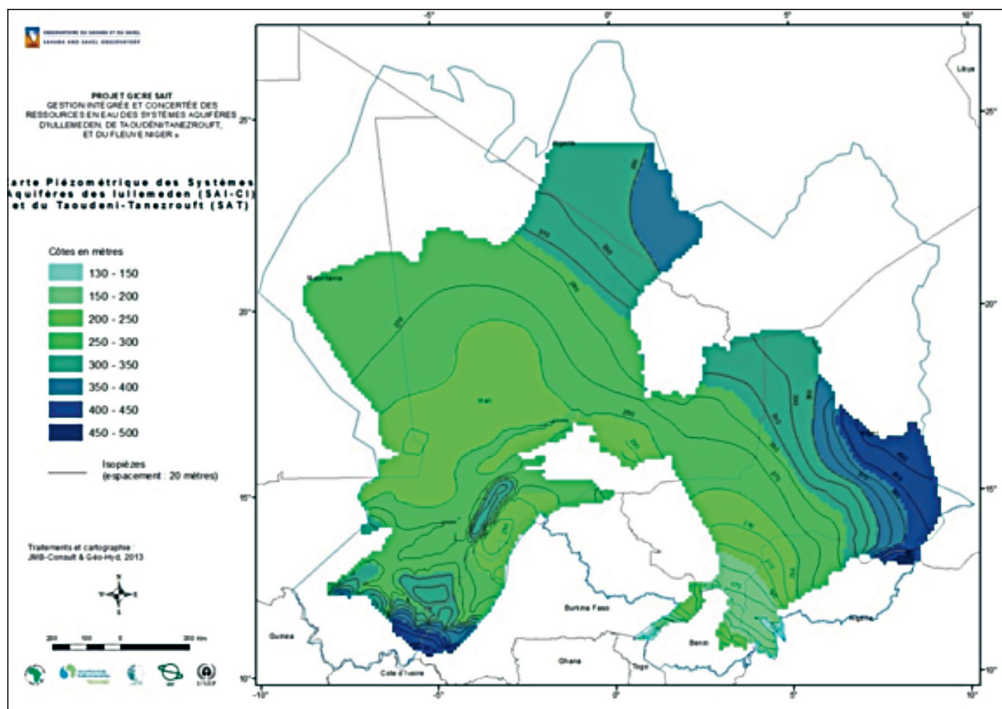


Figure 32 : Modèles SAT & SAI (CI) - Piézométrie simulée

o PIEZOMETRIE DU SAT

La figure suivante présente l'allure de la piézométrie simulée en régime permanent.

Les sens d'écoulement au sein du système aquifère sont contraints par les limites physiques du modèle (Fleuve Niger, Rivière Bani et autres rivières pérennes, les zones d'exfiltration, les limites à flux nul) et par la répartition hétérogène des perméabilités, ce qui se traduit par :

- de forts gradients hydrauliques dans la zone du Plateau Dogon et dans les secteurs de moindre perméabilité,
- la formation de grandes structures dépressionnaires dans le Gondo, l'Azaouad, le Fossé de Nara, entre le fleuve Niger et le Bani,
- des isopièzes convexes dans la zone du Delta Intérieur du fleuve Niger traduisant une alimentation de l'aquifère par le fleuve,
- des isopièzes concaves au Burkina Faso et au sud Mali traduisant le drainage de l'aquifère par les cours d'eau pérennes.

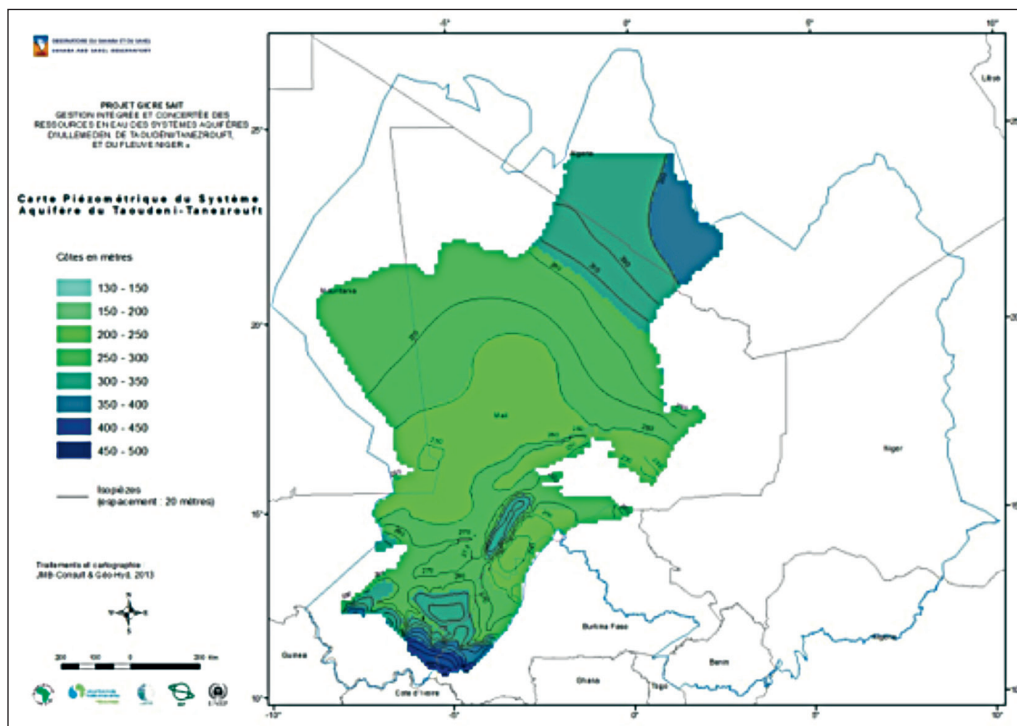


Figure 33 : Modèle SAT - Piézométrie simulée en Régime Permanent

La figure ci-dessous présente la piézométrie simulée superposée aux points d'eau de la base de données dans le secteur le plus riche en points d'eau.

Dans ce secteur, le modèle restitue l'esquisse piézométrique et notamment le secteur dépressionnaire du Gondo immédiatement situé à l'est du Plateau Dogon où les gradients piézométriques sont relativement élevés (0,3%). Dans la dépression du Gondo, les niveaux simulés sont de l'ordre de +220 m.

Sur cette figure, on peut également observer la dépression piézométrique située entre le Niger et le Bani et l'alimentation de l'aquifère dans la zone du Delta Intérieur.

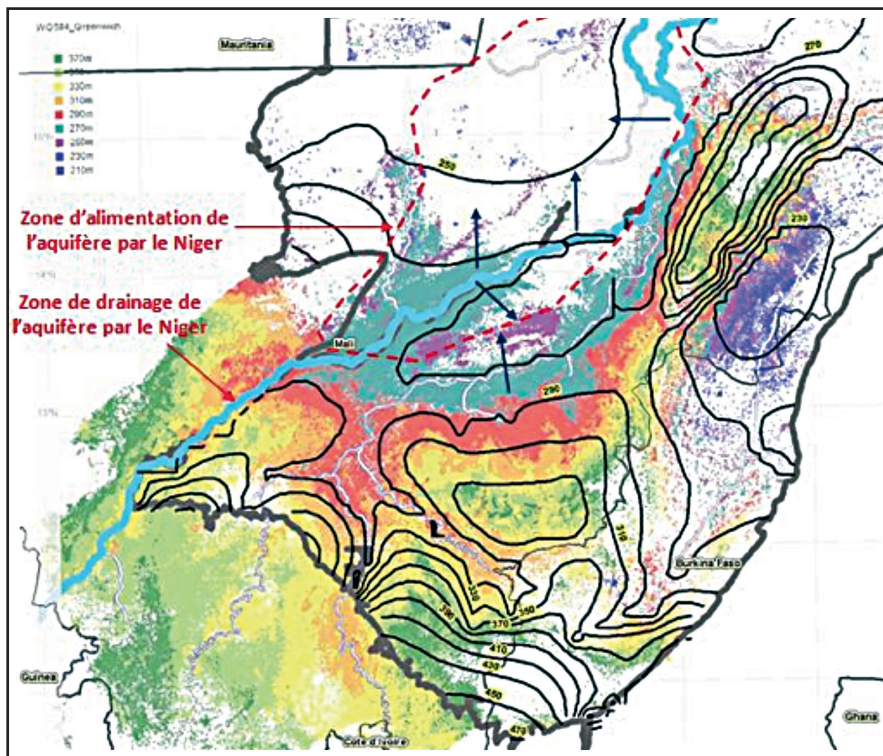


Figure 34 : Modèle SAT - Piézométrie simulée (en noir) et observée en Régime Permanent – zoom sur la zone sud du modèle

o PIEZOMETRIE DU SAI

La Figure 50 et la Figure 51 présentent l’allure de la piézométrie simulée en régime permanent pour la couche du Ci et celle du CT.

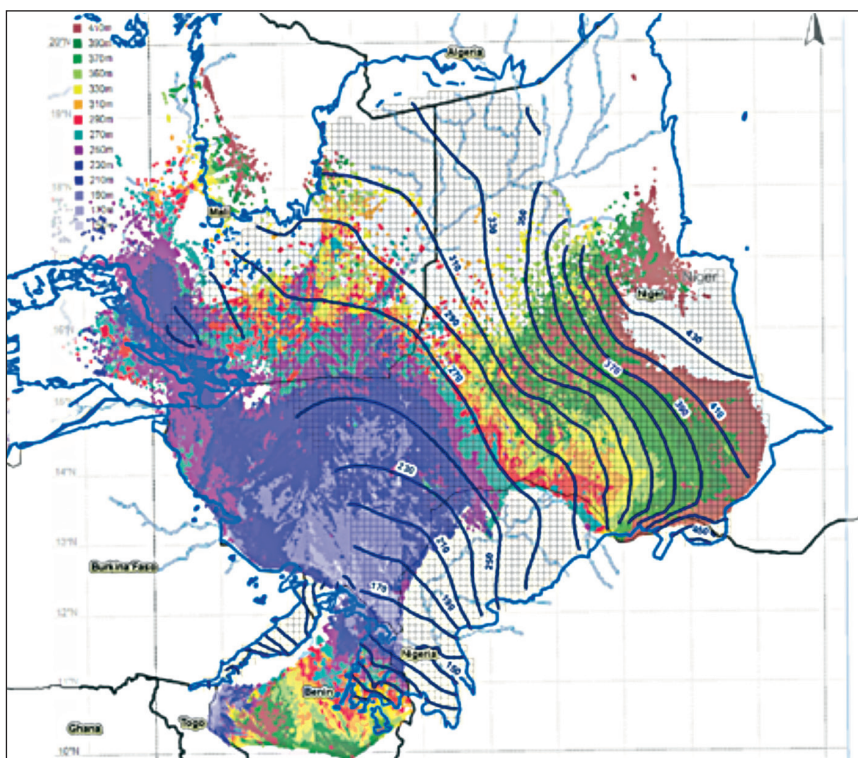


Figure 35 : Modèle SAI - Piézométrie simulée (en noir) et observée en Régime Permanent – couche du Ci

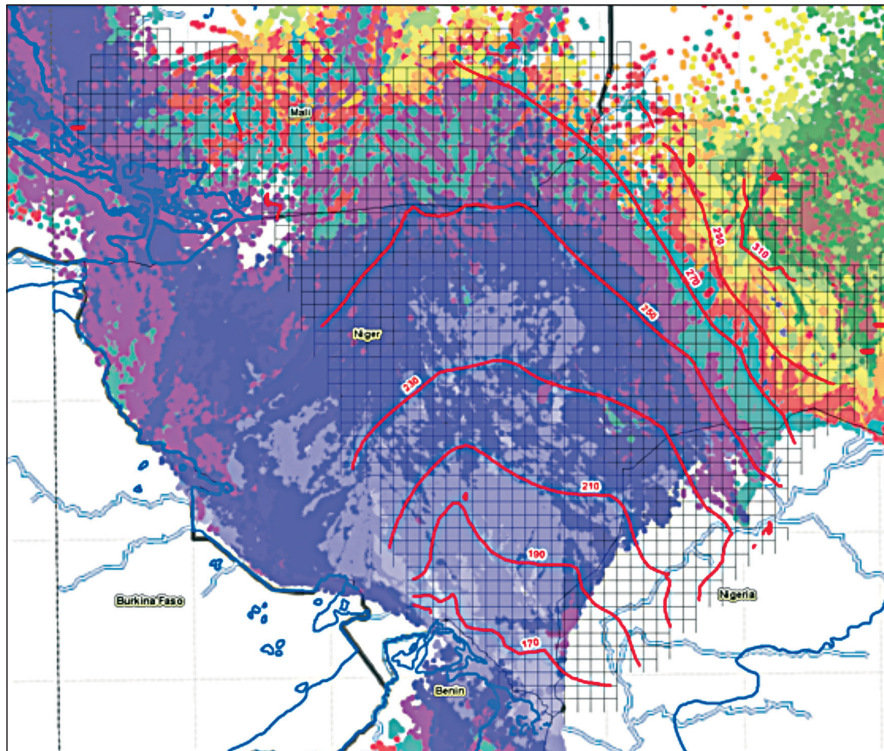


Figure 36 : Modèle SAI - Piézométrie simulée (en rouge) et observée en Régime Permanent – couche du CT

Ces figures montrent que les piézométries simulées respectent globalement le sens et les gradients d'écoulement souterrains dans le SAI :

- le principal exutoire du système est le fleuve Niger qui draine l'ensemble aquifère Ci/CT,
- les principaux axes de drainage du CT, orientés N->S et NE->SW sont constitués par les dallols dont l'effet se fait sentir à mesure que l'on se rapproche du Fleuve Niger,
- les principaux axes de drainage du CI sont orientés E->W dans l'axe de la rivière Sokoto au Nigéria puis s'incurvent en suivant une direction NE->SW au Niger.

Dans le secteur des bas-dallols, on peut observer un différentiel de charge positif en faveur du Ci mettant en évidence un phénomène de drainage vertical ascendant (Figure 37). La charge du CT est plus basse en raison de l'exfiltration et du drainage qui se produisent dans cette zone.

À l'aval du système, en se rapprochant du fleuve Niger on observe la quasi-continuité hydraulique entre les deux nappes.

En se rapprochant du fossé de Gao au nord-ouest, les charges hydrauliques des deux aquifères se mettent pratiquement à l'équilibre. Plus à l'ouest, les mailles périphériques du CT sont dénoyées : dans ce secteur, les mailles du CI sont à surface libre.

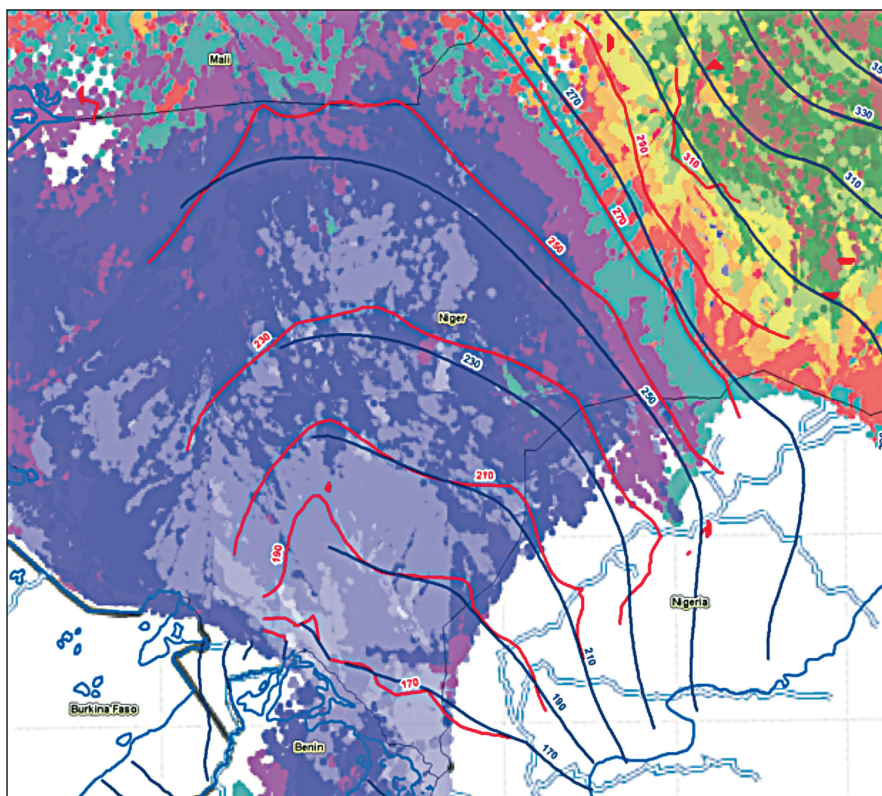


Figure 37 : Modèle SAI - Piézométrie simulée (CT en rouge, CI en noir) et observée en Régime Permanent – comparaison des charges CI et CT dans la zone des dallols

B) BILAN EN EAU

o BILAN EN EAU DU SAT

Le bilan de masse du système est présenté dans le tableau suivant.

Tableau 6 : Bilan du SAT en Régime Permanent

Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Charges Imposées	12	Charges Imposées	136
Oueds	0	Prélèvements	2
Drains	0	Drains	9
Recharge	294	Recharge	0
ET	0	ET	198
Niger	49	Niger	10
Total Entrées	355	Total Sorties	355

Le fleuve Niger constitue à la fois un exutoire et un drain pour le SAT. Les débits d'alimentation/drainage du fleuve Niger par tronçon sont également restitués dans le Tableau 7. On constate que seule la partie située en amont du Delta Intérieur est drainante en régime permanent.

Tableau 7 : Bilan des relations Niger/SAT entre Koulikoro en régime permanent

	Alimentation du SAT (m ³ /s)	Drainage du SAT (m ³ /s)
Koulikoro (amont)	0	6
Koulikoro - Mopti	13	3
Mopti-Diré	12	0
Diré-Asongo	24	0

Les principaux exutoires du système aquifère SAT sont les zones d'exfiltration (55% des débits sortants) et les charges imposées, notamment au Burkina Faso. Une partie des eaux du système a également pour exutoire les zones de débordement constituées par le réseau de sources au Burkina Faso (environ 10 m³/s).

o BILAN EN EAU DU SAI

Le bilan global du modèle pour le SAI est présenté dans le Tableau 8. La recharge constitue l'essentiel des apports en eau du système : 229 m³/s soit 95%. Le reste est assuré par l'alimentation par les rivières.

L'exutoire principal du système est constitué par les mailles rivières (Niger, Sokoto, Bénin, Burkina) à raison de 105 m³/s soit environ 45%. La deuxième sortie d'eau du système est constituée par les zones d'exfiltration (37%) assurée en grande partie par le fossé de Gao.

Le débit de drainage des dallols n'est pas dérisoire et constitue 15% des sorties du modèle.

Tableau 8 : Bilan global du SAI en régime permanent

Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Charges Imposées	0	Charges Imposées	0
Puits	0	Puits	9
Drains	0	Drains	37
Recharge	229	Recharge	0
ET	0	ET	92
Rivières	14	Rivières	105
Total Entrées	243	Total Sorties	243

Le bilan par aquifère (Ci, CT) est présenté dans le Tableau 9

Tableau 9 : Bilan du SAI par aquifère en régime permanent

CONTINENTAL TERMINAL			
Entrées (m ³ /s)		Sorties (m ³ /s)	
Charges Imposées	0	Charges Imposées	0
Prélèvements	0	Prélèvements	5
Drains	0	Drains	37
Recharge	87	Recharge	0
ET	0	ET	48
Rivières	0	Rivières	18
Échanges Éponte > CT	37	Échanges CT > Éponte	16
Total IN	124	Total OUT	124

CONTINENTAL INTERCALAIRE			
IN		OUT	
Charges Imposées	0	Charges Imposées	0
Prélèvements	0	Prélèvements	4
Drains	0	Drains	0
Recharge	101	Recharge	0
ET	0	ET	8
Rivières	4	Rivières	86
Échanges Éponte > CI	52	Échanges CI > Éponte	59
Total IN	157	Total OUT	157

3.4.2. Calage en régime Transitoire

Le calage en régime transitoire est mis en œuvre sur la période juillet 1998 – juillet 2010 (décennie considérée comme moyenne sur le plan hydrologique, en comparaison des décennies 80 et 90, sèches et les années 60 humides).

Le calage en régime transitoire consiste à reproduire les variations piézométriques au cours du temps (recharge et vidange de la nappe), en faisant varier la perméabilité et le coefficient d'emmagasinement des couches du modèle. La distribution spatiale des zones homogènes et les gammes de perméabilité déterminées en régime permanent sont conservées ou doivent rester globalement proches.

3.4.2.1. Piézomètres

Dans les deux bassins, il a été explicité au paragraphe 3.1.3.2 que :

- il n'existe pas de piézomètres dans les nappes captives profondes,

- la répartition des piézomètres n'est pas nécessairement représentative des variations des systèmes aquifères pris dans leur globalité, tel que considéré dans la présente étude, où l'unité de surface est représentée par une maille de 10 km de côté.

Néanmoins, les variations piézométriques ont été suivies de manière éparse sur quelques piézomètres isolés dans différents contextes hydrogéologiques. De l'analyse des différents piézomètres, il est apparu clairement que :

- les variations piézométriques sont de faibles amplitudes (1 à 2) en général,
- les tendances ne sont pas constantes (baisse dans certains piézomètres mais hausse dans d'autres).

Le «calage» en régime transitoire a ici pour but de restituer globalement ces tendances et les ordres de grandeur des variations piézométriques en ajustant le coefficient d'emmagasinement.

En ce sens, différents points d'observations ont été positionnés dans les secteurs les plus intéressants, sur le plan hydrogéologique :

- pour le SAT :
 - o fossé de Gao,
 - o dépression du Gondo,
 - o dépression piézométrique du secteur situé entre le Bani et le fleuve Niger,
 - o Fossé de Nara / Dhar de Néma,
 - o Azaouad,
- pour le SAI :
 - o nord-est et ouest du Ci lorsque celui est libre,
 - o secteur des dallols,
 - o secteur périphérique du CT avant son biseautage sur la séquence argileuse intermédiaire.

3.4.2.2. Recharge

La recharge introduite en régime transitoire est issue du calcul décrit dans les paragraphes précédents. La recharge est uniquement appliquée pendant la période de calcul correspondante à la saison humide (3ème trimestre).

3.4.2.3. Prélèvements

À défaut de chroniques de prélèvement fiables sur la période considérée, les prélèvements en régime transitoire sont les mêmes que ceux introduits en régime permanent pour les deux modèles.

3.4.2.4. Emmagasinement

Les calculs en régime transitoire en hydraulique nécessitent de prendre en compte le paramètre «coefficient d'emmagasinement», qui intervient en régime transitoire dans l'équation de diffusivité. Avec le code de calcul MODFLOW, en fonction de l'état libre ou captif de la maille, le code de calcul utilise soit l'emmagasinement libre soit l'emmagasinement captif.

Pour une nappe libre, l'emmagasinement libre est assimilable à la porosité efficace. Il est utilisé quand une maille (quelle que soit la couche) n'est pas entièrement saturée.

Sinon, le code utilise l'emmagasinement captif, introduit en tant qu'emmagasinement spécifique : il est égal au quotient de l'«emmagasinement des hydrogéologues» (calculé lors des pompages d'essai) par l'épaisseur de l'aquifère.

Le coefficient d'emmagasinement spécifique est une grandeur intrinsèque à la formation aquifère, il est donc plus judicieux de le faire intervenir en modélisation hydrogéologique.

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur le paramètre «emmagasinement».

En nappe libre, des valeurs de 8.10^{-2} , 5.10^{-2} , 1.10^{-2} puis 5.10^{-3} ont été successivement testées.

Il est apparu que la valeur permettant de restituer l'ordre de grandeur des variations piézométriques interannuelles est 1.10^{-2} .

En nappe captive, un coefficient d'emmagasinement spécifique de $1.10^{-5} m^{-1}$ a été appliqué.

3.4.2.5. Résultats du calage en régime transitoire

- SAT

Les graphiques suivants présentent les variations piézométriques aux points de contrôle introduits dans le modèle. Ils sont localisés sur la Figure 38.

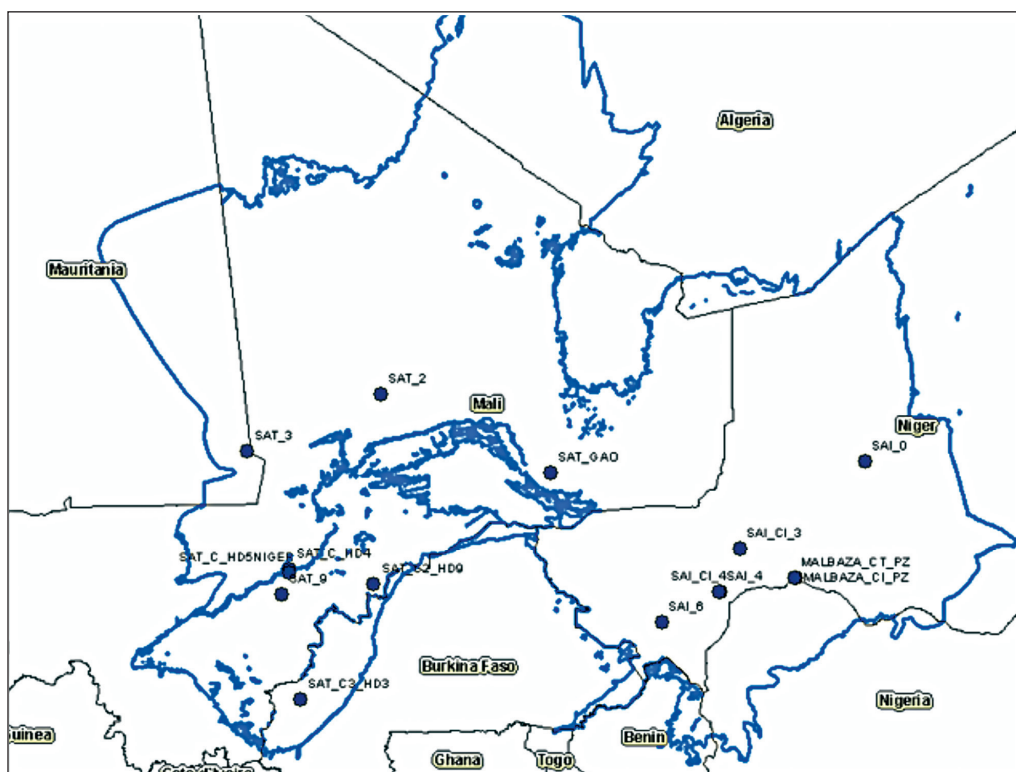


Figure 38 : Localisation des points de contrôle des modèles SAT et SAI

Les échelles des ordonnées des graphiques présentés sont identiques, de manière à apprécier les amplitudes des variations par secteur géographique. Les résultats de la simulation en régime transitoire montrent que :

- les zones situées aux latitudes les plus hautes présentent les variations d'amplitudes les plus faibles (Fossé de Nara, Azaouad, fossé de Gao), en lien avec les taux de recharge peu important introduit dans ces secteurs. Les variations annuelles sont inférieures à 50 cm dans le Fossé de Nara, de l'ordre de la dizaine de centimètres dans l'Azaouad et de la vingtaine dans le fossé de Gao. Dans ces zones, les niveaux restent globalement constants (après une période de démarrage du modèle de quelques années),
- les points d'observations, présentant les variations d'amplitudes les plus fortes, sont situés aux latitudes les plus faibles : au Burkina Faso, la variation annuelle est de l'ordre de 4 mètres, dans le Gondo et la zone située entre le Bani et le fleuve Niger de l'ordre de 2 mètres. À noter que sur le point d'observation situé dans le Gondo le niveau chute pendant 5 années puis se stabilise autour de la cote +210 m : ceci est lié à la période de démarrage du modèle qui est plus longue,
- dans la zone située entre Ségou et Mopti, le Fleuve Niger est perché par rapport à l'aquifère d'environ 7 mètres. La Figure 54 présente les niveaux dans la maille aquifère située directement sous le Fleuve Niger et dans la maille adjacente, c'est-à-dire à une distance de 10 kilomètres du fleuve. On y constate une forte atténuation de l'amplitude des variations piézométriques à mesure que l'on s'éloigne du fleuve.

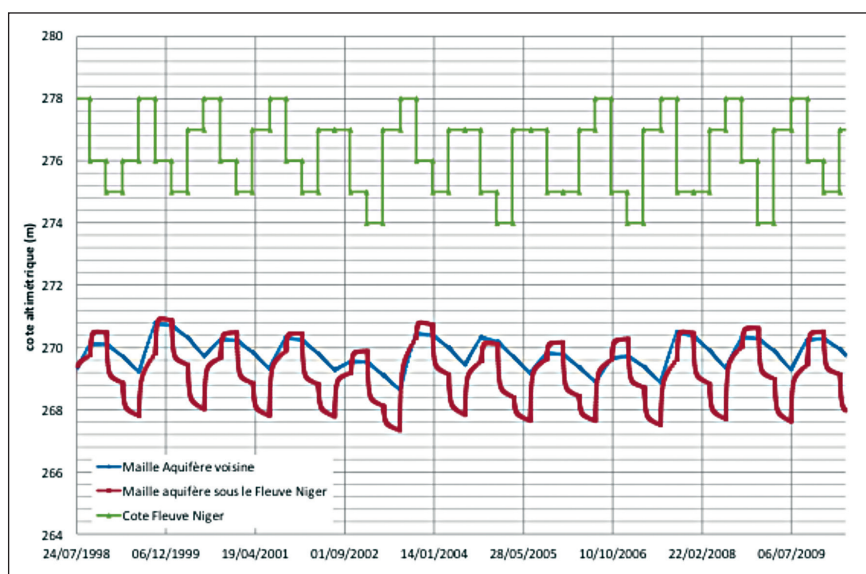


Figure 39 : Variations piézométriques simulées dans la zone de Ségou-Mopti au Mali

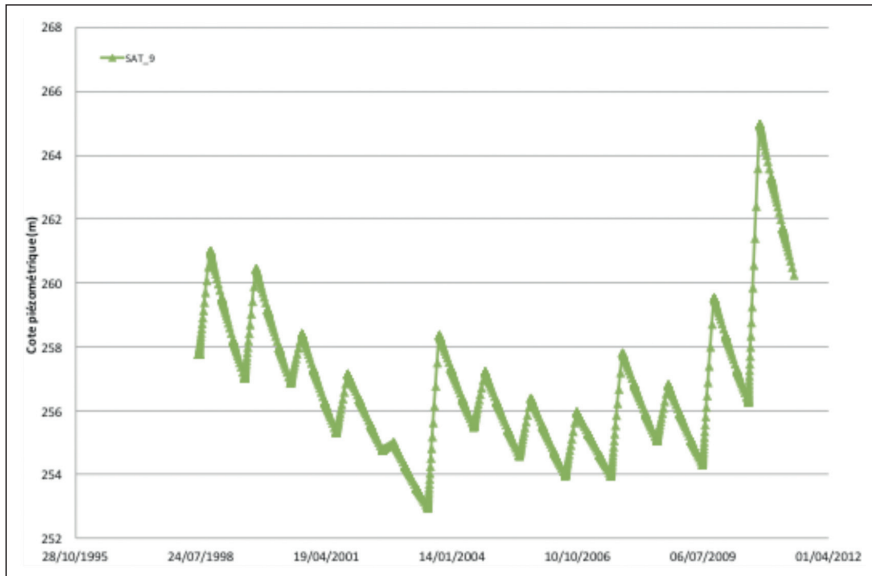


Figure 40 : Variations piézométriques simulées entre le Fleuve Niger et le Bani

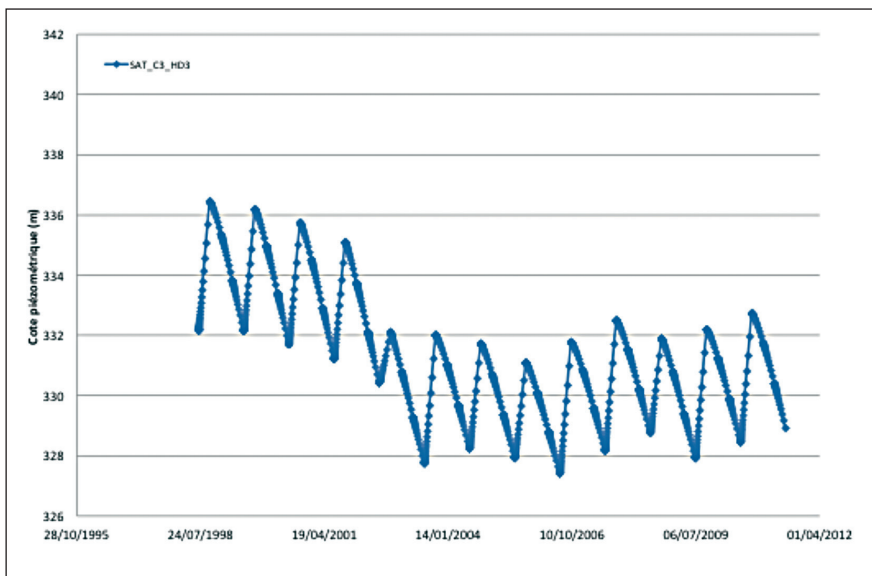


Figure 41 : Variations piézométriques simulées dans la zone du Kourouma au Burkina Faso

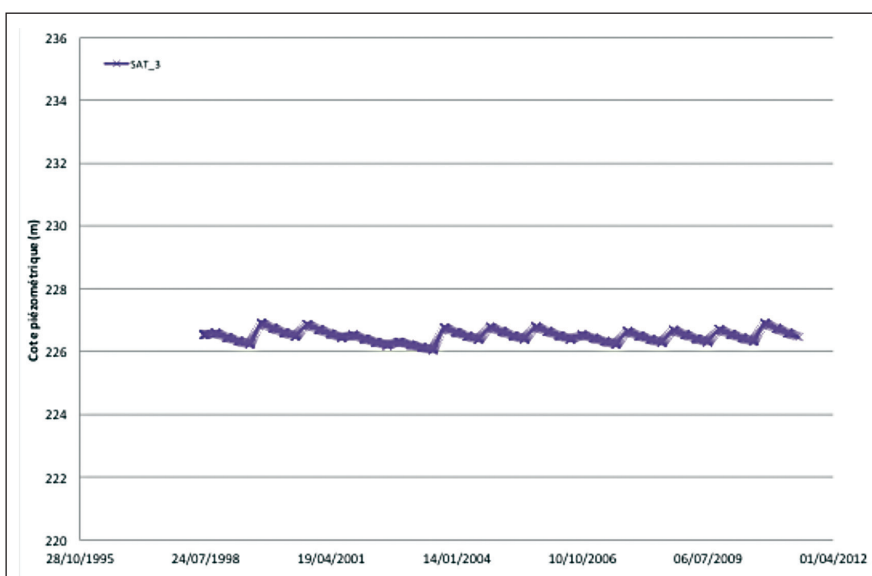


Figure 42 : Variations piézométriques simulées dans le Dhar de Nema

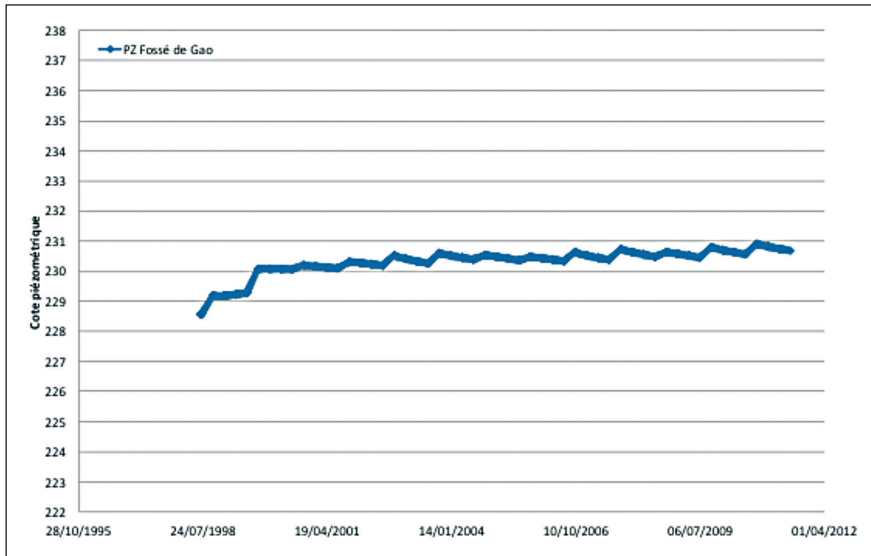


Figure 43 : Variations piézométriques simulées dans le fossé de Gao

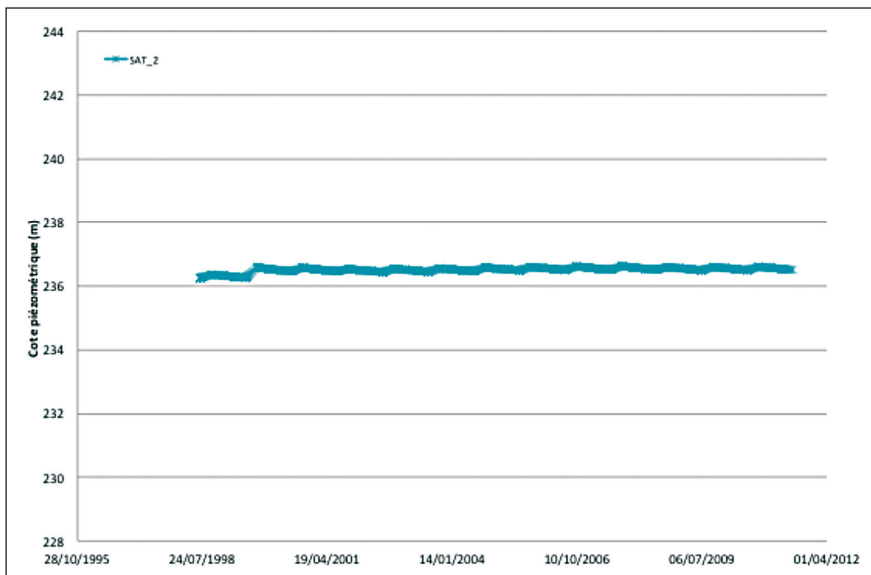


Figure 44 : Variations piézométriques simulées dans l'Azaouad

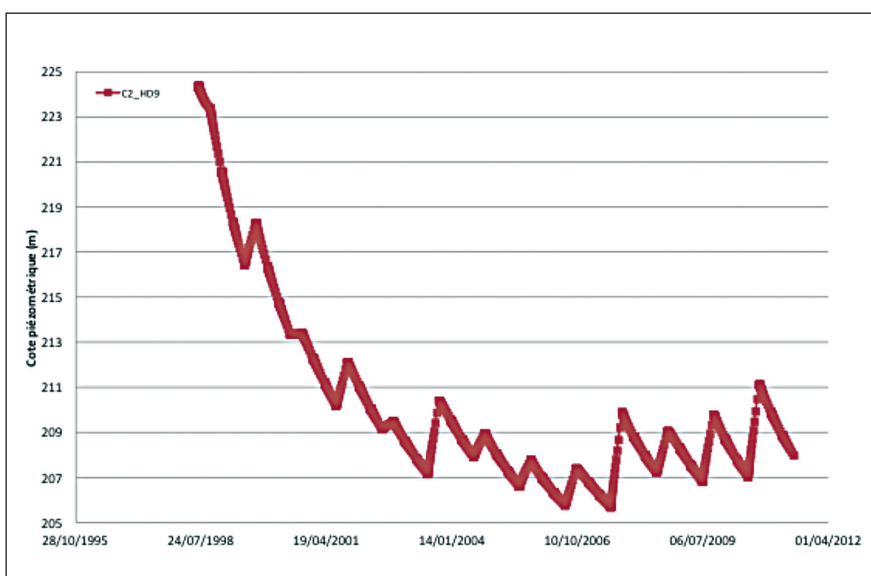


Figure 45 : Variations piézométriques simulées dans la dépression du Gondo

• SAI

Les graphiques suivants présentent les variations piézométriques aux points de contrôle introduits dans le modèle. Ils sont localisés sur la Figure 38.

Les observations suivantes peuvent être faites :

- les variations piézométriques présentent des variations pluri-décimétriques à métriques : dans le nord, où le Ci est affleurant, les variations de niveau sont très peu marquées en raison de la faiblesse des précipitations (point de contrôle n° 00) et atteignent 50 centimètres. Plus au sud, l'augmentation de la recharge conduit à des variations annuelles de l'ordre du mètre (point de contrôle n° 6) ;
- quatre points de contrôle ont été positionnés dans les dallols (n° 3 et 4). Les niveaux piézométriques simulés montrent que le Ci est en charge de quelques mètres par rapport au CT. Celui-ci présente des variations d'amplitudes métriques liées à la recharge qui s'applique directement sur la maille. Les variations dans le Ci sont atténuées par son caractère captif,
- dans la maille «Malbaza» (cimenterie), la charge du CT est supérieure à celle du Ci mais les variations piézométriques du CI sont caractéristiques d'une nappe captive.

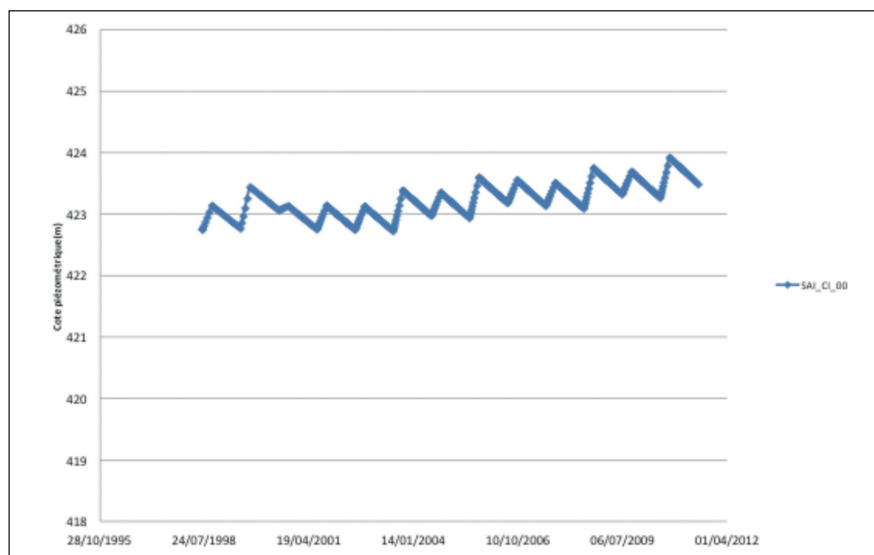


Figure 46 : Variations piézométriques simulées au nord-est du SAI

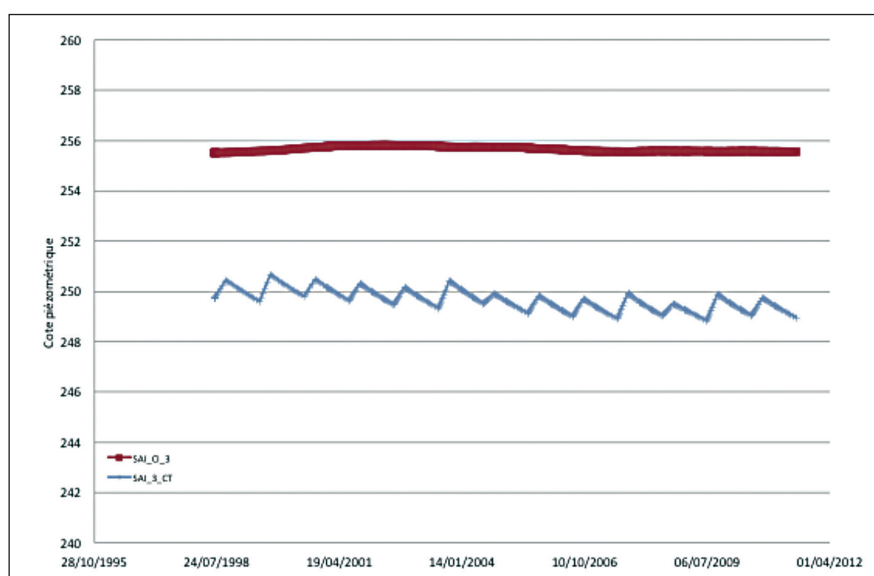


Figure 47 : Variations piézométriques simulées dans les Dallols (1)

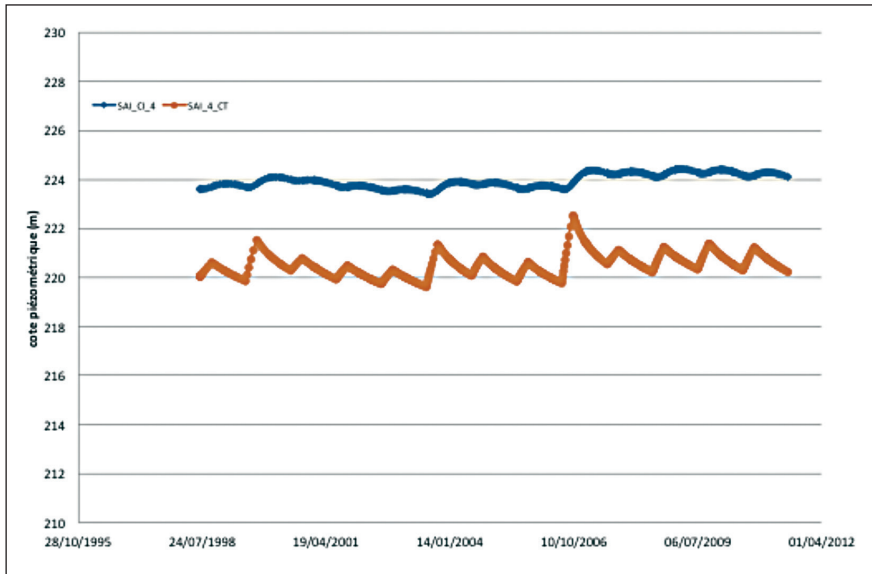


Figure 48 : Variations piézométriques simulées dans les Dallols (2)

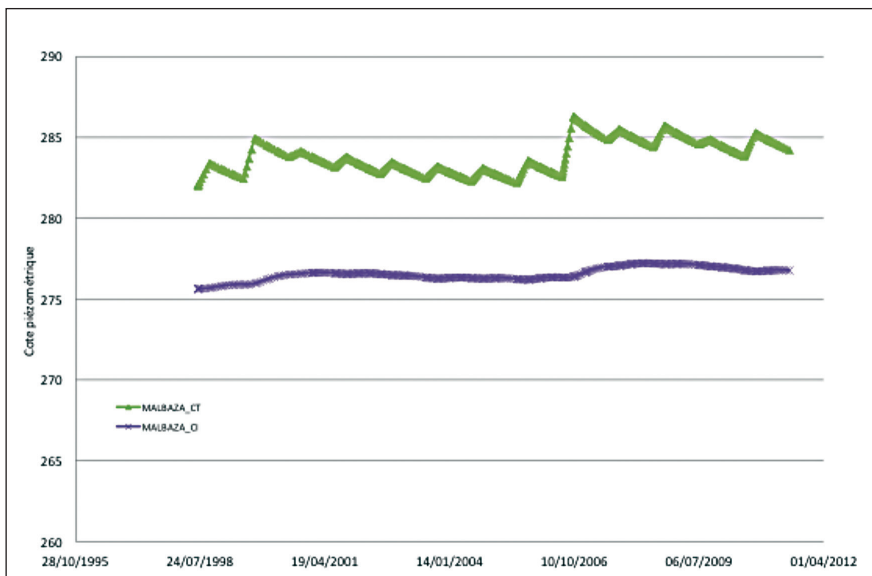


Figure 49 : Variations piézométriques simulées en périphérie du CT

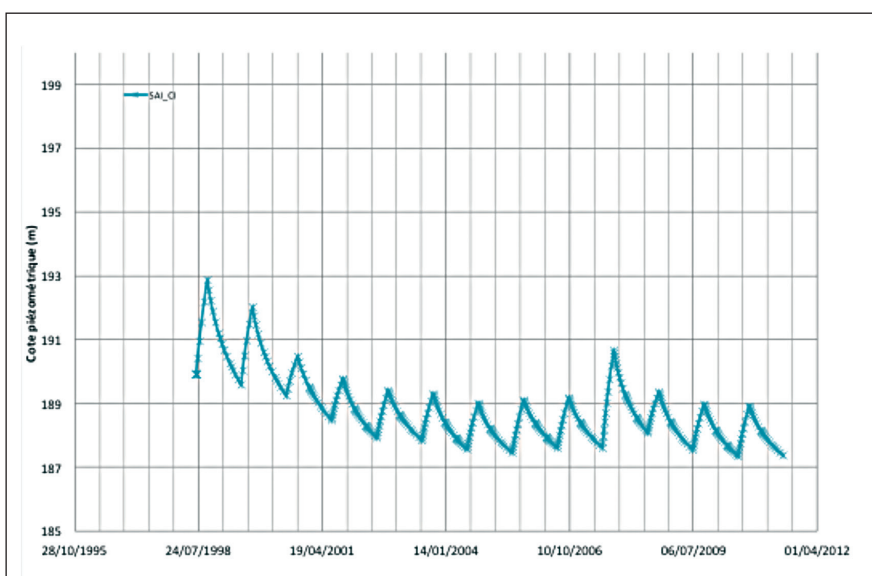


Figure 50 : Variations piézométriques simulées en bordure-ouest du CI libre

3.5. MODÈLE : SCÉNARIOS

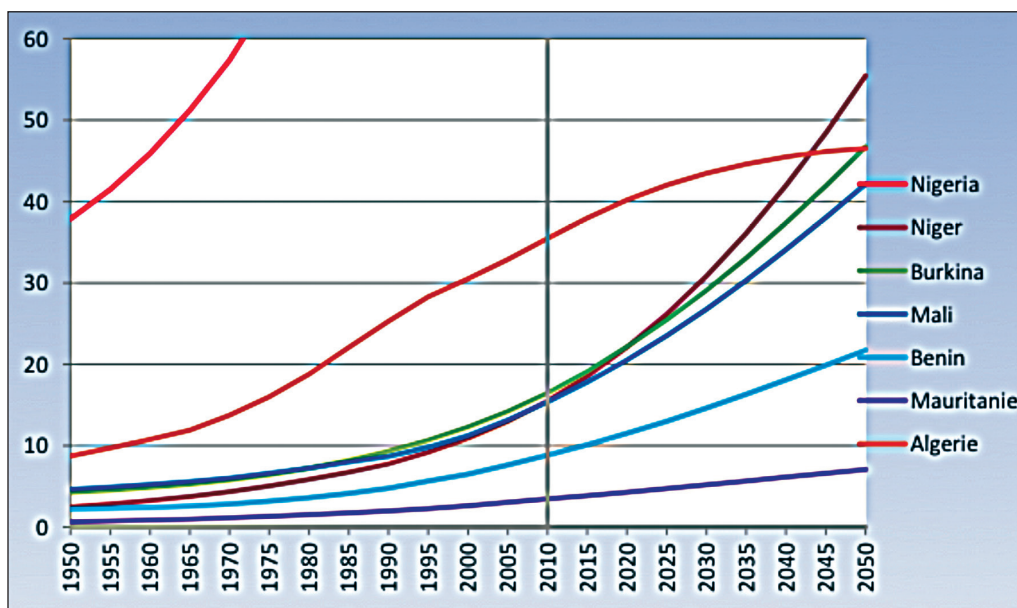
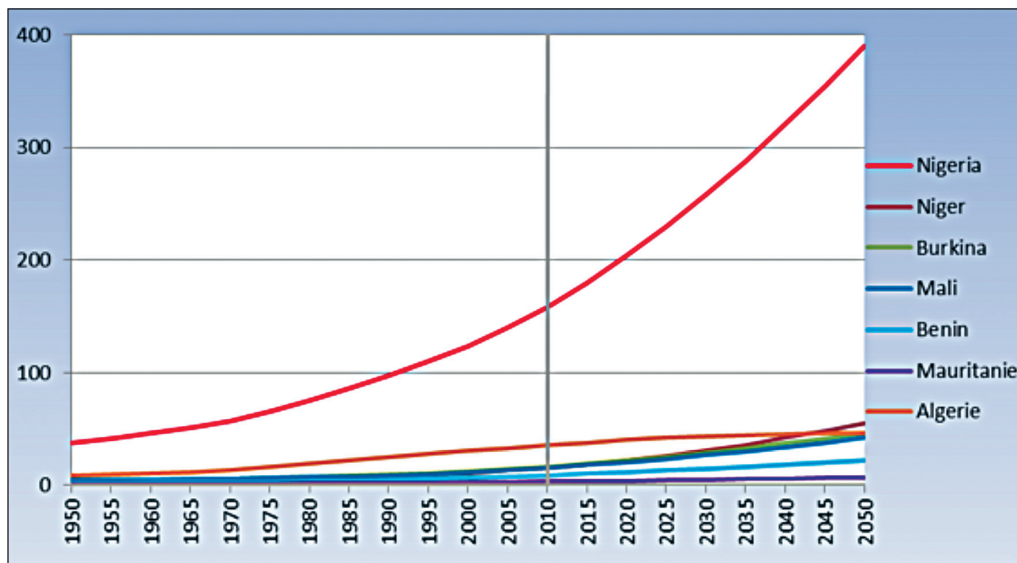
Les scénarios d'exploitation des modèles mathématiques développés pour les écoulements souterrains des systèmes aquifères des Iullemeden et Taoudéni, ont été établis à partir : i) des informations transmises par les points focaux nationaux de l'OSS, ii) des spécifications des termes de références, et iii) de l'expérience des experts impliqués dans le projet.

Les informations recueillies auprès des instances nationales en termes de perspectives de développement sont souvent trop généralistes, très limitées et non chiffrées. La plupart des perspectives pour le secteur Eau se limitent aux Objectifs de Développement du Millénaire élaborés pour l'horizon 2015. D'autres documents concernent des perspectives «à long terme» qui sont des rapports de «Vision_2025». La plupart de tous ces documents ont été élaborés il y a plus de 10 ans, et fournissent des informations et données au niveau national uniquement qui sont donc difficilement transposables pour la partie concernée par la zone d'étude du projet GIGRESAIT. Cependant les principales tendances qui s'en dégagent peuvent se synthétiser comme suit :

- Le facteur déterminant est la croissance démographique qui se traduira par un doublement des populations tous les 20 ans avec une différenciation assez nette entre urbain et rural, la croissance démographique urbaine devant tendre vers un quintuplement - au minimum - entre 2010 et 2050 ;
- L'alimentation en eau potable se fait en très grande majorité à partir des eaux souterraines en milieu rural. Elle se fait à partir des eaux de surface pour toutes les capitales et la majorité des villes secondaires (sauf au Niger pour Maradi, Tahoua, Birni N'Konni, Madahoua, Dosso et Dogondoutchi) ;
- Les normes pour la consommation en eau potable en milieu rural restent fixées à 20 l/hab/j dans la plupart des pays mais sont revues à la hausse dans d'autres pays tel le Bénin avec 50 l/hab/j. En milieu urbain/ semi-urbain, il n'y a pas de normes à proprement parler, mais les minima sont fixés à 40l/hab/j, ce chiffre pouvant atteindre 110l dans certains cas ;
- L'alimentation en eau pour le bétail se fait essentiellement à partir des eaux de surface quand cela est possible, sauf quand les mares sont asséchées où on passe aux eaux souterraines ;
- L'industrie demeurera très limitée et la plupart des industries utilisent les eaux de surface sauf pour les brasseries qui utilisent les eaux souterraines, et quelques autres industries telles celles localisées dans la région de Bobo-Dioulasso et une cimenterie au Niger, ainsi que quelques exploitations minières ;
- Les besoins pour l'irrigation sont presque exclusivement pourvus par les eaux de surface, à l'exception de l'utilisation des puisards dans les nappes alluviales et nappes perchées. Une étude très détaillée pour l'Office du Niger au Mali, montre que dans tous les cas de figure, faire appel aux eaux souterraines pour l'irrigation n'est en aucun cas économiquement rentable, et que le développement de l'irrigation passe par l'amélioration des techniques d'irrigation à partir des eaux de surface et eaux pluviales. C'est la tendance dans tous les pays, le développement de la micro-irrigation à partir des eaux souterraines étant à l'état embryonnaire et localisé dans des zones de socle.

Les conclusions de ces informations ont conduit aux hypothèses suivantes pour le développement des scénarios :

- **Besoins en eau domestique.** Sur les prévisions de croissance démographique données dans certains pays et corroborées par les prévisions des Nations-Unies, une augmentation des besoins domestiques a été établie à partir du graphique suivant qui montre les coefficients multiplicateurs à appliquer aux prélèvements existants aux différents horizons de simulations. Dans ce graphique il a été pris en compte un accroissement des besoins par habitant en se basant sur l'hypothèse que les conditions de vie des populations vont s'améliorer et donc que les besoins en eau domestique vont croître.



(Source : UNDSA)

Figure 51 : Évolution de la population dans les états de l'OSS jusqu'en 2050

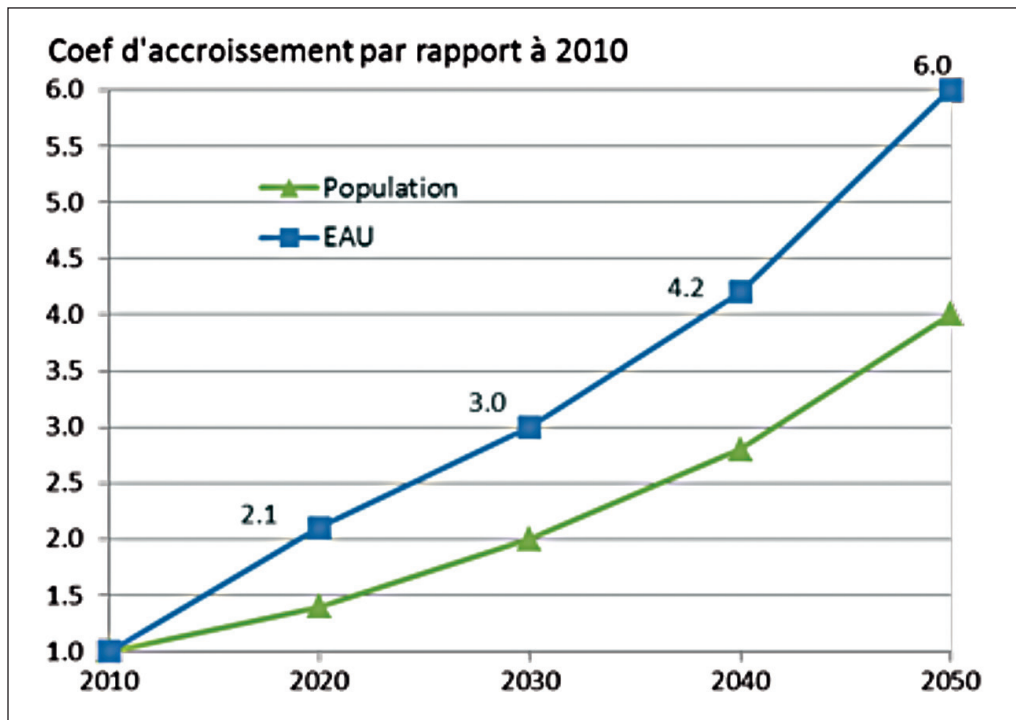


Figure 52 : Accroissement des besoins en eau potable en fonction de la croissance démographique 2010-2050

- **Besoins en eau pour l'irrigation** : les nappes superficielles ou perchées à extensions limitées n'ayant pas été prises en considération dans la réalisation de cette étude régionale, aucun prélèvement ne sera considéré pour subvenir aux besoins de l'irrigation, celle-ci prélevant ses besoins dans les eaux de surface.
- **Besoins en eau pour l'industrie** : les besoins pour l'industrie sont eux-aussi assurés, pour l'essentiel, par les eaux de surface. Pour les industries utilisant les eaux souterraines, le même coefficient d'augmentation des prélèvements a été appliqué que pour la consommation domestique. Ne possédant aucune information sur le développement industriel dans les zones du projet, aucune exploitation supplémentaire n'a été simulée sauf pour dans le fossé de Nara avec un prélèvement de 300 m³/h à partir de 2030 qui correspond aux besoins pour une exploitation pétrolière potentielle.

Définition des scénarios d'exploitation

L'exploitation du modèle pour simuler les effets des accroissements de prélèvements à l'horizon 2050 soumis à différentes contraintes climatiques, a été basée sur deux scénarios :

- Un **Scénario standard** avec les variations climatiques observées de 1960 à 2000 pour simuler le climat de 2010 à 2050.
- Un **Scénario pessimiste** pour simuler un climat avec un très fort déficit pluviométrique, en reproduisant la décade 1980-1990, dans laquelle on a substitué l'année 1985 pluvieuse par l'année 1883 qui est l'année la plus sèche des 50 dernières années. Pour accentuer les effets d'une sécheresse très sévère et continue dans le temps, cette décade ainsi reconstituée a été reproduite sur deux décades successives (années 2030 à 2050). Ce scénario extrêmement pessimiste n'est pas prédit par aucun des modèles de simulations sur les changements climatiques, mais un tel scénario devrait permettre de montrer l'importance des eaux

souterraines en tant que ressource abondante et assez bien protégée des variations climatiques, ce qui lui confère son rôle de buffer vis-à-vis des eaux de surface, et constituer ainsi une alternative de choix en cas de pénurie extrême.

Simulation 2050 standard

3.5.1.1. Recharge

Scénario standard: les calculs de la recharge pour les années 1960 à 2000 ont été dupliqués pour simuler les années 2010 à 2050 avec les correspondances suivantes :

Départ : juillet 1960 - juin 1970 = juillet 2010 - juin 2020

juillet 1970 - juin 1980 = juillet 2020 - juin 2030

juillet 1980 - juin 1990 = juillet 2030 - juin 2040

juillet 1990 - juin 2000 = juillet 2040 - juin 2050

3.5.1.2. Prélèvements

Les prélèvements initiaux sont ceux utilisés pour le calage du modèle en régime transitoire. Les données correspondent donc aux informations disponibles les plus récentes.

Ensuite, pour simuler l'accroissement des besoins liés à la croissance démographique, un coefficient multiplicatif a été affecté aux débits initiaux au début de chaque décennie. Les coefficients utilisés sont ceux présentés au début du § 2.5. Ainsi les prélèvements de 2020 seront multipliés par 2.1 entre 2020 et 2030, par 3 entre 2030 et 2040, par 4.2 entre 2040 et 2050.

3.5.1.3. Bilan et tendances

Pour chaque modèle, un état initial a été réalisé en simulant le comportement de l'aquifère entre 2010 et 2050 en fixant les prélèvements égaux aux prélèvements initiaux.

Le rabattement induit par l'augmentation des prélèvements est ensuite calculé.

Les cartes des trois figures suivantes présentent les résultats calculés au bout de 40 années de simulation (année 2050) pour les deux modèles.

• SAT

Le rabattement maximal calculé dans le SAT atteint 3,35 mètres dans le Dhar de Néma / Fossé de Nara.

On observe plusieurs zones où l'augmentation des prélèvements engendre des dépressions sensibles :

- en bordure de modèle, en Mauritanie, le débit introduit par maille passe de 2,04 L/s environ à 8,56 L/s (soit 30,81 m³/h) en fin de simulation. La présence d'une limite à flux nul sur la bordure ouest du modèle conjuguée favorise l'extension du cône de rabattement générée par les prélèvements. En remontant vers le nord, le rabattement s'atténue en raison de l'absence de prélèvements introduits dans ce secteur,
- en Algérie, on observe la formation d'une dépression centrée sur la ville de Bordj Badji Mokhtar. Le rabattement dans l'aquifère est d'environ 2 mètres,
- au Mali, de petites zones de dépressions correspondantes aux agglomérations s'alimentant via les eaux souterraines. Il s'agit notamment des agglomérations de Sikasso, Douentza, Goundam. Les rabattements calculés n'excèdent toutefois pas 2 mètres,

- dans les secteurs où la perméabilité introduite dans le modèle est plus faible (Plateau Dogon), la nappe est légèrement déprimée mais les rabattements sont limités à quelques décimètres.

Dans l'ensemble, les rabattements calculés restent faibles (inférieurs à 3,5 mètres).

• **SAI**

Dans la couche du Continental Terminal, les rabattements maximaux sont observés autour de la ville de Birni'N Konni à l'est.

L'influence des prélèvements situés au sud du 14^{ème} parallèle se ressent dans la zone centrale du CT où les rabattements sont de l'ordre de 2,5 mètres. L'extension de la zone centrale de dépression s'amenuise lorsque l'on remonte vers le nord où la multiplication des prélèvements, initialement moins importants qu'au sud du 14^{ème}, a moins d'impact.

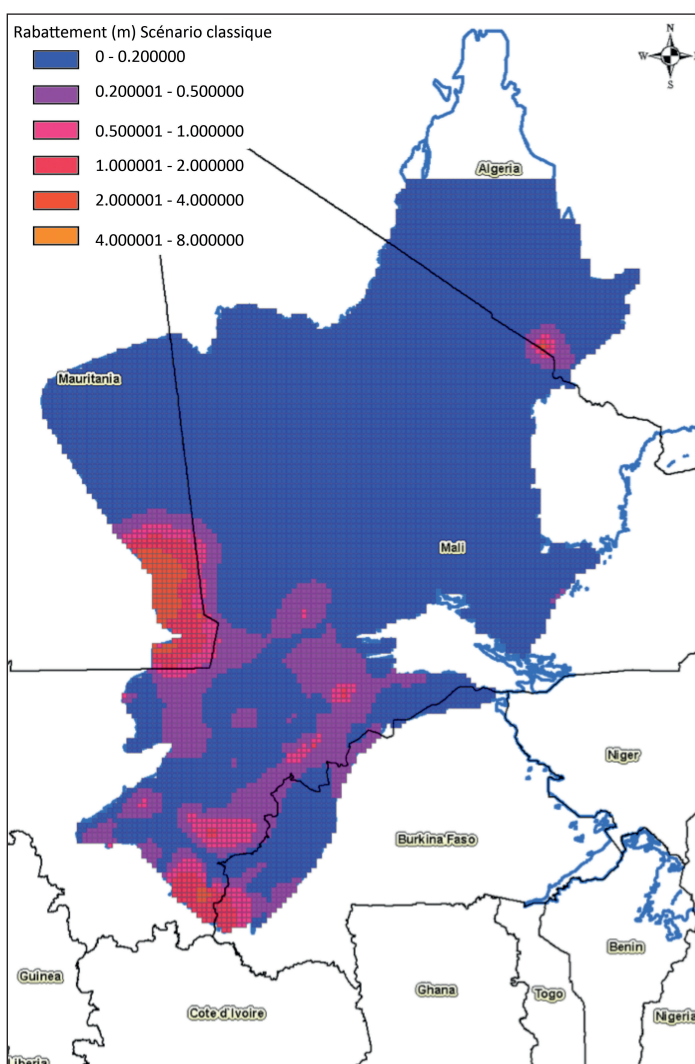
Vers le fleuve Niger, les rabattements simulés sont inférieurs à 2 mètres : l'impact est plus faible qu'en zone centrale en raison des plus fortes perméabilités introduites dans le modèle. Les cônes de rabattement y sont donc moins déprimés.

La présence de limites d'alimentation pour le système constituée par le fleuve Niger et la rivière Sokoto contribue en outre à atténuer légèrement les rabattements dans ce secteur : au bout de 40 ans, la contribution des mailles « river » passe de 17,6 m³/s à l'état initial à 18,81 m³/s avec le scénario classique.

À l'est de Niamey, on observe la formation d'une dépression qui atteint près de 7 mètres : elle est directement liée à la présence de la limite à flux en amont hydraulique de cette zone.

Dans le Ci, l'impact de l'augmentation des prélèvements est ressentie dans le secteur de la rivière Rima : les prélèvements au Niger ont fortement augmenté (car la zone est située au sud du 14^{ème} parallèle). À ceci s'ajoute l'effet de la faible perméabilité des mailles situées à la frontière Niger/Nigeria. ($3 \cdot 10^{-5}$ m/s). En remontant vers le Nord depuis ce secteur, les rabattements diminuent en raison des perméabilités plus fortes (5 à $8 \cdot 10^{-4}$ m/s), la zone d'influence des pompages s'élargit vers le Nord.

Figure 53 : Rabattements calculés dans le SAT en 2050 (Scénario classique)



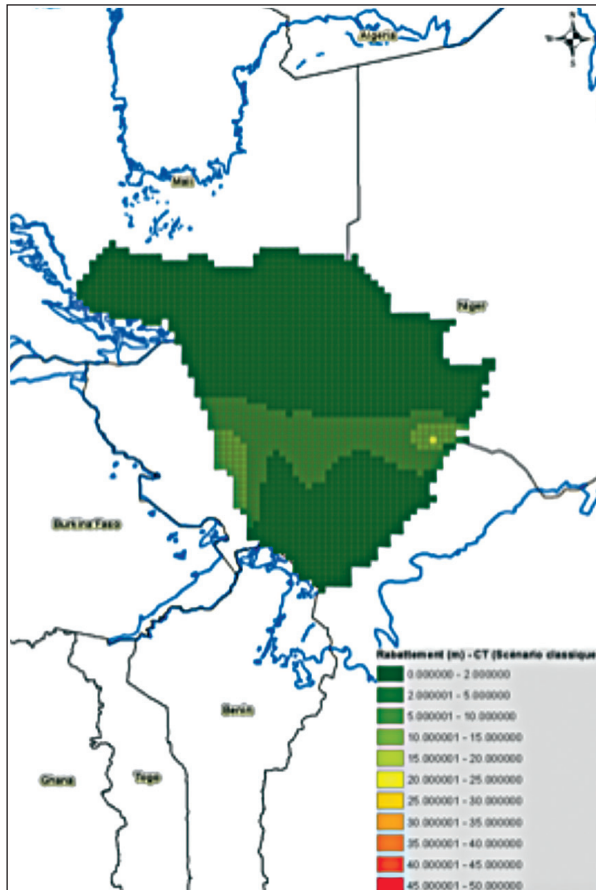


Figure 54 : Rabattements calculés dans le SAI (Continental Terminal) en 2050 (Scénario classique)

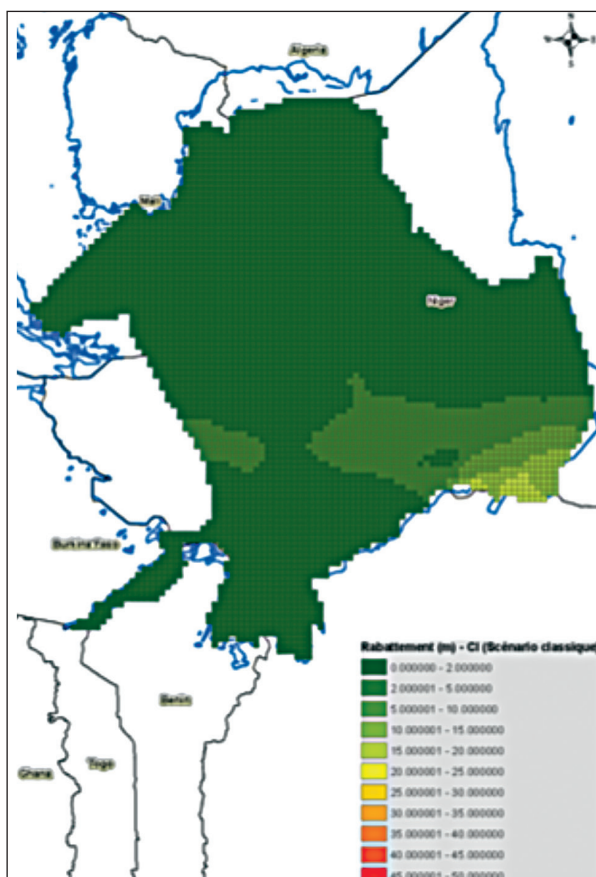


Figure 55 : Rabattements calculés dans le SAI (Continental intercalaire) en 2050 (Scénario classique)

De la même façon que pour le CT, on observe une bande déprimée dans la zone centrale du modèle lié aux forts prélèvements au sud du 14ème parallèle. À ceci s'ajoute vers l'ouest le passage en nappe captive du CI qui accentue l'extension de la zone d'influence.

En raison des faibles taux de prélèvement au Bénin et au Burkina Faso, l'impact de l'augmentation de la population ne génère que des rabattements inférieurs à 50 cm.

Simulation 2050 pessimiste

3.5.1.4. Recharge

Scénario pessimiste : les calculs de la recharge pour les années 1960 à 2000 ont été dupliqués pour simuler les années 2010 à 2050 avec les correspondances suivantes :

(2 décennies sèches : (1980-1990)*2 mais en substituant 1985 par 1983)

Départ : juillet 1960 - juin 1970 = juillet 2010 - juin 2020

juillet 1970 - juin 1980 = juillet 2020 - juin 2030

juillet 1980 - juin 1990* = juillet 2030 - juin 2040 * *1985 substituée par 1983*

juillet 1980 - juin 1990* = juillet 2040 - juin 2050 * *1985 substituée par 1983*

3.5.1.5. Prélèvements

Les prélèvements sont identiques à ceux du scénario standard.

3.5.1.6. Bilan et tendances

Avec le scénario pessimiste, la recharge moyenne introduite pendant la simulation de 40 ans dans les modèles passe de :

- SAT : 259 à 243 m³/s,
- SAI : 206 à 191 m³/s.

Les impacts simulés avec le scénario classique s'amplifient avec la diminution de la recharge : l'extension des zones d'influences des prélèvements augmente.

Dans le SAT, seules les zones désertiques ne sont pas impactées. Le rabattement calculé dans les mailles à potentiel imposé ou Niger est négligeable : le débit d'alimentation de la nappe par le Fleuve Niger passe de 63,97 (État Initial) à 65,26 m³/s avec le scénario pessimiste.

Des constats similaires peuvent être effectués dans le SAI : le débit d'alimentation du système aquifère par les rivières passe de 17,6 (État Initial) à 19,8 m³/s.

Les zones les plus impactées sont celles situées sous le 14ème parallèle et dans la zone de la rivière Rima. Dans certains secteurs proches de limites à flux nul (Niamey, zones périphériques du CI libre, etc.) les rabattements simulés peuvent atteindre 5 à 10 mètres en raison de l'absence d'alimentation en amont hydraulique.

Dans la zone centrale, les rabattements simulés sont proches de 5 mètres.

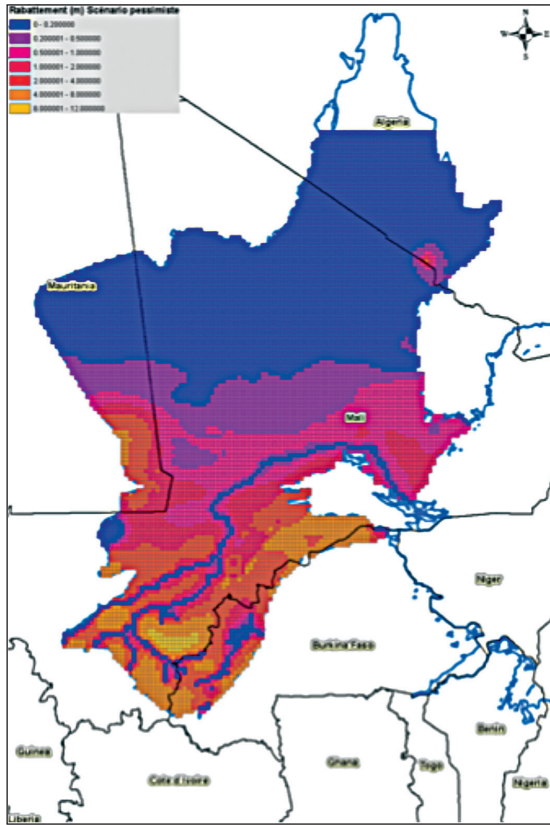


Figure 56 : Rabattements calculés dans le SAT en 2050 (Scénario pessimiste)

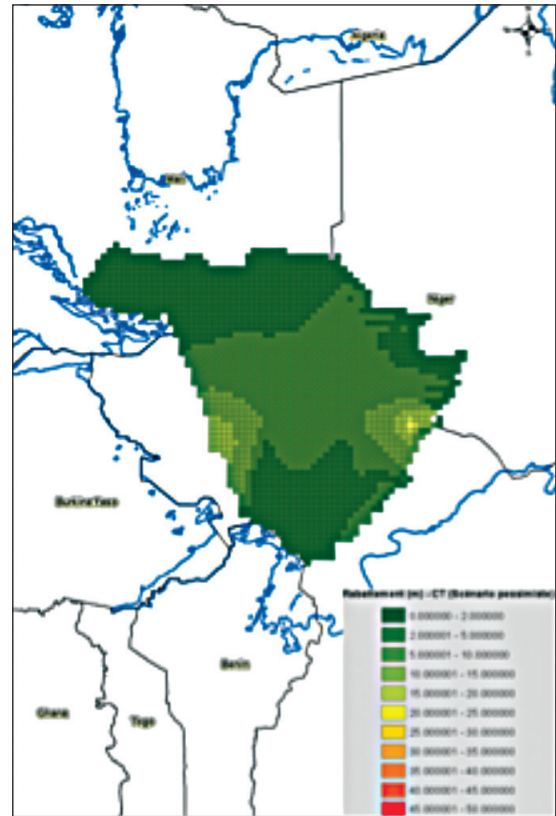


Figure 57 : Rabattements calculés dans le SAI (Continental Terminal) en 2050 (Scénario pessimiste)

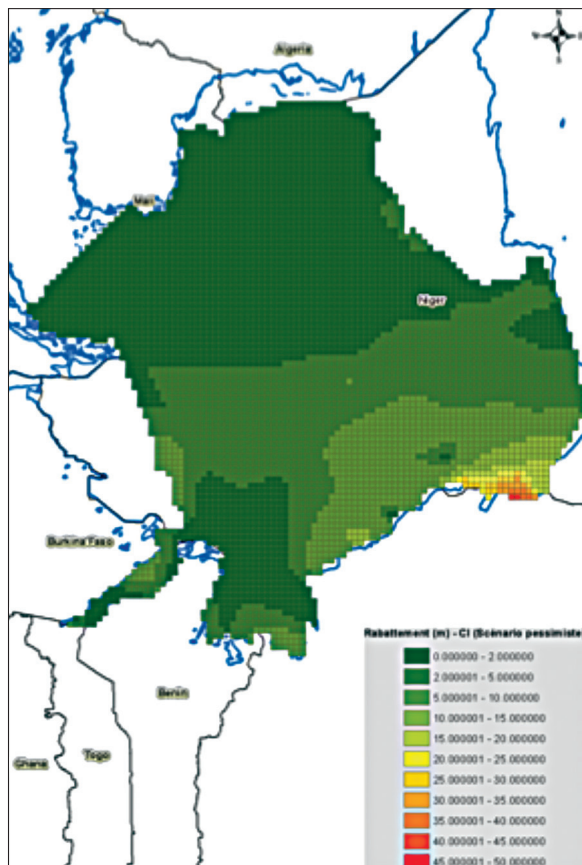


Figure 58 : Rabattements calculés dans le SAI (Continental intercalaire) en 2050 (Scénario pessimiste)

Les charges hydrauliques simulées par les différents scénarios sont comparées sur les graphiques suivants.

Dans la maille où a été introduite le pompage lié à l'industrie pétrolière dans le Fossé de Nara, la baisse de niveau simulée avec le scénario classique est de l'ordre de 1,5 mètre. Elle atteint 2 mètres environ avec le scénario classique (Figure 59). La baisse s'amorce à partir de 2030 où est simulé le début de l'exploitation. Au début des années 2040, on observe un léger décrochement vers le haut de quelques décimètres avec le scénario pessimiste, ceci étant lié à une recharge plus forte dans cette zone pendant les années 1980-1981 appliqué pour les années 2040-2041. Il se produit ensuite une baisse du niveau lié à la recharge 1983 (année très déficitaire) appliquée deux fois en 2043 et 2045. *In fine*, en 2050 les deux courbes présentent un différentiel de 50 cm de charge environ.

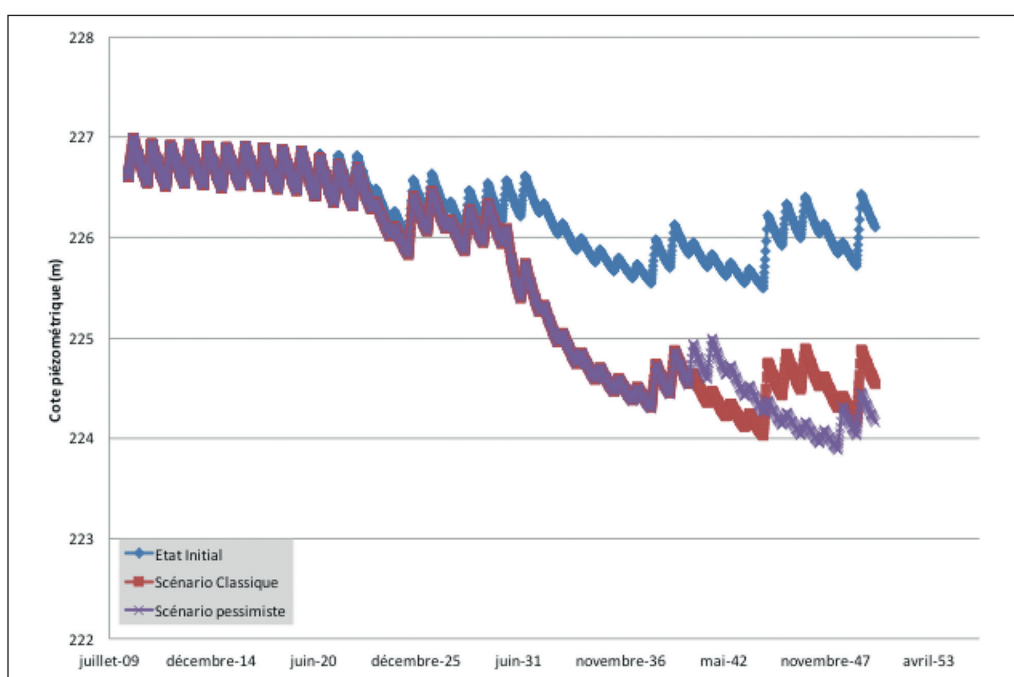


Figure 59 : Charges hydrauliques simulées dans la maille de l'exploitation pétrolière dans le fossé de Nara

Un autre exemple de variations des charges hydrauliques pour les deux scénarios est présenté sur la Figure 75 dans le secteur du Kourouma au Burkina Faso dans le SAT. La figure illustre ici l'influence de la baisse de la recharge (le prélèvement dans cette maille étant négligeable). La courbe représentant les variations de charge dans la maille pour le scénario pessimiste se décroche de la courbe «état initial» à partir de 2035, date à partir de laquelle les chroniques de recharge commencent à diverger.

In fine, un rabattement de l'ordre de 4 mètres est calculé en 2050.

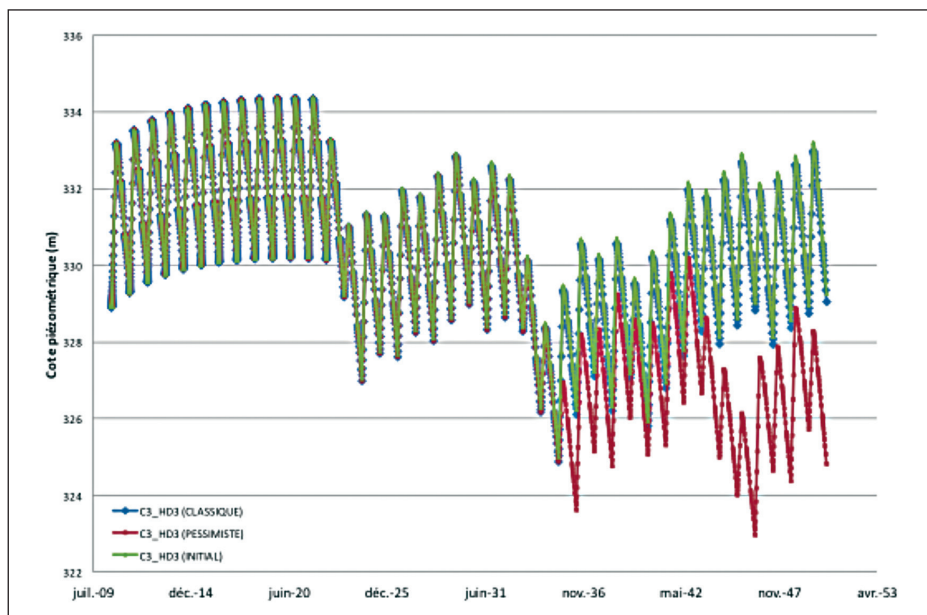


Figure 60 : Charges hydrauliques simulées dans la zone du Kourouma au Burkina Faso

Les deux figures suivantes illustrent les impacts des deux scénarios sur le SAI dans les dallols (point d'observation n° 3) et dans la maille de l'usine Malbaza au Niger.

À partir des années 2020, la courbe rouge (scénario classique) et la courbe verte (scénario pessimiste) se décrochent légèrement de la courbe bleue (état initial) en raison de l'introduction de la multiplication par 2,1 des prélèvements dans cette maille. *In fine*, la courbe rouge décroche au cours de la dernière décennie avec la répétition de la décennie 80 sèche.

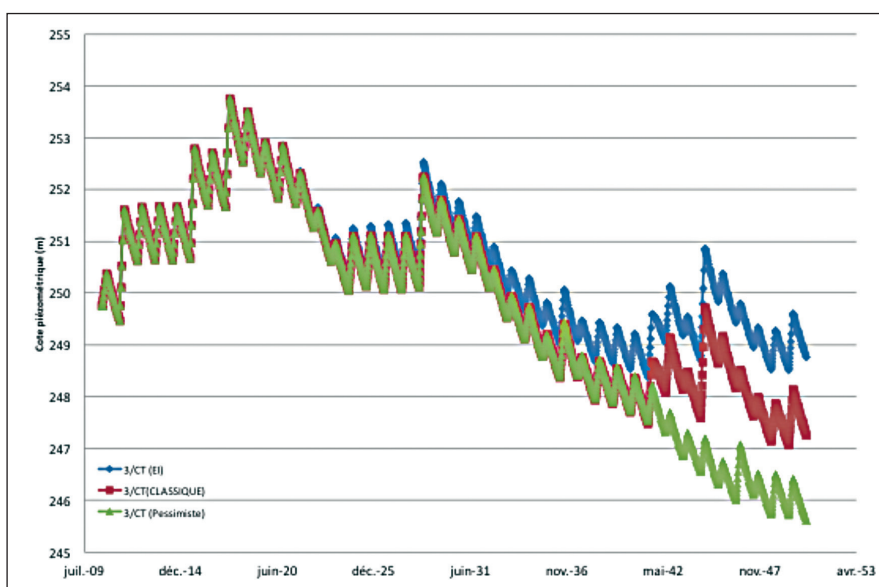


Figure 61 : Charges hydrauliques simulées au Niger dans les Dallols (CT)

La Figure 62 présente les différents résultats pour un point d'observation situé dans la maille de l'usine Malbaza où ont été estimés les prélèvements à 40 L/s en 2010 dans le Ci. Un prélèvement de l'ordre de 9 l/s, correspondant aux prélèvements diffus de la zone située sous le 14^{ème} parallèle est également appliqué dans la maille du CT.

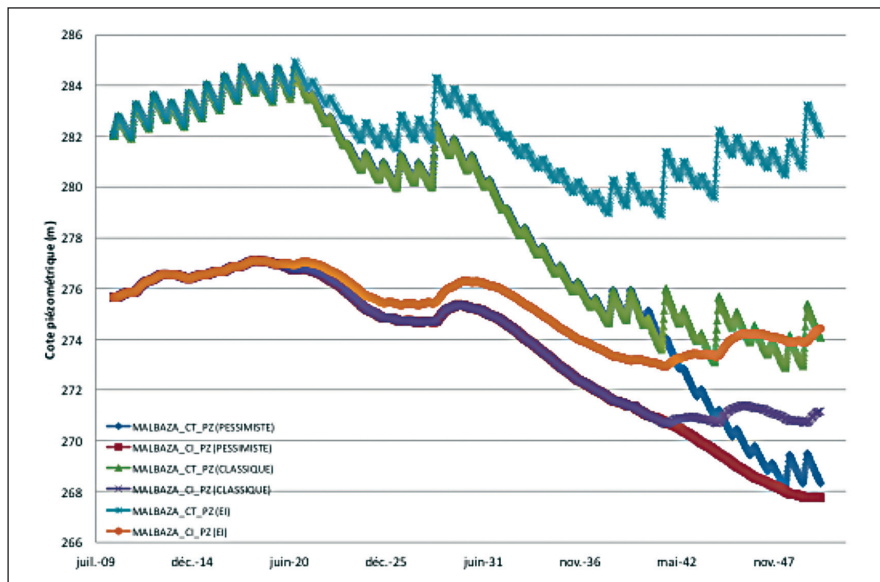


Figure 62 : Charges hydrauliques simulées au Niger dans la maille de l'usine de Malbaza au Niger

Les observations suivantes peuvent être faites :

- une légère baisse de la charge du CT à partir de 2020 (2 m de rabattement en 2030). La baisse s'accroît encore à partir de 2030 (5 mètres de rabattement environ en 2040). L'introduction de la décennie sèche fait baisser le niveau dans la maille de 6 mètres en 2050 par rapport au niveau en 2050 simulé par le scénario classique. En comparaison avec le niveau calculé à l'état initial, le rabattement pessimiste serait de 14 mètres dans la nappe du CT,
- un phénomène analogue se produit pour la nappe du Ci mais la baisse est moins spectaculaire (6 mètres par rapport à l'état initial en 2050). L'explication réside dans le fait que pour la nappe du CT, il y a additivité des rabattements dans le secteur lié aux prélèvements diffus dans le CT. Dans la nappe du CI, les autres points de prélèvements introduits dans le secteur sont plus éloignés (ville de Madahoua, dont le prélèvement a lieu 5 mailles à l'est).

3.5.2. Conclusion sur la modélisation

Les calculs réalisés dans le cadre de la présente étude ont pour vocation de tester la sensibilité des systèmes aquifères de Taoudéni et des Iullemeden à une sollicitation croissante sur la période de simulation avec une augmentation des besoins en eau sur la période.

Dans le SAT, l'impact de l'augmentation des besoins en eau telle que simulée reste faible dans le cas d'un scénario classique. Les rabattements calculés ne dépassent pas 3,5 mètres. Les

secteurs les plus sensibles sont situés près des zones qui exploitent déjà les eaux souterraines : agglomération de Sikasso, Douentza, Goundam au Mali, secteur de Bordj Badji Mokhtar en Algérie et Fossé de Nara / Dhar de Néma.

Une augmentation des besoins en eau couplée à une succession de deux décennies sèches viendrait accentuer l'extension des cônes de rabattements liés à l'exploitation de l'aquifère. Toutefois, les rabattements engendrés seraient inférieurs à 4 mètres sur la majeure partie du système aquifère. Quelques zones ponctuelles et notamment les secteurs proches des limites de l'aquifère seraient plus impactés (Fossé de Nara, Gondo). Les rabattements calculés dans ces secteurs seraient de l'ordre de la dizaine de mètres. Cette valeur est à comparer avec la puissance de l'aquifère, de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Le retour à des années de recharge moyenne voire fortes, permettrait une remontée des niveaux, toute chose étant égale par ailleurs.

Dans le SAI, les prélèvements initiaux introduits sont 4 fois plus élevés que ceux du SAT. Au sud du 14^e parallèle, l'aquifère est déjà sollicité. Une augmentation des prélèvements telle qu'introduite dans le modèle amplifierait les zones déjà sollicitées notamment dans la zone centrale entre le 12^e et le 14^e parallèle.

Les rabattements les plus importants calculés sont situés à la frontière nigéro-Nigériane dans une zone où les perméabilités introduites sont plus faibles d'un facteur 10.

Dans le cas d'un scénario de recharge classique, les rabattements calculés ne dépassent pas 2 mètres sur une large superficie du SAI. Comme pour le SAT, les zones les plus déprimées sont observées en bordure du modèle. Une succession de deux décennies de faible recharge, viendrait accentuer ces rabattements comme pour le SAT.

Ramenés à l'épaisseur totale du Système Aquifère, de plusieurs centaines de mètres, les rabattements calculés restent toutefois très faibles.

Le modèle régional élaboré a permis de dégager des zones qui méritent d'être mieux étudiées et qui doivent faire l'objet de modèles locaux. Ce modèle servira entre autres de conditions aux limites des modèles locaux qui seront développés plus tard lorsque les conditions le permettront. Les principales zones et pays concernés sont les suivantes :

- Le bassin de Tanezrouft (Algérie, Mali)
- Le bassin du Dahr de Néma (Mauritanie – Mali)
- Le graben de Gao (Burkina Faso – Mali – Niger)
- Le bassin de Kandi (Bénin – Niger)
- Le bassin de Sokoto (Niger – Nigeria)
- Les horizons aquifères CT1, CT2 et CT3 du synclinal Nord-Sud de Dogon Douchi (Niger).

4. VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES ET IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1. OBJECTIFS ET ENJEUX DE LA COMPOSANTE, ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Dans le cadre d'un processus visant la gestion intégrée des ressources en eau, la prise en compte de la variable climatique et de ses changements désormais avérés est incontournable afin d'établir des scénarios projetable dans le temps.

En ce qui concerne les territoires des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Niger, les principaux facteurs de vulnérabilité au changement climatique sont :

- une pauvreté généralisée ;
- des écosystèmes fragilisés par des sécheresses cycliques et une forte pression démographique ;
- une très grande sensibilité des principaux secteurs économiques (agriculture et élevage) aux aléas du climat ;
- un faible niveau d'infrastructures et d'institutions spécialisées (infrastructures sanitaires, barrages, laboratoires spécialisés).

4.1.1. Vulnérabilité, résilience, stabilité et risque – définition générique

Dans le domaine des risques naturels, la vulnérabilité signifie : «le degré auquel une unité à risque est susceptible de pâtir de l'exposition à une perturbation ou à une contrainte, et la capacité (ou l'impossibilité) de l'unité à risque de faire face, de s'en sortir ou de s'adapter de manière fondamentale (en devenant un nouveau système ou en disparaissant)» (Kasperson et al., 2000). La littérature technique sur les catastrophes utilise le terme dans le sens de «degré de perte (0 à 100) résultant d'un phénomène potentiellement néfaste (glossaire UNOCHA -Coordination des affaires humanitaires des Nations Unies)».

En revanche, la littérature sur la pauvreté et le développement mettent l'accent sur les conditions sociales, économiques et politiques actuelles: Mesure globale du bien-être humain qui intègre l'exposition d'ordre environnemental, social, économique et politique à un éventail de phénomènes néfastes (Bohle et al., 1994).

La vulnérabilité peut être considérée comme une fonction des risques, des dangers, de l'exposition et des options et réponses d'adaptation.

La **résilience écologique** est le degré selon lequel des perturbations peuvent être absorbées par un système avant qu'il passe d'un état à un autre.

La **stabilité** est l'autre concept associé, définie comme la tendance d'un système à retourner à une position d'équilibre après une perturbation (Ludwig et al., 2002).

Vulnérabilité, résilience et stabilité peuvent ainsi être considérés comme les deux faces d'une même pièce.

Notion de risque : Dans la littérature commune, le risque doit d'abord se prononcer vis-à-vis d'un enjeu (perte ou gain d'un élément suivant le phénomène étudié). Le risque résulte donc d'une approche croisée entre un aléa (événement climatique par exemple) et un enjeu

(baisse du niveau des nappes, pollution etc...). Un aléa important dans un secteur sans enjeu ne présente alors pas de risque.

Résumé dans l'approche qui sera menée le risque peut être exprimé de la manière suivante :

$$\text{Risque} = \text{Pression (Alea)} \times \text{Vulnérabilité}$$

4.1.2. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines

Deux enjeux ont été envisagés dans le cadre du travail mené:

- Enjeu : Baisse du niveau des eaux souterraines lié au changement climatique,
- Enjeu : Pollution organique et bactérienne des eaux souterraines par la pression anthropique.

L'approche retenue pour évaluer les secteurs à enjeu les plus importants repose sur la méthodologie SIRIS.

La **méthodologie SIRIS** (*Système d'Intégration des Risques par Interaction des Scores*) est une méthode mathématique combinatoire de facteurs (critères) de risque, dite «hiérarchique de rang». Cette méthode est le fruit d'un travail entamé dans les années 1980 [Jouany, 1983], et c'est en 1995 qu'elle a donné lieu à son application la plus connue : les classements des pesticides susceptibles d'être présent dans les milieux aquatiques [Vaillant et al., 1995].

L'idée générale des méthodes hiérarchiques est d'établir un système d'inéquation entre les critères et leurs modalités, plutôt qu'un système d'équation [Aurousseau, 2003]. Ainsi sur la base d'un exemple à 3 critères de 3 modalités chacun («o» : non défavorable ; «m» : moyennement défavorable ; «d» : défavorable) :

Critère 1	>	Critère 2	>	Critère 3
o	=	o	=	o
^		^		^
m	>	m	>	m
^		^		^
d	>	d	>	d

Si en postulat de base, on considère les critères dans l'ordre d'importance suivant : Critère 1 > Critère 2 > Critère 3, alors la pénalité associée à la modalité défavorable du critère 1 est supérieure à celle de la modalité défavorable du critère 2, elle-même supérieure à celle du critère 3. Pour un même critère, la pénalité associée à la modalité défavorable doit évidemment être supérieure à la pénalité de la modalité intermédiaire, elle-même supérieure à la pénalité de la modalité non défavorable. Enfin, la pénalité associée à la modalité non défavorable est nulle, et ce quel que soit le critère.

Il n'y a donc, sur cette base, pas lieu de préciser le niveau exact de contribution (le poids) de chacun des critères, puisqu'il repose sur un système d'inégalité découlant de la hiérarchisation des critères.

4.1.3. Enjeu : Baisse du niveau piézométrique liée aux variations climatiques

Définition des hypothèses de base :

L'aléa «changement climatique» (Précipitation et évapotranspiration) présente une tendance similaire sur l'ensemble de la zone d'étude. Dès lors que cette condition est posée, seule

la vulnérabilité est retenue comme approche, celle-ci se confondant avec le risque du fait notamment d'un Aléa homogène sur l'ensemble du territoire.

Seule la vulnérabilité des eaux souterraines aux changements climatiques sont pris en compte dans l'approche, les eaux de surface ne sont pas intégrées dans la démarche.

Les secteurs vulnérables peuvent être définis comme : «**les secteurs ou la baisse du niveau de la nappe peut se faire de manière rapide et importante aux vues des conditions climatiques extérieures**».

Variables prise en compte et degré d'importance

Quatre grands axes ont été utilisés dans la définition de la vulnérabilité des eaux souterraines

- La proximité de la nappe avec la surface – 1^{er} degré d'importance
- La sensibilité de la nappe aux variations climatiques – 2nd degré d'importance
- La proximité d'un écoulement pérenne – 3^{ème} degré d'importance
- Les facteurs d'environnement limitant ou facilitant la recharge de la nappe localement – 4^{ème} degré d'importance

Proximité de la nappe avec la surface

L'hypothèse posée repose sur le fait que plus une nappe est proche de la surface, plus celle-ci est soumise aux conditions extérieures de variations des précipitations et d'évapotranspiration. En effet les nappes profondes restent, de ce point de vue, moins sensibles à ces effets, du fait notamment d'un temps long d'infiltration.

Classe de profondeur	Modalités de pénalité SIRIS
0 -1,5 m	Très défavorable (d)
1,5 à 3 m	Défavorable (s)
3 à 10 m	Moyennement favorable (m)
10 à 30 m	Favorable (e)
Plus de 30 m	Très favorable (o)
Artésien	Très favorable (o)

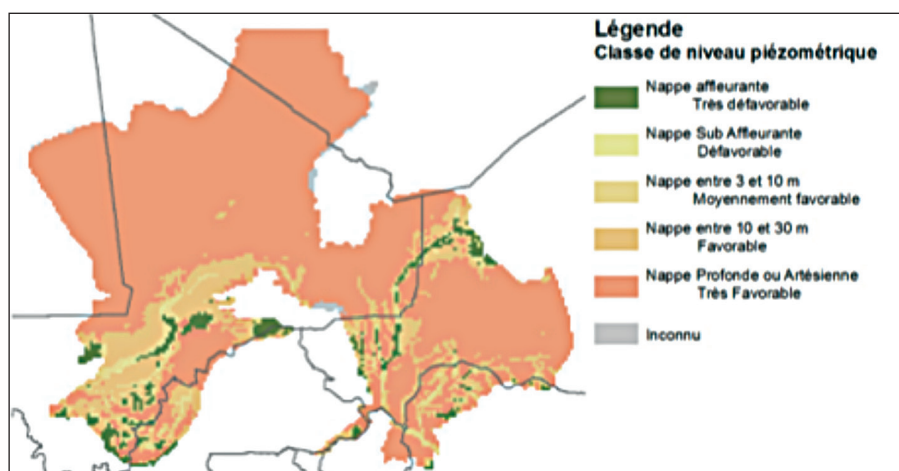


Figure 63 : Cartographie simplifiée du niveau de la nappe

Sensibilité de la nappe à la recharge :

La sensibilité de la nappe à la recharge a été définie sur la base des modélisations de la recharge effectuées entre 1960 & 2010. L'amplitude maximum a été dégagée puis ré-exprimée en pourcentage par rapport au maximum. De cette manière, les secteurs pour lesquels la recharge varie plus ou moins fortement en fonctions des conditions météorologiques ont été mis en évidence. Dans notre approche même une variation faible dans l'absolu peut révéler une sensibilité importante dans le sens où cette variation représente une part importante de la recharge absolue.

Classe d'amplitude de la recharge	Modalités de pénalité SIRIS
90 à 100%	Très défavorable (d)
75 à 90%	Défavorable (s)
50 à 75%	Moyennement favorable (m)
30 à 50%	Favorable (e)
0 à 30%	Très favorable (o)

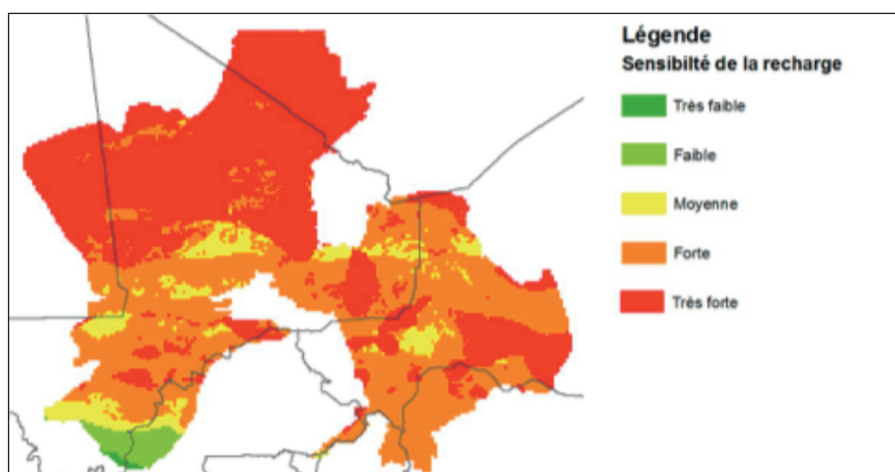


Figure 64 : Cartographie de la sensibilité à la recharge

Présence d'un cours d'eau pérenne

La présence d'un cours d'eau pérenne a été conservée comme facteur d'une limitation de la baisse du niveau piézométrique considérant une réalimentation de la nappe par le cours d'eau dans ces secteurs spécifiques. Ceci concerne le cours d'eau du Bani et le fleuve Niger sur l'ensemble de la zone d'étude

Classe de cours pérenne	Modalités de pénalité SIRIS
Présence	Favorable (o)
Absence	Défavorable (d)

Paramètres d'environnement : le type de sol

Le type de sol a été intégré comme un facteur localement pénalisant en cas de présence de sol à dominante argileuse. Les données utilisées ont été les données issues de la carte des sols de la FAO reclassées par leur teneur en argile, en limon et en sable.

Classe de sol	Modalités de pénalité SIRIS
Eau Libre & Sol dominante sableuse	Favorable (o)
Sol dominant limoneux	Moyennement favorable (m)
Sol dominant Argileux & roche nue	Défavorable (d)

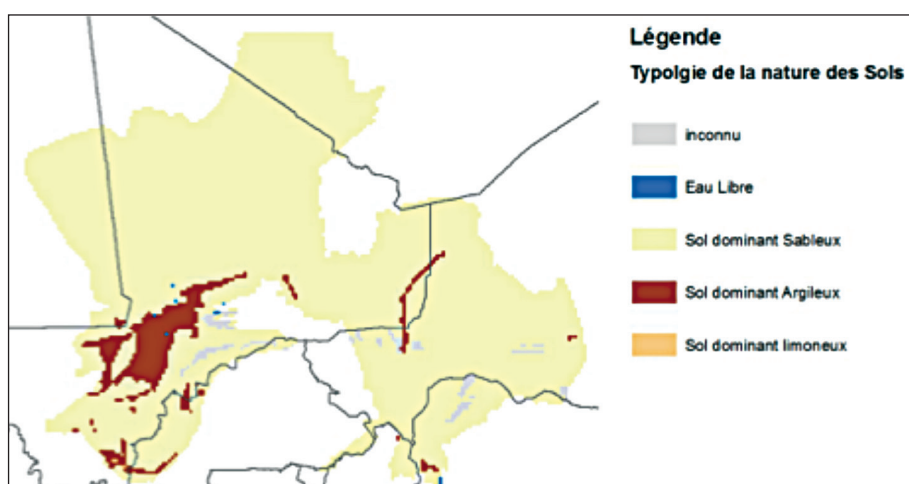


Figure 65 : Cartographie de la typologie de la nature des sols

Paramètres d'environnement : L'indice topographique de Beven Kirkby

L'indice topographique de Beven Kirkby est un indice d'estimation des sols potentiellement saturés en eau (sols hydromorphes). Il représente la capacité d'un point à accumuler de l'eau en fonction de la quantité d'eau qui s'y déverse et qui s'en échappe. Un indice élevé correspond à une forte probabilité de présence de zones humides. Cet indice a été considéré comme un facteur localement atténuant du phénomène de baisse des niveaux piézométrique considérant que sur les endroits favorables l'infiltration et donc la recharge pouvait être facilité.

Classe d'indice Beven Kirkby	Modalités de pénalité SIRIS
Moins de 5	Très défavorable (d)
5 à 6,5	Défavorable (s)
6,5 à 7	Moyennement favorable (m)
7 à 10	Favorable (e)
Plus de 10	Très favorable (o)

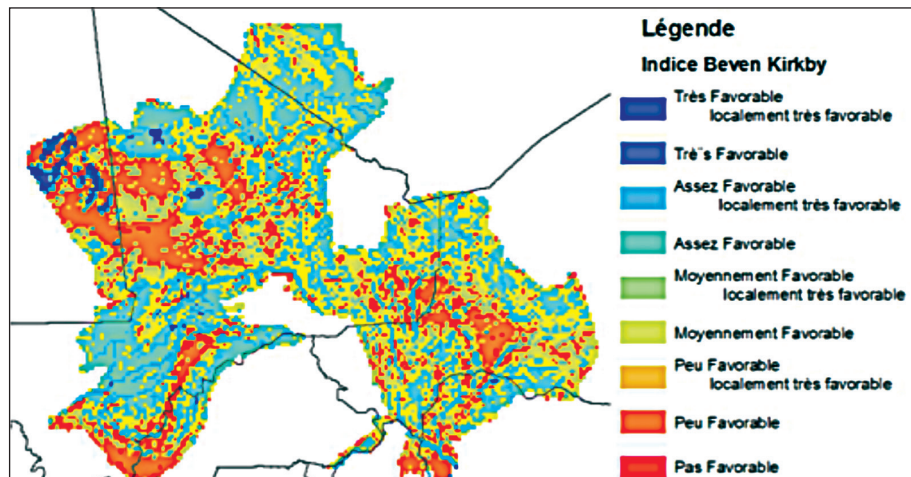


Figure 66 : Cartographie de l'indice de Beven Kirkby

Paramètres d'environnement : La perméabilité

La perméabilité est considérée comme un facteur localement aggravant sur la recharge et donc la réalimentation de la nappe.

Classe de perméabilité	Modalités de pénalité SIRIS
Plus de 0,03 m/s = très perméable	Favorable (o)
De 0,00003 à 0,03 m/s = perméable	Moyennement favorable (m)
Moins de 0,00003 m/s = peu perméable	Défavorable (d)

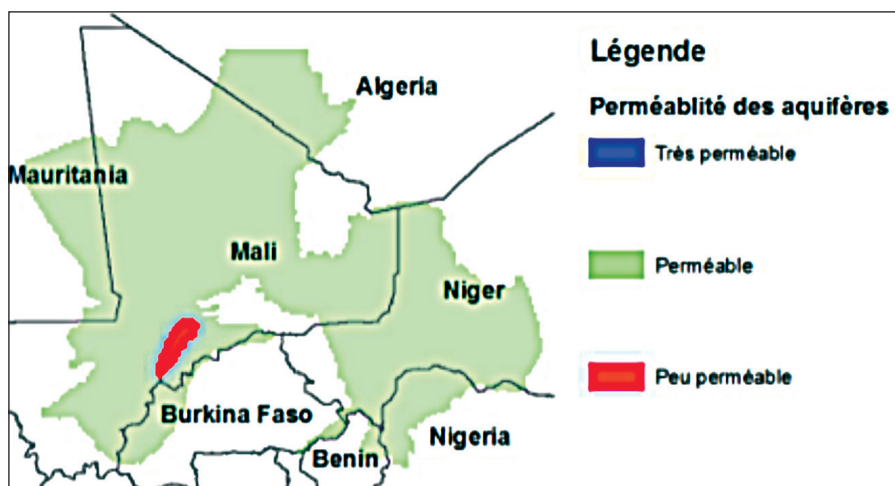


Figure 67 : Cartographie des classes de perméabilité

Paramètres d'environnement : La densité des puits

Une des hypothèses, certes déterministe, repose sur le fait que la densité de puits, reflète dans une certaine mesure, un degré d'accessibilité à l'eau en sub-surface. De plus la présence de ces puits reste un élément important de la demande en eau. Un stress climatique peut occasionner une intensification de la demande sur ces puits. Ce facteur intervient donc comme un facteur aggravant.

Classe de densité de puits	Modalités de pénalité SIRIS
Plus de 50 puits / 100 km ²	Très défavorable (d)
20 à 50 puits / 100 km ²	Défavorable (s)
10 à 20 puits / 100 km ²	Moyennement favorable (m)
5 à 10 puits / 100 km ²	Assez favorable (f)
1 à 5 puits / 100 km ²	Favorable (e)
Pas de puits	Très favorable (o)

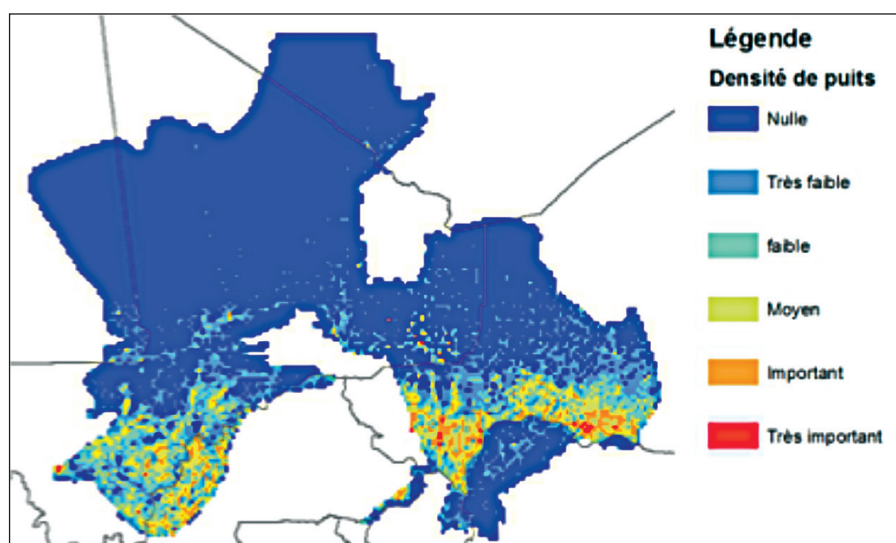


Figure 68 : Cartographie de la densité des puits et forages

Implémentation du modèle de Risque / Vulnérabilité aux changements climatiques

L'implémentation du modèle de Vulnérabilité du niveau des eaux souterraines donne une préférence importante à la zone Sud de l'étude ainsi qu'à la partie Est en termes de vulnérabilité. Ces zones sont celles où le risque de voir baisser les niveaux d'eau sont les plus « probables » et ce, dans un temps relativement court.

Le Sud Mali présente les zones où la nappe est le plus à l'affleurement, en lien direct avec le Fleuve Niger et le Bani. Cette zone présente donc une vulnérabilité, et donc un risque en cas de réduction des pluies efficaces. La demande en eau y est également importante. On peut supposer que la réduction des pluies, par lien de causalité, engendrera une demande en eau plus importante sur ces secteurs, aggravant un peu plus la baisse du niveau d'eau localement.

De la même manière, le secteur Est, au niveau des dallois principalement, reste un secteur vulnérable, du fait principalement d'une nappe affleurante ou sub-affleurante et de facteur limitant localement les aspects « recharge » (perméabilité & indice topographiques notamment).

D'un point de vue global, **plus de 80% du territoire de l'étude reste très peu à peu vulnérable** à la baisse des niveaux piézométriques. Le secteur Nord apparait assez « préservé » de cette vulnérabilité, les nappes étant profondes et le secteur peu peuplé. Un peu moins de 20% de la zone est soumise à une vulnérabilité plus ou moins accrue.

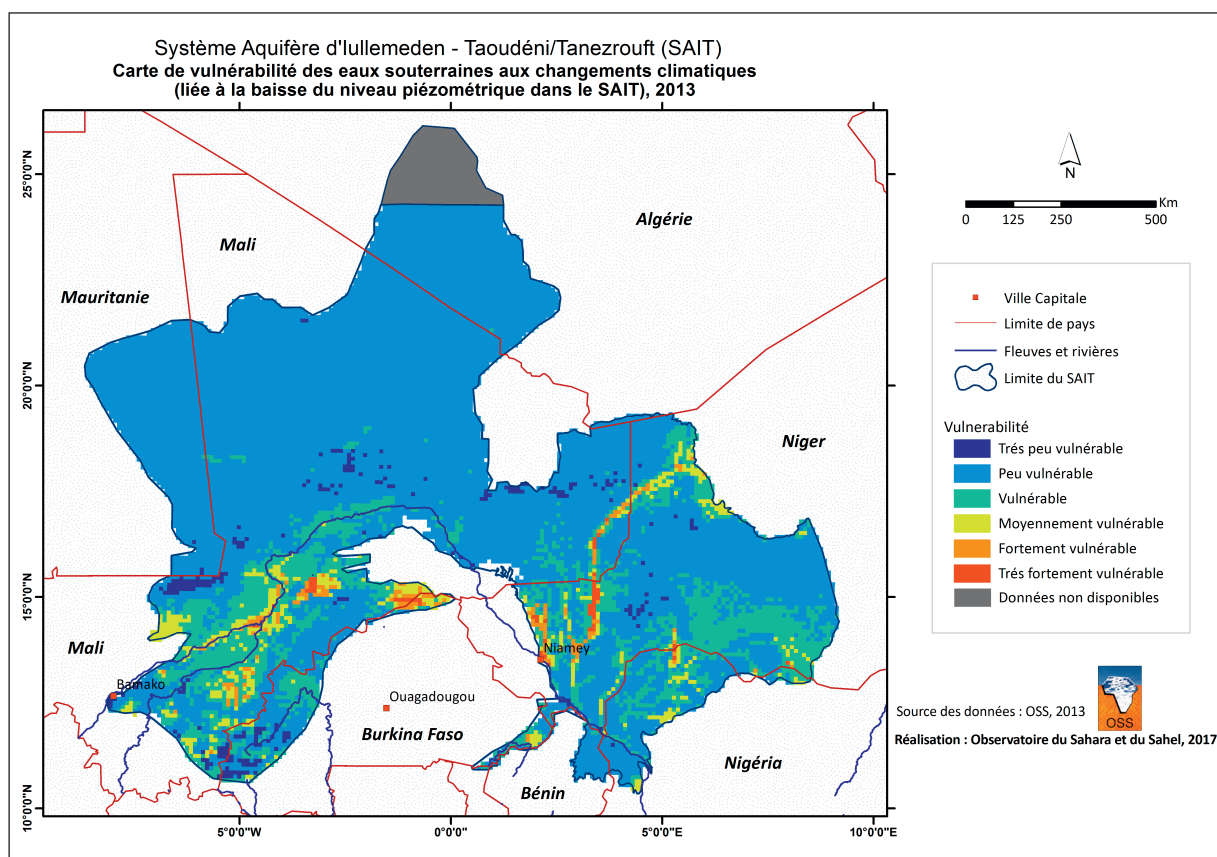
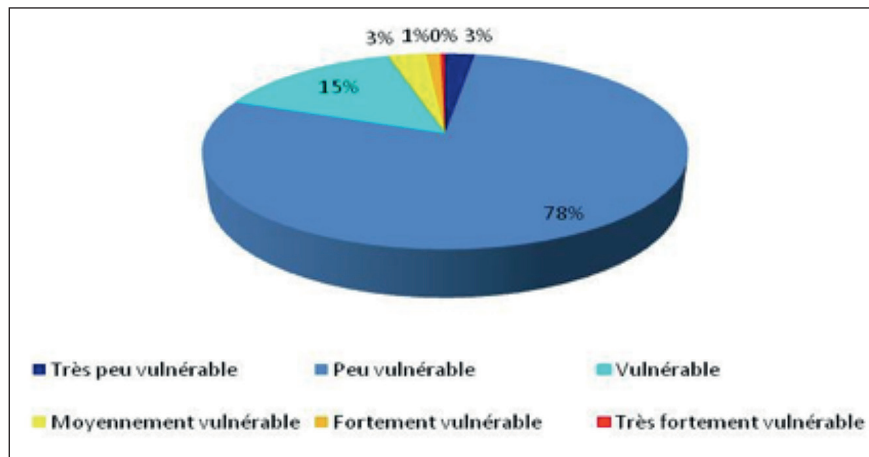


Figure 69 : Cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines

4.1.4. Enjeu : Pollution des eaux souterraines par la pression d'origine anthropique

Définition des hypothèses de base

La pollution des eaux souterraines, que ce soit en termes de pollution fécale ou organique, reste, de facto, très liée aux activités anthropiques. Néanmoins, les conditions de « lien » de ces pressions avec les eaux souterraines sont un facteur prépondérant dans la réalité d'expression du phénomène de pollution des eaux souterraines. Dans l'approche développée, les secteurs à la fois soumis à la pression une pressions anthropique (Pression) et présentant une forte vulnérabilité pour le transfert vers les eaux souterraines (Vulnérabilité) ont été identifiés. Le résultat de cette approche propose un résultat de type «Risque».

Variables prise en compte et degré d'importance

Quatre grands axes ont été utilisés dans la définition de la vulnérabilité des eaux souterraines.

- La pression anthropique – 1^{er} degré d'importance
- La proximité de la nappe avec la surface – 2nd degré d'importance
- L'importance de la recharge – 3^{ème} degré d'importance
- Les facteurs d'environnement aggravant localement la connexion avec les eaux souterraines – 4^{ème} degré d'importance

Cette hiérarchisation reste très proche de la hiérarchisation faite dans le modèle DRASTIC.

Pression anthropique : densité des puits

La densité de puits reflète, dans une certaine mesure, une donnée de population et donc à ce titre une pression importante. C'est aussi un facteur très important de risque de communication des activités de surface avec la nappe sous-jacente. Ce facteur intervient comme un des facteurs principal de la pression.

Classe de recharge	Modalités de pénalité SIRIS
Plus de 50 puits / 100 km ²	Très défavorable (d)
20 à 50 puits / 100 km ²	Défavorable (s)
10 à 20 puits / 100 km ²	Moyennement favorable (m)
5 à 10 puits / 100 km ²	Assez favorable (f)
1 à 5 puits / 100 km ²	Favorable (e)
Pas de puits	Très favorable (o)

Pression anthropique : densité de population

La densité de population reste la meilleure variable de traduction des pressions polluantes pouvant s'exercer sur la nappe. Une densité forte traduit intrinsèquement un risque important. Cette variable est donc également un facteur de très haute importance dans le risque. Les données utilisées sont celles de la FAO pour le recensement de population par analyse satellitale.

Classe de population	Modalités de pénalité SIRIS
Plus de 100 000 hab / 100 km ²	Très défavorable (d)
50 à 100 000 hab / 100 km ²	Défavorable (s)
10 à 50 000 hab / 100 km ²	Moyennement favorable (m)
1000 à 10 000 hab / 100 km ²	Assez favorable (f)
0 à 1000 hab / 100 km ²	Favorable (e)
Pas de population	Très favorable (o)

Proximité de la nappe avec la surface

L'hypothèse posée repose sur le fait que plus une nappe est proche de la surface, plus celle-ci est vulnérable du point de vue des activités anthropique de surface. En effet les nappes profondes restent, de ce point de vue, moins sensibles du fait notamment d'un temps long d'infiltration et donc d'un piégeage des polluants dans les premiers mètres sous la surface.

Classe de profondeur	Modalités de pénalité SIRIS
0 -1,5 m	Très défavorable (d)
1,5 à 3 m	Défavorable (s)
3 à 10 m	Moyennement favorable (m)
10 à 30 m	Favorable (e)
Plus de 30 m	Très favorable (o)
Artésien	Très favorable (o)

Facteur de recharge

Plus une recharge est importante, plus les risque de transfert vers les nappes est importante du fait notamment des effets plus importants du partage « ruissellement / infiltration ».

Classe de recharge	Modalités de pénalité SIRIS
0 à 6 mm	Très favorable (d)
6 à 20 mm	Favorable (s)
20 à 50 mm	Moyennement favorable (m)
50 à 100 mm	Défavorable (s)
Plus de 100 mm	Très défavorable (d)

Paramètres d'environnement : type de sol

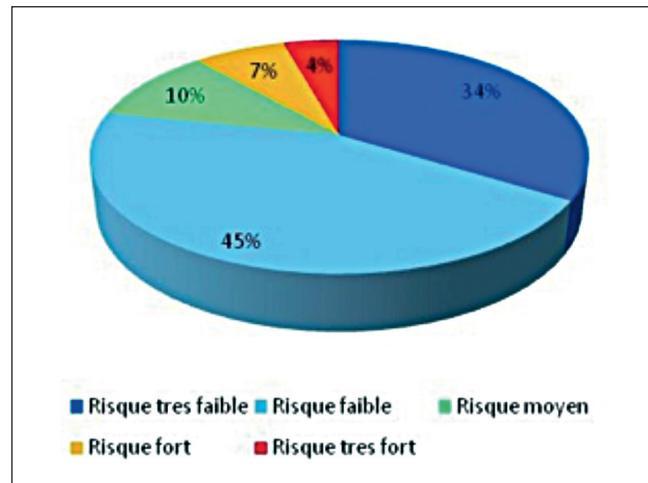
Le type de sol a été intégré comme un facteur localement pénalisant en cas de présence de sol à dominante sableuse. Les données utilisées ont été les données issues de la carte des sols de la FAO reclassées par leur teneur en argile, en limon et en sable.

Classe de sol	Modalités de pénalité SIRIS
Eau Libre & Sol dominante sableuse	Défavorable (d)
Sol dominant limoneux	Moyennement favorable (m)
Sol dominant Argileux & roche nue	Favorable (o)

Paramètres d'environnement : perméabilité (K)

La perméabilité est considérée comme un facteur localement aggravant de transfert de pollution considérant qu'une perméabilité élevée favorisait un transfert vers la nappe.

Classe de sol	Modalités de pénalité SIRIS
$K > 3.E-2 \text{ m}^2/\text{s}$ = très perméable	Défavorable (d)
$3.E-2 > K > \text{à } 3.E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ = perméable	Moyennement favorable (m)
$K < 3.E-5 \text{ m}^2/\text{s}$ = peu perméable	Favorable (o)



Présence d'un cours d'eau pérenne

La présence d'un cours d'eau pérenne a été conservée comme facteur aggravant de la communication des pollutions avec les eaux souterraines. Ceci concerne le cours d'eau du Bani et le fleuve Niger sur l'ensemble de la zone d'étude.

Classe de cours pérenne	Modalités de pénalité SIRIS
Présence	Défavorable (d)
Absence	Favorable (o)

Implémentation du modèle de Risque de pollution des eaux souterraines par les activités anthropiques

Les risques les plus importants se retrouvent naturellement dans les zones peuplées du Sud de la zone. Ces zones coïncident également avec une proximité de la nappe avec le sol et aux bords du Niger et du Bani, fortement peuplés. Le secteur du Nigeria, du fait du manque d'information concernant la densité des puits apparaît un peu sous-évalué du point de vue du risque. Néanmoins, cette zone peut être considérée comme une zone à risque du point de vue des pressions qui s'y exercent.

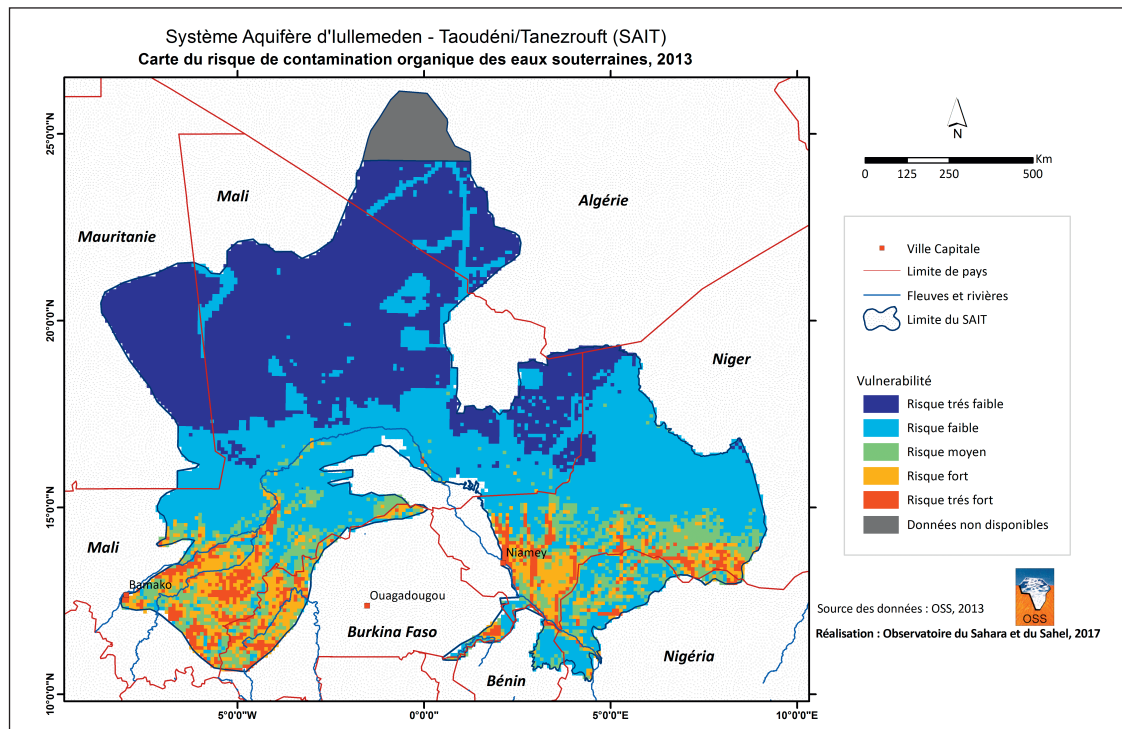


Figure 70 : Cartographie du risque de pollution des eaux souterraines par les activités anthropiques

4.2. INDICATEURS DE SUIVI-ÉVALUATION

** La démarche conceptuelle «DPSIR» relative à la réalisation de l'analyse des «pressions et impacts» et visant à décrire les interactions entre la société et l'environnement à l'aide d'indicateurs et de statistiques a été adoptée dans la présente étude. Cette démarche d'analyse des pressions et de leurs impacts associés permet au final de prioriser et de hiérarchiser la ou les actions à conduire (les réponses) en fonction des enjeux identifiés.

4.2.1. Indicateurs de forces motrice «D»

Les Forces Motrices (*Driving Forces*) regroupent les acteurs économiques et les activités associées, non nécessairement marchandes : agriculture, population, activités industrielles etc. Ces «forces motrices» représentent les causes fondamentales des pressions.

4.2.2. Indicateurs de pression «P»

Les Pressions (*Pressures*) sont la traduction des Forces Motrices (rejets, prélèvements d'eau, artificialisation des milieux aquatiques, captures de pêche ...) et à l'origine d'un changement d'état dans l'espace ou dans le temps.

4.2.3. Indicateurs d'état «S»

L'État (State) décrit les milieux : concentration de différentes variables pour la physico-chimie, peuplements piscicoles, niveaux piézométriques, etc..

4.2.4. Indicateurs d'impact «I»

Les Impacts (Impact) sont la conséquence des Pressions et des Réponses sur les milieux : augmentation des concentrations en phosphore, perte de la diversité biologique, baisse du niveau des eaux etc...

4.2.5. Indicateurs de réponse «R»

Les Réponses (Responses) sont les différentes actions correctrices entreprises, pouvant s'exercer sur l'une ou l'autre des entrées du modèle, que ce soit sur les pressions (ex : la mise en place de bandes enherbées pour éviter des transferts de pollutions, de stations d'épuration pour réduire les émissions de pollutions,...), ou sur les forces motrices (ex : gestion halieutique de la ressource, aménagement du territoire, ...).

4.3. DÉFINITION D'UN RÉSEAU DE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE RÉGIONAL

La définition d'un réseau de suivi piézométrique et d'un réseau de mesure de la qualité des eaux souterraines au niveau régional pour les systèmes aquifères des Iullemeden et du Taoudéni/Tanezrouft doit permettre l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des systèmes aquifères et fournir des indicateurs de gestion de la gestion des eaux souterraines nationales et transfrontalières. Le réseau de suivi piézométrique doit être également pensé en vue de l'optimisation de l'outil de modélisation mis en œuvre dans le cadre du projet GICRESAIT et des futurs modèles locaux mis en place.

La définition d'un réseau de suivi n'est pas une chose aussi simple qu'il y paraît et cela nécessite une étude spécifique à l'échelle des pays avec ensuite agrégation au niveau régional. Si, dans le cadre des plans d'action GIRE, de nombreux pays ont commencé à appréhender la question des réseaux de suivi, aucun d'entre eux n'a, à ce jour, un réseau, de suivi parfaitement défini et opérationnel. Le projet GICRESAIT n'a pas pour objectif de définir les réseaux de suivi qui restent l'apanage des pays, mais il peut, au regard des résultats acquis lors de la modélisation, donner des indications et des orientations sur la procédure à suivre, procédure qui devra faire l'objet d'un projet bien spécifique.

Pour définir un réseau de suivi au niveau régional, il est fondamental de prendre comme base les résultats de la modélisation de la présente étude comme première approche dans la stratégie de suivi, tout en gardant à l'esprit que le réseau régional devra s'appuyer essentiellement sur les réseaux nationaux.

Une étude préalable à la mise en œuvre d'un réseau régional de suivi piézométrique, doit répondre aux besoins suivants :

- Définir les objectifs de suivi (connaissance, relations nappe/rivière, recharge, vulnérabilité, surexploitation, risque de conflits d'usages et transfrontaliers);
- Définir les méthodes de suivi de la piézométrie (automatique, manuelle etc...);
- Définir la fréquence des mesures et les modes de collecte de l'information ;
- Définir le mode de remontée de l'information vers l'agence régionale chargée de la gestion des eaux souterraines ;
- Définir les modes de valorisation de l'information ;
- Définir les besoins matériels, humains et logiciel.

La définition d'un réseau passe par deux étapes principales.

Étape 1 : État des lieux des réseaux de suivi piézométriques nationaux.

La définition du réseau de suivi piézométrique régional se doit de s'appuyer sur un inventaire précis des piézomètres existants dans les pays. L'étude préalable doit donc reposer sur une visite dans les pays pour :

- Inventorier les stations de mesure actuellement fonctionnelles ;
- Collecter les chroniques piézométriques disponibles ;
- Choisir des sites à représentation régionale en fonction des objectifs de suivi ;
- Identifier les réhabilitations / aménagements nécessaires ;
- Identifier les lacunes en moyens matériel et humains à disposition ;
- Identifier les besoins en formations des structures en charge du suivi piézométrique.

Étape 2 : Synthèse des données, proposition d'un réseau et structures à mettre en place.

- Cartographier les stations retenues ou proposées pour un suivi piézométrique dans leur environnement hydrogéologique ;
- Établir des fiches descriptives des piézomètres avec leur environnement ;
- Inclure obligatoirement dans les informations sur les ouvrages leurs coupes lithologique et technique, ainsi que les tests de pompage, paramètres hydrodynamiques et qualité de l'eau ;
- Identifier et évaluer les structures nationales en charge de la collecte et du traitement de l'information ;
- Identifier la structure régionale qui sera chargée de la collecte des données nationales et de la diffusion des informations ;
- Évaluer le cout financier pour la mise en œuvre du réseau régional.

4.4. STRATÉGIE POUR UNE GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES EN EAU

Cette partie spécifique vise à actualiser pas à pas le système de données à disposition pour la caractérisation des situations aux différents termes prospectifs. Elle prend en compte les possibilités de limitation des gaspillages d'eau au niveau :

- **des usages domestiques** (par la promotion en faveur de technologies et de pratiques plus économes en eau et par sensibilisation des usagers),
- **des usages agricoles** avec une promotion auprès des irrigants de pratiques moins consommatrices,
- **des usages industriels et miniers.**

Les conséquences de cette augmentation très rapide de la population seront extrêmement importantes sur les eaux souterraines, que ce soit sur le plan des ressources pour l'eau potable, l'irrigation et l'industrie, que sur le plan de l'environnement avec les rejets industriels, et les problématiques d'assainissement ou de gestion des déchets.

Qu'est-ce que la GIRE ?

C'est un processus «qui favorise le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux » au niveau du bassin fluvial ou lacustre et de l'aquifère (GWP TAC 2000).

La GIRE s'inscrit dans une volonté politique et un système de gestion par bassin ou par aquifère. Le cadre pour la gestion de l'eau s'inscrit alors sur 3 axes :

Un environnement favorable	Des institutions	Des mécanismes de gestion
<p>Lois et politiques</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Cadre de gestion des ressources en eau d'un pays ou entre pays <p>Dialogues entre usagers de l'eau</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dialogues trans-sectoriels et amont-aval ■ Comités de bassin <p>Budgets</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Agences de financement et investissement <p>Coopération</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Au sein des bassins fluviaux transfrontaliers 	<p>Rôles et responsabilités</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Organismes de bassin et autres organisations du secteur de l'eau à différents niveaux des niveaux des secteurs public, non gouvernemental et privé ■ Mécanismes efficaces de coordination ■ Processus de planification ■ Financement 	<p>Mécanismes de gestion pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ évaluer les ressources en eau (disponibilité, qualité et besoins) ■ mettre en place des systèmes de communication et d'information ■ résoudre les conflits liés à l'allocation de l'eau ■ établir une réglementation ■ préciser les modalités financières ■ établir l'autorégulation (actions volontaires) ■ mener des recherches réaliser des travaux d'aménagement ■ garantir l'obligation de rendre compte ■ renforcer les capacités organisationnelles ■ coordonner les acteurs

Figure 71 : Les trois axes de la gestion de l'eau

Définition et écriture d'un plan d'action stratégique

La base de l'organisation d'une gestion intégrée des ressources en eau consiste en la définition et l'écriture d'un plan d'action stratégique sur une perspective à long terme actualisable tous les 5 ans, comparable à un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Ce document s'appuie prioritairement sur les indicateurs de gestion (Type DPSIR – indicateurs techniques) et KPI (Key Performance Index – indicateurs de performance) et se doit de proposer une véritable perspective en termes d'aménagement et de gestion. Il doit s'inscrire comme un projet de territoire (zone d'action ou d'intervention) qui a vocation à se

poursuivre dans le temps et qui doit apprendre de ses propres actions au fur et à mesure du temps.

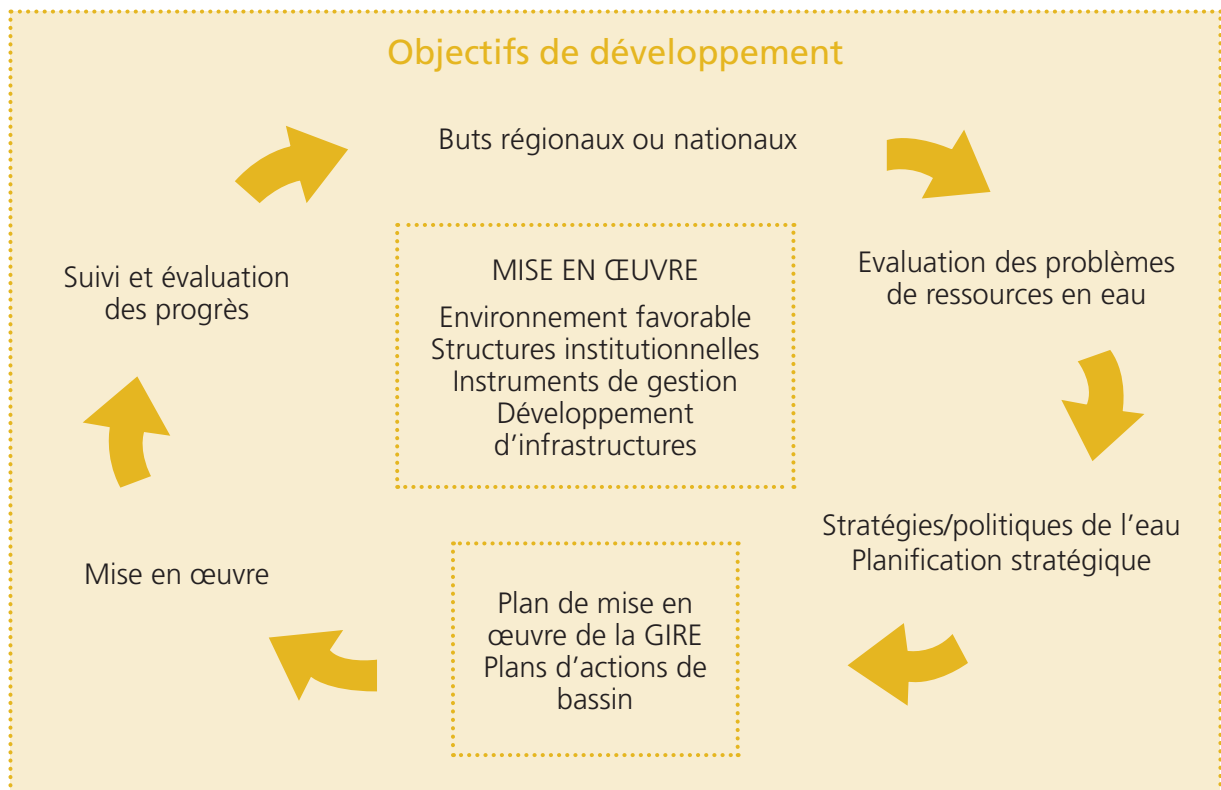


Figure 72 : Insertion d'un plan d'action stratégique dans le processus de planification

Les points clés de la planification stratégique sont les suivants :

- **Définition des objectifs à long terme** pour la gestion des aquifères ;
- **Identifier les problèmes, les priorités, les actions** (gestion) ; les couts et bénéfices et évaluer les risques ;
- **Mettre en lien les actions à mener au niveau des zones d'action** aux objectifs de développement, aux politiques et aux processus de planification régionaux et nationaux ;
- **Être flexible** de façon à pouvoir s'adapter immédiatement aux nouvelles informations disponibles et à l'évolution des circonstances.

L'identification des priorités et des actions ne doit pas être envisagée uniquement en termes de limitation mais bien d'extension et de développement. Ce plan d'action stratégique est réfléchi et coordonné à l'échelle du comité consultatif et technique dédié aux eaux souterraines.

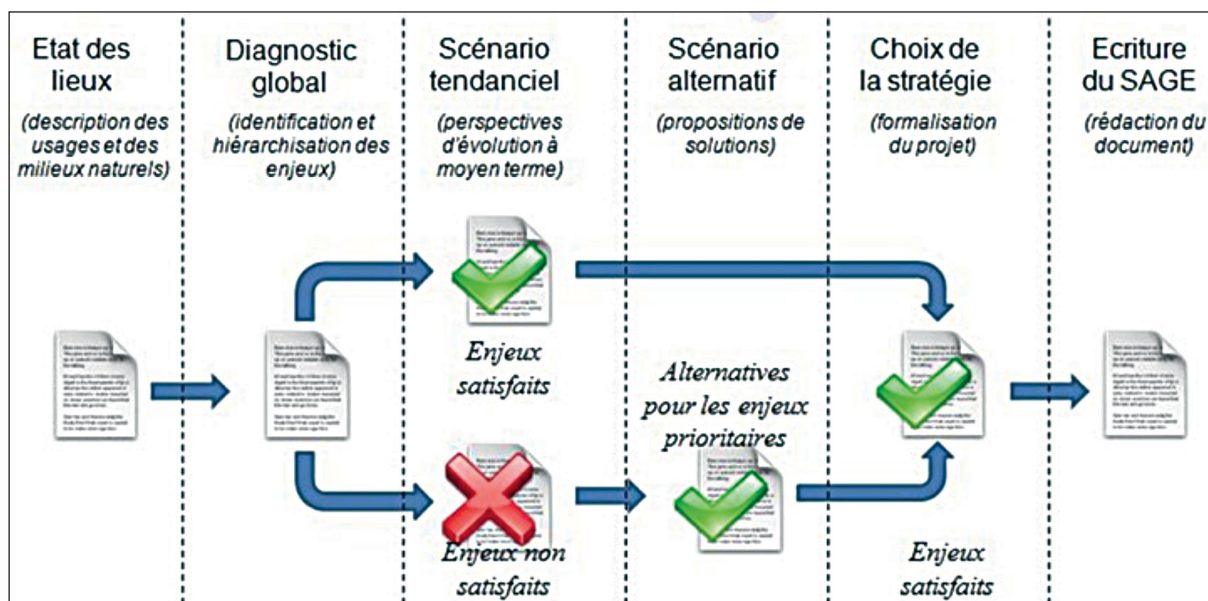


Figure 73 : Phase de mise en œuvre d'un plan d'action stratégique

Développement et partage d'un tableau de bord des indicateurs pertinents

La mise en œuvre, l'implémentation et la diffusion d'un tableau de bord des indicateurs pertinents pour les zones d'intervention (territoire) est une condition fondamentale de la transparence qu'exige la gestion intégrée des ressources en eau. Ce tableau de bord, à destination du public, des experts, des gestionnaires et des décideurs constitue un atout important dans le développement de la GIRE.

Établissement d'un comité consultatif et technique dédié aux eaux souterraines à l'échelle de l'OSS

L'établissement d'un comité consultatif et technique à l'échelle de l'OSS et dédié aux eaux souterraines est un point important. Ce comité doit être l'organisme en responsabilité d'écrire et d'orienter les actions fondamentales identifiées dans le plan d'action stratégique. Afin de garantir un niveau de concertation important, ce comité doit intégrer en son sein :

- Des représentants des États membres afin de garantir une vision politique partagée,
- Des représentants de la société civile afin de garantir la transparence et d'associer la société civile dans la démarche de concertation,
- Des représentants du monde de la recherche afin de garantir un constat crédible de la situation de départ,
- Des représentants des organismes partenaires dans la sous-région (CEDEAO, ABN, ABV, OMVS, AGRHYMET, CBLT, etc...) afin de garantir une vision partagée et non antagoniste avec les actions menées par d'autres organismes,
- Des représentants des acteurs des politiques sectorielles notamment eau, agriculture, industries, aménagement du territoire.

5. CONCLUSION GENERALE

Une masse importante de données a été collectée au niveau des pays. Toutefois, afin de tirer pleinement profit de la base de données, il est nécessaire de compléter les données manquantes afin de pouvoir pousser l'analyse de l'état d'information dans le détail en la classant par «aquifère capté» et par «pays» en vue de localiser les lacunes et d'arrêter les tâches complémentaires à effectuer par les équipes nationales.

Les deux systèmes aquifères présentent en effet des ressources considérables (19 milliards de m³ dont 8 pour la SAI et 11 pour le SAT), de bonne qualité et peu sensibles aux variations climatiques. De plus, des régions présentant des potentialités exceptionnelles ont été identifiées.

Des scénarios d'exploitation des systèmes aquifères de Taoudéni et des lullemeden avec une augmentation continue des besoins en eau ont été simulés jusqu'à l'horizon 2050 en considérant une succession d'épisodes climatiques identiques aux années 1960 (scénario standard) et avec une succession d'épisodes climatiques alarmistes, telle la décennie 1980-90 reproduite deux décennies de suite (scénario pessimiste). Les résultats montrent que :

Dans le SAT, l'impact de l'augmentation des besoins en eau reste faible dans le cas d'un scénario classique. Les rabattements calculés ne dépassent pas 3,5 mètres. Les secteurs les plus sensibles sont situés près des zones qui exploitent déjà les eaux souterraines : agglomération de Sikasso, Douentza, Goundam au Mali, secteur de Bordj Badji Mokhtar en Algérie et Fossé de Nara (Mali) / Dhar de Néma (Mauritanie). Les rabattements les plus importants sont situés à la frontière nigéro-Nigériane (SAI).

Dans le cas d'un scénario pessimiste les rabattements sont inférieurs à 4 mètres sur la majeure partie du système aquifère. Dans les secteurs proches des limites de l'aquifère, les effets seraient plus impactés (Fossé de Nara, Gondo) avec des rabattements simulés de l'ordre de dizaine de mètres.

Il est à noter qu'aussi bien pour le SAT que pour le SAI, une seule année excédentaire permet de combler la baisse des niveaux liée à plusieurs années déficitaires dans les zones où il y a une recharge significative. C'est une des particularités des systèmes aquifères et de leur effet tampon (buffer), que ne possèdent pas les eaux de surface malgré l'édification de barrages.

D'une manière générale, la proximité de la nappe avec le sol offre ce paradoxe d'une eau souterraine facilement accessible par des aménagements artisanaux mais également vulnérable tant du point de vue des pressions polluantes que d'une baisse des pluies efficaces. La vulnérabilité de la ressource en eaux souterraines s'imprime très particulièrement sur la frange Sud du secteur de l'étude. Les secteurs les plus vulnérables sont aussi ceux les plus peuplés.

Du point de vue quantitatif, les secteurs les plus vulnérables s'expriment spécifiquement dans les grandes plaines amont du fleuve Niger (Mali) et dans la zone médiane du bassin du fleuve Niger (Niger – Nigéria). Sur les zones malienne et nigérienne, il convient d'être vigilant sur ce phénomène de baisse du niveau des nappes d'eau qui, s'il s'exprimait durablement, pourrait mettre en péril l'accès à l'eau pour des pratiques agricoles et par conséquent, perturberait la production agricole.

Du point de vue de la qualité, les secteurs à risque sont également identifiés dans la frange Sud où la population est dense et les points de communication avec les eaux souterraines plus nombreux. Les zones les plus peuplées offrent un terrain propice à la pollution bactériologique et aux communications eaux de surface / eaux souterraines.

L'évaluation de la vulnérabilité et du risque rend parfois une image plus pessimiste que la réalité ne l'est réellement. Il convient, en dehors de toute considération alarmiste, de prendre en compte également les aspects optimistes de l'exercice précisant que la ressource souterraine reste encore aujourd'hui sous exploitée au regard des potentialités qu'elle offre.

6. RECOMMANDATIONS

Améliorer la connaissance locale des systèmes aquifères par des cartes piézométriques

Toute la région couverte par le projet souffre d'un manque cruel d'une bonne connaissance des écoulements souterrains. L'acquisition de données supplémentaires pour l'établissement des cartes piézométriques de référence devrait être faite à l'échelle de chaque pays. Cela implique évidemment une révision des bases de données nationales.

Améliorer la connaissance locale des systèmes aquifères avec des modèles dédiés

Le modèle régional élaboré a permis de dégager des zones qui méritent d'être mieux étudiées et qui doivent faire l'objet de modèles locaux. Le modèle régional servira entre autres de conditions aux limites des modèles locaux qui seront développés plus tard lorsque les conditions le permettront. Les principales zones et pays concernés sont les suivantes :

- Le bassin de Tanezrouft (Algérie, Mali)
- Le bassin du Dhar de Néma (Mauritanie – Mali)
- Le graben de Gao (Burkina Faso – Mali - Niger)
- Le bassin de Kandi (Bénin – Niger)
- Le bassin de Sokoto (Niger – Nigéria)
- Les horizons aquifères CT1, CT2 et CT3 du synclinal Nord-Sud de Dogon Doutchi (Niger).

La réalisation de modèles numériques locaux ne pourra être optimisée qu'en améliorant la connaissance des systèmes aquifères à l'échelle locale. Celle-ci ne peut passer que par une phase de reconnaissance géologique et hydrogéologique qui permettra d'affiner localement la géométrie des horizons et leurs caractéristiques hydrodynamiques. Ces données seront intégrées aux modèles locaux dont les calages sont tributaires de la fiabilité des données piézométriques qu'il sera nécessaire de collecter.

Développer un réseau de suivi piézométrique et un réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines

Pour la mise en œuvre des indicateurs et dans un objectif plus large de positionnement de l'OSS comme un référent sur les eaux souterraines, il est recommandé la mise en œuvre d'un réseau régional de suivi piézométrique et d'un réseau de mesure de la qualité des eaux souterraines qui doit permettre l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des aquifères. Ce réseau pourrait être piloté par l'OSS avec l'appui des pays, l'OSS étant le destinataire final de la donnée et le producteur des indicateurs de référence.

Renforcer les connaissances sur les puits et forages du territoire

Le renforcement des connaissances sur les puits et forages apparaît d'une importance capitale pour une meilleure maîtrise des informations et des modélisations. L'OSS possède aujourd'hui une référence de données importante qu'il convient de consolider au vu des erreurs contenues dans les bases de données nationales.

Diffuser l'information et promouvoir un Observatoire des eaux souterraines

Il est fondamental qu'un «Observatoire des eaux souterraines» soit développé pour assurer une diffusion des indicateurs et des données de référence. Ce rôle pourrait être joué par l'OSS en raison de sa position de référent de la connaissance des eaux souterraines dans la région.

En plus d'assurer la diffusion des informations relatives aux eaux souterraines, l'Observatoire des eaux souterraines devra s'investir sur les démarches normatives d'échange de la donnée sur les eaux souterraines. Un partenariat privilégié avec l'AGRHYMET, la CEDEAO et l'Autorité du Bassin du Niger, serait un atout fort dans une approche régionale.

À travers la mise en place de cet observatoire, il sera fondamental de prévoir un renforcement des capacités :

- **Matériel** : Achat et installation de serveurs dédiés à la diffusion internet ;
- **Logiciel** : renouvellement de licences SIG et achat ou demande de développement de solutions pour le déploiement de Web Mapping ; Achat de bibliothèques «graphiques» pour implémenter sur le site web ;
- **Formation** : Envisager des formations SIG, bases de données & modélisation à différents niveaux : utilisateur de premier niveau & utilisateur en mode expert

BIBLIOGRAPHIE

Bénin - «Bénin-2025» Rapport de synthèse des études nationales de perspectives à long terme

Bénin - Politiques macroéconomiques au Bénin : progrès, limites et perspectives. 2010

Bénin - Vision nationale de l'eau en l'an 2025. 1999

Burkina Faso - État des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. Mai 2011. Direction Générale de l'Hydraulique.

Burkina Faso - Élaboration du programme national d'approvisionnement en eau potable et assainissement à l'horizon 2015. Volume 3 : Sous-programme rural. 2006. Direction Générale de Ressources en Eau.

Burkina Faso - Élaboration du programme national d'approvisionnement en eau potable et assainissement à l'horizon 2015. Volume 4 : Sous-programme urbain. 2006. Direction Générale de Ressources en Eau.

Burkina Faso - Recensement général de la population et de l'habitation de 2006 (RGPH-2006). Thème 16: Projections démographiques 2007-2050. 2009. Bureau Central du Recensement.

Niger - Stratégie nationale de développement de l'irrigation et de la collecte des eaux de ruissellement (SNDI/CER), 2005. Ministère du Développement Agricole.

Niger - Plan de Développement Économique et Social (PDES) 2012-2015. Ministère du Plan de l'Aménagement du Territoire et du Développement Communautaire.

Mauritanie – Quatre tableaux Excel : 1) Besoins en Eau des 5 centres urbains principaux de la Willaya du Hodh Echargui ; 2) Base de données PEDAHR : demande en eau exprimés pour 101 points d'eau ; 3) Base de données PEDAHR avec 39 points d'eau ayant des analyses chimiques ; 4) Base de données PEDAHR comprenant 3 feuillets dont le feuillet 2 contient 218 ouvrages captant le Continental intercalaire dans le Dhar de Néma (Willaya du Hodh Echargui).

Armand Claude, Actualisation de l'Atlas des eaux souterraines du Niger. Rapport BRGM, 1987
Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine de la zone de l'Office du Niger (ON). Rapport synthétique de la phase 1 (rapport provisoire). Juin 2011

Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali). Thèse Tangara, 2011

Étude des périmètres de protection des sources de Nasso et des forages de l'ONEA. Rapport Final 2009. Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (VREO)

Schéma directeur d'aménagement et de gestion des ressources en eau du bassin du Sourou - Portion nationale du Mali. Programme triennal prioritaire. Version finale - Février 2012

Modélisation Bassin sédimentaire TAOUDENI Sud-Est. Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest : Modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire. DGRE. SOFRECO-SAWES. Mars 2008

Modélisation Bassin sédimentaire TAOUDENI Sud-Est. Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest : Modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire.

Addendum au Rapport final : Exploitation du modèle hydrogéologique régional. Janvier 2010

Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali) - essai de modélisation. Thèse de Denis Dakouré (2003)

Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (bassin du Sourou) – Burkina Faso / Mali, Thèse de Youssouf KOUSSOUBE 2010, Université Pierre et Marie Curie, Paris

Modélisation des eaux de surface et souterraines du bassin du kori de Dantiandou sur la période 1992-2003. Thèse Sylvain Massuel, 2005, Université de Montpellier

Massuel, S., G. Favreau, M. Descloitres, Y. Le Troquer, Y. Albouy, and B. Cappelaere, 2006. Deep infiltration through a sandy alluvial fan in semiarid Niger inferred from electrical conductivity survey, vadose zone chemistry and hydrological modelling, *Catena*, 67, 105–118, doi:10.1016/j.catena.2006.02.009.

Favreau, G., 2000. Characterization and modelling of a rising water table in the Sahel: Dynamic and geochemistry of the Dantiandou kori natural hollow aquifer (southwest Niger) (in French), Ph.D. thesis, 258 pp., Univ. Paris XI, Orsay, France.

Favreau, G., B. Cappelaere, S. Massuel, M. Leblanc, M. Boucher, N. Boulain, and C. Leduc, 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review, *Water Resour. Res.*, 45, W00A16, doi: 10.1029/2007WR006785

IRD, 2011. Integrated surface water–groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer, *Hydrological Sciences Journal*, 1, 2011

Leblanc, M., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S., Loireau, M., Cappelaere, B., 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change* 61 (1–2), 49–62.

Leduc, C., G. Favreau, and P. Schroeter, 2001. Long-term rise in a Sahelian water table: The Continental Terminal in south-west Niger, *J. Hydrol.*, 243, 43– 54, doi:10.1016/S0022-1694(00)00403-0.

FAO-Aquastat, 2010. AQUASTAT Base de données : <http://www.fao.org/nr/aquastat>

OSS, 2017. Atlas des ressources en eau des pays du Système Aquifère transfrontalier d'Illemeden – Taoudéni/Tanezrouft.

OSS, 2017. Hydrogéologie.

OSS, 2017. Synthèse finale

OSS, 2017. Hydroclimatologie et impacts du changement climatique sur les aquifères.

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 : 978-9938-933-10-9

PARTENAIRES DE COOPÉRATION

