



Second Projet de Renforcement Institutionnel du Secteur Minier de la République Islamique de Mauritanie (PRISM-II), Phase V

Livrable 57

Synthèse des données hydrologiques

Par Michael J. Friedel, Carol A. Finn, et John Horton

Préparé pour le compte du gouvernement mauritanien par l'U.S. Geological Survey

2012

Ce rapport est un rapport administrative, dont la conformité avec les normes éditoriales de l'U.S. Geological Survey ou le code stratigraphique nord-américain n'a pas été examiné. Tout nom commercial, d'entreprise ou de produit est utilisé à des fins descriptives et n'implique pas l'approbation du gouvernement des Etats-Unis.

**U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey**

Synthèse des données hydrologiques

Synthèse

Une étude hydrogéologique est menée afin de compléter le travail d'évaluation de ressources minérales présentes en Mauritanie (Afrique). Des estimations des profondeurs magnétiques, effectuées par avion, indiquent deux bassins primaires d'eau souterraine : le Bassin Terminal Continental, poreux et côtier (dépôts de remplissage) ; et au milieu des terres, le Bassin de Taoudéni, fracturé et intérieur. Dans le Bassin Terminal Continental, il existe une recharge verticale uniforme, et un exutoire localisé qui correspond au pompage de l'eau souterraine à Nouakchott. Ce centre de pompage induit un flux de l'eau souterraine vers l'Est à partir de l'Océan Atlantique, ce qui entraîne un gradient de salinité qui réduit la qualité des eaux souterraines sur 100 km. L'eau souterraine s'écoule également vers le Sud, dans le bassin de l'Ouest du Sahara. Par ailleurs, un échange entre bassins se produit lorsque l'eau douce souterraine s'écoule vers l'Ouest en provenance du Bassin de Taoudéni. Dans le Bassin de Taoudéni, des zones de recharge locale se rencontrent dans trois secteurs : au Nord-Ouest, au bord du Bouclier de Rgueibat, et au niveau de la ville de Tidjikja. L'eau souterraine s'écoule également en traversant les frontières du pays : vers le Nord, dans l'Ouest du Sahara, et vers l'Ouest, à l'intérieur du Mali. À la frontière Sud du pays, le fleuve Sénégal sert de source et d'exutoire à l'eau douce souterraine de ces deux bassins. En utilisant un Système d'Information Géographique, treize unités hydrogéologiques ont été identifiées, en se basant sur leur extension latérale et des propriétés hydrauliques distinctes, afin de permettre la mise en place dans l'avenir d'une modélisation des eaux souterraines. En associant ces informations avec la productivité de forage, la qualité des eaux souterraines, et les interprétations géophysiques (fracturation et absence de filons intrusifs en profondeur), trois cibles potentielles pour la recherche de ressources en eau ont été identifiées : les roches sédimentaires du Jurassique, du Crétacé et du Quaternaire, les roches sédimentaires du Cambrien et de l'Ordovicien, et enfin les roches sédimentaires datant du Néoprotérozoïque.

Table des matières

Synthèse	3
Table des matières.....	3
Illustrations	4
Tableaux.....	4
1 – Introduction	5
2 – Contexte physique	5
3 – Méthodes de compilation des données hydrogéologiques	6
4 – Hydrogéologie.....	7
4.1 – Bassins d'eaux souterraines.....	7
4.2 – Propriétés hydrauliques.....	10
4.3 – Unités hydrogéologiques	11
4.3.1 – Dépôts côtiers du Quaternaire au Tertiaire (TQ).....	12
4.3.2 – Roches sédimentaires du Jurassique, du Crétacé, et du Quaternaire (JQ)	14
4.3.3 – Roches sédimentaires du Carbonifère et du Crétacé (CC)	19

4.3.4 – Roches sédimentaires du Silurien et du Dévonien (S, D)	19
4.3.5 – Roches sédimentaires du Cambrien à l'Ordovicien (CO1, CO2)	19
4.3.6 – Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque au Cambrien, et roches magmatiques du Jurassique (PC1, PC2)	20
4.3.7 – Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (P1, P2)	20
4.3.8 – Roches magmatiques et métamorphiques du Paléoprotérozoïque au Néoprotérozoïque (P3)	21
4.3.9 – Roches magmatiques et métamorphiques du Mésoarchéen au Néoarchéen, ainsi que du Paléoprotérozoïque (AP)	21
4.4 – Écoulement des eaux souterraines	22
4.5 – Qualité des eaux souterraines.....	23
5 – Cibles de ressources en eau	24
6 – Stratégies de modèles de développement.....	25
7 – Références	27

Illustrations

Figure 1. Image en relief et en nuances de couleur de la topographie à partir de données de « Shuttle Radar Topography Mission »	6
Figure 2. Imagerie géophysique : A.) Image en relief ombré et en couleur des estimations de profondeur sur le quadrillage. B.) Carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer en Mauritanie.	9
Figure 3. Carte hydrogéologique physique montrant les unités hydrogéologiques, les équipotentiels de charge hydraulique, les lignes d'écoulement de l'eau souterraine, les zones d'entrée et de sortie, ainsi que les conditions d'écoulement le long des frontières du pays.....	13
Figure 4. Carte hydrogéologique chimique montrant la présence et la distribution de la qualité de l'eau en Mauritanie.	15

Tableaux

Tableau 1. Caractéristiques hydrauliques.....	11
Tableau 2. Relation entre unités pétrographiques productrices et unités hydrogéologiques.	16
Tableau 3. Caractéristiques des unités hydrogéologiques.....	17
Tableau 4. Statistiques pour chaque élément cartographié et pour chaque aqueux paramètre.	24

1 – Introduction

Les représentants du gouvernement de Mauritanie souhaitent un développement stable et à long terme de l’approvisionnement en eau utilisée pour l’agriculture, les particuliers, et le secteur minier (BURGÉAP, 2006). L’approche privilégiée pour l’évaluation d’un approvisionnement en eau stable et à long terme, consiste à effectuer une analyse quantitative à l’aide de modèles numériques. Actuellement, on dénombre quatre priorités nationales en matière de ressources en eau : (1) protéger et développer l’approvisionnement en eaux souterraines de Nouakchott, (2) accroître l’approvisionnement en eau destiné à l’industrie minière, (3) accroître l’approvisionnement en eau dans les zones rurales, et (4) élaborer des stratégies de réalimentation des réserves en eaux souterraines. Bien qu’il existe un logiciel permettant de simuler le transport et l’écoulement des eaux souterraines, il n’existe actuellement aucun cadre hydrogéologique national de la Mauritanie, et il n’existe que peu de données pour la définition, le paramétrage et la calibration de modèles numériques. Afin de faciliter les futures tâches de modélisation des eaux souterraines, cette étude fournit des éléments sur le contexte physique, les données hydrogéologiques, l’hydrogéologie (bassins d’eau souterraine, propriétés hydrauliques, unités hydrostratigraphiques, écoulement des eaux souterraines, et qualité de l’eau), les cibles de ressources en eau, ainsi que les stratégies de modèles de développement.

2 – Contexte physique

La République Islamique de Mauritanie est située en Afrique du Nord-Ouest. Le pays a la forme d’un rectangle avec des indentations. Il mesure environ 1 500 kilomètres du Nord au Sud, et environ 1 000 kilomètres d’Est-Ouest (Fig. 1). Il est encadré au Nord-Ouest par l’Ouest du Sahara, au Nord-Est par l’Algérie, à l’Est et au Sud-Est par le Mali, et au Sud-Ouest par le Sénégal. En allant du Sud vers le Nord, son littoral atlantique, situé à l’Ouest, s’étend sur 700 km, depuis le delta du fleuve Sénégal jusqu’à la péninsule du Cap Blanc. Sa capitale est Nouakchott.

À la fois le relief et l’écoulement des eaux sont influencés par l’aridité qui caractérise la majeure partie de la Mauritanie. L’impression d’immensité donnée par le paysage est renforcée par son caractère relativement plat ; les plaines côtières présentent une élévation inférieure à 45 m au-dessus du niveau de la mer, et les plaines plus élevées de l’intérieur des terres sont étagées à des altitudes d’environ 180 à 230 m au-dessus du niveau de la mer. Les plaines de l’intérieur des terres forment un plateau dont les points culminants, à des niveaux différents, forment de nombreuses mesas, reliées par de longues et faibles pentes d’environ 2 degrés. La topographie est réhaussée par le vestige de falaises, lorsque les plaines inclinées se terminent par des falaises abruptes, par des escarpements faillés qui peuvent atteindre des hauteurs allant jusqu’à 274 m, ou par des inselbergs (collines résiduelles aux flancs raides), dont le plus élevé est le Kedia d’Idjil, qui culmine à 915 m.

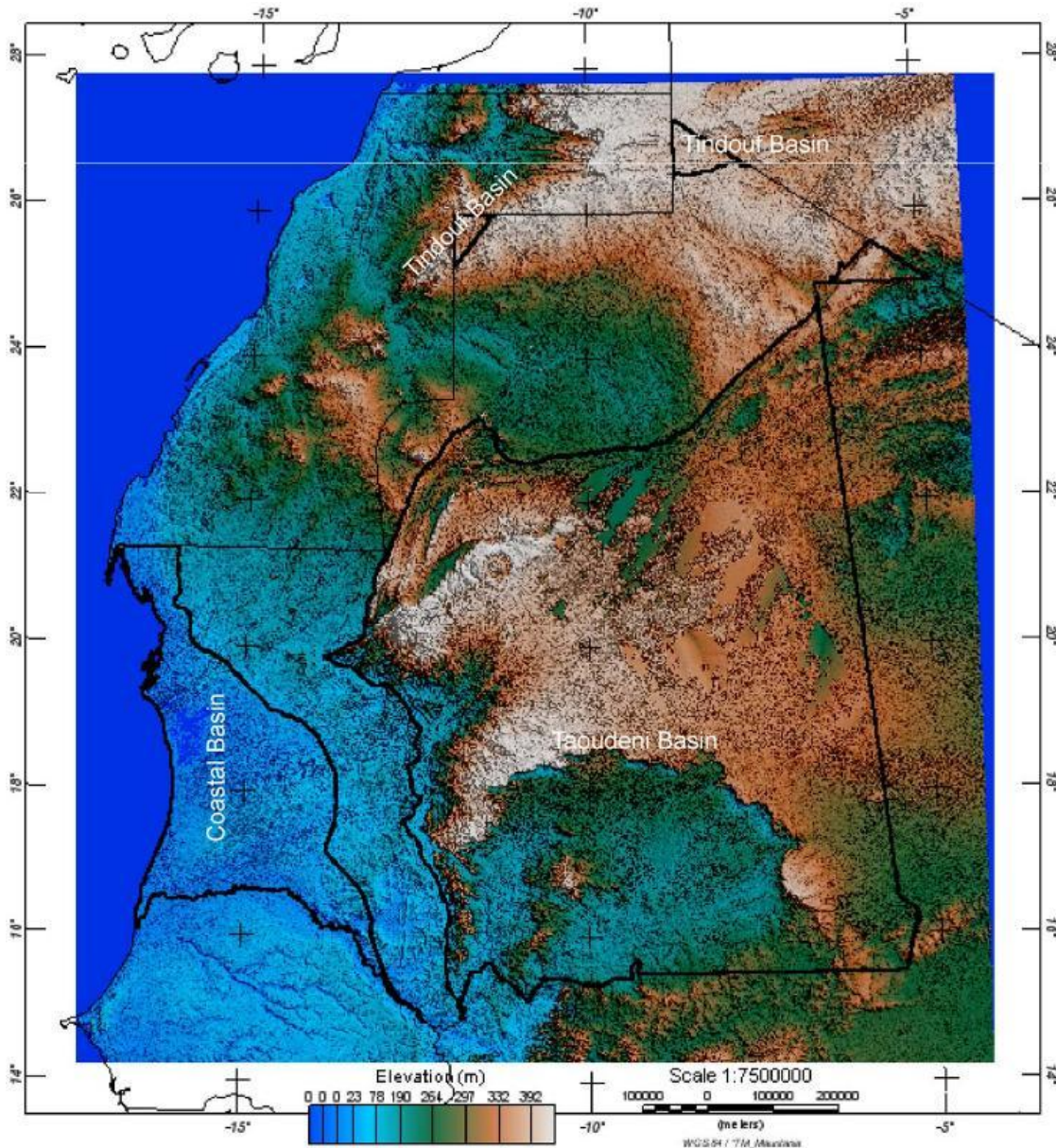


Figure 1. Image en relief et en nuances de couleur de la topographie à partir de données de « Shuttle Radar Topography Mission ».

3 – Méthodes de compilation des données hydrogéologiques

La création de cartes et de modèles pour les eaux souterraines de régions hydrogéologiques complexes nécessite la mise en place d'une gestion des données et d'un contrôle qualité. L'identification, le recueil et la conversion des données hydrogéologiques utilisables, ainsi que les procédures de traitement et d'analyse correspondant à ces données, ont fait partie du travail de caractérisation et de conceptualisation qui a été mené. Les données hydrogéologiques ont été en grande partie extraites de la base de données Access SIPPE2 (Dassargues, 2006). Les requêtes

utilisées pour extraire et mettre en forme les données des tableaux ont été élaborées dans le cadre de la phase 1, en lien avec l'inventaire des données hydrogéologiques (Friedel, 2008). Comme exemples d'information de bases de données utilisée dans cette étude, on peut citer la localisation des villes, la pétrographie (le type de roche), la stratigraphie (l'âge géologique), le type d'aquifère (fracturé ou poreux) et sa nature (captif ou libre), la productivité, la profondeur de production, les propriétés hydrologiques (la transmissivité et les valeurs de conductivité hydraulique), les essais sur l'aquifère, le niveau d'eau, ainsi que la qualité des eaux souterraines (bicarbonate dissous, oxygène, nitrate, sodium, sulfate, et paramètres comme la température et la conductivité électrique). Ces tableaux de données ont été importés et traités à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG), de manière à créer des fichiers en couches permettant les associations et la visualisation. Le SIG a été utilisé pour gérer, stocker et analyser les données numériques utilisées pour générer les cartes hydrogéologiques. D'autres données regroupées dans les annexes 1 à 3 du rapport PRISM II (Dassargues, 2006) indiquent le nom des groupes et des formations par site, avec les valeurs de productivité rencontrées, en pourcentage, indiquant les forages ayant permis des débits d'eau égaux à, ou supérieurs à, $1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ (l'échelle de réussite est la suivante : Médiocre – 0-5 % ; Moyen - 5-45 %, Bon - 45-65 %, Très Bon – 65-80 %, Excellent – 80 % et plus). La productivité dans l'espace, et l'information sur les routes et les villes étaient également disponibles et ont, dans certains cas, été utilisées sous forme de couches SIG.

4 – Hydrogéologie

La conceptualisation d'un système d'écoulement des eaux souterraines exige l'identification et l'évaluation des divers éléments du système, comprenant : (1) la définition des bassins d'eau souterraine, (2) la distribution des propriétés hydrauliques, (3) la définition des unités hydrogéologiques, (4) l'écoulement des eaux souterraines, et (5) la qualité des eaux souterraines. Chacun de ces éléments du système sont décrits plus en détail dans les chapitres suivants.

4.1 – Bassins d'eaux souterraines

Un inventaire récent des données hydrogéologiques de Mauritanie a révélé un manque d'information sur l'épaisseur et l'étendue des unités pétrographiques (Friedel, 2008). Les données géophysiques sont utilisées ici dans le but de déterminer l'étendue des bassins d'eau souterraine et pour identifier les obstacles potentiels à l'écoulement des eaux souterraines. Par exemple, les données magnétiques recueillies par avion, fusionnées avec des données antérieures des Nations Unies (ONU), ont permis d'identifier le Bassin Terminal Continental côtier et le Bassin de l'intérieur des terres de Taoudéni (BURGÉAP, 2006 ; et Dassargues, 2006). Des estimations de profondeurs de bassin ont été calculées à partir de ces données pour la majeure partie de la Mauritanie (Fig. 2a) en utilisant la méthode d'Euler prolongée (Phillips, 2002) avec un indice structural de 0 (contact magnétique) et une fenêtre de 7. Alors que les résultats des deux ensembles de données magnétiques par avion sont en général concordants, les profondeurs estimées sur l'ensemble du Bassin Terminal Continental côtier sont d'environ 1 km supérieures à celles estimées à partir des données plus récentes. Par conséquent, il existe une incertitude sur les estimations de la profondeur réelle du Bassin Terminal Continental. En effet, les évaluations de profondeur calculées sur l'ensemble du Bassin Terminal Continental indiquent des profondeurs d'environ 0,1 km le long de son bord Est, d'environ 2 à 3 km en son centre, et d'environ 3 à 4 km le long de la côte atlantique Ouest.

Dans le bassin de l'intérieur des terres de Taoudéni, les estimations de la profondeur magnétique indiquent des augmentations d'environ 500 m à 1 km en bordure du bassin, jusqu'à plus de 2 km à approximativement 25 km du bord en direction centre du bassin (Fig. 2a). Les estimations de profondeur les plus importantes sont supérieures à 6 km dans les zones non couvertes par des intrusions de dolérite. Au centre du bassin, la profondeur minimale calculée jusqu'au socle magnétique est située à environ 3 km. Ceci a été confirmé lors du forage du puits Abolag-1 (République Islamique de Mauritanie, Ministère des Mines et de l'industrie, 2007). Les données de réflexion sismique utilisées provenant de ce même rapport indiquent que le Bassin de Taoudéni atteint une profondeur maximale d'environ 6 km à la frontière centrale Est de la Mauritanie. En revanche, le rapport indique des profondeurs jusqu'à dolérite jurassique intrusive d'environ 0,5 à 1,5 km, ce qui est en assez bonne concordance avec les épaisseurs déterminées par la prospection sismique des sections dévoniennes sur lesquelles reposent les intrusions. Ces données sismiques et de forage indiquent aussi une colline datant du Silurien-Dévonien au sein du Bassin de Taoudéni.

Des données de gravité non publiées, obtenues auprès d'une agence française (M. Albouy, communication écrite, 2006), ont fourni une confirmation et des indications supplémentaires sur le caractère des deux bassins primaires mauritaniens d'eau souterraine (Fig. 2b). Par exemple, plusieurs anomalies gravimétriques négatives de 20 à 35 mGal, linéaires, d'environ 40 km de large, sont observables au sein du Bassin Terminal Continental. Ces anomalies gravimétriques négatives correspondent à l'emplacement des centres de pompage au sein du bassin, et sont interprétées comme des sédiments moins denses. L'anomalie gravimétrique négative au-dessus du Bouclier de Rgueibat est indicatrice de variations de densité au sein de la formation géologique précambrienne, et non des bassins d'eau souterraine. Plusieurs anomalies gravimétriques négatives, de forme allongée, situées au-dessus de la limite Sud-Ouest du Bassin de Taoudéni, dans les Mauritanides, suivent la même direction que les zones de faibles valeurs magnétiques, et ont été interprétées comme étant en relation avec le socle Précambrien (Roussel et Lesquer, 1991). Une anomalie gravimétrique positive dans la Ceinture des Mauritanides Centre-Nord révèle un socle Précambrien de haute densité relativement peu profond, pouvant limiter l'écoulement régional entre les bassins côtiers et intérieurs. La persistance d'une anomalie gravimétrique positive le long de la Ceinture des Mauritanides au Nord et au Sud correspond à des régions très fracturées, suggérant la possibilité d'un écoulement préférentiel à faible profondeur le long des fractures, dirigé de l'intérieur en direction du bassin côtier. L'autre anomalie gravimétrique positive du Bassin Terminal Continental le long de la côte atlantique correspond au centre d'un panache d'eau salée se déplaçant vers le centre du pompage primaire (Fig. 2 b). L'anomalie gravimétrique positive n'est probablement pas créée par de l'eau salée de faible densité, mais plutôt par des graviers de plus grande densité, et/ou par les roches du socle. Une étude plus approfondie de ces relations est nécessaire pour confirmer la source de cette anomalie gravimétrique.

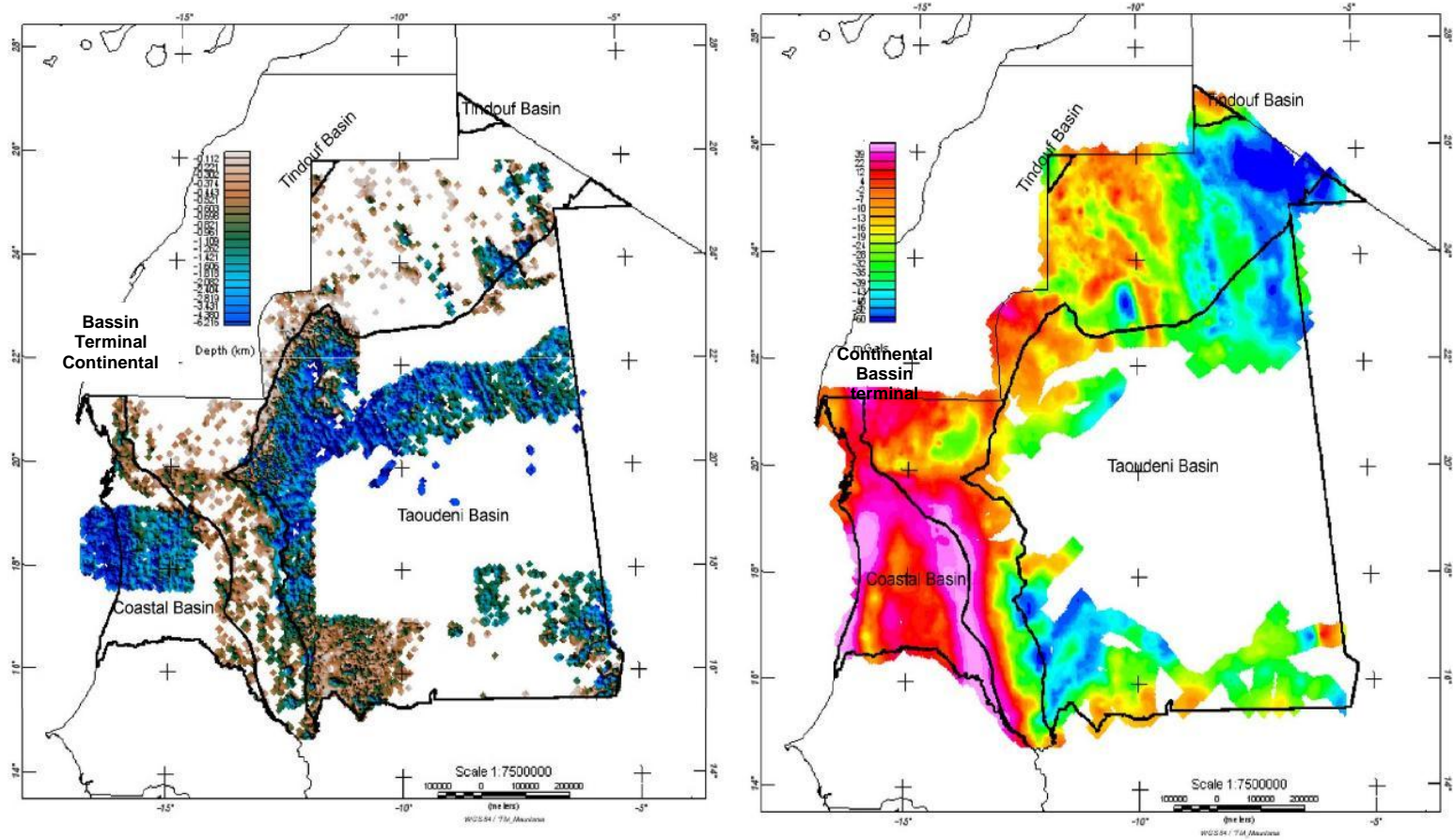


Figure 2. Imagerie géophysique : A.) Image en relief ombré et en couleur des estimations de profondeur sur le quadrillage. B.) Carte de l'anomalie gravimétrique de Bouguer en Mauritanie.

4.2 – Propriétés hydrauliques

Une recherche dans la littérature concernant les propriétés hydrologiques des roches en Mauritanie a été menée dans le cadre de PRISM II (Dassargues, 2006). Cette recherche a mis en lumière différents essais de terrain adaptés aux différents sites, conduits in situ dans différentes localisations (Blanchot, 1975). Ces essais ont mesuré des propriétés hydrologiques variant de plusieurs ordres de grandeur. Par exemple, la conductivité hydraulique s'étend sur plus de trois ordres de grandeur, avec un minimum de $1,0E-06 \text{ m h}^{-1}$ pour le schiste et un maximum de $5,8E-03 \text{ h}^{-1}$ pour le sable coquillier. De même, les valeurs de transmissivité varient de quatre ordres de grandeur, avec un minimum de $1,50E-06 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ pour les dolérites et les pélites, et un maximum de $6,94E-02 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ pour le sable coquillier. Néanmoins, les caractéristiques hydrauliques de nombreuses unités pétrographiques de la géologie demeurent inconnues, et nécessiteraient donc une étude. Une synthèse des valeurs disponibles de conductivité et de transmissivité pour différents types de roche est présentée dans le Tableau 1. Les essais de terrain in-situ au sein du bassin côtier et du Bassin de Taoudéni ont aussi indiqué des différences de caractéristiques hydrauliques. Les essais du Bassin Terminal Continental côtier présente des résultats caractéristiques d'un milieu poreux, alors que les résultats du bassin intérieur de Taoudéni sont caractéristiques de l'hydrologie d'une roche fracturée. D'autres propriétés hydrologiques, telles que la porosité et la capacité de stockage, n'étaient pas disponibles pour tous les types de roche.

Les investigations hydrogéologiques mauritaniennes manquent d'évaluations quantitatives du rôle hydraulique des failles. Ainsi, on ne possède pas d'information sur l'influence des zones de failles régionales sur le mode d'écoulement des eaux souterraines. Puisque des informations informelles suggèrent que le système d'écoulement régional des eaux souterraines peut être influencé par des voies d'écoulement plus profondes, un autre aspect à ne pas avoir été étudié jusqu'à présent, mais qu'il serait utile d'étudier est l'effet de la profondeur sur les propriétés hydrologiques. Par exemple, une des hypothèses est la probabilité d'une augmentation de la fissuration ou de la fracturation près de la surface, en raison de la perte de charge ayant accompagné l'érosion et l'altération, pouvant alors expliquer de plus grandes valeurs de conductivité hydraulique des formations à de plus faibles profondeurs. En raison du fait que les essais de forage sont seulement effectués à de faibles profondeurs (<150 m), d'autres données de propriétés hydrologiques ont été évaluées à partir de systèmes arides comparables rencontrés dans d'autres régions, tel que l'aquifère régional de la Vallée de la Mort, en Californie (Bedinger et al., 1989b). Les données disponibles, ainsi que des informations de contexte, ont été utilisées pour arriver aux conclusions suivantes:

- Altération et fractures (dues au relâchement des pressions de confinement par une réduction de la charge du fait de l'érosion) ne sont probablement pas significatives à des profondeurs inférieures à 300 m.
- À des profondeurs plus importantes, les pressions exercées par la charge des terrains situés au-dessus tendent à diminuer la taille des discontinuités de type fissures ou fractures, ainsi que la taille des pores. De ce fait, la porosité et la perméabilité internes tendent à diminuer.
- Les failles de surface et les fractures sont de bons indicateurs de l'orientation et de la position des zones perméables pour des profondeurs allant jusqu'à 1 000 m.
- Dans certaines régions, des vides de dissolution et des cavités résiduelles peuvent résister aux pressions de charge au sein des roches carbonatées cristallines, permettant à ces éléments de présenter des discontinuités jusqu'à des profondeurs de 2 000 à 3 000 m.

Tableau 1. Caractéristiques hydrauliques.

<u>Pétrographie de la formation</u>	<u>Âge</u>	<u>Transmissivité^{ab} (m² h⁻¹)</u>			<u>Conductivité^c (m h⁻¹)</u>		
		Minimum	Maximum	Médiane	Minimum	Maximum	Médiane
Dolérite		1,50E-06	9,31E-04	7,95E-05	6,69E-04	6,69E-04	6,69E-04
Calcaire dolomitique		1,50E-04	1,50E-04	1,50E-04	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05
Granite		1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	Inconnu	Inconnu	Inconnu
Gravier		1,73E-04	2,20E-02	6,55E-04	1,49E-05	1,25E-03	1,05E-04
Jaspe		5,00E-04	5,00E-05	5,25E-04	Inconnu	Inconnu	Inconnu
Calcaire		1,10E-02	2,30E-03	6,65E-03	1,10E-04	3,10E-04	
Pélite	Autre	1,50E-06	9,31E-04	7,95E-05	Inconnu	Inconnu	Inconnu
	Protérozoïque	3,10E-04	3,10E-04	3,10E-04	4,57E-06	1,77E-05	8,43E-06
Quartzite	Autre	2,38E-05	2,38E-05	2,38E-05	Inconnu	Inconnu	Inconnu
	Protérozoïque	6,83E-04	6,83E-04	6,83E-04	Inconnu	Inconnu	Inconnu
Sable		4,87E-05	1,40E-02	1,02E-03	4,00E-06	1,76E-04	5,00E-05
Grès		2,31E-06	2,80E-02	1,25E-04	1,89E-06	1,89E-06	1,89E-06
	Cambrien-Ordovicien	4,40E-04	8,20E-03	1,95E-03	1,10E-05	3,10E-04	1,10E-04
Schiste	Cambrien-Ordovicien	1,90E-03	1,90E-03	1,90E-03	1,00E-04	1,00E-06	5,05E-05
		2,80E-04	1,15E-03	6,82E-04			
	Protérozoïque	7,29E-04	5,50E-05	3,92E-04	Inconnu	Inconnu	Inconnu

^a Transmissivité = conductivité hydraulique * Épaisseur totale des unités perméables

^b Valeurs de transmissivité (149) extraites de la base de données Access SIPPE2.

^c Valeurs de perméabilité (84) ; 79 étaient situées au sein du Bassin Terminal Continental côtier.

Les grandes zones de failles régionales de la croûte sont de bons indicateurs de zones présentant une conductivité hydraulique significativement plus importante à de grandes profondeurs. La conductivité hydraulique régionale résultant de fractures repose non seulement sur la présence de fractures ouvertes, mais aussi sur le type de roche, sur l'orientation des fractures, et sur l'histoire régionale des contraintes tectoniques.

4.3 – Unités hydrogéologiques

Des unités pétrographiques présentant une considérable extension latérale, et présentant des propriétés hydrologiques distinctes peuvent être regroupées sous la forme d'unités hydrogéologiques (Maxey, 1968). Le terme « d'unité hydrogéologique » est synonyme d'unité hydrostratigraphique. Puisque l'un des objectifs d'une étude scientifique est de permettre de comprendre l'hydrogéologie mauritanienne à l'échelle de 1:1 000 000, les unités hydrogéologiques décrivent les aquifères généralisées et les aquitards. Bien que les principales caractéristiques géologiques aient été conservées, plusieurs unités pétrographiques ont été regroupées en généralisant les propriétés pétrographiques et hydrologiques des unités géologiques de la roche mère (par exemple sa nature, son type, sa productivité et sa transmissivité. En appliquant ces critères, 107 unités pétrographiques (Bradley et al., 2012) ont été regroupées en 13 unités hydrogéologiques (Tableaux 2 et 3). Les abréviations pour les unités hydrogéologiques sont arbitraires, et établies à partir l'âge du Groupe et de la Formation (ère ou période). La présence de

ces unités hydrogéologiques en surface a été repéré pour l'ensemble de la Mauritanie, avec les principaux cours d'eau, les lacs, la pluviométrie annuelle, et les villes, sous la forme d'une carte hydrogéologique (Fig. 3). De nombreuses limitations sont inhérentes à la création de ces fichiers cartographiques numériques. Les cartes sont en particulier exactes jusqu'à l'échelle des cartes géologiques numériques mises à jour, c'est à dire à l'échelle 1:200 000. En outre, les unités pétrographiques situées sous le champ de dunes du Sahara sont interprétées selon leur présence à la surface, les échantillons de forage, les données géophysiques, et les informations de différents rapports (Dassargues, 2006). Le chapitre suivant décrit les caractéristiques géologiques et hydrologiques de chaque unité hydrogéologique. Une synthèse des unités hydrogéologiques et de leurs caractéristiques est présentée dans les Tableaux 2 et 3.

4.3.1 – Dépôts côtiers du Quaternaire au Tertiaire (TQ).

Cette unité hydrogéologique (TQ) est associée à des sédiments alluviaux déposés durant le Quaternaire (Paléocène, Éocène, Oligocène et Miocène) et le Tertiaire (unités pétrographiques Qa, Qd, Qf, Ql, et TIM). Ce mélange hétérogène de graviers grossiers, de sable fin à coquiller, de grès et de carbonate de calcium, a une forte probabilité de présenter des écoulements au sein de la matrice (poreuse) variant considérablement sur de courtes distances (de $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ à $60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$). Le même phénomène est provoqué par le degré de confinement (libre, semi-captive, et captive), ou les propriétés hydrologiques (transmissivité de $3,50\text{E}-05$ à $2,57\text{E}-02 \text{ m}^2 \text{ hr}^{-1}$). Ces changements de caractéristiques hydrauliques, aussi bien horizontalement que verticalement, reflètent de brusques variations de taille des grains, mais aussi de degré de classement et de consolidation. La probabilité d'enregistrer des débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ est d'environ 100 % (excellente).

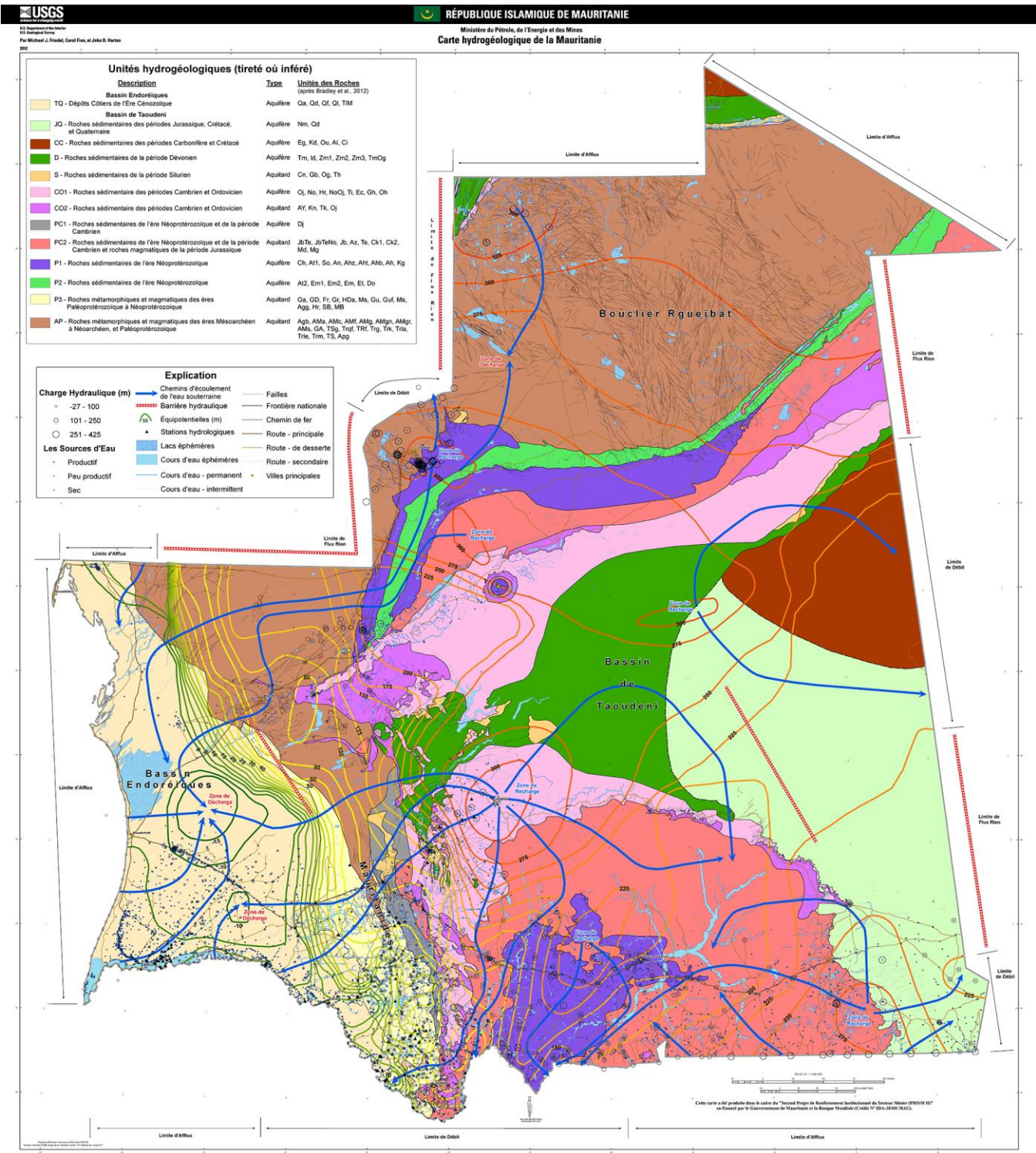


Figure 3. Carte hydrogéologique physique montrant les unités hydrogéologiques, les équipotentiels de charge hydraulique, les lignes d'écoulement de l'eau souterraine, les zones d'entrée et de sortie, ainsi que les conditions d'écoulement le long des frontières du pays.

L'unité de remplissage du Bassin Terminal Continental constitue l'un des deux systèmes d'écoulement régional, et la ressource d'eau souterraine la plus importante de Mauritanie. L'épaisseur totale de remplissage varie en épaisseur de quelques dizaines de mètres à l'Est (le long des Mauritanides) jusqu'à 4 km le long de la côte atlantique. Les eaux souterraines s'écoulent au sein du bassin à partir du Bassin intérieur de Taoudéni en direction de l'Est, en direction de l'Océan Atlantique à partir de l'Ouest, et en direction du fleuve Sénégal depuis le Sud. Les eaux souterraines quittent le bassin principalement par évaporation ou par deux champs de captage de pompage proches du centre du bassin (Fig. 3). Alors que la recharge peut se produire sur la totalité du bassin, la quantité est probablement limitée à des entrées concentrées à l'échelle locale, et limitées au niveau régional en raison des faibles précipitations moyennes (99 mm) et du taux moyen élevé de l'évaporation (> 4 100 mm) (Friedel, 2008) Malheureusement, les cônes de dépression générés par les centres de pompage semblent avoir créé un flux d'eau salée de l'Océan Atlantique vers l'intérieur des terres, caractérisé par une masse dégradant la qualité de l'eau sur des distances pouvant être situées à plus de 100 km de la côte (Fig. 4).

4.3.2 – Roches sédimentaires du Jurassique, du Crétacé, et du Quaternaire (JQ)

Cette unité hydrogéologique (JQ) est associée aux grès perméables du groupe de Néma (unité pétrographique Nm), ainsi qu'aux Formations d'Adeilé, d'Aïdiate, et de Sailé. Ces roches affleurent à l'Est parallèlement à la Ceinture des Mauritanides, mais sont essentiellement recouvertes par le sable des dunes du désert saharien (unité pétrographique Qd). Dans les parties Nord, et au Nord de la partie centrale de cette unité, les données de réflexion sismique et de carottes de forage indiquent la présence de ces roches sous le sable des dunes, et recouvrant au moins une partie des roches du Dévonien (Roussel et Salento, 1991 ; République islamique de Mauritanie, Ministère des Mines et l'Industrie, 2007). Au Sud de la partie centrale, et au Sud-Est de cette unité, les données provenant des essais de résistivité électriques et de résonance magnétique révèlent la présence de ces grès à partir de Néma en direction de l'Est jusqu'à la frontière du Mali (Bernard et al., 1999). Une deuxième étude de la résistivité électrique et de la résonance magnétique révèle que les grès de la moitié Est de cette région contiennent de l'eau, mais que la moitié Ouest est sèche (Bernard et Legchenko, 2003).

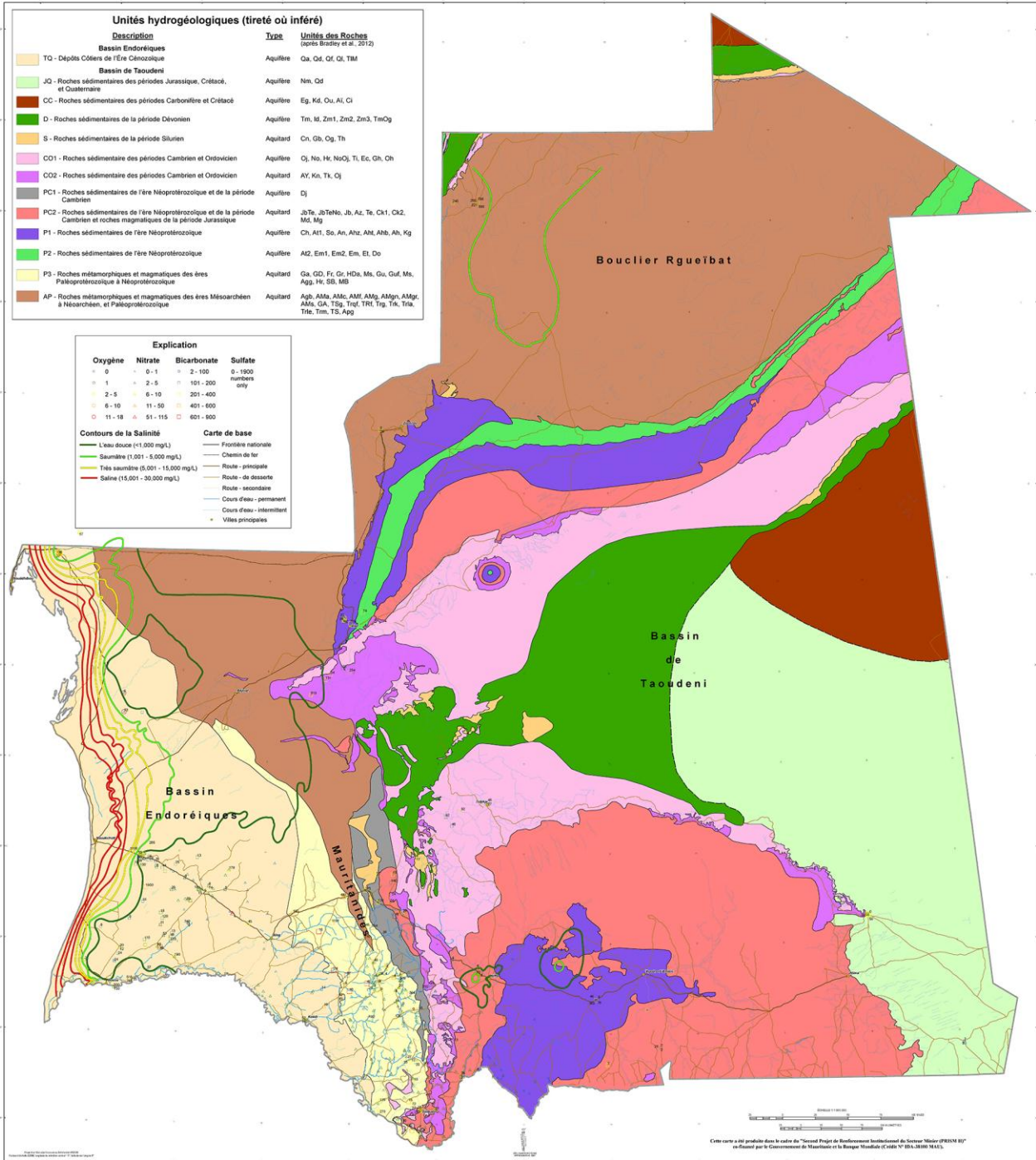


Figure 4. Carte hydrogéologique chimique montrant la présence et la distribution de la qualité de l'eau en Mauritanie.

Tableau 2. Relation entre unités pétrographiques productrices et unités hydrogéologiques.

<u>Unités hydrogéologiques</u>		<u>Unités pétrographiques</u>
Description	Type	(d'après Bradley et al., 2012)
Dépôts côtiers du Tertiaire-Quaternaire (TQ).	Aquifère	Qa, Qd, Qf, Ql, TIM
Roches sédimentaires du Jurassique, Crétacé, et Quaternaire (JQ)	Aquifère	Nm, Qd
Roches sédimentaires du Carbonifère et Crétacé (CC)	Aquifère	Eg, Kd, Ou, Ai, Ci
Roches sédimentaires du Dévonien (D)	Aquifère	Tm, Id, Zm1, Zm2, Zm3, TmOg
Roches sédimentaires du Silurien (S)	Aquitard	Cn, Gb, Og, Th
Roches sédimentaires du Cambrien et de l'Ordovicien (CO1)	Aquifère	Oj, No, Hr, NoOj, Ti, Ec, Gh, Oh
Roches sédimentaires du Cambrien et de l'Ordovicien (CO2)	Aquitard	AY, Kn, Tk, Oj
Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque et du Cambrien (PC1)	Aquifère	Dj
Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque, du Cambrien, et roches magmatiques du Jurassique (PC2)	Aquitard	JbTe, JbTeNo, Jb, Az, Te, Ck1, Ck2, Md, Mg
Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (P1)	Aquifère	Ch, At1, So, An, Ahz, Aht, Ahb, Ah, Kg
Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (P2)	Aquifère	At2, Em1, Em2, Em, Et, Do
Roches magmatiques et métamorphiques allant du Paléoprotérozoïque jusqu'au Néoprotérozoïque (P3) - Ceinture des Mauritanides	Aquitard	Ga, GD, Fr, Gr, HDa, Ms, Gu, Guf, Ms, Agg, Hr, SB, MB
Roches magmatiques et métamorphiques du Mésoarchéen et du Néoarchéen, ainsi que du Paléoprotérozoïque (AP) – Bouclier de Rgueibat	Aquitard	Agb, AMa, AMc, AMf, AMg, AMgn, AMgr, AMs, GA, TSg, Trqf, TRf, Trg, Trk, Trla, Trle, Trm, TS, Apg

Tableau 3. Caractéristiques des unités hydrogéologiques.

Unités hydrogéologiques ¹	Pétrographie de la Formation ²	Bassin	Nature ³	Production ⁵ en %	Type	Transmissivité ⁶ (m ² hr ⁻¹)		
						Minimum	Maximum	Médiane
Dépôts sédimentaires côtiers d'âge Tertiaire et Quaternaire (TQ)	Grès terminaux continentaux, sable, gravier, carbonate de calcium	Côtier	Poreux	100	Aquifère	3,5E-05	2,6E-02	3,0E-03
Roches sédimentaires du Jurassique (JS)	Grès	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnue
Séquence sédimentaire de roches du Carbonifère, du Trias-Crétacé, du Quaternaire, et rhyolite du Cambrien (CR1)	Intrusions de dolérite [#]	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquitard	1,0E-08	2,5E-02	5,2E-06
	Grès [#]	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquifère	2,3E-06	2,8E-02	1,2E-04
	Schistes	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquitard	1,0E-08	1,0E-07	5,5E-08
Séquence sédimentaire de roches du Carbonifère, et du Trias-Crétacé (CR2)	Intrusions de dolérite [#]	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquitard	1,9E-06	2,5E-02	5,2E-06
	Grès [#]	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquifère	2,3E-06	2,8E-02	1,2E-04
	Schistes	Intérieur	Fracturé	Inconnue	Aquitard	1,0E-08	1,0E-07	5,5E-08
Roches sédimentaires du Silurien et du Dévonien (SD)	Groupe de l'Oued : grès (y compris ferrugineux), schistes, argilites, pélites ; Groupe de Tenemouj : grès, silts, argilites	Intérieur	Fracturé	5 à 45	Aquifère	Inconnu	Inconnu	Inconnue
Roches sédimentaires du Cambrien et de l'Ordovicien (CO)	Groupe d'Oujeft : grauwackes, jaspes, pélites (50%), quartzites, grès (50%) ; Groupe de la falaise d'Atar : calcaires (80%) ; Groupe de Nouati : grès, pélites (60%), schistes, dolomites (supérieures) (100%) ; Groupe de Teniagouri : jaspe, schiste, grès (local) silts, et schiste	Intérieur	Fracturé	65-85	Aquifère	4,4E-04	1,9E-03	1,2E-03
Roches sédimentaires allant du Néoprotérozoïque au Cambrien (N1)	Groupe de Des Jbeliat	Intérieur	Fracturé	5 à 45	Aquitard	inconnu	inconnu	inconnu
Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (N2)	Groupe de l'Affolle : Groupes d'Ajoun et d'Atrouss, grès (84 %), basal (62 %), autres ; Groupe de l'Assabet el Hassian : schiste argileux, silts, quartzite, schiste	Intérieur	Fracturé	45-65	Aquifère	5,8E-05	9,3E-04	8,0E-05
	Intrusion de dolérite (Sud)	Intérieur			Aquitard	1,5E-06	9,3E-04	8,0E-05

<u>Unités hydrogéologiques¹</u>	<u>Pétrographie de la Formation²</u>	<u>Bassin</u>	<u>Nature³</u>	<u>Production⁵ en %</u>	<u>Type</u>	<u>Transmissivité⁶ (m² hr⁻¹)</u>		
						Minimum	Maximum	Médiane
Roches sédimentaires de l'ère de Néoprotérozoïque (N3)	Grès, pélite, dolérite	Intérieur	Fracturé	80	Aquifère	2,3E-06	2,8E-02	1,2E-04
Roches carbonatées du Mésoprotérozoïque moyen (PC1)	Groupe d'Atar : dolomite et calcaire (80%)	Intérieur	Karst	45-65	Aquifère	Inconnu	Inconnu	Inconnue
Roches sédimentaires du Mésoprotérozoïque ; métasédimentaires, metabasalte, métarhyolite, et roches intrusives mafiques du Néoprotérozoïque (PC2)	Groupe d'Atar : schiste, quartzite, silts	Intérieur	Fracturé	45-65	Aquifère au Nord et au Sud ; Aquitard central	2,8E-04	1,2E-03	6,8E-04
Roches métavolcaniques et sédimentaires du Mésoarchéen et du Néoarchéen ; andésite, gneiss, granitoïdes, roches métasédimentaires et roches sédimentaires indifférenciées du Paléoprotérozoïque (PC3)	Connu sous le nom de groupe de Char du bouclier de Rgueibat : schiste, dolomite, silts, grès	Intérieur	Fracturé	0-5 %	Aquitard	2,8E-04	1,2E-03	6,8E-04
Séquence inconnue de roches (U1)	Inconnu	Intérieur	Inconnu	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnue
Séquence inconnue de roches (U2)	Inconnu	Intérieur	Inconnu	Inconnue	Inconnu	Inconnu	Inconnu	Inconnue
Mauritanie (ensemble des données)						4,0E-06	6,9E-02	2,1E-03

¹ Unités pétrographiques équivalentes entre parenthèses

² Annexe 1 : Échelles stratigraphiques.

^{3,4} Type et nature de l'aquifère déterminés sur la base d'essais de pompage proches de la surface (<100 m de profondeur) ; information extraite de la base de données Access SIPPE2.

⁵ Pourcentage de productivité des forages produisant de l'eau à un débit supérieur à 1 m³ hr⁻¹.

⁶ Valeurs de transmissivité (149) extraites de la base de données Access SIPPE2.

⁷ Valeurs de transmissivité caractéristiques des dolérites extraites de la base de données Access SIPPE2.

⁷ Valeurs de transmissivité caractéristiques des pélites extraites de la base de données Access SIPPE2.

⁹ Présence de dolérites, révélées grâce à l'interprétation d'images magnétiques aériennes filtrées.

4.3.3 – Roches sédimentaires du Carbonifère et du Crétacé (CC)

Cette unité hydrogéologique (CC) est associée avec les grès et les calcaires des groupes d'El Guettara (unités pétrographiques : Eg et Kd) et d'Ouarkiz (unité pétrographique : Ou) et le Carbonifère ; ainsi qu'avec les grès (unités pétrographiques : Aï et Ci) du Groupe Continental Intercalaire et le Jurassique. Ces roches affleurent dans la partie Nord du Bassin de Taoudéni, mais il n'y a pas d'informations disponibles sur leurs caractéristiques hydrauliques ou sur le niveau d'exploitation des eaux souterraines les concernant.

4.3.4 – Roches sédimentaires du Silurien et du Dévonien (S, D)

Ces unités hydrogéologiques sont associées à des roches qui se sont déposées pendant le Dévonien (D) et le Silurien (S). Les aquifères productifs sont associées avec les Groupes de Zemmour et de Tenemouj, appartenant au Dévonien (unités pétrographiques : Tm, Id, Zm1, Zm2, Zm3, et TmOg). Les affleurements de cette unité hydrogéologique, qui rejoignent le désert du Sahara au Nord et au Sud, recouvrent les roches siluriennes imperméables (unités pétrographiques : Og et Th) au niveau du Bassin Central de Taoudéni, aligné sur la frontière Est. Alors que les caractéristiques hydrauliques de l'unité du Dévonien, dominée par les fractures, sont inconnues, la probabilité de pouvoir mettre en place des forages avec des débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ dans les roches proches de la surface ($< 60 \text{ m}$), comme par exemple à Zemmour, est considérée comme bonne (60 %). En revanche, les groupes de l'Oued Chig et de Tenemouj, datant du Silurien (unités pétrographiques : Cn, Gb, Og, et Th) présentent des argilites, des argiles, et des silts, qui fournissent une base imperméable aux roches du Dévonien, et un plafond aux roches du Cambrien-Ordovicien (BURGÉAP, 2006).

4.3.5 – Roches sédimentaires du Cambrien à l'Ordovicien (CO1, CO2)

Ces deux unités hydrogéologiques sont associées aux roches sédimentaires déposées pendant le Cambrien et l'Ordovicien. Les affleurements sont orientés parallèlement à la Ceinture des Mauritanides et liés au désert du Sahara au Nord et au Sud. La première unité hydrogéologique (CO1) est caractérisée par des roches perméables du Cambrien, de l'intervalle Cambrien-Ordovicien, et de l'Ordovicien. Les roches du Cambrien sont associées au Groupe d'Oujeft (unité géologique : Oj) comprenant des grès de la formation de Beddamez, des grès et des quartzites de la Formation de Chinguetti, des grès et conglomérats de la Formation de Moudjéria, et avec le Groupe Nouatil (unité géologique : No) comprenant des dolomites et des calcaires des Formations d'Achram et d'Amogjar. De même, des roches aquifères allant du Cambrien à l'Ordovicien sont associées aux conglomérats, aux schistes, aux quartzites, et aux silts du Groupe d'El Harach (unité pétrographique : Hr). Au cours de l'Ordovicien, les grès et les quartzites du Groupe de Tichit (unité géologique : Ti) sont des unités productives. Les caractéristiques hydrauliques de cette unité, dominée par des fractures, incluent des valeurs de transmissivité de l'ordre de $4,4\text{E}-04$ à $1,9\text{E}-03 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. La probabilité de débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ dans ces roches est excellente (80 %) pour les calcaires du Groupe de la falaise d'Atar ; bonne (60 %) pour les pélites et intermédiaire pour les dolomites (9 %) du groupe Nouatil ; de 50 % pour les pélites, 50 % pour les grès, 76 % pour les dolomites du groupe d'Oujeft, et de 43 % pour les conglomérats et les quartzites du groupe d'El Harach. La deuxième unité hydrogéologique (CO2) comprend des argilites imperméables, des grès argileux et des argiles (BURGÉAP, 2006) du Groupe de Nouatil (AY, Kn, No, et Tk,) et du Cambrien, ainsi que des grès argileux et des quartzites associées aux Formations de Foum Nbeïka, de Terguent, d'Aghaoujeft et d'Oued Touerga de l'Ordovicien inférieur (unité

pétrographique : Oj). Bien qu'imperméables, leur nature discontinue et fracturée peut permettre des conditions semi-confinées, avec des échanges entre unités inférieures et supérieures.

4.3.6 – Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque au Cambrien, et roches magmatiques du Jurassique (PC1, PC2)

Ces deux unités hydrogéologiques sont formées de roches sédimentaires déposées dans l'intervalle allant du Néoprotérozoïque au Cambrien. Leurs unités de roches fracturées semblent affleurer parallèlement au Bouclier de Rgueibat dans le Nord, et sous forme de région rectangulaire adjacente au fleuve Sénégal au Sud. La première unité hydrogéologique (PC1) forme un aquifère composé de conglomérats, de pélites, de quartzite, de grès et de schistes du Groupe de Djonaba (unité géologique : Dj) avec une probabilité de 56 % (bonne) de production d'eau. Les caractéristiques hydrauliques de cette unité montrent des valeurs de transmissivité de l'ordre $2,3E-6$ à $2,8E-2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. En revanche, la deuxième unité hydrogéologique (PC2) forme un aquitard formé de grès argileux et de quartzites appartenant aux groupes d'Azlaf, de Jbéliat et de Téniaouri (unités pétrographiques : JbTe, JbTeNo, Jb, Az, Te, Ck1, et Ck2) ; et de roches intrusives du Jurassique, comme des dolérites et des diorites (unités pétrographiques : Md, et Mg) qui sont en grande partie imperméables (BURGÉAP), 2006. Le caractère de ces roches est généralement massif, mais si elles sont fracturées, elles présentent alors une probabilité de 38 % de produire de l'eau, dont on prévoit que 75 % puisse produire un débit supérieure à $10 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$. Bien que la nature fracturée et discontinue de ces roches puisse donner lieu à des conditions semi-confinées, avec des échanges entre les unités inférieures et supérieures. Les valeurs de transmissivité de cette unité reflètent la présence des intrusions de dolérite : $1E-8$ à $2,5E-2 \text{ m}^2 \text{ hr}^{-1}$.

4.3.7 – Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (P1, P2)

Ces deux unités hydrogéologiques sont formées de roches sédimentaires déposées durant le Néoprotérozoïque. La première unité hydrogéologique (P1) se compose principalement de grès affleurant dans le Sud du Bassin de Taoudéni, qui a subi un soulèvement syntectonique. La probabilité de mettre en place un forage productif est de 43% à 89% (bonne à excellente), mais varie selon le groupe et de la formation. Par exemple, la probabilité de production d'un débit supérieur à $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ est d'environ 75 % au sein Groupe Aioun (unité pétrographique : An), de 43 % dans le Groupe de l'Assabet el Hassiane (Formation de Taleb) (unités pétrographiques : Ah, Aht, Ahb, et Ahz), de 88 % dans le Groupe d'Atar (unité pétrographique : At1) comprenant les Formations de Foum Chor ; de 50-89 % dans le groupe de Char (unité pétrographique : Ch) comprenant la Formation d'Agueni ; (unité pétrographique : Ch), et de 48 % dans le Groupe de Naam Khaang, comprenant la Formation El Aguer (unité pétrographique : Kg). Les caractéristiques hydrauliques de ces grès incluent des valeurs de transmissivité entre $2,3E-6$ et $2,8E-2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. La deuxième unité hydrogéologique (P2) se compose principalement de calcaires et de dolomites associés à deux groupes : Atar (unité pétrographique : At2) comprenant les formations d'Azougui, d'Herbert, de Tod, de Touiderguilt, de Tifounke, de Terrariat, et d'El Mreïti (unités pétrographiques : Em1, Em2, Em, et Et) comprenant les formations d'Aguel el Mabha, Tourist, Tenoumer, Khatt, Gouamir, et Nesoar. Cette unité de roche karstique affleure seulement dans le Nord, parallèlement au Bouclier de Rgueibat. Les essais hydrauliques indiquent que les probabilités de débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ sont environ de 25 à 100 % (bonnes à excellentes) pour le Groupe d'Atar, de 50 à 89 % (bonnes à très bonnes) pour Groupe de Char et 38 % (bonnes) pour le Groupe d'El Mreïti. Les propriétés hydrauliques de cette unité hydrogéologique sont inconnues.

4.3.8 – Roches magmatiques et métamorphiques du Paléoprotérozoïque au Néoprotérozoïque (P3)

Cette unité hydrogéologique, appelée Ceinture des Mauritanides, se compose principalement de roches métamorphiques et magmatiques du Paléoprotérozoïque au Néoprotérozoïque présentant une orientation Nord-Ouest / Sud-Est. Dans la partie Nord, on trouve des schistes, des roches métavolcaniques et des rhyolites ; dans le Sud, on trouve des schistes présentant des intrusions granitiques. Le caractère hydraulique général de cette unité est un obstacle à la circulation régionale. C'est par exemple le cas à une distance d'environ 150 km à proximité de son centre, où les eaux souterraines sont contraintes d'adopter un écoulement vers le Nord ou vers le Sud.

Là où les conditions géologiques favorisent la circulation au travers des fractures, la probabilité d'obtenir débits dépassant $1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$ dans les schistes et granites est respectivement de 48 % et 65 %, avec une salinité $< 1 \text{ g/l}$. Les caractéristiques hydrauliques de cette perméabilité localisée, dominée par des fractures, indiquent des valeurs de transmissivité de l'ordre de $2,8\text{E}-04$ à $6\text{E}-03 \text{ m}^2 \text{ hr}^{-1}$. Parmi les schistes très productifs, il faut citer les Groupes d'El Fadra (unité pétrographique : Fr), ceux d'El Ghabra (unité pétrographique : Gr), ceux d'El Harach (unité pétrographique : Hr), ceux de Gadel (unité géologique : Ga), ceux d'El Mseigguem (unité pétrographique : Ms), ceux de Gueneiba (unités pétrographiques : Gu, et Guf), qui présentent une probabilité de succès de 40 à 47 % pour trouver des débits supérieurs à $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Parmi les autres roches présentant des taux de réussite de production d'eau souterraine locale de 21 % et 51 %, il faut citer des métasédiments, des métacarbonates et des roches métavolcaniques associées aux Groupes d'El Ghabra (unité pétrographique : Gr), et de Hajar Dekhen – Kleouat (unité géologique : HDa). De même, les chances de succès de produire de l'eau au sein du complexe intrusif métabasique du Cortège de Guidamaka (unités géologiques : GD, et Agg) est d'environ 19-41 %.

4.3.9 – Roches magmatiques et métamorphiques du Mésoarchéen au Néoarchéen, ainsi que du Paléoprotérozoïque (AP)

Cette unité hydrogéologique, connue sous le nom de Bouclier de Rgueibat, comprend à l'Ouest une formation géologique archéenne dominée par des gneiss et des roches granitiques, et à l'Est une formation géologique largement composée de roches métasédimentaires du Paléoprotérozoïque. Malgré l'intense fracturation de cette unité, la plupart des fractures semblent être reliées sans logique apparente, résultant en une productivité hétérogène, avec des chances de succès d'environ 0 à 45 %. Lorsque l'unité est productive, les valeurs de transmissivité s'échelonnent de $2,8\text{E}-4$ to $1,2\text{E}-3 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. Dans la plupart des secteurs, il n'y a aucune productivité, probablement en raison de propriétés hydrauliques de l'ordre $1\text{E}-8 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$. Pour cette raison, cette unité hydrogéologique est considérée comme un aquitard, à la base du centre interne du Bassin de Taoudéni, aligné sur la frontière Est de la Mauritanie.

Concernant les unités aquifères importantes, il faut citer les granites et granodiorites néoarchéennes à mésoarchéennes du Cortège de Tasiast (unités pétrographiques : TSb, TSg, TSt, et TS) avec une probabilité de productivité (supérieure à $1 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$) entre 0 à 45 % (profondeurs : de 47 à 72 m ; quantité : de $0,6$ à $3 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$; salinité : de 3 à 37 g/l) ; les gneiss mésoarchéens, et les schistes associés du Complexe de Tiris (unités pétrographiques : TRf, Trg, Trk, Trla, Trle, et Trm) avec une probabilité de 17 % pour la productivité (profondeur : de 15 à 131 m ; quantité : de 8 à $20 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1}$;

salinité : 5 à 60 g/l), ainsi que les gneiss, les granitoïdes et les roches métamorphiques du complexe d'Amsaga (unités pétrographiques : AMa, AMc, AMf, AMg, AMgn, AMs, Apg, et Agb), avec une probabilité de productivité de 21 % (profondeur : de 21 à 58 m ; salinité : < 2 g/l). D'importants ensembles formant des réserves d'eau sont constitués par les granites, les gneiss métasédimentaires, et les roches sédimentaires indifférenciées du Paléoprotérozoïque (unités pétrographiques : Pan, et Px), et comprennent également les rhyolites du groupe de Blekhzaymat (unités pétrographiques : BZm, et BZn) qui ont une probabilité de productivité de 40 % (profondeur : inconnue ; quantité : inconnue ; salinité : inconnue) et les granites du groupe de Bir Moghreïn qui ont une probabilité de productivité de 40 % et 28 % (profondeur : de 15 à 131 m ; quantité : de 1-8 à 20 m³ h⁻¹ ; salinité : de 5 à 60 g/l).

4.4 – Écoulement des eaux souterraines

Le mouvement des eaux souterraines de Mauritanie a été caractérisé sur la base de lignes d'écoulement orientées perpendiculairement aux lignes équipotentielles de charge hydraulique (Fig. 4). Les valeurs des charges hydrauliques (n=978) ont été calculées sur chaque lieu par soustraction des niveaux d'eau statique de la valeur des altitudes. Alors que les niveaux d'eau observés extraits de la base de données SIPPE2 (Friedel, 2008) avait fait l'objet de l'attribution de coordonnées spécifiques, les coordonnées des altitudes ont été interpolées à partir d'un modèle numérique d'altitude présentant des résolutions de 90 m. Ces valeurs estimées de la charge hydraulique ont été reportées graphiquement, et analysées à l'aide du SIG afin d'identifier les relations statistiques spatiales. L'absence de toute relation statistique spatiale des niveaux de charge hydraulique a empêché le développement d'un modèle de variogramme, et la détermination d'une variance de l'estimation par krigeage.

Un examen des voies d'écoulement des eaux souterraines a permis d'obtenir des informations sur la localisation des zones de recharge et de décharge, ainsi que sur les conditions d'écoulement aux frontières (comme les zones sans écoulement, les lignes de partage des eaux souterraines et les barrières hydrauliques). Prises dans leur ensemble, ces caractéristiques ont confirmé que le système d'écoulement des eaux souterraines de Mauritanie est bien décrit par un modèle présentant deux systèmes régionaux interconnectés : le Bassin Terminal Continental côtier poreux, et le Bassin sédimentaire intérieur fracturé de Taoudéni. L'eau souterraine de cinq secteurs de recharge distincts sortent du bassin de Taoudéni en adoptant trois directions générales : à l'Est vers le Mali, à l'Ouest vers le Bassin Terminal Continental, et au Sud vers le fleuve Sénégal. L'eau souterraine s'écoule dans le Bassin Terminal Continental à partir de l'Océan Atlantique et depuis deux zones de recharge localisées à l'intérieur du Bassin de Taoudéni. Une de ces zones de recharge est située au Nord-Est d'Atar, en bordure Nord-Ouest du Bouclier de Rgueibat (unité hydrogéologique PC2), et l'autre est centrée sur la ville de Tidjikja (unité hydrogéologique CO1). Le transfert des eaux souterraines du Bassin de Taoudéni au Bassin Terminal Continental intervient le long de deux lignes primaire d'écoulement qui sont déviées autour d'une barrière hydrologique de 150 km de long, et adoptent une orientation Nord-Ouest / Sud-Est, le long de l'axe de la Ceinture des Mauritanides (unité hydrogéologique P3), à l'Est d'Akjoujt. Certaines eaux souterraines de la deuxième zone de recharge s'écoulent vers le Nord-Ouest, puis s'orientent au Sud, à proximité d'une autre barrière hydrologique. Cette barrière orientée Nord-Ouest / Sud-Est présente une longueur d'environ 200 km (unité hydrogéologique JQ) et correspond avec le sommet d'une crête du Silurien-Dévonien séparant la Dépression de Maqteir du point bas du Bassin de Taoudéni, qui chevauche la frontière entre la Mauritanie et le

Mali. Une troisième zone de recharge des eaux souterraines dans le bassin de Taoudéni est présente au Sud (unité hydrogéologique PC2) entre les villes de Kiffa et d'Ayouun el-Atrouss. L'eau souterraine s'écoule à partir de cette zone vers le Sud, en trouvant finalement son exutoire dans le fleuve Sénégal. Les quatrièmes et cinquièmes secteurs de recharge alimentent en eau la partie basse du Bassin de Taoudéni, puis finalement le Mali : l'un d'entre eux se situe au centre du pays, dans le désert du Sahara, et un autre est situé à son angle Sud-Est. L'eau souterraine qui est pompée au niveau des deux champs de captage pour l'alimentation en eau du Bassin Terminal Continental (unité hydrogéologique TQ) apparaissent comme deux zones de décharge : 100 km à l'Est de Nouakchott et à 165 km au Sud-Est de Nouakchott. Au cours de cette étude, aucun enregistrement de pompage des puits mauritaniens n'a été fourni.

4.5 – Qualité des eaux souterraines

Une carte hydrogéologique chimique a été construite pour illustrer la présence et la répartition de la qualité de l'eau en Mauritanie (Fig. 4). Un choix d'éléments dissous indicateurs de la qualité de l'eau ainsi que des paramètres de base concernant l'eau ont été analysés en fonction de leur présence et de leur distribution à travers le pays. Les paramètres chimiques ont inclus bicarbonate, nitrate et sulfate. Les paramètres de l'eau pris en compte ont pour leur part inclus la conductivité électrique (salinité) et l'oxygène dissous. Un tableau regroupant les statistiques est fourni pour chaque élément cartographié et pour chaque paramètre aqueux (Tableau 4). Les données sont en nombre limité, et sont affectées par une distorsion spatiale, car la plupart des échantillons ont été prélevés dans le Bassin Terminal Continental et dans les parties Sud des unités hydrogéologiques affleurant au sein du Bassin de Taoudéni.

Un objectif important de cette étude était d'identifier les régions potentielles présentant une eau de qualité suffisante pour l'alimentation publique en eau potable. C'est la raison pour laquelle la présence et la distribution de la salinité des eaux souterraines mauritaniennes ont été cartographiées. Puisque la majorité des sites de surveillance de l'eau souterraine ($n = 796$) mesure la conductivité électrique (CE), mais pas les solides dissous totaux (SDT), ces valeurs de CE ont été converties en valeur équivalente de la salinité par l'utilisation d'une relation de régression. La relation qui permet de convertir la CE en SDT repose sur l'application du processus de régression pour adapter une équation aux mesures de CE ($n = 128$) qui avaient été en même temps fait l'objet d'un prélèvement d'échantillons et analysés pour les SDT. Après la conversion des valeurs de CE en SDT, elles ont été reportées graphiquement et des courbes de niveau ont été tracées, révélant une intrusion importante d'eau salée provenant de l'Océan Atlantique au niveau du Bassin Terminal Continental (unité hydrogéologique TQ). Un gradient de salinité intervient en allant vers l'intérieur, sur une distance d'environ 100 km, et délimite différentes catégories : douce ($< 1\ 000\ \text{mgL}^{-1}$), chargée ($1\ 000 - 5\ 000\ \text{mgL}^{-1}$), très chargée ($5\ 000 - 15\ 000\ \text{mg L}^{-1}$), saline ($15\ 000 - 30\ 000\ \text{mg L}^{-1}$), eau de mer ($30\ 000 - 40\ 000\ \text{mg L}^{-1}$) et saumure ($40\ 000 - 300\ 000\ \text{mg L}^{-1}$). Deux autres plus petites zones présentent également des concentrations salines élevées. Ces zones d'eau chargée sont situées dans le Sud du bassin central de Taoudéni (unité hydrogéologique PC2), à l'Ouest de Kiffa, et entre Kiffa et 'Ayouun el Atrous (unité hydrogéologique P1). Les courbes de niveau correspondant à une salinité élevée semblent allongées sur une orientation Nord-Sud, correspondant avec des lignes d'écoulement de décharge vers le fleuve Sénégal. En dehors de ces trois zones, la majorité de l'eau souterraine de la Mauritanie est douce.

Tableau 4. Statistiques pour chaque élément cartographié et pour chaque aqueux paramètre.

Statistique	Bicarbonate	<u>Éléments dissous</u>			<u>Paramètres</u>
		Nitrate	Sulfate	Solides dissous solides ^a	oxygène dissous
Nombre d'échantillons	281	391	196	746	22
Minimum (mg L ⁻¹)	2	0 (11) ^b	0 (14)	1	0 (3)
Maximum (mg L ⁻¹)	896	115	1 900	35 000	17,6
Moyenne (mg L ⁻¹)	242,2	4,9	96,8	3 952	4,6
Ecart-type (mg L ⁻¹)	44	11,8	195,3	9 867	3,8
Médiane (mg L ⁻¹)	189	1,15	35,1	542	4

^aLes matières solides dissoutes sont estimées en utilisant une relation de régression non-linéaire pour 285 échantillons.

^bLa parenthèse indique le nombre de valeurs à la limite ou en dessous du seuil de détection

5 – Cibles de ressources en eau

Ce chapitre identifie les nouvelles cibles de ressources en eau pour un développement du potentiel pouvant contribuer aux besoins d'approvisionnement pour l'exploitation minière et l'alimentation publique en eau potable de Mauritanie. Le choix de ces objectifs est basé sur une association des données de productivité des forages, des interprétations géophysiques comprenant le degré de fracturation, l'absence de filons intrusifs en sous-sol, et la qualité de l'eau.

1. Roches sédimentaires du Jurassiques, du Crétacé, et du Quaternaire (unité hydrogéologique : JQ)

Il n'existe actuellement aucune information sur l'hydraulique ou sur la production qui soient disponibles pour cette unité hydrogéologique. Toutefois, des études géophysiques et hydrogéologiques de cette unité ont montré plusieurs caractéristiques intéressantes, laissant entendre qu'il s'agit d'une cible importante de ressource en eau. Tout d'abord, l'étude magnétique par avion a montré que le Sud-Est est relativement peu profond, et ne présente pas d'intrusions de dolérite. Le fait que les grès soient présents sous le sable des dunes indique qu'ils doivent bénéficier d'une recharge périodique. En second lieu, les études électriques et de résonance magnétique nucléaire indiquent que la moitié Est doit être privilégiée parce ce qu'elle semble saturée. En troisième lieu, les études de qualité indiquent que l'eau présente dans cette région est de l'eau douce.

2. Roches sédimentaires du Cambrien et de l'Ordovicien (unité hydrogéologique : CO1)

L'anomalie de gravité régionale négative, associée avec la fracturation de cette unité et l'absence de filons intrusifs sur la carte magnétique par avion, confirment que cette unité est une cible de grande valeur pour des ressources en eau. Au Nord, les valeurs de gravité augmentent, ce qui indique peut-être une fracturation moins intense ; toutefois l'épaisseur de cette unité augmente vers le nord, ce qui accroît le volume total potentiel à explorer. Cette région demeure relativement inexploitée et par conséquent peut se révéler intéressante pour l'industrie minière.

3. Roches sédimentaires du Néoprotérozoïque (unités hydrogéologique : N3)

Alors que les roches carbonatées associées à cette unité hydrogéologique ont montré la plus grande productivité de toutes les unités, peu d'exploration a lieu dans le Nord, peut-être à cause de son éloignement, et aussi parce que l'essentiel est situé sous le sable des dunes. Étant donné que le sable des dunes est relativement mince (entre 0 et 100 m) dans les zones adjacentes au Bouclier de Rgueibat, la production au niveau de l'affleurement Sud non couvert est d'environ 80 %, et ses propriétés hydrauliques sont parmi les plus meilleures des unités de roches fracturées du bassin de Taoudéni. Il s'agit d'une bonne cible pour l'exploration de la ressource en eau. Les deux importantes anomalies gravitaires négatives au Sud semblent indiquer des roches de relativement faibles densités qui sont probablement dues à une intense fracturation et/ou des failles locales ; toutefois l'épaisseur estimée est relativement faible, et l'unité ne présente probablement que des ressources moyennes par rapport aux autres unités hydrologiques.

6 – Stratégies de modèles de développement

Le développement futur d'un modèle d'écoulement et de transport de l'eau souterraine nécessitera plusieurs étapes : conceptualisation, paramétrage, calibration, validation et analyse prédictive. Dans le cadre de la présente étude, le développement conceptuel d'un modèle pour les bassins aquifères côtiers et intérieurs est possible en examinant l'extension spatiale des unités sur la carte hydrogéologique. Une estimation de la profondeur des différentes unités peut être obtenue à partir de l'interprétation géophysiques et des données de forage. Le paramétrage du modèle demande la définition d'un quadrillage numérique qui rende compte de la répartition spatiale de la valeur des paramètres. La modélisation des flux nécessite l'affectation de la valeur des propriétés hydrauliques (par exemple la transmissivité ou la conductivité hydraulique, ou encore la capacité de stockage). Le modèle de transport des éléments nécessite des valeurs pour les paramètres de transport (comme la porosité, les coefficients de répartition, la capacité de dispersion et la densité). Pour ces valeurs de paramètres de flux et de transport, une des possibilités est de générer une distribution spatiale aléatoire pour chaque propriété connue, en supposant une distribution log-normale, de façon à refléter le caractère aléatoire et hétérogène de la production des roches fracturées. Une description statistique pour certaines valeurs des propriétés hydrauliques est présentée au sein des Tableaux 1 et 4. Certaines valeurs de propriétés hydrauliques et de transport sont inconnues, et doivent être déterminées à partir d'essais complémentaires sur le terrain, ou de valeurs disponibles dans la littérature.

Les conditions aux limites doit être appliquées aux cellules du quadrillage de façon à ce que les variables dépendantes changent à partir de l'équilibre statique. Certaines conditions spatiales et temporelles courantes aux limites incluent la recharge affectée à la couche supérieure du modèle, une charge hydrostatique constante, et/ou une circulation le long des limites verticales, ainsi que le rythme de prélèvement au niveau des puits. En Mauritanie, une approximation d'état stationnaire du premier ordre de la recharge pourrait indiquer une valeur annuelle négative, en raison du fait que l'évaporation est de 1-2 ordre(s) de grandeur plus grande que les précipitations. En réalité, toutefois, certains lieux présentent au niveau du Bassin de Taoudéni une recharge régionalement concentrée. De même, toutes les recharges concentrées ne peuvent pas apparaître de manière évidente en raison de l'échelle de la carte hydrogéologique et des hypothèses formulées pour

l'établir. Dans les deux cas, cependant, une étude plus approfondie est nécessaire pour confirmer l'emplacement, le volume et l'importance de la recharge concentrée. Le flux approximatif au niveau de la limite verticale doit aussi être calculé.

Pour un modèle d'écoulement stationnaire de l'eau souterraine, des valeurs approximatives des conditions de flux au niveau des limites verticales peuvent être calculées à partir de la surface équipotentielle (voir la carte hydrogéologique) et la moyenne géométrique des valeurs de transmissivité de couche le long de cette frontière. À l'échelle de la carte hydrogéologique, seules deux zones de décharge du système d'écoulement du Bassin Terminal Continental sont clairement identifiables. Ces zones de décharge doivent être spécifiées dans le modèle, et les rythmes de pompage annuels doivent être déterminés à partir des enregistrements existants et affectés en tant que conditions internes aux limites.

Après la conceptualisation et le paramétrage, le modèle doit être étalonné et validé, de même que l'incertitude sur ses prédictions doit être analysée. Pendant le calibrage du modèle stationnaire, d'importantes variables dépendantes doivent être dupliquées afin d'inclure les champs de charges hydrauliques régionales, les circulations internes et aux limites, ainsi que les niveaux d'eau dans les puits désignés.

7 – Références

- Bedinger, M.A., Sargent, K.A., et Langer, W.H., 1989, Studies of geology and hydrology in the Basin and Range Province, southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste-characterization of the Death Valley region, Nevada, and California: U.S. Geological Survey 43 p.
- Bernard, J. Diagona, B., et Ricolvi, M., 1999, Combination of electrical resistivity and magnetic resonance sounding data for mapping an aquifer layer in Mauritania, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 23(1).
- Blanchot, A., 1975, Plan minéral de la République Islamique de Mauritanie : BRGM, 564 p.
- Bradley, D., Motts, H., Horton, J., et Taylor, C., 2012, Geologic Map of Mauritania : U.S. Geological Survey Open File Report XXXX, 2 pp.
- BURGÉAP, 2006, PRISM II: Second project of strengthening of the institutions of the Mining Sector – An evaluation of the hydrogeologic studies in Mauritania at 1:500,000, 86 p.
- Dassargues, A., 2006, PRISM II: Second project of strengthening of the institutions of the Mining Sector – An evaluation of the hydrogeologic studies : Présentation lors d'une rencontre PRISM II, Sabah Hotel, Nouakchott, Mauritanie.
- Friedel, M.J., 2008, Inventory and review of existing PRISM hydrogeologic data for the Islamic Republic of Mauritania, Africa, USGS Open File Report, 2008-1138, 51 pp.
- République Islamique de Mauritanie, Ministère des Mines et de l'Industrie, 2007, Hydrostratigraphic traps and reservoirs.
- Maxey, G.B., 1968, Hydrogeology of desert basins : Groundwater, v. 6, no. 5, p. 10-22.
- Phillips, J.D., 2002, Two-step processing for 3D magnetic source locations and structural indices using extended Euler or analytic signal methods : Society of Exploration Geophysicists, 2002, Technical Program Expanded Abstracts, 4 p.
- Roussel, J., et Lesquer, A., 1991, Geophysics and the crustal structure of west Africa, dans Dallmeyer, R.D., et Lecorche, J.P., édés., The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives : Berlin, Springer-Verlag, p. 9-28.