

Influence du système de drainage sur la vulnérabilité à la pollution des aquifères du bassin de Tim Mersoï, Nord Niger

Boubacar ABDOU BOKO¹, Moussa KONATÉ^{1*}, Rabani ADAMOU² et Alassane ABDOULAYE²

¹ Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire Eaux Souterraines et Géoressources, BP 10662, Niamey, Niger ² Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie, Laboratoire Matériaux-Eaux-Environnement (LAMEE), BP 10662, Niamey, Niger

* Correspondance, courriel : *konate.moussa@gmail.com*

Résumé

Cette étude porte sur la vulnérabilité de quatre aquifères (Guézouman, Tarat, Izégouande, Téloua) du bassin de Tim Mersoï, situé dans le Nord Niger. Une cartographie des zones potentielles de recharge a été effectuée en utilisant les techniques de SIG et de la Télédétection. Il ressort de cette étude que les principaux facteurs dans le processus de recharge sont : la lithologie ; la fracturation, le réseau hydrographique, la pente et l'occupation des sols. La pondération et la combinaison de ces facteurs ont permis de déterminer que 31 % de la zone d'étude possède un potentiel de recharge élevé à très élevé. Tandis que 43 % du secteur d'étude a un potentiel de recharge faible à très faible. Les teneurs mesurées en nitrates dans les quatre aquifères ont permis de valider la carte des zones potentielles de recharge, traduisant ainsi, que les zones à fort potentiel de recharge sont les plus vulnérables à la pollution.

Mots-clés : bassin de Tim Mersoï, recharge, SIG, eaux souterraines, pollution.

Abstract

Influence of the drainage system on vulnerability to pollution of aquifers in Tim Mersoï basin, North Niger

This study focuses on the vulnerability of four aquifers (Guézouman, Tarat, Izégouande, Téloua) in the Tim Mersoï Basin located in North Niger. Potential Recharge areas mapping was carried out using GIS and Remote Sensing technics. The main factors intervening in the recharge process are : lithology, fracturing, drainage system, terrain slope and Land Use / Land Cover. The weighting and combination of these factors determined that 31 % of the study area has high to high very recharge potential, while 43 % has a low to very low recharge potential. The nitrates rates in the four aquifers validated the potential recharge map, indicating that areas with high recharge potential are the most vulnerable to pollution.

Keywords : Tim Mersoï basin, recharge, GIS, groundwater, pollution.

1. Introduction

Depuis plusieurs décennies, le bassin de Tim Mersoï, particulièrement dans la région d'Arlit, fait l'objet d'une exploitation minière sollicitant directement ou indirectement les différentes nappes (Guézouman, Tarat, Izégouande, Téloua) de la région [1]. Par ailleurs, dans le cadre des travaux d'extraction et de traitement du minerai uranifère, des quantités importantes de contaminants sont utilisées, La surexploitation de ces aquifères fossiles d'une part, et l'utilisation des contaminants d'autre part, pourraient favoriser non seulement l'épuisement des réserves d'eaux souterraines, mais aussi impacter durablement sur leur qualité [2 - 5]. Le degré de vulnérabilité de ces aquifères du bassin de Tim Mersoï pourrait dépendre de plusieurs facteurs : la nature du contaminant, le système de drainage (lithologie, fracturation, occupation des sols, pente, réseau hydrographique) et la drainance relative aux échanges verticaux entre nappes [2 - 4, 6]. L'objectif de cette étude consiste à évaluer la vulnérabilité naturelle et anthropique des aquifères du bassin de Tim Mersoï. De manière spécifique il s'agit de : cartographier puis de déterminer les zones potentielles de recharge.

2. Méthodologie

2-1. Contexte géologique et hydrogéologique

2-1-1. Grands traits de l'histoire géologique

Le bassin de Tim Mersoï est caractérisé par un remplissage essentiellement détritique, discordant sur le socle précambrien de l'Aïr *(Figure 1).* Dans la région d'Arlit, l'épaisseur maximale des dépôts est d'environ 1800 m [7]. De nombreux repères paléontologiques et surfaces de discontinuité majeure permettent de conclure que le remplissage de ce bassin s'est réalisé en cycles successifs, du Cambrien jusqu'au Crétacé inférieur [7 - 10].



Figure 1 : Localisation du bassin de Tim Mersoï dans la synéclise des Iullemeden (A). Carte géologique du bassin de Tim Mersoï le long de la bordure occidentale du Massif de l'Aïr [7, 9, 11- 13] (B)

Les données cartographiques de la bordure occidentale de l'Aïr *(Figure 1)*, couplées à celles du terrain montrent clairement que le bassin de Tim Mersoï est structuré en une gouttière synclinale, d'échelle régionale, affectée par des accidents cassants (failles), mixtes (flexures-failles), ou par des déformations plicatives de faibles amplitudes, associés à des discordances progressives [13 - 16]. Les formations géologiques sont faiblement inclinées vers le Sud-Ouest, de 5 à 10° en moyenne. Elles affleurent en auréoles concentriques appuyées sur les contreforts de l'Aïr à l'Est *(Figure 1)*. Les structures plissées secondaires sont peu accusées avec des axes d'orientation Sud-Ouest-Nord Est [7, 14 - 17]. Deux grands ensembles lithostratigraphiques peuvent être distingués dans la région d'Arlit [7 - 9, 13, 16].

- Les formations grises d'âge Carbonifère supérieur (*Figure 2*). Elles sont constituées par des alternances de grès, de siltites et d'argilites, déposées dans un environnement margino-littoral réducteur (fluviatile, deltaïque et estuarien);
- Les formations rouges d'âge permien à jurassique (Figure 2). Elles comprennent des alternances de grès, de siltites, d'argilites et de carbonates, déposées dans un environnement continental et oxydant (fluviatile et lacustre).

RES	RIODES	PÉRIODES ÉPOQUES		GROUPES		FORMATIONS OU UNITÉS		COLONNE LITHOLOGIQUE			DESCRIPTION SOMMAIRE DES FACIÈS	PRINCIPALES NAPPES
1	PÉ					ETECHELL		Arg.	Grés Calc.	Cgt.		
Γ	Juras-	sique	sup. noy. inf	Grès.	gadez	F. Abinky F. Tchirezrine 1	1600	0. 	0 0		Analcimolites et grès conglo- mératiques à bois silicifié	
PALÉOZOÏQUE SUPÉRIEUR	1	Trias			D'A	F. Teloua 2 F. Teloua 1	- 1400			Grès grossiers, conglomé- ratiques à la base	Nappe de Téloua	
	D			-nog	ane	F. Moradi					Argilites rouges à chenaux d'arkose	
	F	-11110		Izé	and	F. Izégouande	- 1200)	Grès calcaires à lentilles d'argilites rouges	Nappe d'Izégouande
		nuro-	Vestph	igora	sup.	U. Arlit Madaouéla				3	Grès fins argileux Alternance de grès et d'argilo- siltites	
		Van				Tarat				Col	Grès grossiers et argilo-siltites	Nappe de Tarat
	0	~		Ta	<u>ب</u>	Blanchâtre	- 1000			Argilites et grès argileux		
	fere				ii.	Guézouman		111	1.		Grès avec conglomérats à la base	Nappe de Guézouman
	Carboni	Viséen	sup.	a cin	.dne p	Unité d'Akokan F. Talak	- 800				Bancs gréseux parfois en blocs basculés Argilites noires feuilletées à niveaux gréseux fossilifères	
		То	inf. Fourn.		Intan	Farazekat moy. inf.		2.22 2.22 2.22			Argilites à dropstones, grès à rides Grès grossiers passant aux tillites Grès grossiers	Nappe de Farazékat
	<u>.</u>	u	sup.	da		Amesgueur	- 600				Dalle à Spirophyton Argilites Grès	
	Dé l	nie	noy.	éra	éra	Touaret					Psammites fossilifères	
			inf.	H		Idekel		4		Grès à bois silicifié		
	;	Silurien			hist	tes à Graptolites	400				Schistes calcaires à graptolites	
PALÉOZOÏQUE			Ordovicien		_	F. d'In-Azaoua				1	Schistes argileux et grès fins à rares tigillites	
	NFÉRIEUR	Cambro-		In-Azaoua		Tindi	- 200	1 1 1 1			Alternance de grès à tigillites et d'argilo-siltites	
						Timesgar	0 m	9 22 24			Conglomérats à intercalation de grès micacés	
PRÉCAMBRIEN											Socle granito-gneissique	

Figure 2 : Colonne lithostratigraphique du bassin de Tim Mersoï à la bordure occidentale de l'Air, montrant les différentes nappes (D'après [7, 12, 13], modifié)

2-2. Contexte hydrogéologique

2-2-1. Principales nappes et leur vulnérabilité

L'hydrogéologie du bassin de Tim Mersoï est marquée par l'existence de cinq nappes fossiles comprenant de la base au sommet *(Figure 2)*: la nappe de Farazekat, la nappe de Guézouman, la nappe de Tarat, la nappe d'Izégouande et celle de Téloua [17]. Cependant, la nappe de Farazekat, n'affleurant qu'à la bordure occidentale de l'Air, c'est-à-dire hors de la zone d'étude, n'a pas été investiguée. Les nappes captives de Guézouman et du Tarat sont contenues dans les formations gréseuses hôtes des minéralisations uranifères exploitées respectivement par la COMINAK et la SOMAIR [18]. La nappe d'Izégouande peu profonde, dont le réservoir est formé par des grès arkosiques, grossiers à niveaux et à passées microconglomératiques, est plus étendue que les précédentes. Cet aquifère à nappe libre est limité au Nord et à l'Est par les limites de ses affleurements, tandis qu'à l'Ouest et au Sud son extension se poursuit au delà de la zone d'étude *(Figures 2 et 3)*[7, 15, 19]. Le réservoir de l'aquifère à nappe libre de Téloua, le moins profond, constitué de grès généralement grossiers et parfois microconglomératiques, n'affleure qu'à l'Ouest de la flexurefaille d'Arlit [7, 20]. Des études récentes ont montré que le comportement hydrodynamique et hydrochimique des aquifères de la zone occidentale du bassin de Tim Mersoï est fortement influencé par la lithologie des réservoirs (variations latérales de faciès et d'épaisseur), le système de fracturation et les activités d'origines anthropiques [1, 20, 21].

265

2-3. Approche méthodologique

La méthodologie utilisée est l'analyse multicritère qui considère que la recharge est fonction d'un certain nombre de facteurs (ou critères) interactifs qui interviennent et influencent à des degrés différents le processus de transferts de contaminants [22]. Ces facteurs sont entre autres : l'occupation du sol, la densité de fracturation, la densité du réseau hydrographique, la lithologie, la pente du terrain. L'organigramme *(Figure 3)* résume la démarche méthodologique utilisée. Par la suite, des données d'analyses chimiques des teneurs en nitrates des forages ont été utilisées pour la validation de la carte des zones potentielles de recharge.



Figure 3 : Organigramme de l'approche méthodologique

3. Résultats et discussion

3-1. Evaluation des zones potentielles de recharge

Il ressort de cette étude que la lithologie, la densité de fracturation, la densité du réseau hydrographique, la pente du terrain et l'occupation du sol constituent les facteurs les plus déterminants dans le processus de recharge des aquifères du bassin de Tim Mersoï. En effet, ces facteurs sont souvent considérés comme étant les plus importants dans le processus de recharge surtout en contexte sédimentaire [23, 24].

3-1-1. Impacts de la lithologie sur la recharge

266

Les caractéristiques hydrogéologiques (perméabilités et transmissivités) des différents aquifères étudiés (Guézouman, Tarat, Izégouande, Téloua) ont permis d'évaluer et de pondérer la contribution des différentes lithologies dans le processus de recharge. Cela a conduit à l'établissement de la carte indiciaire de la capacité d'infiltration de la zone d'étude *(Figure 4)*. Ainsi, à l'inverse des formations argileuses (argilites de Tchinezogue, de Talak, et de Madaouéla), les formations gréseuses (grès de Guézouman, de Tarat et d'Izégouande) à indice lithologique important, présentent une forte capacité d'infiltration. Il apparait ainsi que la lithologie affecte la recharge des nappes [1, 22, 24]. En effet, elle contrôle de manière significative le processus d'infiltration [1, 24]. Elle influence non seulement l'écoulement de l'eau souterraine mais également le ruissellement de surface.



Figure 4 : Carte indiciaire de la capacité d'infiltration en fonction de la lithologie

3-1-2. Impacts du réseau hydrographique sur la recharge

Le traitement d'une image radar (MNT) de résolution moyenne 30 m x 30 m a permis de représenter le réseau hydrographique de la zone d'étude *(Figure 5).*



Figure 5 : Réseau hydrographique extrait de l'image radar SRTM (MNT)

Le réseau hydrographique ainsi obtenu, a permis d'établir la carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la densité de drainage *(Figure 6)*. L'indice de drainage est un paramètre théorique qui est fonction : (i) du poids du facteur ou densité de drainage réparti en cinq classes (très élevée, élevée, modérée, faible très faible) et ; (ii) de la cote, importance relative de chaque classe.



Figure 6 : Carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la densité de drainage

Sur la carte indiciaire, les zones à indice de drainage faible (valeur 3) moyen (valeur 10 à 12) et fort (valeur) correspondent inversement à des densités de drainage forte, moyenne et faible. Il existe en fait, une étroite relation entre le réseau hydrographique et la lithologie [22 - 27]. En effet, les densités de drainage élevées correspondent aux zones moins perméables (argilites), alors que les densités de drainage faibles sont liées aux zones plus perméables, à capacités d'infiltration importantes (grès) [22 - 24]. Le réseau hydrographique est l'un des indicateurs importants des caractéristiques hydrogéologiques. Plus il est dense, moins l'infiltration est importante. La relation infiltration-ruissellement est contrôlée par la perméabilité qui dépend elle-même de la lithologie [6, 22, 24].

3-1-3. Impacts de la densité de fracturation sur la recharge

268

L'exploitation des cartes structurales, de données d'interprétation de sondage géophysique et diagraphique ont permis d'établir la carte de fracturation pondérée en une carte de densité de fracturation *(Figure 7)*. Celle-ci est évaluée relativement à son influence dans le processus de recharge.



Figure 7 : Carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la densité de fracturation

Sur la carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la densité de fracturation, les zones à indice de fracturation faible (valeur 4), moyen (valeur 13 à 16) et fort (valeur 20) correspondent respectivement à des zones à capacité d'infiltration faible, moyenne et forte. Ainsi, deux systèmes de fracturation pourraient influencer la recharge : le système Nord-Sud représenté par la faille d'Arlit, et le système N30° à N40° correspondant à la faille de Madaouéla *(Figure 7).* Il ressort de cette étude que la fracturation représente un indicateur important de recharge potentielle. En effet, une densité de fracturation élevée implique généralement une porosité secondaire importante [22, 25, 28, 29].

3-1-4. Impacts de l'occupation du sol sur la recharge

La carte d'occupation du sol *(Figure 8 b)* est déduite du traitement de l'image satellite Landsat 7 ETM + (30 m x 30 m) *(Figure 8 a)*.



Figure 8 : Composition colorée 531 de Landsat ETM + (a) et carte d'occupation de sol (b)

Les différents éléments de l'occupation du sol de la zone d'étude qui sont entre autres : les carrières, les verses et les bassins (bassins d'eaux chaudes, bassins de décantation), les oueds, les habitations, les jardins et les sols nus ont été déterminés en réalisant les compositions colorées 742 et 531. Cette carte d'occupation du sol a permis de générer la carte indiciaire de capacité d'infiltration selon l'occupation du sol *(Figure 9)*.



Figure 9 : Carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon l'occupation du sol

Les plus forts indices de capacité d'infiltration (valeur 25) ont été observés dans les mines à ciel ouvert ou souterraines des sociétés minières de la région. La présence d'ouvrages miniers (carrières, gros trous, bassins d'effluents, etc.) expliquerait cette capacité d'infiltration importante. Les villes minières d'Arlit et d'Akokan sont situées dans des zones à infiltration relativement faible (valeur 5). Ainsi, contrairement à la pollution industrielle observée dans des zones vulnérables, la pollution urbaine impacterait moins sur la qualité des eaux souterraines. L'occupation du sol est un facteur important susceptible d'affecter le processus de la recharge et par conséquent la qualité des eaux souterraines [1, 22, 30].

3-1-5. Impacts de la pente du terrain sur la recharge

270

La carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la pente a été déduite d'une image radar moyenne résolution (MNT) 30 m x 30 m *(Figure 10)*.



Figure 10 : Carte indiciaire de la capacité d'infiltration selon la pente du terrain

La carte de pente ne montre pas de contrast topographique important *(Figure 10)*. Par conséquent, dans la zone d'étude, la topographie du terrain affecterait fortement le processus d'infiltration et faiblement le ruissèlement [1, 24 - 27].

3-1-6. Elaboration de la carte de recharge potentielle

Les cartes indiciaires *(Figures 4, 6, 7, 9 et 10)* ont été combinées en prenant en compte le pourcentage d'influence de chaque critère sur la recharge pour établir la carte de zones potentielles de recharge *(Figure 11)*. Ainsi, une classification des zones de recharge en cinq classes allant de très faible à très élevée a été réalisée.



Figure 11 : Carte de zones potentielles de recharge des aquifères de la région d'ARLIT

Compte tenu de leurs poids plus élevés comparativement aux autres facteurs (pente du terrain et réseau de drainage), la lithologie, l'occupation du sol et la fracturation représentent les facteurs les plus importants influençant l'infiltration. Ces résultats montrent que 31 % de la zone d'étude possèdent un potentiel de recharge élevé à très élevé. Cela pourrait être lié entre autres à la présence des alluvions, des grès perméables, à la densité importante de la fracturation, mais également, à la présence des carrières à ciel ouvert. Il faut également souligner que les zones à potentiel de recharge élevé se trouvent au niveau des mines à ciel ouvert de la SOMAÏR et à proximité des grands bassins (bassins eaux chaudes, bassins de productions, bassins de décantation) des deux sociétés *(Figure 11)*. Par ailleurs, 26 % de la zone d'étude possèdent un potentiel de recharge modéré pouvant s'expliquer par la présence d'une lithologie gréso-argileuse présentant d'importantes variations de faciès *(Figure 11)*. Ces zones à potentiel de recharge modéré pourraient en partie être liées à la présence de jardins irrigués par des eaux usées pouvant percoler à travers la zone non saturée pour atteindre les nappes [1, 20]. Enfin, 43 % de la zone d'étude possèdent un potentiel de recharge modéré peurgé faible à très faible *(Figure 11)*. Ce qui serait lié à la lithologie argileuse, à la présence de sols peu perméables et aux infrastructures susceptibles de réduire la perméabilité. Ces zones à faible potentiel de recharge se rencontrent au niveau des villes d'Arlit et d'Akokan.

3-2. Validation des zones potentielles de recharge

Pour la validation des zones de recharge, le traceur choisi est le nitrate. En effet, à la différence des autres contaminants potentiels, le nitrate n'interagit pas avec l'encaissant et est facilement transportable par les eaux d'infiltration jusqu'à la nappe [28, 30]. Les résultats des teneurs en nitrates des eaux des principales nappes de la zone (Guézouman, Tarat, Izégouande et Téloua) ont été utilisés en vue de la validation de la carte des zones potentielles de recharge (*Figure 12*).



Figure 12 : Carte de validation des zones potentielles de recharge établie à partir des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la zone

La carte de validation *(Figure 12)* montre que pour les huit (8) ouvrages ayant des teneurs en nitrates largement supérieures à la norme OMS (50 mg / L), six (6) d'entre eux sont localisés dans les zones à potentiel de recharge modéré à très élevé. Les déviations observées relatives aux ouvrages ayant des teneurs en nitrate de 180 et 470 mg / L, localisés respectivement sur des zones à faible et à très faible potentiel de recharge *(Figure 12)*. Cela s'expliquerait par les activités minières dans la zone et par la présence des fractures importantes (faille d'Arlit). Ce résultat met en exergue le rôle de drain potentiel de transfert de contaminants que pourrait jouer l'importante zone de la faille majeure d'Arlit [1,19 - 21].

4. Conclusion

L'élaboration des cartes des zones potentielles de recharge a montré la vulnérabilité des aquifères du bassin de Tim Mersoï. La validation de la carte des zones potentielles de recharge par les teneurs en nitrates des aquifères de la zone confirme que les secteurs les plus vulnerables sont ceux qui présentent un potentiel de recharge élevé. Il a été établit que le processus de transferts de contaminants est principalement contrôlé par trois facteurs : l'occupation des sols, le système de fracturation et la lithologie.

Références

- [1] R. ADAMOU, A. ABDOU MOUMOUNI, K. IKHIRI, B. OUSMANE, A. ABDOULAYE & M. KONATE, Etat des lieux sur les aquifères de la zone minière d'Arlit pour la période allant de 1968 à 2013 : hydrogéologie et hydrochimie. *Expertise collégiale FAST-SOPAMIN, Collection Etudes Nigériennes*, (2015) 156 p.
- [2] C. W. FETTER, Applied Hydrogeology. *Fourth Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458*, (1994) 597 p.
- [3] JAMES A. SAUNDERS, BRUCE E. PIVETZ, NATHAN VOORHIES, RICHARD T. WILKIN, Potential aquifer vulnerability in regions down-gradient from uranium in situ recovery (ISR) site *Journal of Environmental Management*, 183 (2016) 67 - 83 p.
- [4] M. ALBINET et J. MARGAT, Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau Souterraine. Actes du Colloque de Moscou sur la Pollution des Eaux Souterraines : IAHS-AISH Publ, N° 103 (1971) 1975
- [5] L. MATINI, J. M. MOUTOU et M.S. KONGO-MANTONO, Evaluation Hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique SCIENCE*, 05 (1) (2009) 82 - 98 p.
- [6] A. MFUMU KIHUMBA, M. VANCLOOSTER J. NDEMBO LONGO, Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model. *Journal of African Earth Sciences*, 126 (2017) 13 - 22 p.
- [7] M. YAHAYA, Dynamique sédimentaire du Guézouman et des formations viséennes sous-jacentes en liaison avec la tectonique, le volcanisme et le climat. *Mémoire Thèse Université de Bourgogne*, (1992) 355 p.
- [8] F. JOULIA, "Les séries primaires au N et au NW de l'Aïr (Sahara central). Discordances observées. Bulletin de la Société Géologique de France, (1959) 192 - 196 p.
- [9] F. JOULIA, Carte géologique de reconnaissance de la bordure sédimentaire occidentale de l'Aïr au 1 / 500 000 (1963). Éditions du BRGM, Orléans, France
- [10] F. JOULIA et J. M. OBELIANNE, Levés géologiques à l'ouest de l'Air. COGEMA, (1976) inédit
- [11] COGEMA, Carte géologique au 1/200 000 d'Afasto et notice explicative. *Direction Mines et Géologie, Niamey*, (1977) 31 p.
- [12] M. YAHAYA et J. LANG, Évolution tectono-sédimentaire de l'Unité d'Akokan au cours du Viséen dans le bassin de Tim Mersoï (région d'Arlit, Niger). *Journal of African Earth Science*, Vol. 31, N° 2 (2000) 415 431 p.
- [13] M. KONATE, M. DENIS, M. YAHAYA et M. GUIRAUD, Structuration Extensive Et Transtensive Au Devono-Dinantien Du Bassin De Tim Mersoï (Bordure Occidentale De L'Aïr, Nord Niger). Annales de l'Université de Ouagadougou - Série C, Vol. 005, (2007) 1 - 32 p.
- [14] F. JOULIA, sur l'existence d'un important système de fractures intéressant le Continental intercalaire à l'Ouest de l'Aïr (Niger, A.O.F) B.S.G.F., (1957) 137 - 143 p.
- [15] C. VALSARDIEU, Etude géologique et Paléogéographique du Bassin de Tim Mersoï : Région d'Agadès (République du Niger). *Thèse Université de Nice*, (1971) 514 p.
- [16] GERBEAUD OLIVIER, Evolution Structurale du Bassin de Tim Mersoï : Déformations de la couverture sédimentaire, Relations avec la Localisation des gisements uranifères du secteur d'Arlit. *Thèse* Université de Paris Sud, (2006) 261 p.
- [17] A. DODO, Etude des Circulations Profondes le Grand Bassin Sédimentaire du Niger : identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements. *Thèse Université de Neuchâtel*, (1992) 101 p.
- [18] G. BIGOTTE et J. M. OBELIANNE, Découverte de minéralisations uranifères au Niger. *Mineral. Deposita*, 3 (1968) 317 333 p.

Afrique SCIENCE 13(4) (2017) 261 - 274

274

- [19] P. FORBES, Rôles des structures sédimentaires et Tectoniques, du volcanisme alcalin régional et des fluides diagenetiques hydrothermaux pour la formation des minéralisations à U-Zr -Zn -V - Mo. D'Akouta (Niger). *Thèse de doctorat, CREGU Nancy*, (1989) 375 p.
- [20] AMMAN, Suivi de la nappe du Tarat et du réseau de production en eau potable et en eau industrielle d'Arlit-Akokan. *Rapport de synthèse*, (2013) *Réf.:* 2013/NIG/AMN/03/HYDRO
- [21] M. MAMANE MAMADOU, Le système métallogénique des gisements d'uranium associés à la faille d'Arlit (Bassin de Tim Mersoï, Niger) : diagenèse, circulations des fluides et mécanismes d'enrichissement en métaux (U, Cu, V). *Thèse de l'Université de Lorraine,* (2016) 390 p.
- [22] A. SHABAN, M. KHAWLIE and C. ABDALLAH, Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zone : the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14 (2006) 433 - 443 p.
- [23] Y. ZENG. Q. WU. S. LIU. Y. ZHAI. W. ZHANG, Vulnerability assessment of water bursting from Ordovician limestone into coal mines of China *Environ Earth Sci.*, 75 (2016) 1431
- [24] H. MADIOUNE, Etude Hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalais) : apport des techniques de télédétection, modélisation, géochimie et isotopie. *Thèse Université de Liège*, (2012) 311 p.
- [25] F. EL BAZ, I. HIMIDA, Groundwater Potential of the Sinia Peninsula, Egypt, (1995) Summery, AID, Cairo
- [26] H. F. YEH, H-C. LEE, C-K. HSU, H-P. CHANG, GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone : Environ Geol., 58 (2009) 185 - 195 p.
- [27] N. S. MAGESH, N. CHANDRASEKAR, P. J. SOUNDRANAYAGAM, Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geosciences* frontiers, 3 (2) (2012) 189 - 196 p.
- [28] S. BUVANESHWARI et al., Groundwater resource vulnerability and spatial variability of nitrate contamination : Insights from high density tubewell monitoring in a hard rock aquifer. *Science of the Total Environment*, 579 (2017) 838 - 847 p.
- [29] A. M. S. BABAYE, Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). *Thèse Université de Liège*, (2012) 244 p.
- [30] J. ALIKHANI et al., Nitrate vulnerability projections from Bayesian inference of multiple groundwater age tracers. *Journal of Hydrology*, 543 (2016) 167 181 p.