

Évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc

Naima El HAMMOUMI^{1*}, Mohamed SINAN², Brahim LEKHLIF² et
Lakhdar El MAHJOUR¹

¹Laboratoire de Catalyse et Environnement, Faculté des sciences, Université Hassan II Ain Chock,
Km 8, Route d'El Jadida, BP. 5366, Casablanca, Maroc

²Département d'hydraulique, École Hassania des Travaux Publics, km 7, Route d'El Jadida, BP. 8108,
Casablanca, Maroc

* Correspondance, courriel : hammoumi_naima@yahoo.fr

Résumé

La plaine de Tadla fait partie du bassin de l'oued Oum Erbia situé au centre du Maroc. Ses ressources en eau souterraine sont développées pour l'approvisionnement en eau potable, industrielle et agricole. Afin d'évaluer la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude, 25 échantillons d'eau souterraines ont été prélevés et différents paramètres ont été analysés sur le plan physico-chimique et bactériologique: température, conductivité électrique, pH, TDS, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, FeT, streptocoques fécaux, coliformes fécaux et coliformes totaux. L'indice chimique tel que le coefficient d'absorption du sodium (SAR) et l'indice de perméabilité (IP) ont également été déterminés. Les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines du bassin sont généralement dure à très à dure. Les concentrations sont classées comme suit : Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ et Cl⁻ > HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻. Les faciès chimiques trouvés sont le bicarbonaté calcique et le Chloruré sodique avec une prédominance de ce dernier. La qualité des eaux souterraines est liée à la lithologie du secteur. Les valeurs de l'indice de saturation (calculés par le programme PHREEQC) montre que presque tous les échantillons d'eau sont saturés à sous-saturés en carbonate et sous saturés en sulfate. Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) nous a permis de qualifier les eaux souterraines destinées à l'irrigation. L'analyse hydrochimique a montré la mauvaise qualité des eaux se traduisant par des valeurs importantes en chlorures, en nitrites et nitrates. Ainsi que la contamination de tous les puits par les germes de la contamination fécale. Il ressort de cette analyse que les eaux souterraines sont chimiquement non appropriées à la consommation humaine et aux usages agricoles.

Mots-clés : *plaine de Tadla, hydrochimie, qualité des eaux souterraines, hydrogéologie, type d'eau.*

Abstract

**Evaluation of the groundwater quality for the use in drinking water and agriculture :
Plain of Tadla, Morocco**

The Tadla plain is part of the Oum Erbia basin, which is located at the center of Morocco. And its groundwater resources are developed for water supply and irrigation purposes.

In order to evaluate the quality of groundwater in study area, 25 groundwater samples were collected and analyzed for various parameters.

Physical and chemical parameters of groundwater such as electrical conductivity, pH, total dissolved solids, , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , FeT, CT, SF, CF were determined.

Sodium adsorption ratio (SAR), and residual sodium carbonated and permeability index (PI) indices were calculated. Based on the analytical results, groundwater in the area is generally fresh and hard to very hard. The abundance of the major ions is as follows: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ and $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$. The dominant hydrochemical facieses of groundwater is bicarbonated calcic and sodic Chlorinated. According to Gibbs diagrams samples fall in the rock dominance field and the chemical quality of groundwater is related to the lithology of the area. The results of calculation saturation index by computer program PHREEQC shows that the nearly all of the water samples were saturated to undersaturated with respect to carbonate minerals and undersaturated with respect to sulfate minerals.

The Sodium adsorption ratio (SAR) enabled us to qualify groundwater intended for the irrigation.

The hydrochismic analysis showed the bad quality of water resulting in significant chloride values, out of nitrites and nitrates. As well as the contamination of all the wells by the germs of the faecal contamination.

Assessment of water samples from various methods indicated that groundwater in study area is chemically suitable for drinking and agricultural uses.

Keywords : *groundwater quality, hydrochemistry, hydrogeology, Tadla plain, water type, irrigation.*

1. Introduction

La Compréhension des propriétés hydrauliques des couches aquifères et la caractérisation hydrochimique de l'eau qu'elles contiennent sont nécessaires pour la planification et la gestion des ressources en eau souterraine dans le secteur d'étude.

Généralement, la circulation des eaux souterraines dans les vides des formations aquifères augmente la concentration en éléments chimiques [1-3]. Par conséquent, le faciès chimique des eaux souterraines donne des informations pertinentes sur la lithologie des formations aquifères et sur leur comportement hydrogéologique, ainsi que le type d'usage auxquels les eaux souterraines peuvent servir.

L'étude hydrochimique des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec les faciès lithologiques et la piézométrie de la nappe [2-24].

La quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère sont destinés à l'alimentation en eau potable et l'irrigation des terres agricoles. Pour être utilisée l'eau doit répondre à certaines normes qui varient en fonction du type d'utilisation.

La caractérisation hydrochimique des eaux souterraines est habituellement basée sur la disponibilité d'une grande quantité de données physico-chimiques [4-5]. La chimie des eaux souterraines, dépend de plusieurs facteurs, tels que la géologie générale, le degré de météorisation chimique de divers types de roche, la qualité de l'eau de recharge et des diverses sources d'alimentation des formations aquifères. De tels facteurs et leur interaction est le résultat d'une qualité complexe d'eaux souterraines [1,6,7].

Dans cette étude, l'examen physique, hydrogéologique et physico-chimique des eaux souterraines seront intégrées et employé pour déterminer l'influence de ces facteurs et les mécanismes contrôlant la chimie des eaux souterraines dans la région. Le rapport entre l'écoulement des eaux souterraines, les propriétés

hydrogéologiques et hydrochimique a été étudié par plusieurs chercheurs [2,8,9]. La qualité chimique des eaux souterraines est liée à la lithologie de la région.

La plaine du Tadla, située dans le bassin versant de l'Oued Oum Erbia, à environ 270 km à l'Est de Rabat, la ville administratif du Maroc, (*Figure 1*), est une vaste dépression synclinale qui couvre une superficie d'environ 3600 km². Elle présente une pente topographique variant entre 1 et 3 ‰. Elle est parcourue d'Est en Ouest, sur environ 160 km par l'Oued Oum Er-bia qui la subdivise en deux grandes parties à caractéristiques hydrologiques différentes: Béni Amir au Nord et Béni Moussa au Sud. Ces derniers contiennent deux importants périmètres irrigués, dont les superficies irriguées sont respectivement de 33 000 ha et 69 500 ha.

Au début du XX^{ème} siècle, la population de la région d'étude comptait environ 95 000 habitants ruraux avec une densité moyenne de l'ordre de 26 habitants/km² pratiquant essentiellement la céréaliculture extensive. La mise en place de l'infrastructure hydro-agricole s'est accompagnée : d'une croissance spectaculaire de la population, comptant 420 000 en 1982 et 560 000 en 1994 dont 440 000 ruraux à 571.000 habitants en 2004, dont 65 % sont ruraux ; et d'un développement des activités économiques.

Ainsi, l'agriculture intensive se base essentiellement sur la culture des céréales, betterave sucrière, maraîchage, fourrage, coton, arboriculture (oliviers et agrumes) et sur l'élevage. Plusieurs unités agro-industrielles ont été installées dans les périmètres agricoles, les plus importantes étant des sucreries (2), des huileries (9) et des unités d'égrenage du coton (3).

Dans le périmètre de Béni Amir, les eaux d'irrigation proviennent de l'Oued Oum Erbia à partir du barrage de dérivation de Kasba Tadla. Les volumes annuels d'eau utilisés en irrigation dans ce paramètre varient entre 200 et 300 Mm³ en fonction des assolements et des disponibilités de l'eau. Le périmètre de Béni Moussa est irrigué essentiellement par les eaux provenant du barrage Bin El Ouidane avec des volumes annuels de 500 Mm³ dans les deux périmètres, les eaux des nappes phréatiques sont sollicitées à des fins agricoles. Ainsi, les prélèvements annuels, à partir des eaux souterraines, sont évalués à 92 Mm³ et 40 Mm³/an respectivement pour Béni Amir et Béni Moussa. L'irrigation est essentiellement gravitaire. Le système d'irrigation par pivot a été introduit dans un secteur de 3600 ha à Béni Amir [10].

Le climat de la plaine est de type méditerranéen semi-aride à hiver froid. La pluviométrie passe d'un intervalle de [275-1025] mm sur la période de 1935 à 1980 à un intervalle [175-625] mm sur la période 1980 à 2007. On retiendra que cette région a connu une dégradation de la pluviométrie annuelle de 60 mm (15 %) sur cette période [11].

2. Matériel et méthodes

2-1. Contexte Géologique et Hydrogéologique

2-1-1. Géologie

Le Tadla se présente comme une vaste cuvette synclinale asymétrique. Surmontant en discordance un paléozoïque schisto-quartzitique, fortement plissé et faillé, la série sédimentaire du Tadla s'échelonne vraisemblablement du Crétacé au Quaternaire. La séquence lithostratigraphique des formations rencontrées se présente comme suit [12] :

- Trias : série argilo-grézeuse, basaltique, argilo-salifère ;
- Infra-Lias et Lias : Argilo-dolomitique ;
- Infracénomanien : Silicoclastique, à argiles rouges et grès gris ;

- Céno manien transgressif : Laminites argilo-carbonatées, parfois légèrement évaporitiques (sulfates) ;
- Céno manio-Turonien marin : Calcaire, à faune marine franche de plateforme interne à moyenne, et parfois dolomitisé ;
- Sénonien, dit lagunaire ou évaporitique : très développé dans les zones à forte subsidence ;
- Sénonien marin : formé de biocalcarénites, il se traduit par des intercalations plus calcaires et plus riches en faunes, qui donnent à la formation ses propriétés aquifères ;
- Eocène : on y distingue des dépôts à débris phosphatés (beaucoup de dents de poissons, sélaciens, ...) ;
- Mio-Plio-Quaternaire : le Miocène est plus ou moins conglomératique. Le Plio-Quaternaire est constitué essentiellement de faciès fluvio-lacustres du Villafranchien.

2-1-2. Hydrogéologie

Le complexe aquifère de la plaine du Tadla s'étend sur une large portion (10 000 km²) du bassin moyen de l'oued d'Oum Erbia. Il est décrit comme étant une succession d'unités hydrogéologiques d'importance hydraulique variable. Ce système aquifère multicouche se compose de quatre aquifères principaux qui hydrauliquement sont étroitement liés. Ce sont de bas en haut : l'aquifère carbonaté du Turonien, localement le Céno manio-Turonien ; l'aquifère carbonaté du sénonien ; l'aquifère calcaréo-sableux de l'Eocène et les aquifères alluvionnaires Mio-Plio-Quaternaires [12]. Ces aquifères présentent une épaisseur et un toit qui augmentent généralement de l'Est vers l'Ouest.

L'aquifère du Mio-Plio-Quaternaire est représenté par un complexe fluvio-lacustre très hétérogène, contenant notamment une alternance de marno-calcaires, calcaires lacustres et conglomérats. Cette entité hydrogéologique bien individualisée se compose de deux nappes situées de part et d'autre de l'Oum Erbia : nappe de Béni Amir au nord et la nappe de Béni Moussa au sud.

2-1-2-1. Nappe de Béni Amir

La nappe phréatique du périmètre de Béni Amir s'écoulant du NE vers le SW, a une forme elliptique, et circule dans un complexe d'âge Plio-Quaternaire, correspondant à une série continentale fluvio-lacustre très hétérogène s'étendant sur environ 600 km² et composée essentiellement par des alternances de marnes, de calcaires plus ou moins marneux et de conglomérats polygéniques à ciment argileux. Des limons localement à concrétions calcaires, et des conglomérats attribués au Quaternaire surmontent ces alternances.

Ainsi, la nappe phréatique de Béni Amir est circule dans des formations superficielles peu perméables. Son mur se situe au sommet d'une formation phosphatée éocène à une profondeur de 90 m correspondant à des argiles dolomitiques. L'épaisseur de la nappe croît du Nord vers le Sud, elle est comprise entre 50 et 100 m sur la majeure partie de son étendue. Elle atteint des valeurs extrêmement importantes comprises entre 200 m et 250 m au sud-ouest du périmètre. Les ressources en eau mobilisables de cette nappe sont de 190 Mm³/an. Quant à ses caractéristiques hydrauliques, les valeurs de transmissivité sont généralement comprises entre 1.10^{-3} m²/s et 1.10^{-1} m²/s reflétant sa grande hétérogénéité tant verticale qu'horizontale. Les valeurs du coefficient d'emmagasinement de cet aquifère à nappe libre, varient, en règle générale entre 0,01 et 0,1 [12].

2-1-2-2. Nappe de Béni Moussa

Elle s'étend sur une superficie d'environ 885 km². Les formations Mio-Plio-Quaternaires constituant l'aquifère de Béni Moussa sont semblables à celles déposées dans la plaine de Béni Amir. Elles correspondent à une série fluvio-lacustre extrêmement hétérogène formée essentiellement d'alternance de

calcaires, de marnes et de conglomérats. L'épaisseur des formations continentales déposées au niveau de la plaine des Béni Moussa est extrêmement variable, elle varie entre 150 mètres et peut dépasser 600 mètres. Le volume mobilisable de cette nappe est de 250 Mm³. La transmissivité de cet aquifère varie entre 1.10⁻³ m²/s et 5.10⁻¹ m²/s.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement oscillent généralement entre 3.10⁻² et 6.10⁻² [12].

L'alimentation des nappes phréatiques de Béni Amir et Béni Moussa se fait naturellement par les précipitations, l'infiltration des eaux de surface et les apports latéraux, et artificiellement par percolation des eaux d'irrigation qui constituent l'essentiel de la recharge des deux nappes. Cette recharge par les eaux d'irrigation se fait pratiquement sur toute l'année avec des maxima pendant la période de forte demande en eau des cultures (avril-juillet). Néanmoins, un apport supplémentaire, bien que difficilement quantifiable, proviendrait vraisemblablement de la drainance verticale ascendante depuis les aquifères sous-jacents notamment au niveau de Béni Amir.

Les sorties de ces nappes sont constituées principalement par le drainage artificiel par l'intermédiaire du réseau de drains (d'une longueur de 1 703 km), le drainage naturel par l'Oued Oum Erbia, les prélèvements agricoles, d'eau potable et industriels et par l'évaporation directe.

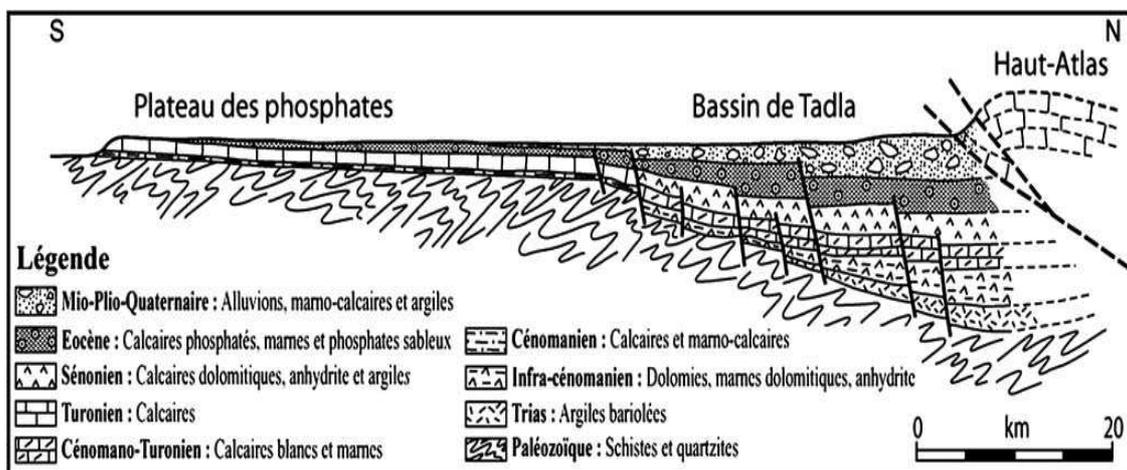


Figure 1 : Coupe géologique montrant la structure du système aquifère du bassin de Tadla [13]

2-2. Situation géographique

La quasi-totalité des points d'eau de l'aquifère est destinée à l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation des terres agricoles. Pour être utilisée l'eau doit répondre à certaines normes qui varient en fonction du type d'utilisation. Dans ce but, 25 puits ont été échantillonnés pendant le mois de février 2007. Pour chaque test, la température, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et le pH ont été mesurés *in situ* par l'agence du bassin hydraulique d'Oum Erbia.

Les échantillons d'eau ont été immédiatement stockés à 4°C en utilisant des bouteilles icebox, l'analyse a été effectuée rapidement moins de 24 h après le prélèvement.

Les éléments majeurs (HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺), le fer, le manganèse et les phosphates ont été analysés dans le laboratoire. Les ions ont été analysés en utilisant diverses techniques décrites dans les études chimiques : Spectrophotométrie (nitrates, nitrites, ions d'ammonium, sulfates et Orthophosphates), titrimétrie (chlorures, calcium, magnésium et carbonates) et le spectrophotomètre avec la flamme (potassium et sodium). L'analyse bactériologique a été effectuée en se référant à la méthode du Rodier [15].

La localisation des points échantillonnés est montrée dans la **Figure 2**. Ces données entrent dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux des bassins versants d'Oum Er-ria, un réseau complet est mis en place par l'Agence Hydraulique d'Oum Er-ria en collaboration avec le Laboratoire Public d'Essais et d'Études (LPEE).

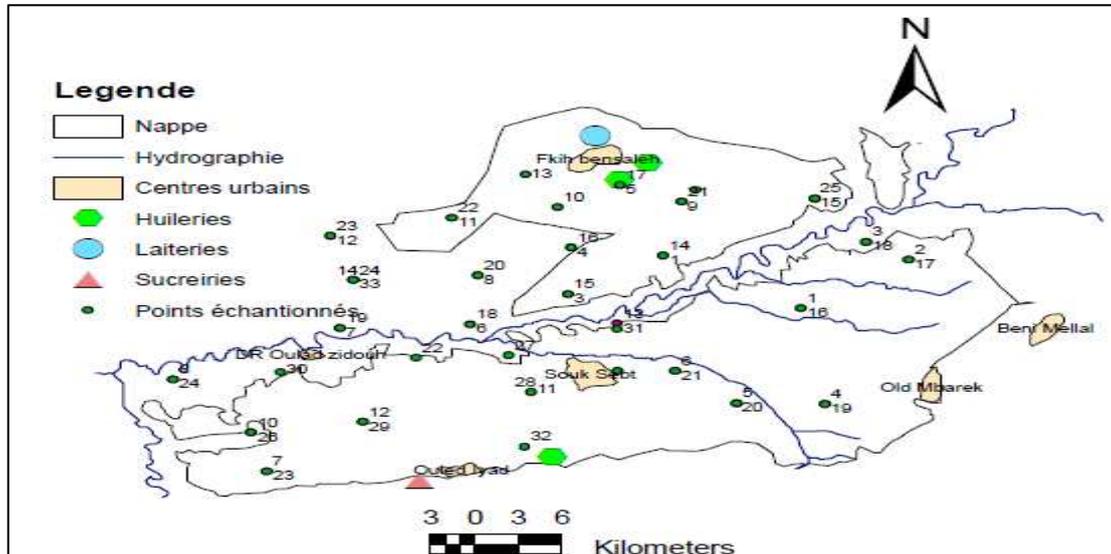


Figure 2 : Carte de répartition des points d'eau échantillonnés dans la plaine de Tadla

3. Résultats et discussion

3-1. Piézométrie

Selon la disponibilité et la répartition des points d'eau dans la région, une campagne piézométrique a été réalisée, durant le mois de février 2007. Les lignes de courant piézométrique indiquent que l'alimentation de la nappe se fait du nord et du nord-est vers le sud du sud-est vers le nord.

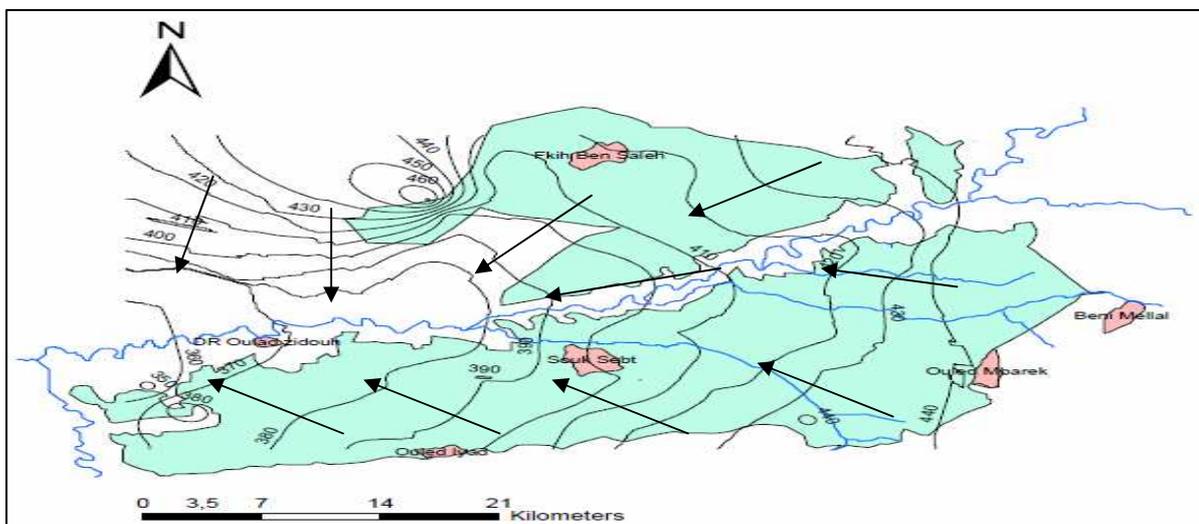


Figure 3 : Carte piézométrique de la région d'étude

La carte montre également un axe de convergence des lignes de courant qui coïncide avec le tracé du lit de l'oued Oum Er-Rbiaa.

Le gradient hydraulique du secteur nord-est est assez élevé, indiquant une vitesse d'écoulement et une faible transmissivité de la nappe (**Figure 3**).

3-2. Hydrogéochimie

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux, leur qualité, le degré de potabilité, ainsi que leur aptitude à l'irrigation. Elle permet aussi de suivre l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie et la piézométrie de la nappe [14].

Tableau 1 : Les résultats préliminaires des paramètres dosés

Variable	Surnom	Min	Max	Moyenne	Unité de mesure
Température de l'eau	Tea	14,500	22,500	19,500	°C
pH	pH	6,900	7,400	7,144	
conductivité	Cond	730,000	10800,000	4092,360	uS/cm
Indice de permanganate	IP	0,330	13,100	4,286	mg/l
Ammonium	NH ⁴⁺	0,007	0,280	0,067	mg/l
Sodium	Na ⁺	7,680	1152,000	408,919	mg/l
Potassium	K ⁺	0,609	5,000	2,272	mg/l
Calcium	Ca ²⁺	82,200	825,000	260,576	mg/l
Magnésium	Mg ²⁺	28,600	649,000	176,580	mg/l
Manganèse	Mn ²⁺	0,019	0,099	0,028	mg/l
Chlore	Cl ⁻	57,600	3967,000	1204,436	mg/l
Nitrites	NO ₂ ⁻	0,000	0,480	0,061	mg/l
Nitrates	NO ₃ ⁻	11,400	99,400	43,998	mg/l
hydrocarbonates	HCO ₃ ⁻	183,000	494,100	380,664	mg/l
Sulfates	SO ₄ ²⁻	15,400	1076,000	179,335	mg/l
Solides Totaux Dissous	TDS	591	6488	2657,04	mg/l
Rapport d'Adsorption du Sodium	SAR	13.76	0.170	4.568	meq/l
Le titre d'alcalinité complet	TAC	15,000	40,500	31,202	(°F)
Le Titre Hydrotimétrique (la dureté)	TH	37,900	429,000	137,378	°F
Résidu sec à 105 °C (RS)	RS	542,000	7685,000	3083,880	mg/l
Fer Total	FeT	0,019	0,336	0,121	mg/l
Coliformes fécaux	CF	0,000	12000,000	1624,400	/100 ml
coliformes totaux	CT	0,000	80000,000	10642,000	/100 ml
Streptocoques fécaux	SF	0,000	18000,000	1789,000	/100 ml

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du Plio-Quaternaire montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique (730-10 800 μS cm⁻¹) avec deux groupes d'éléments chimiques. La première présente des teneurs dominantes en Na⁺ et Cl⁻ (7-57 à 1152-3967 mg/L) respectivement, suivis par le HCO₃⁻, le Ca²⁺ et le Mg²⁺ (82-28 à 825-649 mg/L) respectivement. La présence

de ces ions est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et à la dissolution des formations évaporitiques. Par contre la présence des éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- est liée à la dissolution des carbonates (**Tableau 1**).

L'origine des ions dissous peut être évaluée avec le traçage des échantillons, selon la variation du rapport de $Na / (Na+Ca)$ et $Cl / (Cl+HCO_3)$ en fonction des Solides Totaux Dissous, TDS, [16]. Le diagramme de Gibbs des données de la région d'étude (**Figure 4**) indique que la roche est le processus dominant contrôlant la composition chimique principale des eaux souterraines [16].

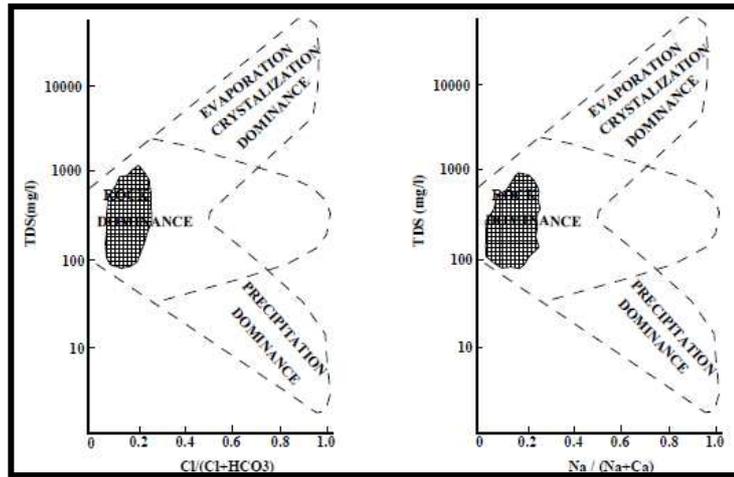


Figure 4 : Mécanismes gouvernant la chimie des eaux souterraines [16].

3-2-1. Diagramme de PIPER

Le report des résultats des analyses des eaux de l'aquifère Plio-Quaternaire sur le diagramme triangulaire de Piper (**Figure 5**), met en évidence l'incidence du faciès lithologique sur la qualité des eaux et permet aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification.

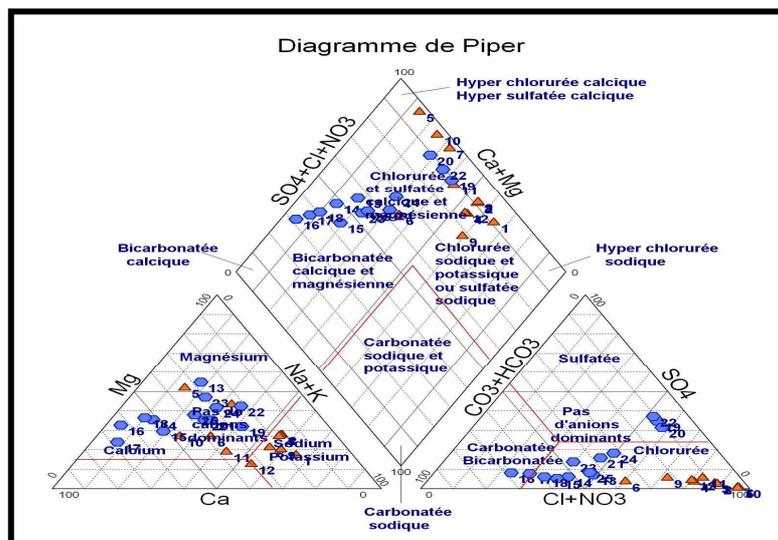


Figure 5 : Diagramme triangulaire de Piper pour l'aquifère Plio-Quaternaire (février 2007).

On remarque sur le diagramme de Piper que les eaux de la nappe appartiennent aux familles des eaux :
 - chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne (14 échantillons),
 - chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique (6 échantillons),
 - bicarbonatée calcique et magnésienne (5 échantillon),

Les puits représentés au milieu du triangle ne présentent pas de dominance. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend de la nature lithologique de l'aquifère et des conditions de recharge.

3-2-2. L'Indice De Saturation

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans l'aquifère Plio-quaternaire de la région d'étude. Pour cela la tendance des formes chimiques entre la phase dissoute et la phase minérale a été examinée. L'indice de saturation calculé exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de l'aquifère et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche [17].

L'utilisation du logiciel WATEQ *Plummer et al.* [18], nous a permis de calculer les indices de saturation de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite, du gypse, de l'anhydrite, et de l'halite.

Les résultats significatifs de tous les échantillons d'eau souterraine analysés dans le **Tableau 2** et la **Figure 7** montrent que ; ces derniers sont saturés par rapport à la calcite, la dolomite, et l'aragonite, mais ils sont plutôt sous-saturés en ce qui concerne l'halite, le gypse, et l'anhydrite ; seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation.

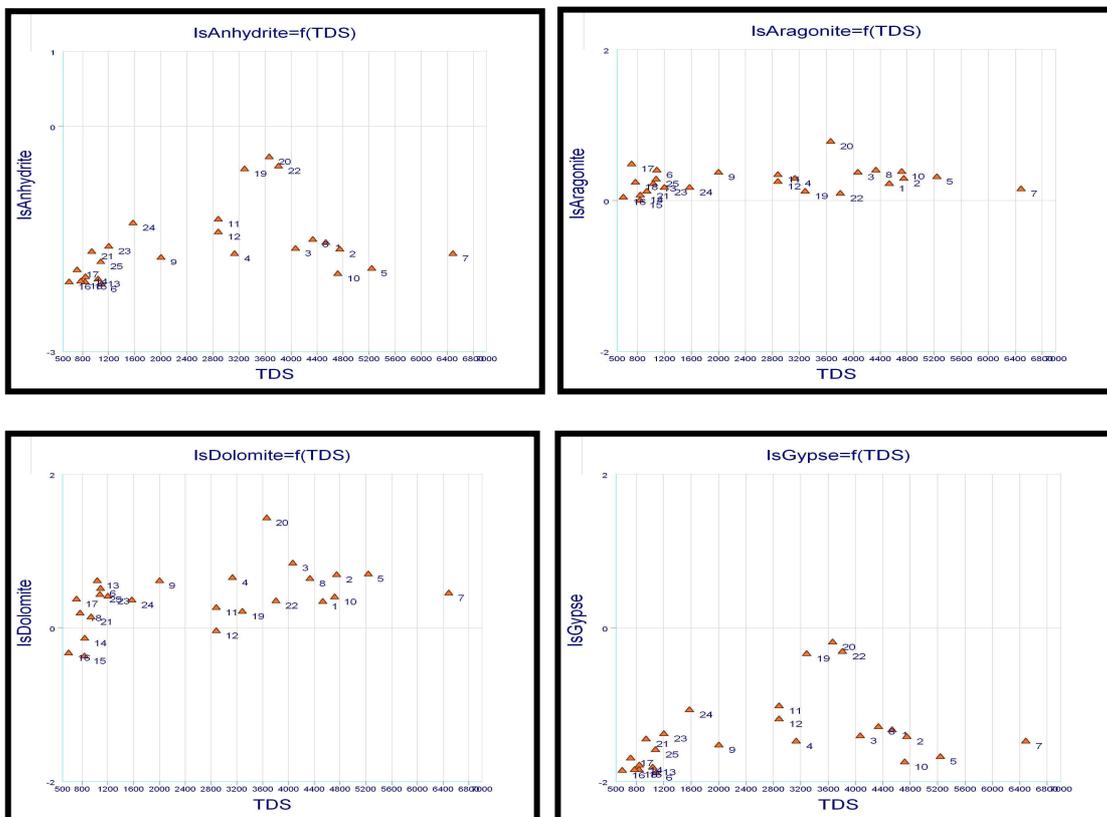


Figure 6 : Évolution des indices de saturation (IS) en fonction de la TDS.

Tableau 2 : Indices de saturation dans les eaux souterraines

variable	Min	Max	moyenne
IS _{Halite}	-7.97	-4.18	-5.542
IS _{Gypsum}	-2.07	-0.48	-1.61
IS _{Dolomite}	0.08	1.73	0.7928
IS _{Calcite}	0.09	0.57	0.3344
IS _{Aragonite}	-0.05	0.66	0.1908
IS _{Anhydrite}	-2.29	-0.7	1.8348

3-3. État de la qualité des eaux souterraines en vue d'un usage agricole

Dans la région étudiée, l'irrigation des cultures est assurée par le pompage des eaux de l'oued Oum Erbia. Pour caractériser l'aptitude à l'irrigation des eaux de la nappe, nous utilisons les valeurs de la conductivité électrique à 25°C et celles du rapport d'adsorption du sodium (SAR).

$$S.A.R = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}{2}}}$$

Dans cette région le SAR est supérieur à 5 et les eaux peuvent provoquer un risque d'alcalinisation des sols [19-20]. Le report des puits échantillons placés sur le diagramme de classification des eaux d'irrigation montre que les eaux se situent entre la classe bonne (S1) et la classe moyenne (S2) où le danger d'alcalinisation du sol est appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange.

Les ions Na⁺ échangeables peuvent se substituer aux ions alcalino-terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) des argiles, engendrant ainsi l'obturation des pores du sol et donc son imperméabilisation.

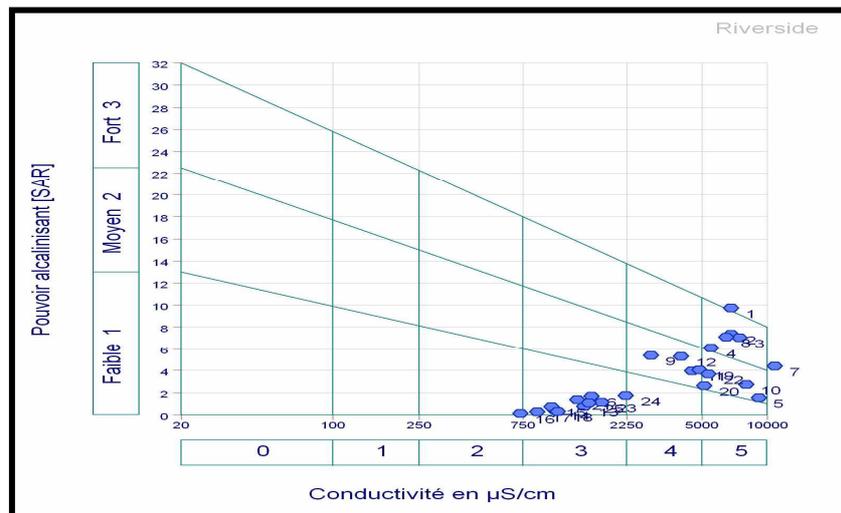


Figure 7 : Diagramme pour la classification des eaux d'irrigation en fonction du SAR

SAR : Rapport d'adsorption du sodium (méq/L).

CE : Conductivité électrique à 25 °C (µS/cm).

3-4. Aptitude des eaux pour la consommation en eau potable

Pour une CE à 25°C, les eaux se distribuent entre : La classe (C3) où les eaux peuvent être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes au sel ayant une bonne perméabilité (puits 6, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 23, 24 et 25).

La classe (C4) où les eaux ne conviennent généralement pas à l'irrigation mais peuvent être utilisées sous certaines conditions: sols très perméables, bien lessivés et des plantes très tolérantes aux sels (puits 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 19,20 et 22).

Il ressort de cette classification que dans l'ensemble, les eaux de la région ne conviennent à l'irrigation que de certaines plantes tolérantes à moyennement tolérantes au sel.

3-5. Aptitude des eaux à l'alimentation en eau potable

Les valeurs du pH et de la température des eaux des puits étudiés se trouvent dans la zone normale; des valeurs elles varient entre 6,9 et 7,4 pour le pH et entre 14,5 et 22,5°C pour la température.

Les valeurs de la conductivité électrique (CE) indiquent une large variation de la composition chimique des eaux, elle varie entre un minimum de 730 µS/cm et un maximum de 10 800 µS/cm. L'origine de cette minéralisation est attribuée à priori au retour des eaux d'irrigation. En se référant aux normes marocaines de potabilité [21], 40 % des puits peuvent être considérés comme acceptables et 60 % mauvaises.

Les valeurs des chlorures varient entre 57,7 mg/L et 3967 mg/L. Elles dépassent dans 60 % des cas la valeur guide fixée (750 mg/L) par la Directive marocaine relative aux eaux destinées à la production de l'eau potable [21].

Pour l'ammonium, les valeurs varient entre 0,007 mg/L et 0,280 mg/L inférieures, à la valeur guide de l'OMS qui est de 2 mg/L.

La dureté totale de l'eau (THt) est rattachée principalement à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau. Dans les échantillons d'eau : La THt varie entre 38 mg/L et 430 mg/L, les valeurs du Mg²⁺ varient entre 28,6 et 649mg/l avec une moyenne de 176,58 mg/L et les valeurs du Ca²⁺ varient entre 82,2 mg/L et 825 mg/l avec une moyenne de 260 mg/L. Pour tous les points d'eaux étudiés, la THt est inférieure à la valeur guide OMS qui est de 200 mg/L, à l'exception des puits 20 et 23 (soit 8 %). Selon la classification de Durfor et Becker [22], les eaux souterraines analysées sont douces puisque le THt se trouve dans l'intervalle 0 – 60 mg/L.

Le titre alcalimétrique complet (TAC) dans les échantillons d'eau analysés est du essentiellement à la présence des ions bicarbonates (HCO₃). Le TAC se situe dans l'intervalle compris entre 15 à 40,5 mg/L de CaCO₃, ce qui se traduit par de très faibles concentrations en ions bicarbonates.

Les solides totaux dissous (TDS) décrivent les sels inorganiques présents en solution dans l'eau. Les TDS varie entre 40,4 mg/L et 229,8 mg/L.

Les concentrations en Fer Total (FeTot) variaient entre 0,019 mg/L et 0,336 mg/L. Le fer est indispensable pour le corps humain mais de très fortes concentrations affectent les propriétés organoleptiques de l'eau et tâchent aussi le linge. La valeur guide de l'O.M.S du Fer Total dans l'eau de boisson est de 0,3 mg/L. les points d'eau analysés ont une concentration en FeTot inférieure à la valeur guide de l'OMS à l'exception pour le puits numéro 11 ou elle atteint 0,336 mg/L.

Les teneurs en sulfate peuvent être considérée admissibles à l'exception des puits 19,20, 22 et 24 où elles dépassent les normes fixées par OMS à 200 mg/L.

La présence des nitrites en quantité importante témoigne d'une contamination récente résultant de l'infiltration des eaux usées et d'un déficit du milieu en oxygène [23-24].

La contamination par les nitrates a été signalée par Aghzar en 2001, montrant que la majorité des puits dépasse les normes de 50 mg/L. Les eaux de la nappe de Beni Amir peuvent être considérées (pour la plupart) comme acceptables vis-à-vis des teneurs en nitrates alors que la plupart des puits de la nappe de Béni moussa sont de mauvaise qualité.

Les résultats de la contamination bactériologique par les coliformes fécaux montrent que la plupart des puits sont contaminés, ce qui montre la non potabilité de tous les puits sauf les puits : 16,17 et 24.

4. Conclusion

L'étude hydrochimique de la nappe du bassin de Tadla a montré que les eaux sont moyennement à fortement minéralisées. Le diagramme de Piper fait ressortir deux types de faciès chimiques : Le bicarbonaté calcique et chloruré sodique, avec une prédominance de ce dernier, La conductivité de l'eau est généralement élevée et oscille entre $750 \mu\text{S cm}^{-1}$ et $10\ 800 \mu\text{S cm}^{-1}$. Cette salinité de l'eau est surtout contrôlée par les chlorures et le sodium. L'utilisation de l'indice de saturation nous a permis de comprendre le processus de minéralisation des eaux. Ainsi, cette minéralisation proviendrait de la dissolution-précipitation de la roche aquifère, des évaporites et de l'échange de base.

Les résultats de l'analyse physico-chimique de l'eau de la nappe phréatique de Tadla, ont montré que le pH, la température, et les teneurs en Fer Total et en sulfates peuvent être considérée admissibles et ne présenteraient pas de danger pour la consommation.

Les eaux des puits étudiés affichent des concentrations moyennes en nitrate supérieures aux normes de l'eau potable 50 mg/L selon l'organisation mondiale de la santé (O.M.S). Ces résultats confirment l'impact de l'intensification de l'agriculture, les rejets des eaux usées domestiques et industriels. Il est à signaler que la nappe phréatique de Tadla affiche également des concentrations élevées en dureté et en salinité.

La présence très élevée des germes indicateurs de la contamination fécale, ainsi que la présence certaine d'autres germes responsables d'infections transmises par l'eau, constituent sans doute une menace pour les habitants qui utilisent l'eau souterraine pour satisfaire la majeure partie de leurs besoins quotidiens.

Références

- [1] - P. A. DOMENICO and F. W. SCHWARTZ, "Physical and chemical hydrogeology," John Wiley and Sons, New York, (1990)824 pp.
- [2] - M. BAHIR, M. MENANI, M. OLIVEIRA DA SILVA, B. BLAVOUX, "Impact de la sécheresse sur la ressource en eau en zone semi aride : cas de l'aquifère Barrémien —Aptien de la zone côtière d'Essaouira (Maroc) ". Ecnologia de la intrusion de agua de mar en acuíferos costeros : países mediterraneos. IGME. ISBN. (2003) 84-7840-740.
- [3] - B. K. KORTATSI, "Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana," Aquatic Geochemistry, Vol. 13(1) (2007) 41-74.
- [4] - N. AGHAZADEH and A. A. MOGADAM, "Evaluation effect of geological formation on groundwater quality in the Harzandat plain aquifer," Symposium of Geosciences of Iran, Vol. 22 (2004)392-395.
- [5] - M. T. HOSSIEN, "Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques". *Hydrogeology Journal*, Vol.12 (2004) 144-158.
- [6] - C. GULER and G. D. THYNE, "Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA". *Journal of Hydrology*, Vol. 285 (2004)177-198.

- [7] - E. VAZQUEZ SUNNE, X. SANCHEZ VILA, and J. CARRERA, "Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain,". *Hydrogeology Journal*, Vol. 13 (2005) 522-533.
- [8] - J. D. HEM, "Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water," US Geological Survey Water-Supply Paper, (1970).
- [9] - Étude De La Stratégie De Gestion Des Ressources En Eau Du Bassin De L'Oum Er Rbia. Rapport d'étude définitif sous-mission II.1b « *Synthèse des études réalisées (Hydrogéologie)*, Groupement CACG / Maroc Développement, juin 2004, Maroc.
- [10] - PDAIRE (Plan Directeur d'Aménagement Intégré des ressources en Eau). Étude d'actualisation du PDAIRE de la zone d'action de l'Agence de l'OER. Mission I, État Des Lieux Et Perspectives d'évolution. Rapport définitif, Royaume du Maroc, Novembre 2008 p.4.
- [11] - BRGM. Étude du système multicouche de la plaine de Tadla. Description des aquifères et analyse du système multicouche, Maroc, *Rapport R3561045/Eau*, 92 (1993) 129p.
- [12] - L. BOUCHAOU, Fonctionnement des aquifères atlasiques et leurs relations avec les aquifères de la plaine : cas de l'Atlas de Béni- Mellal et de la plaine de Tadla (Maroc), thèse d'État, université de Marrakech, (1995) 154 p.
- [13] - J. RODIER, L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 7ème édition. Dunod, Paris, (1984) 1353 p.
- [14] - R. J. GIBBS, "Mechanisms controlling world water chemistry," *Science*, Vol. 17 (1970) 1088-1090 pp.
- [15] - J. F. DREVER, "The geochemistry of natural waters". 3rd ed. New York — Prentice- Hall INC; (1997) 379 pp.
- [16] - L. N. PLUMMER, B. F. JONES, and A. H. TRUSEDALL, WATEQ-A fortran IV version of WATEQ, A computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters 1976 Revised 1978, 1984 Washington D.C. U.S Geol-Surv.-Water Res, 76 (61) (1984).
- [17] - E. V. MAAS et G. B. HOMAN, « Tolérance des cultures au sel ». Riverside, USA. (1976).
- [18] - J. H. DURAND, « Les sols irrigables ». Agence de coopération culturelle et technique. *Presses universitaires de France*, (1983).
- [19] - O.M.S, « Directives de qualité pour l'eau de boisson ». 2nd Ed., Vol 2, Critères d'hygiène et documentation à l'appui, (2000) 1050p.
- [20] - T. SUBRAMANI, L. ELANGO, and S. R. DAMODARASAMY, "Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India," *Environmental Geology*, Vol. 47 (2005) 1099-1110.
- [21] - G. MARTIN, « Le problème de l'azote dans les eaux ». Techniques et documentation, (1979) 279p.
- [22] - R. HAKOU, « La décharge publique de Marrakech : caractérisation des lixiviats, étude de leurs impact sur les ressources en eau et essai de traitement ». Thèse d'état, (2001). Université cadi Ayad de Marrakech, Maroc.
- [23] - N. AGHZAR, H. BELLOUTI et B. SOUDI, « Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc) ». *Rev. Sci. Eau*, 15(2) (2001) 459-492.
- [24] - M. SINAN, « méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par la combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique. Application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc) », thèse d'état, (2000). Université Mohamed V de Rabat, Maroc.