



Note sur les causes de la dégradation de qualité des eaux souterraines de l'aquifère de sana' a -Yémen- Note about the causes of the deterioration of groundwater quality in aquifer of Sanaa -Yemen-

A. K. Alemad^{1*}, H. Saadaoui¹, N. Ait said¹, M. Najy¹, H. Daifi¹, H. Saleh Ali Yahya³, A. Outhman², I. Marc¹, S. Aboubaker¹, I. Belhaili¹, Y. Idrissi Azami¹, K. El kharrim¹, D. Belghyti^{1*}

1 - Laboratoire Agro-physiologie, Biotechnologies, Environnement et Qualité, Eaux, eaux usées & Santé. Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail. Kenitra. B, P: 133, 14 000 Kénitra- Morocco.

2 - Laboratoire Corporation de l'Eau et de l'Assainissement Sana'a. Yémen.

3 - Laboratoire des sciences, de l'eau, de l'Ecologie et de l'Environnement, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail. Kenitra. B, P: 133, 14 000 Kénitra- Morocco

Reçu le 16 Nov 2014, Revised 22 Oct 2015, Accepted 13 Nov 2015

* belghyti@hotmail.com / e_m_d2013@hotmail.fr. Tél: +212 (06) 66 56 33 59- Fax: +212 (05) 37 32 94 33.

Abstract

This study examines the natural and anthropogenic processes that affect the physico-chemical and microbiological quality of Sana'a groundwater aquifer. In 2012, fifteen water samples were collected. The physicochemical parameters followed are: T ° C, PH, EC, TDS, Cl^- , NO_3^- , SO_4^- , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{+2} , K^+ , Ca^{+2} , total hardness (TH), Fe^{++} , F⁻, salinity and turbidity and bacteriological (Total Coliforms and Fecal Coliforms). These types of groundwater in of Sana'a is mainly indicative of the lithology of the aquifer and the influence of evaporation on the composition of the water and consequently a transfer salts from soil to water. The groundwater saturation index are under saturation degrees except for dolomite. The study area is characterized by a high degree of salinity due to high sodium content increased by irrigation activities. The physico-chemical and microbiological parameters exceed the standards of the World Health Organization (WHO) regarding the quality of drinking water. All wells are contaminated with coliform. Contamination is concentrated in the north of the study area, this probably indicates a migration through the underground waters. Parameters were compared with the recommended by WHO and the National Water Resources Authority (NWRA), Yemen Guidelines.

Key words: groundwater, Quality, bacteriological, physico-chemical, Sana'a-Yemen.

Résumé

Cette étude examine les processus naturels et anthropiques qui influent sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines de l'aquifère de Sana'a. En 2012, quinze échantillons d'eau ont été prélevés. Les paramètres physico chimiques suivants sont : T ° C, pH, C.E, TDS, Cl^- , NO_3^- , SO_4^- , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{+2} , K^+ , Ca^{+2} , la dureté totale (TH), Fe^{++} , F⁻, Salinité et La turbidité, pour Les paramètres bactériologiques sont Coliformes Fécaux, Coliformes Totaux, Entérocoques. Les types d'eaux souterraines dans la zone de Sana'a sont essentiellement indicatives de la lithologie de l'aquifère qui influence sur la composition de l'eau, par conséquent un transfert des sels des sols vers les eaux. Les eaux souterraines se trouvent sous degrés de saturation à l'exception de la dolomite. La zone d'étude est caractérisée par un fort degré de salinité à cause de la grande teneur en sodium qui a augmenté par les activités d'irrigation. Tous les puits sont contaminés par les Coliformes. La contamination se concentre au nord de la zone étudiée; ceci indique probablement une migration à travers les eaux souterraines. Les paramètres ont été comparés avec les lignes directrices recommandées par l'OMS et l'Autorité nationale des ressources en eau (NWRA) du Yémen. Les paramètres physico-chimiques et microbiologiques excèdent les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé en ce qui concerne la qualité de l'eau de consommation et aussi les normes du (NWRA).

Mots clés: Nappes, Qualité, bactériologie, physico-chimique, Sana'a- Yémen

1. Introduction

Actuellement le monde souffre de la pollution environnementale. Cette pollution est due généralement à l'augmentation des activités humaines dans tous les secteurs et elle cause des dégâts pour la santé humaine et altère l'équilibre écologique. Pour cette raison, tous les pays ont déployés des efforts pour résoudre la problématique de la rareté, l'altération de la qualité des eaux à cause de la diversité des sources de la pollution. Comme la plupart des pays du Golfe arabe, le Yémen exploite les eaux souterraines comme source principale d'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques [1]. L'évaluation de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines est un enjeu majeur ayant un impact profond sur notre vie. Les principales composantes ioniques présentes dans les eaux naturelles proviennent généralement de deux sources principales : l'atmosphère avec des ions dissolvent dans l'eau de pluie l'autre est le résultat de l'altération des sols et des roches de base dans le bassin [2].

Le problème de l'insuffisance des ressources hydriques au niveau de la majorité des pays du monde n'est pas récent. C'est le cas notamment de la république du Yémen qui figure parmi les pays à faible précipitations annuelles. La part individuelle de chaque citoyen au moyen orient et en Afrique du nord est de l'ordre de 1250 m³ par ans alors que la moyenne mondiale annuelle par habitant est de 7500 m³, la moyenne des précipitations annuelles au Yémen varie entre 50 mm minimum, et 800 mm maximum, d'où une faible moyenne individuelle annuelle par habitant dans ce pays qui est de l'ordre de 125 m³ seulement [3].

La situation dans la ville de Sanaa est extrêmement grave parce que plus de 2 millions de personnes y vivent, en raison de la centralisation et de l'immigration interne. En conséquence, certaines zones du bassin de Sana'a éprouvent des problèmes de qualité de l'eau, en particulier la partie nord, à savoir Arhab et Bani Al-Harith zones autour de l'usine de traitement des eaux usées. [4]. Les objectifs de cette étude sont de procéder à une évaluation des eaux souterraines également, de prévoir la contamination potentielle de ces eaux par les forages de la décharge.

En conséquence, ces impacts vont être liés avec les aspects socio-économiques, environnementaux et institutionnels, dans le cadre des concepts de la G.I.R.E (Gestion Intégrée des Ressources en Eau). Par conséquent, le risque infiltré du lixiviat dans le sol devrait être présent. Une autre raison est que la contamination par le lixiviat constitue une grande menace pour les ressources en eaux souterraines, car ils contiennent plusieurs polluants qui pourraient ne pas être facile à enlever ou traiter comme sulfate.

2. La zone d'étude

Sanaa, la capitale du Yémen, est située dans la partie sud du bassin de Sana'a (figure. 1). Au cours des trois dernières décennies Sana'a a grandi pour devenir le plus grand centre urbain du pays. L'urbanisation rapide a élevé la population de la ville à environ 2 millions. Il est principalement sous la forme de nouvelles zones résidentielles. En a établi des stations d'échantillonnage de l'eau souterraine, sur la base de critères définis par les objectifs de cette étude. Quinze stations d'échantillonnage ont été établies (figure. 1).

Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de deux litres. Les récipients ont été lavés avec de l'eau distillée et séchés avant d'être utilisés. Ils ont été marqués par nombre, l'emplacement, la profondeur et la date du prélèvement, avant l'échantillonnage. Ils sont prélevés après l'extraction de l'eau de la pompe à main. L'eau a été laissée couler à partir de la source pendant environ une demi-heure à assimiler le nombre minimum de volume de bien et de stabiliser la conductivité électrique (C E).

Bassin de Sanaa est composé de Jurassique, Crétacé, Tertiaire et des Quaternaires roches. L'affleurement de séquence stratigraphique présent dans le sous-sol dans le bassin de Sanaa grande gammes de Jurassique Quaternaire (Figure. 2) [5]. Il peut être divisé en trois grands groupes: Mésozoïque et formations sédimentaires du Paléocène, tertiaire série volcanique de piège et Quaternaire sédimentaires. Une brève description de chacune de ces formations suivra; la description est résumée de [5, 6 et 7]. L'évolution volcanique au cours du Tertiaire est expliquée comme un résultat d'une chaleur dans le manteau supérieur, avec transfert de matière et de l'atténuation de la croûte continue qui a commencé à la fin du Protérozoïque (Précambrien) et érodée à la fin du Tertiaire [8]. La phase éruptive volcanique a commencé à l'Eocène moyen avec une alternance de basaltes et rhyolites Trap piège. Les roches volcaniques (roches volcaniques) Yémen semblent avoir été construit par l'éruption de vastes coulées basaltiques fissures nourris, un certain nombre de grandes volcanites basaltique de bouclier, et les dépôts de flux ignimbrite/de cendres des caldeiras individuels. L'épicentre de cette vaste activité apparaît volcaniques ont été autour de la zone qui s'étend de la partie sud du bassin de Sanaa à Dhamar, comme en témoigne l'épaisseur des roches volcaniques tertiaires (Figure. 2). En plus des volcanites Yémen, des champs distincts de Quaternaire (Pliocène-Holocène) volcans intra plaqué se produisent au nord-est (Marib) et au nord-

ouest (Arhab) du bassin, ce dernier s'étendant dans le bassin où il est constitué de 1 500 km², 100 à 250 m d'épaisseur des plateaux basaltiques parsemé par de nombreux cônes de scories [9].

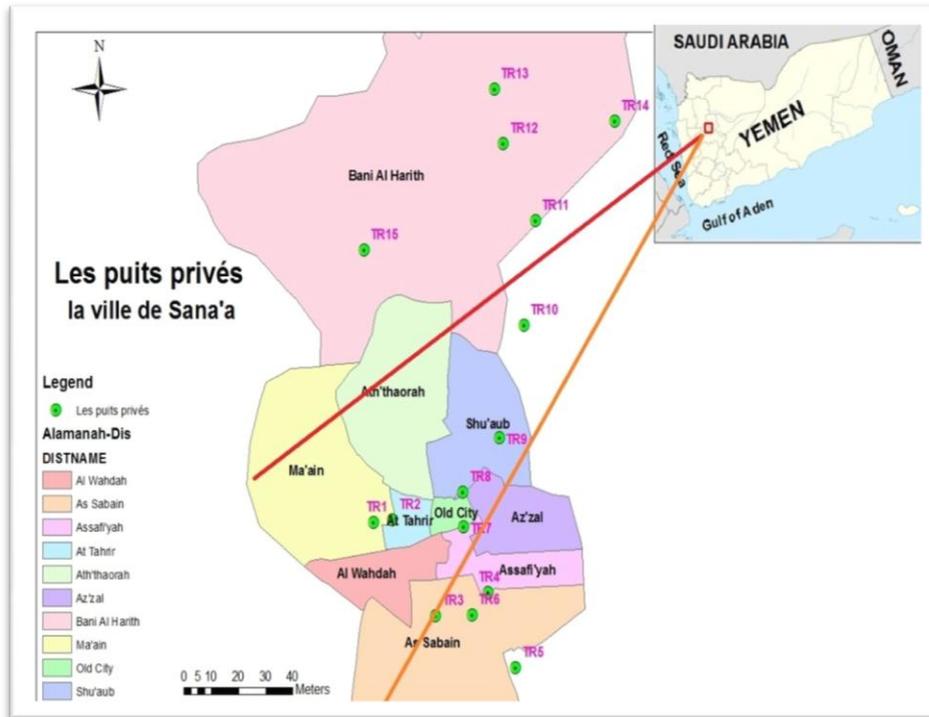


Figure 1: Carte du Bassin de Sana'a

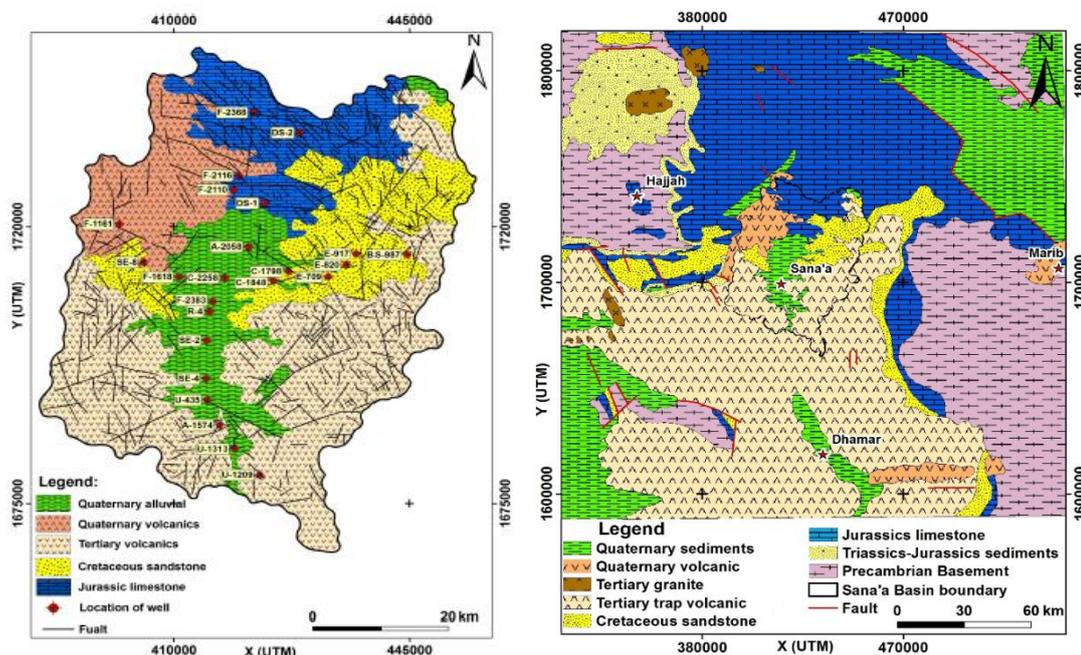


Figure 2 : la carte géologique des sources du bassin de Sana'a [9].

3. Matérielles et Méthodes d'études

Les méthodes utilisées pour ces analyses ont été normalisées selon les méthodes classiques des analyses des eaux de boisson et des eaux usées [10, 11]. Quinze échantillons d'eau, ont été prélevés au niveau des puits qui ont des profondeurs variant entre 70 et 300 m se trouvant au périmètre urbain de Sana'a pour l'analyse physico-chimique et microbiologique. Les paramètres suivants sont mesurés in situ (T°, pH, C.E, NTU) au laboratoire.

local de l'eau et assainissement de Sana'a les autres paramètres sont mesurés qui sont (TDS, TH, salinité, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Fe^{++} et F, et des coliformes totaux, fécaux, entérocoques). Les procédures suivies lors des analyses sont ceux décrites ci-dessus. Le pH et CE ont été examinés à l'aide d'un 720 inoLab WTW pH-mètre avec une électrode de référence à 25 ° C et un conductivité-mètre HACH sension 5 avec une électrode de référence à 25C °. Les paramètres microbiologiques de ces quinze échantillons sont déterminés par la méthode du nombre le plus probable (NPP) [12]. Cette méthode, consiste à inoculer, à l'aide de dilutions décimales appropriées de l'échantillon à analyser, une série de tubes contenant le milieu bouillon nutritif pour la recherche de la flore totale. Après une incubation de 24 h à 37°C, les tubes présentant un trouble sont considérés positifs. L'appréciation de la contamination d'origine fécale est réalisée par le dénombrement des coliformes fécaux et des entérocoques fécaux. Les coliformes totaux sont dénombrés après une incubation de 24 h à 48 h à 37°C, les tubes contenant le milieu bouillon lactose au pourpre de bromocrésol, munis d'une cloche de Durham (test présomptif).

4. Résultats

4.1. Etudes physico-chimiques

L'appréciation de la qualité physico-chimique et bactériologique de la Ville Sana'a a été suivie par le biais de l'analyse de l'eau récoltée au niveau de 15 Forages durant la période 2012.

Les principaux cations d'étude sont Fe^{++} , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} et Mg^{+2} ont montré de manière significative les différences entre les échantillons d'eau. De plus, il n'y avait pas de manière significative une différence entre TR6 - TR13 et TR14 de la concentration de Na^+ . Parmi tous les cations analysés, Ca^{2+} a montré la plus forte concentration dans les forages en eaux souterraines étudiées. La distribution de Na^+ et K^+ dans tous les forages ne pose aucun problème de qualité de l'eau, parce que ces cation sont dans les limites acceptables standard de l'eau potable déterminées par [13, 10].

Les concentrations de Fe^{++} pour tous les forages ont présenté des valeurs de distance entre 0,01367 et 0,4847 mg / l. Bien, il y avait un bon tri des composants de fer de la décharge, mais c'est une forte concentration dans les échantillons étudiés ont donné un indicateur de contamination Fe. La raison peut être due au primaire déversé composants de ce cation dans la décharge ou peut-être à cause des tuyaux des forages. Sur la base des résultats du tableau 1, on peut dire que, les résultats de l'étude en cours (Ca^{2+} , Mg^+) et la dureté totale (TH) étaient élevés par rapport à ceux de [14].

Tableau 1 : Résultats des analyse physico-chimiques des eaux de Sana'a, Yémen

Forages		T °C	PH	C.E µs/cm	TDS mg/l	NTU	T.H mg/l	Fe mg/l	T. Alcalinité mg/l	F ⁻ mg/l
Haeil	TR1	25,2	7,5	1614	1049	7	654	0,034	315	0,322
La Rue Alzraà	TR2	26,9	7,8	1046	680	10	429	0,259	168	0,583
Alssabain	TR3	24,3	8,2	411	267	2	145	0,014	176	0,396
La rue 45	TR4	26	7,7	1011	657	8	438	0,279	170	0,750
Wadi Sana'a	TR5	24,3	8,2	526	345	4	193	0,025	135	0,370
Bait Meiad	TR6	24,8	8,3	746	485	3	178	0,167	114	0,427
Bab Alssalame	TR7	24,1	7,7	1603	1041	4	750	0,039	132	0,630
Sha'ob Almshhad	TR8	24,1	7,3	606	385	19	249	0,187	198	0,413
La ville Saàoin	TR9	26,8	7,5	787	512	6	327	0,484	207	0,470
Sarif	TR10	24,3	7,6	538	349	15	201	0,116	178	1,007
La Rue Zaid	TR11	24,2	7,9	533	346	3	204	0,068	172	0,883
Bani howt	TR12	23,8	7,8	1533	996	10	626	0,090	151	0,203
Aéroport Sana'n	TR13	24,1	7,4	2087	1375	19	830	0,217	325	0,380
Alhatarish	TR14	23,7	8,3	1369	890	9	217	0,253	168	0,453
Jader	TR15	28,4	7,8	845	519	9	207	0,158	180	0,763

Après le tableau précédent et par un examen des résultats de laboratoire ont montré qu'il y a une augmentation significative de la conductivité électrique, les solides totaux dissous, la dureté totale et la turbidité, surtout dans les puits près de la station d'épuration. Aussi la concentration de fer est élevée dans la ville de Saàoin.

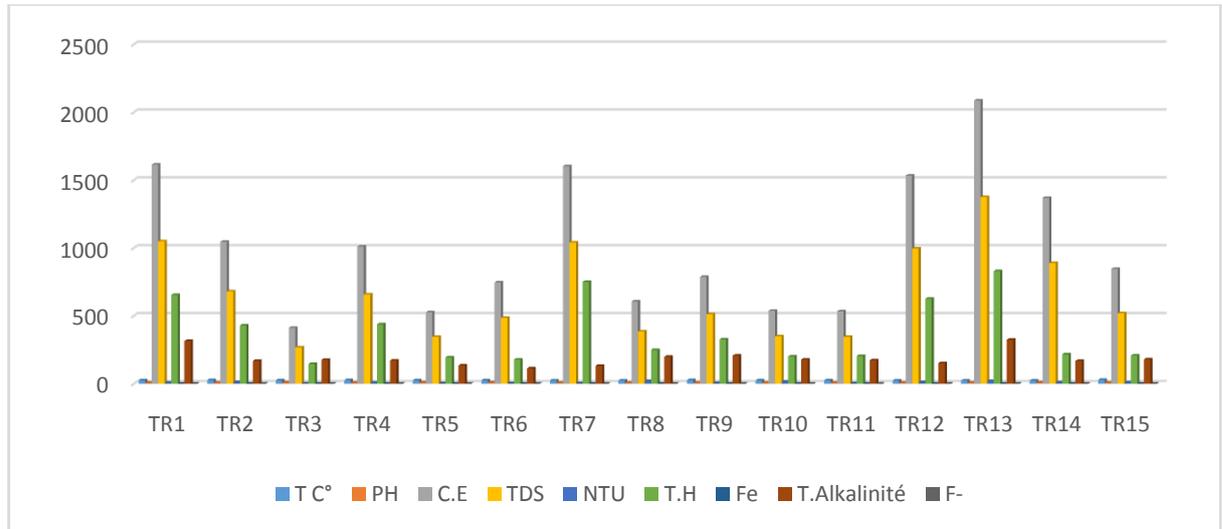


Figure 3 : Evaluation des paramètres physico-chimiques des eaux de Sana'a -Yémen.

Tableau 2 : Résultats des analyse chimique des cations et anions des eaux de Sana'a

Eléments		ions anions mg/l				ions cations mg/l			
Forages		NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	CL ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Haeil	TR1	107,7	383	95,8	255	3,54	56	28	213,8
La Rue Alzraà	TR2	97,1	205	53,3	167,7	2,58	49	23	133,2
Alssabain	TR3	8,1	210	36,8	56	2	66	13	37,3
La rue 45	TR4	99,7	155	63,3	208	2,18	52	33	119,7
Wadi Sana'a	TR5	33,8	165	53,2	62	2,1	41	11	58,4
Bait Meiad	TR6	36,4	139	65,8	124	2	112	9	57
bab Alssalame	TR7	137,7	195	240,0	296	2,5	71	40	234
Sha'ob Almshhad	TR8	5,4	241	57,3	67,5	3,2	34	17	72
Saàoin La vaille	TR9	10,2	253	103,3	76	1,9	47	15	106
Sarif	TR10	13,7	217	42,7	56,7	4,5	34	12	69,2
La Rue Zaid	TR11	14,1	209	53,6	59	4,2	42	10	65,3
Bani howt	TR12	69,2	168	94,5	339	3,4	69	23	212,7
Air port Sana'n	TR13	132,1	396	172,0	357	3,7	130	50	251
Alhatarish	TR14	30,0	205	753,0	59,7	4,5	236	11	68,4
Jader	TR15	7,2	219	182,3	33,1	3,1	99	14	59,3

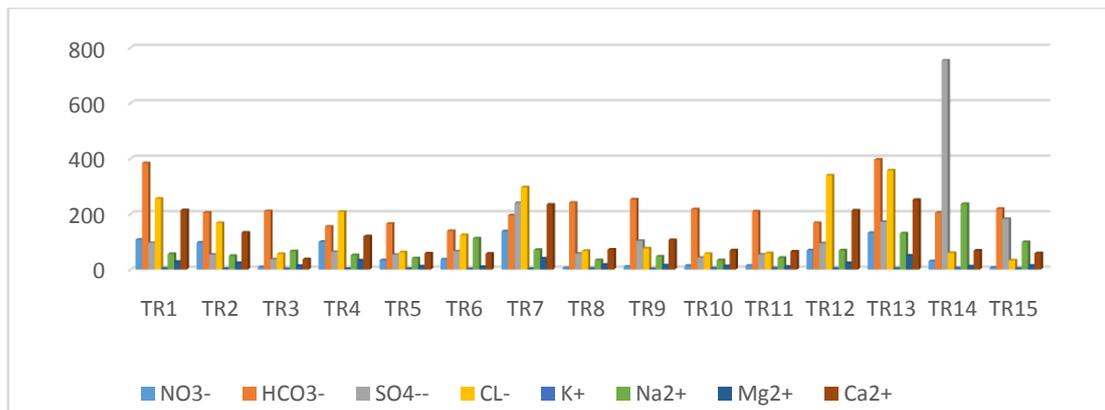


Figure 4 : analyse des ions cations et anions des eaux de Sana'a – Yémen

D'après le tableau les résultats sont dépassé les normes OMS et la norme standard de Yémen, Pour NO_3^- dans la station de Haeil, et dans Alhatarish pour SO_4^{2-} , Cl^- dans la station de Bani Howt et enfin Ca^{2+} à Bab Alssalame et conforme ces normes pour HCO_3^- , K^+ , Na^+ et Mg^{2+} .

4.2. Etude Microbiologiques

Les Agents pathogènes qui causent des maladies peuvent présenter un risque pour la santé particulière, notamment la diarrhée, pour les nourrissons, les jeunes enfants et les personnes dont le système immunitaire est gravement affaibli, [15].

Tableau 3: Résultats moyens de l'analyse bactérienne des eaux de Sana'a – Yémen

Forages		coliformes Fécaux	coliformes Totaux	Entérocoques
Haeil	TR1	2600	8100	1500
La Rue Alzraà	TR2	15	69	13
Alssabain	TR3	0	0	0
La rue 45	TR4	0	0	0
Wadi Sana'a	TR5	0	0	0
Bait Meiad	TR6	17	52	18
bab Alssalame	TR7	18	57	20
Sha'ob Almshhad	TR8	20	69	19
Saàoin La vaille	TR9	6	17	9
Sarif	TR10	5	14	8
La Rue Zaid	TR11	5	13	7
Bani howt	TR12	2500	7500	1650
Air port Sana'n	TR13	75	224	35
Alhatarish	TR14	0	0	0
Jader	TR15	2	3	3

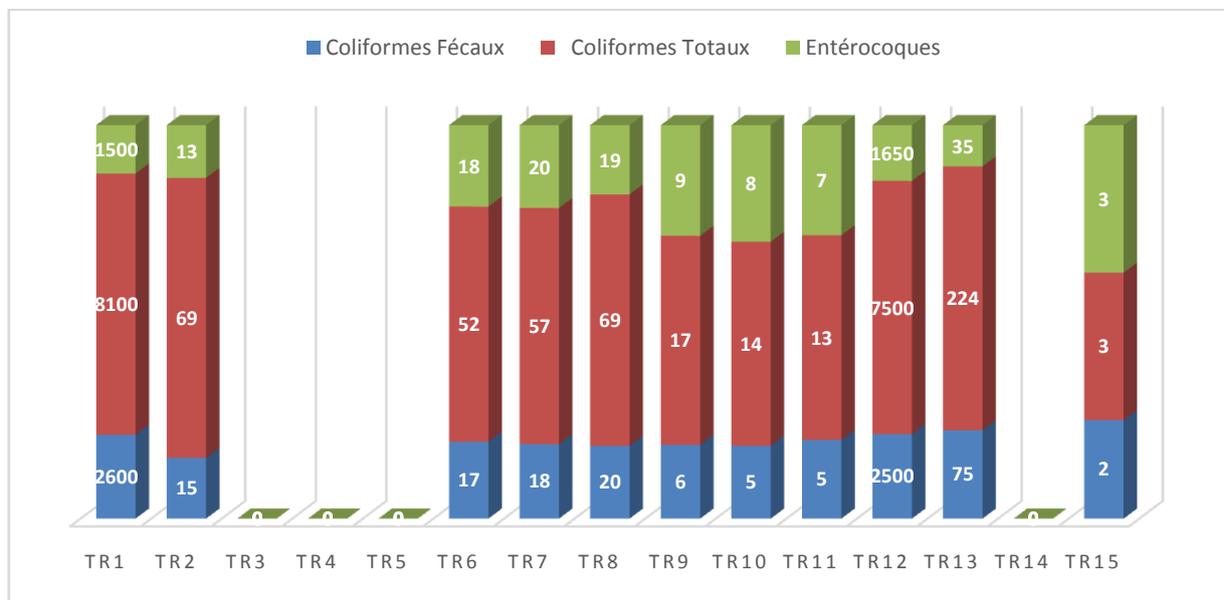


Figure 5 : Moyens les l'analyses bactériennes des eaux de Sana'a – Yémen

Pour qu'une eau soit prêt à être consommé il est nécessaire que les bactéries soient absentes c'est le cas les forages TR3, TR4, TR5 et TR15 par contre au niveau des autres stations sont note la présence d'une quantité importante de bactéries par exemple TR1 présente plus de 10000 bactérie des trois types réunies.

5. Discussion

L'exploitation des résultats est basée sur la comparaison entre les normes du Yémen et de l'OMS avec les données de nos analyses effectuées sur les échantillons des eaux brutes. Les résultats de l'analyse physico-chimique présentés dans ce travail, ont montré que le pH, la température, la matière organique, les sulfates, Nitrates, le Fer, turbidité et les Chlorures peuvent être considérés présentent des incidences sur la qualité des eaux. Ainsi, les valeurs moyennes du pH (7,7), la température (24,9 °C), les sulfates (138 mg/L), les Nitrates (53,5 mg/L), les Chlorures (149 mg/L) ne sont pas compatibles avec les normes des eaux d'alimentation [14]. D'après les résultats ci-dessus, on constate que les valeurs des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des échantillons analysés ne sont pas dans les limites de directives de l'OMS et les normes de Yémen. En ce qui concerne l'analyse biologique, les résultats de laboratoire ont montré que la plupart des puits ont eaux souterraines avec de très grande quantité de bactéries, en particulier dans les puits TR1 et TR12. La principale raison de l'existence de la concentration de ces métaux lourdes et la forte présence de bactéries en présence d'une grande quantité de déchets industriels et ménagers et des déchets solides et la présence de forage près des maisons pour l'élimination de l'eau utilisée dans les foyers et l'absence de réseau d'assainissement et de l'urbanisme de la ville de Sanaa. Et aussi, la présence de l'usine de traitement dans la partie nord de la capitale Sanaa, qui ont un effet significatif sur la propagation de la pollution et des déchets et la filtration de l'eau dans le sol et le mélange avec les eaux souterraines. La variation de la concentration en nitrates constatée entre les différents puits peut être liée entre autre à l'hétérogénéité du milieu physique. Pour [16], cependant, la proportion des puits à nitrates est faible, la proportion élevée de nitrates peut être causée par l'utilisation d'engrais chimiques dans l'agriculture. Les précipitations lourdes et l'absence de couverture végétale contribuent à la lixiviation rapide des nitrates vers la nappe phréatiques [17]. La charge de Sana'a n'a pas été sélectionné sur des bases scientifiques et aucune évaluation de l'impact environnemental n'a été réalisée avant la sélection de ce site. Ce site est situé sur une zone caractérisée par une structure géologique et les aquifères vulnérables. La qualité des eaux souterraines dépend de plusieurs facteurs tels que la composition chimique des aquifères - des conditions climatiques qui prévalent lors de la formation et la quantité d'eau disponible dans l'aquifère et sa vitesse de circulation. En dehors de ceux-ci, les activités des micro-organismes, la température et la pression sont responsables des caractéristiques chimiques de l'eau souterraine [4]. La population de Sana'a dépend de l'eau souterraine comme source principale pour obtenir l'eau. Qualité des eaux souterraines a été discutée par rapport aux aspects techniques, sociaux, institutionnels et environnementaux parce que la qualité de l'eau est un élément important de la gestion intégrée des ressources hydriques [4]. Le manque de données antérieures ou l'analyse de la qualité de l'eau pour les puits autour de la ville de Sana'a, pour faire une comparaison afin de comprendre le rôle de la maison de forage dans le changement de la qualité des eaux souterraines. En conséquence, cette étude pourrait être une étude de base pour de futures enquêtes sur la qualité de ce site sur les eaux souterraines. Ce réexamen a montré que les principales sources des Nitrates dans les aquifères urbains à travers le monde sont principalement liés à l'évacuation des eaux usées et l'élimination des déchets solides [18]. Dans les pays en développement, un système d'égout et le traitement en combinaison avec un système d'élimination des déchets solides appropriée permette de réduire l'essentiel du problème. Toutefois, il reste le risque de pollution des eaux souterraines par des fuites des égouts, [18]. L'excès de Ca^{2+} provoque des concrétions dans le corps tels que calculs rénaux ou vésiculaires et irritation urinaire [19]. Le calcium est présent dans divers matériaux de construction, tels que le ciment, la brique et le béton de la chaux. Il est présent dans les batteries, et est appliquée dans le plâtre en sulfate de calcium. Le calcium peut influencer négativement la toxicité d'autres composés. Des éléments tels que le cuivre, le plomb et le zinc sont beaucoup plus toxiques dans de l'eau douce [20]. Cependant, il semble y avoir trois inconvénients importants de l'assainissement. En premier lieu, une baisse de la nappe phréatique de certaines 20-40 m s'est produite dans les alluvions Quaternaires. En conséquence, le rendement moyen quotidien de nombreux puits creusés a fortement diminué. Un deuxième inconvénient du réseau des eaux usées est qu'il n'y a guère de contrôle sur la réutilisation de l'énorme offre de traitement de l'eau au nord de l'aéroport. Selon [21], la réutilisation incontrôlée d'eaux usées traitées n'aura pas d'effet bénéfique sur (renouvelable) la gestion des ressources en eau durable. Un troisième inconvénient est que la construction d'un réseau d'assainissement est une option qui nécessite un entretien très coûteux, à la fois financièrement et techniquement. D'autres zones urbaines dans le monde, il est connu que les systèmes conventionnels sont de loin l'option la plus chère. Compte tenu de la situation critique à l'égard de la disponibilité des ressources en eau dans le bassin de Sana'a, il était probablement imprudent de considérer l'application de systèmes conventionnels dans toute la ville. [22].

Conclusion

On peut conclure que tous les puits dépassant les normes de l'OMS. Les puits TR-1, TR-12, TR13 et TR-14, situés au Nord-Est de la ville de Sana'a, ont été trouvés les plus pollués. Les principales raisons proposées pourraient être visés à l'écoulement de surface des lixiviats vers le sud, suivie de son infiltration dans le sol, en particulier après la saison des pluies. Polluants peuvent migrer à l'écoulement des eaux souterraines du sud-ouest à nord-est. Cependant, la pollution peut également être provoquée par la composition naturelle des roches. La grande concentration des produits chimiques lors de l'analyse des eaux de ville Sana'a et son impact sur la qualité des eaux souterraines se réfère à la relation entre la population humaine et l'industrielle de la ville. Il est donc fortement recommandé de surveiller la qualité de l'eau de ces puits sur une période plus longue. Le but de cet article est de présenter le développement d'un modèle de flux d'eaux qui sous-tendra le cadre sur lequel se fonde l'évaluation globale de la capacité du bassin de Sana'a pour soutenir les systèmes d'eaux.

Remerciements- Cette étude a été menée par les chercheurs des eaux usées recherche Unit de la Faculté des Sciences de l'Université Ibn tofail et ceux du Laboratoire Environnement & Energies Renouvelables (Maroc), dans le cadre la qualité des eaux souterraines de Bassin Sana'a par la Coopération Laboratoire Corporation de l'Eau et de l'Assainissement Sana'a. Yémen. Et nous remercions sincèrement les différents organismes et intervenants;

Références

1. Al-Alimi A. A. - Water Quality Degradation of Sana'a Groundwater Basin/Yemen. *M. Sc. Thesis, Department of Environmental Sciences, Faculty of Higher Education, Jordan University (2000) 185.*
2. Cey E. E., D.L. Rudolph, G.W. Parkin and R. Aravena, - quantifying groundwater discharge to a Small perennial stream in southern Ontario. *Canada. J. Hydrology.* (1998) 210: 21-37.
3. RAWEH R, - (eds).Études du traitement des eaux usées urbaines. Des performances épuratoires et De l'impact environnemental de la STEP de Sanâa -Yémen. *Thèse université ibn Tofail, kénitra (2011) Maroc.*
4. ALEMAD A., Nagi M., Ibeda A., Nasser R., Alwathaf Y., Elrhauat O., Elkharrim K., Babaqi A., Belghyti D. - *The impact of Sana'a solid waste on the quality of groundwater in Yemen, 2nd International Conference, Water and Society, 4 - 6 September 2013, New Forest, UK. Paper DOI: 10.2495/WS130151. (2013) p.171-184.*
5. Italconsult, - Water supply for Sana'a and Hodeida. Sana'a basin ground water studies, *Volume 1, 2 And UNDP: Yemen 3202, (1973). Rome.*
6. Mosgiprovodkhoz, - *Sana'a Basin Water Resources Scheme, (1986) Volume 2.*
7. Foppen J .W. A, - *Sources for Sana'a Water Supply, SAWAS Project: Evaluation of the effects of Groundwater use on groundwater availability in the Sana'a Basin, SAWAS Technical Report No.05; Volume II and III, (1996) Sana'a.*
8. AL-Kadasi M. A. - *Temporal and spatial evolution of the basalt flows of the Yemen Volcanic Group, Ph. D, thesis, (1994).University of London.*
9. Alwathaf Y., - (eds), *Hydrodynamic modeling for groundwater assessment in Sana'a basin, Yemen, Faculty of Sciences-Kenitra, University of Ibn Tofail, (2013) pp: 38-56.*
10. OMS, - World Health Organization (WHO), (eds). *Guideline for Drinking Water Quality. Health Criteria and Other Supporting Information: 2nd Edition. Vol.2, Geneva, (2014) pp. 940-949.*
11. APHA, - Standard methods for examination of water- wastewater.17th Ed., *American Public Health Association. Washington. (1989) 1500.*
12. Rodier J, - (eds), « *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer : physico- Chimie, Bactériologie et biologie* », Ed. Dunod, Paris, France. (8) (1996) 1383.
13. YMWE, - *Guidelines for drinking water quality. Sana'a, Yemen's Ministry of Water and Environment. (1999). Republic of Yemen.*
14. (REEM), *Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Eau et de l'Environnement, Département de l'Environnement, Observatoire National de L'Environnement du Maroc (ONEM), Octobre, Ed, 2 (2001) 296.*
15. US EPA, - *National primary drinking water regulations, May 2009. EPA 816-F-09-004,*

16. Saadi, Z, A. Maaslouhi M. Zeraouli et J. P Gaudet, - « *Analyse et modélisation des variations Saisonnières des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines de la nappe Mnasra, Maroc* C. R. Acad. Sci., Sér. 2, Sci. Terre Planètes, 329. (8) (1999) p: 579-586.
17. Belghyti D, Daifi H, Alemad A, Elkharrim K, Elmarkhi M, Souidi Y, Benelharkati F, Joti B, Elmoukrifi Z, Ibeda A, Azami-Idrissi Y, Baroud S, Elkhayyat F, Elrhaouat O, Sadeq S, Taboz Y, Sbai H, Naser R, Chigger H, & Derwich N. - *Groundwater management for sustainable Production of drinking water Quality in Maâmora. 2nd International Conference, Water and Society*, 4 – 6 September 2013, New Forest, UK. Paper DOI: 10.2495/ WS130201. (2013) pp. 241-254.
18. Fernando T. Wakidaa, David N. Lerner. - *Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a Review and case study*, *Water Research* 39 (2005) 3–16.
19. Suman, M, Khaiwal, R Dahiya, R & Chndrai. - *Leachate haracterization and assessment of Groundwater pollution near municipal solid waste site*. *Environmental Monitoring and Assessment* 118: (2006) 435– 456.
20. Lenntech, - Calcium and water. <http://www.lenntech.com/elements-and-water/magnesium-and-Water>.
21. Hamdi M., - “*Competition for Scarce Groundwater in the Sana’a Plain, Yemen. A Study on the Incentive Systems for Urban and Agricultural Water Use*”, IHE Ph.D. Thesis. Balkema Publishers, ISBN (2000) 90 5410 426 0.
22. Foppen J.W. A, Naaman M, Schijven J. F. - *Managing Water under Stress in Sana’a, Yemen. The Arabian Journal for Science and Engineering*. Volume 30, (2005). Number 2C.

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>