

CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE SITUÉE DANS UNE ZONE A FORTE POLLUTION INDUSTRIELLE : CAS DE LA COMMUNE DE RUFISQUE

Abdou K. D. DIMÉ^{1,2*}, Galass DIOUF^{1,2}, Mamadou M. SARR^{1,2}
et Modou FALL²

¹Equipe Matériaux, Electrochimie et Photochimie Analytiques (EMEPA) de l'Université Alioune Diop de Bambey, BP 30 Bambey, Sénégal

²Laboratoire de Chimie Physique Organique et d'Analyses Environnementales, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005 Dakar-Fann, Sénégal

* Correspondance, e-mail : abdou.dime@uadb.edu.sn

RÉSUMÉ

Ce travail a pour but d'étudier la composition chimique de la nappe phréatique de la commune de Rufisque. Pour ce faire, nous avons retenu deux points de prélèvements distants l'un de l'autre, afin de déterminer l'impact de cet environnement sur ces eaux. Il ressort de cette étude que les eaux de puits prélevées dans la zone de Diorga Chérif, loin de l'usine, sont riches en Ca, S, Na, Si, Cl⁻ et NO₃⁻, alors que les résultats des analyses des eaux de puits proches de la zone industrielle située dans le quartier de Darou Karim renferment des teneurs anormales en Ca, Na, Mn, Cl⁻, NO₃⁻, Si, S et SO₄²⁻, ce qui constitue une réelle menace sur la santé des populations. Cette étude nous permet de conclure que les autres éléments toxiques analysés (Pb, Hg, As, Cd, Fe, Cr, Al et P), bien que présents au niveau de la zone étudiée, sont en faibles quantités et leurs concentrations dans les eaux restent conformes aux normes de l'OMS.

Mots-clés : *eaux souterraines, qualité physico-chimique, analyse, pollution, Rufisque.*

ABSTRACT

Physico-chemical characterization of water table located in zone with high industrial pollution : case of the municipality of Rufisque

The purpose of this work was to study the chemical composition of the groundwater table in the municipality of Rufisque. For this, we selected two remote sampling points, to investigate the impact of this environment on these

waters. It appears from this study that well waters collected in the Diorga Chérif area, far from the factory, are rich in Ca, S, Na, Si, Cl⁻ and NO₃⁻, whereas the analyses carried out near the industrial place of Darou Karim indicated abnormal quantities of Ca, Na, Mn, Cl⁻, NO₃⁻, Si, S and SO₄²⁻, which constitutes a real threat to people's health. The study showed that the other hazardous elements determined (Pb, Hg, As, Cd, Fe, Cr, Al and P) have relatively weak concentrations and are in conformity with WHO standards.

Keywords : *water table, physico-chemical quality, analysis, pollution, Rufisque.*

I - INTRODUCTION

L'eau constitue un élément indispensable aux des êtres vivants, surtout à l'homme et aux animaux. Sa disponibilité en quantité et qualité suffisantes contribue à la préservation de la santé. L'eau est essentielle pour la vie, mais peut cependant être vecteur de maladie [1]. En effet, l'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir ni substances chimiques dangereuses, ni germes nocifs pour la santé [2, 3]. Au Sénégal, comme dans plusieurs autres pays à travers le monde, une grande variété d'éléments métalliques se retrouve dans l'environnement, parfois rejetées par les activités industrielles et métallurgiques [4 - 6]. Ces facteurs anthropiques rendent les eaux souterraines très vulnérables aux pollutions [7, 8]. Dans beaucoup de villages et villes au Sénégal, où l'accès décent à l'eau, vital pour le bien-être des populations et pour un développement économique efficient et durable, est problématique. Les risques de contamination de ces eaux sont énormes puisque la plupart des puits sont à ciel ouvert et sont alimentés directement par les eaux des pluies et/ou par les eaux de la nappe phréatique. Les contextes hydrogéologique et socio-économique de beaucoup de villes du Sénégal sont à l'origine de la pollution des eaux des puits traditionnels dans ces localités. Et c'est notamment le cas de la commune de Rufisque où les sources de pollution des eaux de la nappe phréatique sont très diversifiées. Cette partie centre-ouest du bassin sédimentaire sénégalais recèle d'importantes ressources en calcaires et marno-calcaires. En outre, la proximité avec la mer qui est à l'origine du phénomène de la salinisation des sols, l'utilisation des engrais et des pesticides dans les activités agricoles et d'autres activités industrielles peuvent provoquer une contamination des eaux. A cet égard, le contexte environnemental et industriel du milieu et particulièrement sa pollution, retient notre attention au regard des investissements humains, financiers et techniques. Dans la ville de Rufisque, même si une frange de la population s'alimente en eau grâce au réseau moderne, une couche plus vulnérable des habitants de utilise pour consommation les eaux des puits. Et comme nous l'avons évoqué en haut, ces

eaux sont potentiellement polluées. Au regard de tous ces facteurs, les risques de pollution de la nappe phréatique de cette zone sont réels et cela constituerait sans doute un danger pour la population. La qualité chimique d'une eau est liée à l'ensemble des caractéristiques générales de l'eau et aux concentrations de minéraux qui y sont dissous. Elle dépend des types de matériaux présents dans le sol et du temps de contact de l'eau avec ces matériaux. En effet, la présence de ces éléments dans la nature influe directement sur la santé des êtres vivants [9 - 11]. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux eaux des puits. Notre principal objectif dans cette étude est de déterminer qualitativement et quantitativement la composition en espèces chimiques, notamment en ions et métaux lourds pour certains puits de la commune qui peuvent être affectés par la pollution. L'étude est consacrée à un point près de la zone à risques de pollution situé au quartier de Darou Karim et un autre point un peu éloigné de cette zone situé au quartier de Diorga Chérif.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Zone de l'étude

Rufisque est une ville côtière située à 25 km au sud-est de la région de Dakar. Elle se situe entre 14°43'0'' et 14°44'0'' de latitude nord et 17°16'0'' et 17°15'0'' de longitude ouest. C'est une zone côtière qui fait partie de la presqu'île du Cap-Vert (pointe occidentale du Sénégal). Elle est limitée au nord par la commune de Sangalkam, au sud par l'océan atlantique, à l'est par la commune de Bargny et à l'ouest par la commune de Grand-Mbao. Elle recouvre trois communes (Rufisque ouest, Rufisque nord et Rufisque est) pour une superficie totale de 9,76 km². Elle est située dans une demi-cuvette formant une dépression ondulée avec des altitudes variant de 0 à 30 m et est traversée par la route nationale (RN1) et par la voie ferrée de l'axe Dakar-Thiès. Cette dernière coupe les bassins de façon latitudinale en deux parties. Selon les données fournies par la Direction de la Prévision et de la Statistique, la population de la commune de Rufisque était estimée en 2014 à 220933 habitants dont 110790 femmes contre 110143 hommes. Elle concentre les 45,1 % de la population de son département.

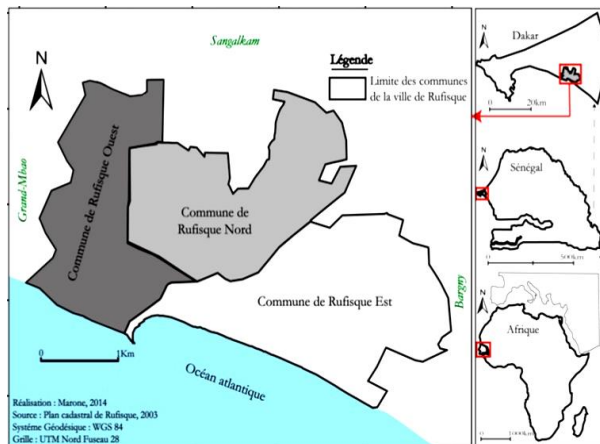


Figure 1 : Situation administrative de la Commune de Rufisque

Plusieurs activités industrielles se déroulent dans cette zone riche en marno-calcaires éocènes à l'origine d'une forte activité cimentière [12]. De plus une centrale à charbon est en activité dans la commune voisine de Bargny, Les principales sources de pollution recensées au niveau des zones d'études sont les activités industrielles et agricoles, qui engendrent des pollutions directes ou indirectes affectant les éléments de la nature. En fonction des procédés de production mis en œuvre, les industries rejettent des gaz dans l'atmosphère et produisent des déchets. Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement et s'effectue dans des broyeurs à boulet. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier et progressivement le ciment est à l'état de fine farine supérieure à 80 μm . A la sortie du broyeur, un cyclone sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée.

Tableau 1 : Proportion de la composition de la farine crue

| Composition de la farine crue | Proportion en % |
|--|-----------------|
| Carbonate de calcium (CaCO_3) | 77 à 88 |
| Silice | 13 à 14 |
| Alumine | 2 à 10 |
| Oxyde de fer | 1,5 à 5 |

Les polluants contenus dans les gaz de combustion dépendent de la nature du combustible utilisé (charbon, fuel ou gaz naturel) et de la composition du minerai (qui peut contenir également du soufre). Les principaux polluants atmosphériques potentiels gazeux dans l'industrie du ciment sont le SO_2 , les NO_x , le CO et le CO_2 . Les matières premières et les combustibles contiennent toujours des métaux mais leur concentration est très variable d'un endroit à un

autre et leur potentiel d'émissions dans l'atmosphère dépend de mécanismes très complexes. De plus, les concentrations en métaux des déchets utilisés comme combustibles sont variables selon l'origine des déchets. On retrouve la pollution agricole dans cette zone, qui est étendue dans l'espace et dans le temps et s'explique par l'infiltration des engrais et pesticides sur l'ensemble de la surface cultivée jusqu'à la nappe.

II-2. Échantillonnage

L'étude a été effectuée sur des eaux de deux puits traditionnels captant l'eau de la nappe phréatique au niveau de la commune de Rufisque. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon en polyéthylène.

II-3. Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques comme le pH, la conductivité et la température ont été mesurés sur place car pouvant évoluer pendant le transport des échantillons et il est toujours préférable de faire ces déterminations sur le terrain. En règle générale, il est plus précis d'analyser les échantillons aussitôt que possible après prélèvement. Ceci est particulièrement vrai lorsque la concentration attendue est faible. L'analyse immédiate réduit les risques d'erreur. Le Titre Hydrotimétrique (TH) a été déterminé par un dosage complexométrique par l'EDTA.

II-4. Chromatographie ionique

Le dosage des ions a été réalisé en utilisant le système de chromatographie ionique Dionex ICS-5000 DC, qui permet l'analyse des ions en utilisant la suppression conductimétrique. Il est composé d'un éluant liquide (Na_2CO_3 à 2 mmolL^{-1} ; NaHCO_3 à $2,4 \text{ mmol L}^{-1}$; 2 % acétone), d'une pompe haute pression, d'un injecteur, d'une colonne de séparation Dionex AS11-HC, d'un suppresseur chimique et d'une cellule de conductivité. Avant l'analyse de chaque échantillon, le système est calibré en utilisant une solution standard. En comparant les données obtenues avec l'échantillon à celles du standard, on quantifie les ions de chaque échantillon. Un logiciel de chromatographie sur PC détermine, pour chaque pic du chromatogramme tracé, la concentration correspondante.

II-5. ICP-AES

L'analyse des métaux a été effectuée sur l'appareil ICP-AES ICAP 7400 double visée (axiale et radiale) Thermo, avec une sensibilité de l'ordre du ppb.

L'échantillon est nébulisé puis introduit au centre du plasma. Sa température permet la désolvation, puis la volatilisation et l'atomisation des éléments contenus dans l'échantillon à analyser. Lors de la désexcitation des ions, il y a émission d'énergie aux longueurs d'ondes spécifiques de chaque élément. Les ions ainsi formés sont détectés à l'aide d'un réseau polychromateur. Dans ce cas, la méthode mise en exergue est l'ICP-optique ou ICP-AES (Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy/Plasma à Couplage Inductif / Spectroscopie d'émission atomique). La double visée dont est équipée l'ICAP 7400 permet le dosage simultané et sans dilution supplémentaire des éléments majeurs et mineurs contenus dans un même échantillon. L'analyse de chaque échantillon avec la longueur d'onde recommandée a permis d'observer le pic de chaque élément. La courbe d'étalonnage linéaire obtenue permet de connaître la concentration de chaque élément [13].

III - RÉSULTATS

Les ions tels que les chlorures, les nitrates, les sulfates et les fluorures ont été analysés par chromatographie ionique.

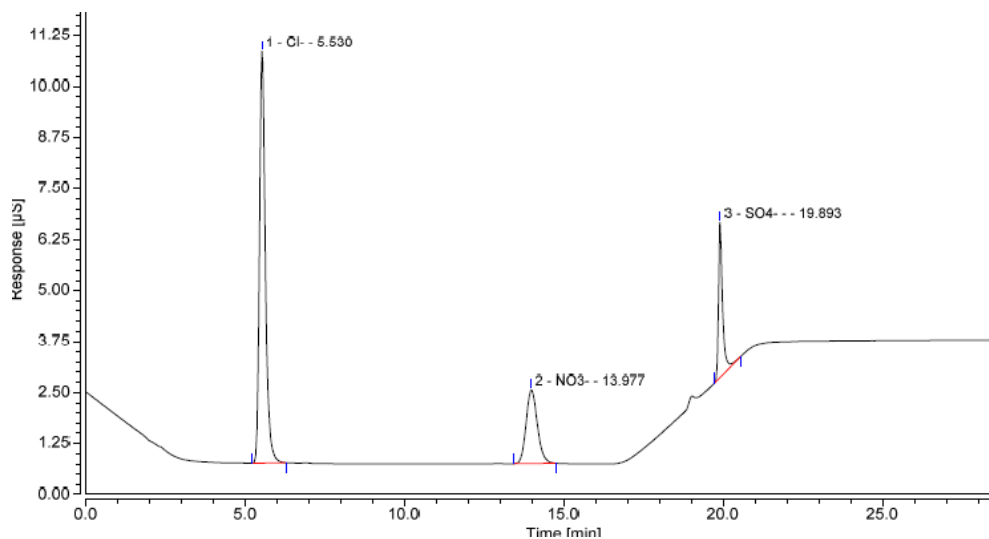


Figure 2 : *Chromatogramme de l'analyse du prélèvement du puits du quartier Darou Karim*

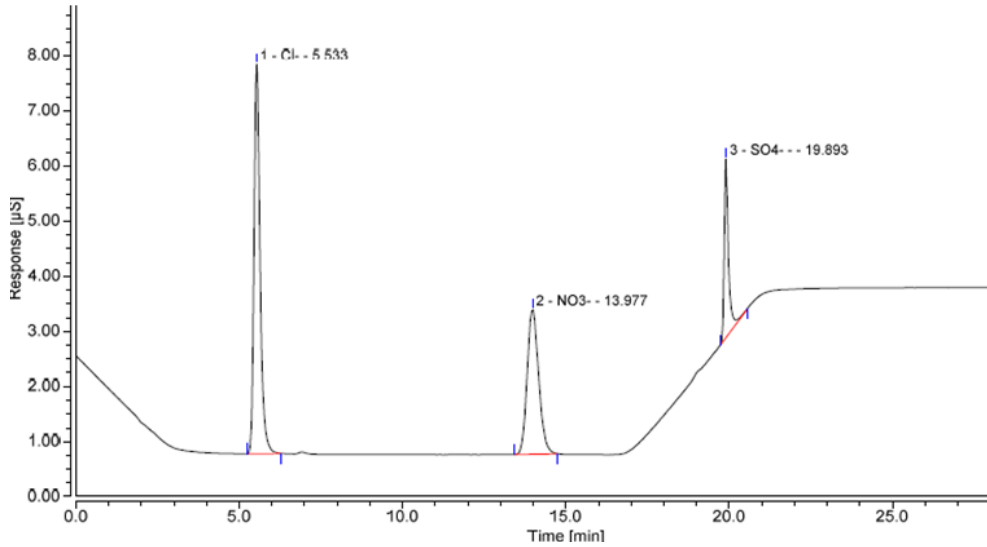


Figure 3 : *Chromatogramme de l'analyse du prélèvement du puits du quartier Diorga Chérif*

Les autres éléments constitués des métaux tels que le fer, l'aluminium, l'arsenic, le calcium, le magnésium, le silicium, le manganèse, le phosphore, le soufre, le sodium, le chrome, le mercure, le cadmium et le plomb ont été obtenus par analyse à l'ICP-AES. Les résultats obtenus après analyse, reportés dans le **Tableau 2**, ont été effectués à des températures comprises entre 22 et 28 °C.

Tableau 2 : *Caractéristiques physico-chimiques des eaux de Darou Karim (E₁) et de Diorga Chérif (E₂) déterminées par ICP-AES et chromatographie ionique*

| Paramètres | Zone de Darou Karim (E ₁) | Zone de Diorga Chérif (E ₂) | Normes OMS [15] |
|---------------------------------|---------------------------------------|---|-----------------|
| pH | 7,26 | 5,97 | 6,5-8,5 |
| Conductivité (µS/cm) | 6196 | 4260 | 2000 |
| TH (°F) | 21,3 | 10,40 | 500 |
| Fer (mg L ⁻¹) | < 0,01 | < 0,01 | 0,3 |
| Soufre (mg L ⁻¹) | 88,13 | 102,96 | 0,2 |
| Aluminium (mg L ⁻¹) | < 0,01 | 0,05 | 0,2 |
| Calcium (mg L ⁻¹) | 272,04 | 219,22 | 100 |
| Magnésium (mg L ⁻¹) | 79,62 | 50,61 | 200 |
| Sodium (mg L ⁻¹) | 436,94 | 237,61 | 200 |
| Phosphore (mg L ⁻¹) | 0,13 | 0,24 | - |
| Silicium (mg L ⁻¹) | 16,76 | 17,76 | 10 |
| Manganèse (mg L ⁻¹) | 1,31 | < 0,01 | 0,1 |
| Chrome (mg L ⁻¹) | < 0,01 | < 0,01 | 0,05 |
| Plomb (mg L ⁻¹) | < 0,01 | < 0,01 | 0,01 |
| Arsenic (mg L ⁻¹) | < 0,01 | < 0,01 | 0,01 |
| Mercure (mg L ⁻¹) | < 0,001 | < 0,001 | 0,001 |
| Nitrates (mg L ⁻¹) | 474,10 | 684,17 | 50 |
| Sulfates (mg L ⁻¹) | 277,29 | 238,96 | 250 |
| Chlorures (mg L ⁻¹) | 696,45 | 487,54 | 250 |
| Fluorures (mg L ⁻¹) | < 1 | < 1 | < 1,5 |

IV - DISCUSSION

IV-1. Caractérisations physico-chimiques

Le pH est un facteur d'investigation de l'acidité ou de l'alcalinité d'une eau. Dans les eaux analysées, il est compris entre 5,97 et 7,26 ce qui indique que les eaux de Diorga Chérif ont un pH légèrement acide tandis que celles de Darou Karim sont neutres. En se référant aux normes de l'OMS (pH compris entre 6,5 et 8,5) pour l'eau potable, les eaux analysées à Diorga Chérif ne sont pas recommandées à la consommation humaine. Dans la zone du quartier Darou Karim, nous avons des sols alcalins dont le pH est compris entre 7,5 et 8. Ce résultat témoigne d'une influence directe de ces sols sur le pH de l'eau souterraine. Dans les eaux analysées des deux sites, nous avons une conductivité de l'eau très élevée dépassant largement les normes fixées pour une bonne eau de qualité. Ces valeurs, comprises entre 4260 et 6196 µS/cm, montrent que les eaux analysées sont très minéralisées [14]. Les résultats

concernant les mesures de la dureté de l'eau dans les deux sites, ont montré que toutes les valeurs de ce paramètre sont conformes aux normes de l'OMS qui exigent une concentration maximale admissible de 500 mg L^{-1} . Cependant, une eau sera dite douce si son TH est $< 15 \text{ }^\circ\text{F}$ mais dans le cas de Darou Karim, l'analyse révèle que les eaux sont dures et peuvent donc avoir des effets négatifs sur la qualité de l'eau potable et provoquer l'entartrage des canalisations et récipients.

IV-2. Caractérisations par ICP-AES

Les résultats des analyses ont montré que toutes les valeurs des teneurs en fer (Fe) sont conformes aux normes de l'OMS qui exigent une concentration maximale admissible de $0,3 \text{ mg L}^{-1}$. En effet, il est connu que les roches dans les zones d'études sont pauvres en minerai de fer et les autres sources de fer sont presque inexistantes. Le fer intervient dans le processus de fabrication du ciment comme élément de correction mais en quantité faible. Dans les eaux analysées, on s'intéresse aux espèces chimiques de la famille du soufre (S). D'après les valeurs de nos résultats, il est établi que ces eaux sont fortement polluées par le soufre avec des valeurs considérablement supérieures à la norme de l'eau potable. Selon cette norme, la concentration en soufre (S) dans l'eau de boisson doit être inférieure à $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Les molécules de soufre (S) sont principalement émises lors de la formation du clinker et se retrouvent majoritairement sous forme particulaire dans l'air ambiant. La conséquence immédiate du dépôt atmosphérique est la pollution des eaux, sols et végétaux. Aussi bien dans l'échantillon 1 (Darou Karim) que dans l'échantillon 2 (Diorga Chérif), la concentration en sodium (Na) dans l'eau de la nappe phréatique dépasse la norme fixée par l'OMS (200 mg L^{-1}). Dans le prélèvement du puits du quartier Darou Karim, nous avons une concentration en sodium de $436,94 \text{ mg L}^{-1}$ bien supérieure à celle du quartier Diorga chérif ($237,31 \text{ mg L}^{-1}$). Il est néanmoins important de signaler qu'au quartier Darou Karim, nous avons des sols riches en sodium (Na) échangeable. Ceci peut expliquer le taux élevé de sodium retrouvé dans les eaux de la nappe phréatique. Le silicium (Si) se retrouve dans l'eau sous forme d'acide silicique ou acide orthosilicique (H_2SiO_3 ou H_4SiO_4). Sa solubilisation partielle par les eaux d'infiltration donne des eaux minérales plus ou moins riches en silicium sous forme ionisée associée à des cations Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc. Les résultats des analyses montrent, dans les deux sites, une forte présence de silicium (Si), bien supérieure à la norme imposée (10 mg L^{-1}), ce qui montre que les eaux proches de l'usine ont plus ou moins des impuretés semblables à celles des eaux lointaines. Le phosphore (P), un élément naturel que l'on retrouve, entre autres, dans le sol, est indispensable à la croissance des végétaux. Il sert principalement d'engrais chimique dans les activités agricoles et industrielles.

Essentiel au bon fonctionnement de l'organisme, le phosphore n'est soumis à aucune limite légale de quantité dans l'eau de distribution. Toutefois, on peut dire que les eaux analysées sont riches en phosphore (P) loin de l'usine, ce qui semble prouver la pollution agricole avec l'utilisation des pesticides. La teneur en calcium (Ca) des eaux de la nappe phréatique des zones d'études dépasse la limite fixée par l'OMS (100 mg L^{-1}) tandis que celle en magnésium (Mg) respecte bien les normes. Dans les échantillons analysés de Darou Karim, à proximité d'une usine utilisant de grandes quantités de calcaire, les concentrations en calcium et en magnésium sont supérieures à celles analysées au quartier Diorga Chérif situé à environ 3 km de l'usine. Pour le quartier de Diorga Chérif, la raison principale de la présence du calcium dans les eaux analysées pourrait être due aux phénomènes de ruissellement et d'infiltration puisque les sols dans cette zone sont pauvres en calcaires et les autres sources calcium (Ca) sont presque inexistantes. L'étude a permis également d'analyser la présence de manganèse (Mn) et les résultats des eaux analysées ont été comparés aux valeurs reconnues comme sécuritaires des normes de l'ONU ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$). Dans ce cas d'étude, il s'avère que des valeurs non conformes ont été observées à Darou Karim, En revanche, les eaux analysées loin de l'usine montrent des valeurs normales par rapport à la norme. Etant donné qu'on retrouve du manganèse (Mn) dans la composition chimique du ciment, la pollution constatée est très probablement d'origine industrielle. L'aluminium (Al) et les métaux lourds tels que l'arsenic (As), le mercure (Hg), le chrome (Cr), le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) retrouvés dans nos prélèvements ont des concentrations relativement faibles qui ne dépassent pas les limites fixées par l'OMS. Les métaux lourds sont toxiques lorsque leur concentration est assez élevée. Dans les zones où nous avons effectué nos études, nous avons des sols pauvres en métaux lourds, n'existant qu'à l'état de traces. Les activités agricoles et industrielles menées dans ces zones n'ont pas pu affecter les eaux souterraines en métaux lourds. Des méthodes de détection plus précises doivent être envisagées et des politiques de préservations doivent être mises en place pour éviter d'éventuels effets sur la santé [16-17].

IV-3. Caractérisations par chromatographie ionique

Les nitrates constituent la forme azotée dominante dans les cours d'eau et dans les nappes d'eau souterraine. Dans notre cas d'étude, les résultats obtenus montrent que les teneurs en nitrates sont élevées par rapport à la norme fixée à 50 mg L^{-1} pour une eau de consommation. Les teneurs en nitrates des eaux des zones étudiées varient entre 474,10 et 684,17 mg L^{-1} . La concentration anormalement élevée de l'échantillon du quartier Diorga Chérif pourrait être due à la pratique agricole qui consiste à appliquer abondamment des engrais industriels ou du fumier. Bien que les nitrates n'aient pas d'effets toxiques

directs sauf à des doses élevées, le fait qu'ils puissent donner naissance à des nitrites conduit à une toxicité [18]. Les teneurs en chlorure des eaux des quartiers Darou Karim et Diorga Chérif sont respectivement 696,45 et 487,54 mg L⁻¹. Signalons que ces valeurs dépassent la limite fixée par l'OMS (250 mg L⁻¹) pour une eau de consommation. Il est important de noter que les échantillons des eaux du quartier Darou Karim présentent une plus grande concentration en chlorures. Ceci s'explique par le fait que les rejets de l'usine, sources de pollution peuvent contaminer localement les eaux de surface et les eaux souterraines. Dans les échantillons analysés, on trouve une forte teneur en sulfates qui dépasse légèrement la norme définie par l'OMS au niveau des eaux de Darou Karim alors qu'elle est normale dans les eaux de Diorga Chérif. Cette valeur, malgré qu'elle ne dépasse pas la norme, est assez importante et doit être prise en compte. Les sulfates peuvent également provenir de la dissolution du gypse qui est un élément additif du ciment, et peuvent causer un problème de santé s'ils ne sont pas pris en compte. Enfin, les fluorures n'ont pas été détectés dans nos prélèvements.

V - CONCLUSION

Le travail entrepris dans le cadre de cette étude est une contribution à l'étude de la qualité des eaux de puits des zones de la nappe phréatique dans les quartiers de Darou Karim et de Diorga Chérif située dans la ville de Rufisque. Les activités industrielles menées près de Darou Karim ont probablement une relation avec la qualité de ces eaux. En effet, les eaux de Darou Karim renferment des teneurs anormales en calcium, sodium, magnésium, manganèse, chlorures, silicium, soufre et sulfates. Celles de la nappe de quartier Diorga Chérif sont menacées par des polluants comme S, Na, K, Si et NO₃⁻. La présence des nitrates en quantité importante dans les eaux de Diorga Chérif s'explique par activités agricoles menées dans ce quartier. Les ruissellements des eaux pendant la période des pluies peuvent déplacer ces nitrates dans des zones plus ou moins lointaines. Nous avons également mis en évidence que la conductivité, les taux de calcium et de sodium militent en faveur d'une minéralisation trop élevée de ces eaux. A noter que les autres éléments analysés n'existent pour la plupart qu'à l'état de traces dans les différentes eaux notamment les métaux lourds.

RÉFÉRENCES

- [1] - Y. LACOSTE, L'eau dans le monde : les batailles pour la vie, Larousse, Paris, (2003)
- [2] - A. PHILIP, Increased body lead burden-causes or consequences of chronic renal insufficiency?, *The New England Journal of Medicine*, Editorials, 348, 4 (2003) 345 - 347
- [3] - A. H. SMITH, M. N. BATES, Cancer risks from arsenic in drinking water, *Environ. Health. Perspect.*, 97 (1992) 259 - 267
- [4] - I. ADRAOUI, A. AMINE, Détermination des métaux lourds par voie électrochimique, *Les technologies de laboratoire*, 3 (2007) 16 - 21
- [5] - I. ZONGO, J-P. LECLERC, H. A. MAIGA, J. WETHE, F. LAPICQUE, Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: a comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes, *Sep. Purif. Technol.*, 66 (2009) 159 - 166
- [6] - A. K. D. DIME, G. DIOUF, E. T. DRAME, M. FALL, Caractérisation physico-chimique de la nappe phréatique située dans une zone à forte pollution industrielle : cas de la commune de Ngoundiane, *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 046 (2018) 23 - 28
- [7] - D. G. AHOULE, M. J. A. OHOU-YAO, O. B. YAPO, A. E. J. E. Y. GNAGNE, V. MAMBO, Caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la ville d'Abidjan : cas des communes d'Abobo, d'Attécoubé, de Koumassi et de Yopougon, *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 044 (2017) 51 - 57
- [8] - S. ISSA, A. ALASSANE, I. NATATOU, M. BOUKARI, D. SOHOUNHLOUE, D. MAMA, Caractéristique hydrogéochimique des eaux souterraines des aquifères de l'Izegouandé et du Tarat au voisinage de la Somair à Arlitau Niger, *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 039 (2015) 57 - 63
- [9] - C. GALY-LACAUX, A. MODI, Precipitation chemistry in the Sahelian Savanna of Niger, Africa, *J. Atmos. Chem.*, 30 (1998) 319 - 343
- [10] - M. TARDAT-HENRY, J. P. BEAUDRY, Chimie des eaux, Ed. Le Griffon d'argile, Québec, (1984)
- [11] - B. M. SEGEMA, C. ARMAUD, R. CARUDA, J. PIRO, Faciès hydrochimique et minéralisation des eaux souterraines côtières de la nappe du Trarza (Mauritanie), *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 6 (1998) 105 - 130
- [12] - Initiative pour la transparence dans les industries extractives du Sénégal : <http://itie.sn/aperçu-du-secteur/>, (2017)
- [13] - J. M. MERMET, A. COSNIER, S. VELASQUEZ, S. LEBOUIL, L'analyse multi-raies en spectrométrie ICP-AES pour une utilisation efficace de l'information spectrale, *Spectra Analysis*, 258 (2007) 39 - 41
- [14] - OMS, directive : Qualité physico-chimique de l'eau de boisson, (2002)
- [15] - J. RODIER, Analyse de l'eau ; eaux naturelles - eaux résiduaires - eau de mer, 8^{ème} édition, DUNOD, Paris, (1996)
- [16] - M. STEINBERG, N. H. NACHTRIEB, Characteristics of the dropping mercury electrode in fused salt, *J. Am. Chem. Soc.*, 70, 26 (1948) 13 - 14
- [17] - V. M. M. LOBO, R. MILLS, Tracer diffusion of cadmium and mercury in mercury over the temperature range 283-333 K, *Electrochim. Acta*, 27 (1982) 969 - 971
- [18] - M. GOUROUZA, G. ZIBO, K. BAYO, Les phénomènes de nitration des eaux souterraines dans la région de Tilabéry (Niger), *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 027 (2009) 83 - 92