République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° d’ordre : ……

Série : ………….

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA-



**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Civil et Hydraulique**

**THESE**

Présentée pour obtenir le Diplôme de Doctorat en sciences en Hydraulique

Option : Sciences Hydrauliques

Par

Mme Bouchahm

Née

**TABOUCHE NORA**

**THEME**

**Hydrogéochimie du Fluor dans les Eaux Souterraines Algériennes du Sahara Septentrional Oriental. Cas des Nappes du Complexe Terminal.**

**Soutenue le : …../…. /….**

**Devant le jury :**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***Président*** | Abderrahmane BOUDOUKHA | Professeur | Université *Hadj Lakhdar* -Batna |
| ***Examinateur*** | Larbi DJABRI | Professeur | Université *Badji Mokhtar*-Annaba |
| ***Examinateur*** | Saadia GUERGUAZI | Maître de conférences | Université *Mohamed Khider*-Biskra |
| ***Rapporteur*** | Samia ACHOUR | Professeur | Université *Mohamed Khider*-Biskra |

|  |  |
| --- | --- |
| **SOMMAIRE** |  |
| **Résumé** | 01 |
| **Introduction générale** | 04 |
| **PREMIERE PARTIE : Revue de la littérature** |  |
| **Chapitre I : Généralités sur le Fluor** | 08 |
| **I. 1. Introduction** | 08 |
| **I. 2*.* Les fluorures dans l’air** | 09 |
| **I. 3. Les fluorures dans l’eau** | 09 |
| I. 3. 1. Le Fluor dans les eaux de Surface | 09 |
| I. 3. 2. Le fluor dans les eaux souterraines | 10 |
| a) D’origine Naturelle | 10 |
| b) De source anthropique | 11 |
| **I. 4. Les fluorures dans les Sols** | 12 |
| **I. 5. Origine du fluor ingéré par l’homme** | 13 |
| **I. 6. Effet des fluorures contenus dans l’eau potable sur la santé humaine** | 14 |
| I. 6. 1. Fluorose dentaire | 14 |
| I. 6. 2. Fluorose squelettique | 16 |
| **I. 7. Dose optimale pour la prévention des caries dentaires** | 17 |
| **I. 8. Etat des fluoroses dans le monde** | 19 |
| I. 8. 1. Etat des fluoroses causées par les eaux souterraines | 19 |
| **I. 9. Etat des connaissances sur le problème du fluor en Algérie** | 21 |
| I. 9. 1. Historique de la fluorose en Algérie | 21 |
| I. 9. 2. Région la plus concernée par le problème de fluorose | 23 |
| I. 9.3. Apport en Fluorures pour les habitants de ces régions | 23 |
| I. 9. 4. Législation concernant le fluor en Algérie | 25 |
| **I. 10. Conclusion** | 27 |
| **Chapitre II : Aperçu sur les principales caractéristiques du Sahara septentrional** | 30 |
| **II. 1. Introduction** | 30 |
| **II. 2. Localisation de la région du Sahara septentrional algérien** | 30 |
| **II. 3. Cadre physique** | 32 |
| II. 3. 1. Le bassin occidental | 33 |
| II. 3. 2. Le bassin oriental | 34 |
| **II. 4. Contexte climatique** | 34 |
| II. 4. 1 Les Précipitations | 34 |
| II. 4. 2 La Température | 36 |
| II. 4. 3 La luminosité | 37 |
| II. 4. 4 Le vent | 37 |
| II. 4. 5 L’humidité de l’air | 37 |
| II. 4.6 L’évaporation | 37 |
| **II. 5. Contexte géologique** | 38 |
| II. 5. 1  Les grands traits de la géologie du sol saharien | 38 |
| II. 5. 2 Principales unités géologiques du Sahara septentrional | 40 |
| **II. 6. Les principaux aquifères du Sahara septentrional** | 41 |
| **II. 7. Estimation des ressources en eau du Sahara septentrional** | 44 |
| **II. 8. Exploitation des ressources en eau du Sahara septentrional en Algérie** | 45 |
| **II. 9. Conclusion** | 46 |
| **Chapitre III : Description hydrogéologique des aquifères du Complexe Terminal** | 49 |
| **III. 1. Introduction** | 49 |
| **III. 2. Faciès lithostratigraphiques** | 49 |
| III. 2. 1. Le Turonien | 49 |
| III. 2. 2. Le Sénonien | 50 |
| III. 2. 3. L’Eocène | 50 |
| III. 2. 4. Le Mioplio-quaternaire | 50 |
| **III. 3. Hydrodynamique des nappes du Complexe terminal** | 53 |
| **III.4. Ecoulement et exutoires de la nappe du Complexe terminal** | 54 |
| **III. 5. Le concept d’affleurement perméable utile** | 54 |
| **III. 6. Description des zones d’affleurements du Complexe terminal** | 57 |
| III. 6. 1. Les carbonates du Mzab | 57 |
| III. 6. 2. Les carbonates du plateau de Tademaït | 57 |
| III. 6. 3. Les carbonates au Nord des chotts | 58 |
| III. 6. 4. Le Miopliocène de l’erg oriental | 58 |
| **III. 7. Conclusion** | 59 |
| **Chapitre IV : Hydrochimie des eaux du Complexe Terminal** | 61 |
| **IV. 1. Introduction** | 61 |
| **IV. 2. Age des eaux souterraines du Complexe terminal** | 61 |
| **IV. 3. Variation des paramètres physico-chimiques** | 63 |
| IV. 3. 1. le pH | 63 |
| IV. 3. 2. La Température | 63 |
| IV. 3. 3. La Conductivité | 64 |
| **IV. 4. Evolution des paramètres chimiques des eaux** | 64 |
| IV. 4. 1. Faciès chimique des eaux | 64 |
| IV. 4. 2. Minéralisation totale des eaux | 65 |
| **IV. 5. Les isotopes et leurs apport dans l’étude des nappes du Sahara septentrional** | 66 |
| IV. 5. 1. Nappe des sables Miopliocène | 64 |
| IV. 5. 2. Nappe des calcaires Sénonien | 68 |
| **IV. 6. Evolution des éléments chimiques** | 69 |
| **IV. 7. Teneurs en fluor dans les aquifères du complexe terminal** | 72 |
| **IV. 8. Conclusion** | 75 |
| **Chapitre V : Genèse du fluor dans les aquifères à travers le monde** | 78 |
| **V. 1. Introduction** | 78 |
| **V. 2. Les interactions eau-roche : source de fluor** | 79 |
| **V. 3. Les sources naturelles du fluor dans les eaux souterraines** | 81 |
| **V. 4. Comportement du fluor dans un bassin granitique** | 82 |
| V. 4. 1. Le fluor dans les eaux souterraines du Sud de la Corée | 82 |
| V. 4. 2. Le fluor dans les eaux souterraines du Thar désert, Pakistan | 86 |
| **V. 5. Le fluor dans les bassins phosphatés** | 89 |
| V. 5. 1. Le fluor dans les eaux souterraines du Sénégal | 89 |
| V. 5. 2. Le fluor dans les aquifères Tunisiens | 92 |
| **V. 6. Le fluor dans l’aquifère sédimentaire** | 94 |
| V. 6. 1. Le fluor dans les eaux souterraines de Bachkirie occidentale | 94 |
| V. 6. 2. Le fluor dans les eaux souterraines de la province du Panjab, dans le sud du Pakistan. | 95 |
| **V. 7. Le fluor dans les roches éruptives** | 98 |
| V. 7. 1. Le fluor dans les eaux souterraines de la région des lacs, la vallée du Rift éthiopien | 98 |
| V. 7. 2. Le fluor dans les eaux souterraines de Nairobi, Kenya | 100 |
| **V. 8. Le fluor dans les eaux souterraines de la région d’Ouargla, Sahara septentrional oriental.** | 102 |
| **V. 9. Conclusion** | 104 |
| **DEUXIEME PARTIE : Procédures expérimentales et interprétations des résultats** |  |
| **Chapitre I : Aperçu sur la région d’étude** | 108 |
| 1. **Introduction** | 108 |
| **I. 2. Cadre physique de la région du Sahara septentrional oriental** | 108 |
| 1. **3. La Région d’Ouargla** | 109 |
| 1. **4. La Région de Biskra** | 112 |
| **I. 5. La Région d’El Oued** | 117 |
| **I. 6. La région de Touggourt** | 120 |
| **I. 7. Etude Climatologique de la région d’étude** | 125 |
| I. 7. 1. La Température | 125 |
| I. 7. 1. 1. La Température moyenne interannuelle | 125 |
| I. 7. 1. 2. La température moyenne mensuelle | 127 |
| I. 7. 1. 3. La Température Maximale moyenne mensuelle | 127 |
| I. 7. 1. 4. La Température Minimale moyenne mensuelle | 128 |
| I. 7. 2. Les Précipitations | 129 |
| I. 7. 2. 1. Répartitions moyennes mensuelles interannuelles des  pluies. | 129 |
| I. 7. 2. 2. La répartition mensuelle des précipitations | 130 |
| I. 7. 3 L’humidité Relative | 131 |
| I. 7. 3. 1. L’humidité interannuelle | 132 |
| I. 7. 4. L’évaporation | 133 |
| I. 7. 4. 1. L’évapotranspiration réelle ETR | 136 |
| I. 7. 4. 2. Evapotranspiration PENMAN totale en mm | 137 |
| I. 7. 5. Le Vent | 140 |
| I. 7. 6. L’Insolation | 141 |
| **I. 8. Synthèse climatique** | 143 |
| I. 8. 1. Diagramme Pluviothermique | 143 |
| I. 8. 2. Régime Climatique (Indice de DEMARTONNE) | 144 |
| I. 8. 3. Bilan Hydrique par la méthode de THORNTHWAITE | 146 |
| **I. 9. Conclusion** | 148 |
| **Chapitre II: Etude expérimentale des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de la région d’étude.** | 151 |
| **II. 1. INTRODUCTION** | 151 |
| **II. 2. Campagne d’échantillonnage** | 151 |
| **II. 3. Caractérisation des principaux éléments minéraux des eaux de nappe** | 152 |
| II. 3. 1.  Le pH | 152 |
| II. 3. 2. La Température | 153 |
| II. 3. 3. La Conductivité | 153 |
| II. 3. 4. La Dureté | 154 |
| II. 3. 5. Dosage du Calcium et Magnésium | 154 |
| II. 3. 6. Titre alcalimétrique | 155 |
| II. 3. 7. Les Chlorures | 155 |
| II. 3. 8. Les Sulfates | 156 |
| II. 3. 9. Sodium et Potassium | 157 |
| II. 3. 10. Dosage du fluor | 159 |
| II. 3. 11. Dosage des phosphates | 160 |
| **II. 4 Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la région d’étude** | 162 |
| **II. 5 Conclusion** | 167 |
| **Chapitre III : Hydrochimie et caractérisation des eaux souterraines de la région d’étude** | 168 |
| **III. 1. Introduction** | 168 |
| **III. 2. Etude de la variation des paramètres physico-chimiques** | 168 |
| III. 2.1 La température | 168 |
| III. 2.2 Variation du pH | 169 |
| III. 2. 2. 1. les Nappes d’Ouargla | 169 |
| III. 2. 2. 2. Les Nappes d’EL Oued | 169 |
| III. 2.2.3. Les Nappes de Touggourt | 169 |
| III. 2.2.4. Les Nappes de Biskra | 169 |
| III. 2.3. La Conductivité | 170 |
| III. 2.3.1. Région d’Ouargla | 170 |
| III. 2.3.2. Région d’El Oued | 170 |
| III. 2.3.3. Région de Touggourt | 171 |
| III. 2.3.4. Région de Biskra | 171 |
| III. 2.4 Le Titre Hydrotimétrique (TH) | 171 |
| **III. 3. Le Faciès chimique des eaux** | 172 |
| III. 3. 1. Région d’Ouargla | 172 |
| III. 3. 2. Région d’El Oued | 174 |
| III. 3. 3. Région de Touggourt | 174 |
| III. 3. 4. Région de Biskra | 174 |
| **III. 4. Minéralisation** | 176 |
| **III. 5. Teneur en Fluor** | 178 |
| III. 5.1. Région d’Ouargla | 179 |
| III. 5. 1. 1. Nappe du Miopliocène | 179 |
| III. 5. 1. 2. Nappe du Sénonien | 182 |
| III. 5. 2. Région d’El Oued | 185 |
| III. 5.3. Région de Touggourt | 187 |
| III. 5. 4. Région de Biskra | 190 |
| **III. 6. Evolution des paramètres chimiques des eaux** | 192 |
| III. 6.1. Les ions (Ca2+, Mg2+, HCO3-) | 192 |
| III. 6. 2. Les ions SO42-, Cl- et Na+ | 196 |
| **III. 7. Origines des éléments chimiques** | 198 |
| III. 7. 1. L’origine du NaCl | 200 |
| III. 7. 2. L’origine du Calcium | 200 |
| III. 7. 3. Evolution des teneurs en sodium | 202 |
| **III. 8. L’échange de base** | 204 |
| **III. 9. Analyse en Composantes Principales** | 205 |
| **III. 10. Conclusion** | 216 |
| **Chapitre IV : Hydrogéochimie du Fluor dans les eaux souterraines de la**  **région d’étude** | 218 |
| **IV. 1. Introduction** | 218 |
| **IV. 2. Relation des concentrations en Fluor et profondeur des nappes** | 218 |
| **IV. 3. Les différentes corrélations du fluor avec les éléments minéraux** | 220 |
| **IV. 4. Relation des teneurs en fluor avec le faciès des eaux** | 222 |
| **IV. 5. Relation des teneurs en fluor avec et la saturation en minéraux** | 223 |
| IV. 5. 1. Saturation des eaux en fluorine | 234 |
| IV. 5. 2. Saturation en Calcite | 237 |
| IV. 5. 3. Relation IS en fluorine et saturation en gypses | 240 |
| **IV. 6. Contrôle chimique des teneurs en fluor** | 241 |
| IV. 6. 1. Relation indice de saturation en fluorine et le pH | 241 |
| IV. 6. 2. Relation indice de Saturation en fluorine et Chlorure | 242 |
| IV. 6. 3. Relation indice de saturation fluorine et les teneurs en calcium | 243 |
| **IV. 7. Transport du fluor sous complexes fluorés** | 246 |
| **IV. 8. Conclusion** | 249 |
| **Conclusion générale** | 253 |
| **Références Bibliographiques** | 261 |
| **Annexes** | 292 |

**Hydrogéochimie du Fluor dans les Eaux Souterraines Algériennes du Sahara Septentrional Oriental. Cas des Nappes du Complexe Terminal.**

**Résumé**

Dans la région du Sahara septentrional algérien, les habitants de la région orientale consomment des eaux souterraines provenant du complexe terminal dont la concentration en fluor est supérieure à la norme de 1,5 mg/l. La géologie, l’hydrogéologie et l’hydrodynamisme des eaux dans ces aquifères ont fait l’objet de diverses études. Notre travail de recherche concerne plus particulièrement l’hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional dans le but de cartographier les eaux souterraines fluorées ainsi que de comprendre l’origine et les conditions du transport du fluor dans ces eaux.

La région d’étude appartient au secteur du Sahara septentrional, sous-secteur oriental, et qui englobe Ouargla, Ghardaïa, Touggourt, El Oued, Biskra et Hassi Messaoud. Le climat de la région est hyperaride. Les eaux souterraines du complexe terminal appartiennent au bassin post-paléozoïque sous bassin sédimentaire oriental de la Mya, du Bassin du Melrghir. Toutes les eaux convergent en direction de la région des chotts où l’on trouve les âges les plus élevés (> 40000 ans). Cela confirme que les eaux de la région des chotts sont les plus concentrées aussi en fluor. Les eaux les moins profondes dans la région de Touggourt et Ouargla sont les plus concentrées en fluor ce qui implique une influence du climat sur la teneur en sels de ces eaux. L'évaporation est un autre facteur important entraînant l'apparition de teneurs élevées en fluorure dans les eaux souterraines.

Les teneurs en fluor sont plus élevées de la région à faciès sodique (en amont du sens de l’écoulement), dans le Sénonien, le Pontien et l’éocène. Les eaux à faciès calcique sont moins concentrées en fluor quand elles sont sous saturées en fluorine (Miopliocène à Ouargla et à Biskra).

Les tests thermodynamiques ont montré que les concentrations en fluorure dépendent de l’état de saturation en fluorine, l’évolution des activités des éléments de l’équilibre dépend directement de l’équilibre des eaux avec la calcite, le gypse ou l’anhydrite, ainsi que la formation des complexes calciques. La présence des gypses dans les aquifères de la région d’étude freine l’augmentation des teneurs en fluor entre 2,3 et 3 mg/l selon la région et la nappe considérée. Le fluor véhiculé sous forme de complexe MgF+ existe en quantité significative dans les eaux souterraines de la région d’étude.

**Fluoride Hydrogéochemistry in Algerian groundwater of East Northern Sahara-Case of Aquifers of the Terminal Complex**

**Abstract**

In the Northern Algerian Sahara region, inhabitants of the Eastern one consume groundwater from the terminal complex whose fluoride concentration exceeds the standard 1,5 mg/l. Geology, Hydrogeology, and the Hydrodynamics of the water in these aquifers have been the subject of many studies. Our research concerns notably the fluoride Hydrogéochemistry in the Eastern groundwater of Northern Sahara having in mind the aim at mapping the fluoride’s groundwater as well as understanding the origin and transportation conditions of fluoride in water.

The study region belongs to the sector Northern Sahara under eastern one, including the regions of Ouargla, Ghardaïa, Touggourt, El Oued, Biskra and Hassi Messaoud.

The climate of the region is hyper-arid. The terminal complex groundwater belongs to the “post-Paleozoic” in under basin oriental sedimentary “Mya”, of the Melrghir basin. Water converges towards the area of “Chotts” where the higher ages (> 40000 years). This confirms that the water of the chotts area is the most concentrated also by fluoride.

Less deep water in the region of Touggourt and Ouargla is more concentrated in fluoride which implies an influence of climate on the content of salt in groundwater in this region. Evaporation is another important factor leading to the emergence of high fluoride in groundwater levels.

The fluoride levels are higher in deep water, in the area to sodium facies (upstream of the sense of flow) including the Senonien, the Pontien and the Eocene. Water with the calcium facies is less concentrated in fluoride when it is under saturated in Fluorite (Miopliocène in the regions of Ouargla and Biskra).

Thermodynamic testing showed that the fluoride concentrations depended on the State of fluorite saturation, the development activities of items in the balance, depends directly on the balance of water with the calcite, gypsum and anhydrite, as well as the formation of calcium complexes. The presence of the gypsum in aquifers of the study region hampers fluoride between 2.3 and 3 mg/l levels increased according to the area and considered aquifer. The conveyed Fluoride in the form of complex MgF+ exists in significant quantities in groundwater in the study region.

**هيد وجيوكيمياء الفليور في المياه الجوفية الجزائرية للمنطقة الشرقية لشمال الصحراء**

**-دراسة حالة لمياه المركب النهائي «CT»**

**ملخص**

في المنطقة الشمالية للصحراء الجزائرية ،يستهلك سكان المنطقة الشرقية المياه الجوفية للمركب النهائي“CT” ، حيث يفوق تركيز الفليور الكمية المحددة 1.5ملغ/لتر. الجيولوجيا ، الهيدروجيولوجيا ، والهيدروناميكا للمركب النهائي“CT" شكلت محور العديد من الدراسات. يخص موضوع هذا البحث هيدروجيوكيمياء الفليور في المياه الجوفية للمنطقة الشرقية لشمال الصحراء، بهدف وضع خريطة توزيع الفليورفي المياه الجوفية ،وكذا فهم أصل وظروف نقل الفليور في الماء.

تنتمي منطقة البحث إلى القطاع الشرقي لشمال للصحراء . وتشمل ورقلة ، وغرداية ،و تقرت ،و الوادي ،و بسكرة وحاسي مسعود. مناخ المنطقة جد جاف. تنتمي المياه الجوفية لطبقة المركب النهائي “CT” إلى الحوض الرسوبي الشرقي ما بعد العصور القديمة لحوض "مية " التابع إلى حوض ملغيغ .تتجمع هده المياه في منطقة البحيرات المالحة والتي يعود تاريخها إلى العصور القديمة (> 40000 سنة). وهذا يؤكد التركيز العالي للفليور في مياه منطقة البحيرات المالحة . المياه الأقل عمقا في منطقة ورقلة و تقرت الأكثر تركيزا بالفليور،مما يعكس تأثير الطقس على تركيز الأملاح في هذه المياه. والتبخر عامل آخر مهم يؤدي إلى ظهور تركيز عالي للفليور في المياه الجوفية. تركيز الفليور جد عالي في المياه العميقة للمناطق ذات السحنة الصودية (في الاتجاه الأعلى للتدفق) في الطبقة الجوفية .( Sénonien و Pontien Eocene ).المياه ذات السحنات الكلسية أقل تركيزا عندما تكون غير مشبعة بالفليورايت (طبقة ميوبليوسان بورقلة وبسكرة).

الاختبارات الترموديناميكية أظهرت أن تركيز الفليور يعود إلى حالة التشبع بالفليورايت، والتغيرات في أنشطة عناصر التوازن يعتمد بشكل مباشر على التوازن المائي مع الكالسيت والجبس أو الأنهيدريت ، وكذلك تشكيل التراكيب الكلسية. وجود الجبس في طبقات المياه الجوفية لمنطقة البحث تبطئ زيادة تركيز الفليور بين 2.3 و 3 ملغ/لتر حسب المنطقة والطبقة المعنية. الفليور في شكل تركيب "+gFM" موجود بكميات كبيرة في المياه الجوفية لمنطقة الدراسة.