



Faculté des Sciences de la Terre  
Département de Géologie

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

**Doctorat En Sciences**

**Etude minéralogique et géochimique de la salinité des roches et des  
sols du bassin versant d'Oued Cherf : Influence sur la pollution du  
barrage et des terrains agricoles.**

Option : Géologie

Par

**Cherif GHERBI**

**Ingénieur d'Etat en Géologie Minière et Magister en Ressources Minérales et Energétiques**

**JURY**

PRESIDENT :	CHOUABBI A. Madjid	Pr. UBMA Annaba
DIRECTEUR DE THESE :	BOUABSA Lakhdar	Pr. UBMA Annaba
EXAMINATEUR :	BENHAMZA Moussa	Pr. UBMA Annaba
EXAMINATEUR :	ZENATI Nouredine	MCA UMCM Souk-Ahras
EXAMINATEUR :	HACINI Messaoud	Pr. UKMO Ouargla
EXAMINATEUR :	LABAR Sofiane	Pr. UCBT El Tarf

## ملخص

يقع سد فم الخنقة على وادي الشارف في شمال شرق الجزائر، في منطقة ذات مناخ شبه جاف تتميز بانخفاض نسبة التساقط ونمط التبخر الشديد. يتكون مستجمع وادي الشارف، من الناحية الجيولوجية، من صخور رسوبية تغلب عليها الجيرية والرملية والمتبخرات والمارنية. تتكون التربة من معادن الكوارتز والكالسيت والطين وأكاسيد الحديد ومعادن الكبريتات. معظم مياه السد هي كلورية-صودي-يوتاسية أما مجاميع الأملاح المذابة (TSD) فإنها تقدر بنحو 1500 ميليغرام/التر.

تم قياس معدلات تحلل الرواسب من خلال أعمال مخبرية تجريبية في مفاعلات نظامية مغلقة عند 25 درجة مئوية وضعت فيها عينات من الرواسب مع أخرى مائية أخذت في نفس المكان والزمان من سد فم الخنقة. تراوحت مساحات سطوح الرواسب من  $16 \text{ m}^2/\text{g}$  إلى  $45 \text{ m}^2/\text{g}$ . تتكون الرواسب من معادن الكوارتز والكالسيت والطين. بعد فترة زمنية موجزة، تكون معدلات تحرر Si و Mg و Ca و Cl و  $\text{SO}_4$  و  $\text{NO}_3$  من هذه الرواسب خطية تقريباً وتستمر على مدار سيرورة التجارب التي دامت 3 إلى 5 أشهر. تقدر سرعة تحرر Si المعدلة إلى مساحة سطوح الرواسب نحو المحاليل المائية من  $10^{-18,4} \text{ mol}/\text{cm}^2/\text{s}$  إلى  $10^{-18,4} \text{ mol}/\text{cm}^2/\text{s}$ . تتطابق معدلات تحرر Si من الرواسب مع معدلات تحرر Si من الكوارتز و من معادن الطين المتحصل عليها تجريبياً والمنشورة في المجالات العلمية. يشير هذا التوافق أنه يمكن الوثوق في معدلات الذوبان التجريبية واستخدامها للتنبؤ بسلوك ذوبان الرواسب في بيئاتها الطبيعية.

---

الكلمات الدالة: الذوبان، الملوحة، مساحة سطوح الرواسب، وادي شارف، الجزائر.

## Résumé

Le barrage de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf se situe au Nord-Est de l'Algérie, dans une région à climat semi-aride caractérisé par une faible pluviométrie et une forte évapotranspiration. Géologiquement le bassin versant d'Oued Cherf est composé de roches sédimentaires dominées par des calcaires, grès, évaporites et marnes. Les sols sont composés de quartz, calcite, argiles, oxydes de fer et de minéraux de sulfates. Les eaux du barrage sont majoritairement chlorurées sodi-potassiques avec un total des sels dissous (TSD) de  $\approx 1500$  mg/L.

Les vitesses de dissolution de sédiments échantillonnés dans la retenue du barrage de l'Oued Cherf ont été mesurées à l'aide de réacteurs fermés à 25°C. Les sédiments, qui présentent des surfaces spécifiques BET comprises entre 16 et 45 m<sup>2</sup>/g sont essentiellement constitués de quartz, calcite et de minéraux argileux. Les taux de départ de Si, Mg, Ca, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> en solution sont approximativement constants lors de ces expériences qui ont duré de trois à cinq mois. Les vitesses de départ de Si en solution, normalisées à la surface BET des sédiments, sont comprises entre 10<sup>-17,4</sup> à 10<sup>-18,4</sup> mol/cm<sup>2</sup>/s. Ces vitesses sont en bon accord avec les vitesses expérimentales de libération de la silice à partir de quartz et d'argiles reportées dans la littérature. Ces résultats indiquent que les vitesses de dissolution mesurées en laboratoire peuvent être utilisées avec confiance pour prévoir la vitesse de dissolution des sédiments dans les eaux naturelles superficielles.

---

Mots clefs : Dissolution, Salinité, Surface spécifique, Oued Cherf, Algérie.

## Abstract

The Foug el Khanga dam on Oued Cherf is located in northeastern Algeria, in a region with a semi-arid climate characterized by low rainfall and strong evapotranspiration. Geologically, the watershed of Oued Cherf is composed of sedimentary rocks dominated by limestones, sandstones, evaporites and marls. Soils are composed of quartz, calcite, clays, iron oxides and sulphate minerals. The waters of the Lake are mainly chlorinated sodium-potassium with a total dissolved salts (TSD) of  $\approx 1500$  mg/L.

Dissolution rates of sediments obtained from the Oued Cherf reservoir were measured in closed-system batch reactors at 25°C in fluids sampled concurrently from the same locations as the sediments. The BET surface areas of the sediments ranged from 16 to 45 m<sup>2</sup>/g and consisted primarily of quartz, calcite, and clay minerals. After a brief initial period, release rates of Si, Mg, Ca, Cl, SO<sub>4</sub>, and NO<sub>3</sub> from these sediments are approximately linear with time over the course of the experiments, which lasted from 3 to 5 months. BET surface area normalized Si release rates ranged from 10<sup>-17.4</sup> to 10<sup>-18.4</sup> mol/cm<sup>2</sup>/s. These release rates match closely Si release rates from quartz and clay minerals determined from laboratory dissolution rates reported in the literature. This coherence suggests that laboratory measured silicate dissolution rates can be used with confidence to predict the dissolution behavior of sediments in natural surface waters.

---

Keywords : Dissolution, Salinity, Surface area, Oued Cherf, Algeria.

# إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع :

إلى أمي الغالية التي ما فتئت تدعولي بالفتح والتوفيق،  
إلى روح أبي رحمه الله الذي شهد بداية الأطروحة ولم يحضر نهايتها، أسأل الله أن  
يتغمد روحه برحمته الواسعة،  
إلى زوجتي العزيزة سهام التي تحملت عبء السنين وساندتني خلال فترات الشك  
والعسر، أترجاها أن تسامحني على كل شيء،  
إلى أولادي وبناتي : نوفل ومنصف ومرام وكوثر،  
إلى إخوتي وأخواتي : يمينة وحليمة وساسية وجمعة ومراد والعيدي ونادية وليلى  
ونبيل ونجمة.

## **Avant-propos**

En premier lieu et avant tout je tiens à remercier **DIEU** le tout puissant qui ma donné le courage, la patience et la force de terminer ce travail.

La majorité de cette thèse a été réalisée au Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie (LMTG) de l'Université Paul Sabatier à Toulouse nommé actuellement laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET) et une petite partie au (LGRN) Laboratoire Géodynamique et Ressources Naturelles à l'Université de Annaba. Ma présence à Toulouse pendant dix-huit mois était dans le cadre du programme de coopération Algéro-Français PROFAS ex-PAF.

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Lakhdar BOUABSA, mon Directeur de Thèse, qui a été à l'origine de ce Thème pour avoir accepté de m'encadrer et de m'accueillir dans son équipe de recherche au LGRN. Il était toujours derrière moi à m'aider, à m'encourager et à me soutenir. En vérité, c'est avec lui que j'ai progressé dans le domaine de la géologie toute au long de ma formation depuis mes années de graduation jusqu'à l'aboutissement de cette Thèse. Il était aussi mon encadreur lors de la réalisation de mon mémoire d'Ingénieur d'Etat et de celui de Magister. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir transmis ses connaissances avec tant de simplicité et de patience.

Je remercie également Mr. Eric Hermann Oelkers, Directeur de Recherches au CNRS pour m'avoir facilité l'accès au GET et mis à ma disposition tout ce dont je pouvais avoir besoin pour compléter mon travail dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont également à Mr Abdelmadjid CHOUABBI, Professeur à l'Université de Annaba, pour m'avoir fait l'honneur de bien vouloir présider mon jury de Thèse. Je le remercie vivement pour son aide dans le domaine de la géologie, pour les sorties de terrain qui a effectué avec moi accompagné de Mr BOUABSA et pour son soutien dans les moments de difficulté et de doute que j'ai traversés.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous les membres de jury ; Mr. Moussa BENHAMZA, Pr. à l'Université Badji Mokhtar Annaba, Mr. Messaoud HACINI, Pr. à l'Université Kasdi Merbah Ouargla, Mr. Nouredine ZENATI, MCA à l'Université Mohamed

Cherif Messaadia Souk Ahras et Mr. Sofiane LABAR, Pr. à l'Université Chadli Bendjedid Taref qui ont accepté de juger ce travail.

J'ai eu beaucoup d'échanges scientifiques et de discussions fructueuses avec des chercheurs du GET que je tiens à remercier, notamment Jacques Schott, Pascale Bénézeth, Oleg Pokrovsky, Gleb Pokrovski, Jean-Louis Dandurand, Robert Gout, Stacey Callahan et Damien Guillaume.

Je tiens également à remercier tous les ingénieurs et techniciens du GET pour leur assistance technique durant mes travaux d'analyses. Je pense en particulier à Thierry Aigouy, Carole Boucayrand, Maïté Carayon, Carole Causserand, Sophie Gouy, Jean-François Mena, Philippe de Parceval, Fabienne de Parceval, Michel Thibaut, Alain Castillo, Jean-Claude Harrichoury, Stéphanie Mounic, Philippe Besson, Frédéric Candaudap et Aurélie Lanzaova. Je suis également reconnaissant à Guiseppe Saldi et Teresa Roncal de m'avoir aidé dans certaines de mes analyses.

Mes remerciements vont également à plusieurs institutions qui m'ont permis de réaliser cette thèse ; notamment au Centre National de Recherche Scientifique (CNRS-France), au Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS-Algérie), aux responsables et au personnel de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT-Algérie) et plus particulièrement au Directeur du barrage de Foug El Khanga-Souk Ahras Mr. Nouar Amar et à tout le personnel de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH-Constantine).

**TABLE DES MATIERES**

<b>RESUME ARABE .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUME FRANÇAIS .....</b>	<b>II</b>
<b>RESUME ANGLAIS .....</b>	<b>III</b>
<b>DEDICACE .....</b>	<b>IV</b>
<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>V</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>XVI</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1 : DEFINITION D'UN BASSIN VERSANT.....</b>	<b>5</b>
<b>I. DEFINITION D'UN BASSIN VERSANT .....</b>	<b>5</b>
<b>II. DELIMITATION D'UN BASSIN VERSANT .....</b>	<b>6</b>
<b>III. LES DIFFERENTES FONCTIONS D'UN BASSIN VERSANT .....</b>	<b>8</b>
<b>III.1 Les fonctions hydrologiques.....</b>	<b>8</b>
<b>III.2 Les fonctions écologiques .....</b>	<b>8</b>
<b>III.3 Les fonctions socio-économiques.....</b>	<b>8</b>
<b>IV. LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE .....</b>	<b>9</b>
<b>V. LES BASSINS VERSANTS ALGERIENS .....</b>	<b>9</b>
<b>V.1 Le bassin de la Seybouse.....</b>	<b>12</b>
<b>V.2 Le bassin versant de l'Oued Cherf .....</b>	<b>13</b>
<b>VI. CONCLUSION.....</b>	<b>13</b>
<b>CHAPITRE 2 : BASSIN VERSANT D'OUED CHERF.....</b>	<b>16</b>
<b>I. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....</b>	<b>16</b>
<b>II. CADRE GEOLOGIQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>II.1 Domaine para-autochtone ou autochtone Nord Aurésien .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1.1 Trias .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1.2 Vraconien et Cénomaniens basal .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1.3 Cénomaniens Supérieurs.....</b>	<b>20</b>
<b>II.1.4 Turonien .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1.5 Coniacien .....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.6 Santonien .....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.7 Campanien.....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.8 Maestrichtien inférieur à dominance marneuse .....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.9 Maestrichtien supérieur.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2 Miocène marin transgressif .....</b>	<b>21</b>
<b>II.3 Domaine Néritique Sud Constantinois.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1 Albien.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2 Vraconien et Cénomaniens basal .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.3 Cénomaniens .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.4 Turonien .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.5 Coniacien et Santonien marneux .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.6 Miocène marin transgressif .....</b>	<b>23</b>
<b>II.3.7 Miocène.....</b>	<b>23</b>

<b>II.4</b>	<b>Nappes telliennes</b> .....	<b>23</b>
II.4.1	Unité inférieure .....	23
II.4.2	Unité supérieure.....	23
II.4.2.1	Paléocène.....	23
II.4.2.2	Yprésien et Lutétien inférieur.....	24
II.4.2.3	Lutécien et Priabonien ( ?) à huîtres.....	24
II.4.2.4	oligocène.....	24
<b>II.5</b>	<b>Nappes de flysch (Nappes numidiennes)</b> .....	<b>24</b>
<b>II.6</b>	<b>Formations peu ou pas tectonisées</b> .....	<b>24</b>
II.6.1	Mio-pliocène .....	24
II.6.2	Quaternaire .....	24
II.6.2.1	Villafranchien .....	24
II.6.2.2	Glacis polygéniques nappant le relief.....	24
II.6.2.3	Terres arables et quaternaire indéterminé .....	25
II.6.2.4	Alluvions actuelles ou récentes .....	25
<b>III.</b>	<b>LES EPOQUES SALIFERES EN ALGERIE</b> .....	<b>25</b>
<b>III.1</b>	<b>Epoque salifère du Trias</b> .....	<b>25</b>
<b>III.2</b>	<b>Epoque salifère sénonienne</b> .....	<b>27</b>
<b>III.3</b>	<b>Epoque salifère Nummulitique (paléogène)</b> .....	<b>27</b>
<b>III.4</b>	<b>Epoque salifère plio-quaternaire</b> .....	<b>28</b>
<b>IV.</b>	<b>LA POSITION DU MATERIEL TRIASIQUE</b> .....	<b>28</b>
<b>V.</b>	<b>LA PALEO GEOGRAPHIE ET TECTONIQUE</b> .....	<b>29</b>
<b>V.1</b>	<b>La bordure septentrionale des unités alloctones</b> .....	<b>29</b>
V.1.1	La klippe d'oued Settara.....	30
V.1.2	L'écaille de l'oued Cherf .....	30
V.1.3	L'écaille de Dj Hamimat.....	30
<b>V.2</b>	<b>La bordure méridionale Nord Auresienne des unités autochtones</b> .....	<b>30</b>
<b>VI.</b>	<b>L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DU BASSIN DE L'OUED CHERF</b> .....	<b>31</b>
<b>VII.</b>	<b>HYDROGRAPHIE</b> .....	<b>31</b>
<b>VIII.</b>	<b>HYDROGEOLOGIE</b> .....	<b>33</b>
<b>IX.</b>	<b>COUVERTURE VEGETALE</b> .....	<b>34</b>
<b>X.</b>	<b>LES FONCTIONS SOCIO-ECONOMIQUES DANS LE BASSIN D'OUED CHERF</b> ....	<b>35</b>
<b>X.1</b>	<b>La population</b> .....	<b>35</b>
<b>X.2</b>	<b>Le pôle industriel</b> .....	<b>35</b>
<b>X.3</b>	<b>Le pôle agricole</b> .....	<b>36</b>
<b>XI.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>36</b>
<b>CHAPITRE 3 : HYDROCLIMATOLOGIE</b> .....		<b>38</b>
<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>38</b>
<b>II.</b>	<b>LES PRECIPITATIONS</b> .....	<b>38</b>
<b>III.</b>	<b>LES TEMPERATURES</b> .....	<b>42</b>
<b>IV.</b>	<b>COEFFICIENT PLUVIOMETRIQUE</b> .....	<b>44</b>
<b>V.</b>	<b>DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE DE GAUSSEN</b> .....	<b>45</b>
<b>VI.</b>	<b>INDICE D'ARIDITE DE DE MARTONNE</b> .....	<b>46</b>
<b>VII.</b>	<b>EVAPORATION</b> .....	<b>48</b>
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>50</b>
<b>CHAPITRE 4 : MATERIELS ET METHODES</b> .....		<b>52</b>
<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>52</b>

<b>II.</b>	<b>METHODOLOGIE D'ECHANTILLONNAGE .....</b>	<b>52</b>
<b>III.</b>	<b>METHODOLOGIE D'ANALYSE .....</b>	<b>54</b>
	<b>III.1 Les solutions.....</b>	<b>54</b>
	III.1.1 Spectroscopie d'absorption atomique.....	55
	III.1.2 Chromatographie ionique .....	56
	III.1.3 Analyse par ICP-MS .....	58
	III.1.3.1 Principe physique de l'ICP-MS .....	60
	III.1.3.2 Problèmes liés à la mesure par ICP-MS .....	61
	III.1.3.3 Méthodologie de la mesure par ICP-MS.....	63
	III.1.4 Mesure de l'alcalinité par titration .....	66
	III.1.5 Mesure par spectromètre U.V de la silice.....	68
	III.1.6 Analyse par ICP-OES .....	69
	<b>III.2 Les solides .....</b>	<b>70</b>
	III.2.1 Les roches.....	70
	III.2.2 Les sols.....	70
	III.2.2.1 Prélèvement.....	70
	III.2.2.2 Préparation des échantillons .....	70
	III.2.2.3 Mise en solution des échantillons de sols .....	71
<b>IV.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>72</b>
<b>CHAPITRE 5 : MINERALOGIE, GEOCHIMIE ET PETROGRAPHIE .....</b>		<b>74</b>
<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>74</b>
<b>II.</b>	<b>CARACTERISATION DES SOLS.....</b>	<b>74</b>
	<b>II.1 Nature des sols du bassin versant d'Oued Cherf .....</b>	<b>74</b>
	II.1.1 Le périmètre de Sedrata-Zouabi .....	75
	II.1.2 Le périmètre de Ksar Sbahi .....	76
	II.1.3 Le périmètre d'Ain Babouche.....	77
	<b>II.2 Surface spécifique de sols .....</b>	<b>77</b>
	<b>II.3 Minéralogie.....</b>	<b>80</b>
	II.3.1 Diffraction des rayons X .....	80
	II.3.2 Microscope électronique à balayage .....	84
	<b>II.4 Géochimie des sols .....</b>	<b>89</b>
	II.4.1 Géochimie des éléments majeurs dans les sols.....	89
	II.4.2 Géochimie des éléments traces .....	92
	II.4.2.1 Zinc (Zn), Cadmium (Cd) et Plomb (Pb) .....	93
	II.4.2.2 Vanadium, Chrome, Rubidium, Galium, Niobium et Etain .....	96
<b>III.</b>	<b>PETROGRAPHIE.....</b>	<b>99</b>
	<b>III.1 Calcaires.....</b>	<b>99</b>
	<b>III.2 Grès .....</b>	<b>101</b>
	<b>III.3 Evaporite (Trias) .....</b>	<b>103</b>
	<b>III.4 Marnes.....</b>	<b>104</b>
<b>IV.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>105</b>
<b>CHAPITRE 6 : HYDROCHIMIE.....</b>		<b>108</b>
<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>108</b>
<b>II.</b>	<b>LES BARRAGES ET LES RETENUS.....</b>	<b>108</b>
	<b>II.1 L'homme construit des barrages depuis plus de 6000 ans.....</b>	<b>109</b>
	<b>II.2 La construction des barrages en Algérie .....</b>	<b>109</b>

II.2.1	L'époque coloniale .....	109
II.2.2	L'Algérie indépendante .....	111
<b>II.3</b>	<b>Types de barrages.....</b>	<b>112</b>
II.3.1	Barrages en béton .....	112
II.3.1.1	Barrages poids .....	112
II.3.1.2	Barrages-voûtes .....	113
II.3.1.3	Barrages à contreforts .....	113
II.3.2	Barrages en remblai .....	113
II.3.2.1	Barrages en terre homogène.....	113
II.3.2.2	Barrages zonés.....	113
II.3.2.3	Barrages à masque .....	113
<b>III.</b>	<b>BARRAGE DE FOUM EL KHANGA .....</b>	<b>114</b>
<b>IV.</b>	<b>HYDROCHIMIE DES EAUX DU BARRAGE DE FOUM EL KHANGA .....</b>	<b>115</b>
<b>IV.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>115</b>
<b>IV.2</b>	<b>Prélèvement des échantillons d'eau.....</b>	<b>116</b>
<b>IV.3</b>	<b>Analyse des solutions naturelles .....</b>	<b>118</b>
<b>IV.4</b>	<b>Résultats et interprétations .....</b>	<b>118</b>
IV.4.1	Caractéristiques hydrochimiques des eaux du barrage.....	124
IV.4.1.1	Température .....	124
IV.4.1.2	Le pH .....	125
IV.4.1.3	La conductivité électrique (CE) .....	126
IV.4.1.4	Alcalinité .....	128
IV.4.1.5	Dureté .....	129
IV.4.1.6	Chlorure (Cl <sup>-</sup> ).....	131
IV.4.1.7	Sodium (Na <sup>+</sup> ).....	134
IV.4.1.8	Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) .....	135
IV.4.1.9	Calcium (Ca <sup>2+</sup> ) .....	136
IV.4.1.10	Magnésium (Mg <sup>2+</sup> ).....	138
IV.4.1.11	Potassium (K <sup>+</sup> ).....	139
IV.4.1.12	Nitrates (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	141
IV.4.2	Salinité des eaux du barrage et leur aptitude à l'irrigation .....	143
IV.4.2.1	Total des Sels Dessous (TDS).....	146
IV.4.2.2	Le diagramme de Piper .....	146
IV.4.2.3	Le diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	148
IV.4.2.4	Diagramme de Richards.....	149
IV.4.2.5	Diagramme de Wilcox.....	152
<b>V.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>153</b>
<b>CHAPITRE 7 : INTERACTION EAU-SEDIMENTS.....</b>		<b>156</b>
<b>I.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>156</b>
<b>II.</b>	<b>METHODE .....</b>	<b>156</b>
<b>III.</b>	<b>SEDIMENTS .....</b>	<b>158</b>
<b>IV.</b>	<b>ECHANTILLONS D'EAU .....</b>	<b>159</b>
<b>V.</b>	<b>RESULTATS .....</b>	<b>161</b>
<b>VI.</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>169</b>
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>170</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>173</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>178</b>
<b>ANNEXE : (L'EAU : BESOINS ET RESSOURCES) .....</b>		<b>186</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: BV= Zone géographique drainée par un cours d'eau à l'exutoire choisi. ....	6
Figure 2 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique .....	7
Figure 3 : Exemple de modifications de la délimitation du bassin versant. ....	7
Figure 4 : Les cinq bassins hydrographiques en Algérie.....	10
Figure 5 : Bassins versants algériens .....	11
Figure 6 : Bassin versant de la Seybousse. ....	13
Figure 7 : Situation géographique du Bassin versant Oued Cherf .....	16
Figure 8 : Extrait de la carte géologique de Constantine. ....	18
Figure 9 : Coupes géologiques du bassin d'Oued Cherf.....	29
Figure 10 : Coupes géologiques N-S traversant Djebel Zouabbi.....	29
Figure 11 : Réseau hydrographique au bassin versant d'Oued Cherf.....	32
Figure 12 : Précipitations annuelles moyenne dans le Nord-Est de l'Algérie. ....	39
Figure 13 : Variation des précipitations annuelles au secteur du barrage. ....	40
Figure 14 : Variation des précipitations annuelles à la station de Sedrata.....	40
Figure 15 : Variation des précipitations mensuelles au niveau du secteur du barrage.....	41
Figure 16 : Variation des précipitations mensuelles à la station de Sedrata.....	42
Figure 17 : Températures moyennes annuelles dans le Nord-Est de l'Algérie.....	43
Figure 18 : Variation des températures annuelles à la station de Sedrata.....	43
Figure 19 : Variation des températures mensuelles à la station thermique de Sedrata.....	44
Figure 20 : Courbe du coefficient pluviométrique au niveau du secteur du barrage.....	45
Figure 21 : Courbe du coefficient pluviométrique à la station de Sedrata.....	45
Figure 22 : Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN à la station de Sedrata. ....	46
Figure 23 : Variation de l'Indice de DE MARTONNE à la station de Sedrata. ....	48
Figure 24 : Photographie d'un Bac de Colorado. ....	49
Figure 25 : Evaporation réelle mensuelle moyenne près du barrage.....	49

Figure 26 : Evaporation totale annuelle près du barrage. ....	50
Figure 27 : Photographie de la salle blanche au laboratoire GET.....	54
Figure 28 : ICP-MS quadripolaire Agilent 7500ce. ....	59
Figure 29 : Flacons Savillex utilisés lors des attaques acides des sols. ....	71
Figure 30 : Plan de situation des périmètres des terres irrigables du bassin versant. ....	75
Figure 31 : Photographie d'une parcelle du périmètre Ksar Sbahi.....	77
Figure 32 : Illustration de surface spécifique apparente et réelle.....	78
Figure 33 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G04S.....	81
Figure 34 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G06S.....	81
Figure 35 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G08S.....	82
Figure 36 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G10S.....	82
Figure 37 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G14S.....	83
Figure 38 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O2G21S.....	83
Figure 39 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G23S.....	84
Figure 40 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O2G23S.....	84
Figure 41 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G04S.....	85
Figure 42 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G06S.....	86
Figure 43 : Image MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G06S. ....	86
Figure 44 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G10S.....	87
Figure 45 : Images MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G10S.....	87
Figure 46 : Images MEB de l'échantillon de sol n° O1G23S. ....	88
Figure 47 : Images MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G23S.....	88
Figure 48 : Comportement des éléments majeurs dans les sols du BV d'Oued Cherf. ....	90
Figure 49 : Développement des encroutements de sel sur le sol du BV d'Oued Cherf.....	91
Figure 50 : Variation de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O, TiO <sub>2</sub> et P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> en fonction de la silice dans les sols. ....	91
Figure 51 : Variation de CaO, MgO, MnO et Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en fonction de la silice dans les sols.....	92

Figure 52 : Relations du Pb avec le Zn et le Cd dans les sols du BV d'Oued Cherf. ....	96
Figure 53 : Courbes de variation de Zn, Pb et Cd dans les échantillons de sols. ....	96
Figure 54 : Relations entre les éléments de V, Cr, Rb, Ga, Nb et Sn dans les sols. ....	98
Figure 55 : Aspect microscopique des calcaires micritiques. ....	100
Figure 56 : Aspect microscopique de calcaires, à poches de sparite et à globigérines. ....	100
Figure 57 : Aspect microscopique des calcaire à Nummulites. ....	101
Figure 58 : Aspect microscopique des calcaires coquilliers et microsparitiques. ....	101
Figure 59 : Aspect microscopique des grès à ciment carbonaté. ....	102
Figure 60 : Aspect microscopique des grès à ciment carbonaté. ....	103
Figure 61 : Aspect microscopique des évaporites, (a) en LPNA, (b) en LPA. ....	104
Figure 62 : Photographie montrant la digue du barrage de Foug el Khanga. ....	109
Figure 63 : Photographie de la pierre d'inauguration du barrage Foug El Khanga. ....	114
Figure 64 : Position des échantillons d'eau prélevés. ....	117
Figure 65 : Volume de remplissage du Barrage. ....	118
Figure 66 : Température des eaux du barrage. ....	125
Figure 67 : pH des eaux du barrage. ....	126
Figure 68 : Conductivité électrique des eaux du barrage. ....	128
Figure 69 : Alcalinité des eaux du barrage. ....	129
Figure 70 : Variation de l'alcalinité dans les eaux du barrage. ....	129
Figure 71 : Dureté des eaux du barrage. ....	130
Figure 72 : Variation mensuelle de la dureté des eaux du barrage. ....	131
Figure 73 : Concentration des chlorures dans les eaux du barrage. ....	132
Figure 74 : Concentration des chlorures dans les eaux des cours d'eau. ....	133
Figure 75 : Variation des chlorures dans les eaux du barrage. ....	133
Figure 76 : Concentration de Na <sup>+</sup> dans les eaux du barrage. ....	134
Figure 77 : Variation de la concentration de Na <sup>+</sup> dans les eaux du barrage. ....	135

Figure 78 : Concentration des sulfates dans les eaux du barrage. ....	136
Figure 79 : Variation des sulfates dans les eaux du barrage.....	136
Figure 80 : Concentration du calcium dans les eaux du barrage.....	137
Figure 81 : Variation de $\text{Ca}^+$ dans les eaux du barrage.....	138
Figure 82 : Concentration du magnésium dans les eaux du barrage.....	139
Figure 83 : Variation mensuelle du magnésium dans les eaux du barrage. ....	139
Figure 84 : Concentration du potassium dans les eaux du barrage.....	140
Figure 85 : Variation mensuelle du potassium dans les eaux du barrage. ....	141
Figure 86 : Concentration des nitrates dans les eaux du barrage. ....	142
Figure 87 : Variation mensuelle des nitrates dans les eaux du barrage. ....	143
Figure 88 : Photographies de quelques oueds et sources d'eau alimentant le barrage.....	144
Figure 89 : Diagrammes représentant le TDS des eaux du barrage.....	146
Figure 90 : Diagrammes de Piper des eaux du barrage. ....	147
Figure 91 : Diagrammes de Piper de tous les échantillons d'eau.....	148
Figure 92 : Diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux du barrage (Hautes eaux). ....	149
Figure 93 : Diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux du barrage (Basses eaux).....	149
Figure 94 : Diagramme de Richards pour les eaux du barrage.....	152
Figure 95 : Diagramme de Wilcox pour les eaux du barrage.....	153
Figure 96 : Photographie d'un réacteur fermé utilisé dans nos manip.....	157
Figure 97 : Photographie d'une enceinte thermostatée. ....	157
Figure 98 : Localisation des échantillons prélevés dans le barrage. ....	158
Figure 99 : Variation en fonction du temps des flux de [Si] vers les solutions réactives.....	166
Figure 100 : Variation en fonction du temps des flux de [Ca] vers les solutions réactives. ..	166
Figure 101 : Variation en fonction du temps des flux de [Na] vers les solutions réactives...	167
Figure 102 : Variation en fonction du temps des flux de [Mg] vers les solutions réactives..	167
Figure 103 : Variation en fonction du temps des flux de [Cl] vers les solutions réactives. ...	168

Figure 104 : Variation en fonction du temps des flux de [SO <sub>4</sub> ] vers les solutions réactives..	168
Figure 105 : Variation en fonction du temps des flux de [NO <sub>3</sub> ] vers les solutions réactives.	169
Figure 106 : La distribution des ressources en eau dans la nature.....	190
Figure 107 : Proportion d'eau par rapport à la population dans le monde.....	191
Figure 108 : Evolution de la part de l'eau par habitant en Algérie. ....	192
Figure 109 : Ressources en eau souterraine au Sud de l'Algérie. ....	193

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Zones hydrologiques ou bassins versants algériens.....	10
Tableau 2 : Bassin versant de la Seybousse avec ses sous bassins.....	12
Tableau 3 : Moyennes des précipitations annuelles.....	39
Tableau 4 : Moyennes des précipitations mensuelles.....	41
Tableau 5 : Classification des climats en fonction de l'indice de DE MARTONNE.....	47
Tableau 6 : Temps de rétention des espèces anioniques.....	57
Tableau 7 : paramètres ICP-MS quadripolaire Agilent 7500ce.....	59
Tableau 8 : Surfaces spécifiques (S A) de quelques échantillons de sol.....	80
Tableau 9 : Composition en oxydes des sols, déterminée par fluorescenceX.....	89
Tableau 10 : Composition chimique en éléments traces des sols.....	94
Tableau 11 : Etat des réserves du barrage de Foug El Khanga.....	117
Tableau 12 : Noms des échantillons d'eau du barrage de Foug El Khanga et les numéros d'ordre qui y sont attribués.....	119
Tableau 13 : Noms des échantillons d'eau des cours d'eau et des sources et les numéros d'ordre qui y sont attribués.....	119
Tableau 14 : Composition chimique des eaux du barrage (Hautes eaux).....	120
Tableau 15 : suite tableau 14.....	120
Tableau 16 : Suite tableau 14.....	121
Tableau 17 : Composition des eaux du barrage (Basses eaux).....	121
Tableau 18 : Suite tableau 17.....	122
Tableau 19 : Suite tableau 17.....	122
Tableau 20 : Variation chimique annuelle des eaux du barrage.....	123
Tableau 21 : Classes de minéralisation d'après la conductivité.....	126
Tableau 22 : Facteur de correction de la température.....	127
Tableau 23 : Classification des eaux d'après leur dureté.....	131
Tableau 24 : Classification des eaux par la méthode du S.A.R.....	150

Tableau 25 : Classification de la salinité globale des eaux.....	151
Tableau 26 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation. ....	151
Tableau 27 : Composition des solides déterminée par fluorescence des rayons X.....	159
Tableau 28 : Composition des solutions initiales.....	159
Tableau 29 : Etat de saturation des solutions initiales et finales.....	160
Tableau 30 : Evolution de la solution (O1G4E+O1G4S). ....	161
Tableau 31 : Evolution de la solution (O1G6E+O1G6S). ....	162
Tableau 32 : Evolution de la solution (O1G8E+O1G8S). ....	162
Tableau 33 : Evolution de la solution (O1G10E+O1G10S). ....	162
Tableau 34 : Evolution de la solution (O1G14'E+O1G14S). ....	163
Tableau 35 : Evolution de la solution (O1G23E+O1G23S). ....	163
Tableau 36 : Evolution de la solution (O2G21E+O2G21S). ....	163
Tableau 37 : Logarithmes des vitesses de départ des éléments aux solutions. ....	165
Tableau 38 : Les petites stations de dessalement dites monobloc. ....	197

# INTRODUCTION GENERALE

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les eaux de surface englobent toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). Leur composition chimique dépend de la nature des terrains qu'elles traversent durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants ; les eaux circulant dans un terrain gréseux ou granitique sont acides et peu minéralisées, celles circulant dans un terrain calcaire sont bicarbonatées et calciques et présentent souvent une dureté élevée, et au contact des évaporites, les eaux se chargent en sulfates, en chlorures et en sodium et par conséquent deviennent impropres à la consommation et même inutilisables pour d'autres usages telle que l'irrigation.

Le bassin versant de l'Oued Cherf est composé essentiellement de roches sédimentaires dominées par des calcaires, grès, évaporites et marnes traversé par un réseau hydrographique qui déverse dans le barrage de Fom El Khanga. La salinité élevée de certains cours d'eau souligne l'implication des formations triasiques dans la pollution naturelle des eaux du barrage.

Ce travail de thèse s'est focalisé sur les axes principaux suivants :

- Dans un premier temps, faire une étude pétrographique des principaux faciès lithologiques affleurant dans le bassin versant en signalant le rôle des formations triasiques dans la salinité des eaux du barrage.
- Dans un deuxième temps, mener une étude géochimique et minéralogique des sédiments et des sols prélevés tout autour de la retenue du barrage de Fom El Khanga.
- Ensuite étudier l'hydrochimie des eaux du barrage avec caractérisation de leurs paramètres physico-chimiques ainsi que la détermination des faciès hydro-chimiques et de la salinité afin de mettre en évidence la qualité de l'eau du barrage et son aptitude à l'irrigation.
- Finalement étudier la réactivité des sédiments vis-à-vis des eaux du barrage par un travail expérimental d'interaction eau-sédiments qui a duré plus de trois mois et qui a été initié au laboratoire Géosciences et Environnement de Toulouse (GET) cela pour étudier la dissolution des minéraux de sédiments dans les eaux du barrage et

déterminer le taux de départ des éléments chimiques du sédiment vers l'eau afin de comprendre le rôle des sédiments sur le chimisme de l'eau.

Pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développé les chapitres suivants :

Le premier chapitre – Définition d'un bassin versant : est consacré aux généralités sur les bassins versants (définition et fonctions) et à la description du grand bassin versant de la Seybousse qui comprend le bassin versant de l'Oued Cherf.

Le deuxième chapitre - Bassin versant d'Oued Cherf : est consacré à la description du bassin versant de l'Oued Cherf (situation, géologie, Hydrographie, hydrogéologie, ...).

Le troisième chapitre – Hydroclimatologie : comprend une étude des principaux paramètres hydroclimatologiques.

Le quatrième chapitre - Matériels et méthodes : est un exposé des techniques d'analyses et des moyens analytiques utilisés.

Le cinquième chapitre – Minéralogie, géochimie et pétrographie : est consacré à la pétrographie des roches et à la géochimie et minéralogie des sédiments et des sols.

Le sixième chapitre – Hydrochimie : est une caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux du barrage, faciès hydro-chimiques, salinité et aptitude à l'irrigation.

Le septième chapitre - Interaction eau-sédiments : est consacré à l'étude de réactivité des sédiments avec l'eau du barrage.

Nous terminons le travail par une conclusion générale dans laquelle nous résumons les principaux résultats obtenus.

Une Annexe consacrée à L'eau : besoins et ressources : c'est un exposé des besoins en eau de notre pays et son évolution et la politique de l'état algérien pour y subvenir.

## CHAPITRE 1

# DEFINITION D'UN BASSIN VERSANT

# CHAPITRE 1 : DEFINITION D'UN BASSIN VERSANT

## I. Définition d'un bassin versant

Le bassin versant représente l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et de ses effets.

Plus précisément, le bassin versant est une surface élémentaire hydrologiquement close, c'est-à-dire qu'aucun écoulement n'y pénètre de l'extérieur et que tous les excédents de précipitations s'évaporent ou s'écoulent par une seule section à l'exutoire.

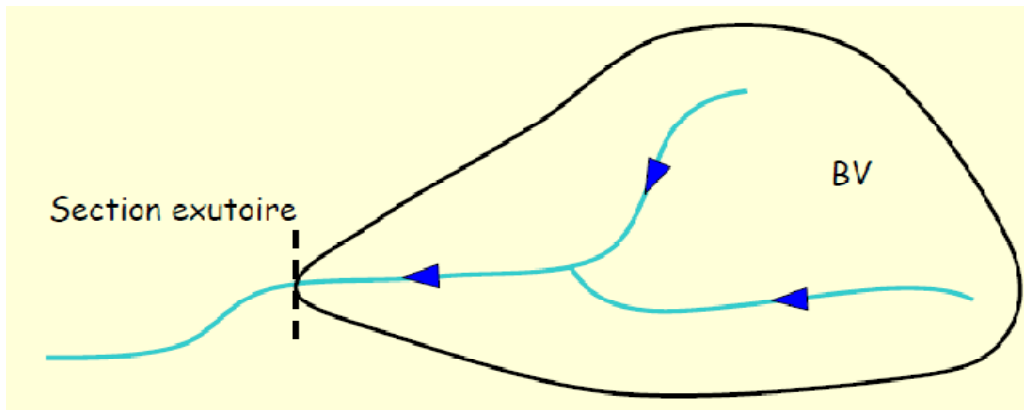
Le bassin versant, en une section droite d'un cours d'eau, est donc défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section.

Un BV est toujours associé à :

- un cours d'eau
- une section de ce cours d'eau : l'exutoire ou émissaire

Appliquée aux eaux de surface, la définition d'un bassin versant désigne l'espace sur lequel les eaux s'écoulent toutes vers un même point appelé exutoire (Figure 1), mais le bassin versant comprend également les activités naturelles et anthropiques (dues à l'intervention humaine) qui s'y passent.

En ce sens, les sols, la végétation, les animaux et les êtres humains font partie d'un bassin versant, ce dernier remplit des fonctions à la fois hydrologiques, écologiques, sociologiques, économiques et touristiques.



**Figure 1: BV= Zone géographique drainée par un cours d'eau à l'exutoire choisi.**

Les caractéristiques topographique, géologique, pédologie jouent un rôle important dans le comportement hydrologique.

Le bassin versant et son exutoire constituent donc un ensemble d'éléments interdépendants (surface, forme, relief, couvert végétal, réseau hydrographique....etc.) qui convient de préciser dès le début de toute étude et cela vers une vision intégrée des ressources en eaux.

## **II. Délimitation d'un bassin versant**

Toutefois, la délimitation topographique nécessaire à la détermination en surface du bassin versant naturel n'est pas suffisante. Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable, la division des eaux selon la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines (Figure 2). Le bassin versant est alors différent du bassin versant délimité strictement par la topographie. Il est appelé dans ce cas bassin versant réel.

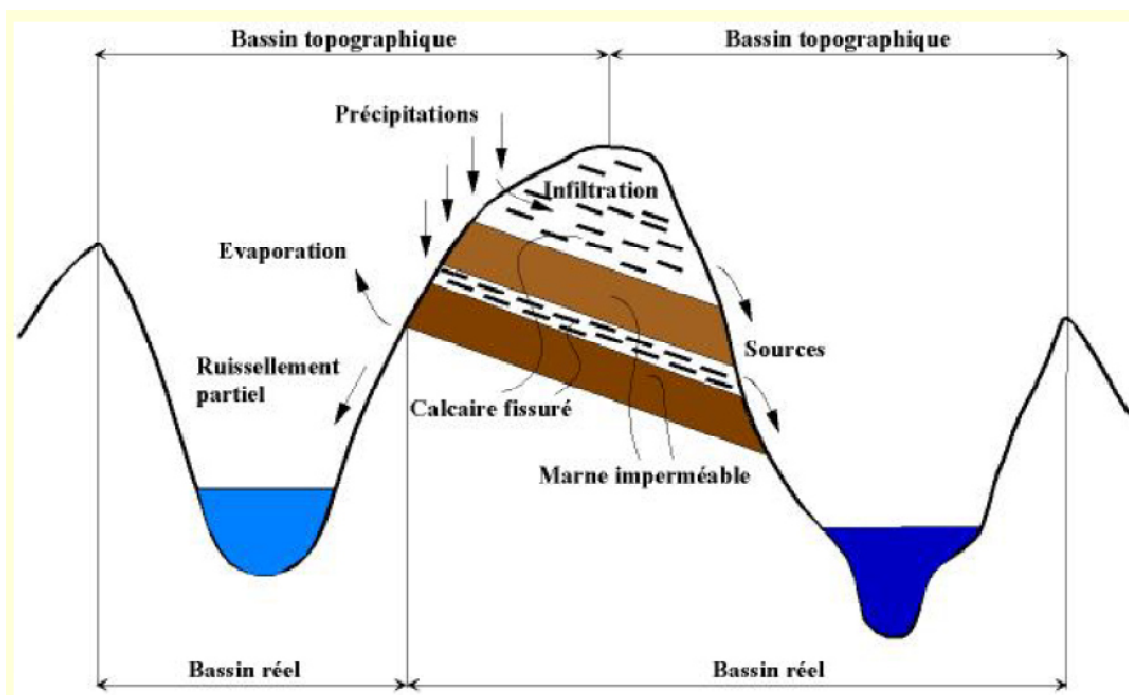


Figure 2 : Distinction entre bassin versant réel et bassin versant topographique  
D'après (Roche, 1963)

Cette différence entre bassins réel et topographique est tout particulièrement importante en région karstique. Lorsque l'on s'intéresse au ruissellement, la délimitation du bassin versant doit aussi tenir compte des barrières artificielles (routes, chemins de fer, etc.). En effet, l'hydrologie du bassin versant, et notamment la surface drainée, peuvent être modifiées par la présence d'apports latéraux artificiels, tels que réseaux d'eaux usées ou potables, drainages, routes, pompages ou dérivations artificielles modifiant le bilan hydrologique (Figure 3).

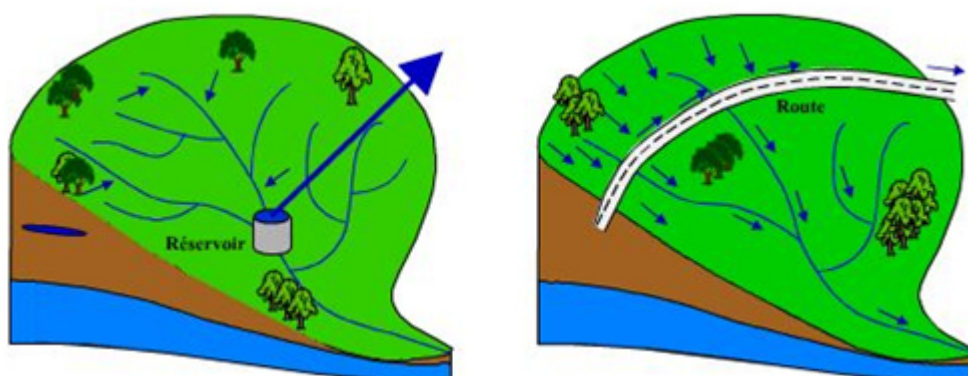


Figure 3 : Exemple de modifications de la délimitation du bassin versant suite à la mise en place d'un réservoir et la construction d'une route.

## **III. Les différentes fonctions d'un bassin versant**

Un bassin versant remplit plusieurs fonctions. Les fonctions hydrologiques, écologiques et socio-économiques ne sont que quelques exemples.

### **III.1 Les fonctions hydrologiques**

Pour comprendre les fonctions hydrologiques, il faut se référer au cycle de l'eau (cycle hydrologique), lequel explique le mouvement constant de l'eau (eau de surface et eau souterraine), par évaporation et transpiration de l'atmosphère à la terre, sous différentes formes de précipitations. Le bassin versant recueille l'eau sous ces différents états (liquide et solide) ; une partie de ces eaux s'infiltré et l'autre ruisselle.

### **III.2 Les fonctions écologiques**

Un bassin versant remplit au moins deux fonctions écologiques : il procure des sites d'échanges et des mécanismes essentiels pour le bon développement des réactions chimiques nécessaires aux organismes vivants et il procure un habitat à la faune et à la flore. Le bassin versant et ses fonctions hydrologiques déterminent les caractéristiques de l'habitat dans les milieux aquatiques. Les perturbations causées par l'homme sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau ont parfois des effets négatifs sur les écosystèmes ainsi que sur la faune et la flore, pouvant aller jusqu'à mettre en péril la chaîne alimentaire. Pour l'eau, la pollution est une menace qui se joue des frontières nationales.

### **III.3 Les fonctions socio-économiques**

Les bassins versants « en bonne santé » sont nécessaires pour assurer un environnement socio-économique sain. Chacun de nous vit dans un bassin versant ; chacun de nous dépend de l'eau et des autres ressources naturelles pour sa survie. Toute personne qui vit ou qui travaille dans un bassin versant a un impact sur les conditions du bassin et sur les ressources en eau qu'il soutient par conséquent, elle a l'avantage à collaborer à la préservation des conditions du bassin versant.

## **IV. Le réseau hydrographique**

Les géomorphologues ont observé depuis longtemps que la densité des cours d'eau est tributaire, en particulier, de la nature des terrains. Le réseau hydrographique est d'autant plus développé et complexe que le sol et le sous sol sont moins perméables, donc le ruissellement de surface est plus intense.

Aucun des oueds algériens n'est navigable. Ils prennent leur source à des altitudes qui peuvent atteindre les 1.500 m. Leur pente moyenne est donc rapide. Ils roulent des quantités d'eau irrégulières et médiocres (Gautier, 1911a, 1911b). C'est la conséquence, d'une part, du caractère morcelé du relief et d'autre part de l'étroitesse de la bande tellienne, qui ne dépasse jamais les 150 à 200 km de large. C'est pourquoi les cours d'eau sont brefs ; ils se nomment « oued » plutôt que rivière dont le débit croît régulièrement de la source vers l'embouchure. Un oued se présente avec un aspect, un débit, un mode d'alimentation et un nom qui varient tout au long du trajet.

## **V. Les bassins versants algériens**

Le territoire algérien est subdivisé en 5 grands bassins hydrographiques créant dans chacun d'entre eux des organismes de bassin : Agences de Bassin hydrographique pour une meilleure gestion intégrée par région des ressources en eau (Figure 4).

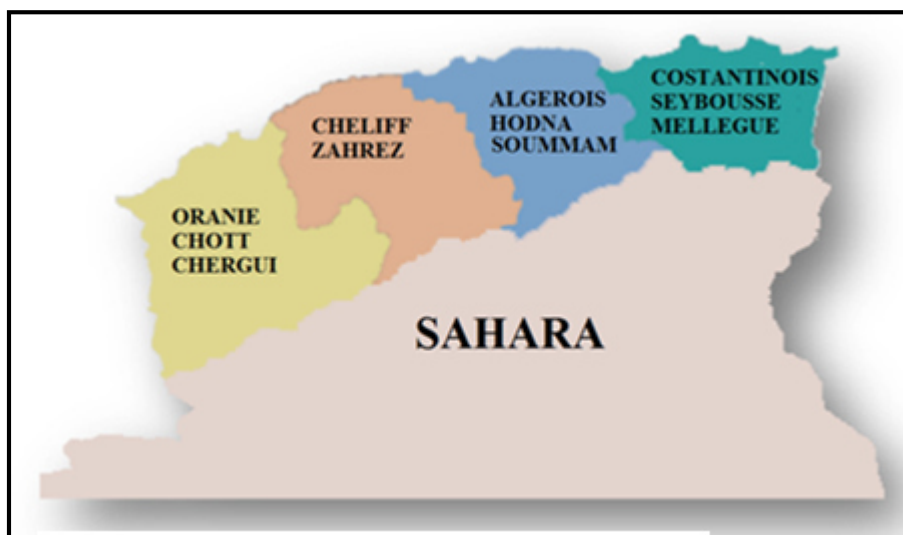


Figure 4 : Les cinq bassins hydrographiques en Algérie<sup>(1)</sup>.

Les bassins versants en Algérie sont au nombre de 17 (tableau 1 et Figure 5), parmi lesquels 11 drainent l'Atlas Tellien et les plaines côtières qui ne représentent que 131 106 km<sup>2</sup> de la superficie totale du territoire algérien. Ces 11 derniers sont répartis d'ouest en est : la Tafna, la Macta, les côtiers oranais, le Cheliff, les côtiers algérois, l'Isser, la Soummam, les côtiers constantinois, le Kebir – Rhumel, la Seybouse et la Medjerda – Mellegue.

Tableau 1 : Zones hydrologiques ou bassins versants algériens

code	Bassin versant	Superficie (en km2)	code	bassin versant	Superficie (en km2)	code	bassin versant	Superficie (en km2)
1	Cheliff	43.750	7	H. Plateaux constantinois	9.578	13	Sahara	2.087.991
2	Côtiers algérois	11.972	8	H. Plateaux oranais	49.370	14	Seybouse	6.475
3	Côtiers constantinois	11.570	9	Isser	4.149	15	Soummam	9.125
4	Côtiers oranais	5.831	10	Kebir Rhumel	8.815	16	Tafna	7.245
5	Chott Hodna	25.843	11	Macta	14.389	17	Zahrez	9.102
6	Chott Melghir	68.751	12	Medjerda	7.785			

Source : ANRH

<sup>(1)</sup> Source : Ministère des ressources en eau, Alger 2008.

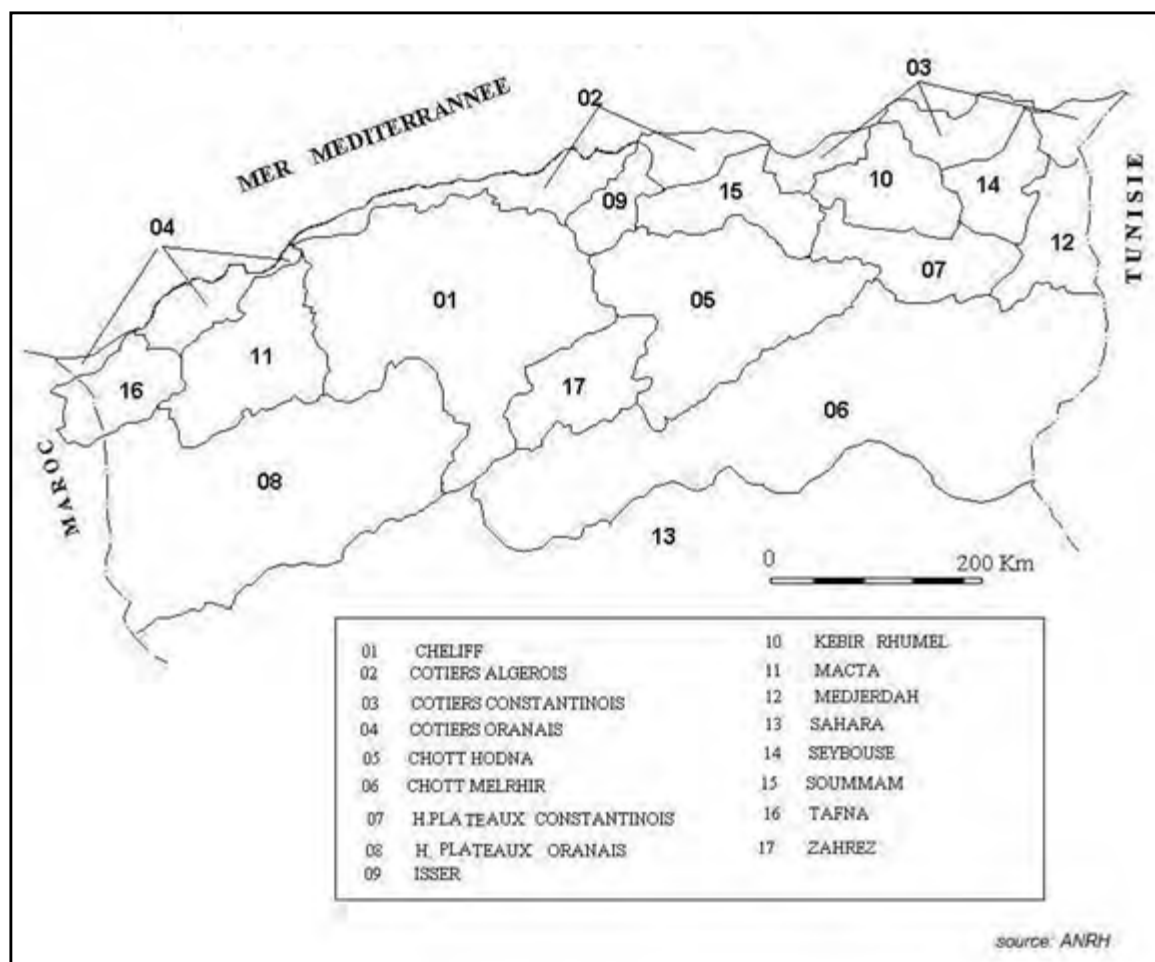


Figure 5 : Bassins versants algériens

Les bassins versants sont regroupés en trois zones<sup>(1)</sup> :

- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au nord de l'Algérie sont des bassins à écoulement exoréique dont les Oueds se jettent dans la mer, tels les Côtiers algérois (2), les Côtiers constantinois (3), les Côtiers algérois, Kébir-Rhumel, Seybouse et Medjeda ont un apport moyen annuel estimé à 11 milliards de m<sup>3</sup>.
- Les bassins endoréiques, les oueds se jettent dans des dépressions fermées, occupant les Hautes Plaines dont les eaux se perdent en grande partie par évaporation dans les chotts. Parmi ces bassins on peut citer les Hauts plateaux constantinois (7), les Hauts plateaux oranais (8), le Chott Hodna (5),
- Les bassins sahariens sont eux aussi à caractère endoréique avec des oueds intermittents qui se jettent dans des dépressions fermées.

<sup>(1)</sup> Source : Agence Nationale des Ressources Hydrique (ANRH, 1993)

En somme, le Tell qui ne représente que 7 % de la superficie du pays enregistré, à lui seul, 90 % de l'écoulement total, le reste du territoire est caractérisé par une aridité chronique.

## **V.1 Le bassin de la Seybouse**

Le bassin versant de la Seybouse avec son code (14), occupe une superficie totale de 6 475 km<sup>2</sup> et s'étend sur 160 km, suivant une disposition sensiblement Sud-Ouest–Nord-Est, des confins des Garaet El Tarf et Guelif au Sud, jusqu'à la mer au Nord (Figure 6). Il comprend six sous bassins versants (Tableau 2).

**Tableau 2 : Bassin versant de la Seybouse avec ses sous bassins.**

<b>Bassin versant N° 14</b>	<b>Code</b>	<b>Sous bassin versant</b>	<b>Superficie (Km<sup>2</sup>)</b>
<b>SEYBOUSSE (6 475 Km<sup>2</sup>)</b>	<b>14-01</b>	<b>Oued Cherf amont</b>	<b>1 739</b>
	14-02	Oued Cherf aval	1 193
	14-03	Oued Bouhamdane	1 108
	14-04	Oued Seybousse moyenne	817
	14-05	Oued Mellah	552
	14-06	Oued Seybousse maritime	1 066

L'Oued de la Seybouse a 223 km de long entre son embouchure, qui est à Annaba, et sa source, qu'elle prend, sous le nom de Oued Cherf auprès de Ain Beïda. Oued Cherf coule donc sur les hauts plateaux et la Seybouse dans le Tell. Le profil suggère que les deux oueds (Cherf et Seybouse) ont été longtemps distincts, et que le premier a été capturé par le second. En amont de Guelma, ils sont réunis par des rapides où la pente atteint les 25 %.

L'oued Cherf prend naissance dans les Hautes Plaines (Berriche et Ain Babouche) et rencontre à l'Ouest de Guelma, l'oued Bouhamdane qui coule Sud-Ouest - Nord-Est, le long du versant Sud-tellien.

Ces deux cours d'eau (Oued Bouhamdene et Oued Cherf) donnent lieu à l'Oued Seybouse qui s'écoule d'Ouest en Est jusqu'à sa confluence avec l'oued Mellah, affluent issu du versant septentrional bien arrosé des Monts de Medjerda. Depuis, la Seybouse change de direction pour rejoindre, plus au Nord, la mer Méditerranée, après avoir traversé la plaine côtière, comprise entre Dréan et Annaba.

## V.2 Le bassin versant de l'Oued Cherf

Le bassin versant d'Oued Cherf portant le code (14-01) fait partie du grand bassin versant de la Seybousse en constituant le haut Seybousse (Figure 6). Ses caractéristiques seront présentées plus loin.

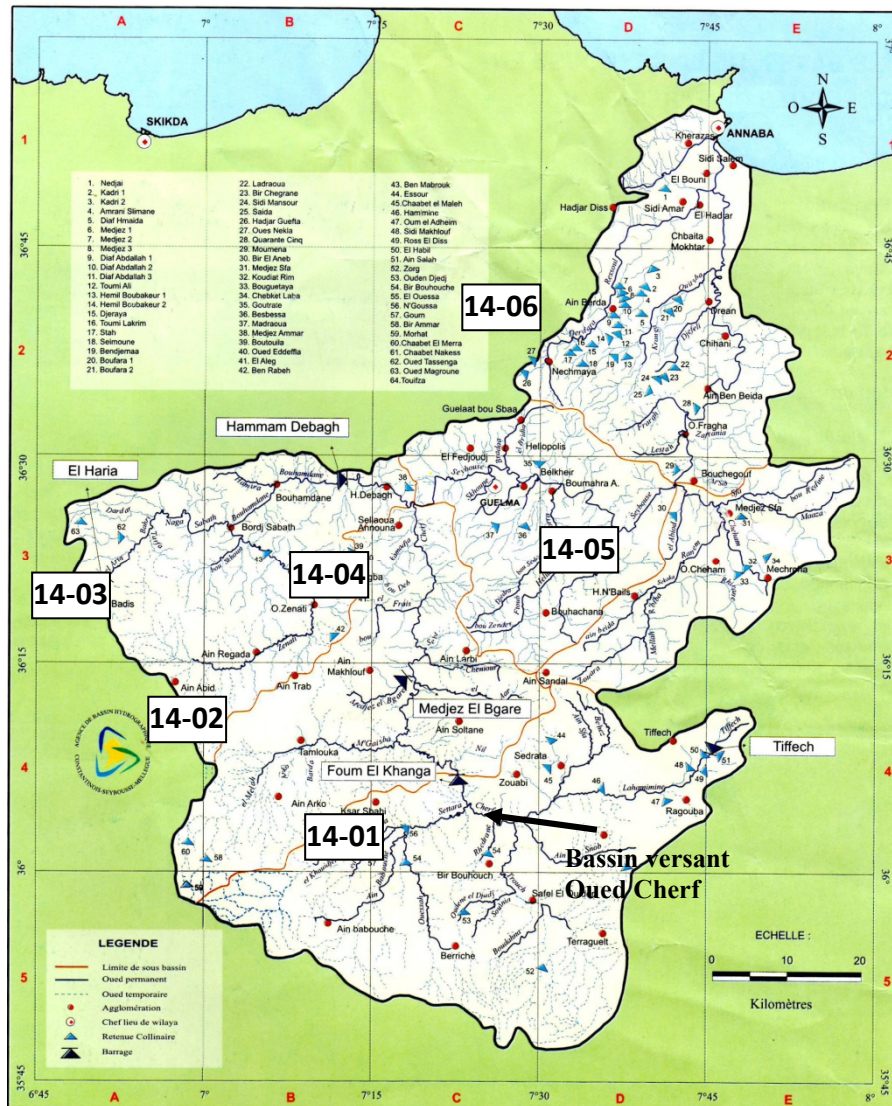


Figure 6 : Bassin versant de la Seybousse.

## VI. Conclusion

Le territoire algérien est subdivisé en 5 grands bassins hydrographiques ; Oranie Chott Chergui, Cheliff Zahrez, Algérois Hodna Soummam, Constantinois Seybousse Mellegue et Sahara. Les bassins versants en Algérie sont au nombre de 17, parmi lesquels 11 drainent l'Atlas Tellien et les plaines côtières. Ces 11 derniers sont répartis d'ouest en est : la Tafna, la Macta, les côtiers oranais, le Cheliff, les côtiers algérois, l'Isser, la Soummam, les côtiers

constantinois, le Kebir – Rhumel, la Seybouse et la Medjerda – Mellegue. Le bassin versant de la Seybouse occupe une superficie totale de 6 475 km<sup>2</sup> et s'étend sur 160 km, suivant une disposition sensiblement Sud-Ouest–Nord-Est. Il comprend six sous bassins versants ; Oued Cherf amont, Oued Cherf aval, Oued Bouhamdane, Oued Seybousse moyenne et Oued Seybousse maritime.

**CHAPITRE 2**

**BASSIN VERSANT OUED CHERF**

## CHAPITRE 2 : BASSIN VERSANT D'OUED CHERF

### I. Situation géographique

Le bassin versant de l'Oued Cherf, qui porte le code 14-01 selon l'Agence des Bassins Hydrographiques, se situe au nord est de l'Algérie à l'amont du barrage de Foum El Khanga (Figure 7). Il couvre une superficie de 1735 km<sup>2</sup> avec un périmètre de 190 km et occupe une position exutoire du grand bassin versant de la Seybousse (Cf. Figure 6). Il constitue la région limitrophe de trois Wilayat : Souk Ahras, Guelma et Oum El Bouaghi et regroupe sept Daïra et seize Communes. Il est délimité par des versants montagneux ; au Nord, par Dj. Tiffech, massif de Ras El Alia, Dj. Zouabi, au Sud par, Dj. Ezzorg, Koudiat Edabdaba et Dj. Lahmar, à l'Est par Dj. Kebarit, Dj. Teraguelet, Dj. Ain Zitouna et à l'Ouest par Dj. Sidi R'ghis et Chebkat Sellaoua.

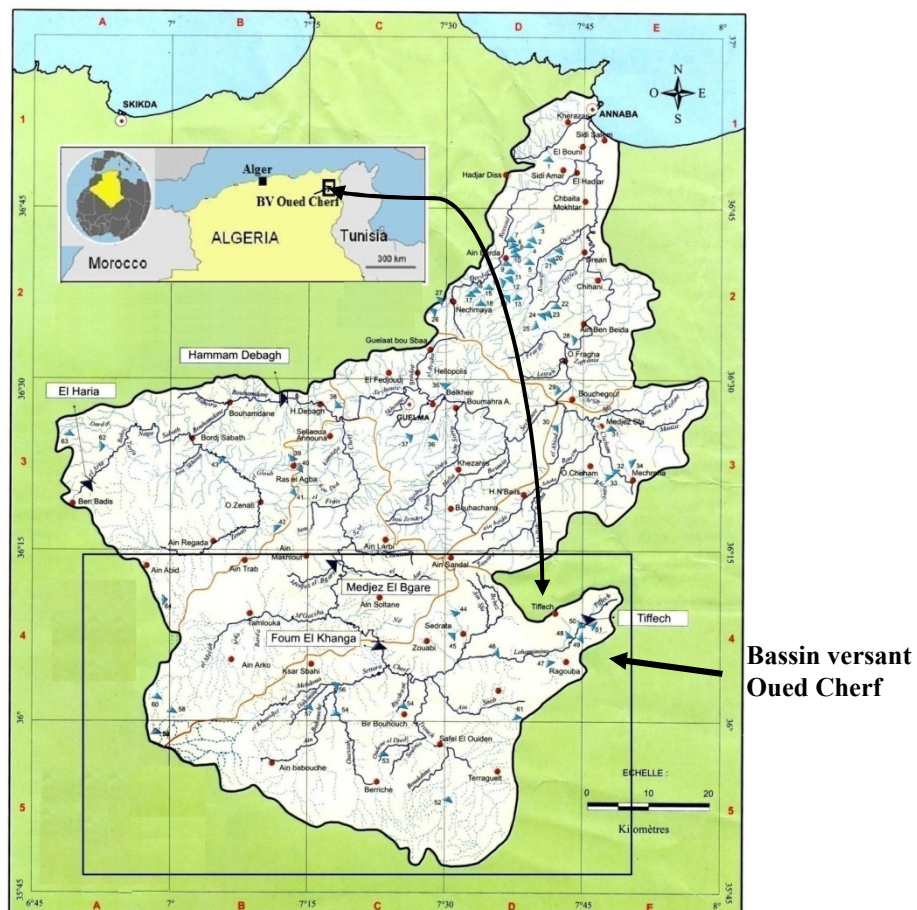


Figure 7 : Situation géographique du Bassin versant Oued Cherf

## **II. Cadre Géologique**

Plusieurs travaux sur la géologie de la région ont été menés, parmi lesquels on peut citer (David, 1956; Dubourdiou, 1956; Voûte, 1967; Baumgartner and Reichel, 1975; Vila, 1977a, 1977b, 1980). La géologie du bassin versant de l'Oued Cherf, selon Vila (1980), est constituée par des roches sédimentaires d'âge allant du Trias au Quaternaire. Elle est représentée par deux grands ensembles structuraux :

- Un ensemble de formations para-autochtone ou autochtone appelé le domaine para-autochtone ou autochtone Nord Aurésien ;
- Un ensemble allochtone écaillé à faciès de type Sellaoua appelé le domaine Néritique Sud Constantinois.

Ces deux ensembles sont recouverts par le domaine des nappes (nappes telliennes et nappes de flyschs) et enfin par des formations peu ou pas tectonisées d'âge Mio-pliocène et Quaternaire.

La lithostratigraphie du bassin versant peut être décrite, du plus ancien au plus récent, comme suite :

### **II.1 Domaine para-autochtone ou autochtone Nord Aurésien**

#### **II.1.1 Trias (t)**

Il est présent à la base de la Klippe de Bir Bouhouche et en recouvrement anormal sur le Maestrichien du Djebel Tiguilaline. Il occupe de vastes surfaces du Djebel Zouabbi. C'est un ensemble broyé d'argiles varicolores et de gypses très broyés. Certains blocs de dolomies cargneulisées (dt) atteignant de fortes tailles notamment au Djebel Tiguilaline où ils voisinent avec des masses (gt) grésopélitiques rouges analogues à celles de Rass el Alia.

#### **II.1.2 Vraconien et Cénomanién basal (c<sup>1b</sup>)**

Il s'agit des marno-calcaires et des biomicrites. La formation est semblable à la base du Sénonien et lardée de filonnets de calcite. Elle livre des empreintes de Puzozia Subplanulata.

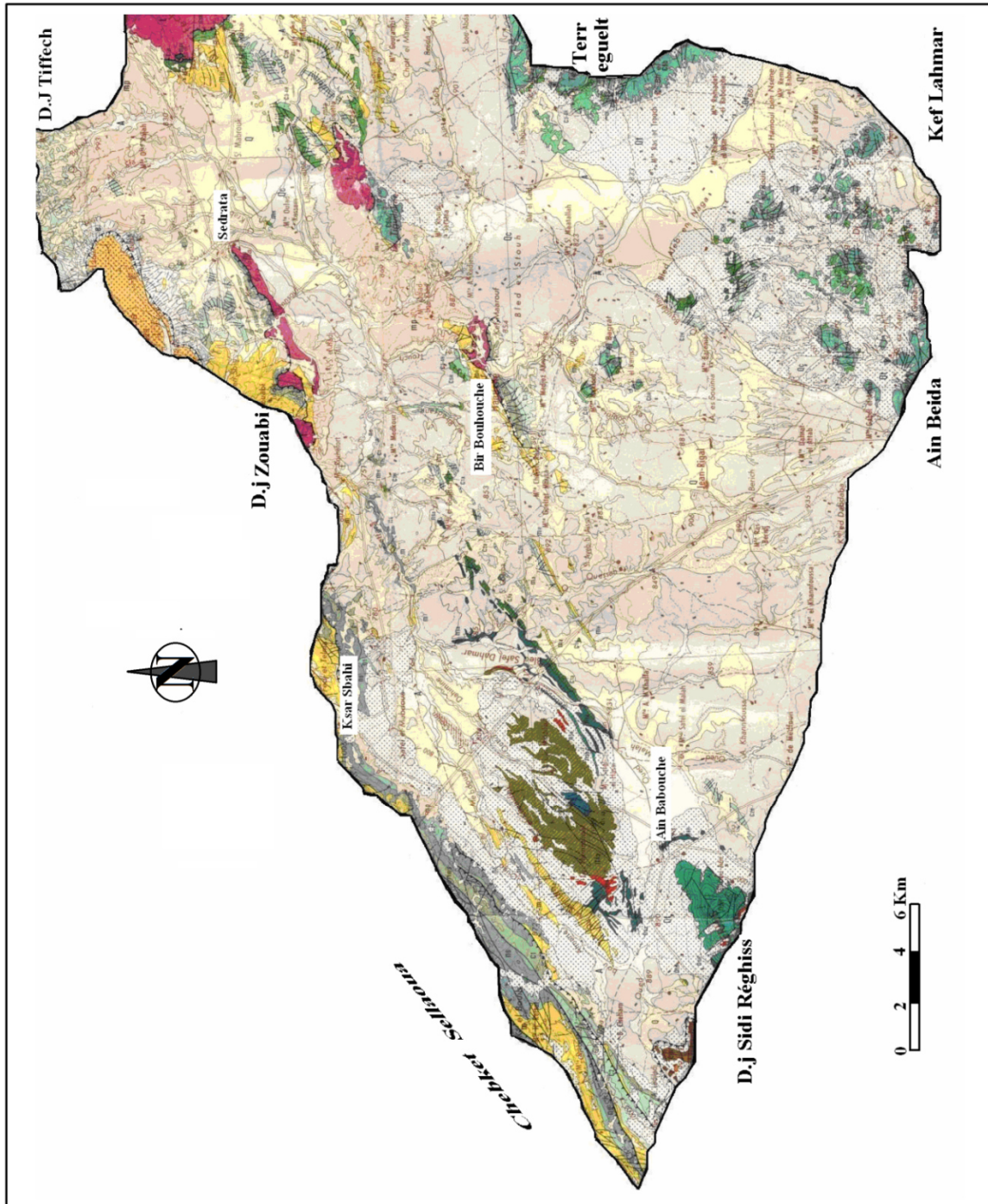



Figure 8 : Extrait de la carte géologique de Constantine (Vila, 1980).

# LEGENDE

**Quaternaire**



Éboulis : 1 - à blocs  
2 - à gangue marneuse  
3 - en masse.

**A** Alluvions actuelles ou récentes.

**Q** Terres arables, formations de pente, alluvions anciennes et Quaternaire indéterminé.

**Q<sup>c</sup>** Villafranchien (?) : croûtes calcaires.

**Q<sup>f</sup>** Travertins et tufs hydrothermaux.

**Mio-Pliocène**

**mp** Mio-Pliocène continental : argiles, conglomérats, grès et calcaires lacustres.

**NAPPES DE FLYSCH**

**Nappe numidienne**

**g<sub>v</sub>** Grès numidiens.

**A<sub>N</sub>** Argiles numidiennes de base à *Tubotomaculum*.

**NAPPES TELLIENNES**

**Unité supérieure : faciès éocènes à Globigérines et à débris.**

**g** Oligocène argilo-gréseux de Béni-Affif.

**e<sup>6-7</sup>** Lutétien et Priabonien (?) à Huîtres.

**e<sup>4-5</sup>** Yprésien à Lutétien inférieur : calcaires blancs bitumineux à cassure noire et à silex noirs : faciès à Globigérines et à débris.

**e<sup>1-3</sup>** Paléocène : marnes noires et alternances de marnes et de marno-calcaires noirs.

**ENSEMBLE ALLOCHTONE ÉCAILLÉ À FACIÈS DE TYPE SELLAOUA**

**m<sup>c</sup>** Miocène à dominante marneuse à l'W de Sedrata.

**m** Miocène transgressif conglomératique et surtout gréseux.

**c<sup>6</sup>** - Maestrichtien surtout calcaire à Inocérames de l'Oued Cheniour.

**c<sup>5-6</sup>** - Campanien-Maestrichtien marneux à *Globotruncana calcarata* de l'Oued Cheniour ou Campanien et Maestrichtien indifférenciés : calcaires à Inocérames et marnes à *Globotruncana*.

**c<sup>5</sup>** - Campanien calcaire de l'Oued Cheniour.

**n<sup>7-c1</sup>** Vraconien et Cénomaniens basal : marnes et biomicrites en petits bancs.

**n<sup>6</sup>** Albien : marnes schisteuses grises et biomicrites à patine grise avec petits niveaux à Orbitolines à l'Oued Cheniour.

**n<sup>4-5</sup>** Barrémo-Aptien : marnes gris-bleu à Ammonites de l'Oued Cheniour.

**Trias** : t - faciès argilo-gypseux varicolore ;  
dt - principaux glaçons calcaro-dolomitiques ;  
gt - masses grésopélitiques rouges.

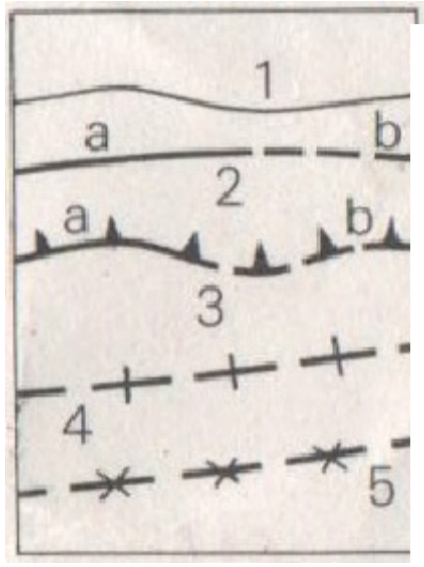
**FORMATIONS PARAUTOCHTONES OU AUTOCHTONES NORD-AURÉSIENNES**

**m<sub>H</sub>** Miocène marin transgressif : conglomérats et grès roux calcaires à *Pecten* et *Ostrea*.

**c<sub>H</sub><sup>6</sup>** Maestrichtien calcaire à Inocérames.

**c<sub>H</sub><sup>5-6</sup>** Campanien supérieur à Maestrichtien à dominante marneuse.

**c<sub>H</sub><sup>5</sup>** Campanien surtout calcaire à Inocérames.



## SIGNES CONVENTIONNELS

- 1- Contact normal
- 2- Principales failles
  - a- Visibles
  - b- Cachées ou supposées
- 3- Charriage et chevauchement
  - a- Visible
  - b- Caché ou supposé

### Pendages

	normaux	renversés
horizontaux	+	✕
faibles	↙	↘
moyens	↙	↘
forts	↙	↘
verticaux	---	---

#### II.1.3 Cénomaniens Supérieur ( $c^{1c}$ )

Il est constitué par des marnes grises à grandes rotalipores. Ces affleurements sont bien visibles en bordure du fosse de Teraguelet.

#### II.1.4 Turonien ( $c_H^2$ )

Il est constitué à sa base par des calcaires marneux en plaquettes à patine blanche et cassures noires caractérisées par la présence d'empreintes d'ammonites et d'Inocérames. Au sommet ces formations sont marneuses et micritiques à Globotruncana. Ces formations forment l'arête principale de la klippe de Bir Bouhouche et les longues arêtes de Dj Hamimat.

### **II.1.5 Coniacien ( $c_H^{2-4}$ )**

Il affleure visiblement à Djebel Teraguelet et dans la klippe de Bir Bouhouche avec un faciès marneux de couleur grise ou gris bleuâtre riche en plaquettes de calcite et à petites intercalations marno-calcaires contenant une microfaune riche en Globotruncana.

### **II.1.6 Santonien ( $c^4$ )**

Il est formé par des marnes grises et de petits niveaux de calcaires noduleux. Il forme les talus marneux sur lesquels sont installés les glacis polygéniques. Il s'agit d'une épaisseur de 150-200 mètres de marnes grises ou beiges à petites intercalations marno-calcaires à Inocérames.

### **II.1.7 Campanien ( $c^5$ )**

Les petits affleurements de la région nord de Bir Bouhouche sont constitués de marnes et de marno-calcaires à Inocérames avec une microfaune pélagique. A Djebel Teraguelet, ce Campanien est légèrement gréseux avec la conservation de microfaune pélagique.

### **II.1.8 Maestrichtien inférieur à dominance marneuse ( $C^{6a}$ )**

Ces roches tendres mettent en relief la corniche précédente. Ce sont des marnes beiges à petits bancs de calcaires à Inocérames un peu noduleux : la microfaune est ainsi pélagique avec Globotruncana.

### **II.1.9 Maestrichtien supérieur ( $c^{6b}$ )**

Les principaux reliefs sont installés sur des calcaires crayeux beiges à cassures blanchâtres en bancs décimétriques, à petites intercalations de calcaires à petites Inocérames trapus ou de calcaires noduleux ocre à rares nodules de silex. La microfaune est pélagique avec globotruncana.

## **II.2 Miocène marin transgressif ( $m_H$ )**

Il forme une série d'affleurements discontinus au dessus des minces niveaux conglomératiques de base généralement rouges ou rubéfiés. Ces conglomérats sont surmontés de calcaires gréseux roux ou bruns riches en débris d'huîtres, de marnes et plus haut de grès en bancs minces alternant avec des couches argileuses brunes. Ces niveaux qui

n'ont livré aucune microfaune significative représentent probablement le Burdigalien Supérieur comme la partie nord de la plaine de Sedrata.

## **II.3 Domaine Néritique Sud Constantinois**

Il s'appelle aussi ensemble allochtone écaillé à faciès de type Sellaoua. Ses formations sont présentées par les klippes de l'oued Settara et de Bir Bouhouche et les écailles de l'oued Cherf. Ce sont des séries localement écaillées qui supportent les nappes du tellien externe au Nord et qui surmontent l'autochtone nord-aurésien au Sud. Elles se sont déposées dans un large sillon de direction NE-SW situé entre le domaine atlasique au Sud et le domaine tellien au Nord. Pour JM Vila 1980, ce sont des formations autochtones écaillées à sédimentation argileuse et marneuse d'âge Crétacé avec une couverture transgressive d'âge miocène inférieur.

### **II.3.1 Albien (n<sup>6</sup>)**

Il est caractérisé par des formations tendres composées essentiellement par des marnes et des argiles grises ou brunes.

### **II.3.2 Vraconien et Cénomaniens basal (n<sup>7</sup> - c<sup>1</sup>)**

Il s'agit d'une série marneuse et marno-calcaireuse à rotalipores à petites intercalations de calcaires marneux très froissés.

### **II.3.3 Cénomaniens (c<sup>1</sup>)**

Sur 150 à 170 mètres, le Cénomaniens est marneux au sommet et à petites intercalations marno-calcaires ayant livré des rotalipores à la base et empreintes de Puzosia Subplanulata.

### **II.3.4 Turonien (c<sup>2</sup>)**

Il est constitué de marno-calcaires noires en plaquettes. Ces formations forment l'arrête principale de la Klippe de Bir Bouhouche, et les longues arrêtes qui cernent l'écaille de Djebel Hammimat où la base de la série n'est pas visible. A la base une série de 50 à 60 m de marno-calcaire blancs en plaquettes à cassures noires livre une microfaune à Hedbergella sp. Au dessus de cette série on rencontre une barre de 25 à 30 m de bio-micrite claires en

petits bancs et des marnes grises ayant livré de microfaunes du Turonien franc à Globotruncana.

### **II.3.5 Coniacien et Santonien marneux (c<sup>3-4</sup>)**

Les terrains de cet âge n'affleurent que dans la Klippe de Bir Bouhouche. Il s'agit de marnes grises et gris blanchâtres filonnées de calcite et qui ont livré une microfaune à dominance Globotruncana.

### **II.3.6 Miocène marin transgressif (m)**

Le miocène marin transgressif est discordant sur le Crétacé. Les premiers niveaux sont en général des conglomérats polygéniques rouges reposant sur un substratum rubéfié ou décoloré. A ces niveaux minces fait suite une barre de grès roux à huîtres et au dessous de ces grès, on trouve des marnes grises ou bleues qui atteignent 600 mètres d'épaisseur.

### **II.3.7 Miocène (m<sup>b</sup>)**

Le Miocène est représenté par une puissante série de marnes bleuâtres et d'argiles grises verdâtres, à intercalations de grès calcareux bruns bien dégagés par l'érosion. Les argiles livrent d'abondante microfaune à globigérinoïdes.

## **II.4 Nappes telliennes**

Elles sont formées de roches sédimentaires d'âge Paléogène (Nummulitique) et sont constituées de deux unités principales :

### **II.4.1 Unité inférieure**

C'est un faciès à Nummulites qui est représenté essentiellement par des calcaires massifs à Nummulites d'âge Yprésien et Lutétien inférieur (e4-5).

### **II.4.2 Unité supérieure**

C'est un faciès éocène à Globigérines et à débris représenté essentiellement par :

#### **II.4.2.1 Paléocène (e<sup>1-3</sup>)**

Il est composé de marnes noires et d'alternances de marnes et de marno-calcaires noirs.

#### ***II.4.2.2 Yprésien et Lutétien inférieur (e<sup>4-5</sup>)***

Il est composé de calcaires blancs bitumineux à cassure noire et à silex noirs ; c'est un faciès à globigérines et à débris.

#### ***II.4.2.3 Lutécien et Priabonien ( ? ) à huîtres (e<sup>6-7</sup>)***

#### ***II.4.2.4 oligocène (g)***

Il est composé essentiellement d'un faciès argilo-gréseux qui affleure à Béni-Affif.

### **II.5 Nappes de flysch (Nappes numidiennes)**

Elles sont composées d'argiles numidiennes de base (AN) à Tubotomaculum et de grès numidien (gN).

### **II.6 Formations peu ou pas tectonisées**

#### **II.6.1 Mio-pliocène (mp)**

C'est un faciès continental composé d'argiles, conglomérats, grès et calcaires lacustres. Ces formations se sont développées au nord de la feuille de Bir Bouhouche à l'Oued de Hamimine. Il s'agit d'argiles jaunes ou ocre, de conglomérats orangés, de grès calcaireux jaunâtres et de calcaires lacustres blancs ou roses.

#### **II.6.2 Quaternaire**

Il est composé des faciès suivants :

##### ***II.6.2.1 Villafranchien (Q<sup>c</sup>)***

Ce sont des croûtes calcaires massives blanchâtres formant soit de petites masses soit des surfaces allongées de formes variées. Elles se déposent directement sur le pliocène supérieur d'où la difficulté de faire la distinction de la limite entre les deux formations.

##### ***II.6.2.2 Glacis polygéniques nappant le relief (Q<sup>t</sup>)***

Ces glacis couvrent de très vastes surfaces. Ils sont caractérisés par leur organisation en pente douce au niveau des plaines qui s'accroît progressivement vers la montagne.

### ***II.6.2.3 Terres arables, formations de pente, alluvions anciens et quaternaire indéterminé (Q)***

Ces formations sont installées sur des placages limoneux qui se trouvent dans les zones de faibles pentes sur les alluvions anciennes et les glacis anciens. Elles supportent un sol brun peu ou pas calcaire. L'intérêt économique de ces formations est très important pour l'agriculture, surtout la culture des céréales.

### ***II.6.2.4 Alluvions actuelles ou récentes (A)***

Elles sont localisées le long des Oueds septentrionaux (Oued Settara, Oued Cherf et Oued Hamimine) et le long de l'Oued Trouch qui draine le fossé de Teraguelet très disséquées. Ce sont des limons, de sables et des graviers gris.

## **III. Les époques salifères en Algérie**

En Algérie, quatre époques salifères importantes et d'intensité décroissante ont pu être mises en évidence (Merabet, O. & Popov, A., 1968) :

- une époque salifère triasique ;
- une époque salifère sénonienne ;
- Une époque salifère nummulitique (paléogène) ;
- une époque salifère plio-quaternaire.

### **III.1 Epoque salifère du Trias**

La première époque salifère du Trias supérieur est liée à la transgression marine triasique, qui a recouvert progressivement l'Afrique du Nord et la partie septentrionale de la plate forme saharienne. Malgré la pénéplanisation des reliefs, cette transgression à caractère lagunaire et laguno-marin présente d'importantes variations des dépôts dues à l'existence de zones hautes partiellement émergées et des fosses à forte subsidence et sièges d'éruptions volcaniques basiques syn-sédimentaires.

Sur le plan tectonique ces évaporites ont joué un rôle important. En effet, elles ont servi de semelles glissantes aux « charriages » de l'orogénèse alpine.

Au Trias inférieur, les mouvements différentiels de réajustement avec rejeux de fractures profondes et anciennes, affectent la plate forme saharienne et sont accompagnés

d'éruptions volcaniques basiques. Les zones hautes du domaine atlasique (môle néritique et la Kabylie) restent émergées. Les dépôts détritiques (conglomérats et grés) se forment en bordure de ces zones sans manifestations diapiriques.

Au Muschelkalk, la sédimentation se caractérise essentiellement par des dépôts d'argiles et de calcaires marquant ainsi la vaste transgression marine du Trias moyen.

Au Keuper, le régime lagunaire s'installe sur l'ensemble de l'Algérie. Trois domaines se différencient du Sud vers le Nord :

- a) Le domaine continental du Sahara central et occidental avec des dépôts de grés et argiles passant progressivement au Nord aux dépôts lagunaires.
- b) Le bassin salifère du Sahara septentrional, développé au Nord d'une ligne passant par El Goléa – Rhourde Nouss et séparé peut être du domaine atlasique par une zone de hauts fonds. Dans ce bassin très subsident où plus de 1000 mètres de sel gemme se sont déposés et les hauts fonds n'ont plus d'influence sensible sur la sédimentation. L'absence de coulées volcaniques indique une tranquillité tectonique. Il est à noter le rôle important de cette couverture salifère pour le piégeage des hydrocarbures.
- c) Le domaine atlasique nettement différencié de celui de la plate forme. Les mouvements tectoniques sont très actifs pendant le Trias surtout le rejeu de failles (probablement hercyniennes) et qui a été accompagné par des éruptions volcaniques. L'accident Sud-atlasique aurait été activé à cette époque. Dans ce domaine, trois zones de sédimentation peuvent être distinguées :
  - le bassin salifère se développant sur l'ensemble de l'atlas saharien jusqu'aux monts des Aurès à l'Est où se déposent les évaporites avec épanchement de laves basiques à structure doléritique.
  - le môle oranais, en partie émergé, bordant au Nord le bassin salifère atlasique. Il s'y dépose une formation volcano-détritique.
  - Enfin au Nord, une vaste zone laguno-marine se caractérisant par de puissants dépôts à faciès germanique (argiles bariolées, cargneules, dolomies, anhydrite, gypse, peu de sel, roches volcaniques).

### **III.2 Epoque salifère sénonienne**

Après une longue période essentiellement continentale au Sahara et plus ou moins marine en Algérie du Nord, les conditions lagunaires apparaissent de nouveau au Néocomien sur une partie du Sahara septentrional et à l'emplacement de l'Atlas Saharien, mais l'instabilité des lagunes ne permet pas un cycle continu de sédimentation évaporitique (dépôt de gypse uniquement).

Au Sénonien supérieur, les lagunes occupent une superficie très étendue de la plate forme saharienne et de l'Atlas saharien. Plus de 300 mètres de séries argilo-gypseuses se déposent avec des bancs de gypse de quelques mètres de puissance. La présence de niveaux carbonatés et de dépôts de sel gemme avec anhydrite indique un régime laguno-marin.

A partir du Sénonien, les lagunes n'existent que sur la plate forme saharienne où deux bassins salifères s'installent :

- le bassin salifère de Béchar avec une puissante formation de sel gemme et peu de gypse et d'anhydrite (450 à 500m) caractérisé par sa subsidence.
- Le bassin de l'Oued Mya avec une formation salifère à la base (100 m) et une formation d'anhydrite intercalée de marnes, de calcaires et de dolomie au sommet.

En Algérie du Nord, du gypse se dépose localement notamment sur les hauts plateaux oranais.

### **III.3 Epoque salifère Nummulitique (paléogène)**

Les mers chaudes à Nummulites recouvrent l'Afrique du Nord. Elles dessinent trois grands golfes, dont le plus important est celui qui traverse le Sahara algérien. La mer va se retirer du Sahara à la fin de l'Yprésien, en se maintenant en Afrique du Nord.

Au Nummulitique, les conditions laguno-marines persistent par endroit. Les dépôts salifères sont rares et peu importants, par contre le gypse se dépose en couches puissantes dans la région du Hodna (400 m).

Après la phase tectonique de la fin de l'Oligocène, marquant l'émersion d'importantes régions de l'Algérie du Nord et du Sahara et l'effondrement de petits bassins

intramontagneux peu profonds, les conditions lagunaires s'installent à nouveau dans ces deniers avec dépôt d'évaporites à prédominance de gypse et d'anhydrite, rares sont les couches de sel gemme et séries argileuses salifères (bassin de Chélif et de Constantine).

### **III.4 Epoque salifère plio-quadernaire**

Au Plio-Quadernaire, dans les bassins morphologiques fermés des Chotts, situés dans les dépressions importantes, s'accumulent des dépôts continentaux post-orogéniques avec d'importantes concentrations de sel gemme provenant du lessivage des niveaux salifères du Miocène et du Trias.

A cette époque de plio-quadernaire, le lessivage est lié à des eaux de ruissellement, qui s'accumule au centre de ces chotts, puis suite au phénomène d'évaporation durant les périodes sèches, il y a dépôt d'évaporites.

## **IV. La position du matériel triasique**

Le Trias est localisé au front des nappes comme d'évaporites à « Ilots » ou à « inclusion » calcaires dolomitiques ou gréseux. Au niveau de la région de Sedrata, on peut observer plusieurs klippes de matériel Triasiques isolé telles que :

- La klippe de Bir Bouhouche qui montre à son bord Nord, un Trias reposant sur le Miocène gréseux et constituant la semelle d'un lambeau des unités méridionales des Sellaoua (Vila, 1977b).
- A l'Ouest de Sedrata, entre la sortie de la ville et de Dj Zouabi, les nombreux contacts anormaux sont bien visibles ; le plus spectaculaire est le contact subhorizontal qui borde au Sud les évaporites de Dj Zouabi. La klippe de Dj Tiguilaline au Sud-ouest de la ville de Sedrata recouvre indifféremment le Maestrichtien au Sud-ouest et le Miocène gréseux au Nord-est.

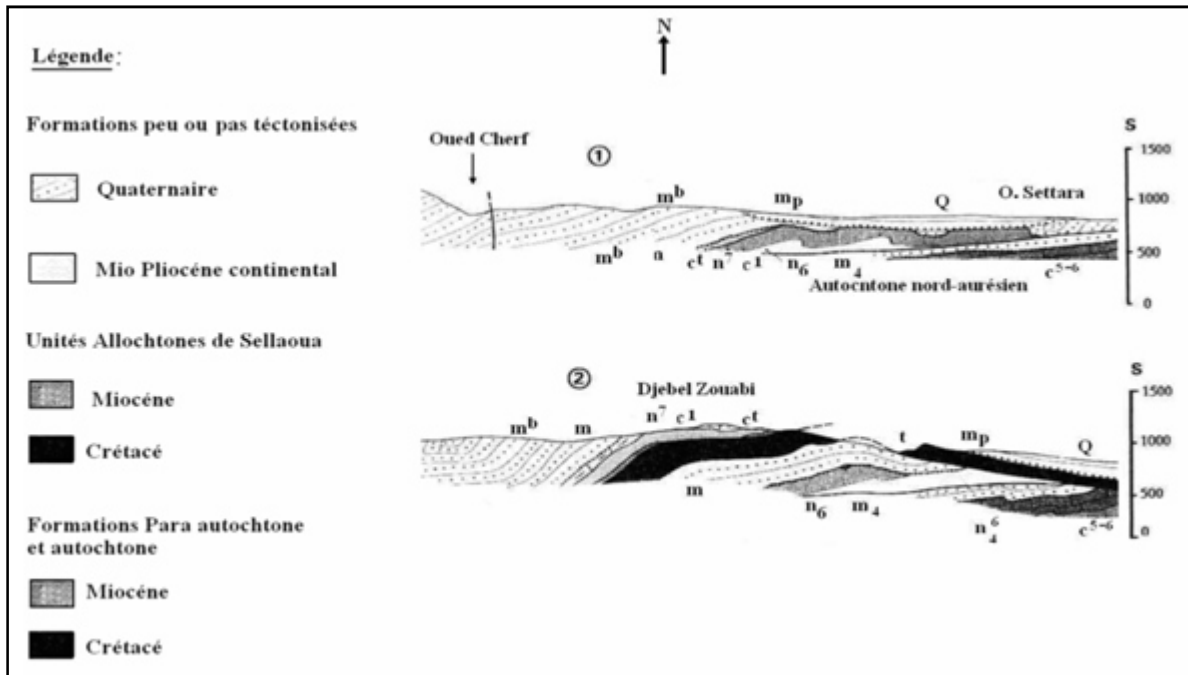


Figure 9 : Coupes géologiques du bassin d'Oued Cherf (Vila, 1980).

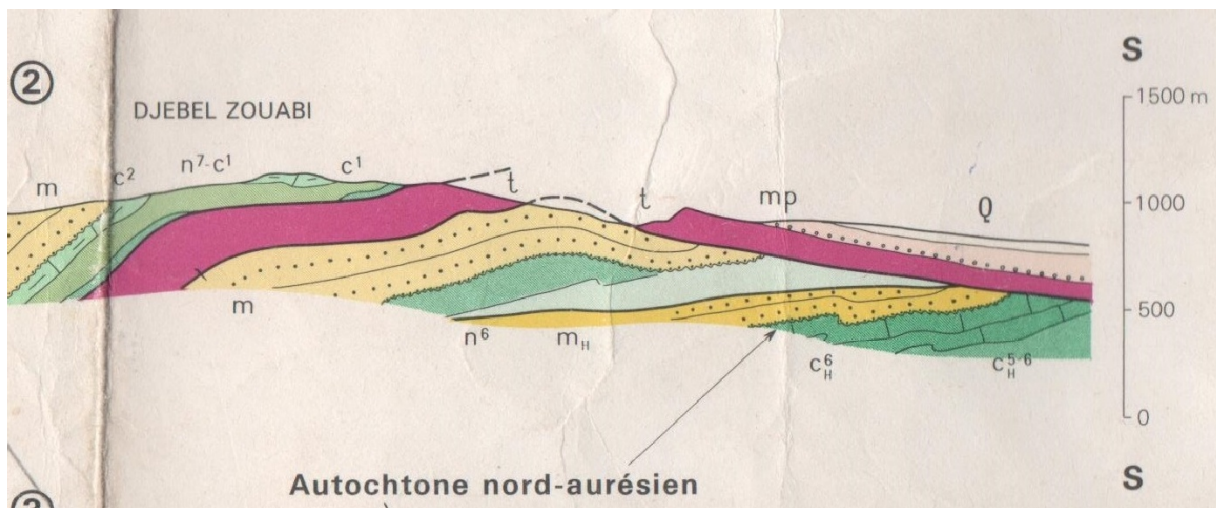


Figure 10 : Coupes géologiques N-S traversant Djebel Zouabi (Vila, 1980).

## V. La paléogéographie et tectonique

L'observation des deux feuilles de Sedrata et celle de Berriche qui couvrent la totalité du bassin de l'oued Cherf amont, nous permet de constater l'existence de deux bordures, l'une septentrionale où s'empilent les unités allochtones, dont les séries appartiennent au faciès de la zone de Sellaoua et l'autre méridionale appartenant à l'édifice autochtone Nord Aurésien.

### V.1 La bordure septentrionale des unités allochtones

On distingue de haut en bas et de nord vers le sud :

### **V.1.1 La klippe d'oued Settara**

Elle comprend les terrains marneux et marno calcaires allant de l'Albien franc au Cénomaniens et qui repose au Nord sur le Miocène. C'est l'existence d'un contact à sa base qui permet de comprendre pourquoi le Miocène de l'oued Settara plonge vers le Nord, c'est à dire sous l'Albien de la rive gauche de l'oued.

### **V.1.2 L'écaille de l'oued Cherf**

L'écaille de l'oued Cherf est hypothétique mais correspond probablement à la prolongation du chevauchement de Sedrata. On peut lui attaché le Trias flottant de Dj Tiguilaline et la klippe de Bir Bouhouche.

### **V.1.3 L'écaille de Dj Hamimat**

Elle ne montre pas son contact de base méridional qui est masqué par les recouvrements du quaternaire. C'est un paquet de plis verticaux de rayon hectométrique, avec des phénomènes de schistosité qui se manifeste un peu plus à l'Ouest surtout au niveau des anciennes mines. Le Dj Hamimat ne montre qu'une quinzaine de mètres au maximum des carbonates. L'existence d'un contact plat des formations du Dj Hamimat rend bien compte de la répartition de l'autochtone ou passe le prolongement de l'axe de Dj Sidi Réghiss.

## **V.2 La bordure méridionale Nord Aurésienne des unités autochtones**

Cette bordure correspond à une vaste surface en structures synclinales et anticlinales. Le synclinale de Bir Boubouche possède la direction Atlasique habituelle à Nord 40° Est. L'ensemble de ces formations est occupé par une structure cassante Plio-quaternaire qui a engendrée le fossé de Teraguelet orienté NNW- SSE.

Au point de vue paléogéographique, on peut donc opposer un domaine septentrional ou les faciès sont marneux au Crétacé inférieur à un domaine méridional masqué par un recouvrement quaternaire, c'est un paquet des masses carbonatées .La série de DJ Hamimat fournit un élément précieux intermédiaire pour cette reconstitution. Les phases tectoniques superposées qui ont affecté ce secteur n'ont fait qu'accentuer ces oppositions. La zone septentrionale des Sellaoua a été le siège d'une importante tectonique tangentielle. Certains

blocs de dolomies atteignent de fortes tailles notamment au Dj Tiguilaline ou ils voisinent avec des masses gréseux-pélimitiques rouges analogues à celles de Ras El Alia.

## **VI. L'histoire géologique du bassin de l'Oued Cherf**

Au Miocène inférieur, une transgression importante ayant affecté la région selon une direction du Nord vers le Sud, cette dernière est responsable de la sédimentation d'une importante série argilo gréseuse dans le bassin d'oued Cherf-Sedrata.

Vers le Turonien s'est produit le charriage des nappes telliennes Paléogènes décollées de leurs substratums crétaqués. Enfin, vers le Miocène supérieur, la zone d'étude a connu une régression de la mer vers le Nord, l'Est et le Sud. Ce dernier événement fait exposer des montagnes jeunes à l'érosion et l'altération accompagnées d'une tectonique de réajustement de l'édifice.

Du Pliocène jusqu'à l'actuel s'est développé dans le bassin de Cherf des sous bassins. Ces derniers vont connaître un éventrement vers le début du Quaternaire, ce qui fait naître le réseau hydrographique actuel.

## **VII. Hydrographie**

Dans le bassin de l'oued Cherf, l'oro-hydrographie est assez simple dans son ensemble (Figure 11). Les différents oueds et leurs affluents convergent tous vers l'exutoire où est installée la station hydrométrique Moulin Rochefort. C'est en ces endroits que l'oued Cherf proprement dit a réalisé sa capture par érosion régressive à travers le Tell méridional pour venir récupérer les eaux des hautes plaines autrefois sans écoulement vers la mer. Plusieurs oueds drainent aujourd'hui ces grands espaces.

A l'Est, l'oued Tiffech qui suit l'axe de la plaine synclinale du même nom. Le synclinal qui forme la plaine de Khamissa est traversé par l'oued Crab grossi de l'oued Behezz, de l'oued Ain Sfa et de l'oued Es Souk vers lesquels s'écoulent les eaux provenant du versant Sud de la chaîne Atlasique. L'oued Crab qui se jette dans l'oued Tiffech qui devient l'oued Hamimine en aval, ce dernier et l'oued Crab, se réunissent au Sud –Ouest de Sedrata et donnent l'oued Cherf qui passe au pied du Dj Zouabi, vient en suite l'oued Ain Snob qui

prend sa source dans le chott El Magéne et le Dj Teraguelet aux points les plus éloignés du grand bassin de la Seybouse. L'Oued Settara est formé de l'oued de Ain Babouche et de l'oued El Mebdoua ; ces affluents sont alimentés par les petits cours d'eau qui descendent du Dj Sidi Reghiss au Nord de Oum El Bouaghi et du flanc Est de la chaîne de Chebkat Sellaoua (Figure 11).

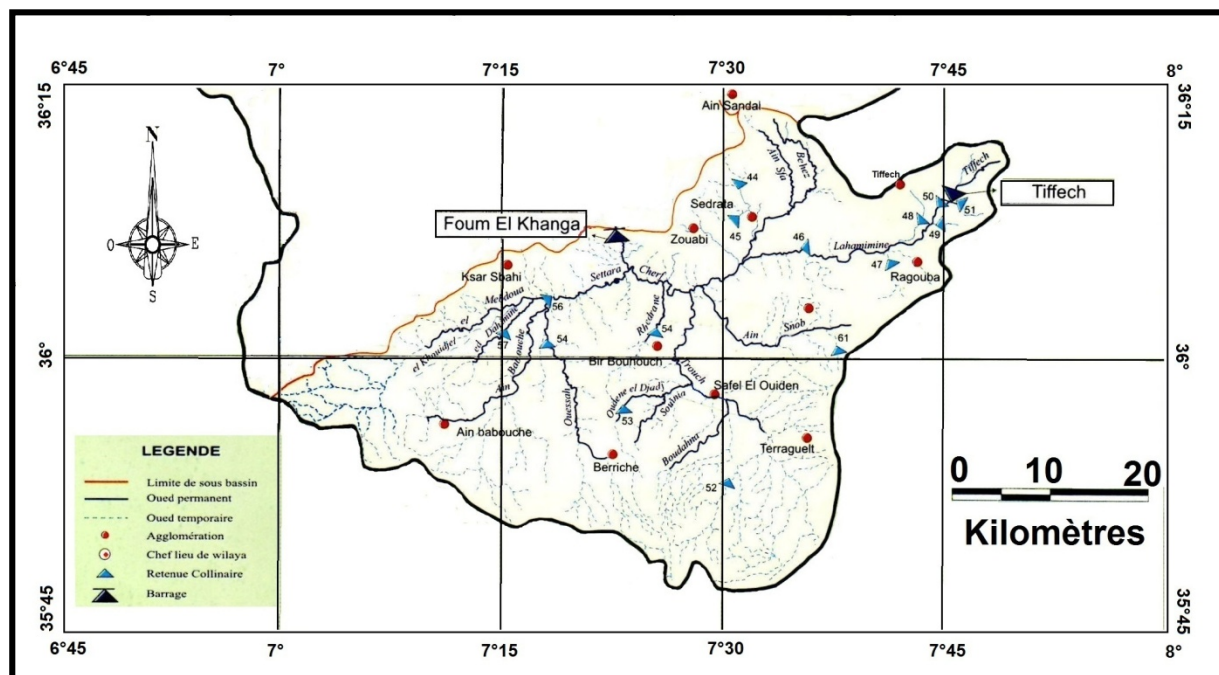


Figure 11 : Réseau hydrographique au bassin versant d'Oued Cherf.

Pour une bonne exploitation de l'eau qui sillonne le bassin versant à travers ce réseau hydrographique, des ouvrages techniques ont été réalisés. Il s'agit d'une quinzaine de retenues collinaires avec une capacité qui dépasse  $7 \text{ Hm}^3/\text{an}$  et deux barrages :

- Barrage de Fom EL Khanga (commune de Zouabi) avec une capacité de  $157 \text{ Hm}^3$  ; son volume régularisé est de  $40 \text{ Hm}^3/\text{an}$ ; dont  $30 \text{ Hm}^3/\text{an}$  destiné à l'irrigation des périmètres agricoles Sedrata/Zouabi et Ksar Sbahi ; le reste est destiné à l'AEP d'Ain Beida.
- Barrage de Tiffech (commune de Tiffech) d'une capacité de l'ordre de  $5,8 \text{ Hm}^3$  avec un volume régularisé de  $2,76 \text{ Hm}^3/\text{an}$  ; destiné à l'irrigation.

## VIII. Hydrogéologie

Le volume d'eau souterraine estimé est de 172 Hm<sup>3</sup> pour une surface de la nappe alluvionnaire de 1053 Km<sup>2(1)</sup>.

Le bassin versant d'Oued Cherf est formé essentiellement d'une suite d'anticlinaux et de synclinaux. Ces derniers sont remplis d'argiles, sables et des formations de cailloutis. Des nappes phréatiques se localisent dans ces formations quaternaires (Gachi ,1986).

Les nappes du bassin versant d'Oued Cherf sont formées essentiellement de dépôts alluvionnaires du quaternaire regroupés en six plaines (Gachi, 1986).

- Plaine de Bir Bouhouche ;
- Plaine d'oued Trough ;
- Plaine d'oued Ain Snob ;
- Plaine d'Ain Babouche ;
- Plaine de Tiffech ;
- Plaine de Sedrata.

Deux types de systèmes aquifères de nature hydrogéologique différente ont été identifiés ; un aquifère de remplissage alluvionnaire à porosité interstitielle, et un aquifère carbonaté profond à porosité fissurée (Gachi ,1986).

Les aquifères de remplissage alluvionnaire à porosité interstitielle sont composés de deux horizons :

- Un horizon superficiel qui s'étend sur la totalité du bassin avec sédimentation très hétérogène composée de graviers de sable et d'argile détritiques. Il se caractérise par une géométrie très variable dont l'épaisseur maximale atteint les 75 m.

---

<sup>(1)</sup> Source : DHW ; Souk Ahras, 2005.

- Un second horizon qui se présente en profondeur en minces couches lenticulaires plus ou moins perméable à faciès particulièrement conglomératique et caillouteux. Il constitue par sa structure discontinue et son extension très limitée, des petits volumes aquifères.

Les aquifères carbonatés profonds à porosité fissurée sont présents par une extension et un développement spatial de la fissuration des calcaires et des calcaires marneux des différents âges. Ils occupent la partie SESW du bassin (région de Teraguelet, Ksar Sbahi, Ain Babouche) et peuvent constituer des stockes importants d'eau souterraine.

L'exploitation des eaux souterraines dans le bassin versant de l'Oued Cherf est donnée par l'implantation des forages et des puits. Vingt deux forages et plus de 200 puits sont répartis sur l'ensemble du bassin d'oued Cherf et mobilisent théoriquement 14,54 Hm<sup>3</sup>/an. Pour les sources, plus de 164 sources avec un débit global de 1,16 Hm<sup>3</sup>/an<sup>(1)</sup>.

## **IX. Couverture végétale**

La connaissance du couvert végétal d'une région nous renseigne sur son aptitude à l'écoulement, et surtout sa vulnérabilité à l'érosion qui est un facteur décisif de la durée de vie des retenues et réservoirs.

La végétation est le résultat des facteurs : climat, relief, lithologie où s'ajoute le facteur humain (défrichement, reboisement). Elle est un facteur de restriction si elle est bien maintenue. La couverture végétale protège le sol contre l'érosion, améliore la capacité d'infiltration des eaux dans le sol, diminue le ruissellement superficiel et apporte au sol des matières organiques (feuilles, branches,....etc.).

La végétation dans le bassin de l'oued Cherf reste étroitement liée à la pluviométrie, et quand cette dernière est inférieure à 500 mm/an, la végétation est peu dense, la steppe d'Alfa domine. Seuls Dj Reghiss et Dj Tiffech sont recouverts de vastes forêts de type Atlasique constituées surtout de pins d'Alep et de genévriers rouges, ils sont en expansion par les reboisements récents en pin d'Alep mais aussi en cyprès et en Eucalyptus.

---

<sup>(1)</sup> Source : DHW ; Souk Ahras et Oum Bouaghi 2005.

Pour le domaine agricole, il comporte tous les terrains à vocation agricole cultivées ou laissés en jachère, les terrains agricoles occupent plus de 65 % de la totalité du bassin versant, pour les cultures pratiquées on peut citer : céréale ; cultures maraîchères ...etc. Malgré les conditions pédologiques très favorables pour mettre en place une culture intensive, le secteur agricole est caractérisé par un embouteillage dont les causes sont d'ordre multiple. Parmi ces causes, on note les conditions climatiques qui ont une tendance vers l'aridité.

L'érosion est intense pendant l'hiver à cause de l'absence de couverture végétal et de la nature du sol, la pente topographique change en moyenne de 2% sur les hautes plaines à 14% sur les montagnes.

## **X. Les fonctions socio-économiques dans le bassin d'oued Cherf**

### **X.1 La population**

Le bassin d'oued Cherf s'étend sur une superficie de 1739 Km<sup>2</sup> avec une population de l'ordre de 193676 d'habitants, répartie sur deux wilayas et sept daïras, suivant les recensements 2006 avec un taux d'accroissement de 1,94% et une densité moyenne de l'ordre de 111 hab/Km<sup>2</sup>. Les répartitions de la population du bassin versant d'oued Cherf selon le sexe sont presque à égalité entre les sexes masculin et féminin.

### **X.2 Le pôle industriel**

Depuis 1970 ; le nombre des unités industrielles a augmenté en raison de l'accroissement démographique ainsi que le niveau de vie des populations. Le bassin versant de l'oued Cherf est à vocation agricole, leur tissu industriel est moins dense, deux usines sont implantées dans la zone de Sedrata. L'une de fabrication des cahiers (CAP Mansouri), et l'autre celui de fabrication des serrures (ENAS) avec quelques unités industrielles de type agro-alimentaire qui sont implantées à la périphérie des zones agricoles (Bir Bouhouche, Ksar Sbahi ...etc.).

### **X.3 Le pôle agricole**

Le potentiel en sol du bassin versant d’oued Cherf présente des formations qui ont donné naissance à des sols aptes aux cultures céréalières et fourragères, cultures industrielles et maraîchères et certaines espèces arboricoles<sup>(1)</sup>.

Le bassin d’oued Cherf est constitué de trois périmètres irrigués : Sedrata-Zouabi (4052 ha.), Ksar Sbahi (2955 ha) et le périmètre d’Ain Babouche (1880 ha).

## **XI. Conclusion**

Le bassin versant de l’Oued Cherf se situe au nord est de l’Algérie et occupe une position exutoire du grand bassin versant du Seybousse. Sa géologie est constituée par des roches sédimentaires d’âge allant du Trias au Quaternaire plissées en anticlinaux et en synclinaux qui se répartissent en deux grands ensembles structuraux :

- Un ensemble de formations para-autochtone ou autochtone d’âge Crétacé et Miocène.
- Un ensemble allochtone écaillé à faciès de type Sellaoua, qui chevauche l’ensemble précédent, constitué de formations géologiques d’âge Trias, Crétacé et Miocène

Ces deux ensembles sont recouverts par le domaine des nappes (nappes telliennes et nappes de flyschs) et enfin par des formations peu ou pas tectonisées d’âge Mio-pliocène et Quaternaire

---

<sup>(1)</sup> Source : DSA. Souk Ahras, Oum Bouaghi ; 2003.

CHAPITRE 3  
HYDROCLIMATOLOGIE

## **CHAPITRE 3 : HYDROCLIMATOLOGIE**

### **I. Introduction**

L'étude hydroclimatologique a pour objet de faire ressortir les caractéristiques climatiques d'une région en traitant des données mesurées à une ou plusieurs stations pour une période donnée. Le bassin versant d'Oued Cherf a fait l'objet de ce genre d'étude par plusieurs auteurs (Athmania, 2002; Mebarki, 2005; Halimi, 2008; Louamri, 2013).

Dans ce chapitre, Nous allons exploiter les données de pluviométrie enregistrées quotidiennement par les techniciens au niveau du barrage de Oued Cherf. Ces données s'étalent sur la période allant de 2000 à 2017. Nous allons aussi traiter les données d'hydroclimatologie recueillies par l'A.N.R.H à la station de Sedrata sur une période de 21 cycles hydrologiques du 1984/1985 à 2004/2005.

Le climat joue un rôle capital dans le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. La connaissance des facteurs climatiques s'avère indispensable pour l'étude de l'interaction eau-sol.

### **II. Les précipitations**

La carte des précipitations médianes du Nord Algérien pour la période (1965-95) établit par l'A.N.R.H montre que les précipitations sur le bassin versant d'Oued Cherf oscillent entre 300 et 500 mm (Figure 12).

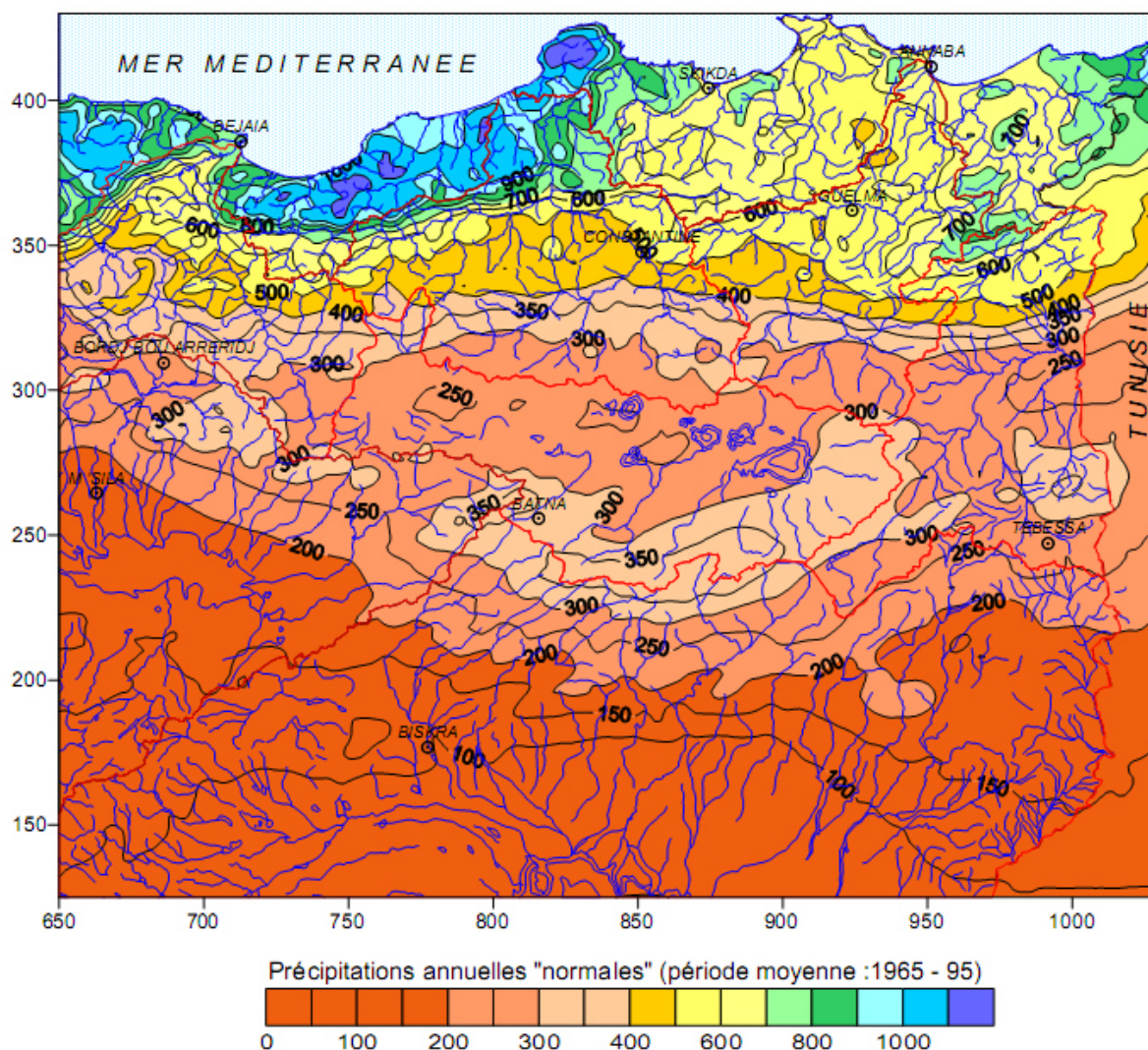
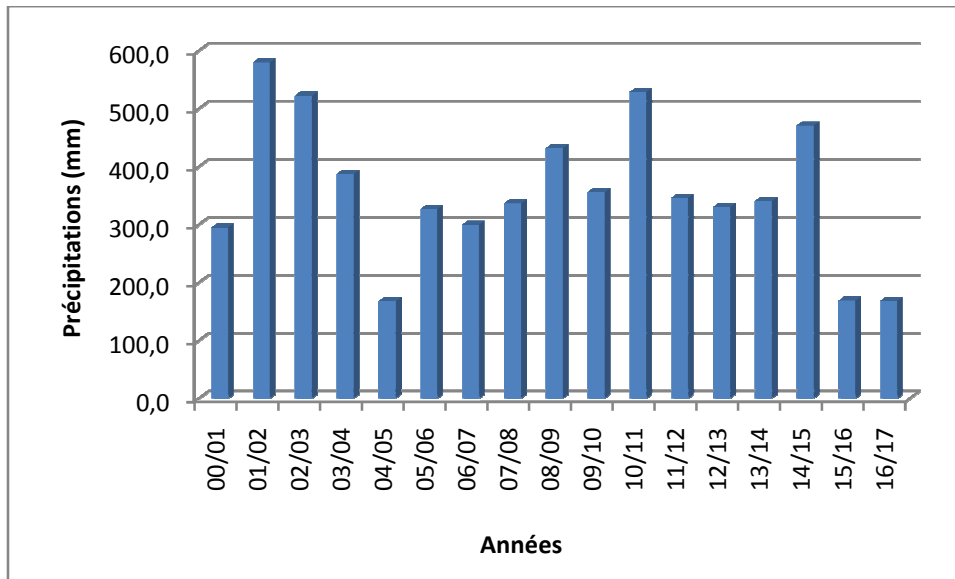


Figure 12 : Précipitations annuelles moyenne dans le Nord-Est de l’Algérie durant la période 1965/1995 (A.N.R.H, 2003) In Mebarki 2009.

L’étude des données pluviométriques recueillies au niveau du barrage d’Oued Cherf qui s’étalent sur 17 cycles hydrologiques allant de 2000/2001 au 2016/2017 ont permis de définir le régime pluviométrique du secteur du barrage. La pluviométrie annuelle moyenne, durant cette période, est de l’ordre de 356 mm et montre une irrégularité importante d’une année à une autre avec une quantité minimale de 167,8 mm en 2004/2005 et en 2016/2017 et une quantité maximale 579,6 mm en 2001/2002 (Figure 13).

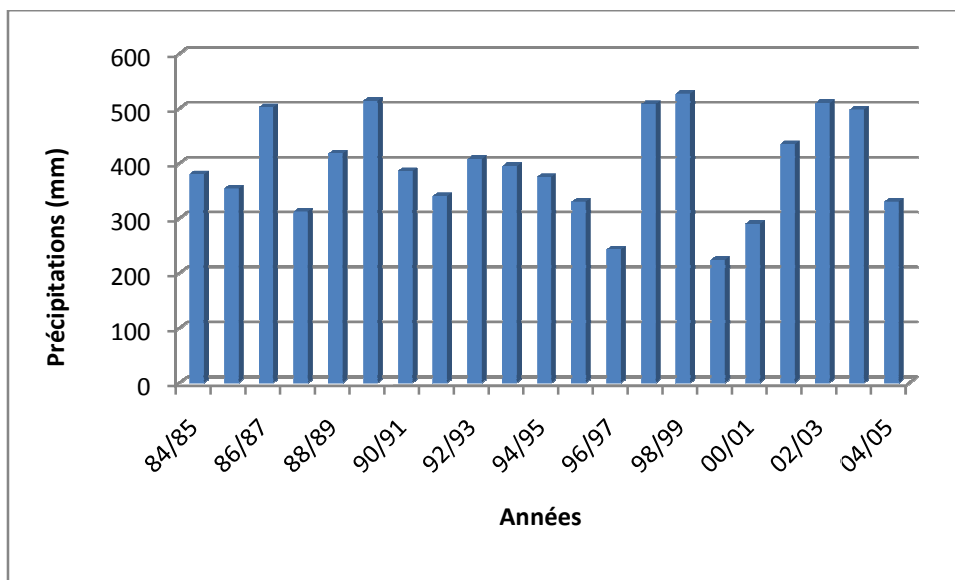
Tableau 3 : Moyennes des précipitations annuelles enregistrées au secteur du barrage de Foug el Khanga sur l’Oued Cherf de 2000/2001 au 2016/2017.

Années	00/01	01/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17	Moy
pluv. (mm)	94,9	79,6	22,2	87,3	67,8	26,4	99,5	36,2	31,6	55,8	28,4	45,7	30,1	40,2	70,7	68,7	67,8	56,1



**Figure 13 : Variation des précipitations annuelles au secteur du barrage d'Oued Cherf sur une période de 17 cycles hydrologiques (2000/2001 – 2016/2017).**

L'historique de variation des précipitations annuelles établi lors de traitement des données pluviométriques de la station de Sedrata enregistrées sur 21 cycles hydrologiques du 1984/1985 à 2004/2005, montre une pluviométrie annuelle moyenne de 394 mm. L'année la plus arrosée est celle de 1998/1999 avec 524 mm et la plus sèche est celle de 1999/2000 avec 224 mm seulement (Figure 14).



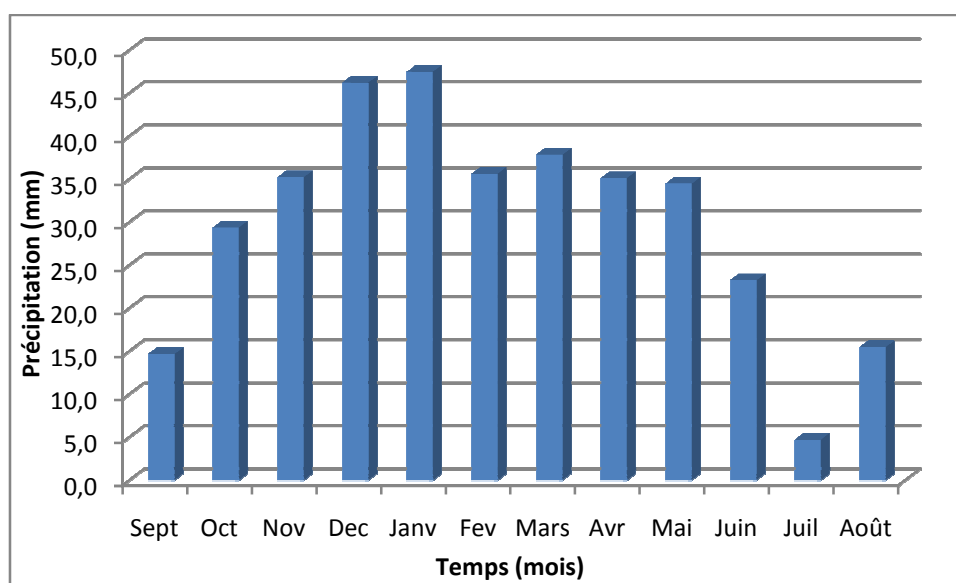
**Figure 14 : Variation des précipitations annuelles à la station de Sedrata sur une période de 21 cycles hydrologiques.**

La pluviométrie mensuelle moyenne au niveau du secteur du barrage enregistrée durant la période 2000/2001 à 2016/2017 est de 30 mm avec une quantité de précipitation

maximale durant les mois de décembre et janvier de l'ordre de 46,2 mm et 47,5 mm respectivement par contre le mois le plus sec est celui de juillet avec une quantité de 4,5 mm seulement (Figure 15).

**Tableau 4 : Moyennes des précipitations mensuelles enregistrées au secteur du barrage de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf de 2000/2001 au 2016/2017.**

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
P (mm)	14,7	29,4	35,2	46,2	47,5	35,7	37,9	35,1	34,5	23,3	4,7	15,5



**Figure 15 : Variation des précipitations mensuelles au niveau du secteur du barrage d'Oued Cherf sur une période de 17 cycles hydrologiques (2000/2001 – 2016/2017).**

L'établissement de l'histogramme représentant la variation des précipitations mensuelles moyennes à la station de Sedrata sur la période 1984/1985 – 2004/2005 nous a permis de constater le régime régulier de la pluviométrie du bassin versant. Les mois le plus pluvieux sont ceux de décembre et janvier avec une quantité moyenne de l'ordre de 60 mm, cependant le mois le plus sec est le mois d'août avec une valeur de 7mm seulement (Figure 16).

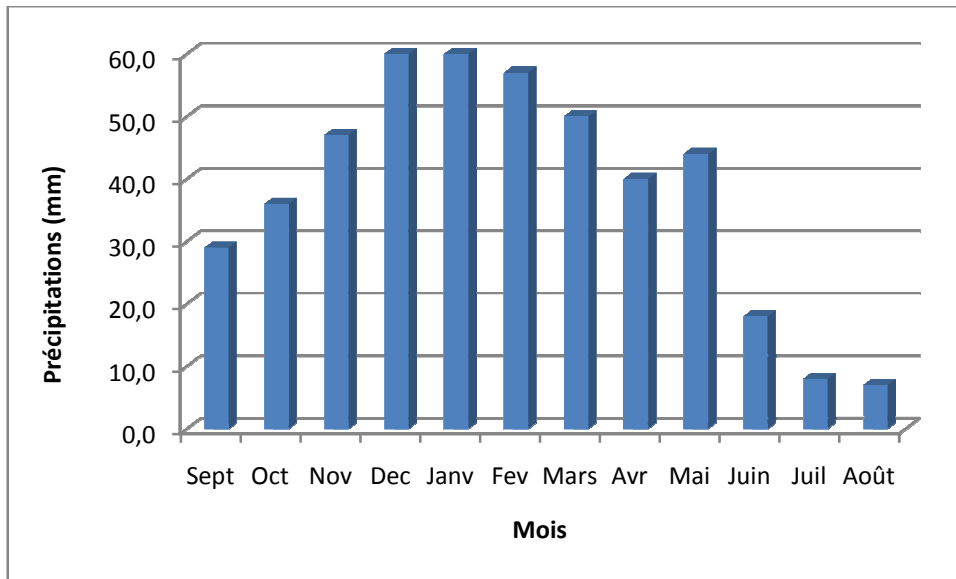


Figure 16 : Variation des précipitations mensuelles à la station de Sedrata sur une période de 21 cycles hydrologiques.

### III. Les températures

La température est l'un des facteurs qui conditionnent le climat d'une région. La carte des températures de l'Est algérien (Figure 17) montre que le bassin versant de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf est caractérisé par des températures annuelles moyennes qui varient de 14°C à 15°C.

Les mesures enregistrées au niveau de la station thermique de Sedrata sur la même période d'observation montrent une variation de température interannuelle faible avec une moyenne de 15,9°C avec une valeur minimale enregistrée de 13,8 durant l'année 1991/1992 et une valeur maximale de 24.9 durant l'année 2004/2005 (Figure 18).

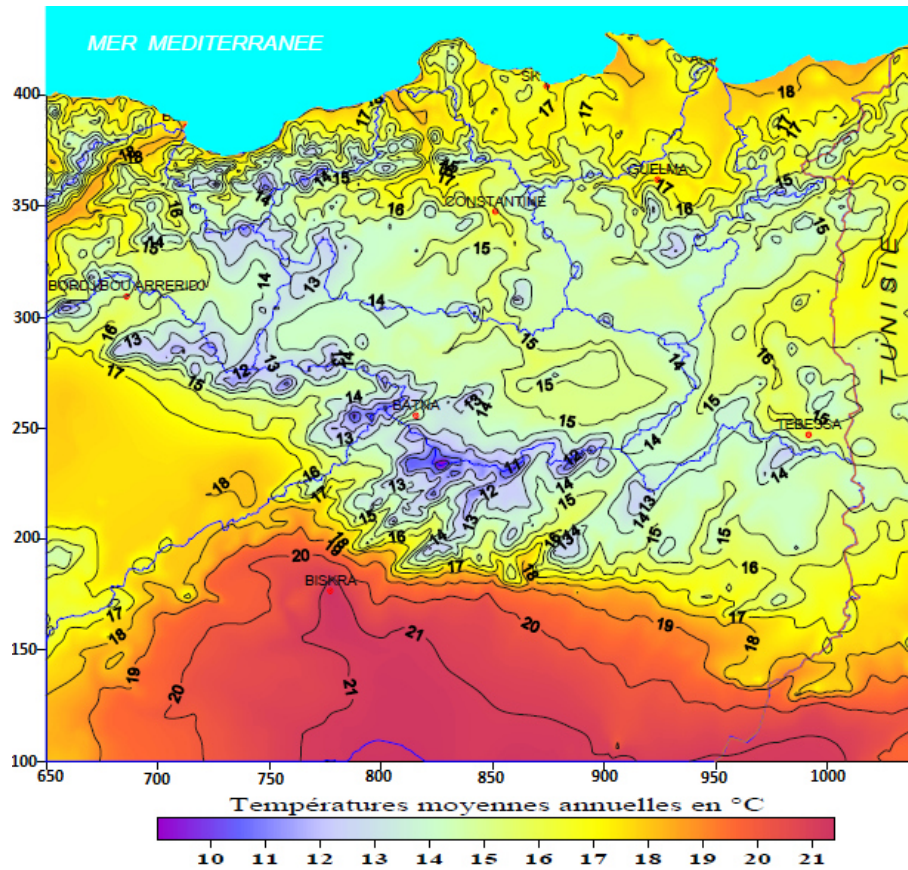


Figure 17 : Températures moyennes annuelles dans le Nord-Est de l’Algérie (Mebarki, 2005).

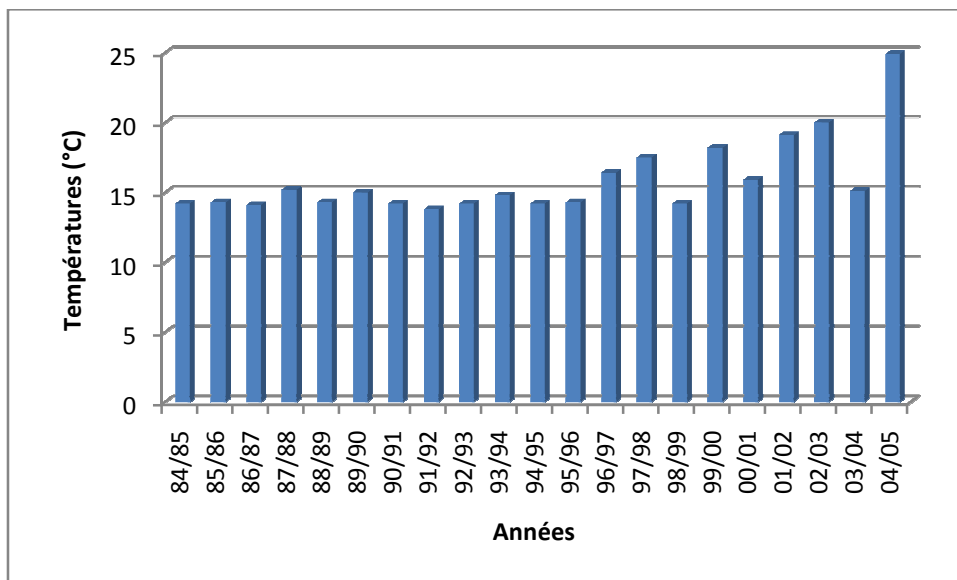
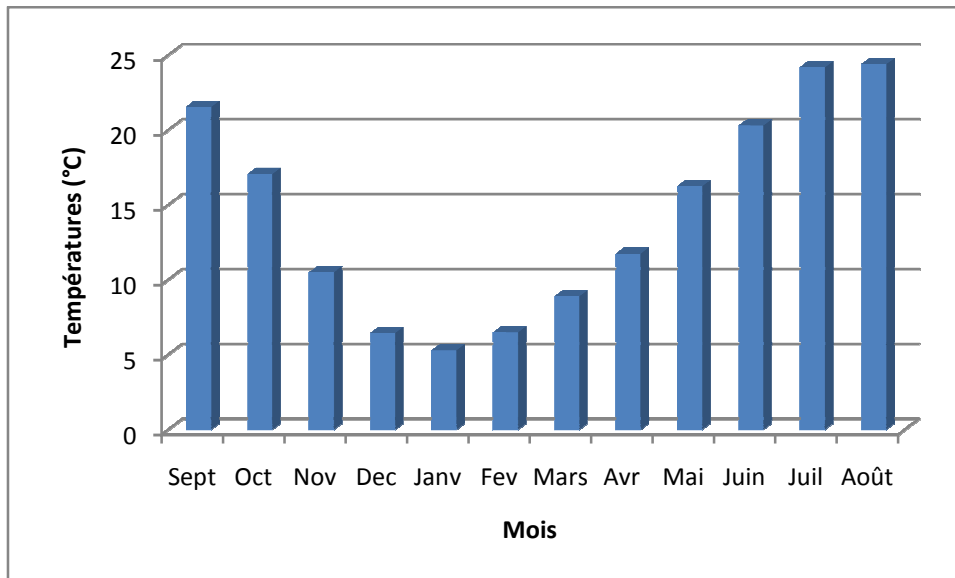


Figure 18 : Variation des températures annuelles à la station de Sadrata sur une période de 21 cycles hydrologiques.

L'établissement de l'histogramme représentant la variation des températures mensuelles moyennes à la station de Sadrata sur la période 1984/1985 – 2004/2005 nous a permis de constater qu'à l'échelle mensuelle l'hiver est caractérisé par un climat froid et

rigoureux avec une température minimale moyenne qui tourne autour de 5°C pendant le mois de janvier et un été chaud et sec avec une température moyenne maximale de l'ordre de 24,2 et 24,4 pendant les mois de juillet et août respectivement (Figure 19).



**Figure 19 : Variation des températures mensuelles à la station thermique de Sadrata sur une période de 21 cycles hydrologiques.**

## **IV.Coefficient pluviométrique**

Le coefficient pluviométrique noté  $C_p$  permet de déterminer les années excédentaires et les années déficitaires, il est donné par la formule :

$$C_p = P / P_{\text{moy}}$$

Où :

$P$  : précipitation de l'année considérée,

$P_{\text{moy}}$  : précipitation moyenne pour la période d'observation.

L'établissement des courbes de variation du coefficient pluviométrique montrent l'abondance des années pluviométriques déficitaires par rapport aux années excédentaires aussi bien pour les données pluviométrique du secteur du barrage de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf ou celles enregistrées à la station de Sadrata. On enregistre 11 années hydrologiques déficitaires en matière de pluviométrie contre 6 seulement excédentaires au

niveau du secteur du barrage (Figure 20). La même constatation est valable à la station pluviométrique de Sedrata (Figure 21).

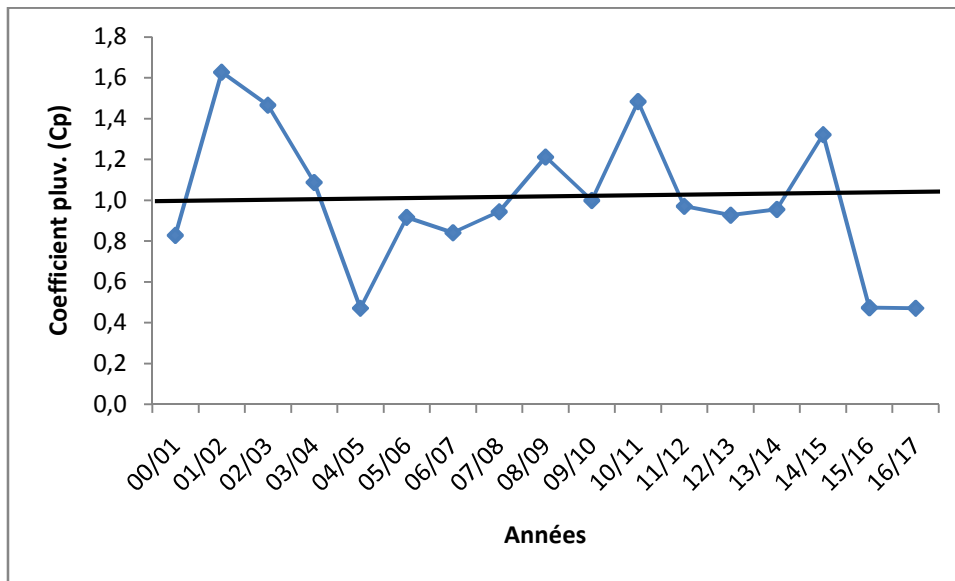


Figure 20 : Courbe du coefficient pluviométrique au niveau du secteur du barrage d'Oued Cherf sur une période de 17 cycles hydrologiques (2000/2001 – 2016/2017).

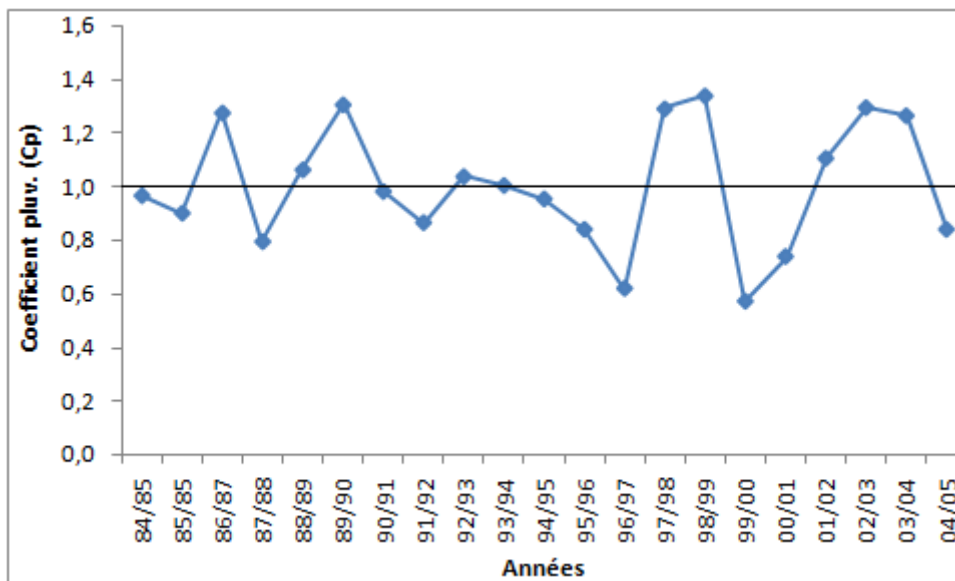


Figure 21 : Courbe du coefficient pluviométrique à la station de Sedrata 1984/1985 à 2004/2005.

## V. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN

Le diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN est un diagramme obtenu par combinaison des données moyennes mensuelles de précipitations à celles des températures enregistrées sur une période d'observation donnée. Ce diagramme est toujours construit sur

le modèle d'échelle 1°C de température égal à 2 mm de précipitations. Il permet de faire ressortir les saisons sèches et les saisons humides.

Ce diagramme montre que la saison humide commence dès la fin du mois d'octobre et se poursuit jusqu'à la fin du mois de mai où commence la saison sèche qui dure à son tour les six mois qui restent ce qui confirme le caractère semi-aride du climat qui règne au bassin versant d'Oued Cherf (Figure 22).

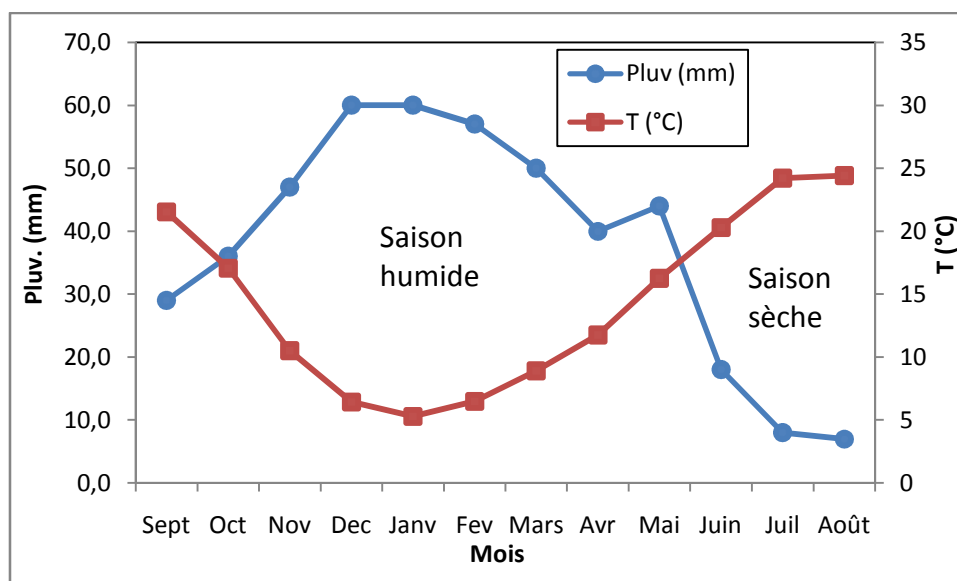


Figure 22 : Diagramme ombro-thermique de GAUSSEN à la station de Sedrata 1984/1985 à 2004/2005.

## VI. Indice d'aridité de DE MARTONNE

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une faiblesse des précipitations annuelles et un fort déficit de celles-ci par rapport à l'évapotranspiration potentielle (ETP). Etant un concept climatique à référence spatiale, l'aridité est différente de la sécheresse, qui est un concept météorologique à référence temporelle. Donc, une région peut être qualifiée d'aride et non une période.

L'indice d'aridité de De Martonne est un élément important dans l'identification du climat. Il est lié à deux facteurs climatiques, à savoir les précipitations moyennes annuelles (P) et les températures moyennes annuelles (T) calculées sur une période d'observation donnée. Cet indice noté (I), permet de déterminer le degré d'aridité d'une région et de

caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. Pour le calculer, on utilise la formule :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Le nombre 10 est une constante utilisée pour éviter les valeurs négatives lorsque la température moyenne de l'air est inférieure à 0°C.

Selon la valeur que peut prendre cet indice, on peut caractériser le type de climat qui règne dans la région d'étude.

**Tableau 5 : Classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DE MARTONNE.**

Indice de DE MARTONNE	Type de climat
0 < I < 5	Hyper-aride
5 < I < 10	Aride
10 < I < 20	Semi-aride
20 < I < 30	Tempéré
30 < I < 55	Humide

Le calcul de l'indice de DE MARTONNE par l'exploitation des données de la station de Sedrata, nous a permis de dresser un histogramme illustratif (Figure 23) montrant l'évolution de sa valeur sur une durée d'observation de 21 cycles hydrographiques allant de 1984/1985 à 2004/2005 avec une valeur minimale de 7,9 durant l'année 1999/2000 et une valeur maximale de 21,8 durant l'année 1998/1999 et avec une valeur moyenne de 15,2. Cette dernière valeur (15,2) révèle clairement que le climat caractérisant la région d'étude est de type semi-aride.

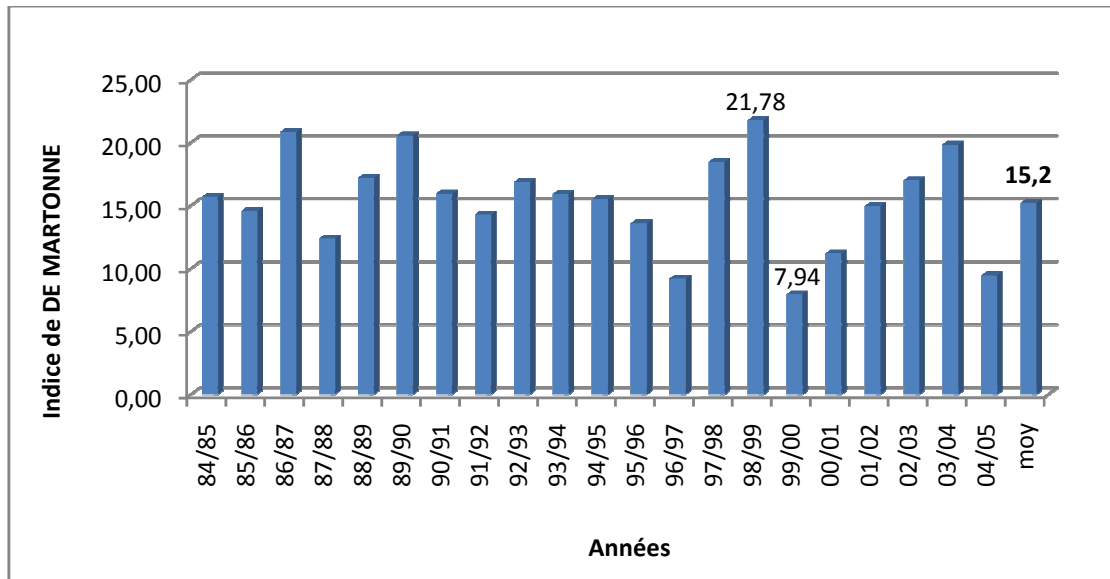


Figure 23 : Variation de l'Indice de DE MARTONNE à la station de Sedrata sur une période de 21 cycles hydrologiques.

## VII. Evaporation

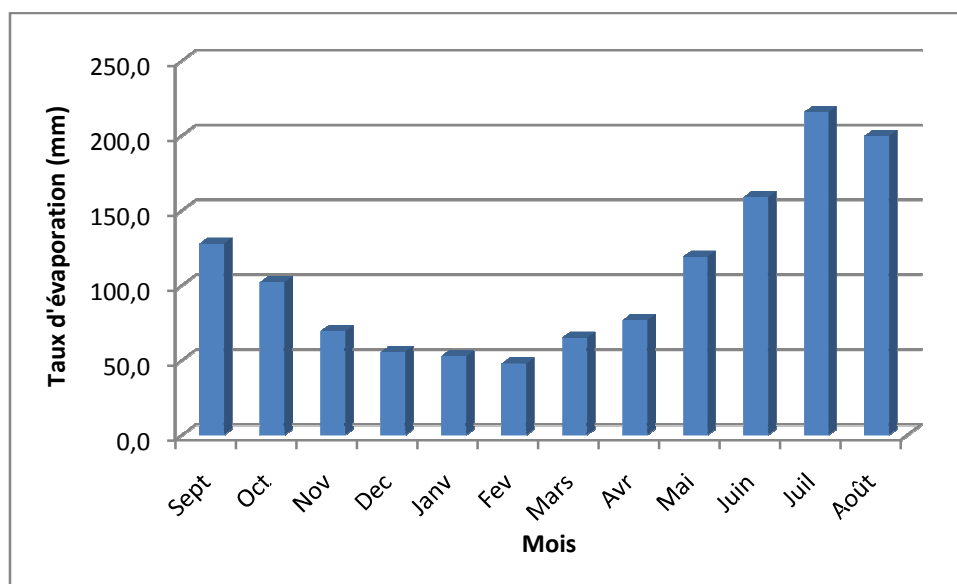
L'évaporation est un phénomène surfacique où les molécules d'eau à la surface passent progressivement de l'état liquide à l'état gazeux. Le phénomène d'évaporation intervient dans le cycle de l'eau au moment où les précipitations atteignent la surface du sol. La vitesse d'évaporation est fonction de la température de l'air, de la durée d'insolation et de la vitesse du vent (Emsalem, 1970; Remenieras, 1986; Mamou, 1990; Godard and Tabeaud, 1993).

Nous avons utilisé les données de l'évaporation journalières enregistrées par les techniciens à l'aide du bac de Colorado (Figure : 24) installé à proximité de la retenue du barrage de Foug El Khanga sur l'Oued Cherf sur une période 17 cycles hydrologiques allant de 2000/2001 à 2016/2017.



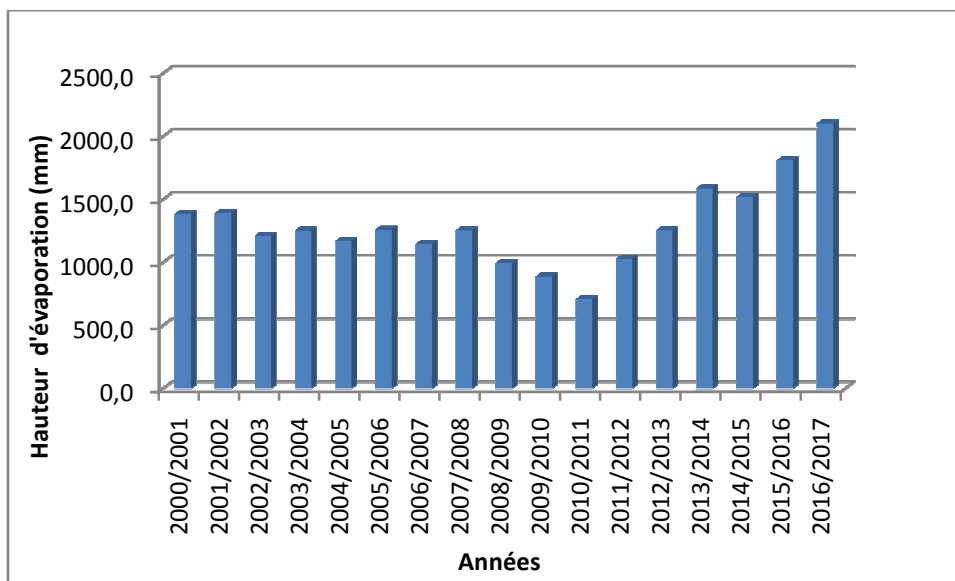
**Figure 24 : Photographie d'un Bac de Colorado installé à proximité de la retenue du barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf.**

L'établissement de l'histogramme d'évaporation réelle mensuelle moyenne nous a permis d'observer l'évolution de l'évaporation à pas du temps mensuel. Le maximum est enregistré pendant le mois de juillet avec une moyenne de 215,6 mm et le minimum au mois de février avec un taux d'évaporation de 47,9 mm (Figure : 25).



**Figure 25 : Evaporation réelle mensuelle moyenne près du barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf sur la même période d'observation 2000/2001 – 2016/2017.**

L'histogramme de l'évolution de la variation de l'évaporation annuelle près du barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf sur la même période d'observation 2000/2001 – 2016/2017 montre l'ampleur de l'évaporation dans les régions à climat semi-aride (Figure : 26) avec une hauteur maximale de la lame d'eau évaporée 2 100,4 durant l'année 2016/2017 et un minimum de 708,2 durant l'année 2010/2011.



**Figure 26 : Evaporation totale annuelle près du barrage de Fom El Khanga sur l'Oued Cherf sur la période d'observation 2000/2001 – 2016/2017.**

## VIII. Conclusion

Le climat caractérisant le BV d'Oued Cherf est de type semi-aride avec une pluviométrie annuelle moyenne de 356 mm qui montre une irrégularité importante d'une année à une autre avec une quantité minimale de 167,8 mm et une quantité maximale 579,6 mm. Les mois le plus pluvieux sont ceux de décembre et janvier avec une quantité moyenne de l'ordre de 60 mm, cependant le mois le plus sec est le mois d'août avec une valeur de 7mm seulement. Le bassin versant de Fom el Khanga sur l'Oued Cherf est caractérisé par des températures annuelles moyennes qui varient de 14°C à 15°C, alors qu'à l'échelle mensuelle l'hiver est caractérisé par un climat froid et rigoureux avec une température moyenne de 5°C pendant le mois de janvier et un été chaud et sec avec une température moyenne de 24,4 pendant le mois d'août. L'évaporation réelle mensuelle moyenne atteint son maximum au mois de juillet avec une moyenne de 215,6 mm et son minimum au mois de février avec un taux d'évaporation de 47,9 mm.

CHAPITRE 4

MATERIELS ET METHODES

## **CHAPITRE 4 : MATERIELS ET METHODES**

### **I. Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons parler de la méthodologie que nous avons utilisée sur terrain pendant le prélèvement des échantillons d'eau, de sols et de roches ainsi que des techniques analytiques et le matériel utilisé aux laboratoires depuis la préparation des échantillons jusqu'à l'obtention des résultats analytiques.

### **II. Méthodologie d'échantillonnage**

Les points d'échantillonnage présentés sont ceux où ont été récoltés un échantillon d'eau et de sédiment associé ou de roche.

Les échantillons d'eau ont été prélevés deux fois, une première fois pendant la période des hautes eaux, correspondant à la fin du printemps 2006 (mai), et une seconde fois dans la période des basses eaux, pendant la première semaine de novembre 2006. Un prélèvement mensuel d'eau au niveau de la digue a été fait de juin 2008 à mai 2009 pour vérifier la variation de la chimie de l'eau du barrage au cours d'une année.

Les flacons de prélèvement d'eau sont en polypropylène (pp). Ils ont été nettoyés à l'acide chlorhydrique (HCl) puis rincés trois fois à l'eau distillée, et encore rincés sur le terrain avec un peu d'eau de l'échantillon avant de les remplir.

La quantité nécessaire pour l'analyse des anions et de l'alcalinité est prélevée sans acidification. Ensuite les échantillons d'eau destinés au dosage des cations et des éléments en traces sont collectés et acidifiés à l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) bidistillé 12N à pH2. L'acidification permet :

- la non-prolifération des bactéries,
- d'éviter l'adsorption de certains éléments comme les métaux sur les parois des récipients,
- d'éviter la précipitation de certains éléments comme par exemple le calcium sous forme de calcite.

Les échantillons une fois prélevés sont conservés dans une glacière, et dans un délai maximal de 12 heures placés dans l'obscurité en frigo à une température avoisinant les 5°C. Filtration, acidification, obscurité, température de 5°C évitent aux eaux d'évoluer, ainsi les analyses peuvent être réalisées quelques mois après la campagne. Plusieurs paramètres ont été mesurés in situ pratiquement en tous les points prélevés. Cela concerne : la température, le pH et la conductivité. Les échantillons d'eau sont filtrés à travers des filtres Millipore Nitrocellulose 45µm avant d'être analysés.

Les flacons de prélèvement, des solutions obtenues après digestion acide des sédiments et des solutions artificielles obtenues lors des manip réacteurs fermés destinées à l'analyse des éléments en traces par l'ICP-MS, sont des piluliers en polypropylène (pp) de 30 ml. Ils ont été nettoyés selon les consignes internes des techniciens encadrant les utilisateurs de la salle blanche<sup>(1)</sup> (Figure 27) : remplir aux 2/3 chaque pilulier avec HCl ~1N ; fermer soigneusement chaque pilulier et laisser agir au minimum 1/2 journée posés sur le bouchon ; retourner les piluliers et laisser au minimum 1/2 journée ; puis rincés au moins trois fois à l'eau MilliQ ; mettre à sécher à l'étuve à 45°C, piluliers et bouchons en position renversée et légèrement entre ouvert pendant 2 à 3 heures.

Les sédiments ont toujours été prélevés sur les mêmes points d'échantillonnage que ceux utilisés pour le prélèvement d'eaux. Pour la récolte des échantillons de sédiments, des gants stérilisés ont été systématiquement utilisés. Les sédiments échantillonnés ont été placés dans des sachets plastiques, puis séchés à l'air libre dans une salle fermée.

Les roches échantillonnées concernent les affleurements géologiques principaux du bassin versant étudié.

La position géographique des points d'échantillonnage a été déterminée à l'aide de la cartographie géographique et géologique existante.

---

<sup>(1)</sup> Une salle blanche est une salle où l'atmosphère est contrôlée : de l'air filtré à 99,99% y est continuellement soufflé à l'intérieur afin de garantir une atmosphère dépoussiérée et en surpression par rapport à l'extérieur.



**Figure 27 : Photographie de la salle blanche au laboratoire GET Université Paul Sabatier de Toulouse.**

La calligraphie des points d'échantillonnage se termine par une lettre indiquant le type d'échantillon (E : eau, S : sédiment, R : roche). Chaque échantillon porte deux numéros, le premier indique le numéro de la campagne et le second indique son numéro d'ordre.

## **III. Méthodologie d'analyse**

### **III.1 Les solutions**

Trois types de solutions ont fait l'objet d'analyses chimiques :

- Solutions naturelles représentant les échantillons d'eau prélevés au terrain.
- Solutions artificielles obtenues au laboratoire par attaques acides des sédiments.
- Solutions artificielles obtenues lors des manips de réactivité eau-sédiments.

Les équipements et les techniques d'analyse utilisés sont décrits ci-dessous :

### **III.1.1 Spectroscopie d'absorption atomique**

Les concentrations en cations majeurs  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ont été mesurées respectivement par spectrométrie absorption/émission atomique avec un appareil *Perkin-Elmer AAnalyst400* avec une marge d'erreur de 1% et une limite de détection de l'ordre de  $6.10^{-7}$ . Le principe de cet appareil est le suivant :

En absorption, on crée un faisceau de référence à l'aide d'une lampe émettant le spectre de l'élément à doser ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ...) et d'un monochromateur qui sélectionne la raie spectrale la plus intense. Ce faisceau traverse une flamme portée à  $2500^{\circ}\text{C}$  et générée par la combustion d'un mélange air/acétylène dans laquelle l'échantillon à doser est nébulisé. La différence de densité optique entre l'amont et l'aval de la flamme est proportionnelle à la concentration de l'élément dans la solution. Un photomulticateur mesure cette absorbance. Le signal de sortie est analysé par traitement informatique.

En émission, on mesure la densité optique (DO) du spectre émis par l'échantillon directement nébulisé dans la flamme sans éclairer celle ci par un faisceau référence. Cette DO, mesurée par ce même photomultiplicateur, est proportionnelle à la concentration de l'élément dans l'échantillon ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ...). Le sodium et le potassium sont mesurés par émission car ils sont plus facilement ionisables que le calcium et le magnésium (un seul électron sur la couche de valence).

En tenant compte de la grande variété des eaux étudiées et des limites de fonctionnement de l'appareil (limites de détection et de saturation, sensibilité optimale, linéarité des courbes d'étalonnage), nous avons travaillé, la majorité du temps, avec des étalons dont les concentrations en ppm étaient comprises entre 0,1 et 0,6 pour le magnésium, 0,5 et 5 pour le calcium, le potassium et le sodium. Pour se ramener à ces gammes de concentrations, toutes les eaux ont été diluées d'un facteur allant de 100 à 300 selon leurs richesses. Concernant le sodium seuls les eaux beaucoup plus chargées de certaines sources et cours d'eau (Oued Mellah Kebira, Oued Mellah Seghira et Source de Bir Echeb ...) ont été dilués d'un facteur 3000. La séquence d'analyse se déroule de la façon suivante : Blanc/Etalon1/Etalon2/Etalon3/Etalon4/7échantillons/Blanc/Etalon international. Le premier blanc de cette séquence sert à régler la ligne de base du signal de sortie, c'est à dire à mesurer le bruit de fond de la machine, il faut qu'il soit le plus stable possible. Les

étalons sont des solutions multiélémentaires ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) préparées à partir des solutions monoélémentaires de chaque élément et d'eau de  $\text{HNO}_3$  à pH2. Avant le dosage de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , on rajoute une quantité d'oxydes de lanthane, égale à 30  $\mu\text{L}$  par 10 mL d'échantillon ceci permet de palier aux interférences spectrales entre le magnésium et le calcium.

### **III.1.2 Chromatographie ionique**

Les concentrations en anions majeurs  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ont été mesurées par chromatographie ionique (H.P.L.C High Performance Liquid Chromatography) en utilisant un appareil Dionex ICS2000 avec une marge d'erreur de 8%. La limite de détection ne paraît pas être un paramètre important du moment que les résultats sont de l'ordre des ppm au ppb et recouvrent largement les concentrations à mesurer.

Le principe de fonctionnement de l'appareil est basé sur la séparation des ions au travers d'une colonne chargée soit positivement, dans le cas d'une colonne de séparation des anions, soit négativement dans le cas d'une colonne de séparation de cations. Les ions à doser sont séparés sur la colonne. Chaque ion a un temps de rétention dans la colonne qui lui est caractéristique.

Le dispositif utilisé, une colonne anionique qui sépare les anions, permet de séparer les constituants d'un mélange en utilisant les différences entre les constantes d'équilibre de ces composés, lors de leur partage entre une phase mobile (éluant) et une phase stationnaire (résine échangeuse d'ions) qui exerce un effet retardateur. Sous l'influence des deux effets antagonistes, effet d'entraînement exercé par la phase mobile et effet de rétention exercé par la phase stationnaire, les constituants du mélange se déplacent à des vitesses différentes et sont séparés selon leur affinité pour les phases mobiles et stationnaires. Etant ionisées, les espèces à doser peuvent être détectées à leur sortie de la colonne chromatographique (contenant la résine échangeuse d'ions) par conductimétrie.

La procédure d'analyse comprend les étapes suivantes :

- injection de l'échantillon dans le flux d'éluant
- séparation des ions sur la résine échangeuse d'ions
- détection des anions par conductimétrie

- identification d'après le temps de rétention
  - quantification au moyen d'une courbe d'étalonnage par mesure de l'aire des pics.
- L'analyse se fait en utilisant la détection par conductimétrie. Cet appareil comprend:
- un passeur d'échantillon,
  - une pompe qui permet la sélection et la circulation de l'éluant à un débit régulé,
  - une cellule de détection CDM-3, P/N 50 776 qui mesure en continu la conductivité et la température de la phase mobile,
  - un supprimeur (SRS) qui neutralise la conductivité de l'éluant et accroît la conductivité des espèces à analyser,
  - une vanne d'injection qui permet de charger l'échantillon dans la boucle et de l'injecter dans la colonne d'analyse,
  - un système qui assure le chargement de l'échantillon dans une boucle de 250  $\mu\text{L}$  et l'injection dans la phase liquide,
  - une colonne de séparation AS18 de 4 mm de diamètre et une précolonne de garde AG9-SC de même diamètre,
  - un système informatique qui pilote les fonctions des différents modules et traite les chromatogrammes (intensité des pics en fonction du temps de rétention dans la colonne).

L'éluant utilisé est de l'hydroxyde de potassium (KOH) dont la concentration est de  $3.10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$  et le débit est fixé à  $1 \text{ mL.min}^{-1}$ . Dans ces conditions, les temps de rétention des espèces anioniques sont donnés dans le tableau 6.

**Tableau 6 : Temps de rétention des espèces anioniques analysées par chromatographie ionique.**

Espèce	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
Temps de rétention (mn)	4,3	5,3	6,8

Une cellule de conductivité en métal inoxydable détecte les éléments dans leur ordre de passage. Son principe de fonctionnement est basé sur la propriété suivante : plus une solution est riche en ions, plus elle sera conductrice et plus sa résistance équivalente est faible. Ainsi, la concentration  $C$  est inversement proportionnelle à la résistance  $R$  de la solution et proportionnelle à la conductance  $G=1/R$  (en Siemens). La solution dont la résistance varie selon sa richesse en ions, passe dans la cellule de conductivité et fait donc varier la résistance totale (cellule + solution) de cette dernière. La concentration s'exprime alors à l'aide de la formule suivante  $C=k \times G$  où  $k$  est la constante spécifique de la cellule de détection. Le signal de conductance se présente sous forme de pic dont la surface (ou la hauteur) est proportionnelle à la concentration de l'élément. Cette surface est calculée par intégration à l'aide d'un logiciel informatique. Le résultat de l'intégration n'est validé que dans la mesure où les pics des différents éléments présentent une forme gaussienne ne se chevauchent pas.

### **III.1.3 Analyse par ICP-MS**

Les concentrations en éléments traces (<ppm) ont été mesurées par ICP-MS (Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer) quadripolaire de type *7500ce*, Agilent Technologies (Figure 28) qui a remplacé à la fin des années 2000 l'ICP-MS PERKING ELMER : Elan 6000 qui était installé à la fin des années 90. Les paramètres de la machine sont décrits dans le (Tableau 7). Le principe physique des deux appareils est identique. Le *7500ce*, Agilent Technologies est plus compact et beaucoup plus sensible que le Elan 6000. Ceci illustre parfaitement l'avancée technologique entre deux appareils de générations différentes. Cette avancée technologique est grandement liée à l'engouement qu'a suscité l'ICP-MS depuis son apparition dans les années 80 auprès de diverses communautés : chimie, géoscience, biomédical, industrie. Du fait de ses capacités de mesures multi-élémentaires alliant précision et rapidité, l'ICP-MS est un outil qui a été rapidement adopté par les géochimistes pour la mesure des éléments traces dans les roches, les sédiments et les eaux (pluies, lacs, rivières).

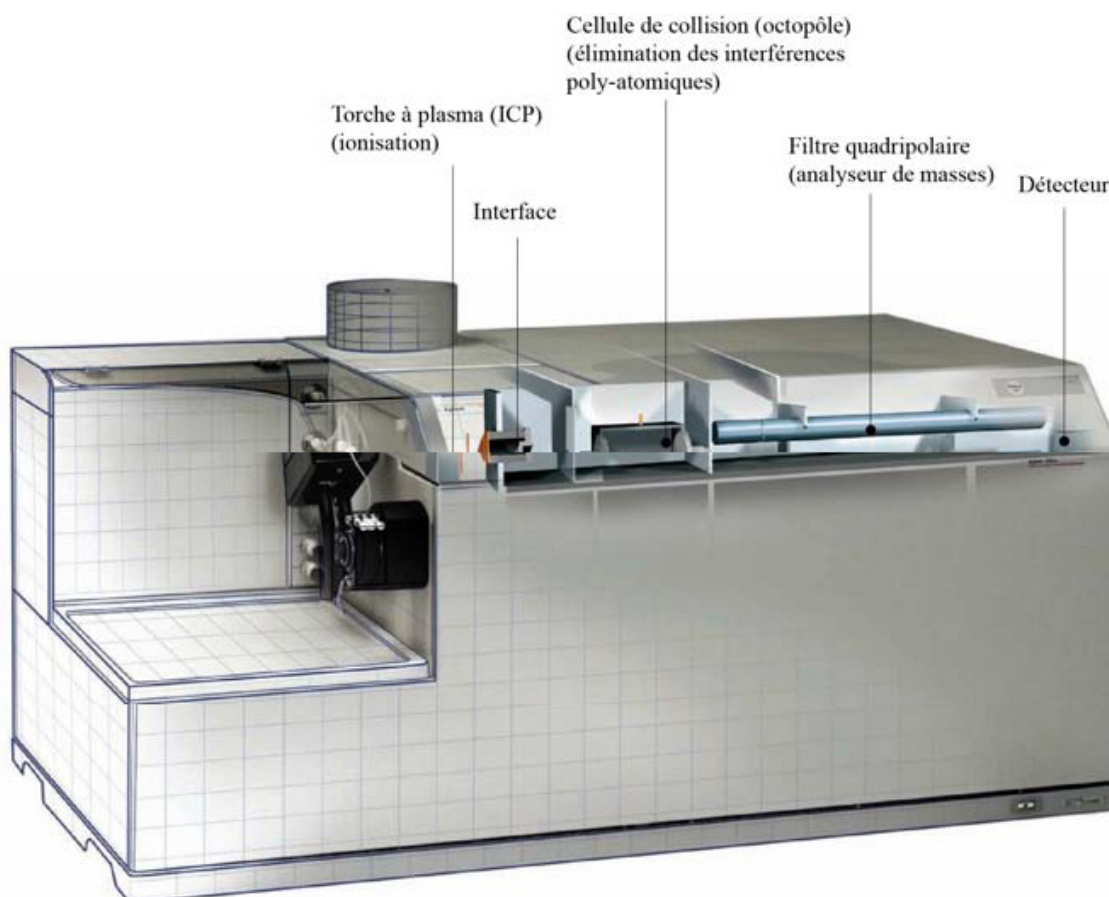


Figure 28 : ICP-MS quadrupolaire Agilent 7500ce. Images : Agilent, [www.chem.agilent.com](http://www.chem.agilent.com).

Tableau 7 : paramètres ICP-MS quadrupolaire Agilent 7500ce.

<b>ICP-MS model</b>	Agilent 7500Ce
Forward power	1550 W
Gas flows:	
<i>Plasma (Ar)</i>	15 l/min
<i>Auxiliary (Ar)</i>	0,9 l/min
<i>Carrier (He)</i>	0,56 l/min
<i>Make-up (Ar)</i>	1,16 l/min
Shield Torch	Used for all analyses
<b>Data acquisition parameters</b>	
Data acquisition protocol	Time-resolved analysis
Scanning Mode	Peak hopping, 1 point per peak
Detector mode	Pulse counting, dead-time correction applied (35ns)
Masses scanned	$^{29}\text{Si}$ , $^{43}\text{Ca}$ , $^{44}\text{Ca}$ , $^{63}\text{Cu}$ , $^{66}\text{Zn}$ , $^{75}\text{As}$ , $^{89}\text{Y}$ , $^{95}\text{Mo}$ , $^{133}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Ba}$ , $^{146}\text{Nd}$ , $^{147}\text{Sm}$ , $^{157}\text{Gd}$ , $^{172}\text{Yb}$ , $^{202}\text{Hg}$ , $^{204}\text{Pb}$ , $^{206}\text{Pb}$ , $^{207}\text{Pb}$ , $^{208}\text{Pb}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{248}\text{ThO}$ , $^{254}\text{UO}$
Dwell Time	25ms
Quadrupole settling time	ca. 5 ms
Time/scan	620 ms
Data acquisition (s)	120 s (20 s gas blank, up to 80 s ablation and 20s of wash out)

### **III.1.3.1 Principe physique de l'ICP-MS**

Les échantillons sont placés dans une enceinte pressurisée afin d'éviter au maximum toute contamination. Un passeur automatique assure l'introduction de l'échantillon dans le nébuliseur. La nébulisation est une opération capitale qui fait passer l'échantillon sous forme d'aérosol, ce qui ne perturbe pas le plasma. Le nébuliseur est constitué de 2 tubes placés à 90°, chimiquement inertes, de diamètres suffisamment fins pour induire la formation de petites gouttes. A la sortie du nébuliseur, elles sont dispersées en microgouttelettes d'un diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .

Ces microgouttelettes pénètrent ensuite dans la torche à plasma d'argon où elles sont vaporisées, dissociées, atomisées et ionisées sous l'effet d'une température qui s'élève à environ 7000°C. Une partie du plasma ( $\approx 10\%$ ) est prélevé par un premier orifice de forme conique, puis se détend pour atteindre le vide secondaire du spectromètre de masse (1-2 mbar) enfin pénètre dans le second orifice. Les ions sont alors guidés par des lentilles ioniques jusqu'au spectromètre de masse quadripolaire. Le spectromètre est constitué de deux paires de barres cylindriques opposées. Chaque paire est traversée par un courant continu (DC) opposé et alternatif (RF) de même amplitude mais en opposition de phase. Dans le plan formé par la paire positive, les ions «légers» sont éjectés sur les barres ; seul l'ion à analyser et ceux ayant une masse supérieure subsistent. Dans le plan de la paire négative c'est le phénomène inverse qui se produit. La combinaison de ces deux filtres (passe-haut, passe-bas) permet de triller les ions selon le rapport  $m/z$  (masse/charge) désiré.

La partie détection est assurée par un multiplicateur d'électrons (type channeltron). L'intérieur de ce tube de détection est tapissé par un matériau semi-conducteur. A l'extrémité du détecteur un cône soumis à une tension négative ( $\approx -3\text{Kv}$ ) permet d'attirer les ions positifs sortant du quadripôle. L'autre extrémité reliée à la terre, attire les électrons. Quand un ion positif entre en collision avec le semi-conducteur, il provoque l'émission d'un ou plusieurs électrons secondaires qui à leur tour heurtent de nouveau les parois et ainsi de suite. Pour un ion qui heurte le détecteur, environ 10<sup>8</sup> électrons parviennent à un collecteur équipé d'un préamplificateur. Le signal récupéré sous forme de nombre de coups (impulsions) est traité par une interface informatique.

L'ICP-MS étant un appareil linéaire dans un domaine de 6 ordres de grandeur, le nombre d'électrons récupérés par le collecteur est directement proportionnel à la concentration de l'élément étudié. Normalement, l'analyse d'un étalon dont on connaît les concentrations en chaque élément et de l'échantillon suffisent pour en calculer les concentrations. Cependant, afin de palier à un certain nombre de perturbations inhérentes au concept physique de l'ICP-MS (effets de matrice et dérive temporelle du signal, interférences isobariques), le laboratoire a développé une méthodologie de la mesure et du traitement des données (Valladon et al., 1995; Freydier, 1997; Aries et al., 2000).

### **III.1.3.2 Problèmes liés à la mesure par ICP-MS**

#### III.1.3.2.1 Effets de matrice et dérives temporelles

Selon les concentrations relatives en ions majeurs de l'échantillon («matrice de l'échantillon»), le signal mesuré pour les éléments traces peut être fortement atténué. Ces effets de matrices sont principalement dus aux trop fortes concentrations en charges dissoutes (exemple  $\text{Na}^+$  pour l'eau de mer) qui provoquent une chute du signal par :

- Colmatage des cônes,
- Chute du taux d'ionisation des éléments du fait d'une trop forte concentration en un élément facilement ionisable (famille des alcalins, alcalino-terreux),
- Déviation de la trajectoire des ions à analyser lors de leur focalisation par les lentilles ioniques vers le spectromètre de masse provoquée par une trop forte densité en un ion particulier ( $\text{Na}^+$  par exemple) ayant pour effet leur répulsion.

Dérive du signal et effets de matrices sont notamment liés aux variations temporelles (à long terme) du colmatage du cône d'échantillonnage. Les fluctuations du signal à court terme, sont imputables aux variations des paramètres physiques de la machine liées au détecteur, au plasma (température, flux d'argon) etc..... Ces variations affectent particulièrement la séquence d'étalonnage.

#### III.1.3.2.2 Effet mémoire

Une séance journalière d'analyse ICP-MS débute toujours par la mesure du «bruit de fond» des analyses en utilisant une solution d'eau ultrapure à 2% d' $\text{HNO}_3$  bidistillé. Ce «bruit

de fond» résulte des réglages des paramètres physiques de l'ICP-MS (flux du nébuliseur, du plasma...) auxquels peuvent se superposer des effets mémoire. Cet effet mémoire résulte du passage de solutions très concentrées (roches, sédiments..) antérieurement au jour d'analyse de nos solutions de rivières (moins concentrées). Il en résulte un bruit de fond «anormalement» élevé, lié aux dépôts en certains éléments traces sur les éléments de la machine en contact avec l'échantillon. De plus, ce bruit de fond va diminuer durant les premières analyses (effet de lessivage par une solution moins concentrée), risquant ainsi d'engendrer des erreurs sur la mesure des concentrations (car il est mesuré tous les 10 échantillons et soustrait à chacun d'eux).

### III.1.3.2.3 Interférences

Le phénomène d'interférence spectrale est essentiellement lié à la résolution de l'ICP-MS (0,8 uma) qui ne permet pas de doser deux isotopes d'éléments dont la différence de masse est inférieure à une unité de masse atomique (uma). On dit qu'il y a interférences entre deux éléments lorsqu'ils ont la même masse (m, interférence isobarique) ou le même rapport masse/charge (m/z), ce qui alors fausse leur mesure. Les interférences possibles en ICP-MS sont les suivantes :

#### *III.1.3.2.3.1 Les interférences élémentaires*

Ces interférences monoatomiques ont lieu lorsque deux éléments possèdent des isotopes de même masse atomique. Par exemple on peut citer le  $^{138}\text{Ba}$  avec  $^{138}\text{La}$  et  $^{138}\text{Ce}$ .

#### *III.1.3.2.3.2 Les interférences d'oxydes et d'hydroxydes*

Il s'agit, en majorité, des interférences entre des oxydes  $(M-16)\text{O}^+$  et hydroxydes  $(M-17)\text{OH}^+$  et un élément de masse atomique M quelconque. Elles ont lieu pour des éléments dont l'énergie de liaison M-O est élevée (terres rares, U, Th ..). Ces oxydes se forment principalement dans la partie la plus froide du plasma à partir de la décomposition de l'eau, constituant majeur des solutions à analyser et des acides ajoutés dans celle-ci (conservation, préparation pour l'analyse).

#### *III.1.3.2.3.3 Les interférences d'ions doublement chargés*

Ces ions ne se forment que si leur énergie de deuxième ionisation est inférieure à celle de la première ionisation de l'argon. Les ions doublement chargés du type  $M^{++}$  interfèrent avec les isotopes des éléments dont la masse atomique est 2 fois inférieure. Ils ont le même rapport m/z, le spectromètre quadripolaire ne peut donc pas les séparer.

Parmi ces interférences, en plus des interférences liées à la nature même de l'échantillon, voici des interférences que l'on retrouve systématiquement :

#### *III.1.3.2.3.4 Autres interférences*

- Les interférences liées au fond spectral : L'argon, présent de façon permanente et en grande quantité dans la torche à plasma est une source d'interférences continue. Ces interférences sur les éléments légers,  $M < 80$ , par exemple :  $^{56}\text{Fe}$  et  $^{57}\text{Fe}$ , proviennent des espèces  $\text{ArO}^+$ ,  $\text{ArOH}^+$ ,  $\text{Ar}^{++}$  de  $^{40}\text{Ar}$ , mais aussi des espèces dimères ( $^{40}\text{Ar}_2$ ,  $^{36}\text{Ar}_2$ ,  $^{38}\text{Ar}_2$ ..) continuellement présentes et de la formation d'espèces polyatomiques avec les éléments de la solution à doser ( $\text{ArH}$ ,  $\text{ArN}$ ..)
- Les interférences liées aux acides : Les acides utilisés pour la conservation et la préparation (ajustement du pH, minéralisation par attaques acides) des échantillons en vue de leur analyse sont des sources d'interférences. Ces acides, dont les plus utilisés sont l'acide nitrique, chlorhydrique, fluorhydrique (voire perchlorique ou sulfurique), sont des sources d'éléments tels que H, O, N, Cl, F, P, S formant des complexes polyatomiques qui interfèrent.

#### **III.1.3.3 Méthodologie de la mesure par ICP-MS**

Les précautions de base à respecter afin d'éviter un colmatage prématuré des cônes sont les suivantes :

- Passage de solutions peu concentrées, dont la charge totale en majeurs n'excède pas 1g/L.
- Toutes les solutions (blancs, étalons, échantillons) sont placées dans une matrice d' $\text{HNO}_3$  2% avant analyse. Le passage des échantillons en solution acide augmente également leur pouvoir d'ionisation dans la torche à plasma.

##### III.1.3.3.1 Calcul des concentrations par la méthode d'étalonnage externe

L'ICP-MS étant une méthode analytique linéaire, le calcul de la concentration ( $C_x$ ) d'un élément X dans un échantillon s'effectue simplement par la méthode d'étalonnage externe. La formule est la suivante :

$$C_X = (C_X)_{etl.} \cdot \frac{(N_X)_{ech.}}{(N_X)_{etl.}}$$

avec C signifiant concentrations, N le nombre de coups, etl. abréviation d'étalon, ech. abréviation d'échantillon.

### III.1.3.3.2 Calcul des concentrations par la méthode d'étalonnage externe avec un standard interne : une solution à la dérive temporelle et aux effets de matrice

La méthode d'étalonnage externe avec un standard interne est pratiquement identique à celle décrite précédemment. On ajoute en plus un standard interne dans les solutions (étalons et échantillons). Cet ajout d'indium (In) en tant que standard interne permet de s'affranchir des effets de matrice et de variations temporelles du signal. L'indium a été choisi car il est très peu abondant dans le milieu naturel (Meyer et Piccot, 1989), d'autre part la masse atomique de son isotope le plus abondant ( $^{115}\text{In}$ ) est à la moitié du spectre de masse généralement analysé ( $^{23}\text{Na}$ ,  $^{235}\text{U}$ ). La concentration d'un élément X se calcule alors de la façon suivante :

$$C_X = \left(\frac{N_X}{N_{In}}\right)_{ech.} \cdot \left(\frac{N_{In}}{N_X}\right)_{etl.} \cdot \left(\frac{C_X}{C_{In}}\right)_{etl.} \cdot C_{aj} \cdot \left(\frac{m_{In}}{m_{ech.}}\right)$$

$(N_X/N_{In})_{ech.}$ , est le rapport du nombre de coups de l'isotope de l'élément X et  $^{115}\text{In}$  dans l'échantillon ;  $(N_{In}/N_X)_{etl.}$ , est le rapport du nombre de coups entre  $^{115}\text{In}$  et l'isotope de l'élément X dans le standard ;  $(C_X/C_{In})_{etl.}$ , est le rapport de concentration entre l'isotope de l'élément X et  $^{115}\text{In}$  dans le standard ;  $C_{aj}$ , est la concentration en In de la solution In/Re ajoutée ;  $m_{In}$ , est la masse de solution d'In/Re ajoutée ;  $m_{ech.}$ , est la masse d'échantillon, on peut utiliser le volume au lieu de la masse pour le dernier terme de l'équation.

Le calcul des concentrations en utilisant l'équation ci-dessus est automatisé par une Macro VBA Excel (Valladon et al., 2005). Les corrections des interférences dues aux oxydes et hydroxydes décrites par Aries *et al.* (2000) pour calculer la concentration des éléments sont prises en compte.

A chaque passage des échantillons à l'ICP-MS, la qualité d'analyse a été vérifiée avec le standard international d'eau de rivière SLRS4 (Yeghicheyan et al., 2001).

### III.1.3.3.3 Séquence d'analyse

Une séquence d'analyse bien définie et répétitive permet de palier à un certain nombre de problèmes analytiques évoqués précédemment :

- Analyse du blanc constitué par une solution d'eau ultrapure à 2% d' $\text{HNO}_3$  bidistillé. Cela permet de mesurer le bruit de fond puis de le retrancher aux étalons et échantillons.
- Analyse de deux étalons multiélémentaires (ICPA et ICPB) utilisés pour la méthode d'étalonnage externe avec standard interne permet de couvrir un large spectre d'éléments.
- Analyse de la même solution à 2% d' $\text{HNO}_3$  qui a pour finalité de rincer la machine après le passage des solutions étalons multiélémentaires.
- Analyse d'un standard d'eau de rivière certifié pour certains éléments traces.
- Analyse de 8 échantillons, ce qui limite le temps entre deux séquences d'étalonnage et donc la dérive temporelle.
- Rinçage entre chaque échantillon avec la même solution à 2% d' $\text{HNO}_3$  afin de lutter contre l'effet mémoire, prévenir le colmatage des cônes.

### III.1.3.3.4 Validation des mesures

Le contrôle de certains paramètres permet de vérifier le bon fonctionnement de la machine et de valider les mesures.

- Inter-calibration : Afin de vérifier le bon fonctionnement de l'ICP-MS, lorsqu'on mesure des eaux, les concentrations d'un standard international d'eau de rivière (eau du fleuve Saint-Laurent : SLRS-3 et 4, National Research Council Canada) ont été mesurées tous les 10 échantillons et comparées aux valeurs certifiées (en temps réel, puis sur une moyenne journalière). Nos concentrations mesurées à l'ICP-MS sont très proches des valeurs certifiées (écart < 20%). Toutefois les écarts plus élevés observés sur certains éléments s'expliquent par les phénomènes d'interférences n'ayant pas été totalement corrigés (Ca, Zn), l'état de propreté de la machine le jour de l'analyse ou encore la faiblesse de la concentration de l'élément à mesurer (Co).
- Utilisation de deux standards internes pour l'étalonnage :  $^{115}\text{In}$  et  $^{187}\text{Re}$ . Re et In, en provenance d'une même solution, sont ajoutés dans l'échantillon. Puis on calcule la

concentration de Re par la méthode d'étalonnage externe avec In comme standard interne. Elle ne doit pas s'écarter de plus de 5% (environ 2 fois l'écart-type moyen sur la mesure) de la valeur calculée par la pesée.

- Comparaison des deux méthodes de calcul des concentrations : Les concentrations calculées par la méthode des étalons externes et celle des étalons externes avec standard interne ne doivent pas différer de plus de 10%. Si ces deux dernières conditions ne sont pas vérifiées, on recommence la mesure.

### **III.1.4 Mesure de l'alcalinité par titration**

Les alcalinités totales des échantillons d'eau ont été mesurées par titration à l'acide chlorhydrique à l'aide d'un titrateur volumétrique automatique de type *Schott Titroline alpha plus* doté d'un passeur automatique *TW alpha plus* et un logiciel *Titrisoft*. L'erreur pour chaque détermination est d'environ  $\pm 1\%$  avec une limite de détection de l'ordre de  $5 \times 10^{-5}$  eq/l. D'autres mesures d'alcalinité sur quelques échantillons ont été faites manuellement suivant la méthode de Gran, voir (Stumm and Morgan, 1996).

Dans les eaux naturelles les bases les plus importantes, titrables par l'acide chlorhydrique, sont les suivantes :

- a)  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,
- b)  $\{\text{OH}^-, \text{H}^+\}$ ,  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$ ,  $\text{B}(\text{OH})_4^-$
- c)  $\text{NH}_3$ ,  $\text{S}_2^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ , anions organiques.

Les teneurs en bases du groupe c) sont en général faibles dans la plupart des eaux naturelles. De plus, dans le domaine de pH de nos eaux et compte tenu du fait que  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{B}(\text{OH})_3$  sont des acides faibles (respectivement  $\text{pK}=9,5$  et  $8,9$ ) les teneurs en bases du type b) sont aussi en général faibles (sauf dans l'eau de mer ou 20% des espèces du bore sont présentes sous forme de borates). D'autre part, ce bassin est recouvert à 75% par des roches carbonatées. L'alcalinité mesurée résulte alors essentiellement de l'équilibre entre la pression atmosphérique en dioxyde de carbone et la dissolution des carbonates calciques et magnésiques (calcite, dolomite).

Ce titrateur automatique possède plusieurs modes de dosage :

- Un premier permet de programmer l'injection d'un volume fixe d'acide par l'intermédiaire d'une micro-pompe et de pouvoir tracer en sortie (micro-ordinateur, table traçante) la courbe de dosage  $\text{pH} = f(\text{volume d'HCl versé})$ .
- Le deuxième mode permet de fixer le pH pour lequel on veut arrêter le dosage, en l'occurrence le pH du point d'inflexion à l'équivalence. Il ajuste alors automatiquement le pas de temps et le volume des ajouts successifs d'acide dans la solution à doser en fonction de la stabilité du pH et de la pente de la courbe de titration. Une fois atteint le pH, l'appareil indique le volume total versé. Ces deux premiers modes nécessitent au préalable, un étalonnage de l'électrode pH, ainsi que la surveillance de sa stabilité lors du passage de longues séries d'échantillons.
- Le troisième mode est appelé le mode automatique car il détecte automatiquement le point d'inflexion lors du dosage. Dans ce mode l'électrode n'est pas étalonnée en pH, elle fonctionne en capteur de tension (mV). Le titrateur ajuste le pas de temps et le volume des ajouts successifs d'acide dans la solution à doser en fonction de la stabilité du potentiel de l'électrode et de la rapidité d'évolution de la pente de la courbe de titration  $\Delta V_{\text{acide}} / \Delta mV$ . Cette pente croît pour passer par un maximum au point d'inflexion (point d'équivalence) de la courbe de titration. L'appareil détecte ce maximum en le dépassant légèrement, alors, la pente de la courbe de titration commence juste à diminuer. Il corrige le volume total versé qui est surestimé afin de calculer le volume réel à l'équivalence. Si l'acide utilisé est de concentration trop faible, le titrateur ne détecte pas le changement de pente car la chute de la courbe de titration n'est pas assez brutale. Au contraire si la concentration de l'acide est trop forte le volume versé à l'équivalence n'est pas assez grand et l'on perd de la précision sur ce volume. (Rq : on peut aussi jouer sur le volume de solution à doser pour faire varier la rapidité de la chute de la pente de titration). Sachant que le constructeur assure une précision de 0,01  $\mu\text{l}$ , il faut au moins verser 1  $\mu\text{l}$  à l'équivalence pour assurer une précision d'au moins 1% sur le volume. Avec une solution d'HCl préparée à partir d'une solution mère de haute précision en capsule et une pipette à 2%, l'erreur sur l'alcalinité n'excède pas les 5%. D'autre part trois mesures ont été effectuées sur chaque échantillon, c'est la moyenne qui a été retenue comme mesure. L'écart-type sur ces trois mesures n'excédait pas 2 à 3%.

C'est la troisième méthode qui a été retenue car 1) dans le milieu naturel, même si on connaît les pH théoriques correspondant à la neutralité des ions  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  (8,5 et 4,2), ces pH sont légèrement décalés car en plus de ceux-ci on titre d'autres substances (voir paragraphe ci-dessus) ; 2) d'autre part cela évitait de surveiller la dérive de l'étalonnage lors de l'exécution d'un grand nombre de titrations à la suite. L'électrode pH était tout de même étalonnée en début de série de mesure afin de vérifier approximativement le pH du point d'équivalence. Les pH de nos eaux étant inférieurs à 8,5, les courbes de titrations présentent un seul point d'inflexion, celui des ions  $\text{HCO}_3^-$ . Les mesures d'alcalinité sur nos eaux ont été validées, en comparant avec des résultats de titrations faites manuellement sur quelques échantillons suivant la méthode de Gran.

### **III.1.5 Mesure par spectromètre U.V de la silice**

La silice totale dissoute dans les solutions naturelles a été dosée par colorimétrie en utilisant un spectromètre U.V./visible à injection automatique de réactifs de marque *Technicon Autoanalyzer II*. L'imprécision sur la mesure est inférieure à 5%. L'appareil est constitué d'un passeur automatique (30 échantillons), d'une canette de prélèvement, d'un système d'injection automatique séquentiel de réactifs (respectivement molybdate d'ammonium, acide ascorbique, acide oxalique dans notre cas) et d'un analyseur de lumière. L'échantillon est introduit dans le système d'injection automatique des réactifs. Dans un premier temps, ces silicates forment avec le molybdate d'ammonium un complexe silico-molybdique. Puis celui-ci est réduit en «bleu de molybdène» par l'acide ascorbique. Un ajout d'acide oxalique permet d'éliminer les interférences avec les phosphates. Un analyseur de lumière dans le visible, mesure les variations d'absorbance au sein des échantillons (variations de la dureté du «bleu de molybdène»). Ces variations sont proportionnelles à la quantité de silice totale dissoute dans chaque échantillon. Les hauteurs des pics des échantillons en sortie de l'analyseur de lumière sont comparées à celles de solutions étalons, pour en déduire leurs concentrations en silice par une simple relation linéaire. Une séquence d'analyse est constituée de : Etalon1/ Etalon2/ Etalon3/ Eau MQ/ 15 échantillons/ Etalon 2/ 15 échantillons.... Entre deux échantillons, afin de rincer le circuit, la canette de prélèvement plonge dans un tube en U en permanence balayé par un flux d'eau déminéralisée. L'eau ultrapure (MQ) permet de fixer la ligne de base (pas de pic pour une concentration nulle). On s'arrange en général pour que les concentrations à mesurer soient réparties autour de la

valeur de l'étalon central<sup>2</sup>. Sa mesure permet d'une part de vérifier l'étalonnage, d'autre part d'évaluer expérimentalement la précision sur la mesure incluant toutes les sources d'erreurs (préparation de la solution, machine, régression linéaire, mesure des hauteurs de pics ...). Elle ne dépasse pas en général les 5%. On peut également mesurer par cette méthode les ions  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Br}^{3+}$ .

### **III.1.6 Analyse par ICP-OES**

Quelques échantillons d'eau ont été analysés par le Spectromètre d'Émission Optique Couplé à Plasma Inductif (ICP-OES)<sup>(1)</sup> de type *Horiba Jobin Yvon Ultima2*. Il permet le dosage des cations majeurs  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ .

Le principe de la mesure est basé sur la nébulisation puis l'ionisation de l'échantillon liquide dans un plasma d'argon (6000-8000°C). Les atomes de l'échantillon sont excités à un niveau énergétique supérieur. Le retour à l'état stable est accompagné de l'émission d'une série d'ondes électromagnétiques dans la gamme du spectre visible ou UV caractéristique de chaque élément. Les différentes longueurs d'ondes sont séparées par un spectromètre. L'intensité de la radiation est proportionnelle à la concentration de l'élément.

En d'autre terme, cette technique de quantification est basée sur l'analyse par spectrométrie optique de photons générés par un plasma à couplage inductif. Outre l'obtention de limites de détection de l'ordre du  $\mu\text{g/L}$  en phase dissoute, elle est également la seule à supporter l'introduction d'échantillons liquides extrêmement chargés en sels et l'analyse de solvants organiques avec une relative facilité.

La sensibilité intrinsèque de la méthode et la présence de très nombreuses raies adjacentes, parfois peu ou pas séparées par les mono et polychromateurs, font que cette

---

<sup>(1)</sup> *Sigles usuels ICP-AES ; inductively coupled plasma – atomic emission spectrometry ; ou de façon plus exacte ICP-OES (O pour optical, car on peut analyser les raies ioniques en ICP). Parmi toutes les techniques disponibles à ce jour, l'ICP-OES (**Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry**) ou ICP-AES (**-Atomic Emission Spectrometry**), introduit commercialement dès 1974, est particulièrement répandu dans les laboratoires occidentaux et affiche une popularité sans cesse croissante dans les pays émergents. Pour éviter toute confusion avec la spectrométrie Auger, l'IUPAC recommande généralement l'usage de OES.*

technique est appliquée essentiellement pour l'obtention rapide et précise des compositions en éléments majeurs.

## **III.2 Les solides**

Les solides en question concernent les échantillons de roches et de sols prélevés dans le bassin versant d'Oued Cherf.

### **III.2.1 Les roches**

Les roches échantillonnées représentent les faciès dominants dans le bassin versant, à savoir les calcaires, les grès, les évaporites, les argiles et les marnes. Les échantillons de roches dures et non friables ont fait l'objet d'une confection de lames minces. Le sciage des échantillons a été fait dans l'atelier de lames minces au département de géologie de l'Université d'Annaba avant d'être transportés à Toulouse pour la confection de lames minces en vue d'une étude pétrographique. Ceci a été réalisé au Laboratoire GET (Géosciences Environnement Toulouse) ex-LMTG (Laboratoire des Mécanismes et transferts en Géologie) de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, France par Fabienne de PARSEVAL, technicienne dans l'Atelier Roches.

### **III.2.2 Les sols**

#### ***III.2.2.1 Prélèvement***

Les sols ont toujours été prélevés sur les mêmes points d'échantillonnage que ceux utilisés pour le prélèvement d'eaux. Le nombre d'échantillons prélevés avoisine ainsi la vingtaine. Pour la récolte des échantillons de sols, des gants stérilisés ont été systématiquement utilisés. Les sols des points échantillonnés ont été placés dans des sachets plastiques, qui garantissent une fermeture isolant de l'air extérieur.

#### ***III.2.2.2 Préparation des échantillons***

Les échantillons de sols ont fait l'objet d'un séchage à l'air libre dans une salle propre et d'une homogénéisation à l'aide d'un mélangeur à l'atelier de roche à l'Université de Annaba. Une première caractérisation chimique a été faite à l'Université de Annaba en utilisant un X-ray fluorescence de type Panalytical PW2400. Une caractérisation minéralogique a été faite au laboratoire GET de Toulouse en Utilisant un diffractomètre de

rayons X de type INCEL CPS 120 et au Microscope Electronique SEM de type JEOL JSM-6360LV Scanning Electron Microscope.

Les solutions obtenues après digestion acide des poudres de sols ont été analysées au GET par ICP-MS quadripolaire (7500ce, Agilent Technologies) pour déterminer la teneur des métaux et des éléments traces. Dans les cas de fortes concentrations en dehors de la gamme de l'ICP-MS, notamment pour Fe, Mn et Al, ces éléments ont été également analysés par la spectroscopie d'absorption atomique (AAS) avec une erreur de  $\pm 1\%$  et une limite de détection de  $6 \times 10^{-7}$  M et la torche à plasma (HPLC) de type Dionex High-Pressure Liquid Chromatograph avec une précision inférieure à 8%.

### **III.2.2.3 Mise en solution des échantillons de sols**

Cette attaque est nécessaire afin de permettre l'analyse des éléments en traces contenus dans les solides. L'attaque sur plaque avec acide Fluorhydrique et acide nitrique HF/HNO<sub>3</sub>. Elle est faite dans la salle blanche, étant stérile toute contamination ou pollution est évitée lors des manipulations des échantillons. Mais son inconvénient est l'utilisation l'acide fluorhydrique (HF) qui consomme la silice contenue dans les solides.

Cette attaque été menée à l'aide de flacons entièrement en téflon PFA de marque (Savillex®) que l'on appelle communément savillex (Figure 29). On pèse 100 mg d'échantillon et une quantité adaptée d'un standard LKSD1 et un blanc. Elle consiste à suivre rigoureusement un protocole composé de plusieurs étapes bien précises à adapter au matériel attaqué.



**Figure 29 : Flacons Savillex utilisés lors des attaques acides des sols.**

Lorsque l'attaque est terminée, la préparation des échantillons pour l'analyse ICP-MS des éléments en traces peut être effectuée, toujours en salle blanche. Une nouvelle dilution peut être nécessaire pour cette analyse, elle se fait alors avec de l'eau ultra pure Milli-Q. Les piluliers utilisés pour préparer les solutions à analyser ont été préalablement lavés à l'HCl

1N. Un standard interne, In + Re, a aussi été ajouté dans chaque pilulier (1% max. de la solution). Les concentrations de ce standard interne sont connues ([In] = 0.8029 ppm et [Re] = 0.8005 ppm).

## **IV. Conclusion**

Lors des travaux de terrains trois types d'échantillons ont été prélevés ; eaux (solutions naturelles), sols et roches. Des lames minces ont été confectionnées à partir de roches en vue d'une étude pétrographique.

Les sols ont fait l'objet des travaux suivants :

- Caractérisation chimique des éléments majeurs à la fluorescence des rayons X.
- Mise en solution par digestion acide à la salle blanche (solutions artificielles) ont vue d'une caractérisation chimique des éléments traces.
- Manips de réactivité sols-eaux (solutions artificielles) qui feront l'objet d'analyses chimique des éléments majeurs et en traces.
- Mesure de la surface spécifique par application de la théorie de Brunauer, Emmett et Teller aux isothermes d'absorption d'azote et argon.

Les solutions tous types (naturelles et artificielles) ont fait l'objet, d'analyses chimique des éléments majeurs et en traces par les techniques analytiques suivantes :

- Spectroscopie d'absorption atomique ou ICP-OES pour les cations majeurs et Chromatographie ionique pour les anions majeurs.
- ICP-MS pour les éléments traces.
- Mesure de l'alcalinité par titration à l'acide chlorhydrique à l'aide d'un titrateur volumétrique automatique.
- Dosage de la silice totale dissoute dans les solutions naturelles par colorimétrie en utilisant un spectromètre U.V./visible.

## CHAPITRE 5

# MINERALOGIE, GEOCHIMIE ET PETROGRAPHIE

# CHAPITRE 5 : MINÉRALOGIE, GEOCHIMIE ET PETROGRAPHIE

## I. Introduction

Le bassin versant de l'Oued Cherf est dominé par des roches d'argiles, de gypses, de dolomies, de grès péliciteux, des marno-calcaires, des biomicrites, des calcaires marneux, des marnes et des conglomérats.

Les roches échantillonnées concernent les affleurements géologiques principaux du bassin versant étudié. La position géographique des points d'échantillonnage a été déterminée à l'aide de la cartographie géographique et géologique existante.

Les échantillons représentant les solides à caractériser dans ce travail concernent les différents types de roches et de sols composant le bassin versant de l'Oued Cherf.

## II. Caractérisation des sols

Le sol est une formation naturelle qui se transforme et évolue dans le temps et dans l'espace continuellement sous l'influence de processus physiques, chimiques, biologiques et humains. De nombreux facteurs interfèrent dans la formation des sols, les plus importants sont la nature de la roche mère, le climat, le temps et la végétation. Un sol résulte donc de l'union de la matière minérale provenant de la roche mère par le processus d'altération superficielle et de la matière organique provenant de la décomposition des débris d'origine animale ou végétale.

### II.1 Nature des sols du bassin versant d'Oued Cherf

C'est par leur décomposition plus au moins rapide que les affleurements de roches dures libèrent la terre fine constituant les sols des terres arables.

Le bassin d'Oued Cherf est constitué de trois périmètres agricoles<sup>(1)</sup> : Sedrata-Zouabi, Ksar Sbahi et le périmètre d'Ain Babouche (Figure 30).

---

<sup>(1)</sup> *Directions des Services Agricoles (DSA) de Souk Ahras et Oum Bouaghi ; 2003.*

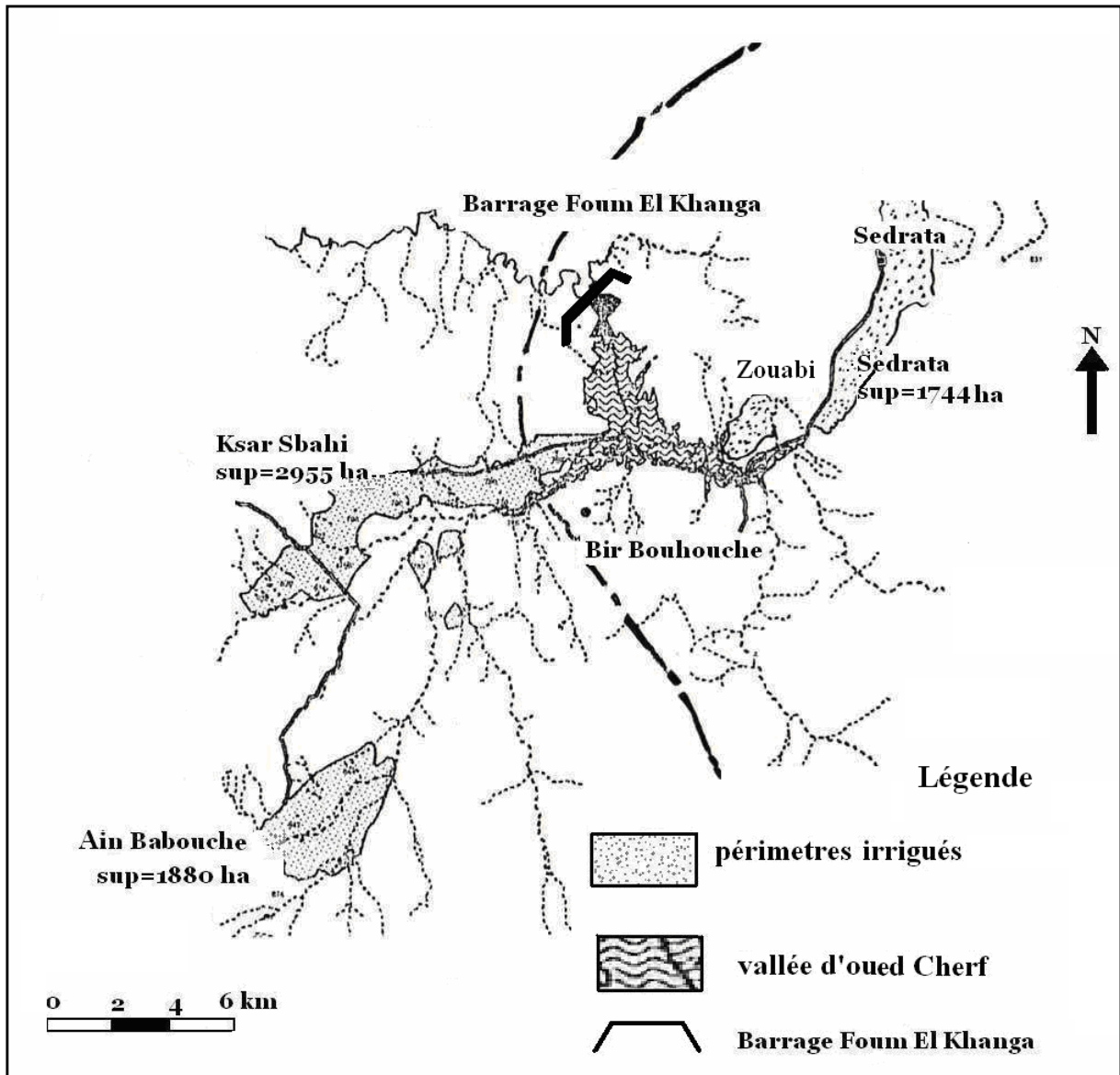


Figure 30 : Plan de situation des périmètres des terres irrigables du bassin versant de l'Oued Cherf.

### II.1.1 Le périmètre de Sedrata-Zouabi

Le périmètre de Sedrata-Zouabi se localise dans la partie Nord-Est du bassin versant d'Oued Cherf et s'étale sur une superficie de 4051 ha, il appartient aux communes de Sedrata et Zouabi dans la wilaya de Souk Ahras. Ce périmètre reçoit une pluviométrie annuelle de l'ordre de 456 mm et une température annuelle moyenne de 14,30°C avec un type de climat semi-aride.

La plus grande superficie de ce périmètre est occupée par des sols qui sont caractérisés par une texture fine à très fine (argiles limoneuses et sableuses) et une porosité

réduite ; l'irrigation de ces sols est délicate car la pénétration de l'eau dans le sol est très lente donc, il faut apporter des petites quantités d'eau à chaque fois pour éviter d'engorger le sol<sup>(1)</sup>.

Les sols de ce périmètre sont par conséquent aptes à l'arboriculture (agrumes, cerisier, oliviers,...etc.), aux cultures industrielles (coton, betterave à sucre, tourne sol, tabac...etc.), aux cultures céréalières et fourragères (maïs, blé dur et tendre, orge ...etc.) et aux cultures maraîchères (tomate, oignon, pomme de terre, poivron ...etc.).

### **II.1.2 Le périmètre de Ksar Sbahi**

Le périmètre de Ksar Sbahi occupe la majeure partie de la commune de Ksar Sbahi dans la Wilaya d'Oum Bouaghi à une altitude varie de 750 à 850 m, situé sur la rive gauche d'oued Settara (Figure 31) avec une superficie de 2955 ha de terres irrigables. Ce périmètre est caractérisé par une pluviométrie de l'ordre de 375 mm et une température moyenne de 14,8°C avec un climat est semi-aride.

Les sols de ce périmètre sont favorables à l'arboriculture (agrumes, cerisier, oliviers,...etc.), aux cultures industrielles (coton, betterave à sucre, tourne sol, tabac...etc.), aux cultures céréalières et fourragères (maïs, blé dur et tendre, orge ...etc.) et aux cultures maraîchères (tomate, oignon, pomme de terre, poivron ...etc.).

Le potentiel en sol de ce périmètre présente des formations du quaternaire ancien caractérisé par des fortes accumulations calcaires à faible profondeur qui ont donné naissance à des sols calcimagnésiques.

---

<sup>(1)</sup> *Directions des Services Agricoles (DSA) de Souk Ahras et Oum Bouaghi ; 2003.*



**Figure 31 : Photographie d'une parcelle du périmètre Ksar Sbahi près du village de Settara.**

### **II.1.3 Le périmètre d'Ain Babouche**

Le périmètre irrigué d'Ain Babouche se situe dans la commune d'Ain Babouche dans la Wilaya d'Oum Bouaghi, il se présente sous forme d'un plateau, avec une superficie de 1880 ha de terres irrigables. Ce périmètre reçoit une pluviométrie annuelle de l'ordre de 246,39mm avec une température moyenne de l'ordre de 15°C donc un type de climat semi-aride.

Le potentiel en sol de ce périmètre présente des formations du quaternaire ancien caractérisé par des fortes accumulations calcaires à très faible profondeur, ces sols sont aptes à toutes les cultures (cultures céréalières et fourragères, moyennement aptes aux cultures industrielles et maraîchères). L'élevage dans les trois périmètres à un rôle important dans l'intensification de la production végétale à l'état projeté permettra le développement et la restriction de l'élevage.

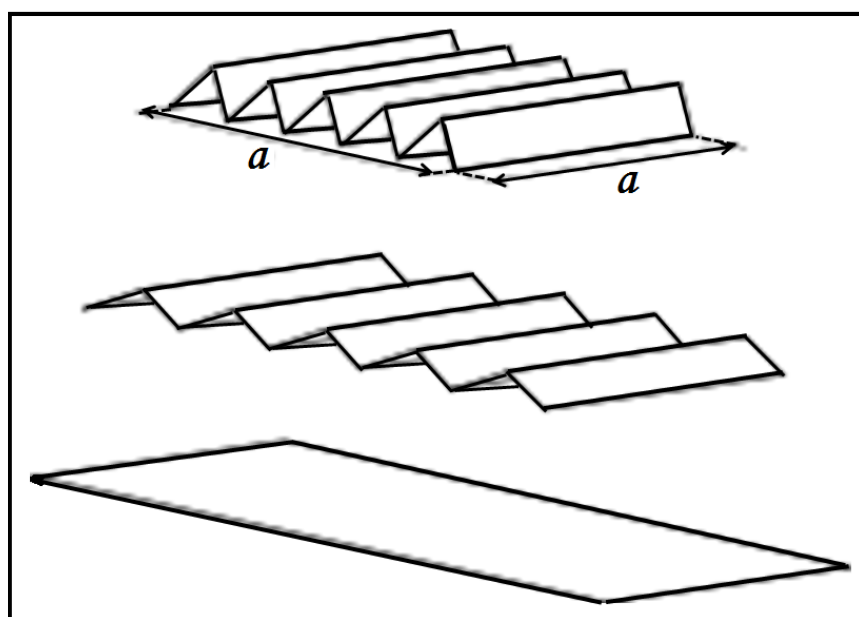
## **II.2 Surface spécifique de sols**

La surface spécifique désigne la superficie réelle de la surface d'un objet par opposition à sa surface apparente. Cela a une grande importance pour les phénomènes faisant intervenir les surfaces, comme l'adsorption, l'absorption ou les échanges de chaleur.

On l'exprime en général en surface par unité de masse, en mètre carré par kilogramme ( $m^2 \cdot kg^{-1}$ ), ou en une des unités dérivées (par exemple, mètre carré par

gramme,  $1 \text{ m}^2 \times \text{g}^{-1} = 1\,000 \text{ m}^2 \times \text{kg}^{-1}$ ). On parle de ce fait parfois d'aire massique. On peut éventuellement l'exprimer en surface par unité de volume, soit en mètre carré par mètre cube ( $\text{m}^2 \times \text{m}^{-3} = \text{m}^{-1}$ ), mais ceci est assez rare.

La présence de rayures, symbolisées ici par des sillons triangulaires, augmente la surface spécifique. Prenons un cube d'arête ( $a$ ) présentant des rayures régulières, les rayures ayant un profil triangulaire (Figure 32). La surface apparente  $S_{\text{app}}$  du cube est la somme des aires de ses six faces :  $S_{\text{app}} = 6 \times a^2$ . Mais regardons une face de près : chaque rayure est un sillon, il faut prendre en compte l'aire des flancs de chaque sillon. Si l'on « déplie » la surface, on voit que l'on obtient une aire plus grande que la surface apparente ; la surface réelle est supérieure à la surface apparente, elles sont égales si la surface est strictement plane et lisse :  $S_{\text{réelle}} \geq S_{\text{app}}$



**Figure 32 : Illustration de surface spécifique apparente et réelle.**

Dans le cas d'une poudre, la surface réelle est la somme des surfaces des grains. De manière générale : pour une masse ou un volume donné, plus les grains sont fins, plus la surface spécifique est importante.

Les surfaces ont été obtenues par application de la théorie de Brunauer, Emmett et Teller [B.E.T., (1938)] aux isothermes d'absorption d'azote et argon. La théorie BET repose sur l'hypothèse d'une adsorption multimoléculaire due à des liaisons faibles de type Van der Waals. La mesure de la surface spécifique des silicates par l'isotherme d'absorption de

l'azote donne des résultats reproductibles en dépit de leur microporosité qui en limite, en principe, l'application. La surface spécifique  $S$  est calculée à partir de la capacité de recouvrement moléculaire  $V_m$  qui est la quantité de gaz nécessaire pour couvrir la surface avec une couche mono moléculaire. On a :

$$S = \frac{s \cdot N \cdot V_0}{V_m}$$

avec  $N$ , le nombre d'Avogadro ( $6,02 \cdot 10^{23} \text{ moles}^{-1}$ ),  $V_0$ , le volume molaire du gaz ( $22,41 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ ),  $s$ , la section efficace de la molécule adsorbée. La valeur  $V_m$  est déterminée à l'aide de l'équation BET suivante :

$$\frac{p}{V(p_0 - p)} = \frac{1}{V_m \cdot c} + \frac{(c - 1) \cdot p}{V_m \cdot c \cdot p_0}$$

ou  $p$  est la pression d'équilibre de l'absorbât,  $p_0$  sa pression de saturation à la température de l'absorption,  $c$  une constante et  $V$  le volume de gaz adsorbé à 273 K et 1 atmosphère. En portant le premier terme de cette équation dans un graphique en fonction de  $p/p_0$ , on obtient une droite, dont la pente et l'ordonnée à l'origine permettent de déterminer  $V_m$ . La méthode BET nécessite un prétraitement des échantillons (dégazage et déshydratation) afin de retirer les gaz préalablement adsorbés.

Les résultats d'analyses de la surface spécifique des échantillons de sols prélevés dans le bassin versant de l'Oued Cherf sont présentés dans le tableau 8. Ils varient de  $11,91 \text{ m}^2/\text{g}$  à  $47,21 \text{ m}^2/\text{g}$ . Quelques résultats de ces analyses seront exploités ci-dessous dans le chapitre interaction eau-sédiments.

**Tableau 8 : Surfaces spécifiques (S A) de quelques échantillons de sol du BV d'Oued Cherf.**

<b>Echantillon</b>	<b>S A (m2/g)</b>
O1G4S	15,69
O1G6S	16,46
O1G8S	44,97
O1G9S	34,36
O1G10S	30,07
O1G14S	47,21
O1G15S	40,64
O1G16S	35,6
O1G17S	15
O1G23S	15,79
O2G2S	11,91
O2G21S	38,9

## **II.3 Minéralogie**

### **II.3.1 Diffraction des rayons X**

Cette technique qui se fonde sur l'interaction des photons X avec la matière, est une méthode conventionnelle pour l'identification des différentes espèces minéralogiques, elle se fonde sur l'interaction des photons X avec la matière.

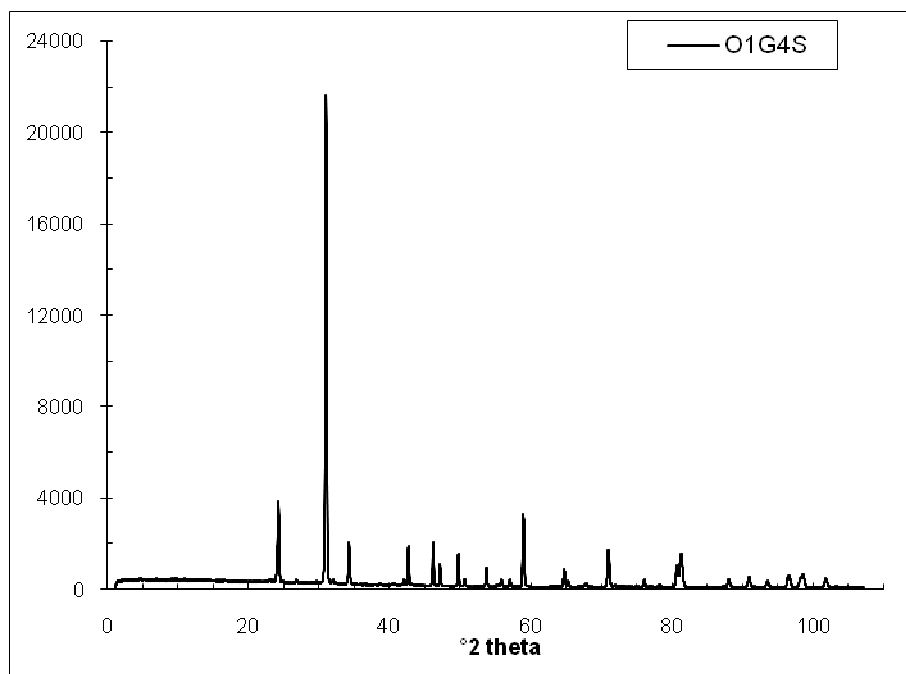
Les spectres enregistrés sur des matériaux inconnus permettent d'identifier les espèces minéralogiques présentes. On procède par comparaison avec les nombreuses données disponibles dans la littérature en recherchant les réflexions caractéristiques de chaque espèce minéralogique. L'équivalence entre l'angle de réflexion ( $\theta$ ) et la distance inter-réticulaire ( $d[hkl]$ ) est donnée par la loi de Bragg :

$$2d.\sin\theta = n.\lambda$$

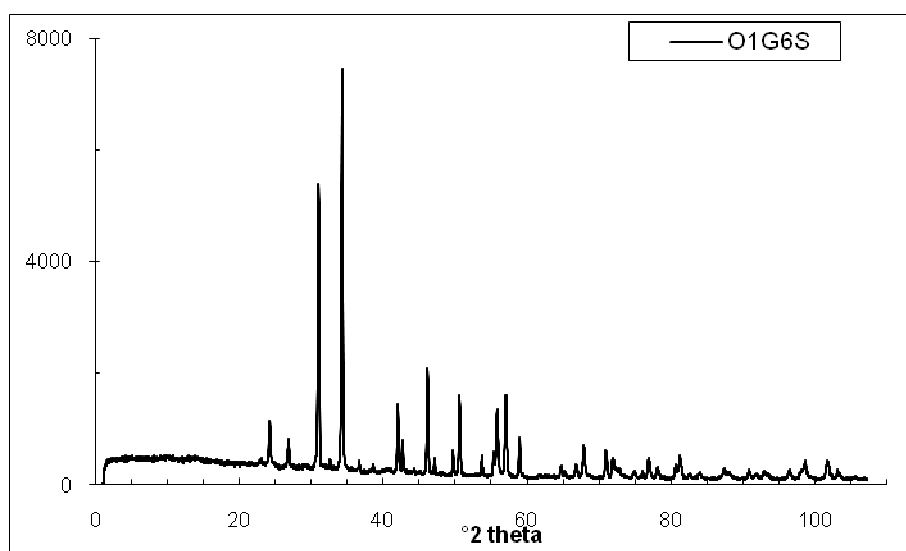
avec  $d$ , équidistance entre les plans cristallographiques  $[hkl]$ ,  $\theta$ , l'angle de rayon incident,  $n$ , l'ordre de la réflexion et  $\lambda$ , la longueur d'onde du rayonnement utilisé.

Pour ces analyses réalisées au GET c'est un appareil du type CPS 120 Inel pour la radiation  $K_\alpha$  du cobalt ( $\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$ ) dans un secteur angulaire de 1 à  $120^\circ$  en  $2\theta$ .

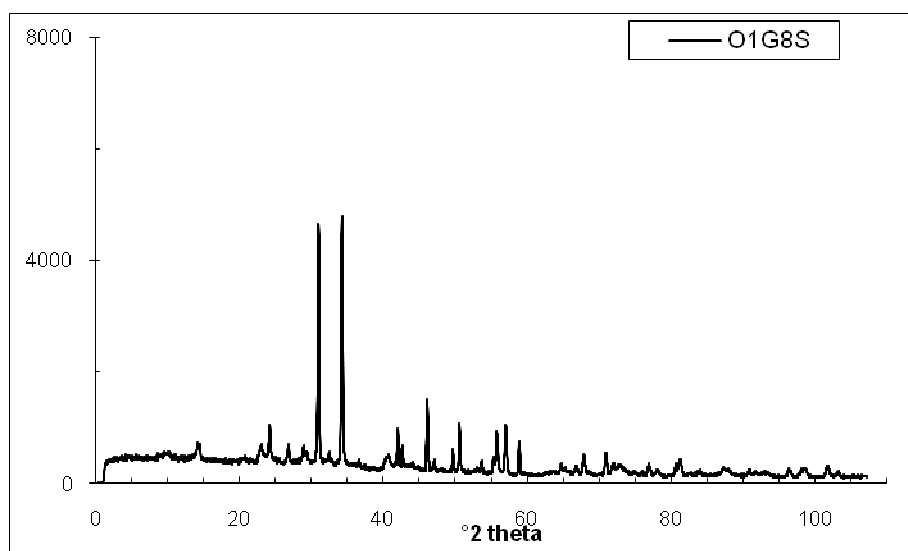
Le dépouillement des spectres obtenus montrent que les sédiments sont composés essentiellement de quartz, calcite, minéraux argiles, oxydes de fer et des minéraux de sulfates. Des exemples de spectres obtenus sont présentés dans les Figures 33 à 40.



**Figure 33 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G04S.**  
O1 G4s: ( 94% de Qz); (5 à 6% de calcite); (1% d'hématite + goethite).

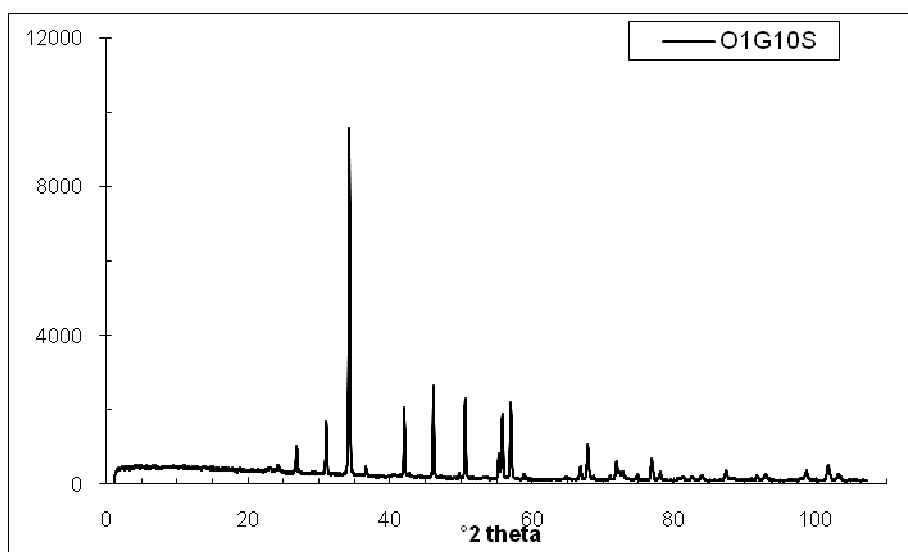


**Figure 34 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G06S.**  
O1 G6S: (85 à 88% de calcite); (8 à 12% de Qz); (2% d'hématite + goethite).



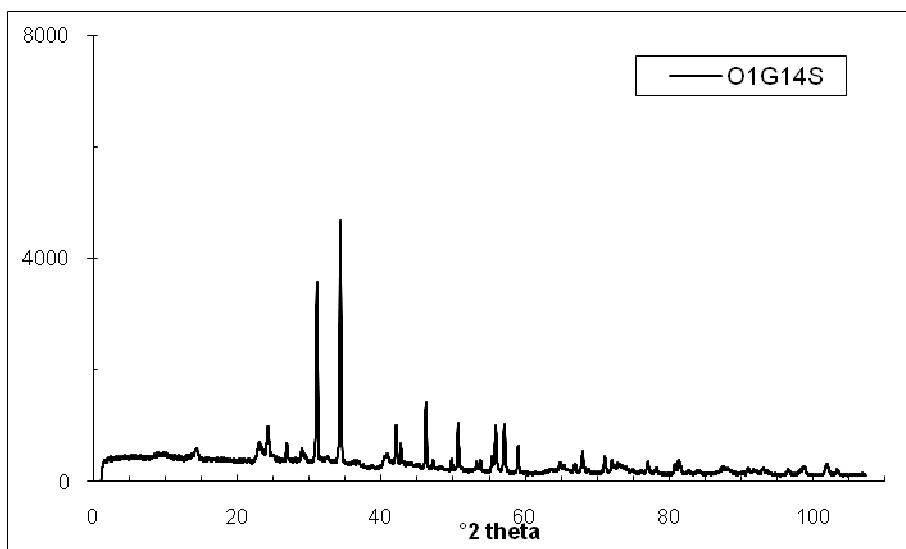
**Figure 35 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G8S.**

O1G8S: (60 à 65% Qz); (35 à 40% de calcite); (1% de Kaolinite) ; (1% d'hématite + goethite).



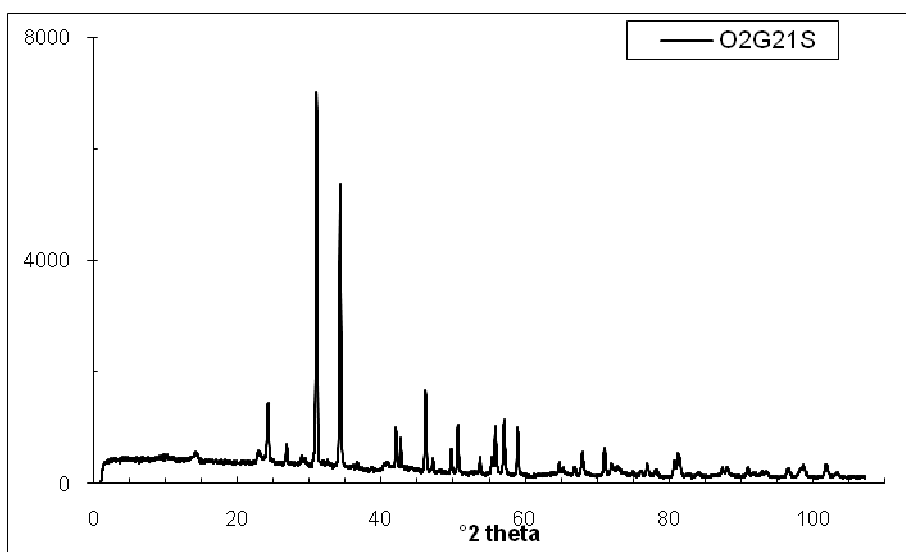
**Figure 36 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G10S.**

O1 G10S: (94% de calcite); (5 à 6% de Qz); ( inf. à 1% d'hématite + goethite).



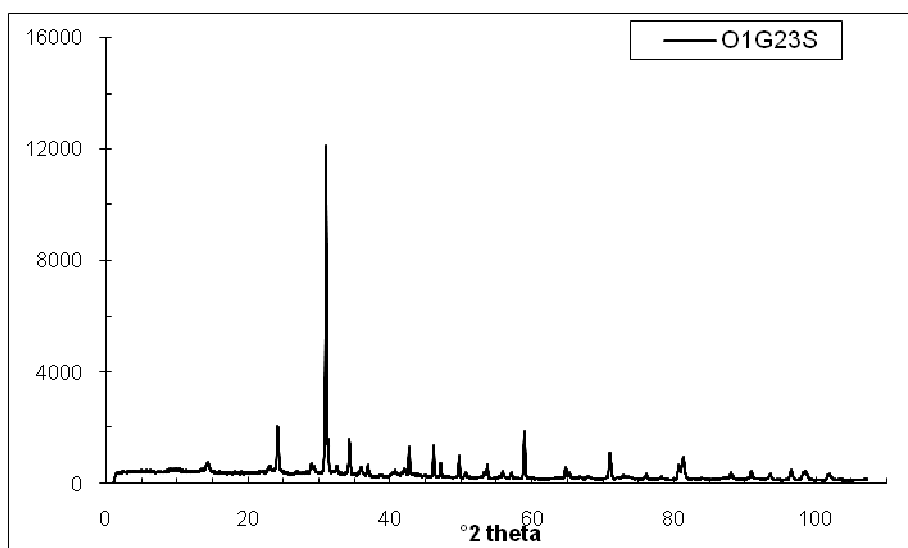
**Figure 37 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G14S.**

O1 G14S: (40 à 45% Qz); (40 à 45% de calcite); (4 à 6% de Kaolinite, 1 à 2% illite) ; (2 à 3% d'hématite + goethite).



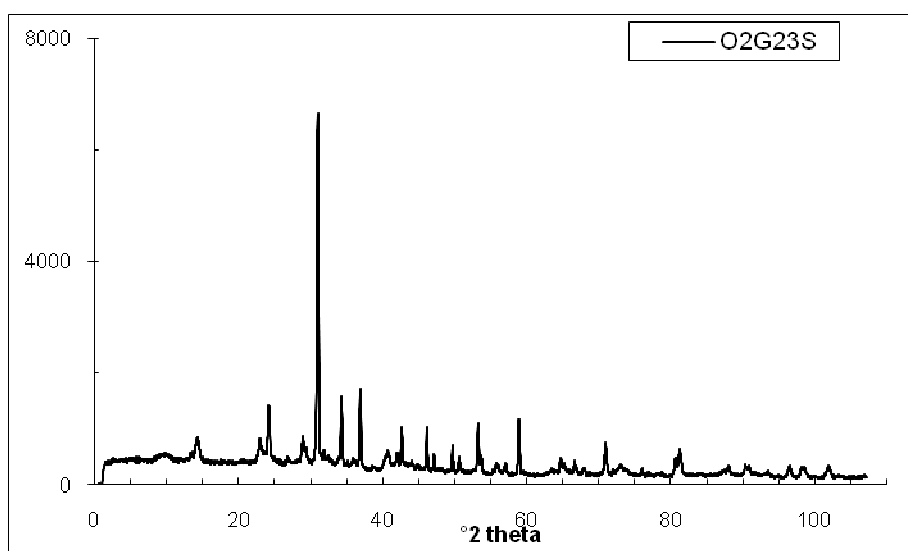
**Figure 38 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O2G21S.**

O2 G21S: (60 à 62% de Qz); (35 à 40% calcite); 5% de kaolinite.



**Figure 39 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O1G23S.**

O1 G23S: (85 à 90% de Qz); 4 à 6% de calcite; (1% NaCl); (1% hémat. + goeth).



**Figure 40 : spectre X-ray de l'échantillon de sol O2G23S.**

O2 G23S: (90% qz); 2 à 3% calcite); 2 à 4% kaol); 6 à 8% NaCl).

### II.3.2 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope est muni de deux types de détecteurs d'électrons : annulaire et latéral. Ces détecteurs permettent de travailler suivant deux modes différents :

- Le mode « électrons secondaires » (Secondary Electron Imaging ou SEI) permettant de visualiser le relief de l'échantillon ;

- Le mode « électrons rétrodiffusés » (Backscattered Electron Imaging ou BEI) permettant de visualiser les contrastes chimiques ;

Les images obtenues (Figures 41 à 47) montrent que les sédiments sont essentiellement composés de grains fins de taille inférieure à 100 µm de quartz, calcite, oxydes de fer, minéraux d'argiles, abarite, biotite,.... Quelques gros grains sont composés d'un assemblage de minéraux de nature différente (quartz, calcite, oxydes de fer, ....).

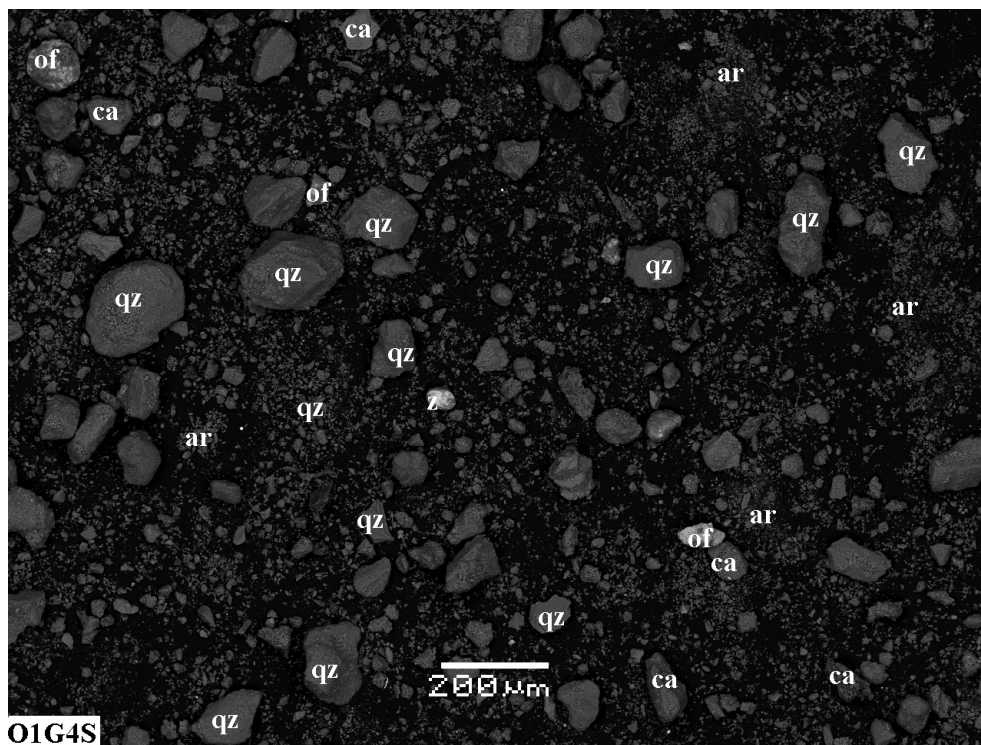


Figure 41 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G4S.

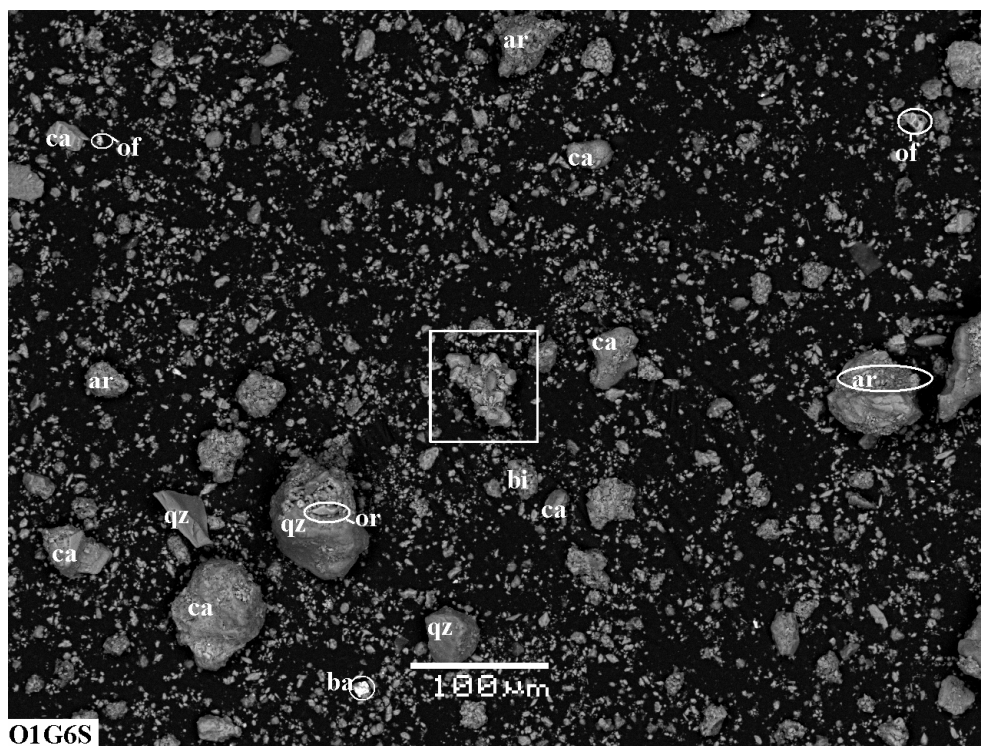


Figure 42 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G06S.

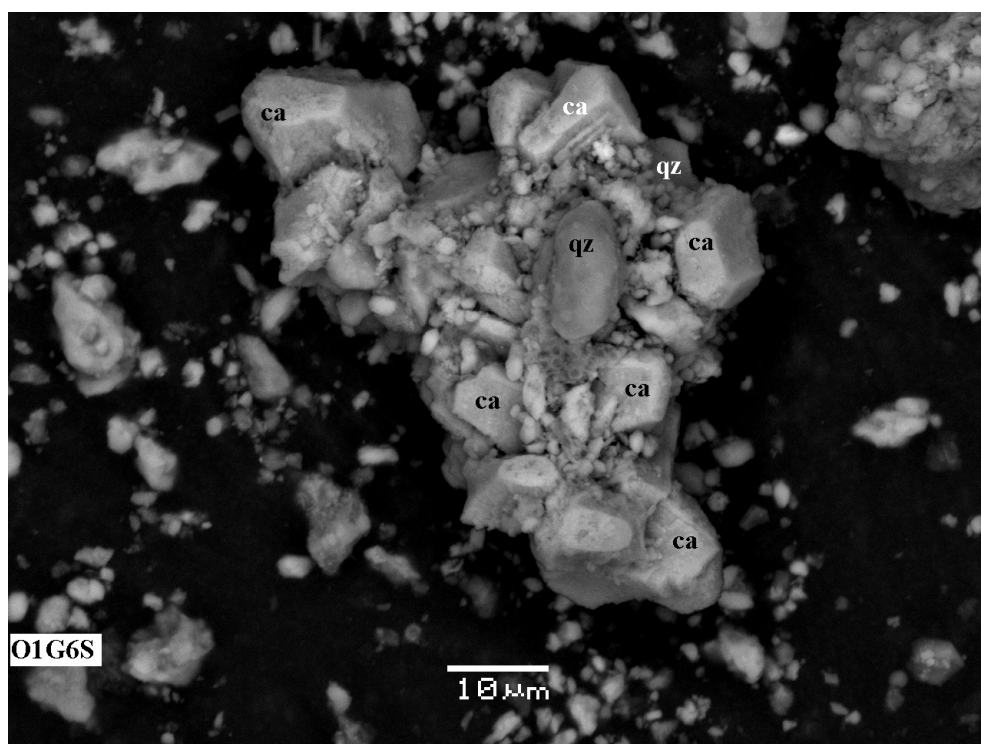


Figure 43 : Image MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G06S dans la figure précédente.

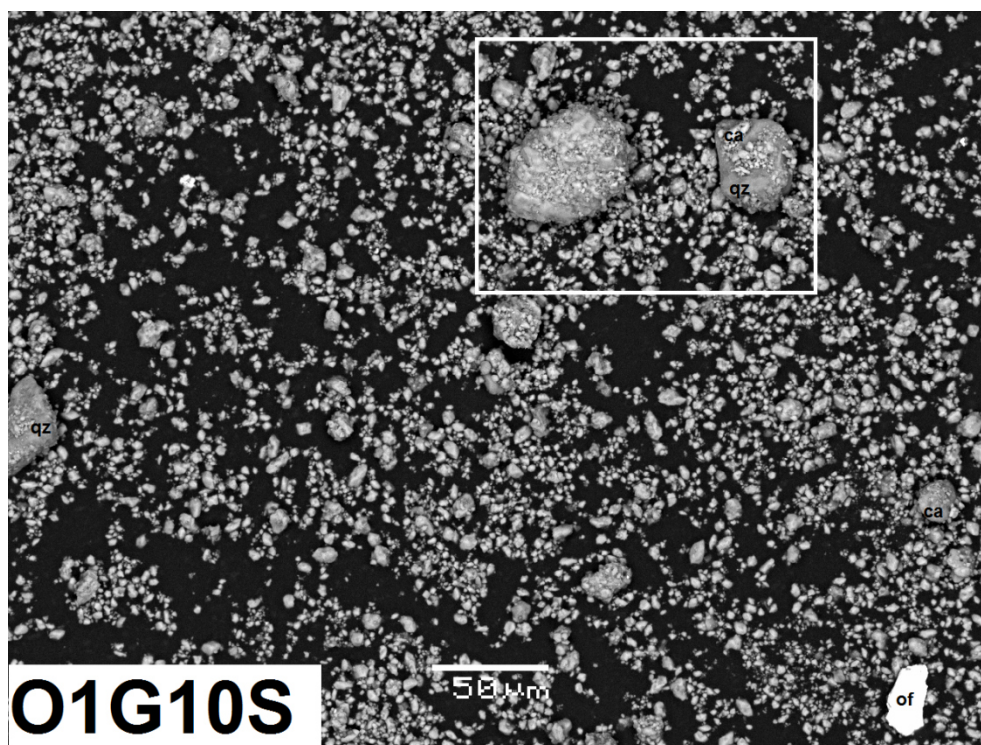


Figure 44 : Image MEB de l'échantillon de sol n° O1G10S.

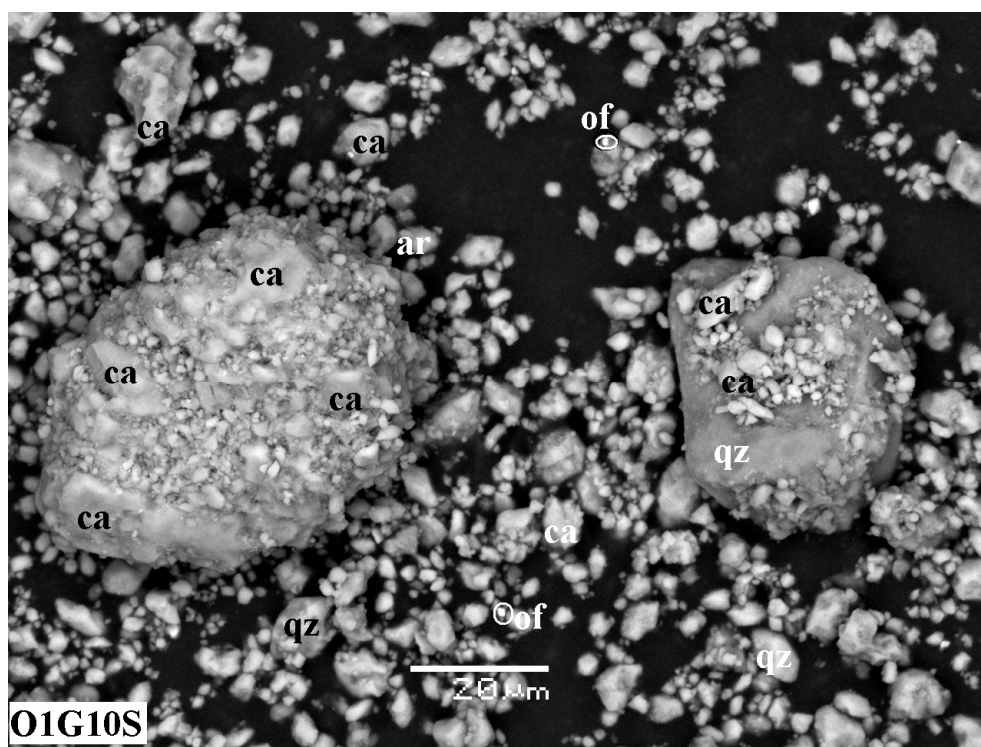


Figure 45 : Images MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G10S dans la figure précédente.

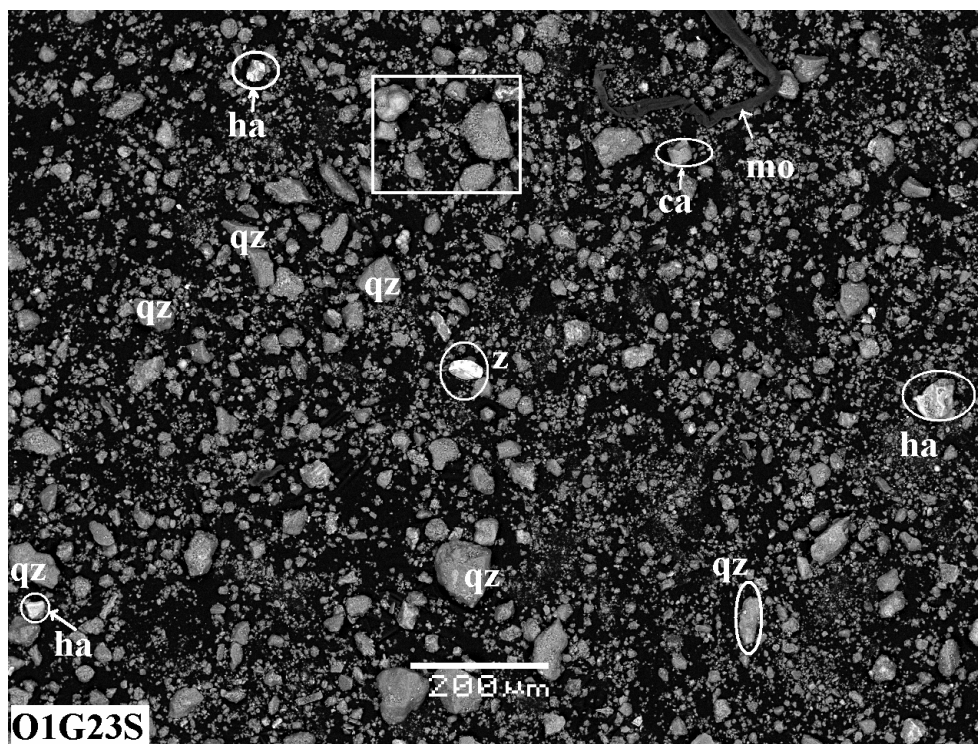


Figure 46 : Images MEB de l'échantillon de sol n° O1G23S.

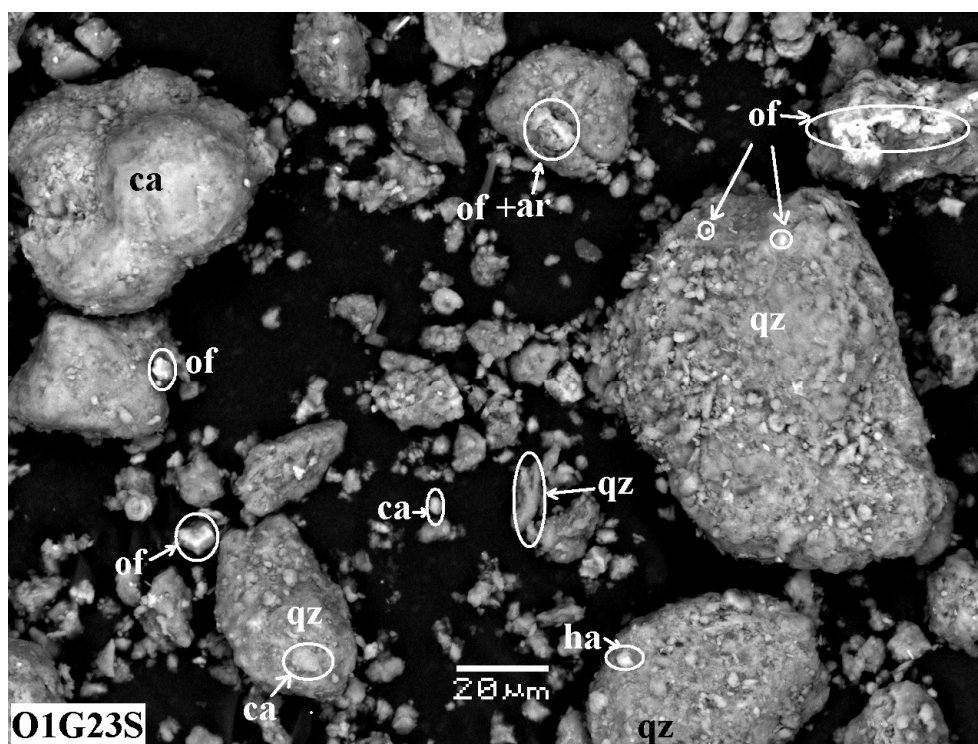


Figure 47 : Images MEB de la zone encadrée de l'échantillon de sol n° O1G23S dans la figure précédente.

## II.4 Géochimie des sols

Les échantillons de sols prélevés dans le bassin versant d'Oued Cherf ont fait l'objet d'une caractérisation chimique des éléments majeurs par fluorescence X faite à l'Université de Annaba et des éléments en traces par ICPMS après mise en solutions au GBE de Toulouse.

### II.4.1 Géochimie des éléments majeurs dans les sols

Les résultats d'analyses des éléments majeurs sont représentés dans le tableau 9. On peut à première vue distinguer trois grands groupes de sols;

- le premier est caractérisé par un pourcentage élevé de SiO<sub>2</sub> qui tourne autour 70% à 80% (Figure 48a) et qui s'exprime minéralogiquement par la prédominance de minéraux de quartz. Cela était confirmé par la caractérisation minéralogique faite au microscope électronique à balayage (Cf. figure 41) et à la diffraction des rayons x (Cf. figure 33). Ce sont des sols qui sont probablement issus de roches gréseuses.

**Tableau 9 : Composition en oxydes des sols, déterminée par fluorescenceX**

<b>Samples</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Pf</b>	<b>Cl</b>	<b>Total</b>
<b>O1G3S</b>	71,37	3,94	3,89	0,09	0,57	10,29	-	0,45	0,07	0,28	8,2	-	<b>99,15</b>
<b>O1G4S</b>	77,89	3,44	3,21	0,03	-	7,73	-	0,4	0,06	0,3	6,2	-	<b>99,26</b>
<b>O1G5S</b>	45,21	3,65	4,06	0,09	0,58	33,41	-	0,45	0,07	0,18	11,46	0,04	<b>99,2</b>
<b>O1G6S</b>	31,77	3,38	4,35	0,08	0,59	32,11	-	0,5	0,08	0,27	26,23	0,02	<b>99,38</b>
<b>O1G7S</b>	42,64	8,96	9,23	0,11	1,36	30,44	-	1,54	0,15	0,59	4,2	0,27	<b>99,49</b>
<b>O1G8S</b>	35,74	11,79	5,71	0,06	1,47	19,59	-	0,81	0,14	0,58	23,4	0,08	<b>99,37</b>
<b>O1G9S</b>	37,88	8,6	5,79	0,09	1,26	19,88	-	1,27	0,15	0,55	22,9	0,3	<b>98,67</b>
<b>O1G10S</b>	18,17	4,57	2,62	0,03	0,87	50,56	-	0,67	0,04	0,35	21,7	-	<b>99,58</b>
<b>O1G12S</b>	29,68	10,12	5,54	0,07	1,27	32,36	-	1,75	0,18	0,46	18,2	0,1	<b>99,73</b>
<b>O1G13S</b>	40,85	2,15	4,64	0,06	-	30,22	-	0,34	0,06	0,18	20,9	-	<b>99,4</b>
<b>O1G14S</b>	44,85	15	7,34	0,08	1,86	23,3	2,1	1,7	0,18	-	2,2	1,05	<b>99,66</b>
<b>O1G15S</b>	28,39	10,44	4,82	0,06	1,33	21,41	0,95	1,12	0,13	0,7	29,8	0,51	<b>99,66</b>
<b>O1G16S</b>	33,07	7,57	4,41	-	0,96	16,54	-	0,71	0,11	0,48	35,4	0,11	<b>99,36</b>
<b>O1G17S</b>	42,21	6,25	4,47	0,08	1,06	16,48	3,35	-	0,09	0,41	21,8	2,98	<b>99,18</b>
<b>O1G20S</b>	51,98	11,68	6,86	0,15	1,9	14,17	-	1,73	0,15	0,79	9,9	-	<b>99,31</b>
<b>O2G21S</b>	48,1	5,41	4,74	0,09	1,08	22,21	-	0,82	0,09	0,45	16,3	0,09	<b>99,38</b>
<b>O1G22S</b>	59,2	8,69	7,1	0,18	1,88	7,81	3,7	-	0,14	0,64	6,5	3,03	<b>98,87</b>
<b>O1G23S</b>	57,89	9,35	7,08	0,18	1,65	7,13	1,51	1,29	0,15	0,66	10,5	0,96	<b>98,35</b>
<b>O1G24S</b>	58,91	5,37	5,99	0,17	1,1	16,5	-	0,69	0,1	0,43	10,1	0,07	<b>99,43</b>

- le second groupe est caractérisé par un taux élevé en CaO de l'ordre de 30% à 50% (Figure 48b) qui s'exprime minéralogiquement par la présence de la calcite en quantité importante (Cf. figures 36, 44 et 45). Ce type de sol serait issu de l'altération de la calcite qui est le principal minéral des roches calcaires.
- le troisième est caractérisé par un pourcentage important en alumine de l'ordre de 10% à 15% (Figure 48c) qui s'exprime minéralogiquement par la présence des minéraux argileux (Cf. figure 37). Ce type de sol serait issu de l'altération des roches argileuses et marneuses.

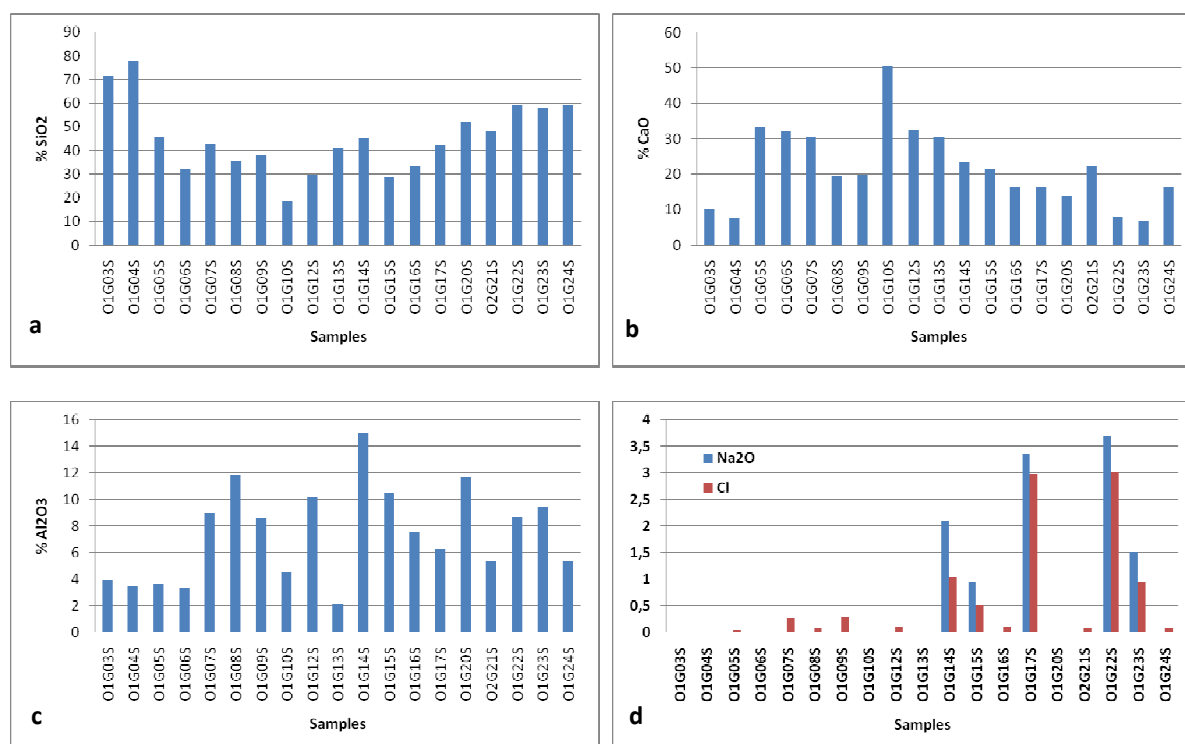


Figure 48 : Comportement des éléments majeurs dans les sols du BV d'Oued Cherrf.

- Le chlore est toujours associé au sodium car les échantillons présentant un pourcentage important en Na<sub>2</sub>O ont également une quantité notable en Cl (Figure 48d) expliquant ainsi la salinité de ce type de sol qui s'exprime minéralogiquement par la présence de minéraux de sel telle que la halite (Cf. Figures 39, 40, 46 et 47). La cristallisation de sel est surtout favorisée par l'évaporation de l'eau pendant la période des basses eaux avec le développement des encrustements de sel dans certains endroits (Figure 49).



Figure 49 : Développement des encrustements de sel sur le sol du BV d'Oued Cherf.

La projection des résultats d'analyses des éléments majeurs dans des diagrammes binaires ne montre pas de corrélations nettes des oxydes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  en fonction de la silice (Figure 50) témoignant que cette dernière se retrouve plus fréquemment libre dans les sols sous forme de grains de quartz, mais elle est parfois associée au  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{K}_2\text{O}$  que l'on peut attribuer aux minéraux argileux.

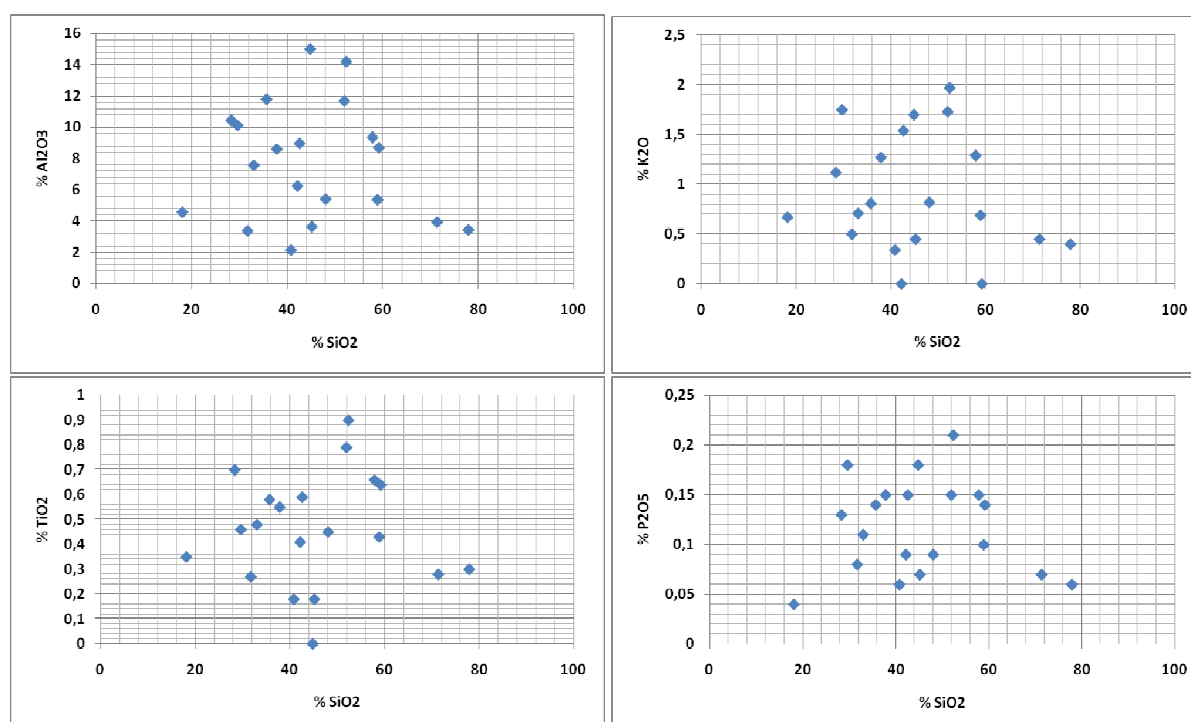
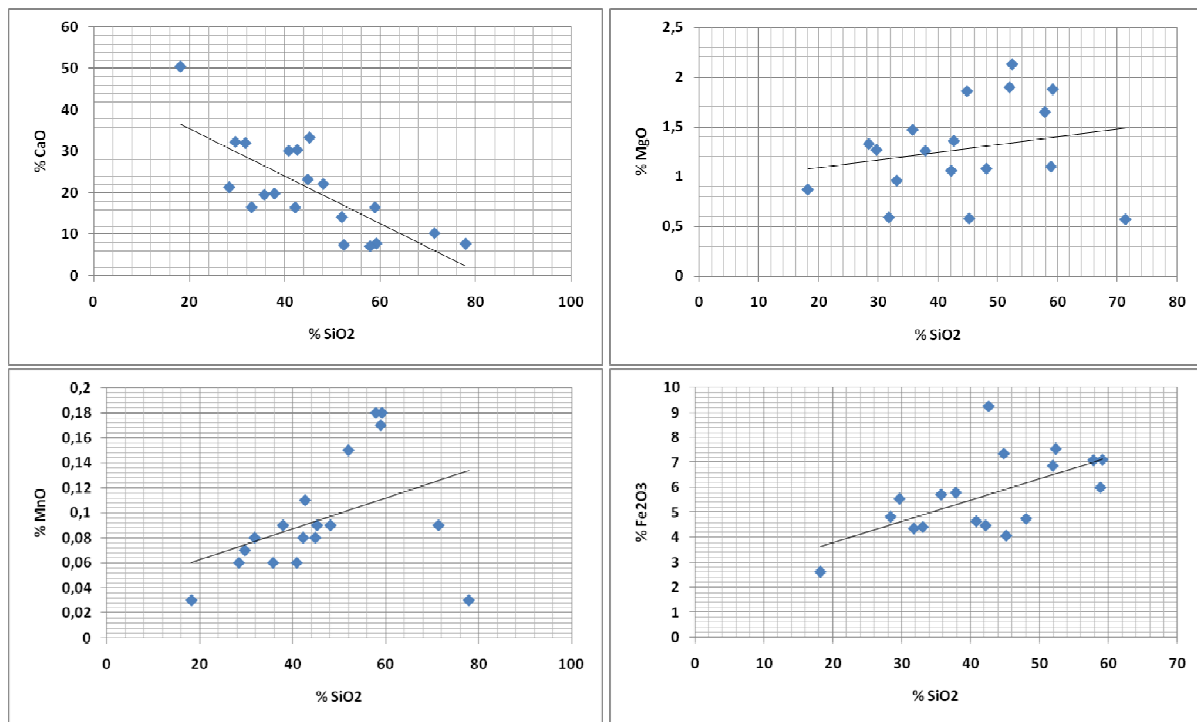


Figure 50 : Variation de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  en fonction de la silice dans les sols du BV d'Oued Cherf.

Une bonne corrélation négative du  $\text{CaO}$  en fonction de  $\text{SiO}_2$  (Figure 51) est à signaler témoignant de l'indépendance des ces deux oxydes l'un de l'autre et de l'origine différente

des deux types de sol. Les oxydes de magnésium, manganèse et fer sont plus fréquemment associés à la silice en montrant de bonnes corrélations positives (Figure 51).



**Figure 51 : Variation de CaO, MgO, MnO et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en fonction de la silice dans les sols du BV d'Oued Cherf.**

## II.4.2 Géochimie des éléments traces

Les éléments traces en Sciences de la Terre sont les 68 éléments constituant la croûte terrestre dont la concentration pour chacun d'entre eux est inférieure à 0,1 %. Ils ne représentent à eux tous que 0,6 % du total, alors que les 12 éléments majeurs (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P, Mn) interviennent pour 99,4 % (Baize, 1997).

Les éléments traces peuvent être des métaux (ex : Cd, Cu, Ni, Zn, Pb) ou des éléments non métalliques (ex : As, Se). Leurs origines dans le sol sont nombreuses, mais l'altération de la roche mère est la source principale du fond pédo-géochimique.

Les éléments traces sont présents naturellement en quantités très faibles dans le sol, l'eau et l'air. Mais certaines de ces substances montrent, à certains endroits, une présence anormalement élevée qui a généralement une origine anthropique. L'absorption de certaines de ces substances par des organismes vivants n'est pas nécessairement problématique. Au contraire, beaucoup d'éléments traces sont même utiles dans les

processus biologiques. Le fer, par exemple, est un composant essentiel de l'hémoglobine ; le cuivre et le zinc sont des oligo-éléments indispensables. On parle alors d'éléments traces essentiels. En revanche, il existe d'autres éléments traces, dits non-essentiels, qui n'ont pas de rôle positif connu dans l'activité biologique mais qui sont à risques pour la santé humaine. Il s'agit en particulier de l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le sélénium (Se).

L'eau et les sols sont les deux sources par lesquelles les éléments traces s'introduisent dans la chaîne alimentaire. Förstner et Wittman (1981) ont établi un classement des éléments selon trois critères, en tenant compte de leur dangerosité vis à vis de l'environnement :

- Les non critiques : Na, K, Mg, Ca, H, O, N, C, P, Fe, S, Cl, Br, F, Li, Rb, Sr, Al, Si ;
- Les toxiques mais très insolubles ou très rares : Ti, Hf, Zr, W, Nb, Ta, Re, Ga, La, Os, Rh, Ir, Ru, Ba ;
- Les très toxiques et relativement répandus : Be, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, As, Se, Te, Pd, Ag, Cd, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Sb, Bi.

Les résultats d'analyse des éléments traces sont présentés dans le tableau 10. Un traitement géochimique des données a été mené pour caractériser nos sols, étudier le comportement des éléments traces et établir la relation qui existe entre eux.

#### ***II.4.2.1 Zinc (Zn), Cadmium (Cd) et Plomb (Pb)***

Le zinc est un chalcophile. On l'extrait de son minerai principal qui est le sulfure de zinc appelé blende ou sphalérite (ZnS). On peut le trouver aussi sous forme de carbonates (smithsonite, ZnCO<sub>3</sub>) et sous forme d'oxyde (zincite, ZnO). L'altération des sulfures par oxydation produit la libération de l'ion zincique : ( $ZnS + 2O_2 = Zn^{2+} + SO_4^{2-}$ ). Le zinc est utilisé en premier lieu dans la galvanisation des aciers. C'est aussi un oligo-élément, essentiellement en zone de sols fortement calcaires, mais une quantité importante peut entraîner un phénomène de toxicité. La teneur moyenne du zinc dans les sols varie entre 10 à 300 mg/kg (Mihaljevic, 1999) avec une moyenne estimée à 64 mg/kg (Kabata-Pendias, 2000).

**Tableau 10 : Composition chimique en éléments traces (mg/kg) des sols.**

Sample	O1G3S	O1G4S	O1G5S	O1G6S	O1G7S	O1G8S	O1G9S	O1G10S	O1G12S	O1G13S	O1G14S	O1G15S	O1G16S	O1G17S	O1G20S	O2G21S	O1G22S	O1G23S	O1G24S
<b>V</b>	44,85	37,02	46,70	46,41	79,92	96,62	78,76	35,57	99,60	41,11	129,07	121,40	110,55	64,53	98,76	66,83	88,49	96,53	58,83
<b>Cr</b>	33,50	29,53	25,62	27,60	61,63	75,42	63,58	29,29	69,51	20,53	92,63	83,08	77,94	48,56	81,97	45,66	80,62	90,60	46,18
<b>Co</b>	12,81	6,75	10,56	7,80	11,69	12,71	12,58	9,88	9,38	12,90	10,39	10,87	11,26	12,96	13,99	16,01	17,08	19,80	15,10
<b>Ni</b>	26,98	14,02	23,03	18,29	32,24	33,41	28,17	13,31	39,62	14,06	30,83	27,39	28,57	24,87	31,39	24,89	34,47	37,77	26,62
<b>Cu</b>	13,61	8,75	12,50	10,90	23,97	20,32	17,57	29,08	24,90	8,72	16,73	13,29	16,62	16,45	22,99	14,19	29,33	36,72	19,25
<b>Zn</b>	143,37	45,74	62,61	64,39	102,40	91,34	81,84	53,39	158,52	666,46	98,54	90,56	91,96	94,36	111,14	80,17	111,78	119,25	90,59
<b>Ga</b>	4,97	3,96	4,31	4,53	10,73	15,38	12,19	5,37	13,65	2,51	15,85	14,43	12,27	8,52	14,00	7,27	11,88	13,25	6,98
<b>Rb</b>	18,24	16,09	16,67	19,72	52,19	73,97	55,07	21,33	77,06	10,14	51,68	42,18	38,47	32,15	52,60	27,62	40,56	46,03	22,32
<b>Sr</b>	138,25	130,69	407,85	325,79	503,08	438,57	643,96	214,17	484,27	1288,53	509,80	610,13	510,93	523,25	564,15	629,66	346,37	345,89	358,94
<b>Zr</b>	38,15	55,11	29,63	29,51	49,02	59,32	60,67	34,12	41,61	20,17	75,16	62,04	57,72	51,37	71,61	55,44	79,30	87,51	52,03
<b>Nb</b>	5,26	4,95	3,16	3,53	6,75	9,86	8,76	4,68	7,52	0,75	13,24	11,47	10,13	7,17	13,12	6,09	12,47	13,67	6,97
<b>Mo</b>	1,97	1,30	0,82	0,89	1,54	0,87	1,40	0,42	1,23	1,68	1,13	1,07	1,02	1,07	1,39	1,35	1,45	1,61	2,05
<b>Cd</b>	0,55	0,09	0,16	0,19	0,21	0,18	0,23	0,16	0,29	5,29	0,22	0,22	0,22	0,15	0,21	0,18	0,16	0,17	0,19
<b>Sn</b>	0,79	0,65	0,78	0,89	1,44	2,03	1,69	0,88	2,12	0,47	1,91	1,70	1,65	1,16	1,86	2,01	1,59	1,74	0,96
<b>Sb</b>	0,73	0,54	1,67	1,44	1,46	14,33	17,38	0,71	0,66	0,43	0,55	0,60	0,51	0,45	1,10	0,71	0,55	0,62	0,95
<b>Ba</b>	361,72	122,43	329,55	236,79	565,80	301,50	336,71	199,99	284,70	590,32	229,44	166,95	205,50	348,62	289,14	254,60	523,02	511,57	386,50
<b>W</b>	31,09	25,59	32,12	14,98	10,28	9,11	9,91	28,09	5,14	106,56	9,35	7,15	15,26	11,07	29,45	66,17	17,62	23,24	53,20
<b>Pb</b>	81,51	12,35	11,93	9,40	14,69	14,88	13,80	7,05	8,94	381,34	16,91	15,57	17,28	16,43	23,70	17,20	18,35	21,07	17,00
<b>Th</b>	3,14	3,05	2,85	2,31	5,29	7,08	6,04	3,02	5,49	1,71	6,93	6,12	5,67	4,72	7,16	4,28	7,06	7,59	4,00
<b>U</b>	1,00	0,70	0,89	0,81	1,57	1,84	1,84	0,76	2,93	0,58	1,88	1,97	1,63	1,32	1,66	1,40	1,52	1,64	1,10

La teneur moyenne des sols en zinc varie entre 10 et 300 ppm Mihaljevic (1999) avec une moyenne de 64 ppm (Kabata-Pendias, 2000). Le zinc dans nos échantillons présente des teneurs dans les normes citées dans la littérature avec une moyenne de l'ordre de 124 ppm et un pic de 666,5 pour l'échantillon O1G13S prélevé à l'embouchure d'un petit ravin qui parcourt des terres agricoles avant de se jeter dans le barrage ce qui fait penser à une origine anthropique telle que l'incinération des déchets ménagers.

Le cadmium est un métal blanc, mou et malléable. Il ternit au contact de l'air (Callender, 2003). Il est présent dans presque tous les minerais de zinc, de plomb et de cuivre, ainsi que dans des phosphates naturels (Hurlbut Jr and Klein, 1982a). Ses effets toxiques ne le sont pas seulement pour l'homme, mais aussi pour les végétaux et les animaux (Benito et al., 1999). L'usage de plus en plus fréquent de zinc dans les fertilisants et l'usage de phosphates naturels peuvent apporter des contaminations en cadmium ce qui explique le pic de 5,29 ppm enregistré pour l'échantillon O1G13S.

Le plomb est un produit naturel de la désintégration de l'uranium (Mahan, 1987). Il est associé au gisement de sulfures ; on l'extrait de sa source minérale principale, la galène (PbS) qui en contient 86.6% en poids, mais aussi des minerais associés aux Zn (la sphalérite), à l'argent et le plus abondamment au cuivre (Hurlbut Jr and Klein, 1982b). On le trouve également comme élément trace dans de nombreux minéraux tels que les feldspaths, les micas, le zircon et la magnétite. A la différence du Zn, le Pb n'est pas un oligo-élément car il possède un caractère toxique bien connu (Nriagu, 1978). Dans les sols, le plomb est surtout associé aux minéraux argileux, adsorbé sur les oxydes et oxyhydroxydes de Mn, Fe et Al. Dans certains cas, il peut être associé aux carbonates et aux phosphates. La teneur moyenne du Pb dans les sols naturels a été estimée par Kabata-Pendias (2000) à 25 mg/kg, au-dessus de cette valeur une influence anthropique demeure possible.

Nos échantillons de sol présentent des concentrations en zinc variant de 46 mg/kg à 666 mg/kg avec une concentration moyenne de l'ordre de 124 mg/kg. Le cadmium a une valeur moyenne de 0,48 mg/kg avec un pic d'une valeur de 5,29 mg/kg. Le plomb varie de 7 mg/kg à 381 mg/kg avec une moyenne de 37,86 mg/kg. Il est remarquable que le zinc et le cadmium sont combinés au plomb comme cela est souvent la règle dans les sols. Cela peut être expliqué par leur association dans le minerai source qui serait probablement des

sulfures avant d'être libérés par altération. Le pic enregistré pour l'échantillon a probablement une origine anthropique.

La projection des résultats d'analyses des échantillons de sols dans des diagrammes binaires montrent que le Zn et le Cd présentent des corrélations positives avec le Pb (Figure 52) témoignant de leur présence ensemble dans le plasma, ce qui plaide pour une origine commune des trois éléments. Le diagramme en courbes de variation de Pb, Zn et Cd (Figure 53) met encore en valeur l'association des trois éléments et fait apparaître une anomalie qui matérialisée par le pic de l'échantillon O1G13S.

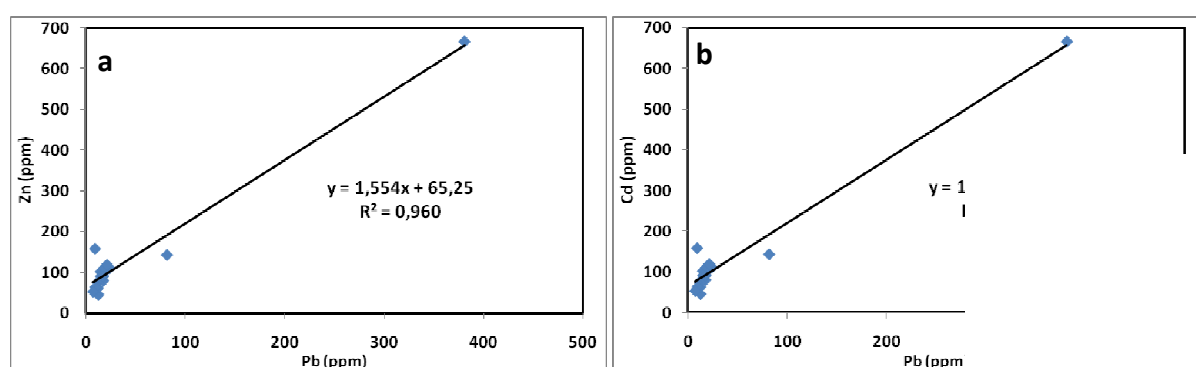


Figure 52 : Relations du Pb avec le Zn et le Cd dans les sols du BV d'Oued Cherf.

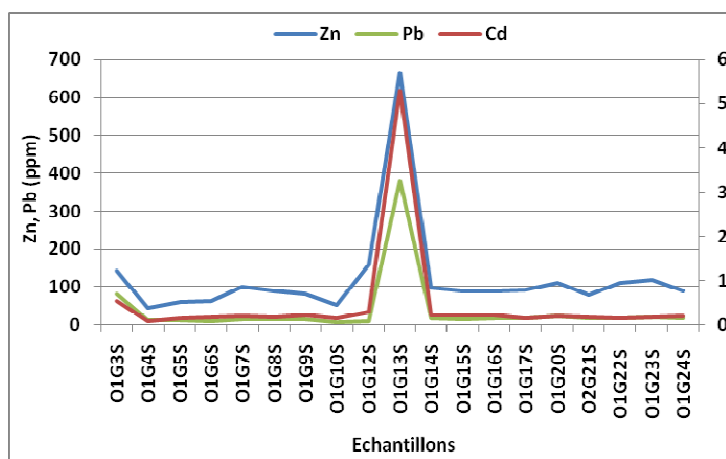


Figure 53 : Courbes de variation de Zn, Pb et Cd dans les échantillons de sols du BV d'Oued Cherf.

#### II.4.2.2 Vanadium (V), Chrome (Cr), Rubidium (Rb), Galium (Ga), Niobium (Nb) et Etain (Sn)

Le vanadium (V) est un métal blanc, argenté, dur, ductile et résistant à la corrosion. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité. Le principal minéral de vanadium est la patronite (VS<sub>4</sub>). Le vanadium est utilisé principalement (90 %) dans les alliages (ferro-

vanadium) pour la fabrication d'acier de haute résistance mécanique. La concentration de vanadium (V) varie de 35 ppm à 129 ppm avec une moyenne de 76 ppm.

Le chrome (Cr) est essentiellement un élément lithophile. Le clark est de l'ordre de 100 à 200 mg/kg dans la croûte terrestre. Le principal minéral de chrome est la chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) qui est une espèce minérale du groupe de spinelle. L'élément est assez abondant dans des roches magmatiques ultrabasiqes. Les minéraux silicates, comme la muscovite, le pyroxène, l'épidote, la chlorite, le grenat (ouvarovite) contiennent très communément des traces d'élément de chrome. La concentration du chrome dans nos sols est très faible et varie 20,5 à 92,5 ppm avec une moyenne de 57 ppm soit 1/2 à 1/4 les teneurs mesurées habituellement dans les sols.

Le rubidium (Rb) est un métal alcalin mou, d'éclat blanc argenté. On le trouve sous forme de traces dans la carnallite ( $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Comme les autres métaux alcalins, le rubidium s'enflamme spontanément au contact de l'air et réagit violemment avec l'eau. L'alliage de césium et de rubidium est utilisé dans le domaine photovoltaïque. Certains verres de sécurité contiennent du rubidium. Il peut être maintenu liquide à température ambiante grâce au phénomène de surfusion, comme le césium et le gallium. La concentration du rubidium dans nos échantillons de sol varie de 10 ppm à 77 ppm avec une moyenne qui tourne autour 37 ppm.

Le gallium (Ga) est un métal à aspect argenté, il se brise sous forme solide de la même manière que le verre. Il est présent dans la nature à l'état d'oxydation +3. Il se rencontre sous forme d'impuretés dans les minerais d'aluminium (bauxite). Le Ga dans nos sols présente des concentrations allant de 2,5 ppm à 16 ppm avec une moyenne de 9,6 ppm.

Le niobium (Nb) est l'un des métaux les plus réfractaires connus. Il ne fond qu'à 2468°C. C'est un élément lithophile souvent associé au  $\text{Ta}^{5+}$ . Les minerais les plus riches en niobium sont les colombites  $(\text{Fe, Mn})(\text{Nb, Ta})_2\text{O}_6$  et les pyrochlores  $(\text{Ca, Na})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH.F})$ . Des traces de Nb peuvent être présentes dans la biotite, le rutile, le sphène, la cassitérite et le zircon. La teneur moyenne du Nb dans les sols naturels est de 9,7 ppm, mais elle peut aller de 0,4 ppm à 134 ppm. Nos sols présentent des teneurs faibles en Nb variant de 0,75 ppm à 13,67 ppm avec une moyenne de l'ordre de 7,87 ppm.

L'étain (Sn) C'est un métal gris-argent, malléable, moyennement ductile à température ambiante. On le trouve dans la nature principalement sous forme de cassitérite, qui est l'oxyde  $\text{SnO}_2$ , et dans des sulfures mixtes tels que la stannite,  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_2$  et la téallite,  $\text{PbZnSnS}_2$ . Les teneurs en étain dans les roches varient en fonction de la nature de la roche ; elles sont plus faibles dans les roches éruptives basiques (basalte, gabbro...) : 1,5 ppm que dans les roches éruptives acides (granite...) : 3 ppm et que dans les roches métamorphiques et sédimentaires (schistes et argiles) : 10 ppm (Vinogradov, 1959). Dans les sols la teneur en étain peut atteindre 10 ppm. Dans nos sols l'étain présente des concentrations faibles allant 0,47 ppm à 2,12 ppm avec une moyenne de 1,39 ppm.

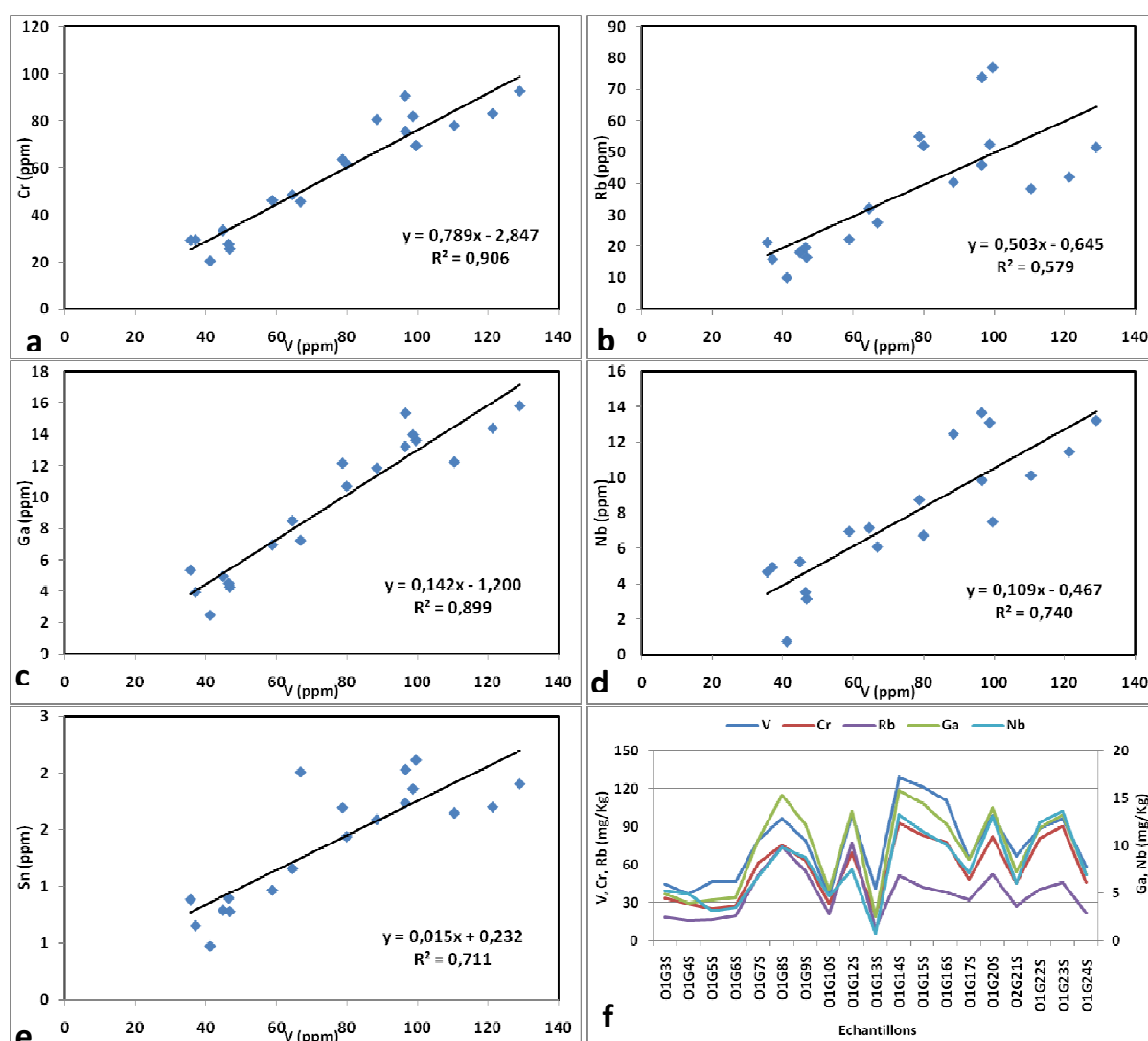


Figure 54 : Relations entre les éléments de Vanadium, Chrome, Rubidium, Galium, Niobium et Etain dans les sols du BV d'Oued Cherf.

La projection d'analyses des éléments traces dans des diagrammes binaires (Figure 54a, b, c, d, e) montre des corrélations positives nettes des éléments de chrome (Cr),

Rubidium (Rb), Galium (Ga), Niobium (Nb) et Etain (Sn) avec le Vanadium (V) cela signifie que ces éléments ont le même comportement géochimique et sont entièrement associés les uns aux autres. La projection des résultats d'analyses dans un graphique en courbes (Figure 54f) confirme les constatations précédentes. Les courbes des éléments prennent une allure quasiment semblable.

### **III. Pétrographie**

Les échantillons de roches prélevés dans le bassin versant de l'Oued Cherf ont fait l'objet d'une étude pétrographique. Ils représentent les différents types de roches affleurant, ce sont essentiellement des calcaires, grès, gypses et marnes.

#### **III.1 Calcaires**

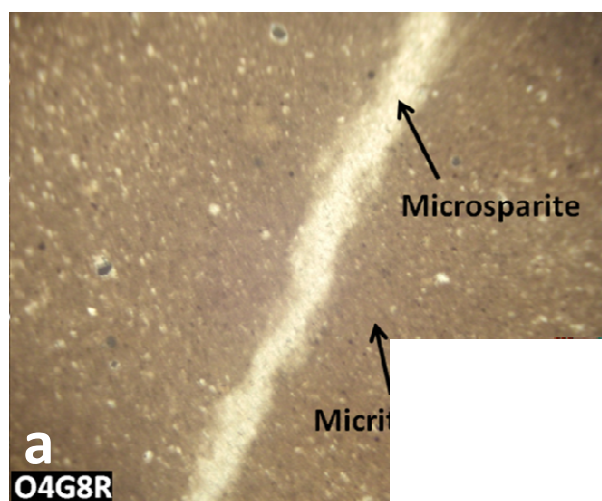
Les calcaires du bassin versant de l'Oued Cherf affleurent en plusieurs endroits et se présentent sous différentes formes et variétés. Les travaux réalisés lors des sorties de terrain nous ont permis d'échantillonner quelques types en vue d'une étude pétrographique. Parmi les affleurements de calcaires observés on peut citer :

- Les calcaires massifs à Nummulites.
- Les calcaires en croûtes massives blanchâtres qui se présentent soit en petites masses soit des surfaces allongées de formes variées.
- Les calcaires blancs bitumineux à cassures noires et à silex noirs à globigérines.
- Les calcaires lacustres blancs ou roses qui affleurent à l'Oued Hamimine au nord de la feuille de Bir Bouhouche.
- Les calcaires gréseux roux ou bruns riches en débris d'huitres.
- Les petits bancs de calcaires à Incérâmes.

L'étude pétrographique des calcaires échantillonnés dans le bassin versant de l'Oued Cherf révèle des variétés importantes d'un affleurement à un autre :

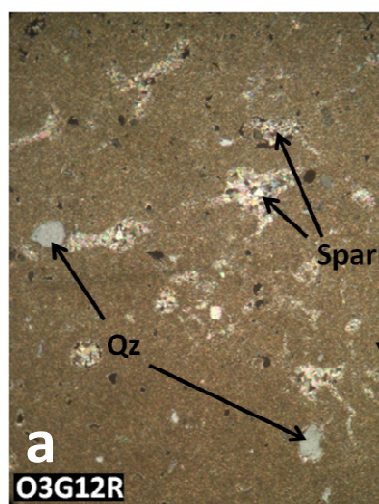
- Des calcaires noirs à matrice carbonatée micritique très fine qui forme la presque totalité de la roche avec quelque grains de quartz très fins d'origine détritique et de quelques microveinules remplies de calcite microcristallin (microsparite) (Figure 55a).

- Des calcaires noirs à ciment carbonaté micritique avec quelques bic foraminifères à forme enroulée et rectiligne et de microveinules rei carbonatée finement cristallisée (microsparite) (Figure 55b).



**Figure 55 : Aspect microscopique des calcaires micritiques à microv microcristalline.**

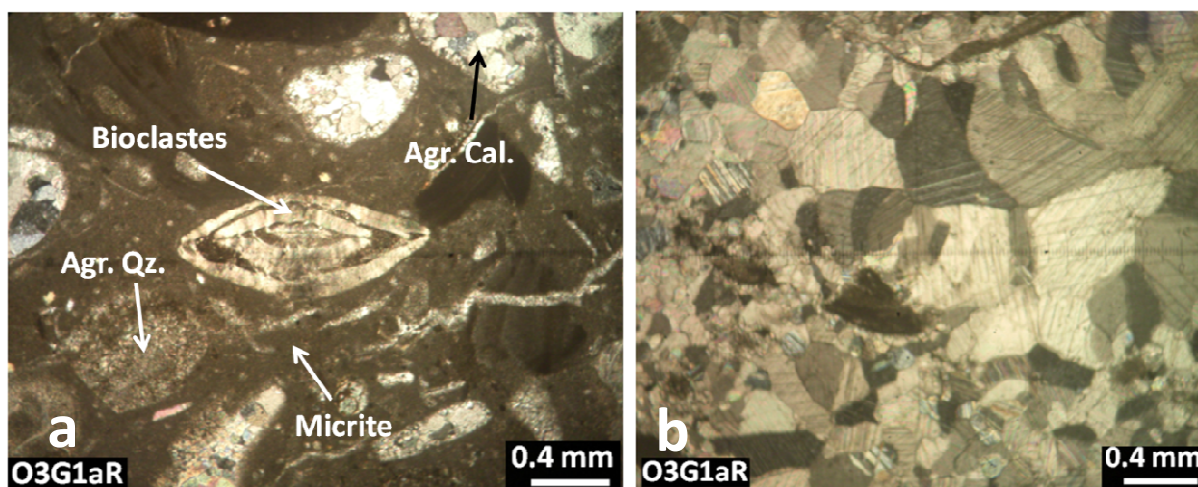
- Des calcaires noirs à matrice carbonatée micritique formant la majeure partie de la roche avec quelques grains de quartz détritique monocristallin de taille allant de 50µm à 200µm et quelques poches de calcite cristallisée (sparite) (Figure 56a).
- Des calcaires clairs à matrice carbonatée micritique avec quelques bioclastes allant de 20µm à 200µm représentés par des foraminifères (globigé



**Figure 56 : Aspect microscopique de calcaires, (a) à poches de sparite et**

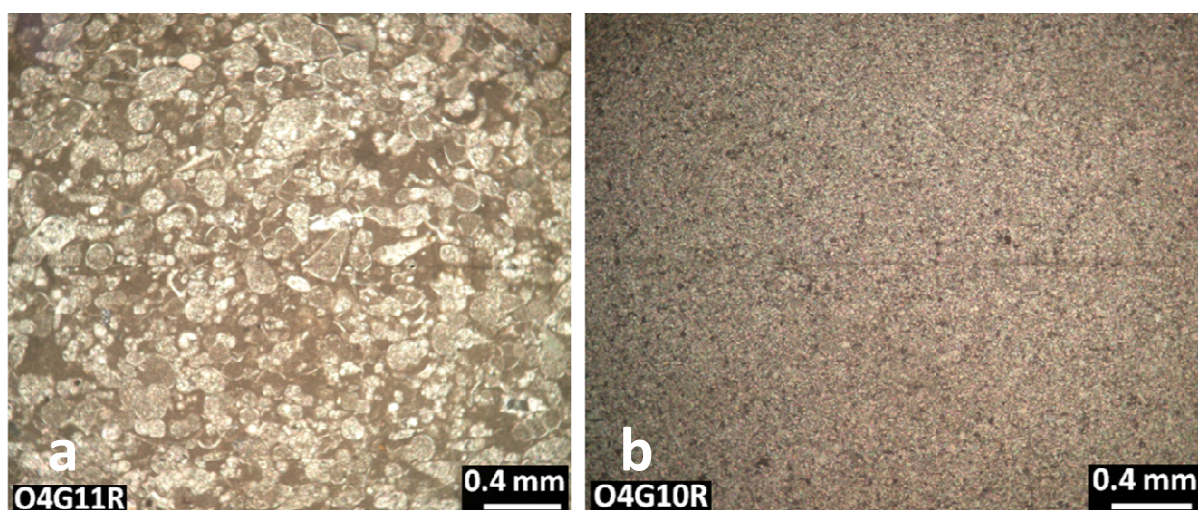
- Des calcaires à ciment carbonaté micritique qui occupe environ 50% de la roche avec des bioclastes de foraminifères représentés essentiellement par des Nummulites de taille allant de 1mm à 1,5mm et des grains en agrégat de calcite cristallisée (sparite) et parfois de quartz (Figure 57a). On not

présence de la calcite sparitique remplissant des poches et des veines. Ces veines de calcite cristallisée atteignent par fois une largeur de 5mm (Figure 57b).



**Figure 57 : Aspect microscopique des calcaires, (a) à Nummulites et (b) une veine à remplissage de calcite cristallisée.**

- Des calcaires coquilliers avec des éléments qui forment  $\approx 70\%$  de la roche dans un ciment carbonaté micritique. Les éléments sont des fragments de coquilles et des foraminifères avec des formes de pelets (Figure 58a).
- Des calcaires totalement formés par de la calcite microcristallin (microsparite) (Figure 58b).



**Figure 58 : Aspect microscopique des calcaires, (a) coquilliers, (b) microsparitiques.**

### III.2 Grès

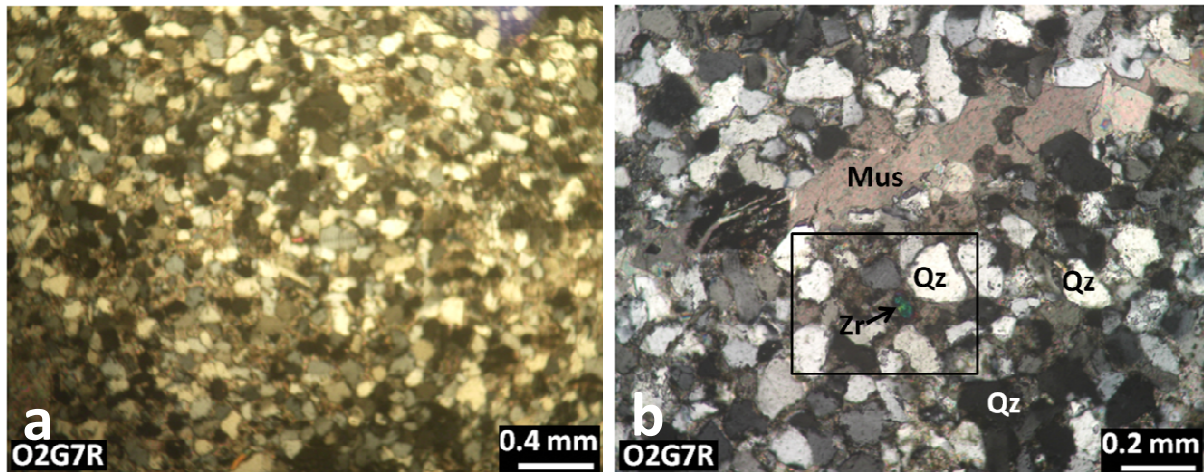
Les formations gréseuses affleurant au bassin versant de l'Oued Cherf sont nombreuses, parmi lesquelles on peut citer :

- Les grès numidiens qui forment la nappe des flyshs.

- Les grès qui affleurent à l'Oued Hamimine au nord de la feuille de Bir Bouhouche.
- Les grès de Djebel Teraguelet.
- Les masses grès-pélitiques rouges qui affleurent au Djebel Tiguilaline.
- Les grès calcaires bruns bien dégagés par l'érosion qui s'intercalent dans une puissante série de marnes et d'argiles.

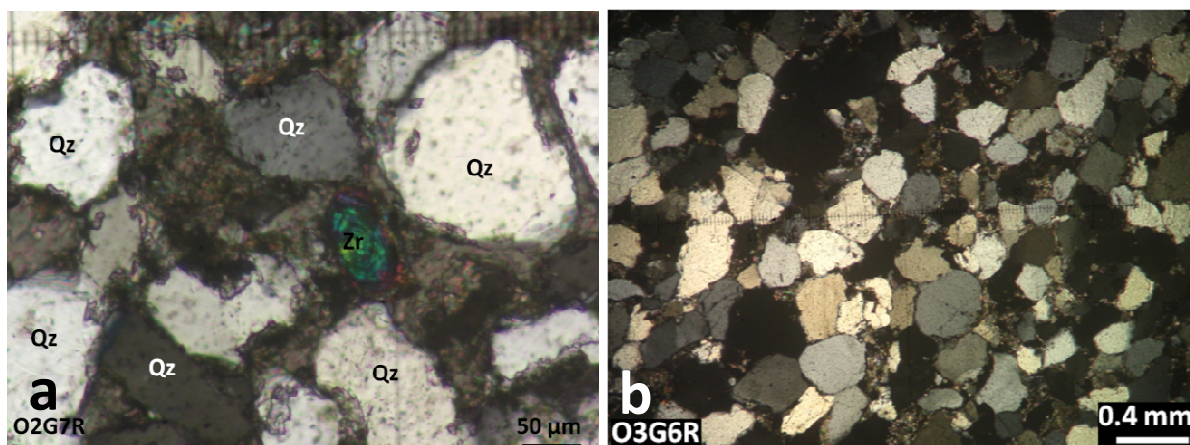
L'examen microscopique des grès échantillonnés dans le bassin versant de l'Oued Cherf montre qu'ils sont essentiellement formés de quartz détritique subanguleux à subémoussé très souvent monocristallin mais parfois polycristallin avec un pourcentage variable d'un échantillon à un autre dépassant le plus souvent les 75%. La taille des grains de quartz est petite dans certains échantillons ( $\approx 0.1\text{mm}$ ) et est moyenne dans d'autres ( $\approx 0.3\text{mm}$  en moyenne mais peut atteindre  $0.8\text{mm}$ ).

Les micas sont peu nombreux et sont représentés par des paillettes de muscovite mais parfois par de la biotite (Figure 59). Les feldspaths représentés pas de l'orthose et un peu moins par du plagioclase. Le zircon est présent en quantité notable dans certains échantillons mais rare dans d'autres. Il est souvent de petite taille et de forme arrondie à subarrondie, rarement automorphe (Figures 59b et 59a). On note parfois la présence de microveinules remplies de calcite bien cristallisée qui parcourent la roche de grès.



**Figure 59 : Aspect microscopique des grès à ciment carbonaté.**

Le ciment, souvent carbonaté est d'une granulométrie fine mais qu'on peut quand même reconnaître en LPA par ses teintes de biréfringence caractéristiques dans le gris rose d'ordre élevé (Figure 60a). En plus du caractère carbonaté du ciment, il est également ferrugineux et argileux par endroits.



**Figure 60 : Aspect microscopique des grès à ciment carbonaté.**

(a) Détail de la zone encadrée de l'échantillon de roche n° O2G7R dans l'image précédente.

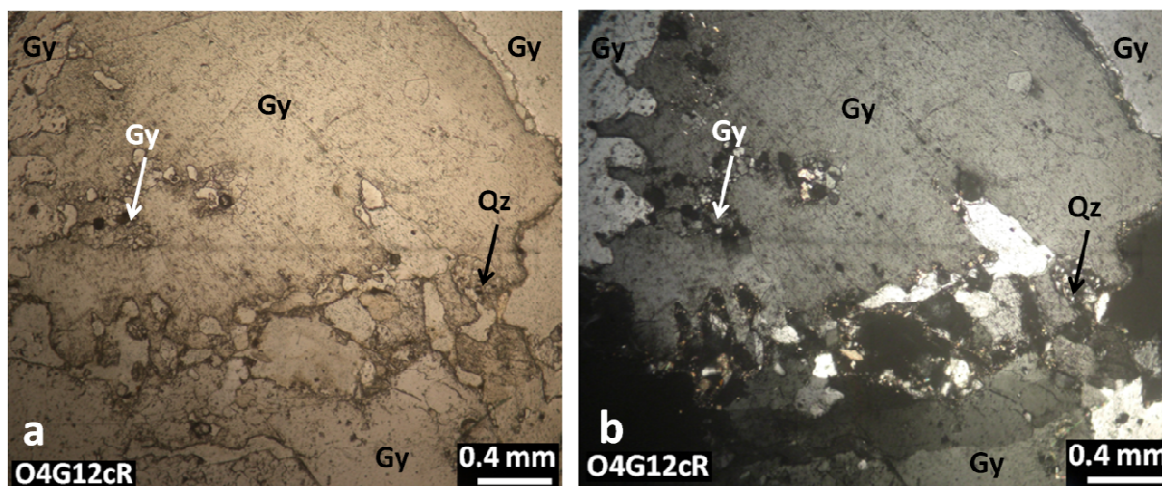
(b) Grès à grains moyens.

### III.3 Evaporites (Trias)

Les évaporites constituent les formations du Trias. Elles affleurent en différents endroits. Parmi ces formations on peut citer :

- Les évaporites de la klippe de Bir Bouhouche.
- Les évaporites occupent de vastes surfaces du Djebel Zouabi.
- Les évaporites qui affleurent au Djebel Tiguilaline au sud ouest de la ville de Sedrata.
- Les évaporites qui affleurent entre la sortie de la ville de Sedrata et de Djebel Zouabi.

L'examen microscopique de quelques échantillons de roches évaporitiques taillés dans le bassin versant de l'Oued Cherf montre qu'elles sont formées essentiellement par de gros cristaux de gypse ( $\approx 3\text{mm}$  environ), qu'on peut facilement reconnaître en LPNA par leur transparence parfaite et leurs traces de clivage et en LPA par leur faible biréfringence avec la teinte grise du premier ordre proche à celle du quartz, englobant parfois des poches de cristaux de quartz et même de gypse (Figure 61). L'espace intragranulaire est très souvent rempli de carbonates microcristallins.



**Figure 61 : Aspect microscopique des évaporites, (a) en LPNA, (b) en LPA.**

Gy : gypse, Qz : quartz.

Dans certains échantillons, les cristaux de gypse tapissent toute la matrice de la roche évaporitique en englobant des inclusions de minéraux carbonatés de petite taille, de quartz, de feldspaths et de minéraux argileux donnant une structure poecillitique.

### **III.4 Marnes**

Les marnes affleurent en différents endroits dans le bassin versant de l'Oued Cherf et atteignent parfois des épaisseurs importantes. Vila (1980) décrit les marnes du Santonien d'épaisseur allant de 150 à 200 mètres et les marnes du Miocène marin transgressif qui peuvent atteindre 600 mètres d'épaisseur. Les travaux de terrain que nous avons menés nous ont permis de positionner quelques affleurements marneux, parmi lesquels on peut citer :

- En bordure du fosse Taraguelet affleurent des marnes grises à grandes rotalipores.
- L'arête principale de la klippe de Bir Bouhouche et les longues arêtes de Djebel Hamimat sont formées par des marnes à Globotruncana qui surmontent des calcaires marneux en plaquettes caractérisées par la présence d'empreintes d'Ammonites et d'Inocérames.
- Le Djebel de Teraguelet et la klippe de Bir Bouhouche sont caractérisés par la présence d'un faciès marneux de couleur grise ou gris bleuâtre riches en plaquettes de calcite et à petites intercalations marno-calcaires contenant une microfaune riche en Globotruncana.
- La klippe de l'Oued Settara et celle de Bir Bouhouche et les écaillés de l'Oued Cherf sont caractérisées par la présence de formations marneuses et argileuses.

Les échantillons de roches marneuses taillés dans le bassin versant de l'Oued Cherf n'ont pas fait l'objet d'une confection de lames minces à cause de leur degré d'altération et de friabilité élevée ce qui rend difficile leur examen pétrographique au microscope polarisant.

## **IV. Conclusion**

Le bassin d'Oued Cherf est constitué de trois périmètres agricoles : Sedrata-Zouabi, Ksar Sbahi et le périmètre d'Ain Babouche. Le périmètre de Sedrata-Zouabi est majoritairement occupé par des sols qui sont caractérisés par une texture fine à très fine composée d'argiles limoneuses et sableuses avec une porosité réduite. Le périmètre de Ksar Sbahi est composé de formations du quaternaire ancien caractérisé par des fortes accumulations calcaires à faible profondeur qui ont donné naissance à des sols calcimagnésiques. Le périmètre d'Ain Babouche est composé de formations du quaternaire ancien caractérisé par des fortes accumulations calcaires à très faible profondeur.

La surface spécifique des échantillons de sols prélevés dans le bassin versant de l'Oued Cherf varie de 11,91 m<sup>2</sup>/g à 47,21 m<sup>2</sup>/g. La minéralogie des sols obtenue par la diffraction des rayons X montre qu'ils sont essentiellement composés de quartz, calcite, minéraux argiles, oxydes de fer et des minéraux de sulfates. Les images obtenues par microscope électronique à balayage montrent que les sédiments sont essentiellement composés de grains fins de taille inférieure à 100 µm de quartz, calcite, oxydes de fer, minéraux d'argiles, abarite, biotite,.... Quelques gros grains sont composés d'un assemblage de minéraux de nature différente (quartz, calcite, oxydes de fer, ...).

La composition géochimique des sols en éléments majeurs permet de distinguer trois grands groupes de sols ; le premier siliceux avec 70% à 80% de SiO<sub>2</sub> qui s'exprime minéralogiquement par la prédominance de grains de quartz, le second calcique avec CaO de l'ordre de 30% à 50% qui s'exprime minéralogiquement par la présence de la calcite en quantité notable et le troisième alumineux avec Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> variant de 10% à 15% matérialisé par la présence de minéraux argileux.

Le chlore est toujours associé au sodium car les échantillons présentant un pourcentage important en Na<sub>2</sub>O ont également une quantité notable en Cl expliquant ainsi

la salinité de ce type de sol qui s'exprime minéralogiquement par la présence de minéraux de sel telle que la halite.

La concentration des éléments traces dans les sols est toujours faible. Le zinc et le cadmium présentent une bonne corrélation positive avec le plomb témoin d'un comportement géochimique similaire. Le chrome et le vanadium semblent être entièrement associés dans les différents types de sols. Ils sont distribués d'une façon uniforme, comme le rubidium, le gallium, le niobium et l'étain.

L'étude pétrographique des principaux types de roches composant le bassin versant d'Oued Cherf montrent que les calcaires sont dans la plupart des cas à matrice carbonatée micritique à foraminifères et à calcite bien cristallisée remplissant les veines et les poches. Les grès sont essentiellement formés de quartz détritique très souvent monocristallin de petite taille à moyenne et à ciment souvent carbonaté. Les évaporites sont formées essentiellement par de gros cristaux de gypse englobant parfois des poches de cristaux de quartz et même de gypse. L'espace intragranulaire est très souvent rempli de carbonates microcristallins.

CHAPITRE 6  
HYDROCHIMIE

# CHAPITRE 6 : HYDROCHIMIE

## I. Introduction

Les rétentions de surface comprennent toutes sorte d'eau accumulée ou captée dans les dépressions de surface, des plus petites (dus à la rugosité du sol) aux plus grandes rétentions telles que plaines inondées, lacs, barrages, marais, étangs, etc.

Les petites dépressions se remplissent dès que l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'absorption du sol. Ces dépressions ne sont que de petits réservoirs temporaires puisqu'ils se dessèchent après l'averse par infiltration et évaporation.

Les lacs, les barrages, les plaines inondées et les étangs sont des rétentions de surface naturelles ou artificielles, de volume et de superficie pouvant être très importants. Ces réservoirs d'eau sont caractérisés par leur propre système de fonctionnement.

## II. Les Barrages et les retenus

La vocation de ces ouvrage est de créer des réserves d'eau superficielles en obturant localement le cours d'eau principal, par la construction d'une digue en béton, jusqu'à une cote adaptée (Figure 62). Leurs objectifs sont variés et peuvent être multiples :

Historiquement, les barrages furent construits afin de répondre à un seul problème: l'approvisionnement en eau et l'irrigation. Avec le développement des civilisations, les besoins furent plus importants et plus nombreux, ajoutant aux précédents la nécessité de contrôler les crues, la navigation, la qualité de l'eau, le contrôle des sédiments et l'énergie. Par conséquent des barrages ont été construits pour répondre à ces besoins spécifiques. Un Barrage est la pierre angulaire dans le développement et la gestion des ressources hydrauliques. Les barrages polyvalents sont des projets très important pour les pays en développement, puisqu'un seul investissement permet aux populations de recevoir des bénéfices à la fois domestiques et économiques.



**Figure 62 : Photographie montrant la digue du barrage de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf.**

## **II.1 L'homme construit des barrages depuis plus de 6000 ans.**

Dès qu'ils se sont sédentarisés, les hommes ont commencé à aménager les rivières pour adapter leur environnement à leurs besoins : conserver l'eau, permettre l'irrigation, se protéger contre les crues, faciliter la navigation, produire de l'énergie, évacuer leur déchets, etc.

Il semble ainsi que les plus anciens barrages aient été construits au Moyen Orient il y a probablement plus de 6.000 ans. On en trouve des traces aussi bien en Chine, en Inde, au Sri Lanka qu'au Mexique ou qu'en Egypte.

## **II.2 La construction des barrages en Algérie**

### **II.2.1 L'époque coloniale**

C'est à l'époque coloniale qu'est liée la naissance de la grande hydraulique en Algérie (Côte, 1996). En effet, la première génération de barrages-réservoirs furent construits durant la période (1850-1894). Il s'agit de 5 ouvrages en Oranie (Cheurfas, Djidiouia, Tlelat, Fergoug, Magoum) et 2 autres tout près d'Alger (Hamiz, Meurad), totalisant un volume de 65 hm<sup>3</sup> (Arrus, 1985).

La période 1895-1925 avait connu un arrêt total de construction de barrages à l'exception de quelques barrages de dérivation comme celui du Sasaf dans le Nord Constantinois.

La seconde génération de barrages avait connu la construction de 9 ouvrages durant la période 1926-1945 d'une capacité totale de 800 hm<sup>3</sup>. Ce sont les barrages de Zardézas, Ksob, Foum El Gueiss, Oued Fodda, Ghrib, Boughzoul, Bakhadda, Beni Bahdel, Bou Hanifia sans oublier la surélévation de 2 barrages édifiés au 19<sup>ème</sup> Siècle (Hamiz et Cheurfas).

La période 1945-1962 connut quant à elle, la construction de nouveaux barrages : le barrage de Foum El Gherza (mis en eau en 1950, vidé en 1951 pour cause de fuites, puis remis en eau en 1960), celui de Cheffia sur l'oued Bounamoussa qui était encore en construction à l'Indépendance, le barrage de Sarno sur l'oued Sarno ou Mekerra, barrage d'Inféroflux de Tadjemout sur l'oued M'zi, barrage de Meffrouch sur l'oued du même nom, barrage de Fergoug sur l'oued El Hammam et surélévation de Bakhadda sur l'oued Mina.

C'est pendant cette même période que les besoins grandissants en énergie amenèrent la colonisation à la construction des barrages hydroélectriques et à l'installation des centrales électriques au pied des barrages destinés à l'irrigation.

Les barrages hérités de la colonisation, du fait de l'envasement rapide, perdaient de leur capacité utile, autour de 2 à 3 % annuellement. A titre d'exemple, le barrage à voûte multiple en béton du Ksob, au Nord du Chott Hodna, a été édifié en 1940 pour irriguer la plaine de M'sila. Sa capacité initialement faible (12,4 hm<sup>3</sup>) est passée à moins de 4 hm<sup>3</sup>, ce qui a conduit, en 1977, à la surélévation de la digue de 15 m, portant la capacité de la retenue à 29,5 hm<sup>3</sup>. Le barrage-poids de Zardézas, édifié en 1945 sur la haute vallée du Safsaf, avec une capacité initiale également réduite (14,9 hm<sup>3</sup>), a connu le même sort : par suite d'un taux d'envasement élevé, une surélévation de près de 13 m a été opérée en 1977 pour ramener sa capacité à 31 hm<sup>3</sup>. Mais, pour l'un et l'autre barrage, face à l'intensité de l'érosion du bassin versant, il est vite devenu nécessaire de faire recours à de longs et onéreux travaux de dévasement.

## **II.2.2 L'Algérie indépendante**

Le jour de l'indépendance l'Algérie compte 15 barrages. De 1962 à 1980, l'Algérie a enregistré un retard dramatique en matière de l'hydraulique. Quatre barrages seulement ont été mis en eau : le barrage hydroélectrique d'Erraguène en 1963, le barrage de Cheffia en 1965, le barrage de Djorf Torba en 1969 et le barrage de Sidi Mohamed Ben Aouda en 1970. Les deux premiers étaient en construction pendant la période coloniale. Or pendant cette période, l'héritage de l'époque coloniale n'a fait que se dégrader surtout par l'envasement qui faisait perdre annuellement 2 à 3 % de la capacité de ces barrages.

A partir des années 1980, pour tenter de rattraper ce retard, le pays s'est lancé dans une politique dynamique dans le secteur de l'hydraulique. Le résultat est la réalisation de 19 barrages en à peine 10 ans (1980-1990), portant le total à 37 ouvrages et un volume de stockage égal à 3,9 milliards de m<sup>3</sup>. 11 se situaient à l'ouest, 9 dans le Cheliff, 7 au centre et 10 à l'est.

La décennie 1990-2000 a connu un fléchissement important dû à deux raisons essentiellement, l'une sécuritaire rendant les travaux trop risqués pour les ouvriers, aussi bien les étrangers que les nationaux, l'autre financière quand le pays connaissait d'énormes difficultés d'apport de capitaux. Le résultat est que seuls 7 barrages furent mis en service parmi lesquels on peut citer le barrage de Foug El Khanga sur l'Oued Cherf qui a été mis en eau en 1994.

A partir de l'an 2000, l'Algérie a connu une augmentation de la cadence des réalisations des barrages avec la nouvelle prise de conscience du réel danger qui menace le pays surtout après la crise de sécheresse de 2002 qui avait réveillé les esprits et grâce à la situation financière confortable découlant de la hausse des prix du pétrole. Le nombre de barrage a augmenté sensiblement donnant, en 2009, 60 barrages en exploitation et en 2018 75 barrages.

En 2017-2018, on enregistre la mise en service de 5 barrages. Il s'agit de : Ouljet Mellegue dans la willaya de Tébessa, Soubella à M'sila, Béni Slimane à Médéa, Ettaht à Mascara et Seglaba à Laghouat.

Les barrages algériens sont de moyenne capacité et n'atteignent rarement les 300 millions de m<sup>3</sup>. Le plus grand est celui de Beni Haroun (Mila) avec une capacité de 795 Hm<sup>3</sup>. Les experts soulignent que les conditions naturelles en Algérie ne permettent pas d'avoir des barrages de plus grandes capacités comme c'est le cas par exemple du Maroc (avec 5 barrages dépassant le milliard de m<sup>3</sup> chacun) de la Syrie et son barrage de Tabqa (12 km<sup>3</sup>) ou de l'Egypte avec le barrage d'Assouan (162 km<sup>3</sup>).

## **II.3 Types de barrages**

La classification adoptée en Algérie considère comme petits barrages, les ouvrages ayant une capacité inférieure à 10 millions de m<sup>3</sup> ; au-delà, ils sont classés dans la catégorie des grands barrages. Les barrages algériens sont de moyenne capacité et n'atteignent rarement les 300 millions de m<sup>3</sup>. Le plus grand est celui de Beni Haroun (Mila) avec une capacité de 795 Hm<sup>3</sup>. On est donc loin des grands barrages marocains qui dépassent le milliard de m<sup>3</sup>.

En effet les barrages sont classés en fonction des matériaux qui les constituent, de leurs formes et de leurs conceptions. Le site d'un barrage doit répondre à des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques précises. On peut distinguer deux grandes classes de barrages :

- les barrages en béton (en maçonnerie).
- les barrages en remblai (en matériaux meubles).

### **II.3.1 Barrages en béton**

Ces ouvrages qui, dans le passé, étaient construits en maçonnerie sont le plus souvent, à l'heure actuelle, construits en béton. Ils se divisent en trois catégories :

- les barrages poids.
- les barrages-voûtes.
- les barrages à contreforts.

#### **II.3.1.1 Barrages poids**

C'est le poids du barrage qui assure la stabilité face à la poussée des eaux. Le tracé en long, rectiligne dans les anciens barrages, est maintenant souvent courbe pour permettre les

mouvements de la structure. On choisit ce type de barrage quand la vallée est large. C'est le cas du barrage de Hamiz et de Beni Haroun.

### ***II.3.1.2 Barrages-voûtes***

La forme courbe permet un report des poussées sur les rives rocheuses (la force s'exerce sur les cotés). Cela permet également de diminuer le volume de béton et d'utiliser au mieux ses capacités à supporter la compression. C'est le cas des barrages de Foug El Gherza et de Bouhanifia.

### ***II.3.1.3 Barrages à contreforts***

Dans les barrages à contreforts, les murs de coupe triangulaire sont soutenus par des contreforts. C'est le cas du barrage de Zardezas.

## **II.3.2 Barrages en remblai**

Ce sont des barrages construits en matériaux meubles (terre et enrochement). Ils se divisent également en trois catégories :

- barrages en terre homogène.
- barrages zonés.
- barrages à masque.

### ***II.3.2.1 Barrages en terre homogène***

Ce sont des barrages constitués d'un matériau meuble et imperméable. Comme c'est le cas des barrages de Guenitra, Beni Zid et Zit Emba,...

### ***II.3.2.2 Barrages zonés***

Ce sont des barrages en remblai, constitués de plusieurs types de matériaux dont le zonage, variable en fonction des matériaux trouvés sur le site, assure les fonctions de stabilité et d'étanchéité. C'est le cas du barrage de Fontaine des Gazelles et de Deurdeur.

### ***II.3.2.3 Barrages à masque***

Ils sont constitués d'un remblai qui assure la stabilité et d'un écran imperméable sur le parement amont. Le remblai est souvent réalisé en enrochements bien compactés et le masque est constitué de béton, de produits bitumineux ou d'une membrane qui accepte des

déformations importantes. C'est le cas des barrages d'Oued **Cherf**, Foug El Gueiss et de Beni Amrane.

### III. Barrage de Foug El Khanga

Le barrage de Foug El Khanga est situé à la sortie du bassin versant de l'Oued Cherf. Il est construit sur le haut Cherf juste à l'embouchure de gorge de dite lieu Bordj Foug El Khanga à proximité de Aïoun Settara, à l'emplacement même de la station hydrométrique Moulin Roche Fort. Il se trouve suivant les coordonnées Lambert X=921,400 ; Y=322,770 et Z=692,000 de la carte topographique de Sedrata feuille n° 99.

L'étude d'avant-projet détaillé a été confiée au bureau d'études belge TRACTEBEL. Le bureau d'études d'exécution étant COBA (Portugal). Les travaux ont débuté au mois de juin 1988, la mise en eau s'est effectuée en 1994 et son inauguration en novembre 1995 par l'ex-chef du gouvernement algérien Mokdad Sifi (Figure 63).

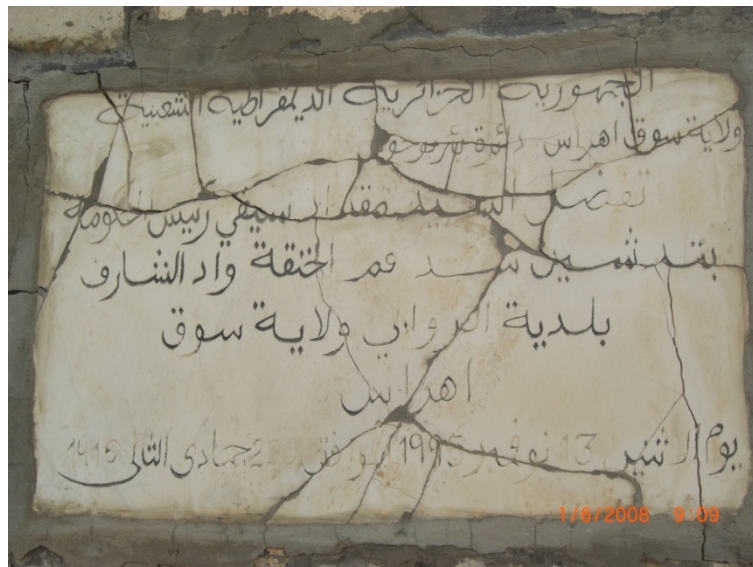


Figure 63 : Photographie de la pierre d'inauguration du barrage Foug El Khanga.

L'ouvrage est situé dans une région qui fait partie des hautes plaines constantinoises, il est entouré par des reliefs abrupts (Dj. Zouabi ; 1164 m et Dj. Kef El Bellal ; 1024 m). Sa capacité de stockage est de 157 Hm<sup>3</sup> tandis que son volume régularisé est seulement de l'ordre de 40 Hm<sup>3</sup>. De point de vue administratif ; le barrage fait partie de la commune de Zouabi et géré par la subdivision d'hydraulique de Sedrata (wilaya de Souk Ahras). Le choix du site a été fait en 1984 où on a constaté que le site de Foug El Khanga présente un cas favorable suivant les conditions géologiques, la structure se présente en monoclinale sans

présence de phénomène de filtration, en ce qui concerne les conditions économiques; le rapport économique représentant le volume du barrage sur le volume de remblais de la digue est très favorable, pour les conditions géotechniques, la stabilité du versant, l'absence de risque de glissement et le coût favorable ont suffisamment appuyer la réalisation de l'ouvrage.

Le barrage de Foug EL Khanga se subdivise en deux types de constructions ; l'ouvrage principal qui est présenté par le barrage lui-même et les ouvrages annexes, caractérisé par une cote maximale de 750,00 m et minimale de 722,70 m avec une hauteur de digue de 60 m. Les eaux du barrage de Foug EL Khanga sont destinées à l'alimentation en eau potable des populations d'Oum Bouaghi et Ain Beida, et à l'irrigation des périmètres de Sedrata, Zouabi et Ksar Sbahi.

Le barrage est du type Remblai compacté avec noyau en silts argileux et recharges amont et aval stabilisatrices en enrochements calcaire. La hauteur au-dessus du fond de vallée est de 60 m, le niveau de la crête est de 752 m, la longueur en crête est de 397 m et la largeur en crête de 9 m.

Bien que la mise en eau du barrage se soit effectuée en 1994, les débuts effectifs de l'irrigation se sont effectués au mois de mai 2010. Les délais entre la mise à disposition des ressources en eau et les débuts de l'irrigation sont très importants à cause des retards dans les études, et des délais indispensables pour l'équipement des terres irrigables.

## **IV.Hydrochimie des eaux du barrage de Foug EL Khanga**

### **IV.1 Introduction**

Les eaux de surface sont constituées par toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents. Elles ont pour origine les précipitations ou les nappes souterraines dont l'émergence constitue une source de ruisseau puis de rivière. Ces eaux se rassemblent en cours qui parcourent des terrains de diverses natures sur des distances variables. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (étangs, lacs) ou artificielles (retenues,

barrages). Il s'agit d'une ressource facilement accessible mais, malheureusement, fragile et, qui doit être protégée contre les divers facteurs de pollution qui la menacent.

La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par l'eau durant son parcours dans l'ensemble des bassins versants ou hydrologiques (Drever, 1982). Au cours de son cheminement, l'eau se charge de différents éléments constitutifs des terrains. Ainsi l'eau à l'état naturel peut contenir :

- des matières dissoutes provenant des terrains traversés (calcium, magnésium, sodium, potassium, bicarbonates, sulfates, chlorures, métaux lourds, ...),
- des particules en suspension,
- des matières organiques.

Par échange à la surface eau-atmosphère, l'eau se charge aussi en gaz dissous (oxygène, gaz carbonique, azote) (Guilbert, 2000).

Les eaux superficielles sont caractérisées par des variations saisonnières et à degré moindre, journalières de ses paramètres physiques telles que : température, pH, turbidité, coloration, ...

Dans le but d'identifier les caractéristiques physico-chimiques, et d'étudier la qualité hydro chimique ainsi que la salinité des eaux du barrage de Foum El Khanga, un plan de travail a été adopté.

## **IV.2 Prélèvement des échantillons d'eau**

Les prélèvements d'eau ont été faits pendant les périodes des hautes et basses eaux de l'année 2006 et ont concerné le barrage avec 18 échantillons, les cours d'eau avec 7 échantillons et des sources à proximité immédiate du barrage avec 2 échantillons. Les points de prélèvement sont représentés dans la figure 64. Un prélèvement d'eau au niveau de la digue a été fait chaque mois de juin 2008 à mai 2009 pour vérifier la variation de la chimie de l'eau du barrage au cours d'une année.

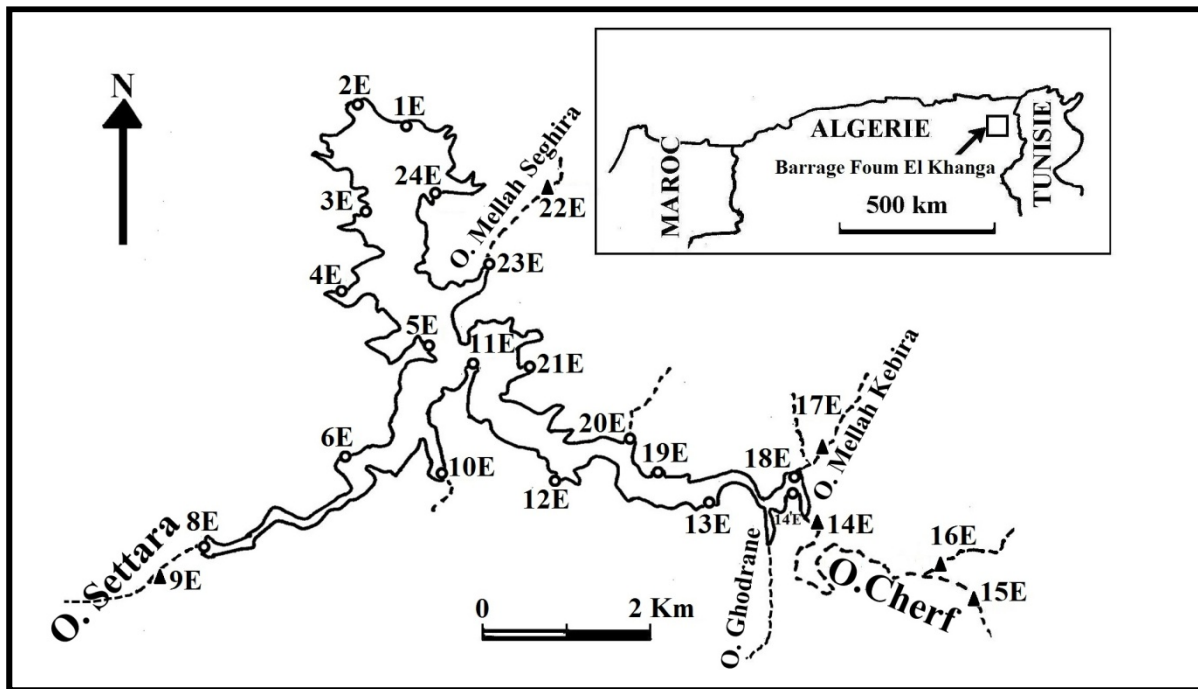


Figure 64 : Position des échantillons d'eau prélevés.

La méthode de préparation des flacons pour le prélèvement et la technique de prélèvement lui-même sont décrits en détail dans le chapitre matériels et méthodes.

Le choix des périodes de prélèvement était imposé par les conditions climatiques exceptionnelles qu'a connues la région d'étude durant cette année et le taux de remplissage du barrage. Le volume de la retenu et le taux de remplissage en sont témoins (tableau 11).

Tableau 11 : Etat des réserves du barrage de Foug El Khanga en 2006.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
V (hm <sup>3</sup> )	88,03	96,92	105,90	107,81	110,07	109,98	108,95	106,63	105,96	103,88	108,14	110,24
Taux(%)	56,07	61,73	67,46	68,65	70,12	70,07	69,40	67,90	67,50	66,20	68,85	70,20

Le temps de prélèvement choisi pour la période des hautes eaux correspond à la fin du printemps en mois de mai où le barrage était à son plus haut niveau avec 110,07 millions de m<sup>3</sup> et un taux de remplissage estimé à 70,12% (Figure 65). La période des basses eaux correspond à la période où le barrage atteint son plus bas niveau en automne pendant le mois d'octobre avec un volume d'eau de 103,88 millions de m<sup>3</sup> et un taux de remplissage de 66,20%.

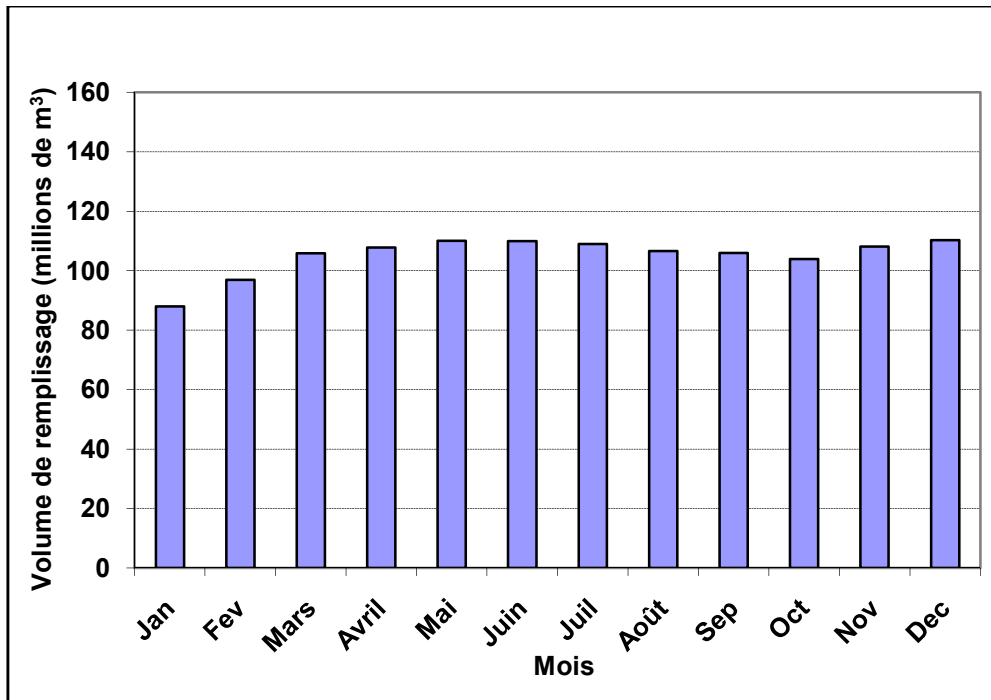


Figure 65 : Volume de remplissage du Barrage de Fom El khanga durant l'année 2006.

### IV.3 Analyse des solutions naturelles

Toutes les analyses des échantillons d'eau ont été effectuées au laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET) ex\_LMTG de l'Université Paul Sabatier de Toulouse. Les résultats, présentés aux tableaux 14, 15, 16, 17, 18 et 19, sont validés après vérification de la balance ionique qui est toujours inférieure de 9%. Les techniques d'analyse et l'appareillage utilisés sont décrits au chapitre matériels et méthodes.

### IV.4 Résultats et interprétations

Des numéros sont attribués aux échantillons lors de l'interprétation des données analytiques et dans la présentation des figures pour faciliter leur lecture (tableau 12 et 13) :

Tableau 12 : Noms des échantillons d'eau du barrage de Foum El Khanga et les numéros d'ordre qui y sont attribués.

Hautes eaux		Basses eaux	
Noms des échantillons	Numéros attribués	Noms des échantillons	Numéros attribués
<b>O1G01E</b>	1	O2G01E	19
<b>O1G02E</b>	2	O2G02E	20
<b>O1G03E</b>	3	O2G03E	21
<b>O1G04E</b>	4	O2G04E	22
<b>O1G05E</b>	5	O2G05E	23
<b>O1G06E</b>	6	O2G07E	24
<b>O1G08E</b>	7	O2G08E	25
<b>O1G10E</b>	8	O2G10E	26
<b>O1G11E</b>	9	O2G11E	27
<b>O1G12E</b>	10	O2G12E	28
<b>O1G13E</b>	11	O2G13E	29
<b>O1G14'E</b>	12	O2G14'E	30
<b>O1G18E</b>	13	O2G18E	31
<b>O1G19E</b>	14	O2G19E	32
<b>O1G20E</b>	15	O2G20E	33
<b>O1G21E</b>	16	O2G21E	34
<b>O1G23E</b>	17	O2G23E	35
<b>O1G24E</b>	18	O2G24E	36

Tableau 13 : Noms des échantillons d'eau des cours d'eau et des sources et les numéros d'ordre qui y sont attribués.

Noms d'échantillons	Nature d'échantillons	Numéros d'échantillons
<b>O1G07E</b>	Cours d'eau	1
<b>O1G09E</b>	Cours d'eau	2
<b>O1G12'E</b>	Cours d'eau	3
<b>O1G14E</b>	Source	4
<b>O1G15E</b>	Cours d'eau	5
<b>O1G16E</b>	Cours d'eau	6
<b>O1G17E</b>	Cours d'eau	7
<b>O1G22E</b>	Cours d'eau	8
<b>O2G08'E</b>	Source	9
<b>O2G09E</b>	Cours d'eau	10
<b>O2G12'E</b>	Cours d'eau	11
<b>O2G14E</b>	Source	12
<b>O2G15E</b>	Cours d'eau	13
<b>O2G16E</b>	Cours d'eau	14
<b>O2G17E</b>	Cours d'eau	15
<b>O2G22E</b>	Cours d'eau	16

Les résultats d'analyses sont représentés dans les tableaux 14 à 19.

**Tableau 14 : Composition chimique des eaux du barrage de Foum El Khanga (Hautes eaux).**

Anions/Cations	O1G01E	O1G02E	O1G03E	O1G04E	O1G05E	O1G06E
T°C	16,00	16,00	17,00	17,00	16,00	16,00
pH	7,57	7,60	7,55	7,75	7,90	8,10
CE (µS/cm)	3080,00	3400,00	3350,00	3650,00	3650,00	3200,00
Na (ppm)	334,82	339,65	342,40	313,31	338,30	344,99
Mg (ppm)	56,42	56,79	56,86	57,42	56,49	58,32
Cl (ppm)	476,62	496,62	527,30	490,21	487,24	506,64
K (ppm)	20,75	21,30	20,84	20,92	23,05	24,56
Ca (ppm)	127,04	129,41	123,14	129,96	135,01	125,59
SO <sub>4</sub> (ppm)	305,40	308,04	329,71	296,73	290,77	309,50
HCO <sub>3</sub> (ppm)	98,22	101,27	86,02	109,81	127,51	95,17
NO <sub>3</sub> (ppm)	32,40	33,68	32,96	32,81	38,68	33,45
SiO <sub>2</sub> (ppm)	1,61	1,63	1,64	1,63	1,85	1,67
Al (ppb)	4,23	1,19	1,33	0,78	0,00	1,72
Li (ppb)	70,97	66,24	67,06	63,16	69,22	61,20
B (ppb)	313,24	293,64	295,84	280,08	317,76	273,83
Rb (ppb)	1,00	0,96	0,97	0,95	1,07	0,89
Sr (ppb)	3724,20	3724,88	3715,83	3636,02	3947,69	3751,06

**Tableau 15 : suite tableau 14**

Anions/Cations	O1G08E	O1G10E	O1G11E	O1G12E	O1G13E	O1G14'E
T°C	20,00	15,00	17,00	17,00	19,00	20,00
pH	8,05	8,05	7,75	7,34	7,54	7,95
CE (µS/cm)	3300,00	3800,00	3800,00	3500,00	3500,00	4800,00
Na (ppm)	317,83	321,06	319,71	263,48	324,10	327,32
Mg (ppm)	60,54	56,92	56,52	49,06	55,34	57,24
Cl (ppm)	481,07	470,30	491,19	421,89	497,12	490,82
K (ppm)	18,98	19,87	20,31	19,13	18,85	19,78
Ca (ppm)	141,36	133,88	134,50	123,49	124,58	155,49
SO <sub>4</sub> (ppm)	304,70	285,86	292,29	239,46	294,99	292,17
HCO <sub>3</sub> (ppm)	178,75	129,34	128,73	92,73	109,20	192,18
NO <sub>3</sub> (ppm)	38,71	33,63	33,53	62,16	33,14	32,09
SiO <sub>2</sub> (ppm)	2,22	1,64	1,65	3,27	1,61	1,64
Al (ppb)	4,03	0,33	0,00	0,00	0,00	2,00
Li (ppb)	108,19	77,64	67,97	48,93	48,04	91,33
B (ppb)	437,69	349,52	306,10	239,24	214,72	411,00
Rb (ppb)	1,18	1,08	0,98	0,89	0,87	1,36
Sr (ppb)	4541,71	4000,46	3824,15	3175,28	3358,88	4553,81

**Tableau 16 : Suite tableau 14**

Anions/Cations	O1G18E	O1G19E	O1G20E	O1G21E	O1G23E	O1G24E
T°C	20,00	18,00	20,00	19,00	21,00	18,00
pH	8,03	7,75	8,02	8,20	7,90	8,14
CE (µS/cm)	5400,00	4650,00	5150,00	4710,00	5650,00	5380,00
Na (ppm)	345,99	325,05	319,81	325,77	348,66	326,42
Mg (ppm)	57,61	56,82	57,99	57,70	58,21	56,57
Cl (ppm)	599,53	488,81	484,32	469,33	504,46	500,72
K (ppm)	20,54	18,70	18,88	18,59	20,35	21,31
Ca (ppm)	149,67	135,88	157,05	126,15	147,33	135,32
SO <sub>4</sub> (ppm)	340,87	294,35	335,81	325,17	338,18	342,65
HCO <sub>3</sub> (ppm)	178,14	135,44	181,80	103,10	156,18	126,90
NO <sub>3</sub> (ppm)	34,37	33,68	36,92	33,37	34,69	33,52
SiO <sub>2</sub> (ppm)	1,60	1,65	1,69	1,65	1,77	1,64
Al (ppb)	2,35	0,99	1,65	1,10	15,53	1,26
Li (ppb)	91,01	86,61	91,21	84,46	88,04	88,37
B (ppb)	405,95	399,96	423,94	396,07	406,33	400,56
Rb (ppb)	1,29	1,18	1,28	1,20	1,28	1,22
Sr (ppb)	4095,13	3845,19	4123,70	4343,14	3988,33	3863,05

**Tableau 17 : Composition des eaux du barrage de Foug El Khanga (Basses eaux).**

Anions/Cations	O2G01E	O2G02E	O2G03E	O2G04E	O2G05E	O2G07E
T°C	17,00	17,00	17,00	17,00	17,00	15,00
pH	8,10	8,05	8,20	8,04	7,60	7,80
CE (µS/cm)	4000,00	4700,00	4800,00	4800,00	4800,00	4000,00
Na (ppm)	349,44	349,52	344,80	344,30	343,74	352,18
Mg (ppm)	59,00	59,45	58,76	59,23	59,38	62,00
Cl (ppm)	538,19	521,01	520,06	503,48	518,24	515,61
K (ppm)	20,08	20,50	19,37	19,18	19,33	19,93
Ca (ppm)	135,90	134,30	123,95	129,64	129,97	132,98
SO <sub>4</sub> (ppm)	355,81	354,20	325,34	315,53	303,96	358,53
HCO <sub>3</sub> (ppm)	135,44	120,19	92,12	109,20	113,48	117,14
NO <sub>3</sub> (ppm)	24,90	25,22	24,84	24,92	24,84	25,67
SiO <sub>2</sub> (ppm)	1,36	1,32	1,36	1,35	1,35	1,46
Al (ppb)	1,02	-	11,24	1,36	1,54	2,58
Li (ppb)	96,38	94,49	92,95	92,80	94,02	93,60
B (ppb)	442,92	431,64	429,60	431,88	430,74	440,66
Rb (ppb)	1,50	1,24	1,20	1,23	1,16	1,11
Sr (ppb)	4061,33	4021,41	4025,91	3970,91	4009,16	4058,33

**Tableau 18 : Suite tableau 17**

Anions/Cations	O2G08E	O2G10E	O2G11E	O2G12E	O2G13E	O2G14'E
T°C	14,00	14,00	17,00	17,00	17,00	16,00
pH	7,95	7,90	7,80	8,30	7,60	7,30
CE (µS/cm)	4000,00	5200,00	5300,00	5000,00	5400,00	10200,00
Na (ppm)	349,00	350,53	351,37	347,51	341,35	888,52
Mg (ppm)	62,49	59,45	60,73	60,02	59,49	85,83
Cl (ppm)	543,08	510,66	502,35	516,63	516,63	1501,36
K (ppm)	20,15	20,54	19,86	20,55	19,35	32,76
Ca (ppm)	142,60	142,75	136,34	144,60	145,44	230,22
SO <sub>4</sub> (ppm)	322,95	348,59	331,48	308,32	326,39	323,68
HCO <sub>3</sub> (ppm)	161,06	147,64	122,63	142,76	151,91	215,97
NO <sub>3</sub> (ppm)	30,64	24,17	24,96	29,61	25,10	29,68
SiO <sub>2</sub> (ppm)	1,59	1,36	1,36	1,58	1,46	2,29
Al (ppb)	17,35	0,37	0,52	0,64	-	1,20
Li (ppb)	98,21	98,95	97,87	96,16	100,34	781,50
B (ppb)	447,10	456,45	454,50	436,97	451,96	1008,34
Rb (ppb)	1,00	1,13	1,20	1,18	1,24	11,14
Sr (ppb)	4247,70	4009,62	4040,97	3928,16	4204,84	6694,37

**Tableau 19 : Suite tableau 17**

Anions/Cations	O2G18E	O2G19E	O2G20E	O2G21E	O2G23E	O2G24E
T°C	16,00	16,50	17,80	18,00	18,00	19,00
pH	7,90	7,80	7,80	7,76	7,80	8,10
CE (µS/cm)	5800,00	5800,00	5900,00	5800,00	6400,00	6300,00
Na (ppm)	355,47	348,89	342,80	368,07	368,15	359,82
Mg (ppm)	60,23	59,54	60,16	61,83	61,33	61,82
Cl (ppm)	520,34	498,61	511,77	517,38	524,77	506,04
K (ppm)	21,36	19,79	20,65	19,90	19,49	19,50
Ca (ppm)	144,08	141,73	144,59	149,02	145,76	145,07
SO <sub>4</sub> (ppm)	328,66	314,30	327,95	334,49	322,47	347,86
HCO <sub>3</sub> (ppm)	147,03	151,30	153,13	152,52	152,52	147,03
NO <sub>3</sub> (ppm)	25,32	24,87	24,27	24,38	25,10	24,64
SiO <sub>2</sub> (ppm)	1,43	1,42	1,41	1,35	1,42	1,34
Al (ppb)	1,55	1,57	0,51	1,16	2,95	2,17
Li (ppb)	111,36	108,63	105,75	104,32	105,55	110,35
B (ppb)	485,95	489,28	481,71	473,76	474,40	502,20
Rb (ppb)	1,30	1,22	1,23	1,18	1,22	1,15
Sr (ppb)	4017,36	4066,54	4033,80	3976,85	4046,27	4090,39

Pendant ma présence au Laboratoire de Toulouse GBE, un recevais les échantillons prélevés à l'aéroport de Toulouse chaque prélèvement mensuel d'eau au niveau de la digue a été fait par les mois. Les résultats de leurs analyses sont présentés dans le tableau techniciens du barrage de juin 2008 à mai 2009 pour vérifier la 20. variation de la chimie de l'eau du barrage au cours d'une année. Je

**Tableau 20 : Variation chimique annuelle des eaux du barrage de Foug El Khanga de juin 2008 au mai 2009.**

Anions/Cations	juin-08	juil-08	août-08	sept-08	oct-08	nov-08	déc-08	janv-09	févr-09	mars-09	avr-09	mai-09
Na (ppm)	383,95	377,58	394,93	396,76	381,42	386,35	376,54	373,58	375,05	374,77	365,96	373,34
Mg (ppm)	65,04	64,45	66,62	66,74	65,49	63,95	63,67	61,31	61,50	60,81	59,36	60,29
Cl (ppm)	673,73	681,66	692,45	689,96	665,72	659,24	672,88	652,93	653,87	641,67	638,91	622,37
K (ppm)	5,41	5,47	5,96	5,94	5,83	5,74	5,68	7,08	7,21	7,33	7,32	7,05
Ca (ppm)	136,96	130,57	132,84	130,85	131,88	134,27	134,56	132,67	133,91	134,10	132,81	134,65
SO4 (ppm)	408,15	411,71	417,04	413,25	398,25	395,32	402,83	397,31	397,95	385,02	386,91	377,37
HCO3 (ppm)	175,68	152,50	134,20	132,98	150,67	147,01	161,04	143,96	145,18	146,40	149,45	153,72
NO3 (ppm)	10,21	9,05	8,53	6,77	5,22	4,21	3,76	4,26	4,15	3,92	4,43	4,67
Si (ppm)	1,25	1,19	1,24	1,33	1,66	1,70	1,69	1,64	1,64	1,60	1,40	1,32
Al (ppb)	12,24	8,56	16,00	14,87	53,63	16,87	14,32	8,75	10,92	7,01	7,58	x
Li (ppb)	79,19	81,36	82,40	88,66	109,33	107,81	99,70	100,75	89,58	85,45	96,44	108,86
B (ppb)	366,52	372,78	380,69	404,24	477,45	476,66	455,55	447,72	407,05	394,71	441,68	464,34
F (ppb)	693,95	714,03	677,39	704,22	715,90	709,85	738,10	962,94	921,15	1315,56	934,62	693,48
Rb (ppb)	1,13	1,11	1,27	1,18	1,23	1,22	1,12	1,09	1,12	1,05	1,17	1,04
Sr (ppb)	3801,57	3868,71	3856,99	3879,47	3908,61	3773,65	3795,82	3757,90	3744,21	3756,78	3653,27	3753,89

#### **IV.4.1 Caractéristiques hydrochimiques des eaux du barrage de Foug El Khanga**

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, et de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie, etc.) (Debieche, 2002).

Les réactions majeures reconnues comme responsables d'enrichissement ou d'appauvrissement des éléments dans les eaux naturelles sont l'échange  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  dû à l'interaction eau-roches carbonatées, l'échange de base  $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+}$ , la réduction ou la dissolution des sulfates (Fidelibus, 1996).

##### ***IV.4.1.1 Température***

La température est un paramètre physique clé. Elle agit de manière déterminante sur d'autres paramètres physiques tel que le pH et sur les processus chimiques et, plus encore, biologiques au sein du barrage et des cours d'eau (Chapman and Kimstach, 1996).

Le barrage reçoit à sa surface l'énergie lumineuse du soleil qui est très rapidement transformée en chaleur car l'eau absorbe les radiations rouges et infrarouges dans le spectre solaire. La température est influencée surtout par la période de prélèvement (hautes eaux, basses eaux, matin et soir). Elle joue un rôle important dans l'activité physico-chimique, bactérienne et de l'évaporation de l'eau du barrage.

La température de l'eau du barrage mesurée sur terrain varie de 15°C à 21°C avec une moyenne de 18°C pendant la période des hautes eaux et de 13,5°C à 19°C avec une moyenne de 16,5 pendant la période des basses eaux (Figure 66). Ces fluctuations sont en premier lieu dues au contact direct des eaux avec l'atmosphère.

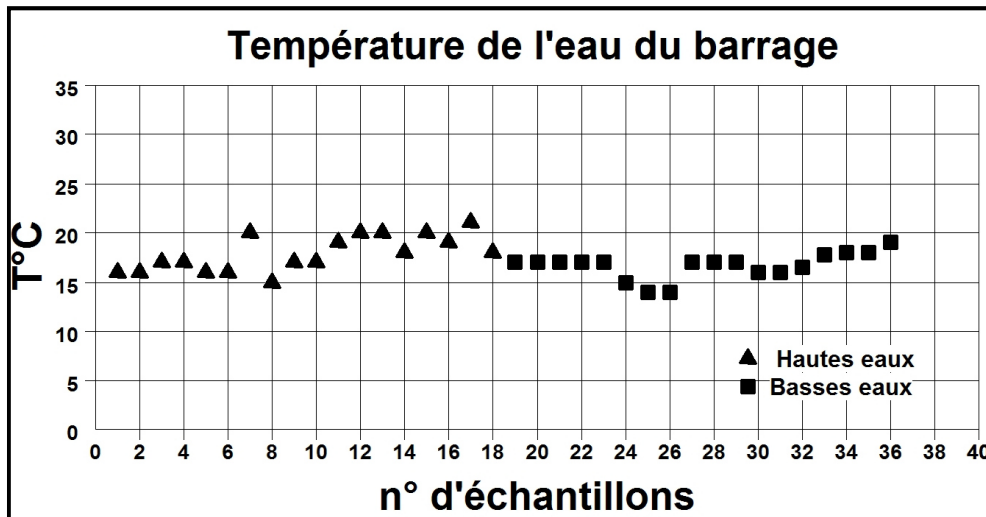


Figure 66 : Température des eaux du barrage de Foum el Khanga sur l'Oued Cherf.

#### IV.4.1.2 Le pH

La molécule d'eau est légèrement ionisée en ions  $H^+$  et  $OH^-$ . Le pH d'une solution est l'inverse du logarithme de la concentration en ions  $H_3O^+$ . Il varie en fonction de la température et de la force ionique. C'est un paramètre qui détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau ainsi que l'état d'équilibre des éléments chimiques dans les diagrammes Eh-Ph.

Le pH de l'eau est déterminé principalement par les équilibres calco-carboniques et par les conditions géochimiques du bassin versant. Les zones très calcaires se caractérisent par une capacité tampon de l'eau élevée et un pH d'environ 8,3. D'autres facteurs agissant sur le pH sont la température et des processus biologiques tels que la photosynthèse ou la décomposition de matériel organique. Une température croissante diminue la solubilité du  $CO_2$  et fait baisser la valeur du pH. La photosynthèse prend à l'eau du  $CO_2$  et du  $HCO_3^-$ , ce qui accroît le pH.

La décomposition aérobie de matière organique libère du  $CO_2$  et provoque ainsi une baisse du pH. Celui-ci varie également selon l'origine de l'eau examinée: des eaux souterraines, par exemple, contiennent en général davantage de  $CO_2$  dissous que les eaux superficielles, et sont de ce fait plus acides.

Les déversements d'eaux usées provoquent également une baisse de pH lorsque la matière organique apportée par ces eaux favorise l'activité microbienne et accroît la production de  $CO_2$  et les apports d'acides d'origine industrielle ou artisanale font aussi baisser le pH des cours d'eau récepteurs.

Les résultats des mesures du pH des eaux effectuées varient de 7,3 à 8,2 avec une moyenne de 7,8 pour la période des hautes eaux et de 7,3 à 8,3 avec une moyenne de 7,3 pour la période des basses eaux (Figure 67).

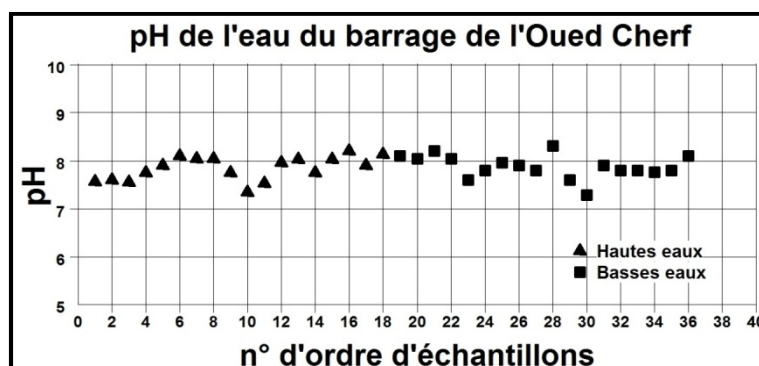


Figure 67 : pH des eaux du barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf.

#### IV.4.1.3 La conductivité électrique (CE)

L'eau est peut être considérée comme une solution électrolytique, car presque tous ses constituants dissous sont présents sous forme ionique. La présence des ions lui confère donc une certaine conductivité et devient susceptible de se laisser traverser par un courant électrique, ce qui fait que plus la concentration des sels dissous est élevée plus la conductivité est grande. Par conséquent, la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (Derwich et al., 2010).

Le tableau 21 donne quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité.

**Tableau 21 : Classes de minéralisation d'après la conductivité (Rodier et al., 2009).**

Conductivité	Minéralisation
CD < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	très faible
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CD < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	faible
200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CD < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$	moyenne
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CD < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$	moyenne accentuée
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CD < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	importante
CD > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	élevée

Le conductimètre utilisé est de type CD4301. Il est muni d'une sonde de correction automatique de température et le résultat enregistré est exprimé en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 25°C. Cependant, il est préférable de ne pas utiliser la sonde de correction pour des températures

inférieures à 15°C ou supérieures à 30 °C. Dans ce cas, un facteur de correction de température est appliqué (Tableau 22).

**Tableau 22 : Facteur (F) de correction de la température (Norme AFNOR NF en 2788).**

Temp. °C	dixièmes de degré Celsius									
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	F 25°C									
<b>10</b>	1.428	1.424	1.420	1.416	1.413	1.409	1.405	1.401	1.398	1.394
<b>11</b>	1.390	1.387	1.383	1.379	1.376	1.372	1.369	1.365	1.362	1.358
<b>12</b>	1.354	1.351	1.347	1.344	1.341	1.337	1.334	1.330	1.327	1.323
<b>13</b>	1.320	1.317	1.313	1.310	1.307	1.303	1.300	1.297	1.294	1.290
<b>14</b>	1.287	1.284	1.281	1.278	1.274	1.271	1.268	1.265	1.262	1.259

La correction de la conductivité mesurée dans ce cas, en utilisant le facteur (F) de correction de la température correspondant, se fait de la manière suivante :

$$\text{Conductivité à 25°C} = \text{Conductivité mesurée} \times F$$

F : facteur de correction donné dans le tableau ci-dessus

Exemple : conductivité mesurée = 580  $\mu\text{S/cm}$ , température mesurée = 14,2°C

F : = 1,281

Conductivité à 25°C = 580 x 1,281 = 743  $\mu\text{S/cm}$ .

Les valeurs de conductivité mesurées dans les eaux du barrage de Foug El Khanga sur l'Oued Cherf indiquent une minéralisation élevée (Tableau 21), car elles sont globalement supérieures à 3000  $\mu\text{S/cm}$  (Figure 68). Pendant la période des hautes eaux, la conductivité de l'eau du barrage varie de 3080  $\mu\text{S/cm}$  à 5650  $\mu\text{S/cm}$  avec une moyenne de l'ordre de 4100  $\mu\text{S/cm}$ . Des valeurs encore plus élevées sont enregistrées pendant la période des basses eaux. Elles oscillent entre 4000  $\mu\text{S/cm}$  et 6300  $\mu\text{S/cm}$  avec une moyenne de ~5200  $\mu\text{S/cm}$ . Les valeurs de conductivité les plus élevées des eaux du barrage sont enregistrées aux embouchures immédiates des sources et des oueds salés.

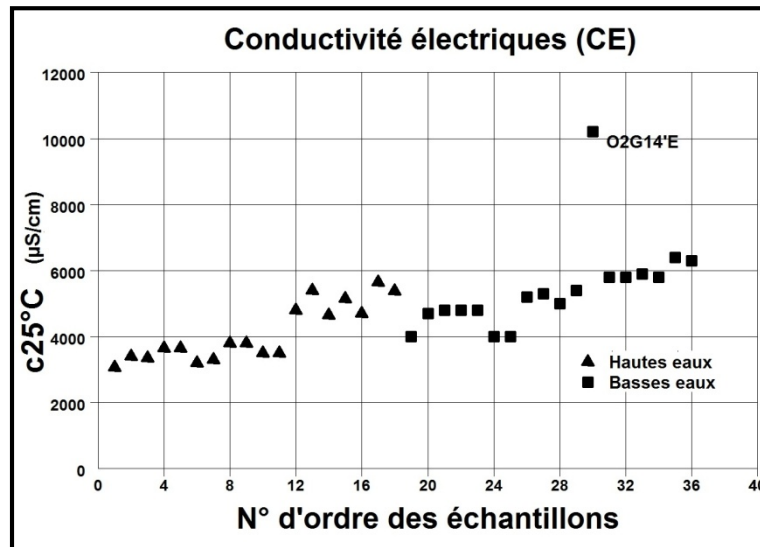


Figure 68 : Conductivité électrique des eaux du barrage de Foum el Khanga sur l'Oued Cherf.

#### IV.4.1.4 Alcalinité

L'alcalinité est une mesure du pouvoir de l'eau à neutraliser les acides, c'est un peu comme le «pouvoir tampon de l'eau». En d'autres termes, l'alcalinité mesure la résistance à tout changement de pH. Le pouvoir neutralisant de l'eau est attribué principalement à la présence de bicarbonates de calcium et de magnésium dissous dans l'eau (également dans une moindre mesure, des hydroxydes, des bases organiques, des borates, des ions ammoniums, phosphates et silicates). Tant que l'acide n'a pas maîtrisé les ions responsables de l'alcalinité, le pH ne bouge pratiquement pas. Une fois le processus d'acidification enclenché, la réaction produit alors de l'eau (H<sub>2</sub>O), du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est libéré dans l'air ainsi que le cation accompagnateur (soit le calcium ou le magnésium). Dans les eaux naturelles les bases les plus importantes sont les suivantes : HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, {OH<sup>-</sup>, H<sup>+</sup>}, H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>, B(OH)<sub>4</sub><sup>-</sup>, NH<sub>3</sub>, S<sub>2</sub><sup>-</sup>, HS<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, anions organiques.

Dans les eaux naturelles, l'alcalinité à fCO<sub>2</sub> constante varie dans le même sens que le pH (Bourrie, 1975). Dans le cas d'un pH neutre, compris entre 7 et 8,5, l'alcalinité est représentée essentiellement par les bicarbonates HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

L'alcalinité des eaux du barrage varie de ~86 mg/L à ~216 mg/L avec une moyenne de ~135mg/L (Figure 69).

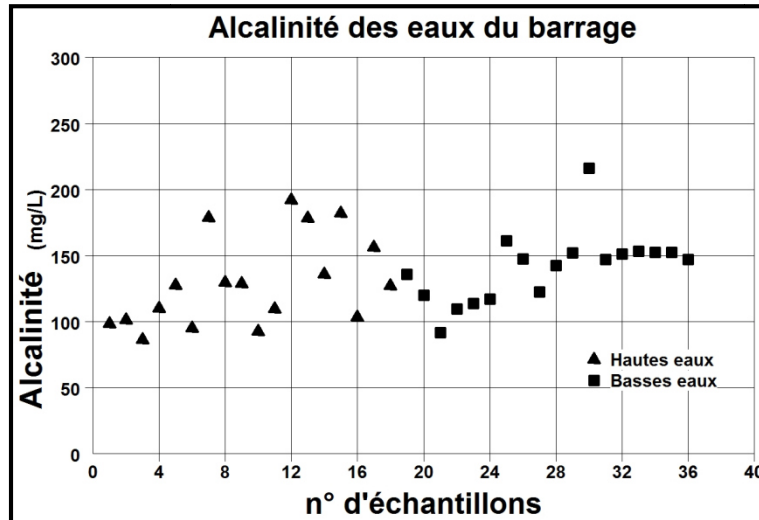


Figure 69 : Alcalinité des eaux du barrage de Foum el Khanga sur l’Oued Cherf.

Au niveau de la digue, l’alcalinité de l’eau du barrage de Foum el Khanga (Figure 70) varie de de ~133mg/L au mois de septembre 2008 à de ~176mg/L au mois de juin 2008 avec une moyenne annuelle de ~150mg/L.

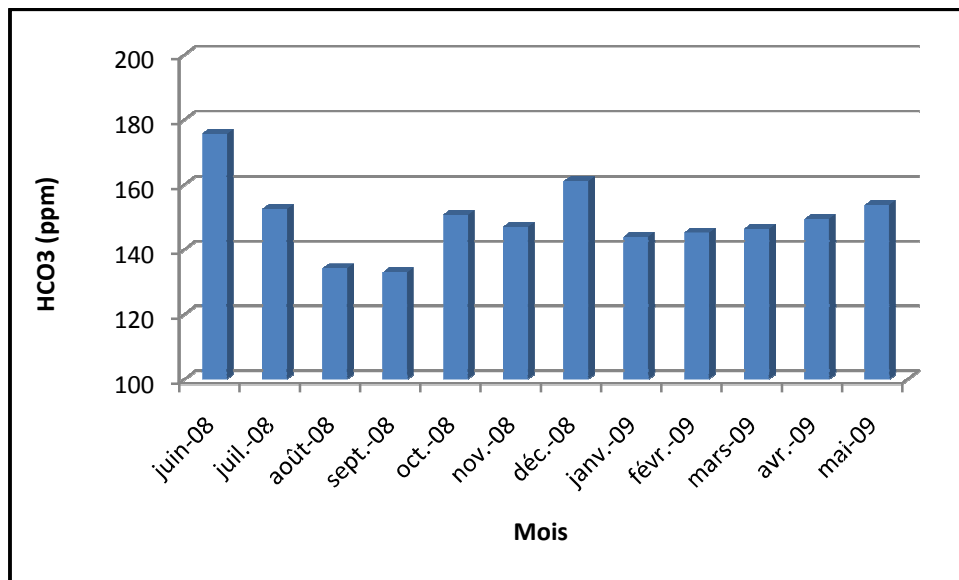


Figure 70 : Variation de l’alcalinité dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.5 Dureté

La dureté fait référence à la quantité de calcium et de magnésium contenue dans l’eau (Boeglin, 1997). Ces deux éléments proviennent de l’altération de la roche-mère principalement par le lessivage des calcaires et des dolomies par les eaux de pluie. La teneur en calcium est habituellement plus élevée que le magnésium dans les eaux souterraines. Par

contre, là où on trouve de la contamination par l'eau de mer, la concentration en magnésium peut être plus élevée que celle du calcium.

La dureté (d) de l'eau ou titre hydrotimétrique (TH) est exprimée en degré français (°F) ou en millimoles par litre (mmol/L). Un degré français (1°F) correspond à 0,1 mmol/L de carbonates de calcium et magnésium. La dureté de l'eau peut être donc calculée par la formule suivante :

$$d \text{ (}^\circ\text{F)} = ([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] \text{ en mmol/L}) * 10$$

En général, une eau dure n'est pas souhaitable pour l'usage domestique car elle réduit l'efficacité des savons. Par contre, en agriculture, une eau dure aide le sol à conserver une bonne structure par les ponts calciques.

Une eau riche en calcium et en magnésium possède généralement des quantités équivalentes de bicarbonate ou de carbonate, lesquelles lui confèrent une alcalinité élevée. Il arrive toutefois que la dureté de l'eau soit élevée sans pour autant que son alcalinité le soit. C'est le cas lorsque le calcium et le magnésium de l'eau sont sous forme de sulfates et de chlorures.

Les eaux du barrage de Foum el Khanga présentent une dureté oscillant entre ~51°F et ~63°F avec une valeur moyenne de ~58°F (figure 71).

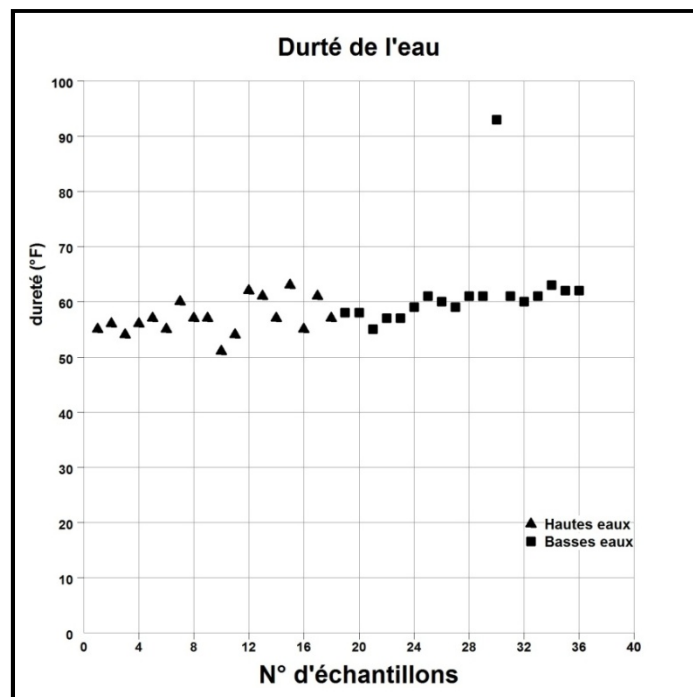


Figure 71 : Dureté des eaux du barrage de Foum el Khanga sur l'Oued Cherf.

Au niveau de la digue, la dureté de l'eau ne varie pas trop au cours des mois de l'année (figure 72). Elle présente une valeur moyenne de  $\sim 59^{\circ}\text{F}$  une valeur minimale de  $\sim 51^{\circ}\text{F}$  enregistrée au mois de juin 2008 et une valeur maximale de  $\sim 57,5^{\circ}\text{F}$  en avril 2009.

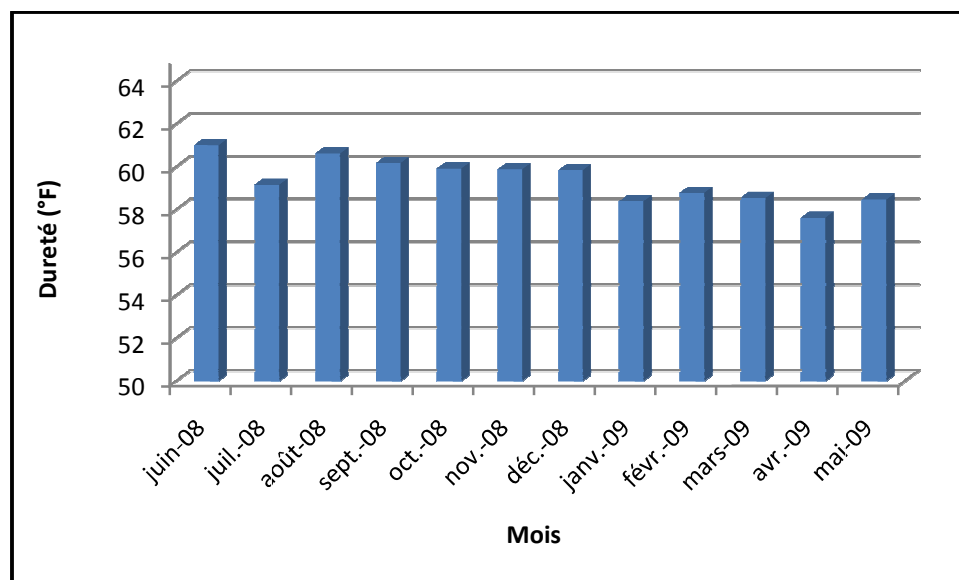


Figure 72 : Variation mensuelle de la dureté des eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

La dureté ( $^{\circ}\text{F}$ ) des eaux du barrage de Foum el Khanga comparées aux normes (O.M.S, 2005) de classifications illustrées dans le tableau 23, sont des eaux très dures, que ce soit en hautes eaux ou en basses eaux.

Tableau 23 : Classification des eaux d'après leur dureté.

Titre hydrotimétrique (TH) en $^{\circ}\text{F}$	Dureté de l'eau
Inférieur à 18	Douce
Compris entre 18 et 25	Peu dure
Compris entre 25 et 35	Dure
Supérieur à 35	Très dure

#### IV.4.1.6 Chlorures ( $\text{Cl}^-$ )

Les concentrations en chlorures dans les eaux du barrage tournent autour  $500 \text{ mg/L}$  avec une valeur minimale de  $421,9 \text{ mg/L}$  et une valeur maximale de  $1\,501,4 \text{ mg/L}$ . La concentration moyenne est de l'ordre  $493,6 \text{ mg/L}$  pour la période des hautes eaux est de  $571,5 \text{ mg/L}$  pour la période des basses eaux (Figure 73).

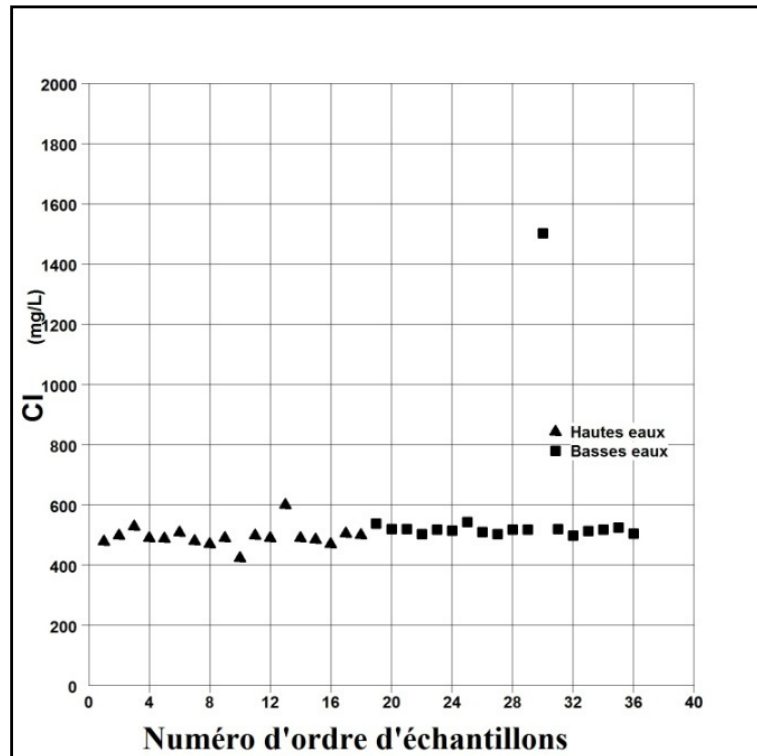


Figure 73 : Concentration des chlorures dans les eaux du barrage.

Les concentrations les plus élevées se trouvent aux zones d'alimentation d'eau salée telles que les embouchures des cours d'eau (Oued Mellak Kebira et Oued Mellah Seghira) ou à proximité des résurgences salées (source Ain Mellah ou source de Bir Echeb). Cela plaide à la faveur de la dissolution des formations salifères pour l'origine des chlorures dans les eaux du barrage. Le point qui se trouve écartée dans la Figure 73 correspond à la concentration maximale en Cl<sup>-</sup> dans les eaux du barrage. Elle concerne l'échantillon O2G14'E localisé tout près la source salée de Bir Echeb.

Les échantillons prélevés dans les sources et cours d'eau salés présentent des concentrations très élevées en Cl<sup>-</sup> qui peuvent atteindre 24,7 g/L avec une moyenne de 5,97 g/L en périodes des hautes eaux et de 6,61 en périodes des basses eaux (Figure 74).

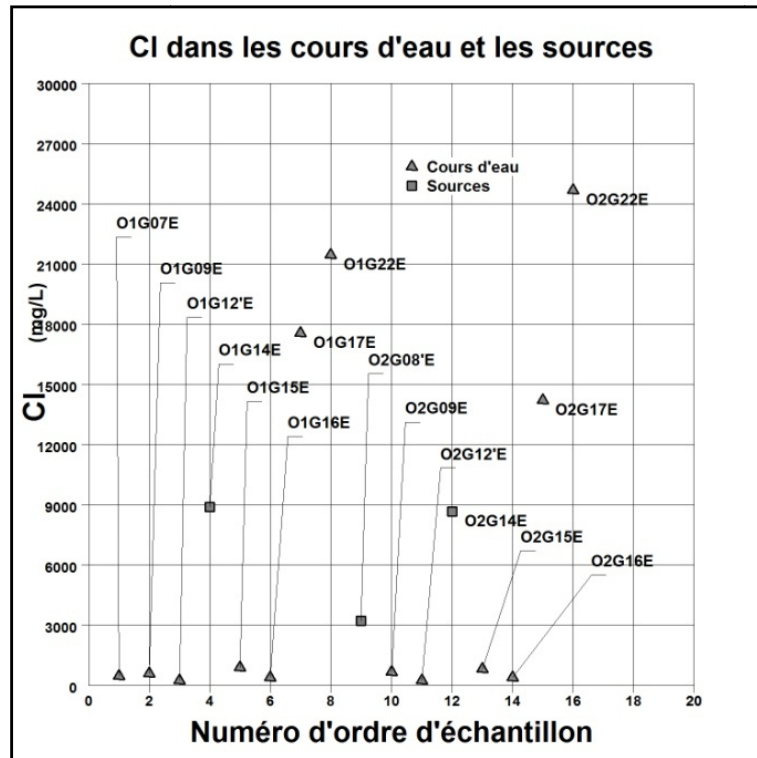


Figure 74 : Concentration des chlorures dans les eaux des cours d'eaux.

La concentration annuelle moyenne des chlorures dans l'eau du barrage de Foum el Khanga au niveau de la digue est de ~662mg/L avec une valeur maximale enregistrée au mois d'août 2008 voisinant ~692,5mg/L et une minimale de ~622mg/L au mois de mai 2009 (Figure 75).

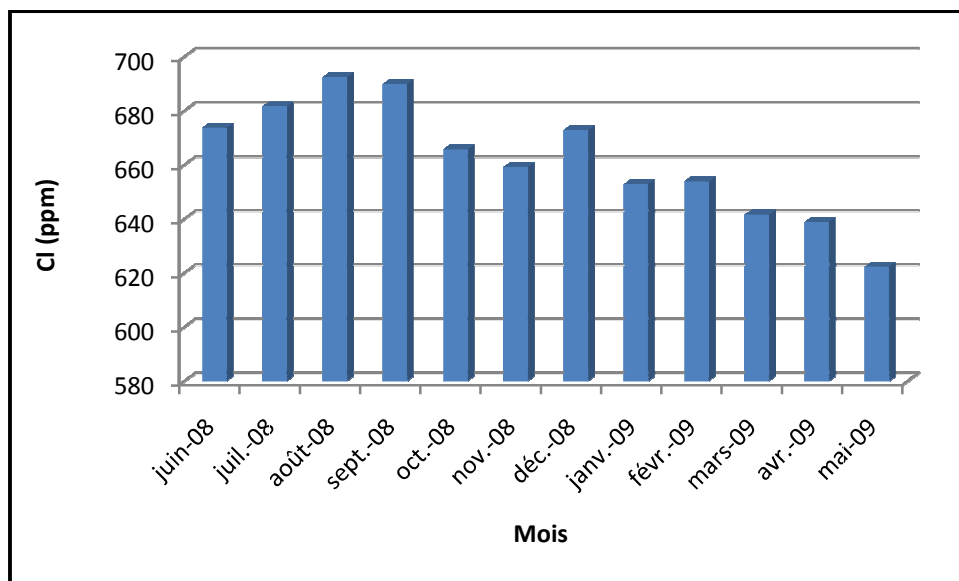


Figure 75 : Variation des chlorures dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.7 Sodium ( $\text{Na}^+$ )

La présence d'ions  $\text{Na}^+$  dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations salifères du Trias affleurant en amont.

Les résultats obtenus montrent des concentrations variant de 263,5 mg/L à 888,5 mg/L avec une moyenne de 326,6 mg/L en période des hautes eaux et de 380,9 mg/L en période des basses eaux (Figure 76). Des concentrations remarquables en  $\text{Na}^+$  sont à signaler à l'embouchure de l'Oued Cherf (échantillon n° O2G14'E) en période des basses eaux qui sont expliquées par des eaux chargées de la source Bir Echeb et aussi par une recharge supplémentaire en  $\text{Na}^+$  qui se fait par des eaux usées de Sedrata et de Zouabbi.

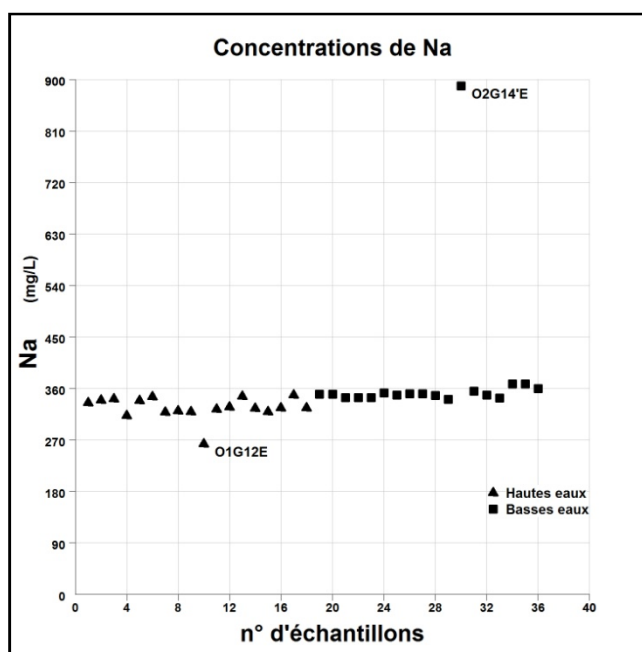


Figure 76 : Concentration de  $\text{Na}^+$  dans les eaux du barrage.

Au niveau de la digue, la concentration moyenne annuelle de  $\text{Na}^+$  (Figure 77) est de 380 mg/L avec une valeur minimale au mois d'avril 2009 de 365,9 mg/L et une maximale en septembre 2008.

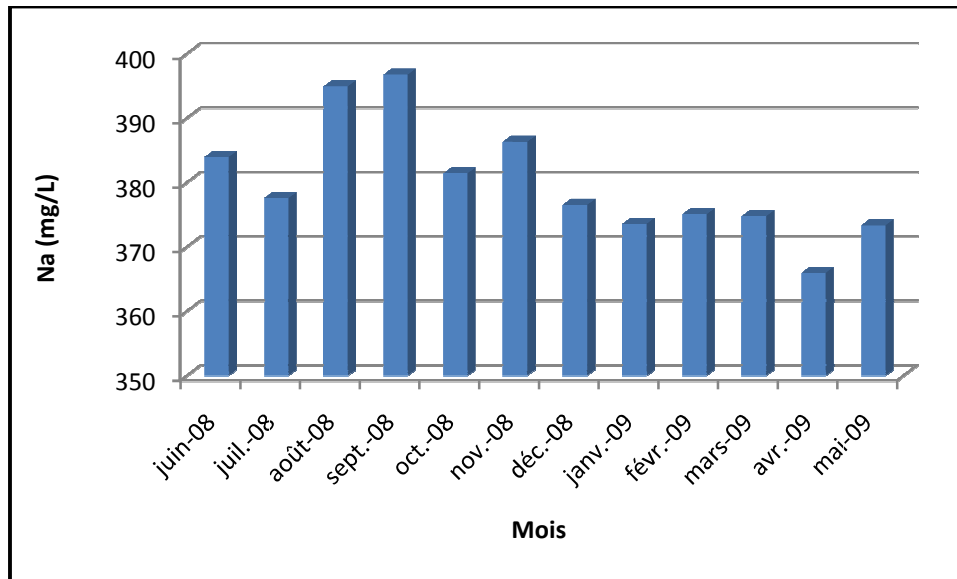


Figure 77 : Variation de la concentration de  $\text{Na}^+$  dans les eaux du barrage de Foug el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.8 Sulfates ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup>

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/L, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg/L) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé (Rodier et al., 2009).

La présence des sulfates dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses mais aussi aux pesticides provenant des eaux d'irrigation. Les concentrations observées dans les eaux du barrage varient 239,5 mg/L à 358,5 mg/L avec une moyenne de 307,0 mg/L pour la période des hautes eaux et de 330,6 pour la période des basses eaux (Figure 78). Les échantillons prélevés dans des endroits proches des zones d'irrigation et des embouchures des Oued qui drainent les formations gypseuses de Dj. Zouabbi en présentent des concentrations remarquables. Les plus fortes concentrations en sulfates sont enregistrées dans les eaux des Oueds Mellah Seghira avec 4361,3 mg/L et Mellah Kebira avec 1493,2 mg/L ce qui confirme le lien existant entre la présence de sulfates dans les eaux du barrage et la dissolution des formations triasiques existantes au niveau du Djebel Zouabbi et de la klippe de Bir Bouhouche.

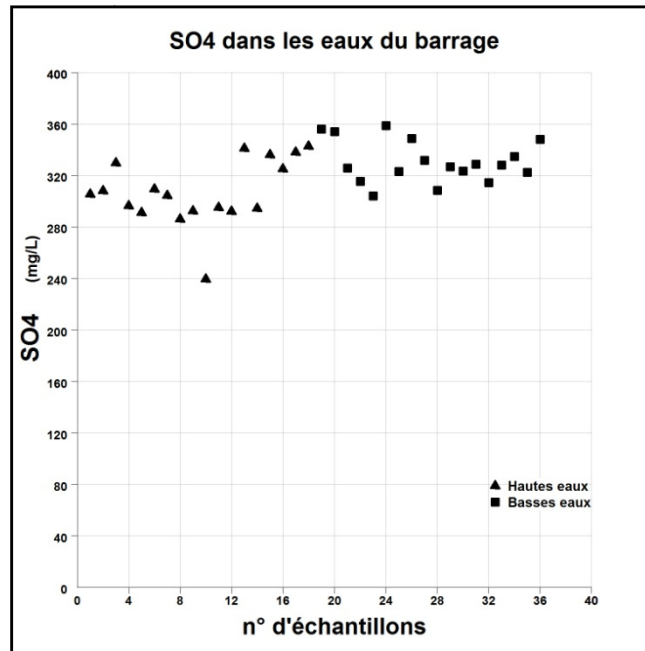


Figure 78 : Concentration des sulfates dans les eaux du barrage.

La concentration des sulfates (Figure 79) dans les eaux au niveau de la digue du barrage de Foum el Khanga varie de ~377,5mg/L au mois de mai 2009 à ~417mg/L pour une valeur maximale au mois d'août 2008 avec une moyenne de l'ordre de ~400mg/L.

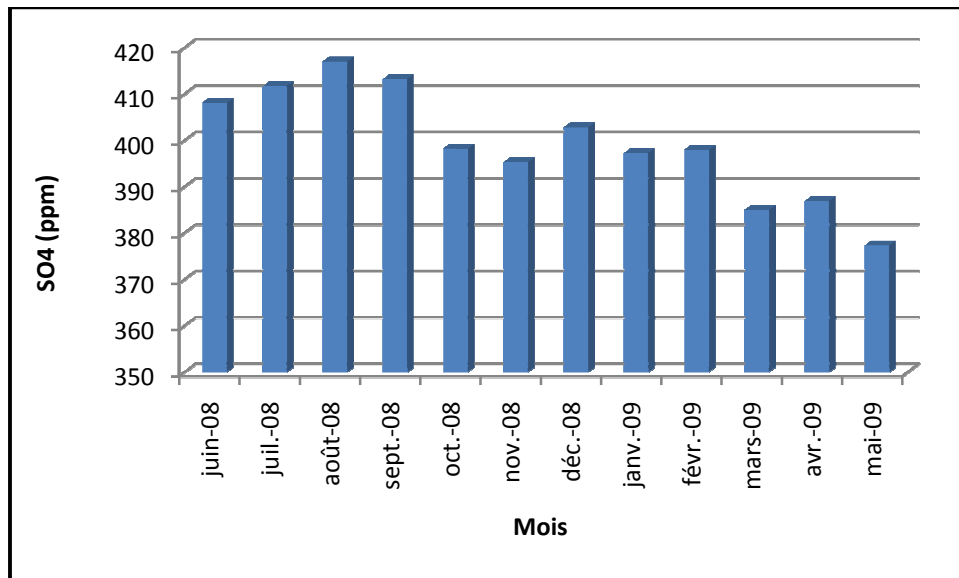


Figure 79 : Variation des sulfates dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.9 Calcium (Ca<sup>2+</sup>)

La présence d'ions Ca<sup>2+</sup> dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles, à savoir la dissolution des formations carbonatées (Calcaires et dolomies) et gypseuses. Le calcium est un des paramètres qui contribuent à la minéralisation des eaux. Il en ressort que

les eaux du barrage de Foug El Khanga présentent des teneurs variant de 123,1 mg/L à 230,2 mg/L avec une moyenne de 135,3 mg/L en périodes des hautes eaux et 144,4 mg/L en période des basses eaux. Les plus fortes concentrations sont enregistrées au niveau des embouchures de l'Oued Cherf, (échantillon 14'E) Oued Mellah Kebira (échantillon 18E) et Oued Mellah Seghira (échantillon 23E) (Figure 80).

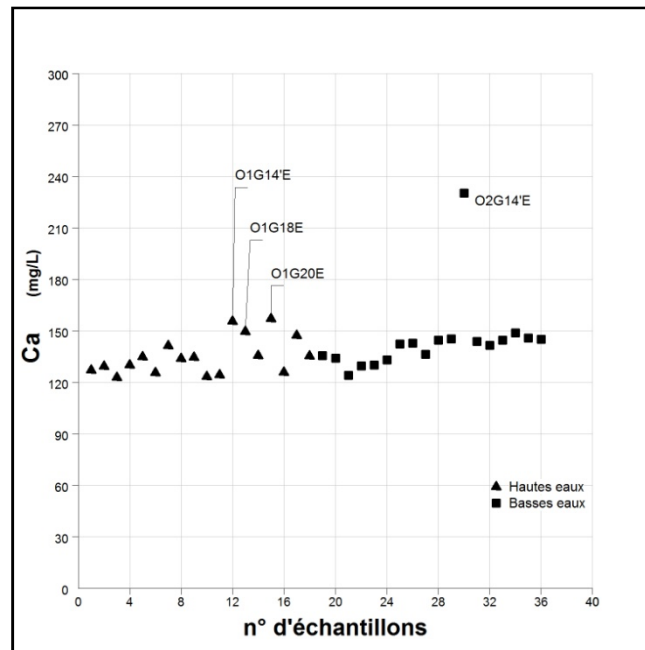


Figure 80 : Concentration du calcium dans les eaux du barrage.

La concentration du calcium (Figure 81) dans les eaux au niveau de la digue du barrage de Foug el Khanga varie de ~130,5mg/L au mois de juillet 2008 à ~137mg/L pour une valeur maximale au mois de juin 2008 avec une moyenne de l'ordre de ~133mg/L.

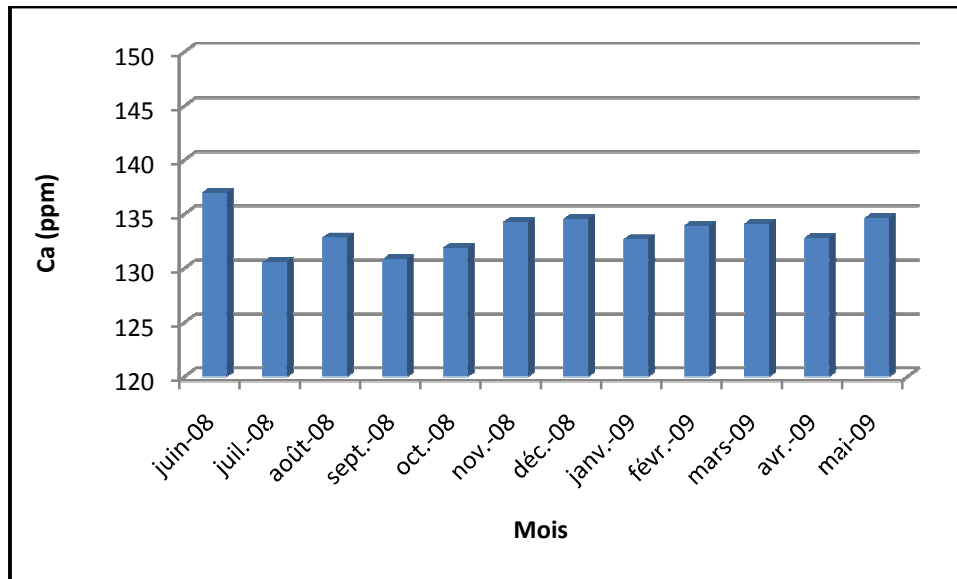


Figure 81 : Variation de  $\text{Ca}^+$  dans les eaux du barrage de Foug el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.10 Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Les origines du magnésium sont comparables à celles du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en Mg telles que la magnésite et la dolomite.

Les concentrations en magnésium dans le barrage présentent des valeurs moyennes de 56,8 mg/L pour la période des hautes eaux et de 61,7 mg/L en période des basses eaux (Figure 82). La plus haute concentration est enregistrée à l'embouchure de l'Oued Cherf (échantillons O2G14'E avec 85,8 mg/L) qui draine le long de son parcours des formations de terrain de nature variable. Des concentrations remarquables sont aussi enregistrées à l'embouchure de l'Oued Settara (échantillon G8E avec  $\approx$  62,5 mg/L).

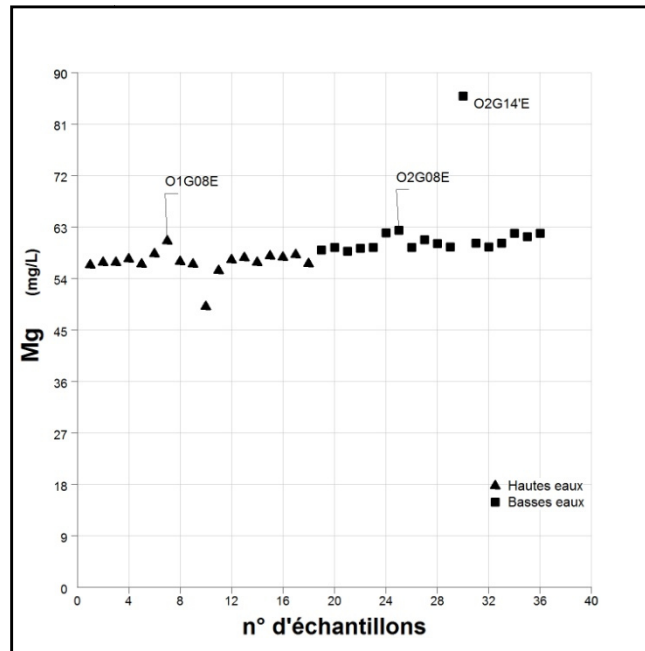


Figure 82 : Concentration du magnésium dans les eaux du barrage.

Les échantillons d'eau prélevés au niveau de la digue présentent une concentration annuelle moyenne en magnésium de l'ordre de ~63,3mg/L (Figure 83) avec une variation mensuelle douce allant de ~67mg/L en juillet 2008 à ~57mg/L en avril 2009.

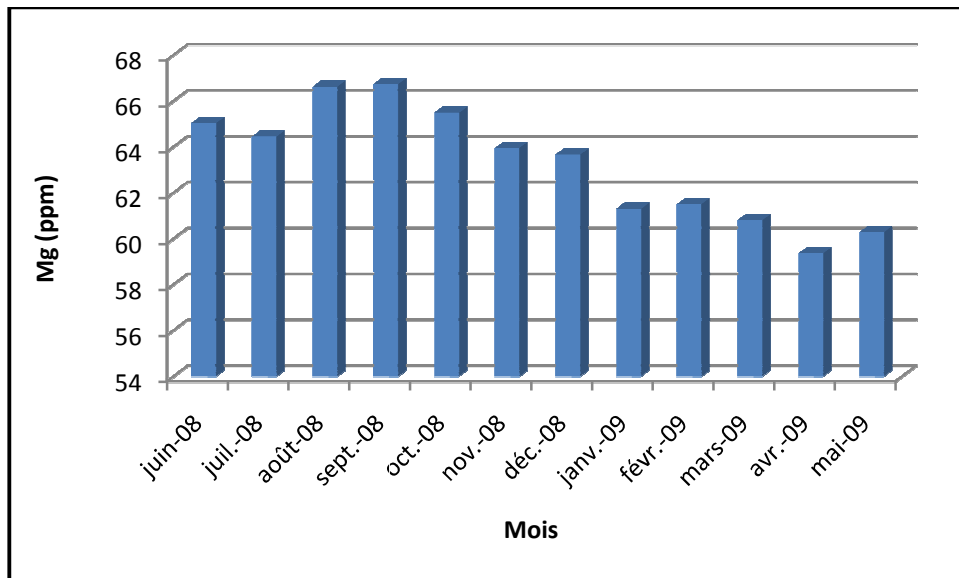


Figure 83 : Variation mensuelle du magnésium dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.11 Potassium (K<sup>+</sup>)

Les concentrations en potassium dans les eaux du barrage varient très peu de 18,6 mg/L à 32,8 18,6 mg/L avec une moyenne de 20,4 mg/L en période des hautes eaux et de

20,7 mg/L en période des basses eaux (Figure 84). Le potassium provient de l'altération des formations argileuses affleurant en amont et de la dissolution des formations salifères potassiques telle que la sylvine caractérisant la source de Bir Echeb qui se trouve à proximité du point de prélèvement O2G14'E. Cette dernière (la source de Bir Echeb, G14E) présente des concentrations assez élevées en K<sup>+</sup> avec des valeurs de 143,9 mg/L en période des hautes eau et de 148,2 mg/L en période des basses eaux.

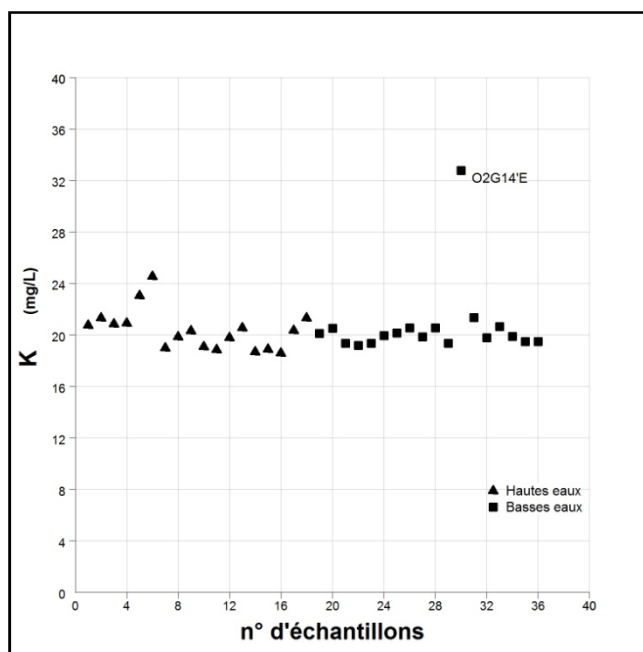


Figure 84 : Concentration du potassium dans les eaux du barrage.

Le potassium dans l'eau prélevée au niveau de la digue présente des concentrations assez faibles et plus ou moins constantes (Figure 85) variant mensuellement de ~5,4mg/L à ~7,3mg/L avec une moyenne annuelle de l'ordre de ~6,3mg/L.

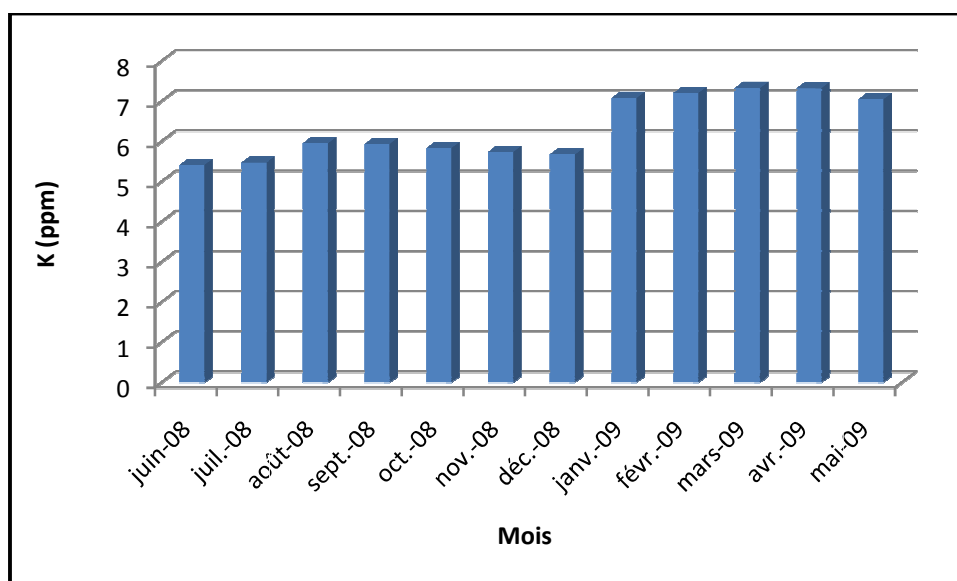


Figure 85 : Variation mensuelle du potassium dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.

#### IV.4.1.12 Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )

L'azote est présent sous trois formes chimiques qui sont, le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), le nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et l'ammonium ( $\text{NO}_4^-$ ). Nous n'avons pu déterminer que les nitrates lors des analyses effectuées sur les eaux du barrage de Foum El Khanga. Les résultats de nitrites et d'ammonium n'étaient pas significatifs. Les nitrates proviennent souvent de l'utilisation des engrais chimiques par les agriculteurs et de l'élevage de bétail mais aussi des rejets domestiques et industriels (El Ouali Lalami et al., 2011).

Les résultats d'analyses des eaux du barrage (Figure 86) montrent des teneurs moyennes de 35,8 mg/L en mois de mai et de 25,7 en période sèche, ce qui laisse penser à l'utilisation des engrais chimiques comme origine. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées tout près des installations de pompage des eaux là où l'activité agricole est intense avec des teneurs 62,2 mg/L.

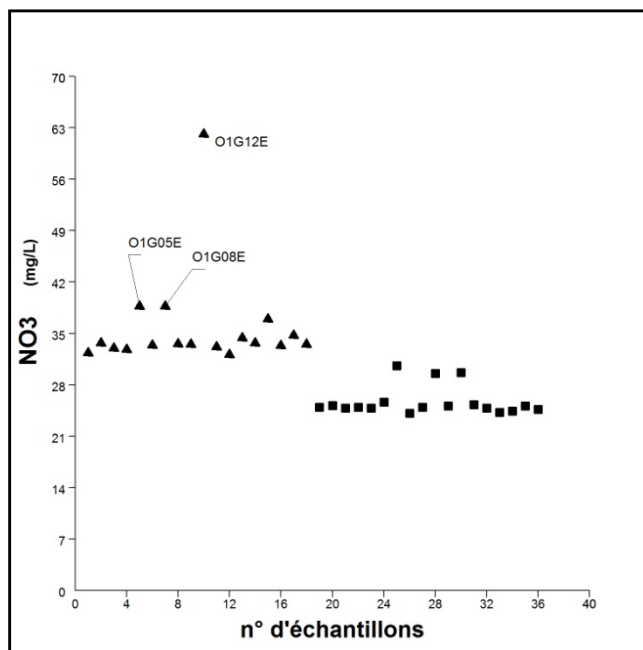
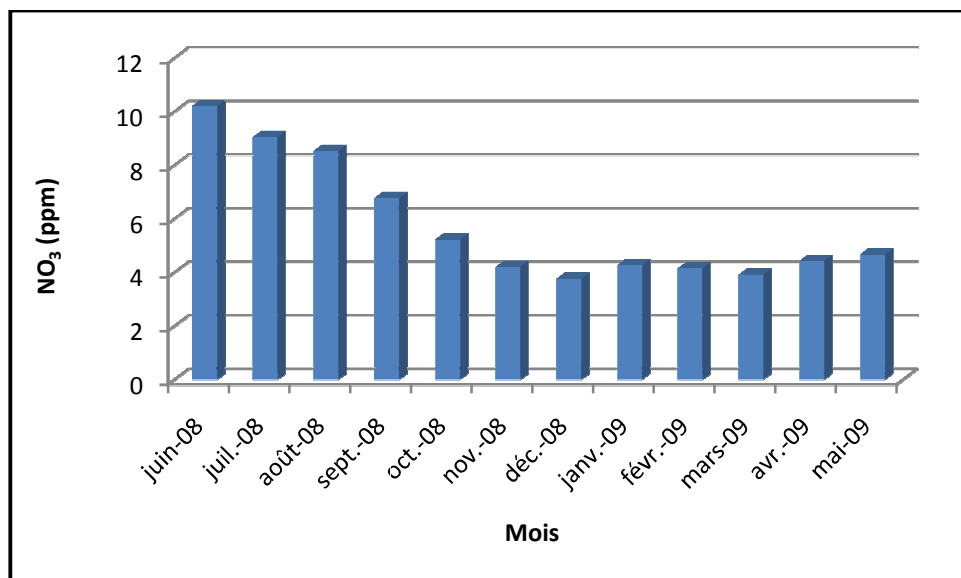


Figure 86 : Concentration des nitrates dans les eaux du barrage.

Les nitrites représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, qui est très soluble. Leur présence dans les eaux naturelles en concentrations importantes est rare car ils s'oxydent facilement en nitrates. De plus la concentration de  $\text{NO}_2^-$  est très souvent intégrée dans la valeur mesurée de  $\text{NO}_3^-$ .

Le diagramme des teneurs en nitrates (Figure 86) met en évidence la variation de ces teneurs entre les différentes périodes et qui apparait plus importantes en hiver qu'en été, mais qui restent inférieures à la valeur admissible par les normes (50 mg/l). De ce fait, les eaux étudiées ne sont pas assujetties à une pollution ponctuelle par les nitrates.

La variation mensuelle des nitrates (Figure 87) dans les eaux prélevées au niveau de la digue semble être directement liée à l'utilisation des engrais chimiques par les agriculteurs car elle présente des concentrations élevées en saison d'été où le recours à l'irrigation est intense avec une valeur maximale en juin 2008 avoisinant 10,5mg/L et des concentrations minimale en période de crue de l'ordre de  $\sim 3,8$ mg/L en décembre 2009.



**Figure 87 : Variation mensuelle des nitrates dans les eaux du barrage de Foum el Khanga durant la période de juin 2008 au Mai 2009.**

#### IV.4.2 Salinité des eaux du barrage et leur aptitude à l'irrigation

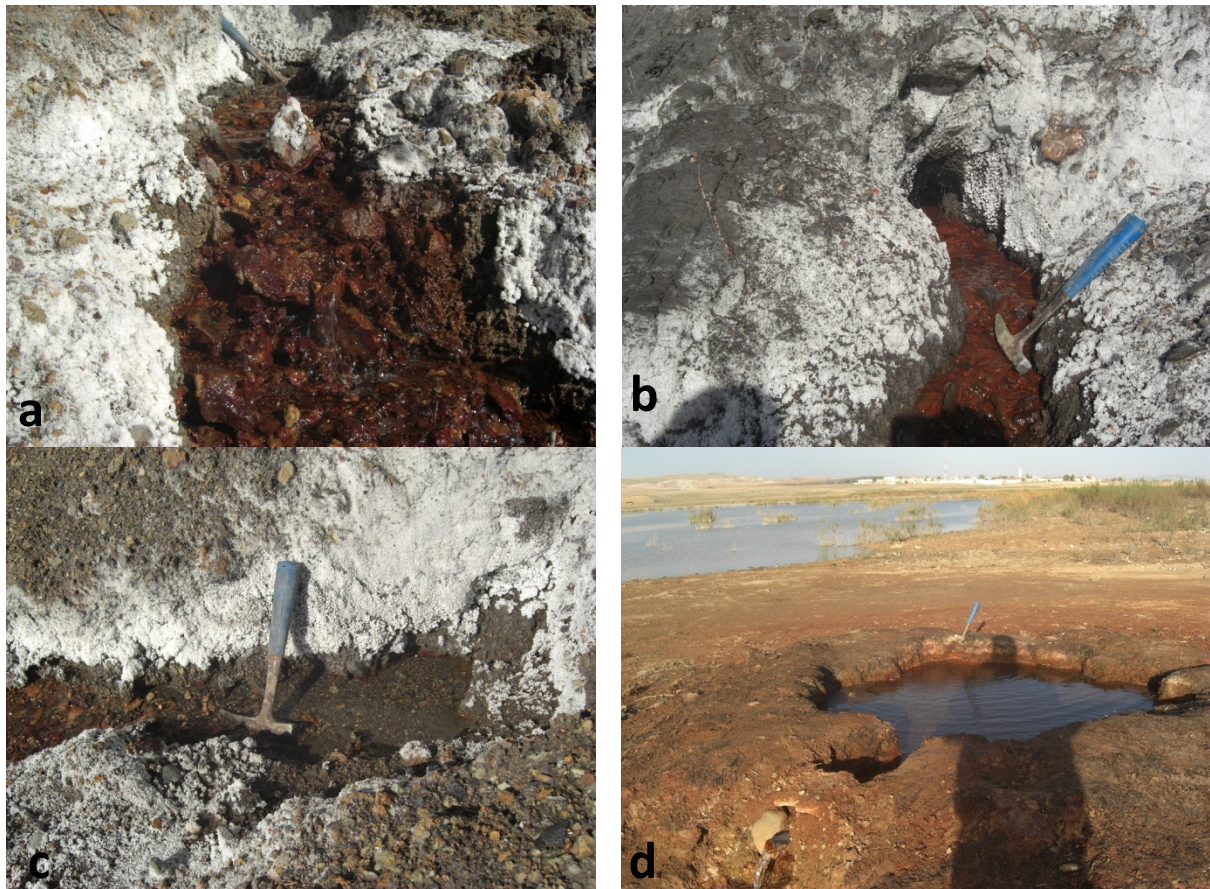
On définit la salinité de l'eau par la quantité totale des résidus solides lorsque toute la matière organique ainsi que les carbonates ont été oxydés et lorsque le brome et l'iode ont été remplacés par du chlore.

Il est difficile de mesurer directement la salinité de l'eau par des méthodes de séchage et de pesage du résidu car un certain nombre de composés s'évaporent lors de cette opération. Toutefois, les proportions relatives entre les différents ions sont quasiment constantes, ce qui signifie qu'il suffit de déterminer la concentration d'un seul élément de l'eau analysée pour en déduire les concentrations des autres éléments. Le total des sels dissous (TDS) est aussi un paramètre indicateur de la salinité des eaux. Or depuis 1978, la salinité est officiellement mesurée à partir de la conductivité électrique de l'eau à une certaine température et pression.

Le recours à l'irrigation des terres agricoles sous un climat semi-aride est inévitable. Tel est le cas des plaines agricoles du bassin versant d'Oued Cherf. L'eau du barrage de Foum el Khanga est, donc de plus en plus sollicitée.

Le barrage de Foum el Khanga sur l'Oued Cherf est alimenté par plusieurs cours d'eau et sources qui portent un nom significatif de salinité dont les eaux parcourent des terrains

salifères et qui contribuent sensiblement à la salinité des eaux du barrage. Oued Mellah Kebira, Oued Mellah Seghira, Ain Mellah et Bir Echeb en sont des exemples (Figure 88).



**Figure 88 : Photographies de quelques oueds et sources d'eau alimentant le barrage de Foum El Khanga.**

- (a) Oued Mellah Seghira avec encroutements de sels sur ses abords.
- (b) et (c) Ain Mellah avec encroutements de sel.
- (d) Source de Bir Echeb

Le barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf subit l'action conjuguée de la sécheresse et des prélèvements par pompage destinés à l'irrigation des terres agricoles, ce qui favorise l'augmentation de la salinité de ses eaux. L'origine de la salinité est attribuée au lessivage des formations du Trias ainsi qu'à l'effet de l'évaporation et au retour des eaux d'irrigation.

La salinité est l'un des paramètres de qualité les plus importants pour l'eau d'irrigation. Une salinité excessive peut altérer les propriétés du sol, endommager les plantes ou réduire le rendement des cultures (Asano and Levine, 1998).

Il est connu que les sols et les plantes peuvent être affectés par les sels minéraux (Na, Cl, Ca, Mg, K etc..) contenus dans l'eau. Ces derniers peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption de l'eau qui agit sur le processus osmotique, ou chimiquement par les réactions métaboliques telles que celles causées par les constituants toxiques (Hg et Pb).

L'eau faiblement minéralisée pénètre dans la plante par le phénomène d'osmose. Celui-ci sera inversé dans le cas où l'eau est fortement minéralisée et par conséquent la plante se dessèche.

Le sol irrigué par de l'eau salée peut connaître des changements dans sa structure, sa perméabilité et son aération ce qui influence directement le développement de la plante (Person, 1978). L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer la dispersion et la destruction de la structure du sol (Suyama et al., 2007; Khechana, 2014), si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium, dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture (Khelef, 2006; Papaioannou et al., 2007; Khechana and Derradji, 2014). Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable.

Les sels dissous dans les eaux à salinité élevée s'accumulent dans la zone racinaire des plantes. Ils s'épaississent par la suite et limitent la disponibilité de l'eau dans le sol (Ayers and Westcot, 1994). L'accumulation de sels dans le sol diminue le rendement des cultures et peut finalement rendre ce sol impropre à la culture (Pescod, 1992).

La qualité des eaux d'irrigation, les caractéristiques du sol et l'efficacité du système de drainage sont les facteurs essentiels qui influent sur l'intensité du processus de salinisation des terrains agricoles. En Algérie plus de 20 % des sols irrigués sont affecté par la salinité à cause de mauvaises pratiques d'irrigation (Douaoui and Hartani, 2007; Bouhlassa et al., 2008; Rouabhia and Djabri, 2010; Gouaidia et al., 2012).

Pour définir l'aptitude des eaux du barrage de Foug el Khanga à l'irrigation et leur influence sur le sol, on utilise la méthode de SAR et celle de (Wilcox, 1948).

#### IV.4.2.1 Total des Sels Dessous (TDS)

Les sels minéraux contenus dans les eaux d'irrigation ont un impact sur le sol et les plantes, car ils peuvent causer des changements dans la structure du sol en modifiant sa perméabilité et son aération et perturber le développement des plantes (Person, 1978).

Le total des sels dissous (TDS) des eaux du barrage varient de 1275 mg/L à 3315 mg/L avec une moyenne qui tourne au tour de 1500 mg/L (Figure 89). Les cours d'eaux et les sources alimentant le barrage présentent un Total des Sels Dissous (TDS) très contrasté. Ce dernier varie largement de 853 mg/L à 41640 mg/L.

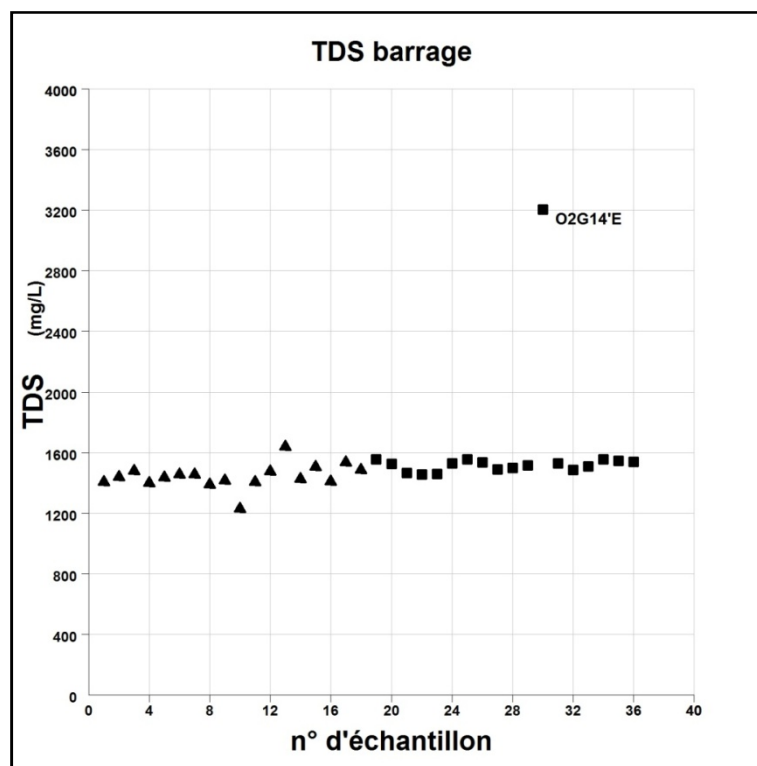


Figure 89 : Diagrammes représentant le TDS des eaux du barrage de Foum El Khanga.

#### IV.4.2.2 Le diagramme de Piper

Nous avons utilisé le diagramme de Piper qui permet de représenter le faciès chimique d'un ensemble d'échantillons d'eau. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global.

A l'analyse du diagramme, il ressort que les eaux du barrage de Foum El Khanga sont majoritairement chlorurées sodi-potassiques aussi bien pour les échantillons de la période des hautes eaux que pour ceux des basses eaux (Figure 90), ce qui prouve l'alimentation du

barrage par des eaux qui drainent les formations salifères du trias affleurant en plusieurs endroits en amont.

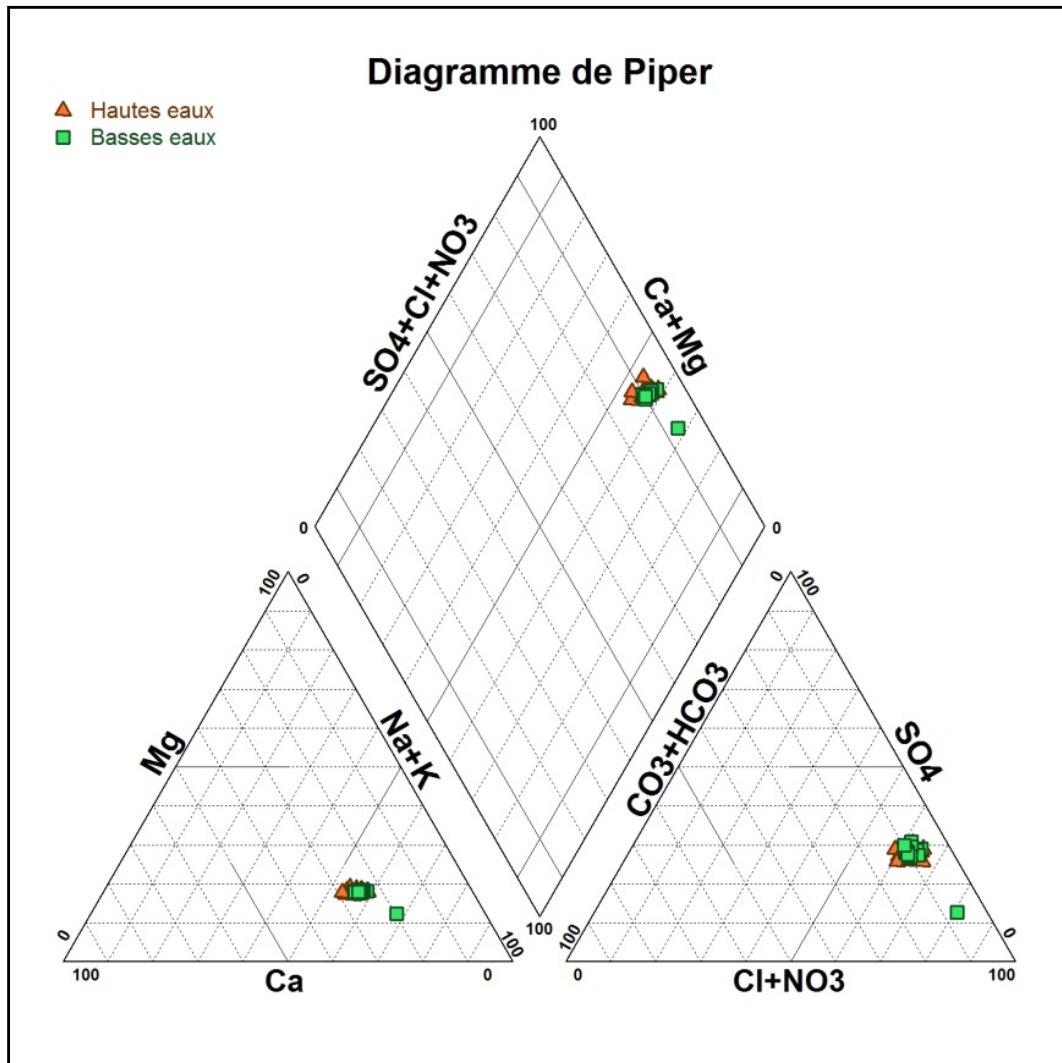


Figure 90 : Diagrammes de Piper des eaux du barrage de Fom El Khanga.

La projection de tous les échantillons d'eau du barrage, des cours d'eau et des sources dans le diagramme de Piper (Figure 91), montre la prédominance du faciès chlorurées sodi-potassique à tendance calcique pour les cours d'eau.

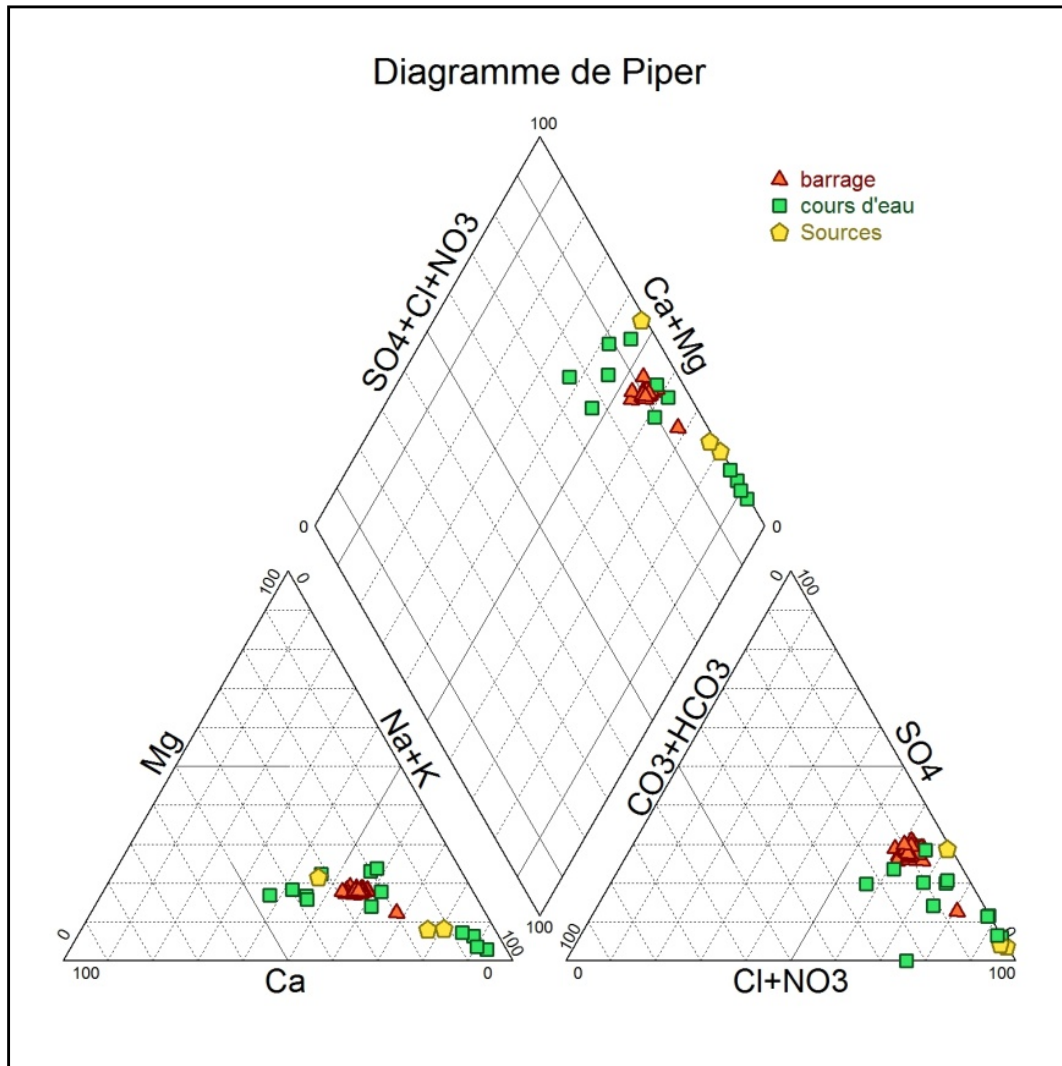
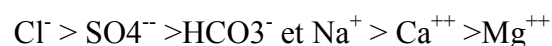


Figure 91 : Diagrammes de Piper de tous les échantillons d'eau.

#### IV.4.2.3 Le diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.

A travers ces représentations, les eaux du barrage de Foum El Khanga présentent un faciès chloruré sodique et potassique. Selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff (Figures 92 et 93), les ions dominants sont les chlorures pour les anions et le sodium et le potassium pour les cations. Les concentrations s'ordonnent comme suit :



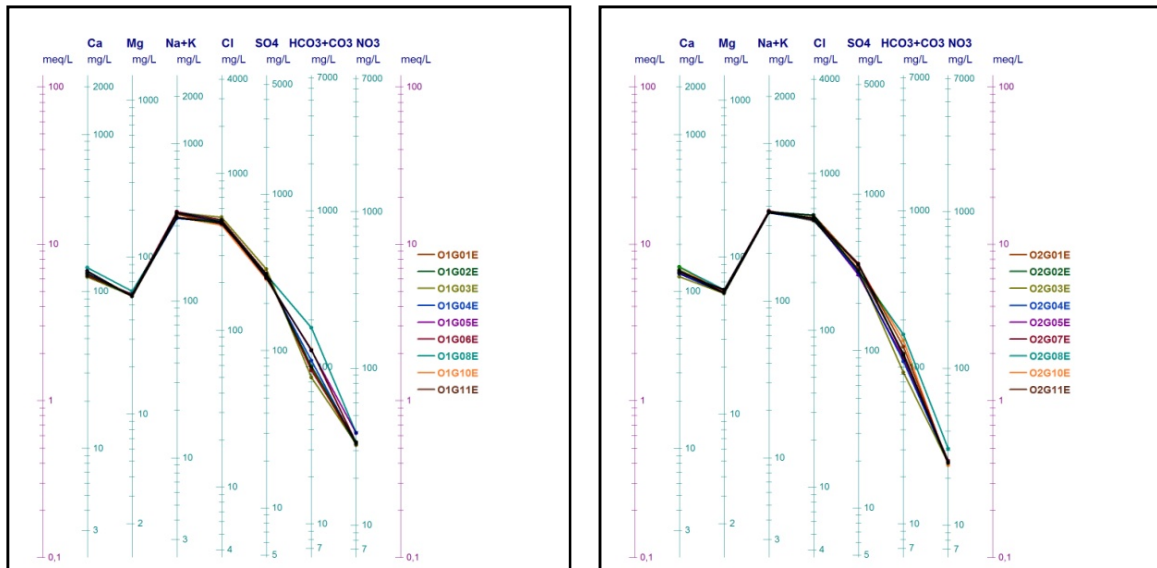


Figure 92 : Diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux du barrage de Foum El Khanga (Hautes eaux).

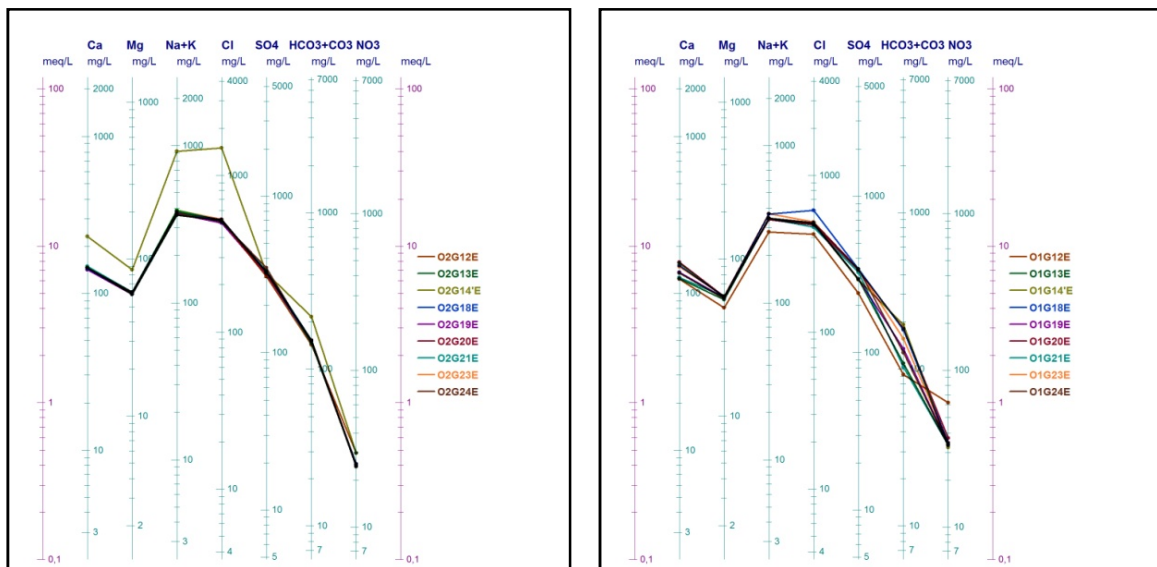


Figure 93 : Diagrammes de Schöeller-Berkaloff des eaux du barrage de Foum El Khanga (Basses eaux).

#### IV.4.2.4 Diagramme de Richards

Le diagramme de (Richards, 1954) est très utilisé pour classer les eaux d'irrigation. Il comporte des classes qui sont définies par la combinaison du SAR (Sodium Absorption Ratio) et de la conductivité électrique (CE). Cette méthode, nommée aussi, classification de USSLS était adoptée en 1954 par United State Salinity Laboratory Staff.

L'indice du SAR exprime l'activité relative des ions de sodium par rapport au calcium et au magnésium dans les réactions d'échange eau-sol. La présence d'une quantité

importante d'ions de  $\text{Na}^+$  dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  adsorbés sur les argiles de sol seront progressivement remplacés par le  $\text{Na}^+$  présent dans l'eau en forme échangeable et cause la dispersion des particules dans le sol. Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure, par conséquent l'asphyxie des plantes.

Ce problème est également relié à plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol. Par exemple les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols argileux quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut SAR.

La prédominance des ions de  $\text{Ca}^{2+}$  et de  $\text{Mg}^{2+}$  adsorbés sur le complexe d'échange du sol lui donne une structure perméable et granulaire et devient facilement cultivé.

Le SAR est définie par l'équation suivante :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{1}{2}([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}}$$

$[Na^+]$  : Concentration de l'eau en ions sodium en méq/L.

$[Ca^{2+}]$  : Concentration de l'eau en ions de calcium (méq/L).

$[Mg^{2+}]$  : Concentration de l'eau en magnésium en méq/L.

Les valeurs du SAR peuvent être utilisées pour prédire le degré pour lequel l'eau d'irrigation a tendance à rentrer en échange cationique avec le sol. Des valeurs élevées de SAR impliquent un risque de sodicité qui peut endommager la structure et la fertilité du sol. Quatre classes de risque alcalin en relation avec le risque salin sont présentées dans le tableau 24.

**Tableau 24 : Classification des eaux par niveau d'aptitude à l'irrigation par la méthode du S.A.R.**

Classes	Risque alcalin	S.A.R
S1	Risque faible	$S.A.R \leq 10$
S2	Risque moyen	$10 < S.A.R \leq 18$
S3	Risque élevé	$18 < S.A.R \leq 26$
S4	Risque très élevé	$S.A.R > 26$

En tenant compte de la salinité globale des eaux, la conductivité électrique définie toujours quatre classes (Tableau 25).

**Tableau 25 : Classification de la salinité globale des eaux.**

Classes	Risque salin	Conductivité électrique (CE)
C1	Risque faible	$CE \leq 0,25$
C2	Risque moyen	$0,25 < CE \leq 0,75$
C3	Risque élevé	$0,75 < CE \leq 2,25$
C4	Risque très élevé	$CE > 2,25$

En tenant compte du risque alcalin et de la salinité globale des eaux, la classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation est donnée par le tableau 26.

**Tableau 26 : Classification des eaux par degrés d'aptitude à l'irrigation.**

Classes	Degré	Qualité
C1-S1	1	Excellente
C2-S1 C2-S2	2	Bonne
C3-S1 C3-S2 C2-S3	3	Admissible
C4-S1 C4-S2 C3-S3	4	Médiocre
C3-S4 C4-S3 C4-S4	5	Mauvaise

L'application de la méthode de Richards associant le SAR et la conductivité électrique aux échantillons d'eaux prélevés dans la cuvette du barrage de Foum el Khanga (Figure 94) montre que ces eaux sont de qualité médiocre pour la période des hautes eaux et deviennent mauvaise à très mauvaises à l'irrigation durant la période des basses eaux et constituent alors un danger certain pour la plupart des cultures et sur la plupart des types de sols.

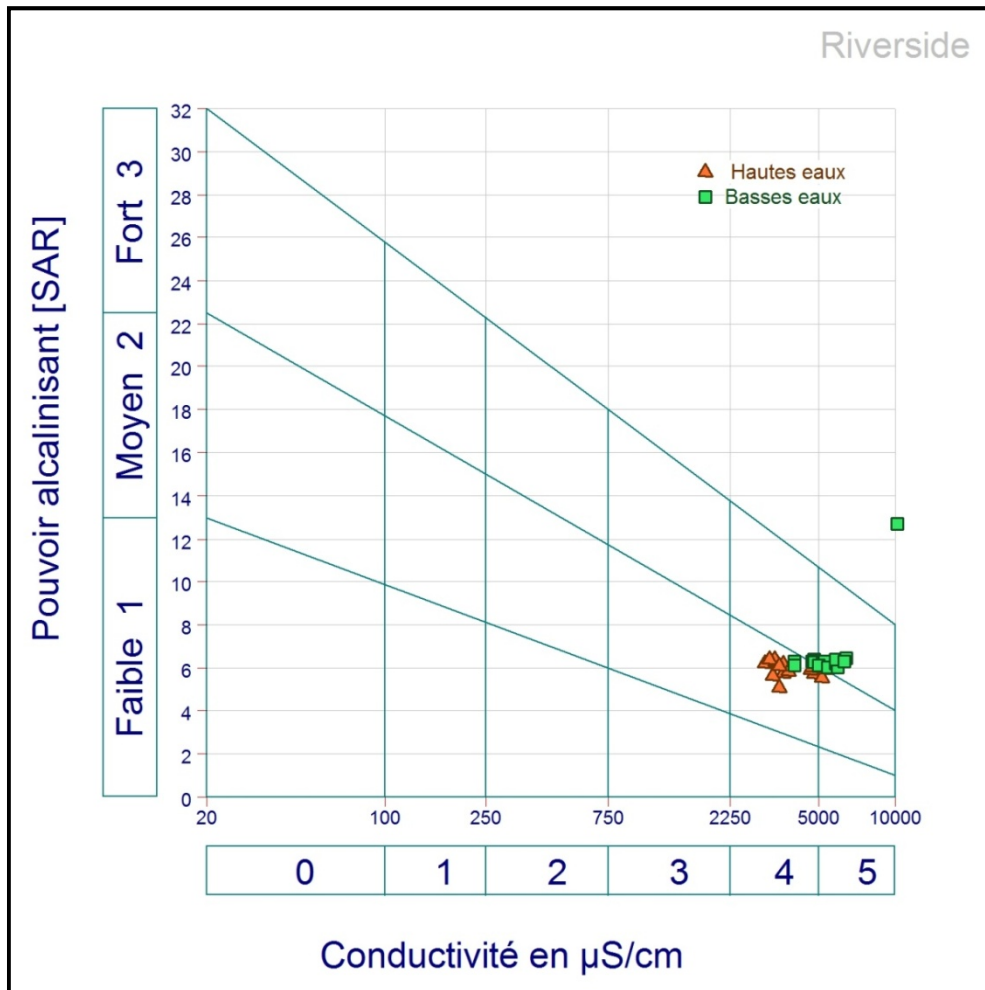


Figure 94 : Diagramme de Richards pour les eaux du barrage de Foug el Khanga.

#### IV.4.2.5 Diagramme de Wilcox

Il est connu qu'en général les plantes supportent mal les sols saturés en sodium, ceci s'exprime par leur croissance très faible ou nulle. Le diagramme de Wilcox (1948), qui est une représentation graphique du pourcentage du sodium (% Na) en fonction de la conductivité électrique, permet de déterminer le risque de salinité des eaux. La classification définie cinq classes d'eau : excellente, bonne, admissible, médiocre et mauvaise. Le pourcentage du sodium est défini par la formule suivante :

$$\% Na^{+} = \frac{100 \cdot Na^{+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}}$$

Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L.

La projection des échantillons d'eau du barrage de Foug el Khanga sur l'Oued Cherf dans le diagramme de Wilcox montre clairement que les eaux de la cuvette du barrage de

Foum el Khanga sont de mauvaise qualité pour l'irrigation et se dégradent encore pendant la saison sèche et cela à cause de leur forte minéralisation qui s'exprime par des valeurs assez élevées de la conductivité électrique (Figure 95).

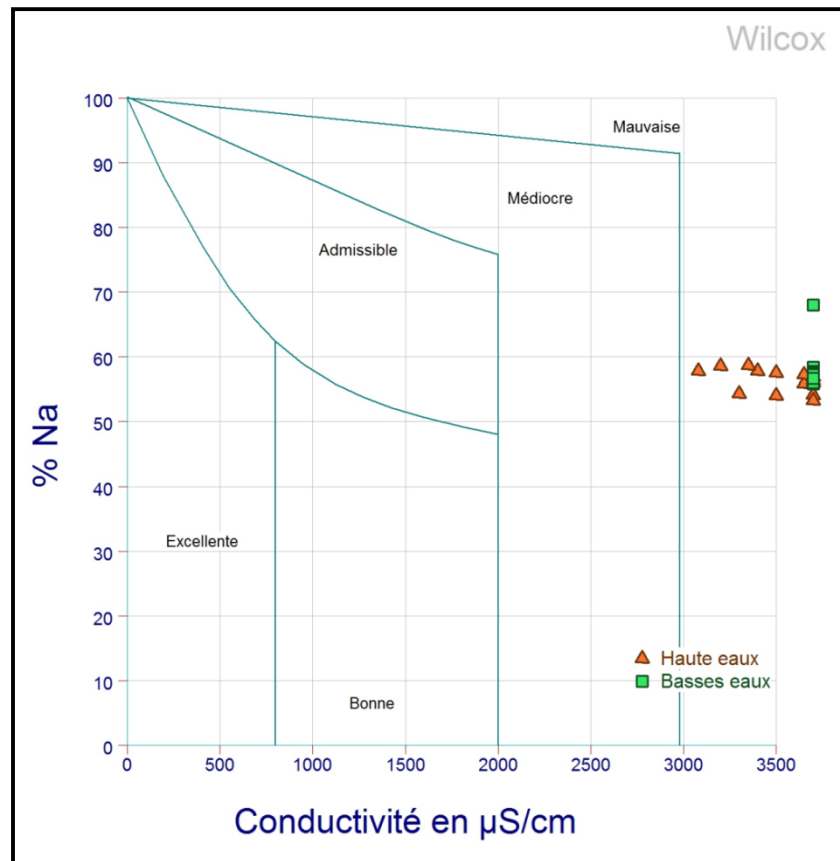


Figure 95 : Diagramme de Wilcox pour les eaux du barrage de Foum el Khanga.

## V. Conclusion

Le pH des eaux du barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf varie de 7,3 à 8,3 avec une moyenne de 7,4 environ. Les valeurs de conductivité mesurées indiquent une minéralisation très élevée, car elles sont globalement supérieures à 3000 µS/cm. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées aux embouchures immédiates des sources et des oueds salés.

L'alcalinité des eaux du barrage varie de ~86 mg/L à ~216 mg/L avec une moyenne de ~135mg/L. Les roches carbonatées du BV confèrent aux eaux du barrage un caractère dur avec des valeurs variant de ~51°F à ~63°F. Les formations géologiques salifères affleurant en amont jouent un rôle cardinal dans la concentration des chlorures et de sodium dans les eaux du barrage ; la concentration moyenne des chlorures est de l'ordre 493,6 mg/L pour la

période des hautes eaux est de 571,5 mg/L pour la période des basses eaux, quant à celle de sodium, elle varie de 326,6 mg/L en période des hautes eaux à 380,9 mg/L en période des basses eaux.

Les concentrations notables de calcium et magnésium dans l'eau du barrage est due en premier lieu à la dissolution des formations carbonatées et gypseuses. Elles présentent des valeurs moyennes de 135,3 mg/L en périodes des hautes eaux et de 144,4 mg/L en période des basses eaux pour le calcium et des valeurs moyennes de 56,8 mg/L pour la période des hautes eaux et de 61,7 mg/L en période des basses eaux pour le magnésium.

Le potassium avec des concentrations moyennes de 20,5 mg/L provient de l'altération des formations argileuses affleurant en amont et de la dissolution des formations salifères potassiques telle que la sylvine. Les eaux du barrage montrent des teneurs moyennes en nitrates de 35,8 mg/L en mois de mai et de 25,7 en période sèche. Les concentrations les plus élevées, avec des teneurs 62,2 mg/L, sont enregistrées tout près des activités agricoles, ce qui laisse penser à l'utilisation des engrais chimiques comme origine.

Le total des sels dissous (TDS) des eaux du barrage varient de 1275 mg/L à 3315 mg/L avec une moyenne qui tourne au tour de 1500 mg/L. Le faciès hydrochimique est majoritairement chlorurées sodi-potassiques aussi bien en période des hautes eaux qu'en période des basses eaux, ce qui prouve l'alimentation du barrage par des eaux qui drainent les formations salifères du trias affleurant en plusieurs endroits en amont.

L'application de la méthode de Richards associant le SAR et la conductivité électrique montre que ces eaux du barrage sont de qualité médiocre pour la période des hautes eaux et deviennent mauvaises à très mauvaises à l'irrigation durant la période des basses eaux et constituent alors un danger certain pour la plupart des cultures et sur la plupart des types de sols.

L'utilisation du diagramme de Wilcox montre clairement que les eaux du barrage sont de mauvaise qualité pour l'irrigation et se dégradent encore pendant la saison sèche et cela à cause de leur forte minéralisation qui s'exprime par des valeurs assez élevées de la conductivité électrique.

CHAPITRE 7  
INTERACTION EAU-SEDIMENTS

# CHAPITRE 7 : INTERACTION EAU-SEDIMENTS

## I. Introduction

Pour comprendre l'effet des sédiments sur le chimisme de l'eau du barrage de Fom El Khanga, on a initié des manips de réactivité eau-sédiments au laboratoire GET de Toulouse. De nombreuses études de laboratoire ont été faites dans ce sens pour quantifier le taux de dissolution des minéraux essentiels de roches (Sverdrup, 1990; White and Brantley, 1995; Oelkers, 2001; Brantley, 2008; Schott et al., 2009; Zhen-Wu et al., 2016; Oelkers et al., 2018; Yu et al., 2019). L'application des résultats de laboratoire aux systèmes naturels est beaucoup discutée car la vitesse de dissolution des minéraux dans la nature semble être nettement inférieure à celle du laboratoire (White and Brantley, 2003; Ganor et al., 2007). Ces différences sont probablement liées aux affinités des réactions chimiques et à la participation des minéraux secondaires (Zhu, 2005; Maher et al., 2009; Zhu and Lu, 2009; Oelkers et al., 2019), ainsi qu'à l'âge des minéraux (White, 1995; Hodson and Langan, 1999), et aux difficultés de quantification des taux de dissolution/précipitation des minéraux dans la nature (Hacini et al., 2008). Etudier la dissolution des sédiments lacustres dans leurs milieux naturels nous aide à mieux cerner ces différences. Si les expériences de laboratoire étudiant les taux de dissolution sont couramment effectuées sur des minéraux préalablement broyés et nettoyés, les sédiments naturels sont régulièrement broyés et nettoyés pendant leur transport par les eaux de ruissellement.

## II. Méthode

Parmi les échantillons de sédiments et d'eau prélevés lors des deux campagnes d'échantillonnage, on a choisi sept d'entre eux pour initier des manips d'interaction eau-sédiment. Les expériences ont été faites à l'aide de réacteurs fermés (batch), similaires à ceux qui ont été décrits par Harouiya et al. (2007). Ceux-ci sont constitués de flacons étanches (Nalgene) à 150 mL de volume (Figure 96) placés dans une enceinte thermostatée à 25°C (Figure 97).



**Figure 96 : Photographie d'un réacteur fermé utilisé dans nos manip.**



**Figure 97 : Photographie d'une enceinte thermostatée.**

Dans chaque réacteur on a mis  $\approx 500$  mg de sédiments avec  $\approx 80$  mL d'eau de barrage correspondante. L'agitation des réacteurs se fait manuellement chaque 48 heures.

Les sédiments utilisés dans ces expériences ont été obtenus par échantillonnage direct au font du barrage à sa périphérie immédiate. Ils ont la même localité que les échantillons d'eau correspondants (Figure 98)

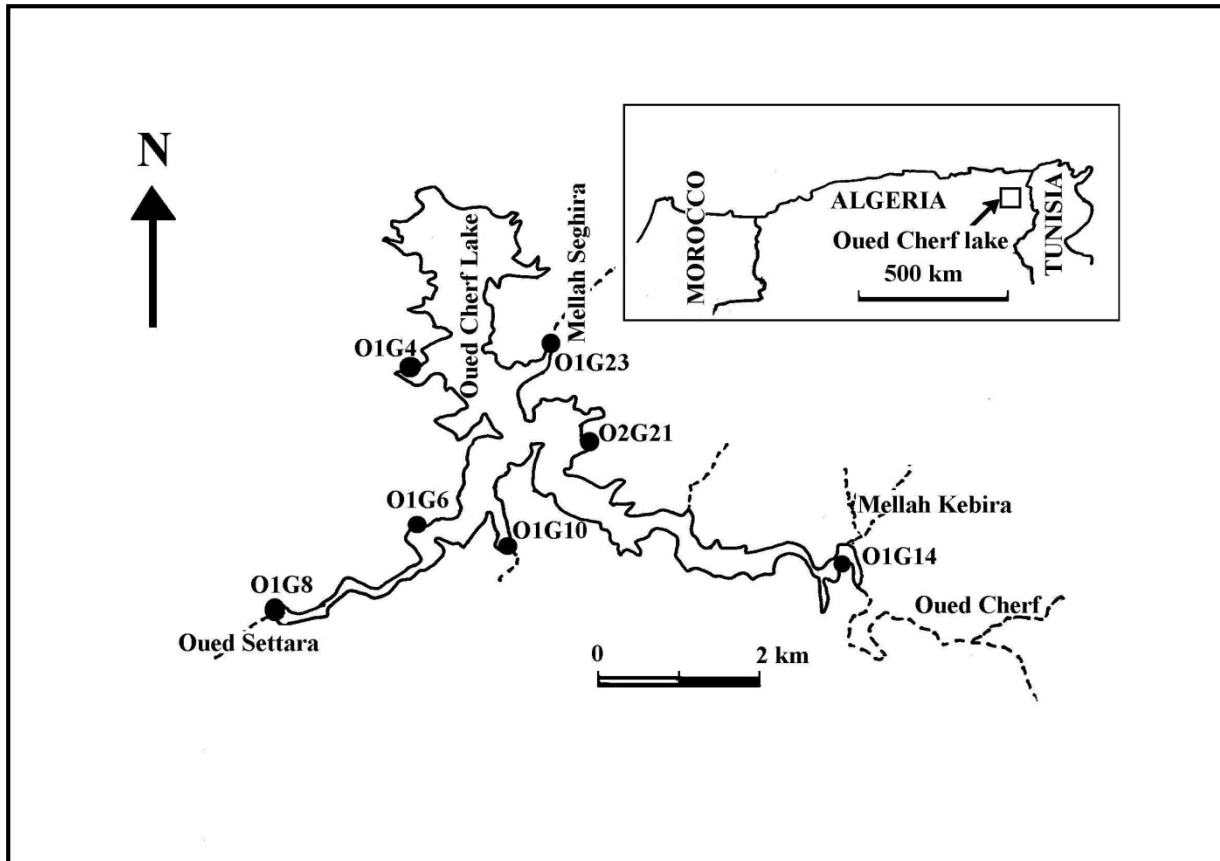


Figure 98 : Localisation des échantillons prélevés dans le barrage de Foum El Khanga sur l'Oued Cherf utilisés lors de la présente étude.

### III. Sédiments

La diffraction des rayons X montre que ces sédiments sont composés de quartz, calcite, argiles, oxydes de fer et de minéraux de sulfates (Cf. Figures 30 à 40). Les images SEM obtenues par microscope électronique montre que ceux-ci sont composés de grains de petites tailles ( $< 100 \mu\text{m}$ ). Les plus gros grains sont composés d'un assemblage de minéraux de différentes natures ; quartz, calcite, oxydes de fer, ... (Cf. Figures 41 à 47).

La composition chimique des sédiments, déterminée par fluorescence des rayons X, varie considérablement d'un échantillon à un autre ;  $\text{SiO}_2$  varie de 18% à 78% (Tableau 27). La surface spécifique des sédiments, déterminée par la méthode de triple-points BET, varie de  $16 \text{ m}^2/\text{g}$  à  $45 \text{ m}^2/\text{g}$ .

**Tableau 27 : Composition des solides utilisés dans la présente étude déterminée par fluorescence des rayons X.**

% Oxydes	O1G04S	O1G06S	O1G08S	O1G10S	O1G14S	O1G23S	O2G21S
SiO <sub>2</sub>	77,89	31,77	35,74	18,17	44,85	57,89	48,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,44	3,38	11,79	4,57	15,00	9,35	5,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,21	4,35	5,71	2,62	7,34	7,08	4,74
MnO	0,03	0,08	0,06	0,03	0,08	0,18	0,09
MgO	-	0,59	1,47	0,87	1,86	1,65	1,08
CaO	7,73	32,11	19,59	50,56	23,3	7,13	22,21
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	-	2,1	1,51	-
K <sub>2</sub> O	0,4	0,5	0,81	0,67	1,7	1,29	0,82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,08	0,14	0,04	0,18	0,15	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,27	0,58	0,35	-	0,66	0,45
Pf <sup>(1)</sup>	6,2	26,23	23,4	21,7	2,2	10,5	16,3
Cl	-	0,02	0,08	-	1,05	0,96	0,09
Total	99,26	99,36	99,29	99,58	98,61	97,39	99,29
S.A <sup>(2)</sup>	15,69	16,46	44,97	30,07	47,21	15,79	38,9

(1) Perte de feu, (2) Surface spécifique (m<sup>2</sup>/g).

## IV. Echantillons d'eau

La composition chimique des sept échantillons d'eau utilisés dans nos expériences est illustrée dans le tableau 28.

**Tableau 28 : Composition des solutions initiales utilisées dans la présente étude.**

Anions/cations	O1G04E	O1G06E	O1G08E	O1G10E	O1G14'E	O1G23E	O2G21E
Na (ppm)	313,31	344,99	317,83	321,06	327,32	348,66	368,07
Mg (ppm)	57,42	58,32	60,54	56,92	57,24	58,21	61,83
Cl (ppm)	490,21	506,64	481,07	470,30	490,82	504,46	517,38
K (ppm)	20,92	24,56	18,98	19,87	19,78	20,35	19,90
Ca (ppm)	129,96	125,59	141,36	133,88	155,49	147,33	149,02
SO <sub>4</sub> (ppm)	296,73	309,50	304,70	285,86	292,17	338,18	334,49
HCO <sub>3</sub> (mmol/l)	1,80	1,56	2,93	2,12	3,15	2,56	2,50
NO <sub>3</sub> (ppm)	32,81	33,45	38,71	33,63	32,09	34,69	24,38
Si (ppm)	1,63	1,67	2,22	1,64	1,64	1,77	1,35
Al (ppb)	0,78	1,72	4,03	0,33	2,00	15,53	1,16
pH	7,75	8,10	8,05	8,05	7,95	7,90	7,70

L'état de saturation des phases minérales dans ces solutions a été déterminé en utilisant le PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) avec sa base de données LLNL. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 29.

**Tableau 29 : Etat de saturation des solutions initiales et finales des expériences en tenant compte des phases calculées à l'aide de PHREEQC Parkhurst et Appelo (1999) avec leur LLNC database.**

Phases	O1G4E(0)	O1G4E(6)	O1G6E(0)	O1G6E(7)	O1G8E(0)	O1G8E(7)	O1G10E(0)	O1G10E(7)	O1G14E(0)	O1G14E(7)	O1G23E(0)	O1G23E(7)	O2G21E(0)	O2G21E(7)
Albite	-1,43	0,03	-1,07	-0,02	-0,67	0,55	-1,77	1,07	-1,38	0,46	-0,43	-0,31	-1,68	-0,02
Amesite-14A	-3,88	5,20	-1,02	4,62	0,71	6,00	-4,16	6,12	-1,27	5,88	2,18	2,85	-3,41	5,48
Analcime	-1,45	0,02	-1,13	-0,04	-0,78	0,37	-1,81	0,80	-1,35	0,32	-0,45	-0,39	-1,61	0,02
Anhydrite	-1,45	-1,19	-1,44	-1,25	-1,37	-1,20	-1,44	-1,21	-1,35	-1,17	-1,30	-1,22	-1,33	-1,20
Anorthite	-6,96	-3,53	-6,20	-3,63	-5,32	-3,10	-7,57	-2,46	-6,15	-3,25	-4,37	-4,70	-6,77	-3,43
Aragonite	-0,00	0,49	0,27	0,30	0,60	0,61	0,37	0,15	0,57	0,75	0,42	0,46	0,16	0,52
Boehmite	0,27	1,39	0,33	1,43	0,58	1,36	-0,30	1,85	0,37	1,26	1,27	0,68	0,45	1,49
Calcite	0,15	0,63	0,42	0,45	0,75	0,75	0,52	0,30	0,72	0,89	0,56	0,60	0,31	0,67
Chrysotile	-2,88	0,42	-0,86	-0,14	-0,36	1,19	-1,32	-0,15	-1,29	1,40	-1,40	0,83	-3,13	0,31
Clinochlore-14A	-3,18	4,64	0,27	3,79	1,62	5,81	-1,76	4,53	-0,30	5,96	1,31	3,87	-3,20	4,66
Clinochlore-7A	-6,62	1,26	-3,18	0,41	-1,79	2,43	-5,22	1,15	-3,71	2,58	-2,09	0,50	-6,64	1,29
Dawsonite	-1,14	-0,09	-1,22	-0,17	-0,80	-0,12	-1,73	0,20	-0,99	-0,08	-0,16	-0,81	-0,93	0,04
Diaspore	0,69	1,80	0,74	1,84	0,99	1,77	0,12	2,26	0,78	1,66	1,68	1,08	0,87	1,89
Diopside	-4,74	-2,56	-3,40	-2,94	-2,98	-1,93	-3,67	-2,77	-3,62	-1,78	-3,71	-2,23	-4,94	-2,67
Dolomite	1,28	2,30	1,84	1,95	2,48	2,55	2,00	1,64	2,36	2,78	2,08	2,26	1,58	2,37
Epsomite	-3,89	-3,72	-3,84	-3,75	-3,86	-3,72	-3,88	-3,73	-3,90	-3,75	-3,84	-3,73	-3,82	-3,73
Gibbsite	0,14	1,20	0,19	1,24	0,42	1,17	-0,42	1,66	0,21	1,07	1,10	0,49	0,31	1,30
Gypsum	-1,19	-1,0	-1,16	-1,06	-1,14	-1,02	-1,16	-1,03	-1,12	-0,99	-1,08	-1,04	-1,08	-1,02
Hexahydrate	-4,12	-3,95	-4,08	-3,99	-4,09	-3,96	-4,11	-3,97	-4,14	-3,98	-4,08	-3,97	-4,05	-3,96
Illite	0,51	3,15	1,14	3,02	1,81	3,70	-0,36	4,96	0,77	3,38	2,84	1,80	0,52	3,03
K-Feldspar	0,34	1,37	0,89	1,07	1,12	1,83	0,17	2,51	0,44	1,68	1,34	0,83	0,14	1,04
Kaolinite	0,83	2,83	0,99	2,95	1,55	3,12	-0,22	4,27	0,88	2,82	2,69	1,60	0,97	2,93
Magnesite	-0,54	0,05	-0,26	-0,12	0,08	0,17	-0,20	0,29	-0,01	0,26	-0,13	0,03	-0,39	0,08
Montmor-Ca	0,46	2,51	0,98	2,55	1,62	3,22	-0,07	4,13	0,66	2,92	2,18	1,74	0,34	2,47
Montmor-K	0,23	2,16	0,78	2,10	1,35	2,83	-0,29	3,80	0,39	2,54	1,91	1,33	0,09	2,02
Montmor-Mg	0,54	2,60	1,06	2,64	1,70	3,31	0,00	4,22	0,73	3,00	2,25	1,83	0,41	2,56
Montmor-Na	0,33	2,38	0,82	2,40	1,44	3,07	-0,25	3,99	0,46	2,80	1,99	1,62	0,17	2,34
Muscovite	2,20	5,43	2,85	5,21	3,58	5,83	0,89	7,49	2,48	5,46	5,17	3,46	2,35	5,30
Nesquehonite	-3,58	-2,97	-3,31	-3,14	-2,95	-2,85	-3,26	-3,30	-3,04	-2,76	-3,15	-2,98	-3,43	-2,94
Paragonite	-0,49	3,19	-0,03	3,22	0,87	3,65	-1,96	5,15	-0,25	3,35	2,49	1,42	-0,38	3,34
Pentahydrate	-4,46	-4,29	-4,42	-4,33	-4,43	-4,30	-4,45	-4,30	-4,48	-4,32	-4,42	-4,31	-4,39	-4,30
Phlogopite	-1,05	3,48	1,46	2,58	2,12	4,36	0,25	3,53	0,77	4,50	1,53	3,16	-1,29	3,14
Pyrophyllite	-0,97	0,93	-0,76	1,08	-0,08	1,56	-1,95	2,88	-1,02	1,17	0,83	-0,11	-1,02	0,92
Quartz	-0,05	-0,14	-0,02	-0,12	0,02	0,03	-0,00	0,12	-0,11	-0,01	-0,10	-0,04	-0,15	-0,19
Sepiolite	-6,15	-2,17	-3,36	-2,86	-2,62	-0,57	-3,90	-2,09	-4,29	-0,45	-4,41	-1,31	-6,85	-2,50

Les eaux du Barrage de Foug El Khanga utilisés dans nos expériences sont proches de l'équilibre vis-à-vis du quartz (indice de saturation allant de -0,15 à 0,02) et de la calcite (indice de saturation allant de 0,15 à 0,75), minéraux qui prédominent la composition minéralogique des sédiments. Elles sont aussi sous-saturées vis-à-vis des sulfates (gypse et anhydrite) et des minéraux des évaporites (ex. : epsomite et hexahydrate). Elles sont sursaturées vis-à-vis du diaspre, k-feldspaths, kaolinite et muscovite.

## V. Résultats

L'évolution progressive de la composition chimique des solutions prélevées au cours des expériences qui se sont déroulées dans un système clos durant une période de quatre mois, est illustrée dans le tableau. Les chiffres entre parenthèse indiquent l'ordre de prélèvement des solutions de chaque expérience.

Dès que les expériences commencent, les concentrations des éléments changent sensiblement. La concentration de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, et NO<sub>3</sub> dans les solutions expérimentales tendent à augmenter notablement une fois que les sédiments sont introduits dans les eaux du barrage. En revanche, la concentration du Ca dans les solutions chute de façon remarquable au cours des premières minutes de chaque expérience. La libération initiale de NO<sub>3</sub> et l'alcalinité dans les solutions ne montrent aucune tendance nette. Après cette période initiale, les concentrations de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> dans les solutions augmentent systématiquement avec le temps (Tableaux 30 à 36), ce qui en accord parfait avec la dissolution théorique des minéraux.

**Tableau 30 : Evolution de la solution (O1G4E+O1G4S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G4S+O1G4E	O1G4E(0)	O1G4E(1)	O1G4E(2)	O1G4E(3)	O1G4E(4)	O1G4E(5)	O1G4E(6)
Time (s)	0,00E+00	3,07E+05	5,70E+05	1,29E+06	2,59E+06	5,26E+06	7,83E+06
pH	8,05	7,97	7,95	7,96	8,03	8,14	8,09
Si (ppm)	1,63	1,73	1,74	1,77	1,76	1,79	1,96
Ca (ppm)	129,96	121,13	121,46	122,65	118,14	135,45	145,54
Na (ppm)	313,31	334,99	322,71	323,75	359,44	369,22	399,83
K (ppm)	20,92	46,44	21,78	19,13	16,68	17,24	13,66
Mg (ppm)	57,42	58,08	54,41	55,58	57,00	61,14	68,18
Cl (ppm)	490,21	595,35	581,03	580,63	599,70	623,11	700,21
SO <sub>4</sub> (ppm)	296,73	388,26	386,85	388,38	402,85	418,14	457,53
NO <sub>3</sub> (ppm)	32,81	32,45	32,44	33,84	35,03	37,11	45,14
Alc. (mol/l)	1,80E-03	2,00E-03	1,93E-03	1,94E-03	1,92E-03	1,92E-03	1,86E-03
Al (ppb)	0,78	45,22	50,22	51,73	44,73	48,98	45,95

**Tableau 31 : Evolution de la solution (O1G6E+O1G6S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G6E+O1G6S	O1G6E(0)	O1G6E(1)	O1G6E(2)	O1G6E(3)	O1G6E(4)	O1G6E(5)	O1G6E(6)	O1G6E(7)
Time (s)	0,00E+00	8,88E+04	1,74E+05	1,04E+06	2,34E+06	4,93E+06	7,61E+06	1,02E+07
pH	8,08	7,99	8,00	7,94	7,94	7,81	7,98	8,00
Si (ppm)	1,67	1,70	1,71	1,73	1,78	1,78	1,86	2,03
Ca (ppm)	127,04	116,41	117,20	115,92	116,66	122,80	123,01	130,62
Na (ppm)	334,82	337,61	330,02	329,99	334,58	342,90	351,54	346,71
K (ppm)	24,56	61,45	43,25	72,80	61,36	12,73	14,58	6,74
Mg (ppm)	58,32	59,52	56,62	56,16	57,92	57,66	60,21	63,75
Cl (ppm)	506,64	601,00	616,56	627,24	617,67	589,99	602,94	626,81
SO <sub>4</sub> (ppm)	309,50	387,64	396,49	398,37	390,61	397,74	405,93	421,68
NO <sub>3</sub> (ppm)	33,45	32,76	33,50	34,13	33,00	34,13	34,71	36,94
Alc, (mol/l)	1,56E-03	1,66E-03	1,65E-03	1,62E-03	1,62E-03	1,59E-03	1,64E-03	1,59E-03
Al (ppb)	1,72	31,99	31,99	34,28	35,39	35,73	36,30	41,05

**Tableau 32 : Evolution de la solution (O1G8E+O1G8S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G8S+O1G8E	O1G8E(0)	O1G8E(1)	O1G8E(2)	O1G8E(3)	O1G8E(4)	O1G8E(5)	O1G8E(6)	O1G8E(7)
Time (s)	0,00E+00	2,54E+05	5,16E+05	1,23E+06	2,53E+06	5,21E+06	7,77E+06	1,04E+07
pH	8,36	8,09	8,11	8,16	8,11	8,12	8,13	8,16
Si (ppm)	2,22	2,64	2,63	2,78	2,75	2,78	2,89	2,93
Ca (ppm)	141,36	139,96	131,36	138,00	142,14	140,41	140,62	145,33
Na (ppm)	317,83	323,84	324,80	331,44	336,76	341,01	350,97	359,04
K (ppm)	18,98	44,32	16,01	17,49	14,80	15,51	9,91	10,79
Mg (ppm)	60,54	61,79	58,65	58,56	58,95	61,18	65,78	67,77
Cl (ppm)	481,07	589,64	565,37	576,89	573,07	594,72	596,37	645,21
SO <sub>4</sub> (ppm)	304,70	393,85	391,18	399,85	399,68	415,22	415,89	442,29
NO <sub>3</sub> (ppm)	38,71	38,67	38,56	40,00	40,57	41,31	43,96	48,33
Alc, (mol/l)	2,93E-03	3,06E-03	3,05E-03	2,97E-03	2,83E-03	2,72E-03	2,43E-03	2,07E-03
Al (ppb)	4,03	45,13	48,88	43,81	50,11	46,41	43,41	50,12

**Tableau 33 : Evolution de la solution (O1G10E+O1G10S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G10S+O1G10E	O1G10E(0)	O1G10E(1)	O1G10E(2)	O1G10E(3)	O1G10E(4)	O1G10E(5)	O1G10E(6)	O1G10E(7)
Time (s)	0,00E+00	3,07E+05	5,68E+05	1,29E+06	2,58E+06	5,26E+06	7,83E+06	1,04E+07
pH	8,01	7,84	7,92	7,92	7,82	7,83	7,89	7,91
Si (ppm)	1,64	2,57	2,77	2,84	2,96	3,16	3,17	3,50
Ca (ppm)	133,88	120,67	118,72	115,95	122,57	125,79	135,97	143,50
Na (ppm)	321,06	328,49	329,51	324,55	333,86	356,90	348,43	387,71
K (ppm)	19,87	50,01	21,29	17,84	17,57	18,53	12,21	16,67
Mg (ppm)	56,92	58,31	54,63	55,17	55,73	51,02	60,69	67,26
Cl (ppm)	470,30	596,16	590,10	581,82	598,33	614,01	605,40	684,46
SO <sub>4</sub> (ppm)	285,86	389,31	392,25	390,33	401,50	412,03	404,21	442,82
NO <sub>3</sub> (ppm)	33,63	32,85	35,47	32,78	34,30	34,78	34,70	41,27
Alc, (mol/l)	2,12E-03	1,68E-03	1,64E-03	1,61E-03	1,56E-03	1,56E-03	1,45E-03	1,30E-03
Al (ppb)	0,33	90,98	84,43	87,14	86,28	84,58	82,88	88,75

**Tableau 34 : Evolution de la solution (O1G14'E+O1G14S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G14S+O1G14'E	O1G14'E(0)	O1G14'E(1)	O1G14'E(2)	O1G14'E(3)	O1G14'E(4)	O1G14'E(5)	O1G14'E(6)	O1G14'E(7)
Time (s)	0,00E+00	2,53E+05	5,15E+05	1,24E+06	2,54E+06	5,21E+06	7,77E+06	1,04E+07
pH	8,41	8,18	8,18	8,19	8,12	8,15	8,19	8,22
Si (ppm)	1,64	2,04	2,06	2,27	2,37	2,50	2,61	2,66
Ca (ppm)	155,49	144,03	116,86	145,18	148,42	151,68	153,93	159,22
Na (ppm)	327,32	379,53	327,09	390,55	376,73	396,88	502,28	447,17
K (ppm)	19,78	32,11	12,73	20,89	16,26	16,10	10,27	11,62
Mg (ppm)	57,24	57,27	46,88	55,09	56,05	58,63	66,91	66,04
Cl (ppm)	490,82	645,83	542,49	631,53	657,86	660,80	677,12	748,44
SO <sub>4</sub> (ppm)	292,17	398,80	339,67	395,00	413,43	414,79	421,80	456,65
NO <sub>3</sub> (ppm)	32,09	37,36	32,13	37,54	40,32	41,21	43,38	49,88
Alc, (mol/l)	3,15E-03	3,33E-03	3,13E-03	3,08E-03	3,07E-03	3,05E-03	2,76E-03	2,38E-03
Al (ppb)	2,00	45,08	42,64	43,83	43,46	43,14	45,50	45,56

**Tableau 35 : Evolution de la solution (O1G23E+O1G23S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O1G23S+O1G23E	O1G23E(0)	O1G23E(1)	O1G23E(2)	O1G23E(3)	O1G23E(4)	O1G23E(5)	O1G23E(6)	O1G23E(7)
Time (s)	0,00E+00	2,39E+05	5,02E+05	1,22E+06	2,52E+06	5,19E+06	7,76E+06	1,03E+07
pH	8,16	8,10	8,11	8,13	8,07	8,11	8,10	8,13
Si (ppm)	1,77	1,93	1,99	2,09	2,11	2,25	2,44	2,45
Ca (ppm)	147,33	136,97	132,75	132,64	140,11	140,52	139,59	140,89
Na (ppm)	348,66	389,45	393,65	432,92	395,13	405,90	414,47	439,05
K (ppm)	20,35	27,41	24,26	11,69	15,01	13,51	7,44	9,55
Mg (ppm)	58,21	60,01	57,65	56,80	58,53	48,80	63,87	67,38
Cl (ppm)	504,46	684,78	677,54	673,43	690,69	693,80	708,99	779,42
SO <sub>4</sub> (ppm)	338,18	411,33	409,06	408,35	419,05	420,60	424,47	450,71
NO <sub>3</sub> (ppm)	34,69	34,14	33,82	33,90	35,52	35,80	36,80	41,19
Alc, (mol/l)	2,56E-03	2,15E-03	2,12E-03	2,09E-03	2,02E-03	1,96E-03	1,86E-03	1,66E-03
Al (ppb)	15,53	10,10	9,21	10,49	9,70	11,07	9,62	9,81

**Tableau 36 : Evolution de la solution (O2G21E+O2G21S) lors des expériences menées dans cette étude.**

O2G21E+O2G21S	O2G21E(0)	O2G21E(1)	O2G21E(2)	O2G21E(3)	O2G21E(4)	O2G21E(5)	O2G21E(6)	O2G21E(7)
Time (s)	0,00E+00	8,97E+04	1,73E+05	1,03E+06	2,34E+06	4,93E+06	7,61E+06	1,02E+07
pH	8,21	8,18	8,21	8,16	8,14	8,05	8,08	8,09
Si (ppm)	1,35	1,40	1,40	1,46	1,50	1,54	1,59	1,74
Ca (ppm)	149,02	142,93	145,26	142,36	140,08	140,30	141,75	146,35
Na (ppm)	368,07	415,53	388,54	380,53	402,93	369,63	373,38	404,86
K (ppm)	19,90	34,94	25,30	40,22	39,57	12,26	11,97	7,29
Mg (ppm)	61,83	58,47	59,48	58,24	59,95	59,91	62,12	67,57
Cl (ppm)	517,38	646,03	654,45	693,86	650,51	629,24	659,87	696,62
SO <sub>4</sub> (ppm)	334,49	411,57	415,66	427,51	410,54	412,52	432,65	451,15
NO <sub>3</sub> (ppm)	24,38	23,32	23,66	24,46	23,52	24,68	27,66	29,50
Alc, (mol/l)	2,50E-03	2,72E-03	2,73E-03	2,62E-03	2,56E-03	2,33E-03	2,30E-03	2,00E-03
Al (ppb)	1,16	44,09	45,04	54,79	59,93	60,79	58,56	57,67

Pour quantifier les taux de départ des éléments, on calcule la masse de chaque élément dans la phase fluide totale de chaque expérience (égale à l'élément présent dans le fluide dans le réacteur et celle dans les fluides prélevés précédemment dans le réacteur) en utilisant la formule suivante :

$$M_i = c_{i,r} V_r + \sum_n c_{i,n} V_n \quad (1)$$

où  $M_i$  représente la masse du  $i$ ème élément dans la phase fluide,  $c_{i,r}$  correspond à la concentration de cet élément dans la phase fluide présente dans le réacteur,  $c_{i,n}$  représente cette concentration dans le  $n$ ième échantillon de fluide, et  $V_r$  et  $V_n$  désignent la masse de fluide présente dans le réacteur et prélevée au cours du  $n$ ième échantillon, respectivement. Les masses d'éléments présents dans la phase aqueuse à partir de la dernière partie de trois expériences représentatives sont présentées sur les figures 99 à 105. Les taux de départ des éléments ( $r_i$ ) ont été calculés à partir de ces masses en utilisant la formule suivante :

$$r_i = \frac{1}{s_{BET}} \frac{\partial M_i}{\partial t} \quad (2)$$

où  $t$  représente le temps, et  $s_{BET}$  correspond à la surface spécifique BET des sédiments présents dans le réacteur.

On enregistre des régressions linéaires de  $M_i$  en fonction du temps sur toutes les expériences réalisées dans cette étude (Figures 99 à 105). Ces régressions ont été faites sur les échantillons de liquide final 5-7 de chaque expérience pour éviter les effets initiaux décrits ci-dessus. Pour la plupart, ces régressions linéaires fournissent une excellente description de l'évolution temporelle de  $M_i$ . Cependant, dans certains cas, les distributions des concentrations aqueuses montrent une diminution de la pente avec le temps pendant les expériences, ce qui correspond à des vitesses de dissolution plus faibles. Le ralentissement des vitesses de dissolution pourrait provenir d'une approche de l'équilibre du fluide aqueux par rapport à un ou plusieurs minéraux dans les sédiments (Schott and Oelkers, 1995). Dans de tels cas, les vitesses calculées à partir des deux premières et des deux dernières concentrations aqueuses mesurées sur les figures 99 à 105 diffèrent de celles de la courbe de régression d'au plus un facteur de 2. La pente des courbes de régression représentée dans les figures 99 à 105 correspond à  $\partial M_i / \partial t$ . Ces pentes ont été utilisées pour calculer les taux de libération des éléments en utilisant Eq.(2). Les résultats de ce calcul sont résumés dans le tableau 37. Il convient de noter que l'évolution de la concentration en Al aqueux reste presque constante, probablement en raison de la combinaison de la dissolution des phases porteuses d'Al couplées à la précipitation de l'hydroxyde d'aluminium. Contrairement aux autres éléments, les concentrations de K

aqueuses à long terme et de l'alcalinité ont tendance à diminuer tout au long des expériences.

**Tableau 37 : Logarithmes des vitesses de départ des éléments aux solutions lors des expériences menées dans la présente étude.**

<b>Log r (mol/cm<sup>2</sup>/s)</b>	<b>O1G4</b>	<b>O1G6</b>	<b>O1G8</b>	<b>O1G10</b>	<b>O1G14</b>	<b>O1G23</b>	<b>O2G21</b>
Log r (Si)	-18,42	-17,75	-18,06	-17,53	-17,78	-17,43	-18,16
Log r (Ca)	-16,6	-16,22	-16,66	-16,49	-16,2	-16,25	-17,16
Log r (Na)	-15,9	-15,75	-15,96	-15,79	-16,38	-15,36	-16,64
Log r (Mg)	-16,6	-16,38	-16,66	-16,71	-16,38	-16,51	-16,94
Log r (Cl)	-15,9	-15,92	-15,96	-15,88	-15,68	-15,51	-15,94
Log r (SO <sub>4</sub> )	-16,42	-16,23	-16,66	-16,49	-16,2	-16,3	-16,64
Log r (NO <sub>3</sub> )	-17,12	-16,92	-17,18	-17,19	-16,84	-16,91	-17,16

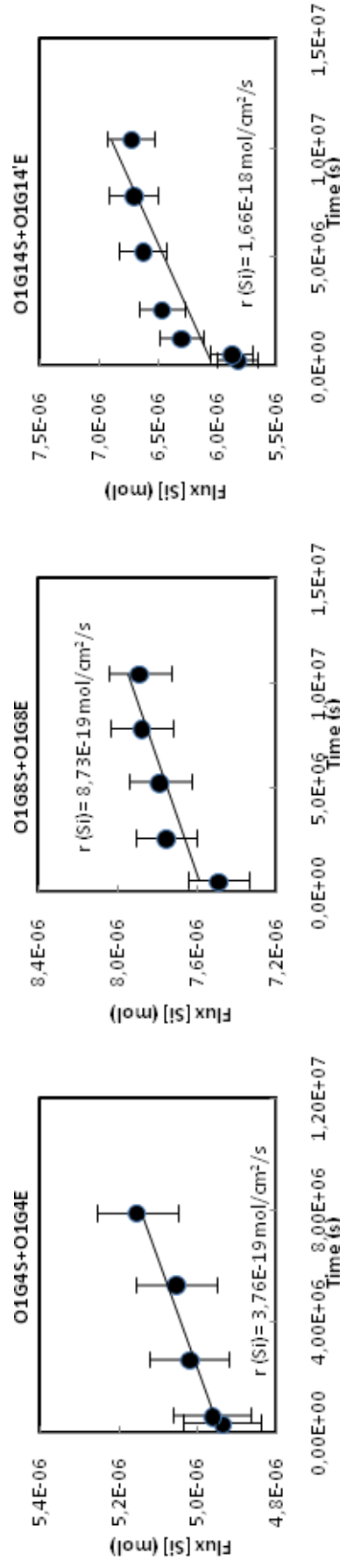


Figure 99 : Variation en fonction du temps des flux de [Si] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

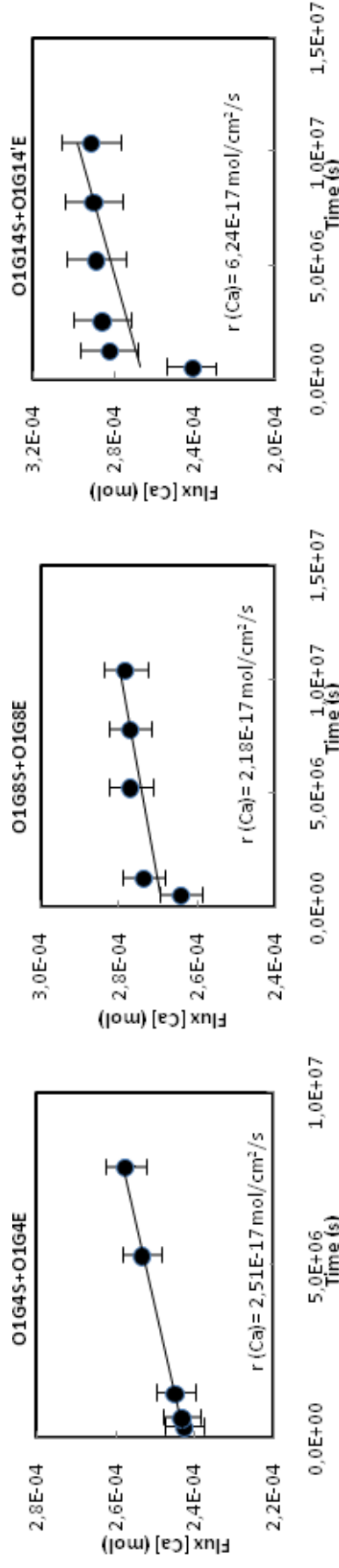


Figure 100 : Variation en fonction du temps des flux de [Ca] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

Les symboles correspondent aux flux mesurés, et les courbes représentent les régressions linéaires des données. Les vitesses de départ des éléments déduits de ces courbes sont reportées dans la figure.

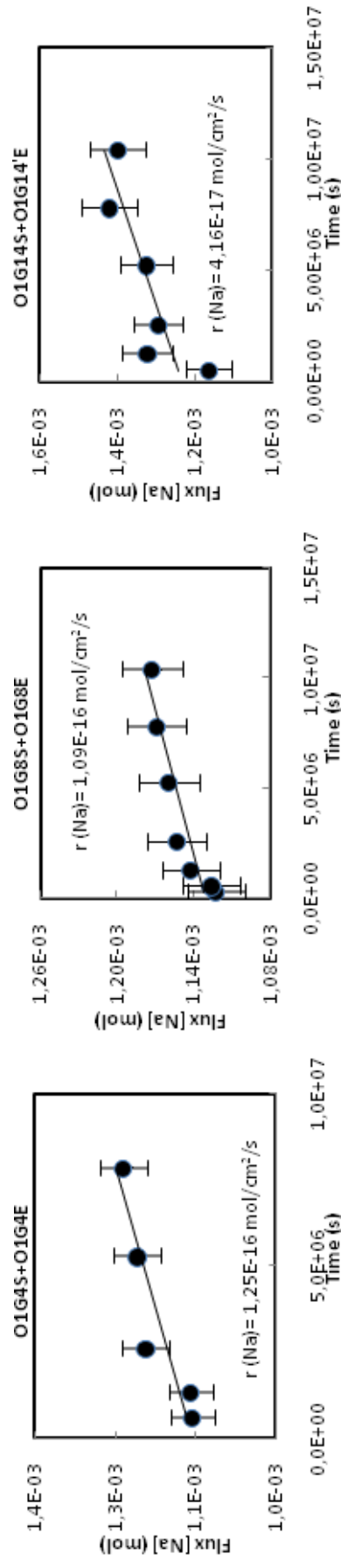


Figure 101 : Variation en fonction du temps des flux de [Na] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

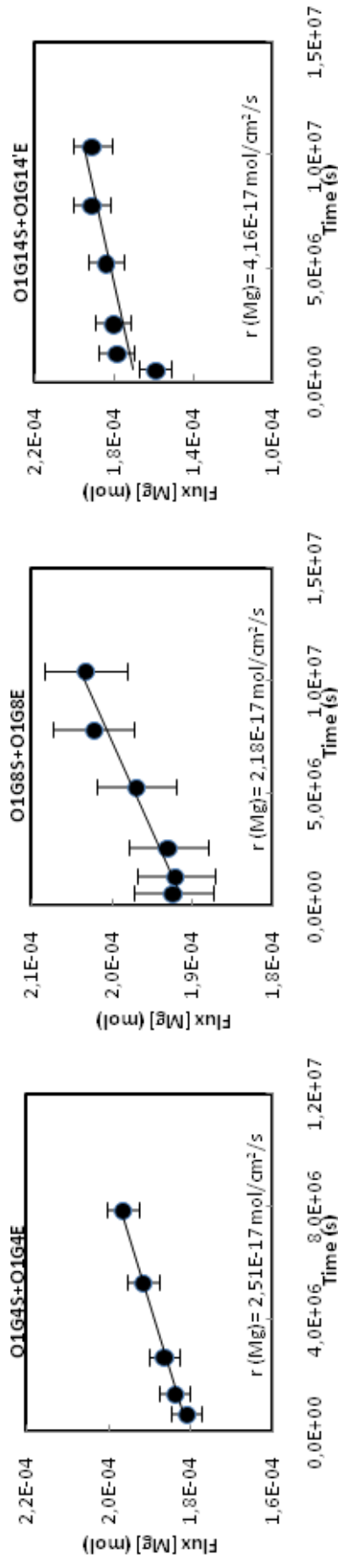


Figure 102 : Variation en fonction du temps des flux de [Mg] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

Les symboles correspondent aux flux mesurés, et les courbes représentent les régressions linéaires des données. Les vitesses de départ des éléments déduits de ces courbes sont reportées dans la figure.

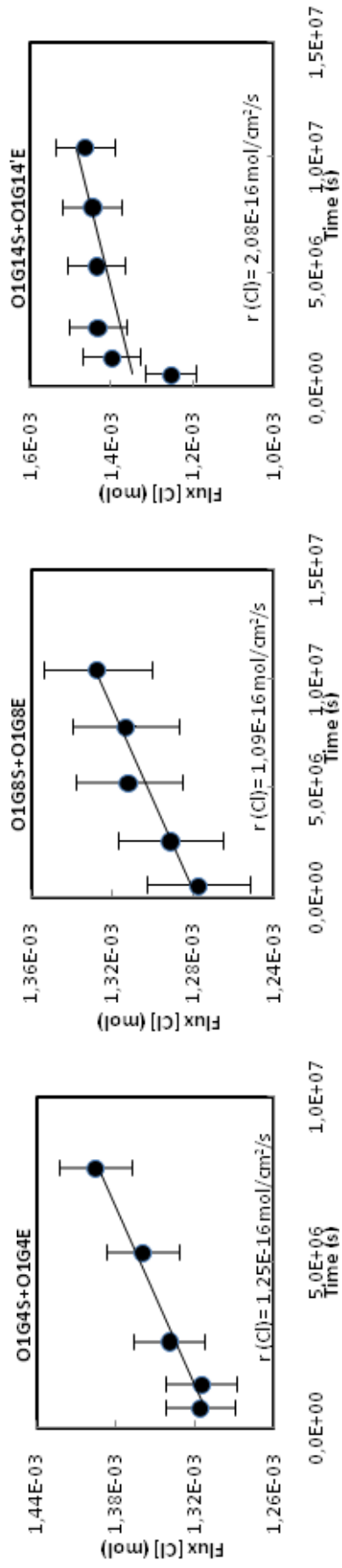


Figure 103 : Variation en fonction du temps des flux de [Cl] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

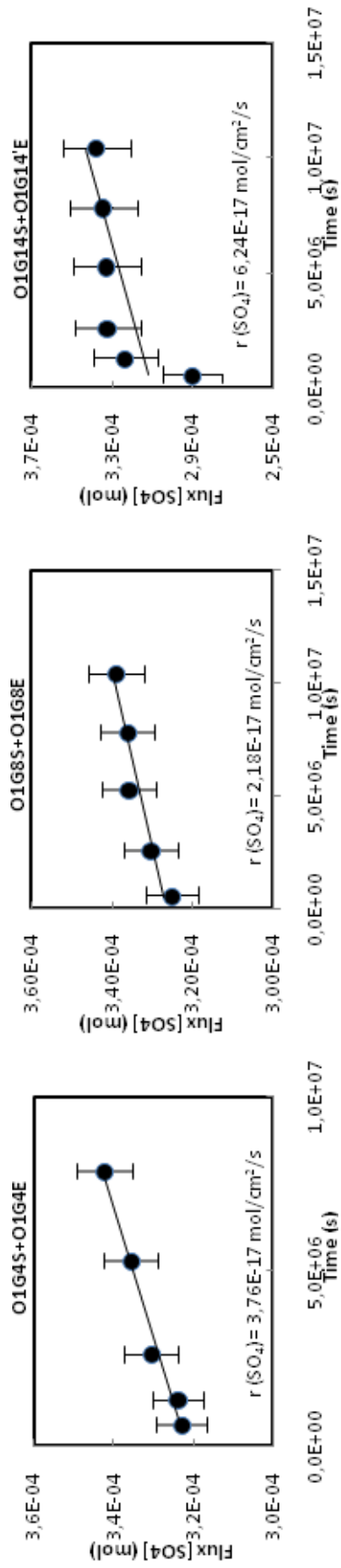
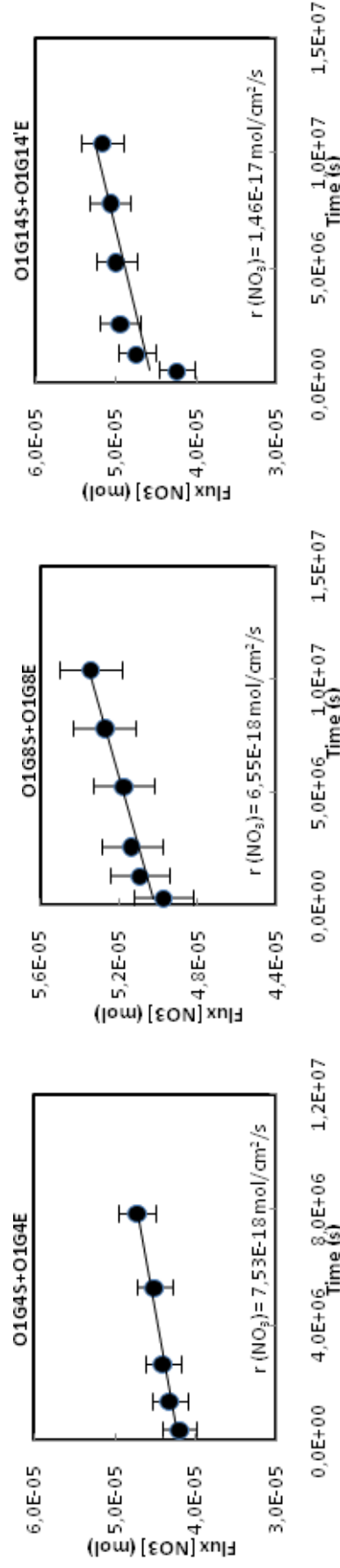


Figure 104 : Variation en fonction du temps des flux de [SO<sub>4</sub>] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.

Les symboles correspondent aux flux mesurés, et les courbes représentent les régressions linéaires des données. Les vitesses de départ des éléments déduits de ces courbes sont reportées dans la figure.



**Figure 105 : Variation en fonction du temps des flux de [NO<sub>3</sub>] vers les solutions réactives, lors de trois expériences représentatives.**

Les symboles correspondent aux flux mesurés, et les courbes représentent les régressions linéaires des données. Les vitesses de départ des éléments déduits de ces courbes sont reportées dans la figure.

Les taux de départ d'éléments calculés de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> sont des expériences remarquablement cohérentes d'une expérience à une autre et d'un élément à autre. Les logarithmes des taux de départ de Si en unités mol/cm<sup>2</sup>/s ne varient que de -18,4 à -17,4 ; ceux de Mg ne varient que de -16,4 à -16,9. L'élément ayant le plus rapide taux de départ mesuré est bien le Na. Le logarithme de ses taux de départ est aussi élevé que 15,8 ; ce qui est inférieur de trois ordres de grandeur à celui du taux de départ des éléments mesurés le plus lent dans cette étude.

## VI. Discussion

Les résultats présentés ci-dessus montrent que tout au début des expériences, la concentration des éléments dans les solutions change rapidement par rapport à leur évolution au cours des expériences, cela est probablement la cause de :

- manipulations que les solutions et les sédiments ont subi entre le prélèvement et le début des expériences.

- équilibre total ou partiel entre les échantillons d'eau du barrage et l'atmosphère.
- formation des sels solubles durant le séchage des sédiments
- précipitation des phases insolubles dans les solutions.

La libération initiale rapide de Na, K, Si, Cl et SO<sub>4</sub> est due à la dissolution rapide des sels formés durant le séchage des sédiments.

L'augmentation rapide des concentrations d'Al dans les solutions pourrait être due à la précipitation hydroxyde d'Al durant le temps entre l'échantillonnage et le début des expériences. Il faut noter aussi que les échantillons d'eau sont sursaturés vis-à-vis du diaspore. Dès le début des expériences la concentration de l'Al peut augmenter grâce à la dissolution des phases contenant Al (ex. minéraux d'argiles).

La variation de la composition des solutions au cours des expériences est le résultat de la réactivité des minéraux dans l'eau. La comparaison directe des taux de départ déterminée ci-dessus avec ceux publiés dans la littérature est difficile pour de nombreuses raisons :

- nos résultats sont normalisés à la surface spécifique des sédiments, alors que les taux de dissolution/précipitation déterminés aux laboratoires sont normalisés à la surface spécifique des minéraux.
- les taux de dissolution des minéraux dépendent fortement de l'état de saturation et de la composition des solutions (Oelkers, 2001).
- le minéral source de chaque élément libéré peut être inconnu car plusieurs minéraux peuvent le contenir.

## **VII. Conclusion**

L'étude expérimentale montre un transfert chimique à long terme entre les sédiments et les eaux qui est dominé par la dissolution des phases silicatées relativement inertes à l'instar du quartz et des argiles.

La concentration de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, et NO<sub>3</sub> dans les solutions expérimentales augmente sensiblement dès que les sédiments sont introduits dans les eaux du barrage, cela est dû à la dissolution rapide des sels formés durant le séchage des sédiments.

Après cette période initiale, les concentrations de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> dans les solutions augmentent systématiquement avec le temps, ce qui est en accord parfait avec la dissolution théorique des minéraux.

Les taux de départ d'éléments calculés de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> sont des expériences remarquablement cohérentes d'une expérience à une autre et d'un élément à un autre. Les logarithmes des taux de départ de Si en unités mol/cm<sup>2</sup>/s ne varient que de -18,4 à -17,4 ; ceux de Mg ne varient que de -16,4 à -16,9. L'élément ayant le plus rapide taux de départ mesuré est bien le Na. Le logarithme de ses taux de départ est aussi élevé que 15,8 ; ce qui est inférieur de trois ordres de grandeur à celui du taux de départ des éléments mesurés le plus lent dans cette étude.

L'augmentation rapide des concentrations d'Al dans les solutions pourrait être due à la précipitation hydroxyde d'Al durant le temps entre l'échantillonnage et le début des expériences.

## CONCLUSION GENERALE

## **CONCLUSION GENERALE**

La géologie du bassin versant d'Oued Cherf est constituée par des roches sédimentaires d'âge allant du Trias au Quaternaire plissées en anticlinaux et en synclinaux. L'étude pétrographique des principaux types de roches montrent que les calcaires sont dans la plupart des cas à matrice carbonatée micritique à foraminifères et à calcite bien cristallisée remplissant les veines et les poches. Les grès sont essentiellement formés de quartz détritique très souvent monocristallin de petite taille à moyenne et à ciment souvent carbonaté. Les évaporites sont formées essentiellement par de gros cristaux de gypse englobant parfois des poches de cristaux de quartz et même de gypse. L'espace intragranulaire est très souvent rempli de carbonates microcristallins.

La composition géochimique des sols en éléments majeurs permet de distinguer trois grands groupes de sols ; le premier siliceux avec 70% à 80% de  $\text{SiO}_2$  qui s'exprime minéralogiquement par la prédominance de grains de quartz, le second calcique avec CaO de l'ordre de 30% à 50% qui s'exprime minéralogiquement par la présence de la calcite en quantité notable et le troisième alumineux avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$  variant de 10% à 15% matérialisé par la présence de minéraux argileux.

Le chlore est toujours associé au sodium car les échantillons présentant un pourcentage important en  $\text{Na}_2\text{O}$  ont également une quantité notable en Cl expliquant ainsi la salinité de ce type de sol qui s'exprime minéralogiquement par la présence de minéraux de sel telle que la halite.

La concentration des éléments traces dans les sols est toujours faible. Le zinc et le cadmium présentent une bonne corrélation positive avec le plomb témoin d'un comportement géochimique similaire. Le chrome et le vanadium semblent être entièrement associés dans les différents types de sols. Ils sont distribués d'une façon uniforme, comme le rubidium, le gallium, le niobium et l'étain.

La surface spécifique des échantillons de sols prélevés dans le bassin versant de l'Oued Cherf varie de 11,91  $\text{m}^2/\text{g}$  à 47,21  $\text{m}^2/\text{g}$ . La minéralogie des sols obtenue par la diffraction des rayons X montre qu'ils sont essentiellement composés de quartz, calcite, minéraux argiles, oxydes de fer et des minéraux de sulfates. Les images obtenues par

microscope électronique à balayage montrent que les sédiments sont essentiellement composés de grains fins de taille inférieure à 100 µm de quartz, calcite, oxydes de fer, minéraux d'argiles, abarite, biotite,.... Quelques gros grains sont composés d'un assemblage de minéraux de nature différente (quartz, calcite, oxydes de fer, ...).

Les eaux du barrage de Foum el Khanga sur l'Oued Cherf sont de pH variant de 7,3 à 8,3 avec une valeur moyenne d'environ 7,4. Les valeurs de conductivité mesurées indiquent une minéralisation très élevée, car elles sont globalement supérieures à 3000 µS/cm. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées aux embouchures immédiates des sources et des oueds salés.

L'alcalinité des eaux du barrage varie de ~86 mg/L à ~216 mg/L avec une moyenne de ~135mg/L. Les roches carbonatées du BV confèrent aux eaux du barrage un caractère dur avec des valeurs variant de ~51°F à ~63°F. Les formations géologiques salifères affleurant en amont jouent un rôle cardinal dans la concentration des chlorures et de sodium dans les eaux du barrage ; la concentration moyenne des chlorures est de l'ordre 493,6 mg/L pour la période des hautes eaux est de 571,5 mg/L pour la période des basses eaux, quant à celle de sodium, elle varie de 326,6 mg/L en période des hautes eaux à 380,9 mg/L en période des basses eaux.

Les concentrations notables de calcium et magnésium dans l'eau du barrage est due en premier lieu à la dissolution des formations carbonatées et gypseuses. Elles présentent des valeurs moyennes de 135,3 mg/L en périodes des hautes eaux et de 144,4 mg/L en période des basses eaux pour le calcium et des valeurs moyennes de 56,8 mg/L pour la période des hautes eaux et de 61,7 mg/L en période des basses eaux pour le magnésium.

Le potassium avec des concentrations moyennes de 20,5 mg/L provient de l'altération des formations argileuses affleurant en amont et de la dissolution des formations salifères potassiques telle que la sylvine. Les eaux du barrage montrent des teneurs moyennes en nitrates de 35,8 mg/L en mois de mai et de 25,7 en période sèche. Les concentrations les plus élevées, avec des teneurs 62,2 mg/L, sont enregistrées tout près des activités agricoles, ce qui laisse penser à l'utilisation des engrais chimiques comme origine.

Le total des sels dissous (TDS) des eaux du barrage varient de 1275 mg/L à 3315 mg/L avec une moyenne qui tourne au tour de 1500 mg/L. Le faciès hydrochimique est majoritairement chlorurées sodi-potassiques aussi bien en période des hautes eaux qu'en période des basses eaux, ce qui prouve l'alimentation du barrage par des eaux qui drainent les formations salifères du trias affleurant en plusieurs endroits en amont.

L'application de la méthode de Richards associant le SAR et la conductivité électrique montre que ces eaux du barrage sont de qualité médiocre pour la période des hautes eaux et deviennent mauvaise à très mauvaises à l'irrigation durant la période des basses eaux et constituent alors un danger certain pour la plupart des cultures et sur la plupart des types de sols.

L'utilisation du diagramme de Wilcox montre clairement que les eaux du barrage sont de mauvaise qualité pour l'irrigation et se dégradent encore pendant la saison sèche et cela à cause de leur forte minéralisation qui s'exprime par des valeurs assez élevées de la conductivité électrique.

Les eaux du Barrage de Foum El Khanga utilisés dans nos expériences sont proches de l'équilibre vis-à-vis du quartz (indice de saturation allant de -0,15 à 0,02) et de la calcite (indice de saturation allant de 0,15 à 0,75), minéraux qui prédominent la composition minéralogique des sédiments. Elles sont aussi sous-saturées vis-à-vis des sulfates (gypse et anhydrite) et des minéraux des évaporites (ex. : epsomite et hexahydrate). Elles sont sursaturées vis-à-vis du diaspore, k-feldspaths, kaolinite et muscovite.

L'étude expérimentale montre un transfert chimique à long terme entre les sédiments et les eaux qui est dominé par la dissolution des phases silicatées relativement inertes à l'instar du quartz et des argiles.

La concentration de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, et NO<sub>3</sub> dans les solutions expérimentales augmente sensiblement dès que les sédiments sont introduits dans les eaux du barrage, cela est dû à la dissolution rapide des sels formés durant le séchage des sédiments.

Après cette période initiale, les concentrations de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> dans les solutions augmentent systématiquement avec le temps, ce qui en accord parfait avec la dissolution théorique des minéraux.

Les taux de départ d'éléments calculés de Si, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> sont des expériences remarquablement cohérentes d'une expérience à une autre et d'un élément à autre.

Les logarithmes des taux de départ de Si en unités mol/cm<sup>2</sup>/s ne varient que de -18,4 à -17,4 ; ceux de Mg ne varient que de -16,4 à -16,9. L'élément ayant le plus rapide taux de départ mesuré est bien le Na. Le logarithme de ses taux de départ est aussi élevé que 15,8 ; ce qui est inférieur de trois ordres de grandeur à celui du taux de départ des éléments mesurés le plus lent dans cette étude.

L'augmentation rapide des concentrations d'Al dans les solutions pourrait être due à la précipitation hydroxyde d'Al durant le temps entre l'échantillonnage et le début des expériences.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aries, S., Valladon, M., Polvé, M., and Dupré, B., 2000, A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples: *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 24, p. 19–31, doi:10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x.
- Arrus, R., 1985, , *L'eau en Algérie. De l'impérialisme au développement (1830-1962)*, Alger, O.P.U, 388 p.
- Asano, T., and Levine, A.D., 1998, Wastewater reclamation, recycling, and reuse: An introduction: *Wastewater reclamation and reuse*, v. 10, p. 1–56.
- Athmania, D., 2002, *Etude de la salinité et de l'envasement du barrage de Fom el Khanga sur l'Oued Cherf (Sedrata, Wilaya de Souk Ahras)*. [Mémoire de Magister]: Centre Universitaire Cheikh Larbi Tébessi-Tébessa., 170 p.
- Ayers, R.S., and Westcot, D.W., 1994, *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. FAO, Rome: FAO.
- Baize, D., 1997, *Teneurs totales en éléments en trace métalliques dans les sols (France)*. INRA Editions: 408 p.
- Baumgartner, A., and Reichel, E., 1975, *The world water balance mean annual global, continental, and maritime precipitation, evaporation and run-off*: Amsterdam, Reichel, Eberhard. coaut., 551.35 B3, 179 p.
- Ben Icha, B., 2008, *Sources et la répartition des ressources en eau en Algérie*, Un Article publié: *Le Journal de l'Eau*.
- Benito, V., Devesa, V., Munoz, O., Suner, M.A., Montoro, R., Baos, R., Hiraldo, F., Ferrer, M., Fernandez, M., and Gonzalez, M.J., 1999, Trace elements in blood collected from birds feeding in the area around Donana National Park affected by the toxic spill from the Aznalcollar mine. *Science of The Total Environment*, 242(1-3), 309-323.
- Boeglin, J.-C., 1997, *Analyse des eaux résiduaires: Mesure de la pollution: Techniques de l'ingénieur. Analyse et caractérisation*, v. 9, p. 4200.
- Bouhlassa, S., Alechcheikh, C., and Kabiri, L., 2008, *Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc): Science et changements planétaires/Sécheresse*, v. 19, p. 67–75.
- Bourrie, G., 1975, *Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO2 dans les eaux nature: Lettre de l'Association (AFES)*, p. 145–159.
- Brantley, S.L., 2008, *Kinetics of Mineral Dissolution*, in Brantley, S.L., Kubicki, J.D., and White, A.F. eds., *Kinetics of Water-Rock Interaction*, New York, NY, Springer New York, p. 151–210, doi:10.1007/978-0-387-73563-4\_5.

- Brunauer, S., Emmett, P.H., and Teller, E., 1938, Adsorption of gases in multimolecular layers: *Journal of the American chemical society*, v. 60, p. 309–319.
- Callender, E., 2003, Heavy Metals in the Environment-Historical Trends. In: B.S. Lollar (Ed.), *Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, pp. 67- 105.
- Chabaca, M.N., Isbérie, C., and Messahel, M., 2007, La politique de gestion de la ressource en eau d'irrigation face à l'aléa climatique, aux contraintes sociales et économiques : Cas de l'Algérie . *La Houille Blanche*, 4 (2007), 131-136.
- Chapman, D., and Kimstach, V., 1996, Selection of water quality variables. *Water quality assessments : a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
- Cosandey, C., and Robinson, M., 2000, *Hydrologie continentale*, Armand Colin, Paris, 2000, 368 p.
- Côte, M., 1996, Eau, environnement et développement au Maghreb, *Annuaire de l'Afrique du Nord*, tome 35, CNRS Editions, pp. 104-114.
- David, L., 1956, Étude des monts de la haute Medjerda: *Publications du service de la carte géologique de l'Algérie*. *Buttetin N°11*. Alger.
- Debieche, T.H., 2002, Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien [PhD Thesis]: Université Franche-Comté des sciences et techniques, 199 p.
- Derwich, E., Benaabidate, L., Zian, A., Sadki, O., and Belghity, D., 2010, Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès: *LARHYSS Journal* ISSN 1112-3680.
- Douaoui, A., and Hartani, T., 2007, Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chéliff, *in* Troisième atelier régional du projet Sirma (Nabeul, Tunis), Édité. CIRAD, p. 5.
- Drever, J., 1982, *The geochemistry of natural waters*: Englewood Cliffs, New Jersey, 388 p.
- Dubourdieu, G., 1956, Etude géologique de la région de l'Ouenza (Confins algéro-tunisiens): *Publication Service de cartes Géologiques de l'Algérie*, Nouv. Ser 10, 659 p. Alger...
- El Ouali Lalami, A., Merzouki, M., El Hillali, O., Maniar, S., and Koraichi, I., 2011, Pollution des eaux de surface de la ville de Fès au Maroc: typologie, origine et conséquences: *Larhyss Journal*, v. 9, p. 55–72.
- Emsalem, R., 1970, *Climatologie générale*, tome I, Fondements des équilibres atmosphériques, Editions SNED- Alger, 215 pages.

- Falkenmark, M., and Widstrand, C., 1992, Population and water resources: a delicate balance.: Population bulletin, v. 47, p. 1.
- Fidelibus, M.D., 1996, Regional flow of intruding sea water in the carbonate aquifers of Apulia (Southern Italy), *in* Proceedings 14th Salt Water Intrusion Meeting, 1996, p. 230–241.
- Förstner, U., and Wittman, G.T.W., 1981, Metal Pollution in the Aquatic Environment. 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 486. - References - Scientific Research Publishing:
- Freydier, R., 1997, Chimie des précipitations en Afrique intertropicale : cations et anions majeurs, éléments traces et acides organiques [thesis]: Toulouse 3, <http://www.theses.fr/1997TOU30294> (accessed December 2018).
- Ganor, J., Lu, P., Zheng, Z., and Zhu, C., 2007, Bridging the gap between laboratory measurements and field estimations of silicate weathering using simple calculations: Environmental Geology, v. 53, p. 599–610.
- Gautier, É.-F., 1911a, Profils en long de cours d'eau en Algérie-tunisie: premier article, *in* Annales de Géographie, JSTOR, v. 20, p. 351–366.
- Gautier, É.-F., 1911b, Profils en long de cours d'eau en Algérie-tunisie: second article, *in* Annales de Géographie, JSTOR, v. 20, p. 431–447.
- Godard, A., and Tabeaud, M., 1993, Les climats- mécanismes et répartition. Editions Armond Colin-Paris, 168 pages.
- Gouaidia, L., Guefaïfia, O., Boudoukha, A., Hemila, L.M., and Martin, C., 2012, Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols: exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). Physio-Géo. Géographie, Physique, et Environnement, 6, 141-160: Physio-Géo. Géographie, Physique, et Environnement, v. 6, p. 141–160.
- Hacini, M., Kherici, N., and Oelkers, E.H., 2008, Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 72, p. 1583–1597.
- Halimi, S., 2008, Ressources et essai de gestion intégrée des eaux du bassin versant d'oued Cherf/Sedrata (Nord – Est Algérien). [Mémoire de Magister]: Université Badji Mokhtar Annaba, 125 p.
- Harouiya, N., Chaïrat, C., Köhler, S.J., Gout, R., and Oelkers, E.H., 2007, The dissolution kinetics and apparent solubility of natural apatite in closed reactors at temperatures from 5 to 50 C and pH from 1 to 6: Chemical Geology, v. 244, p. 554–568.
- Hodson, M.E., and Langan, S.J., 1999, The influence of soil age on calculated mineral weathering rates: Applied Geochemistry, v. 14, p. 387–394.
- Hurlbut Jr, C.S., and Klein, C., 1982a, Manual de Mineralogía de Dana. Editorial Reverté, Barcelona, 564p.

- Hurlbut Jr, C.S., and Klein, C., 1982b, *Manual de Mineralogía de Dana*. Editorial Reverté, Barcelona, 564p.
- Kabata-Pendias, A., 2000, *Trace elements in soils and plants*. Third Edition. CRC Press, NY.
- Khechana, S., 2014, *Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien) [Thèse doctorat ès sciences en Hydrogéologie]: Université Badji Mokhtar Annaba, 130 p.*
- Khechana, S., and Derradji, E.-F., 2014, *Qualité des eaux destinées à la consommation humaine et à l'utilisation agricole (Cas des eaux souterraines d'Oued-Souf, SE algérien): Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, v. 28, p. 58–68.*
- Khelef, K., 2006, *Etude de la remontée des eaux de la nappe phréatique de Oued-Souf [PhD Thesis]: Thèse de Master d'école de Management EURO-MED, Université de Marseille, 100 p.*
- Louamri, A., 2013, *Le Bassin-versant de la Seybousse (Algérie orientale) : Hydrologie et aménagement des eaux. [These de Doctorat en Sciences (Géographie et Aménagement du Territoire, option : Hydrologie)]: Université Mentouri-Constantine1, 301 p.*
- Loucif, N.S., 2002, *Les ressources en eau et leurs utilisations dans le secteur agricole en Algérie. INRAA/CRP, Alger, 17 p.*
- Lvovitch, M.I., 1970, *Les ressources en eau du globe terrestre et leur avenir: Bulletin de l'association internationale d'hydrologie scientifique, v. 4, p. 23–28.*
- Mahan, B.H., 1987, *Química. Curso Universitario. Fondo Educativo Interamericano S. A:*
- Maher, K., Steefel, C.I., White, A.F., and Stonestrom, D.A., 2009, *The role of reaction affinity and secondary minerals in regulating chemical weathering rates at the Santa Cruz Soil Chronosequence, California: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 73, p. 2804–2831.*
- Mamou, A., 1990, *Caractéristiques, évaluation et gestion des ressources en eau du Sud-Tunisien [PhD Thesis]: Paris 11.*
- Margat, J., 1993, *Ressources en eau : conception, évaluation, cartographie, comptabilité. Rapport BRGM R 37267, 141 p.*
- Martin-Samos, F., 1976, *La santé publique en Haut Volta: profil sanitaire.*
- Mebarki, A., 2005, *Hydrologie des bassins de l'Est algérien : Ressources en eau, aménagement et environnement. [Thèse de Doctorat d'Etat (Géographie et Aménagement du Territoire, option : Hydrologie)]: Université Mentouri-Constantine, 360 p.*
- Mebarki, A., 2010, *La région du Maghreb face à la rareté de l'eau. L'exemple du défi algérien: mobilisation et gestion durable des ressources, in ICID+ 18 2nd International*

- Conference: Climate, Sustainability and Development in semi-arid regions August, Fortaleza- Cearà ,Brazil, p. 16–20.
- Mebarki, A., 2007, L'eau, défi majeur en Algérie. Ressources, mobilisation et gestion durable. Revue du Laboratoire d'Aménagement du territoire (Université Mentouri de Constantine, DZ), 7, 42-68.
- Mihaljevic, M., 1999, Zinc. In C.P. Marshall ad R.W. Fairbridge. Eds., Encyclopedia of geochemistry. P. 67-675. Kluwer, Dordrecht.
- Nichane, M., and Khelil, M. a, 2015, Changements climatiques et ressources en eau en Algérie vulnérabilité, impact et stratégie d'adaptation: LARHYSS Journal ISSN 1112-3680, v. 0, p. 15-23–23.
- Nriagu, J.O., 1978, The biogeochemistry of lead in the environment. Elsevier, Amsterdam, 1011 pp.
- Oelkers, E.H., 2001, General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 65, p. 3703–3719.
- Oelkers, E.H., Declercq, J., Saldi, G.D., Gislason, S.R., and Schott, J., 2018, Olivine dissolution rates: A critical review: Chemical Geology, v. 500, p. 1–19, doi:10.1016/j.chemgeo.2018.10.008.
- Oelkers, E.H., Pogge von Strandmann, P.A.E., and Mavromatis, V., 2019, The rapid resetting of the Ca isotopic signatures of calcite at ambient temperature during its congruent dissolution, precipitation, and at equilibrium: Chemical Geology, v. 512, p. 1–10, doi:10.1016/j.chemgeo.2019.02.035.
- Oki, T., and Kanae, S., 2006, Global hydrological cycles and world water resources: Science, v. 313, p. 1068–1072.
- O.M.S, O.M., 2005, célébration de la décennie internationale d'action l'eau, source de vie (2005-2015): Guide de sensibilisation, p. 34.
- Papaioannou, A., Plageras, P., Dovriki, E., Minas, A., Krikelis, V., Nastos, P.T., Kakavas, K., and Paliatsos, A.G., 2007, Groundwater quality and location of productive activities in the region of Thessaly (Greece): Desalination, v. 213, p. 209–217.
- Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J., 1999, User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. GEOLOGICAL SURVEY, Water-Resources Investigations Report, p. 99–4259.
- Person, J., 1978, Irrigation et drainage en Tunisie problème posé par la salinité des sols et des eaux: Bull. BRGM (2ème série) section III, p. 143–151.
- Pescod, M.B., 1992, Wastewater treatment and use in agriculture: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Irrigation and Drainage, Rome, Paper 47).

- Remenieras, G., 1986, L'hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles, 451 p.
- Remini, B., Leduc, C., and Hallouche, W., 2009, Evolution des grands barrages en régions arides : quelques exemples algériens. *Sécheresse*, 20 (1), 96-103.
- Richards, L.A., 1954, Diagnosis and improvement of saline and alkali soils: Agriculture Handbook 60, Washington D.C, U.S. Salinity Laboratory Staff, p. 160.
- Roche, M., 1963, Hydrologie de Surface.: Paris, Gauthier-Villars, 430 p.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., and Brunet, R., 2009, L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 9ème édition: Paris, Dunod, 1579 p.
- Rouabhia, A.E.K., and Djabri, L., 2010, L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El Ma El Abiod: *LARHYSS Journal* ISSN 1112-3680, p. 55–67.
- Schott, J., and Oelkers, E.H., 1995, Dissolution and crystallization rates of silicate minerals as a function of chemical affinity: *Pure and applied chemistry*, v. 67, p. 903–910.
- Schott, J., Pokrovsky, O.S., and Oelkers, E.H., 2009, The link between mineral dissolution/precipitation kinetics and solution chemistry: *Reviews in mineralogy and geochemistry*, v. 70, p. 207–258.
- Stumm, W., and Morgan, J.J., 1996, Aquatic chemistry : chemical equilibria and rates in natural waters: New York, John Wiley & Sons Inc., Environmental science and technology, 1022 p.
- Suyama, H., Benes, S.E., Robinson, P.H., Grattan, S.R., Grieve, C.M., and Getachew, G., 2007, Forage yield and quality under irrigation with saline-sodic drainage water: Greenhouse evaluation: *agricultural water management*, v. 88, p. 159–172.
- Sverdrup, H.U., 1990, The kinetics of base cation release due to chemical weathering: Lund, Sweden, Krieger Publishing Company, 226 p.
- Touati, B., 2010, Les barrages et la politique hydraulique en Algérie : état, diagnostic et perspectives d'un aménagement durable. [Thèse Doctorat d'Etat]: Université Mentouri-Constantine, 385 p.
- Valladon, M., Dupre, B., and Polvé, M., 1995, ICP-MS chemical analysis of natural samples. Interference and shift corrections. EUG Conference, Strasbourg.
- Valladon, M., Freydier, R., and Candaudap, F., 2005, Cours de formation pour les utilisateurs de l'ICP-MS du LMTG: LMTG, 86 p.
- Vila, J.M., 1977a, Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000: feuille no 99, Sédrata (1ère éd.), avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et JM Vila): Publication Service de cartes Géologiques et Sonatrach, Division d'hydrocarbure, Direction des explorations, Alger, Algérie.

- Vila, J.M., 1977b, Carte géologique de l'Algérie au 1/50 000: feuille no 123, Berriche (Jean Rigal)(1ère éd.), avec notice explicative détaillée (levés de S. Guellal et JM Vila): Service de cartes Géologiques et Sonatrach, Division d'hydrocarbure, Direction des explorations, Alger, Algérie.
- Vila, J.-M., 1980, La chaîne alpine de l'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens [These d'Etat]: Université Pierre et Marie curie, Paris-6, France, 665 p.
- Vinogradov, A.P., 1959, The geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils. (translated from Russian). Consultant bureau, New York, 209 p.
- Voûte, C., 1967, Essai de synthèse de l'histoire des environs d'Ain Fakroun, Aïn Babouche et des régions limitrophes: Publications of the geological map of Algeria, v. 255.
- White, A.F., 1995, Chemical weathering rates of silicate minerals in soils: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 31, p. 407–461.
- White, A.F., and Brantley, S.L., 1995, Chemical weathering rates of silicate minerals; an overview: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, v. 31, p. 1–22.
- White, A.F., and Brantley, S.L., 2003, The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? Chemical Geology, v. 202, p. 479–506.
- Wilcox, L., 1948, The quality of water for agricultural use: US Dept Agriculture Tech Bull, Washington D.C, v. 962.
- Yeghicheyan, D. et al., 2001, A Compilation of Silicon and Thirty One Trace Elements Measured in the Natural River Water Reference Material SLRS-4 (NRC-CNRC): Geostandards and Geoanalytical Research, v. 25, p. 465–474, doi:10.1111/j.1751-908X.2001.tb00617.x.
- Yu, L., Daniels, L.M., Mulders, J.J.P.A., Saldi, G.D., Harrison, A.L., Liu, L., and Oelkers, E.H., 2019, An experimental study of gypsum dissolution coupled to CaCO<sub>3</sub> precipitation and its application to carbon storage: Chemical Geology, v. 525, p. 447–461, doi:10.1016/j.chemgeo.2019.08.005.
- Zhen-Wu, B.Y., Dideriksen, K., Olsson, J., Raahauge, P.J., Stipp, S.L.S., and Oelkers, E.H., 2016, Experimental determination of barite dissolution and precipitation rates as a function of temperature and aqueous fluid composition: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 194, p. 193–210.
- Zhu, C., 2005, In situ feldspar dissolution rates in an aquifer: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 69, p. 1435–1453.
- Zhu, C., and Lu, P., 2009, Alkali feldspar dissolution and secondary mineral precipitation in batch systems: 3. Saturation states of product minerals and reaction paths: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 73, p. 3171–3200.

**ANNEXE**

**L'EAU : BESOINS ET RESSOURCES**

## **ANNEXE : (L'EAU : BESOINS ET RESSOURCES)**

### **I. Introduction**

La consommation annuelle d'eau par habitant tous usages confondus est très variable selon les pays. Elle est de l'ordre de 6000 mètres cubes par an aux USA et de 7 mètres cubes dans les pays du Sahel. La moyenne est d'environ 600 mètres cubes par an par habitant.

La consommation d'eau dans le monde double tous les vingt ans. En 2025 la population mondiale devrait être d'environ huit milliards d'habitants, or aujourd'hui environ 25% des habitants de la planète n'ont pas accès à l'eau potable. Les perspectives à moyen terme sont donc très inquiétantes.

Les utilisations principales de l'eau sont les suivantes :

- Usages domestiques, pour subvenir aux besoins alimentaires (boisson, lavage et cuisson), ménagers (sanitaires, chauffage, lavage du linge et de la vaisselle), et d'agrément (arrosage des jardins, lavage des voitures,...).
- Usages collectifs et publics (protection incendie, lavage des rues, remplissage des bassins d'aménagement,...)
- Usages agricole, tels que l'irrigation des cultures et l'abreuvement des animaux.
- Usages industriels

Les besoins vitaux minima de l'être humain sont d'environ 10 litres par jour. Théoriquement, l'homme peut subsister en n'utilisant que 5 litres d'eau par jour ou même moins. Cependant on doit compter une moyenne de 40 à 50 litres par jour pour l'hygiène personnelle et domestique, et davantage encore lorsque l'on vit dans un milieu plus complexe où on pratique l'élevage et l'agriculture ; c'est ainsi que l'habitant d'un village doit disposer d'au moins 100 litres. On peut arriver à consommer 400 à 500 litres par personne et par jour dans les pays industrialisés voire davantage (Martin-Samos, 1976). La consommation domestique journalière atteint 400 litres par personne dans certaines villes des Etats-Unis ; à l'inverse elle est inférieure à 30 litres par personne dans de nombreuses

villes africaines. L'augmentation du niveau de vie s'accompagne donc d'un accroissement considérable de la consommation d'eau.

D'après les données de la FAO, les usages de l'eau se répartissent à 70 % pour l'agriculture, 20 % pour la production industrielle et énergétique (hydroélectricité, énergie thermique et nucléaire), et 10 % pour la consommation domestique. L'agriculture est donc, la principale consommatrice d'eau de la planète. A titre d'exemple, il faut 500 litres d'eau pour faire un kilo de farine. Ceci s'explique en premier lieu par le fait qu'il faut de 2000 à 5000 litres d'eau pour produire la nourriture quotidienne d'une personne, contre 2 à 5 litres pour boire et 25 à 100 litres pour les usages domestiques. Les prélèvements pour les usages domestiques et ceux liés aux activités industrielles utilisent l'eau, mais ne la consomment que dans de faibles proportions allant de 5 à 15% (Margat, 1993). L'eau prélevée pour ces usages est en grande partie restituée, généralement pas dans le même état de qualité, mais avec de faibles modifications de volume (Cosandey and Robinson, 2000). Cette eau représente une source importante de pollution. Dans les pays arides, le recours à des méthodes d'irrigation moins gourmandes en eau (goute à goutte par exemple) permet de diminuer la part de l'eau agricole.

## **II. Besoins en eau en Algérie**

En Algérie, la demande d'eau tient à l'accroissement démographique et aux conséquences qui en découlent. Cet accroissement qui était à son maximum dans les années 1980 est, aujourd'hui, acceptable néanmoins la demande en eau est importante en raison des mutations économiques et sociales qu'enregistre le pays : l'augmentation des superficies irriguées et la croissance urbaine.

A titre illustratif, les besoins annuels de l'agglomération algéroise qui n'étaient que de 70 millions de m<sup>3</sup> en 1970, sont aujourd'hui de l'ordre de plus de 210 millions m<sup>3</sup>. Cette augmentation est valable pour toutes les grandes agglomérations du pays. Pour répondre à cette demande sans cesse croissante, la ville va quérir son eau de plus en plus loin. L'agglomération oranaise, par exemple, en pleine croissance et localisée dans la partie la plus sèche du littoral oranais où il ne tombe que 350 mm/an, fait appel aux monts de Tlemcen et à ceux de Saida, plus humides, pour lui fournir l'eau nécessaire.

En données chiffrées, pour l'alimentation en eau potable et industrielle, l'estimation faite par la DGAIH et le CNES, dans le cadre du Plan National de l'Eau, fait apparaître que le volume distribué en 1998 était de l'ordre de 1,3 milliards de m<sup>3</sup> (provenant à 30 % à partir des eaux de surface et à 70 % des eaux souterraines). Il serait, dans le Nord du pays, de 3,5 milliards de m<sup>3</sup> (en supposant que les fuites seraient réduites graduellement pour atteindre 25 %) en 2020 et de 4,4 milliards de m<sup>3</sup> si le taux de perte reste à son niveau actuel (environ 40 à 50 %).

En définitive, à des ressources hydriques limitées correspondent une demande croissante en eau potable du fait déjà de la croissance démographique puis de l'urbanisation grandissante, en eau industrielle du fait du développement du tissu industriel, et en eau agricole croissante du fait des surfaces à irriguer qui doivent augmenter pour répondre à une demande de consommation croissante de produits agricoles mais aussi du fait de la croissance des cheptels.

L'Algérie dispose d'un vaste territoire présentant une grande diversité de sol et de climat. Cette diversité donne un caractère assez différencié à l'agriculture dont le système de production varie du type très extensif au type intensif.

Cependant, et en dépit de son vaste territoire l'Algérie n'est pas un pays agricole. La nature ne l'a pas avantagé, elle ne l'a pas doté de terres fertiles et de climats favorables au développement des plantes et des animaux.

En effet, la superficie totale de l'Algérie couvre près de deux millions quatre cents milles Km<sup>2</sup> (2.4 millions de Km<sup>2</sup>). Sur cette superficie près de deux millions de Km<sup>2</sup> sont occupés par du véritable désert saharien et 150.000 Km<sup>2</sup> sont classés par les climatologues comme semi-aride recevant moins de 400mm de pluie par an, seuil minimum pour la culture des céréales.

La seule région convenablement arrosée est la bande côtière située dans la moitié Est du pays. Elle s'étend sur environ 600Km de long (Cherchel ; El-Kala) et sur une profondeur Nord-Sud qui ne dépasse pas les 100Km, et son relief laisse peu de place aux terres arables.

Au plan spatial, les ressources en eau sont concentrées dans les bassins côtiers, qui reçoivent 11,1 milliards de m<sup>3</sup> (90,2 %) de l'écoulement total, celles des hautes plaines ne sont estimées qu'à 0,7 milliards de m<sup>3</sup> (5,7 %) et enfin les bassins sahariens entrent pour 0,5 milliards de m<sup>3</sup> (4,1 %). Ces eaux superficielles sont deux fois plus importantes à l'Est qu'à l'Ouest où se trouvent les terres les plus fertiles. Une très grande disparité marque donc les espaces algériens. L'écoulement est concentré dans la petite frange Nord du pays faisant de l'arrière pays une zone où l'écoulement est presque inexistant. Cette disparité est également présente entre l'Est et l'Ouest. Les ressources en eau superficielles au Sahara sont localisées dans les piedmonts de l'Atlas saharien et dans les régions du Hoggar et du Tassili. Les pluies sont généralement rares et proviennent surtout du grand atlas marocain (Oued Guir) et du versant sud des Aurès.

Cette répartition spatiale de la ressource en eau qui est déjà une contrainte de localisation des populations et des activités agricoles en Algérie, le sera davantage, à moyen et long terme.

Pour atténuer ce déséquilibre, une meilleure gestion de la ressource en eau est impérative; il s'agit de mettre en place des mesures simples qui permettent de dégager des réserves importantes du côté de l'offre (épuration, entretien des barrages, réduction des pertes du réseau, dessalement) et de la demande (tarification, contrôle du détournement des eaux).

L'Algérie a souffert de l'exploitation, de la gestion et de la disponibilité des ressources hydriques. La rareté et la détérioration continue de ses ressources en eau l'ont caractérisé pendant longtemps. Le modèle de développement économique préconisé durant la période 1967-1979 basé sur les industries ainsi que les tentatives de la décennie 1980-1990 de décentraliser l'économie en se basant sur le développement local n'ont pas permis à l'amélioration de l'accès à l'eau.

### III. Ressources en eau

#### III.1 Les ressources en eau dans le monde

L'eau constitue l'essentiel dans le corps humain. Elle représente 90% de son cerveau, 70% des composants du cœur et 86% des composants des poumons et du foie. Les ressources en eau sont donc vitales pour la vie des êtres humains.

Les études historiques ont prouvé la forte corrélation entre la disponibilité de l'eau et la mise en place des civilisations anciennes, en particulier dans les zones qui jouissent d'un climat tempéré et l'eau douce. La façon dont étaient employées les ressources en eau disponibles est garante de la stabilité des populations. L'exemple de la civilisation de la Mésopotamie en Irak, la civilisation pharaonique en Égypte, la civilisation maya au Pérou en Amérique latine et d'autres civilisations en témoignent.

##### III.1.1 Répartition des ressources en eau dans la nature

D'après les ressources documentaires consultées à ce sujet (Lvovitch, 1970; Baumgartner and Reichel, 1975; Falkenmark and Widstrand, 1992; Oki and Kanae, 2006), la distribution de l'eau dans la nature selon chaque type est exposée dans la (Figure 106).

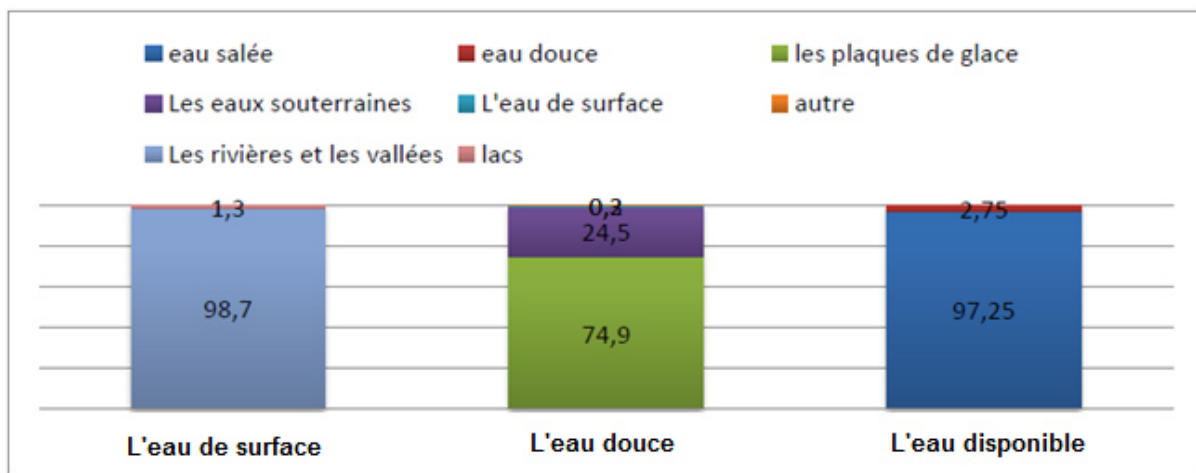


Figure 106 : La distribution des ressources en eau dans la nature<sup>(1)</sup>.

Selon le Graphique, L'eau douce ne représente que 2,75% de la masse d'eau sur terre, 75% de cette eau douce est emprisonnée dans les calottes glaciaires et la glace.

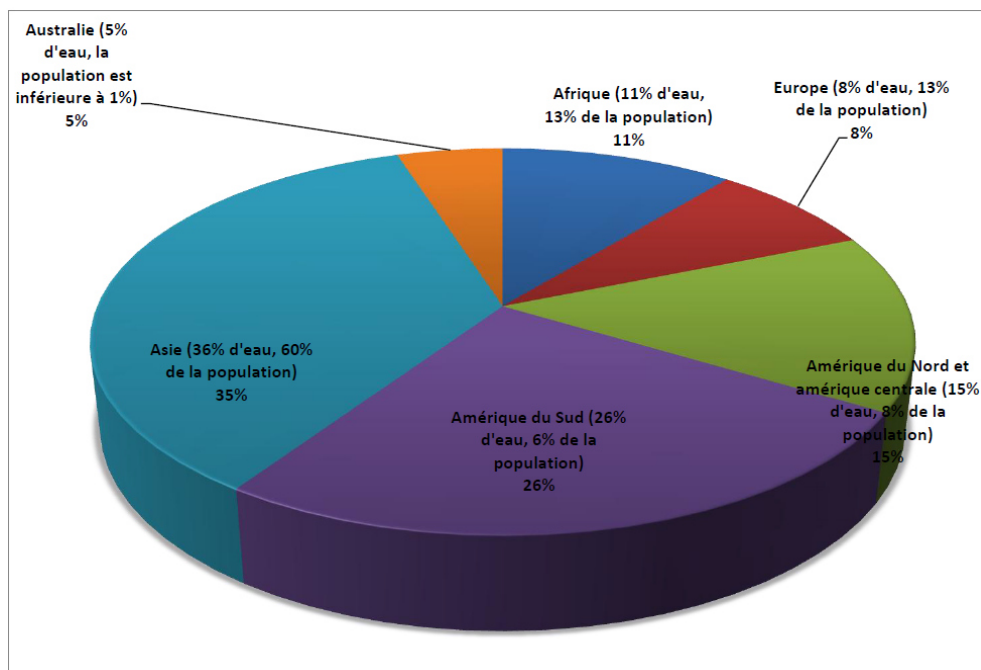
<sup>(1)</sup> Source : Pwc, les nouveaux modèles de gestion de l'eau, l'eau : enjeux, dynamique et solution, Pwc, mars 2012.

### III.1.2 Répartition des ressources en eau dans le monde par rapport à la population

On estime que le monde contient 1400 millions de km<sup>3</sup> d'eau, constituée d'eau douce à concurrence de 2,75% dont la plus grande proportion est sous forme de glace dans l'Antarctique et Green Earth<sup>(1)</sup>.

Le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord sont considérés parmi les régions les plus pauvres du monde en ressources en eau. La quantité moyenne d'eau disponible par personne et par an dans le monde est environ 7000 m<sup>3</sup>, tandis que la quantité moyenne d'eau disponible par personne et par an en Afrique du nord et Moyen-Orient est aux alentours de 1200 m<sup>3</sup> seulement.

La croissance prévue de la population d'environ 300 millions de personnes à 500 millions de personnes en 2025 va diminuer la quantité d'eau disponible par personne en 2050<sup>(2)</sup>



**Figure 107 : Proportion d'eau par rapport à la population dans le monde<sup>(3)</sup>.**

<sup>(1)</sup> Poitou-Charentes, Observatoire régional de l'environnement, réseau partenarial des données sur l'eau, 2007

<sup>(2)</sup> European commission, water for life, eu water initiative, international cooperation from knowledge to action, Luxembourg, 2003.

<sup>(3)</sup> Source : Unesco/Phi, bureau régional pour l'Amérique latine et les caraïbes. Sur le site internet

La répartition des ressources en eau par rapport au nombre de la population dans le monde n'est pas équilibrée (Figure 107). Ceci qui explique les grandes disparités dans les ressources en eau par habitant entre les pays du monde.

## IV. Les Ressources en eau en Algérie

Selon divers rapports préparés par des experts et des organismes spécialisés dans le domaine des ressources en eau, l'exposition de nombreux pays et régions au niveau mondial à une grave crise de l'eau, parmi ces pays l'Algérie, qui est classé selon un rapport de la banque mondiale parmi les 17 pays africains qui souffrent de la pauvreté de l'eau à horizon 2025 (>400 m<sup>3</sup> par habitant et par an). La figure 108, nous renseigne sur l'évolution de la part d'eau par habitant de 1962 (date de l'indépendance aux prévisions 2020). Elle illustre la baisse continue de la part annuelle de l'eau par habitant en Algérie. À l'horizon 2020, si l'Algérie ne rattrape pas ce retard elle descendra en dessous des normes définies par la banque mondiale pour exprimer la pauvreté en eau (Nichane and Khelil, 2015).

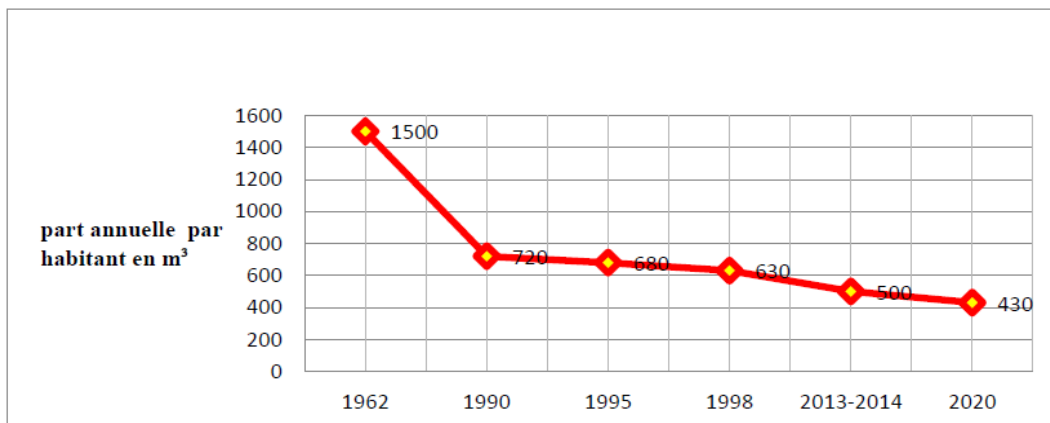


Figure 108 : Evolution de la part de l'eau par habitant en Algérie, 1962-2020<sup>(1)</sup>.

### IV.1 Les Ressources en eau disponibles en Algérie.

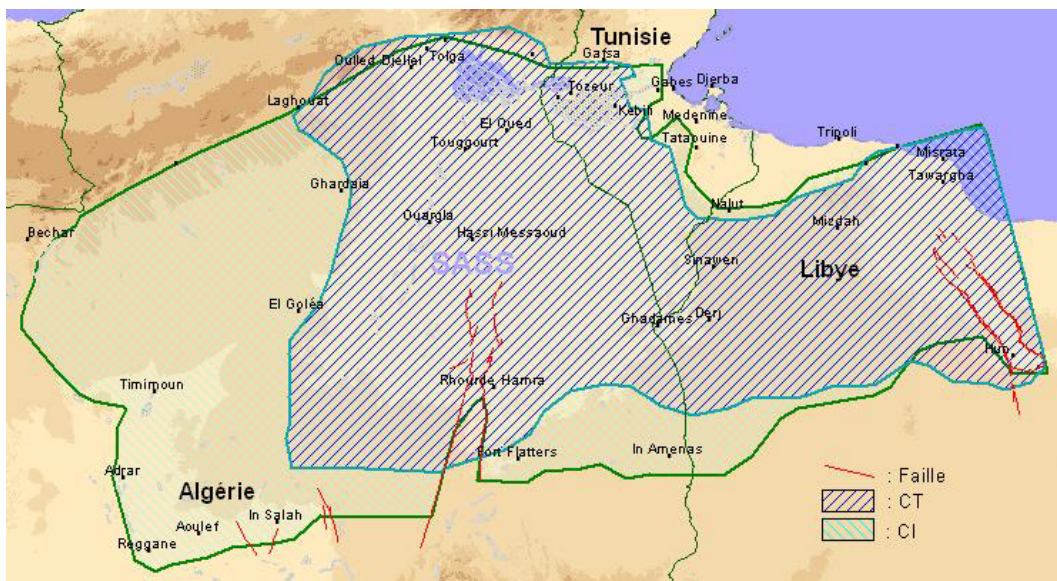
Les ressources en eau sont estimées en Algérie à environ 17,2 milliards de m<sup>3</sup>, 12 milliards de m<sup>3</sup> le volume des ressources en eau de surface dans le nord et 5,2 milliards de m<sup>3</sup> représentant des ressources en eau dans les zones désertiques (0,2 milliards de m<sup>3</sup> superficielles et 5 milliards de m<sup>3</sup> d'eau souterraine)<sup>(2)</sup>. Les ressources en eau renouvelables

<sup>(1)</sup> Source : Séminaire international, enjeux et perspectives de la gestion de l'eau potable en milieu rural, état des lieux des secteurs de l'eau potable en Afrique du nord, Mbodiène, Sénégal, 3-7 nov. 2008.

<sup>(2)</sup> Source : MSRE, 2011 : stratégie et indicateur du secteur de l'eau en Algérie.

représentent en Algérie 75% du total ; de 60% pour les ressources en eaux superficielles et 15% pour les ressources souterraines (Ben Icha, 2008).

Selon les plus récentes études et recherches, les ressources en eau souterraine en Algérie sont inexploitées. Le sud algérien dort sur un trésor en ressources en eau souterraine très impressionnant (Figure 109). Il se caractérise par l'existence de ressources en eaux souterraines considérables provenant des nappes du Continental Intercalaire (CI) ou nappe albienne et du Complexe Terminal (CT). La capacité est estimée à près de 60.000 milliards de m<sup>3</sup>, répartie sur deux bassins. Le premier (CT) est une nappe d'une profondeur estimée entre 100-400m située dans le désert inférieur. Le deuxième (CI) est une nappe dont la profondeur se situe entre 1000-1500 m de profondeur, la capacité est de 30.000 à 40.000 km<sup>3</sup> (Mebarki, 2010), 60 à 70% est situé en Algérie et 40 à 30% en Libye<sup>(1)</sup>, c'est une eau chaude (60°C) dont la teneur en sels est de 1 à 2 mg/litre.



**Figure 109 : Ressources en eau souterraine au Sud de l'Algérie<sup>(2)</sup>.**

CT : Nappe du Complexe Terminal ; CI : Nappe du Continental Intercalaire.

## IV.2 Plan national de l'eau

L'eau est considérée comme une denrée rare qui doit être gérée de façon optimale en posant les jalons d'une véritable politique de l'eau intégrant sa dimension dans le cadre d'un développement durable en tenant compte de sa préservation pour les générations

<sup>(1)</sup> Source : UN, problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie, 07 mars 2009.

<sup>(2)</sup> Source : tirée du site web, observatoire du Sahara et Sahel, projet SASS.

futures. Elle passe par la constitution de structures technico – administratives d'approche intégrée englobant tous les aspects : qualité–quantité, prélèvement–rejet, approvisionnement et protection.

L'Algérie est classée parmi les pays les plus défavorisés en termes de potentialités hydriques. En effet, actuellement le seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale à 1000 m<sup>3</sup>/habitant/an est loin d'être atteint avec une disponibilité moyenne de 500m<sup>3</sup>/habitant/an (Loucif, 2002).

Face au retard accumulé en matière de disponibilité en eau, l'Algérie mène une politique active pour mobiliser des ressources en eau et faire face aux irrégularités spatio-temporelles des précipitations (Chabaca et al., 2007; Mebarki, 2007; Remini et al., 2009).

Sur le plan structurel, un ministère est créé ; Ministère de l'Eau et des Ressources Hydriques (MRE). Il représente l'autorité centrale responsable de l'élaboration et de la mise en œuvre de la politique nationale de l'eau et dispose de relais déconcentrés au niveau local avec les directions des ressources en eau de wilaya (DREW).

Une stratégie à long terme est adoptée clairement annoncée dans les différents programmes quinquennaux (1999-2004,2005-2009,2010-2014,2015-2019).

Depuis le début des années 2000, le gouvernement algérien a pris des mesures importantes pour sortir de la situation de pénurie d'eau qui touchait le pays. La question hydraulique a été placée en priorité sur l'agenda politique et de gros moyens ont été mis en œuvre pour mobiliser de nouvelles ressources en eau conventionnelles et non conventionnelles.

L'objectif s'articule autour de l'amélioration en fourniture des ressources en eau en se basant sur l'utilisation rationnelle des ressources en eau, la construction de barrages, des centrales de dessalement et des usines de traitement des eaux usées. L'Algérie s'est lancée dans un grand chantier de ressources en eau afin de garantir un développement durable et essayer de réduire la dépendance en matière de sécurité alimentaire.

Le gouvernement n'a pas manqué de prendre en compte dans son dernier plan quinquennal la nécessité d'effectuer davantage d'investissements dans ce domaine. Le plan

d'action économique pour la période 2015-2019 alloue 18 milliards de dollars à l'amélioration de la sécurité hydrique, ce qui en fait le plus important domaine d'investissement.

Des actions durables comme le dessalement de l'eau de mer, le traitement des eaux usées, le transfert de l'eau, les forages et l'élargissement du programme de construction des barrages entrant dans le cadre global d'un schéma d'aménagement en vue de répondre à une demande de plus en plus croissante (Touati, 2010).

Dans le cadre de cette stratégie, des efforts importants ont été déployés pour garantir une mobilisation durable de la ressource en tenant compte de l'impératif de sa préservation pour les générations futures tout en assurant une équité dans l'accès à l'eau à travers la réalisation de grands transferts régionaux et de systèmes d'interconnexion des barrages.

#### **IV.2.1 Construction des barrages et retenues collinaires**

Afin de développer la capacité de retenue des eaux de surface, de nombreux ouvrages ont été construits. Alors qu'en 1962, il n'existait que treize barrages permettant de stocker 450 millions de m<sup>3</sup> d'eau destinée essentiellement à l'irrigation des plaines agricoles, on en dénombre actuellement 75 contre 31 en 1999 pour une capacité globale de 7,3 milliards de m<sup>3</sup> d'eau. Afin de mobiliser de nouvelles ressources en eau, l'Agence nationale des barrages et transferts (ANBT) a engagé d'importants moyens pour améliorer le rendement des exploitations déjà existantes et réaliser de nouveaux ouvrages hydrauliques.

Dans un contexte de croissance de la population, d'urbanisation, de hausse des températures, d'industrialisation accrue et de développement du secteur agricole, les autorités poursuivent leurs projets de développement des infrastructures hydrauliques du pays. De ce fait, le gouvernement entend faire passer à 139 le nombre total de barrages en Algérie d'ici 2030 pour atteindre une capacité de stockage de près de 12 milliards de mètres cubes sur l'ensemble du pays.

Les barrages répondent à deux enjeux majeurs auxquels l'Algérie doit faire face : la mobilisation de nouvelles ressources pour l'alimentation en eau potable et industrielle (AEPI) et l'irrigation. En effet, pour relever le défi de la sécurité alimentaire, l'Algérie a

cherché à affecter de plus grandes ressources en eau au secteur agricole. Le pays a augmenté en dix ans les dotations en eau des Grands périmètres irrigués (GPI) tout en multipliant leur superficie globale.

Cette expansion des terres irriguées a pu avoir lieu grâce aux ressources souterraines et aux barrages de petite ou de moyenne dimension ainsi qu'au développement du parc des retenues collinaires qui compte aujourd'hui environ 550 ouvrages à travers le territoire national. Celles-ci permettent de stocker les eaux de surface et de ruissellement et sont un investissement peu coûteux par rapport aux barrages. Ces ouvrages ont prouvé leur efficacité surtout dans des environnements difficiles telles que les zones arides et semi-arides.

#### **IV.2.2 Installation des stations de dessalement**

Outre l'augmentation de la capacité des barrages, l'Algérie s'est également attelée à développer sa production d'eau potable à partir de l'eau de mer et plusieurs usines de dessalement construites depuis 2000, permettent d'approvisionner la population en eau douce à partir de l'eau de mer de la Méditerranée.

L'Algérie possède 1200 Km de côtes, ce qui laisse présager d'énormes possibilités de dessalement. Près de 70% de la population sont concentrés à proximité du littoral, de même que les industries, grandes consommatrices d'eau, comme les hôtels et les zones industrielles.

La station de dessalement par osmose inverse de Magtaa à Oran, mise en service en 2015, en est l'exemple le plus marquant : d'une capacité de traitement de 500 000 mètres cubes par jour ( $m^3/jour$ ), permettant l'approvisionnement en eau potable de cinq millions de personnes, il s'agit là de la plus grande usine de dessalement de toute l'Afrique. Elle fait partie d'une quinzaine de grandes stations de dessalement d'eau de mer (SDEM) qui sont installées le long littoral algérien dont la capacité de production allant de 100 000 à 500 000  $m^3/j$ .

Le recours aux unités de dessalement permet de réserver une partie plus importante des eaux de barrages à l'agriculture. Ce recours au dessalement n'est pas récent. En effet, les premières expériences de dessalement dans le pays ont été réalisées après l'indépendance

pour des besoins spécifiques liés à l'industrie pétrolière et à la sidérurgie ainsi que pour la déminéralisation d'eaux souterraines présentant un taux élevé de salinité. Il faut pourtant attendre 2001 pour que les autorités prennent la décision de retenir le dessalement d'eau de mer pour l'alimentation en eau potable comme une priorité de leur stratégie économique.

En plus des grandes stations, l'Algérie possède une vingtaine de petites stations de dessalement qu'on appelle monoblocs dont la capacité de production qui ne dépasse pas les 7 000 m<sup>3</sup>/j. Le (tableau 38) englobe les paramètres des stations monoblocs de dessalement d'eau de mer :

**Tableau 38 : Les petites stations de dessalement dites monobloc.**

Wilaya	Stations	Capacité nominale (m <sup>3</sup> /j)	Date de mise en service	Gestionnaire
Alger	Zeralda	5 000	juillet 2003	SEAAL
	Ain Benian	5 000	Novembre 2003	SEAAL
	Palm Beach	2 500	juin 2004	SEAAL
Oran	Bousfer	5 500	Novembre2005	SEOR
	Les Dunes	5 000	Août 2006	SEOR
Tlemcen	Ghazaouet 1	2 500	Janvier 2004	ADE
	Ghazaouet 2	2 500	Avril2004	ADE
Tipasa	Bou Ismail	5 000	2004	SEAAL
Tizi ousou	Tigzirt	2 500	Août 2004	ADE
Skikda	Larbi Ben M'Hidi	7 000	2003	ADE
Chlef	Ténes	5 000	Juillet 2007	ADE
Ain Temouchent	Bouzedjar	5 000	Juillet 2006	ADE
	Chatt el ward	5 000	Juin 2006	ADE
<b>Total</b>		<b>57 500</b>		

*(Source : MRE, Alger, 2014).*

#### **IV.2.3 Lutte contre l'envasement des barrages**

Le phénomène d'envasement des barrages se pose avec acuité. Il constitue une menace qui affecte sérieusement la santé publique ainsi qu'un handicap principal concernant la longévité des ouvrages. L'ampleur de ses dégâts est souvent considérable. La réduction de la capacité des barrages en est directement liée et par conséquent, la diminution de leurs volumes régularisés.

La lutte contre l'envasement occupe, aujourd'hui, une place importante dans les programmes de l'état puisque des actions ont été déjà menées dans ce sens. Le meilleur moyen de lutter contre l'envasement est, sans doute, la prévention. En Algérie, plusieurs méthodes sont utilisées à nos jours pour lutter contre ce phénomène à savoir :

- Le reboisement,
- La restauration des sols
- La formation des banquettes
- La plantation de cultures selon les courbes de niveau
- La plantation de végétation à longues tiges dans les oueds.

L'élimination des sédiments au fur et à mesure de leur arrivée aux barrages est un autre moyen de lutte contre l'envasement qui est aujourd'hui utilisé en Algérie. À cet effet, plusieurs méthodes sont aussi utilisées :

- La méthode des chasses, dite l'espagnole, utilisée pendant les premières crues pour les barrages de moindre importance et à régulation annuelle comme ce fut le cas des barrages de Hamiz et de Beni Amrane.
- La méthode des chasses de dévasement par les vidanges de fonds à barrages pleins utilisée sur la majeure partie des barrages algériens.
- La méthode de soutirage par courant de densité ou underflow, grâce aux vannettes de dévasement, cette méthode peu utilisée en Algérie s'avère très coûteuse en eau car pour enlever un volume de vase il faut utiliser jusqu'à dix volumes d'eau.
- Le dévasement par dragage est la méthode la plus performante par rapport aux trois méthodes précédentes qui se sont avérées peu efficaces compte tenu des résultats obtenus. Cette méthode consiste en passage de la drague au fond des oueds et des barrages dans le but de les nettoyer de la vase qui s'y est accumulée. C'est une opération excessivement longue et coûteuse.

Pour aller plus loin dans ce sens, l'Algérie s'est lancée pour la première fois dans la fabrication des machines de dragage des barrages en septembre 2017 par la compagnie publique d'équipement industriel (ALIECO, filiale de l'entreprise nationale de charpente et de chaudronnerie ENCC).

Trois dragues pour le dévasement des barrages seront livrées au cours du premier semestre de cette année 2018, a indiqué le ministre des Ressources en eau, Hocine Necib, lors de la cérémonie de lancement de réalisation de ces équipements au niveau de l'usine d'Alieco à Hussein Dey (Alger).

Elles auront, de par leurs caractéristiques techniques, l'immense avantage de doter le secteur d'une flexibilité de planification et de programmation des opérations de dévasement, et d'adapter ainsi le programme en fonction des priorités imposées par la réalité du terrain.

D'un coût global de 1,4 milliard de dinars, ces trois équipements pourront être déplacés d'un barrage à un autre dans les cas d'urgence.

#### **IV.2.4 Installation des stations d'épuration des eaux usées**

Le déversement des eaux usées dans les oueds engendre de graves problèmes de pollution avec leurs conséquences sur le milieu naturel et la santé publique. La quantité des eaux usées rejetée augmente avec l'accroissement des consommations en eau, ce qui incite les autorités publiques à opter pour l'installation des stations d'épuration. L'eau traitée constitue, à long terme, un potentiel non négligeable. Les stations d'épuration est donc, la solution qui permet non seulement d'obtenir un volume d'eau supplémentaire pour certains usages, mais qui protège aussi les oueds, les barrages et les rivages marins contre la pollution. De ce fait, les eaux usées ne doivent pas constituer un problème d'environnement mais une ressource à valoriser.

Les eaux d'épuration peuvent remplacer l'eau potable dans plusieurs domaines tels que :

- Réutilisation pour l'irrigation : cultures fourragères ou maraîchères, céréales, etc.
- Réutilisation industrielle : circuit de refroidissement, construction, papeteries, industries, textiles, etc.
- Réutilisation en zone urbaine : stations de lavage, arrosage des espaces verts et des terrains de sport, utilisation par les services de la protection civile, utilisation dans le nettoyage de la voirie urbaine, etc.

Malgré les efforts déployés par l'Etat, l'épuration des eaux usées en Algérie reste loin des ambitions compte tenu du volume des eaux usées rejetées dans la nature. Il est important de signaler que le coût du mètre cube d'eau épuré est largement inférieur au coût de revient du mètre cube d'eau dessalé.

Face au défi d'assurer la couverture des besoins en eau pour l'agriculture, l'Algérie mène une politique active de mobilisation des ressources en eau à travers la réutilisation des eaux usées surtout en agriculture. L'épuration des eaux usées et leur utilisation en irrigation est une option attrayante, en particulier dans les zones arides et semi-arides, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables<sup>(1)</sup>.

En Algérie, les eaux usées représenteront un volume très appréciable de près de 2 milliards de m<sup>3</sup>. Un tel volume, une fois épuré, pour des considérations écologiques ou de protection des ressources en eau, sera très apprécié quant à son utilisation par l'agriculture ou l'industrie. La stratégie du ministère des Ressources en eau dans le domaine de l'épuration est basée sur la protection de la ressource hydrique, l'éradication des fosses septiques, le confort et le bien-être des citoyens, la protection du littoral conformément à la Convention de Barcelone et la réutilisation des eaux usées épurées, notamment à des fins agricoles. Actuellement, l'Algérie dispose de près de 180 stations d'épuration (STEP et lagunes) en fonctionnement. La réutilisation des eaux usées épurées notamment à des fins agricoles est devenue l'un des axes principaux de la stratégie du secteur des ressources en eau en Algérie.

#### **IV.2.5 Le transfert d'eau et l'interconnexion**

Face aux demandes urbaines, agricoles et industrielles en eau de plus en plus croissantes, les tensions sur l'eau sont devenues tellement importantes, qu'elles requièrent, désormais, une mobilisation d'eau de grande ampleur complétée par de longs transferts et l'interconnexion des ouvrages hydrauliques ; ceci dans le but de fournir de l'eau potable et d'irrigation aux régions consommatrices et souffrant d'un déficit chronique à partir de régions productrices. Ce sont là, des impératifs devenus incontournables car la mobilisation de la ressource semble être limitée ou avoir atteint ses limites depuis bien longtemps déjà.

---

<sup>(1)</sup> *Food and Agriculture Organization (FAO, 2003) : Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases*

Aujourd'hui, ces transferts s'organisent à l'intérieur d'espaces régionaux et permettent d'assurer une meilleure répartition géographique de l'eau. Le réseau comprend à la fois un système de canalisations et une interconnexion des grands barrages. De nombreuses infrastructures de mobilisation ont déjà été réalisées ou sont en cours de réalisation.

La stratégie au niveau national est d'interconnecter les ouvrages de stockage en systèmes régionaux pour permettre de transférer le surplus d'eau des régions à climat pluvieux vers les régions arides et semi-arides. Durant la décennie 2005-2015, sept grands transferts d'eau ont été réalisés, dont un méga-transfert dans le sud du pays sur une distance de 750km et trois nouveaux transferts sont actuellement en voie d'achèvement, selon un communiqué du ministère.

## **V. Conclusion**

L'accroissement démographique, l'augmentation du niveau de vie et le développement de l'agriculture et de l'industrie s'accompagne toujours d'un accroissement considérable de la consommation d'eau. La répartition des ressources en eau par rapport au nombre de la population dans le monde n'est pas équilibrée. L'Algérie a connu depuis l'indépendance une baisse continue de la part annuelle de l'eau par habitant. Face à ce retard l'Algérie mène une politique active pour mobiliser des ressources en eau en prenant des mesures importantes, parmi lesquelles on peut citer :

- La construction des barrages et retenues collinaires.
- L'installation des stations de dessalement.
- La lutte contre l'envasement des barrages.
- L'installation des stations d'épuration des eaux usées.
- Le transfert d'eau et l'interconnexion.