

Université MUSTAPHA Stambouli  
Mascara



جامعة مصطفى أسطمبولي  
معسكر

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département des Sciences agronomiques  
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau (LSTE)

## THESE de DOCTORAT en SCIENCES

Spécialité : Hydraulique Agricole

Intitulée

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus  
d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de  
Saida ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

*Présentée par* : BENTABET ABDELKADER

Soutenue le 13 septembre 2020

Devant le jury :

Président	Mr Bekoussa. S	Professeur	Université de Mascara
Examineur	Mr Mansour. H	Professeur	Université d'Oran
Examineur	Mr Medjeber. A	Professeur	Université de Saïda
Examineur	Mr Zaagane. M	MCA	Université de Mascara
Directeur de Thèse	Mr Azzaz. H	Professeur	Université de Mascara
Co-promoteur	Mr Christoph. E	Professeur	Université d'Avignon, France

Année Universitaire : 2019-2020

## AVANT-PROPOS

On lisant le passage de **monsieur** Bazin. H, dans sans livre intitulé (La mort du petit cheval, 1950), j'ai ressenti qu'il est entrain d'exprimer mes sentiments en écrivant les dernières lignes de cette thèse.

*Les derniers kilomètres - comme les premiers - sont les plus longs. Au départ, le but est trop éloigné. A l'arrivée, l'appréhension nous freine. En se rapprochant du but, on se rend compte qu'il n'est pas même une étape, mais une simple borne, devant laquelle la vie doit défiler, sans s'arrêter. (Bazin. H, La mort du petit cheval, 1950).*

Lorsqu'on arrive au moment d'écrire les lignes qui vont suivre, cela signifie que, finalement, le travail touche à sa fin. Cette thèse n'aurait sûrement pas abouti sans l'aide de nombreuses personnes. Aussi, je vais tenter à travers ces quelques lignes de trouver les mots justes pour remercier tous ceux qui m'ont soutenu durant ces années.

Ces moments vécus sur le terrain ainsi que la possibilité d'apporter ma pierre à l'édifice de la science, je les dois à de nombreuses personnes mais, il en est une à qui mes pensées vont immédiatement : Le Professeur **Habib Azzaz** qui m'a été d'une aide précieuse par sa connaissance des aquifères karstiques et par ses critiques constructives.

C'est à lui que va toute ma respectueuse gratitude pour le soutien, l'encadrement et les conseils qu'il a toujours su me prodiguer tout au long de ce travail. Il a su manifester une grande patience à mon égard et un vif intérêt pour ce travail, qu'il a ponctué par ses remarques empreintes de toute son expérience scientifique

Au co-encadrant de ma thèse, Le Professeur **Christophe Emblanch**, également à l'origine du sujet de mon article, qui a accepté de se lancer dans cette aventure avec son esprit d'analyse et d'intuition, toujours juste, sans savoir si nous aurions les résultats escomptés, et pour son soutien, notamment lors de la phase de rédaction et de traduction à la langue Anglaise.

Je suis reconnaissant à messieurs ; le président du jury **Bekkoussa. S** professeur à l'université de Mascara, **Mr Zaagane. M** professeur à l'université de Mascara, **Mr Mansour. H** professeur à l'université d'Oran, **Mr Medjeber. A** professeur à l'université de Saïda d'avoir participé au jury et prodigués des critiques constructives

Je tiens ensuite à remercier tous les membres du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon pour leur accueil et avec qui j'ai eu plaisir à travailler durant la période de mon stage et sans oublier **Mr Roland Simler**, **Mr Daniel Michel** et **M. Babic** pour leur accueil au laboratoire d'analyses.

Je remercie également mes collègues enseignants thésards avec qui j'ai partagé la souffrance de l'éloignement durant notre séjour à Avignon : **Zohra, Rania, Salah, Tehao.**

Je n'aurais sans doute jamais achevé ce travail sans le soutien du professeur **Merdji Mohammed** et mon amie **Benamina Benyakhelef (Djamel)** qui m'ont accordé leur confiance pour porter ce projet. Djamel ; je vous remercie de m'avoir permis de développer et de faire connaître mon travail, ainsi que les échanges enrichissants que nous avons pu avoir.

Mes vives gratitudeles vont aussi à Monsieur **M. Bouchekara** Doyen de la faculté la faculté des sciences et technologies de l'université de Mascara pour ses orientations et ses encouragements.

Ces remerciements ne sauraient être complets sans exprimer ma gratitude à mes collègues de travail du département de l'hydraulique de la faculté des sciences et technologies de l'université de Mascara.

Je dédie ce travail de thèse à :

A mes **parents** pour leur amour et leur dévouement

A mon **épouse**, qui m'a soutenu et apporté une grande aide affective, morale et logistique pour tout ces petits tracass de la vie à côté de la thèse, me permettant de me concentrer sur la recherche,

A mes enfants **Idriss, Wissal, Fatima Zohra et Aya** pour leur affection et leur patience

A mes frères, sœurs,

A ma belle famille pour leur soutien.

**BENTABET ABDELKADER**

**Mascara le ; 02-02-2020**

*"Et Nous avons fait de l'eau toute chose vivante"* (Coran  
21/30)

Béni soit celui dans la main de qui est la royauté. Et Il est  
capable de toute chose. (1)

Celui qui a créé la mort et la vie dans le but de vous  
éprouver ceux parmi vous qui feraient la meilleure oeuvre.  
Et c'est Lui le Puissant, le Pardonneur (2)

Dis que : „Si votre eau était absorbée dans la profondeur  
de la terre, qui pourrait vous apporter de l'eau courante?“  
(30)

Sourate Al-Mulk Le Coran

L'important n'est pas le bout du chemin,  
c'est le chemin parcouru

## **Sommaire**

AVANT-PROPOS .....	2
Liste des figures .....	11
Liste des tableaux .....	13
Introduction Générale .....	14
Première partie : Caractéristiques physiques, géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude .....	18
Chapitre I : Caractéristiques physiques .....	19
1. Présentation de la zone d'étude .....	20
2. Situation géographique .....	20
<b>3. Hydrologie</b> .....	20
3.1. Délimitations hydrographiques .....	21
3.2. Relief .....	22
Figure 3: Présentation du réseau .....	23
4. hydrographique .....	23
4.1. Ressources en eau superficielle .....	23
<b>5. Occupation du sol</b> .....	23
5.1. Sols et végétation .....	23
5.2. Le cheptel : .....	25
<b>6. Le Climat de la zone d'étude</b> .....	26
6.1. Introduction .....	26
6.2. Le réseau pluviométrique de la zone d'étude .....	26
6.3. Equipement du bassin et difficultés .....	27
6.4. Collecte des données pluviométriques et leur présentation .....	27
6.5. Les autres facteurs climatiques .....	32
<b>7. Conclusion</b> .....	34
Chapitre II : Géologie .....	36
Introduction : .....	37
1. Les études géologiques antérieures des Monts de Saïda .....	37
2. Stratigraphie .....	38
2.1. Le socle Triaso- Paléozoïque .....	39
2.2. Le Mésozoïque .....	41
2.3. Le Cénozoïque .....	46
3. Cadre structural et tectonique .....	46
3.1. Structure générale : .....	47
<b>4. La Fissuration</b> : .....	49
4.1. Le résultat de la tectonique cassante .....	50
5. Conclusion .....	51
Chapitre III : Hydrogéologie .....	53
Introduction .....	54

1.	Distinction des aquifères : .....	54
1.1.	Le Jurassique moyen (Bajo-Bathonien). .....	54
1.2.	L'Aaléno-Bajo-Bathonien. ....	54
1.3.	Le Callovo-Oxfordien. ....	60
2.	Les atterrissements tertiaires et quaternaires. ....	61
3.	La piézométrie .....	61
<b>3.2.</b>	<b>Les points d'eau :</b> (Figure. 25 et Tableau. 8).....	63
<b>4.</b>	<b>Les conditions aux limites :</b> .....	66
Deuxième partie : Etude du fonctionnement des systèmes karstiques; (Rôle de la zone non saturée).....		69
Chapitre I : Utilisation des traceurs climatiques pour la connaissance hydrogéologique des systèmes karstiques .....		70
1.	Utilisation de la température dans la caractérisation des systèmes karstique des Monts de Saïda	71
	Introduction.....	71
2.	Equilibre thermique des sources à l'échelle annuelle .....	71
2.1.	Gradient altimétrique à l'échelle de la région des Monts de Saïda .....	71
3.	Discussion .....	79
<b>4.</b>	<b>Conclusion</b> .....	79
Chapitre II : Etude hydrochimique des sources .....		81
	Introduction.....	82
1.	Approche hydrochimique .....	82
2.	Facteurs responsables de la chimie des eaux.....	83
2.1.	Systèmes chimiques impliqués dans la chimie des eaux .....	84
3.	Description des données.....	86
3.1.	Composition chimique des sources de la nappe karstique des Monts de Saïda .....	87
4.	Caractéristiques géochimiques .....	87
4.1.	Validité des données de terrain et méthodes d'interprétation .....	88
4.2.	Les éléments caractéristiques de la nappe karstique des Monts de Saïda.....	89
5.	Caractéristiques générales des eaux des émergences.....	90
<b>6.</b>	<b>Les faciès des eaux :</b> .....	94
6.1.	Faciès chimiques des eaux des Mont de Saïda.....	94
6.2.	Faciès chimique des eaux de la source Ain Zerga par le diagramme de Schoeller/Berkalof	95
<b>7.</b>	<b>Conclusion</b> .....	102
Chapitre III : Caractérisation hydrochimique par la méthode d'analyse multivariée (ACP).....		103
Les analyses factorielles .....		104
Introduction.....		104
1.	Traitement des données par la méthode d'analyse en composante principale.....	104
2.1.	La source Ain Zerga .....	105
2.2.	La source Ain Teghat .....	108
2.3.	Forage N62 .....	111
2.4.	La source Poirier .....	114

2.5.    La source Ronde.....	117
3.    Conclusion.....	119
Chapitre IV : Etude des équilibres calcocarboniques .....	121
Introduction.....	122
1.    Rappel sur le rôle du CO <sub>2</sub> dans le processus de karstification .....	122
<b>2.    Processus de karstification des formations géologiques carbonatées .....</b>	<b>123</b>
<b>3.    Les phénomènes des roches karstifiables .....</b>	<b>124</b>
3.1.  Caractéristiques de l'aquifère karstique, son originalité. ....	125
3.2.  Identification du degré d'organisation d'un aquifère carbonatée par l'analyse des débits .....	127
3.3.  Identification du degré d'organisation d'un aquifère carbonaté par l'étude géochimique des eaux.....	128
3.4.  Les indicateurs chimiques de temps de séjour :.....	129
3.5.  Utilisation de la relation d'indice de saturation et pression partielle de CO <sub>2</sub> .....	130
3.6.  Interprétation des résultats .....	133
Discussion.....	137
<b>Discussion.....</b>	<b>141</b>
4.    Comparaison des évolutions en bicarbonates et en Chlorures dans les systèmes karstiques .....	142
5.    Etude de la relation magnésium-calcium .....	144
6.    Relations HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> -Mg <sup>2+</sup> .....	146
7.    Le rôle des argiles .....	148
1.1.  Les échanges de bases .....	148
1.2.  Pollutions ponctuelles.....	150
<b>2.    Conclusion.....</b>	<b>151</b>
Chapitre V : Evolution du signal chimique.....	153
en fonction des périodes hydrologiques.....	153
Introduction.....	154
1.    Etude du comportement hydrochimique des systèmes .....	154
1.1.  La source de Ain Zerga .....	154
1.2.  Le forage N62 .....	156
1.3.  La source Ronde : .....	158
2.    Evolution temporelle des signaux chimiques en fonction de la pluie .....	160
3.    Evolution du signal chimique de l'année hydrogéologique 2013-2014.....	162
3.1.  Forage N62 .....	162
3.2.  Ain Zerga.....	165
3.3.  La source Poirier .....	167
3.4.  Ain Teghat.....	170
4.    Evolution du signal chimique (2004-2007).....	170
4.1.  Forage N62 et Ain Zerga.....	170
<b>5.    Distribution de fréquence des conductivités.....</b>	<b>172</b>
5.1.  Application aux sources étudiées .....	174

<b>6. Etude de temps de réponse</b> .....	176
6.1. Ain Zerga .....	176
6.2. Forage N62 .....	178
7. Conclusion.....	180
Troisième partie : Vulnérabilité des eaux souterraines.....	182
Chapitre I : Impact de l'agriculture sur les eaux .....	183
des aquifères karstiques des Monts de Saïda .....	183
Introduction.....	184
1. Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines .....	184
2. Relation entre chlorure et nitrate .....	185
3. Relation Sodium+Potassium et nitrate des eaux souterraines .....	185
4. Impact de l'évolution des périmètres irrigués sur la qualité des eaux de la nappe karstique des Monts de Saïda .....	186
4.1. Ressources économiques .....	187
5. Pollution agricole :.....	188
5.1. La pollution nitratée .....	189
5.2. La pollution sulfatée :.....	193
5.3. La pollution chlorurée .....	194
6. Commentaire .....	195
7. Recommandations.....	195
8. Conclusion.....	196
Conclusion générale .....	197
Références bibliographiques .....	202
Annexe.....	215
Résumé .....	216
Abstract.....	216

## Liste des figures

Figure 1: Localisation des Monts de Saïda .....	20
Figure 2: Les sous bassins hydrologiques.....	21
Figure 3: Présentation du réseau .....	23
Figure 4: cartes d'occupation du sol du bassin versant d'Oued Saïda.....	25
<b>Figure 5: Evolution des cheptels et la surface agricole dans la wilaya de Saïda. (DSA)</b> .....	26
Figure 6: Précipitations moyennes mensuelles des Stations de la zone d'étude (1973-2015) .....	28
Figure 7: Répartition mensuelle du nombre de jours de pluies .....	29
Figure 8: Les répartitions des précipitations annuelles des stations .....	30
Figure 9: la variation des précipitations mensuelles des stations de la zone d'étude (1973-2014) .....	31
Figure 10: Histogramme de variation des vitesses moyenne mensuelle du vent .....	32
Figure 11: Courbes des variations des Températures dans la région de Saïda.....	33
Figure 12: Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen de la région de Saïda (1980-2014)...	34
Figure 13: carte géologique de Djebel Sidi Youssef de la région de Saïda (d'après le Service Géologique de l'Algérie (M. Gane v, K. Khistchev, J. Kolev, M. Moev)) .....	39
Figure 14: Coupe lithostratigraphique de la région de Saïda.....	42
Figure 15: Coupe du jurassique à Tiffri.....	44
Figure 16 : Coupe géologique simplifié : Sud Est-Nord Ouest de Djebel Sidi Youssef (d'après le Service Géologique de l'Algérie (M. Gane v, K. Khistchev, J. Kolev, M. Moev)).....	47
Figure 17: Dolomies de Tiffrit évolution lithostratigraphique sur le mole Tiffrit.....	48
Figure 18: les photos présentent la forme des fissurations prédominantes dans les Monts de Saïda (les photos prisent dans la zone de A. Zerga).....	51
Figure 19: Coupe lithostratigraphique et hydrogéologique de la région de Saïda.....	55
Figure 20: la source Ain Zerga.....	56
Figure 21: la source Poirier.....	57
Figure 22: la source Ain Teghat.....	58
Figure 23: Coupe géologique au niveau de la vallée de l'Oued Saïda (G.Pitaud.1973).....	62
Figure 24: Localisation des points d'eau de la région de Saïda.....	63
Figure 25: carte piézométrique des aquifères karstique des Monts de Saïda .....	64
Figure 26: Synthèse hydrogéologique de la nappe karstique .....	67
Figure 27: Gradients moyens des températures atmosphériques .....	72
Figure 28: Evolution de la température dans les systèmes Karstiques de la source Ain Zerga et la source Poirier dans les Monts de Saïda (2004 – 2014).....	76
Figure 29: Evolution de la température dans les systèmes Karstiques du Forage N62 et la source Ain Teghat dans les Monts de Saïda (2004 – 2014).....	77
Figure 30: Evolution de la température dans le système Karstiques de la source Ronde dans les Monts de Saïda (2004 – 2014) .....	78
Figure 31: faciès chimique des eaux d'Ain Zerga pendant les périodes.....	95
Figure 32: faciès chimique des eaux d'Ain Teghat pendant les périodes .....	96
Figure 33: faciès chimique des eaux du forage N62 pendant .....	96
Figure 34: faciès chimique des eaux de la source Poirier pendant les périodes des hautes et basses eaux.....	97
Figure 35: faciès chimique des eaux de la source Ronde pendant .....	98
Figure 36: Diagramme de schoeller (faciès chimiques des eaux karstiques .....	99
Figure 37: faciès chimique des eaux de la source Ain Zerga pendant les périodes des hautes et basses eaux .....	100
Figure 38: faciès chimique des eaux de la source Ronde pendant les périodes .....	101
Figure 39: faciès chimique des eaux de Forage N62 pendant les périodes des hautes et basses eaux ...	102
Figure 40: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Zerga Période .....	106
Figure 41: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Zerga (plan des individus) Période (Mai/2004–Fév/2007)–(Jan/2014 – Jan/2015).....	108
Figure 42: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Teghat Période .....	109
Figure 43: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Teghat (plan des individus) Période (Jan/2014 – Jan/2015).....	110

Figure 44: ACP sur les systèmes karstiques de la Forage N62 Période .....	113
Figure 45: ACP sur les systèmes karstiques de la source Forage N62 (plan des individus) Période (Mai/2004 – Fév/2007) – (Jan/2014 – Jan/2015) .....	113
Figure 46: ACP sur les systèmes karstiques de la source Poirier (Jan/2014 – Jan/2015).....	116
Figure 47: ACP sur les systèmes karstiques de la source Poirier (plan des individus) (Jan/2014 – Jan/2015) .....	116
Figure 48: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ronde (Mai/2004 – Fév /2007).....	118
Figure 49: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ronde (plan des individus) (Mai/2004 – Février /2007).....	119
Figure 50: Représentation du système karstique avec les différents .....	123
Figure 51: Schéma de l'hydrosystème karstique .....	124
Figure 52: Relation indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) et pression partielle de CO <sub>2</sub> (pCO <sub>2</sub> ) dans les systèmes karstiques des Monts de Saïda .....	132
Figure 53: Evolutions de la saturation dans les eaux d'Ain Zerga (2004-2007), (2014).....	135
Figure 54: Evolutions de la saturation dans les eaux Source Poirier.....	136
Figure 55: Evolutions de la saturation dans les eaux du Forage N62.....	139
Figure 56: Evolutions de la saturation dans les eaux de la source Ain Teghat .....	140
Figure 57: Comparaison des évolutions en bicarbonates dans.....	142
Figure 58: Comparaison des évolutions en Chlorures dans .....	143
Figure 59: Relation magnésium-calcium dans les différents aquifères carbonatés dans les Monts de Saïda .....	145
Figure 60: Evolution des teneurs en Mg en fonction des teneurs en Ca .....	146
Figure 61: Relation entre les teneurs en Ca en fonction des teneurs en HCO <sub>3</sub> des eaux karstiques des Monts de Saïda.....	147
Figure 62: Evolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium des eaux karstiques des Monts de Saïda.....	149
Figure 63: Evolution des teneurs en chlore en fonction des teneurs en sodium des eaux karstiques des Monts de Saïda.....	150
Figure 64: Relation Ca + Mg avec le bicarbonate des eaux souterraines (meq/l). .....	151
Figure 65: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de la source Ain Zerga.....	155
Figure 66: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de Forage N62 (2004-2007).....	157
Figure 67: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de la source Ronde (2004-2007) .....	159
Figure 68: Découpage des années 2013- 2014 en période sèche et humide .....	161
Figure 69: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de Forage N62 .....	164
Figure 70: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Ain Zerga .....	166
Figure 71: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Poirier .....	168
Figure 72: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Ain Teghat .....	169
Figure 73: Variation des indicateurs.....	171
Figure 74: Variation des indicateurs.....	172
Figure 75: Catalogue de référence de distribution de la conductivité .....	173
Figure 76: Distribution des fréquences des conductivités de Forage N62.....	174
Figure 77: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ain Zerga.....	175
Figure 78: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ronde .....	175
Figure 79: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ain Teghat .....	176
Figure 80: le nombre de pic des variations des éléments hydrochimiques durant la période pluviométrique 2013-2014 de la source Ain Zerga .....	177
Figure 81: le nombre de pic des variations des éléments hydrochimiques durant la période pluviométrique 2013-2014 de Forage N62 .....	179
Figure 82: Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines (mg/l).....	184
Figure 83: Relation entre chlorure et nitrate des eaux (mg/l) .....	185
Figure 84: Relation Na+K et nitrate des eaux souterraines (meq/l). .....	186
Figure 85: la variation de la teneur en Nitrate (2014) .....	190
Figure 86: La variation des teneurs en Nitrate en fonction de la pluviométrie (2014).....	191
Figure 87: La variation des sulfates en fonction de la pluviométrie (2014) .....	194

## Liste des tableaux

Tableau 1: Evolution de la surface agricole dans la wilaya de Saïda. (DSA) .....	24
Tableau 2: Evolution de la surface agricole dans la wilaya de Saïda.(DSA) .....	24
Tableau 3: Caractéristiques des stations utilisées .....	27
Tableau 4: Précipitation moyennes mensuelles [mm] .....	28
Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles des Stations de la zone d'étude .....	29
Tableau 6: vitesse moyenne mensuelle de vent de la station de Saïda (m/s) .....	32
Tableau 7: Température moyenne mensuelle en °C (1960-2014).....	33
Tableau 8: Dénomination des points d'eau.....	65
Tableau 9: caractéristiques des sources karstiques suivies et comparatif des moyennes de températures avec les valeurs calculées à partir des différents gradients .....	73
Tableau 10: Caractéristiques thermiques et hydrodynamiques des systèmes étudiés .....	74
Tableau 11: Evolution de la température dans le système Karstiques de la source Ronde dans les Monts de Saïda (période : 2004 – 2014) .....	91
Tableau 12: Synthèse des données chimiques des eaux des sources .....	93
Tableau 13: Synthèse des rapports des données chimiques .....	94
Tableau 14: Corrélations entre les variables et les facteurs .....	106
Tableau 15: Corrélations entre les variables et les facteurs .....	109
Tableau 16: Corrélations entre les variables et les facteurs .....	112
Tableau 17: Corrélations entre les variables et les facteurs .....	115
Tableau 18: Corrélations entre les variables et les facteurs .....	117
Tableau 19: Calcul du nombre de pic de réponse.....	178
Tableau 20: Le nombre de pics de réponse.....	180
Tableau 21: Evolution du cheptel (DSA ; Direction des Services agricole).....	187
Tableau 22: Evolution des surfaces agricoles durant la période : 2000-2015 (DSA).....	188
Tableau 23: Utilisation des engrais par type de spéculation dominante .....	188
Tableau 24: Norme de potabilité chimique des ions majeurs (mg/l).....	189
Tableau 25: Variation des nitrates des eaux karstiques des Monts de Saïda .....	190
Tableau 26: la variation des teneurs en nitrate avec le taux de cheptel et la surface.....	192
Tableau 27: Variation des sulfates des eaux karstiques des Monts de Saïda .....	193
Tableau 28: Variation des chlorures des eaux karstiques des Monts de Saïda .....	195

## **Introduction Générale**

Les problèmes abordés dans la présente étude concernant l'hydrogéologie karstique, celle-ci ne peut être envisagée sans une bonne connaissance du milieu lui-même. Or, avec le karst apparaissent d'emblée des difficultés, car ce milieu est complexe, souvent décrit et interprété en fonction d'une approche morphologique plus que hydrogéologique. Pourtant, connaître le karst implique que l'on possède une notion exacte des circulations qui l'affectent.

Ici, et bien que cela ne soit pas vrai dans l'absolu, nous confondrons régions karstiques et régions carbonatées. Soulignons cependant que toutes les roches carbonatées ne présentent pas forcément le même degré de karstification. (A. Mangin ; 1975)

Les aquifères karstiques se distinguent des autres aquifères par leur complexité structurale, hydrodynamique et hydrochimique. L'hétérogénéité spatio-temporelle des données climatiques d'entrées et du système karstique causent des processus d'écoulement non-linéaires, difficiles à modéliser. De plus, ces processus diffèrent selon qu'ils interviennent dans la zone vadose (constituée du sol, de l'épikarst et de la zone non saturée) ou dans la zone saturée.

Les Monts de Saïda sont des massifs de nature karstique constituée de roches carbonatées, calcaréo-dolomitiques d'âge Jurassique moyen (Aaléno-Bajo-Bathonien). L'aquifère est alimentée par les précipitations et un réseau hydrographique temporaire et dense. Les Monts de Saïda représentent un château d'eau très important pour le Nord-Ouest Algérien. Elles soutiennent le quasi totalité de l'approvisionnement en eau potable de la région et par sa position géographique et sa richesse naturelle (eaux minérales).

Ces eaux sont contrôlées qualitativement et quantitativement aux niveaux des principales émergences. Cette nappe souffre actuellement d'une dégradation notable, qui est engendrée par la surexploitation et l'utilisation abusive des engrais agricoles. La mise en protection de cette ressource devrait passer par l'évaluation des zones vulnérables et l'installation des périmètres de protections (Jean-Joel. Gril, N. Carluer et G. Le Hénaff., 2011 ; S. Fass et J.-C. Block., 2014).

La zone non saturée joue un rôle crucial dans la dynamique des aquifères karstiques, même si le fonctionnement de cette zone est encore mal compris. Le manque d'accès direct à la zone non saturée, autres que les cavités spéléologiques, dans lesquelles les réseaux d'écoulements sont déjà structurés, rend difficile la caractérisation de l'ensemble des processus hydrodynamiques et hydrochimiques qui s'établissent dans cette zone. Cette caractérisation est généralement effectuée de façon indirecte, par des convolutions hydrodynamiques et hydrochimiques des mesures réalisées aux exutoires. Depuis deux décennies, ce genre d'approche a permis un réel progrès dans la compréhension du fonctionnement de la zone non saturée.

Ce travail repose sur l'analyse de 4 années de chroniques hydrochimiques, obtenues directement au sein de la zone non saturée à travers différentes émergences durant des périodes climatiques contrastées. Entre 2004 jusqu'à 2006 et l'année 2014 les écoulements ont été suivis et caractérisés au niveau de 05 points d'écoulements répartis sur la surface des Monts de Saïda.

Le présent document développe l'aspect scientifique de cette étude et permet d'apporter une validation originale à l'utilisation des traceurs géochimiques dans le domaine des karsts du Nord-Ouest d'Algérie (climat semi-aride à aride). Il proposera un schéma de vulnérabilité à la pollution de la ressource en eau souterraine à l'attention des collectivités de la région.

L'objectif de ce travail est de caractériser le fonctionnement de la zone non saturée du karst : la répartition spatiale des écoulements et leurs activations sont-elles influencées par la géologie locale? Les écoulements rencontrés peuvent-ils être différenciés et caractérisés de façon hydrodynamique, hydrochimique et/ou par couplage de ces deux approches ?

Pour répondre à ces problématiques, ce travail s'appuie sur l'analyse individuelle, puis croisée, des données pluviométriques, hydrodynamiques et hydrochimiques. La finalité de ce travail est de proposer un schéma conceptuel du fonctionnement de la zone non saturée qui soit le plus générique possible. Ce schéma s'inscrit dans une démarche de caractérisation des processus hydrodynamiques et hydrochimiques qui s'établissent au sein de la zone non saturée.

Compte tenu des objectifs de notre étude, nous avons choisi de présenter ce mémoire en trois parties.

La première partie est essentiellement consacrée à une présentation du contexte physique, morphologique, climatique, géologique et hydrogéologique de la région d'étude.

La deuxième partie de cette étude est consacrée à un rappel des particularités du milieu karstique et des principales approches hydrodynamiques et hydrochimiques utilisées pour caractériser les compartiments karstiques. Les caractéristiques du site d'étude, ainsi que les méthodes d'analyses mises en œuvre sont également présentées.

La dernière partie présente la vulnérabilité du système, l'analyse croisée des données et la synthèse de ces études.

**Première partie : Caractéristiques physiques,  
géologiques et hydrogéologiques de la région d'étude**

## **Chapitre I : Caractéristiques physiques**

## 1. Présentation de la zone d'étude

## 2. Situation géographique

Les Monts de Saïda font partie de la région Hauts Plateaux du Nord-Ouest Algérien, limitées au Sud par les Hautes Plaines Oranaises (la dépression de Chott Chergui), au Nord par les Monts de Sidi Kada et de la Mina, à l'Ouest par les Monts de Daïa et à l'Est par les Mont de Frenda. (Figure. 1)

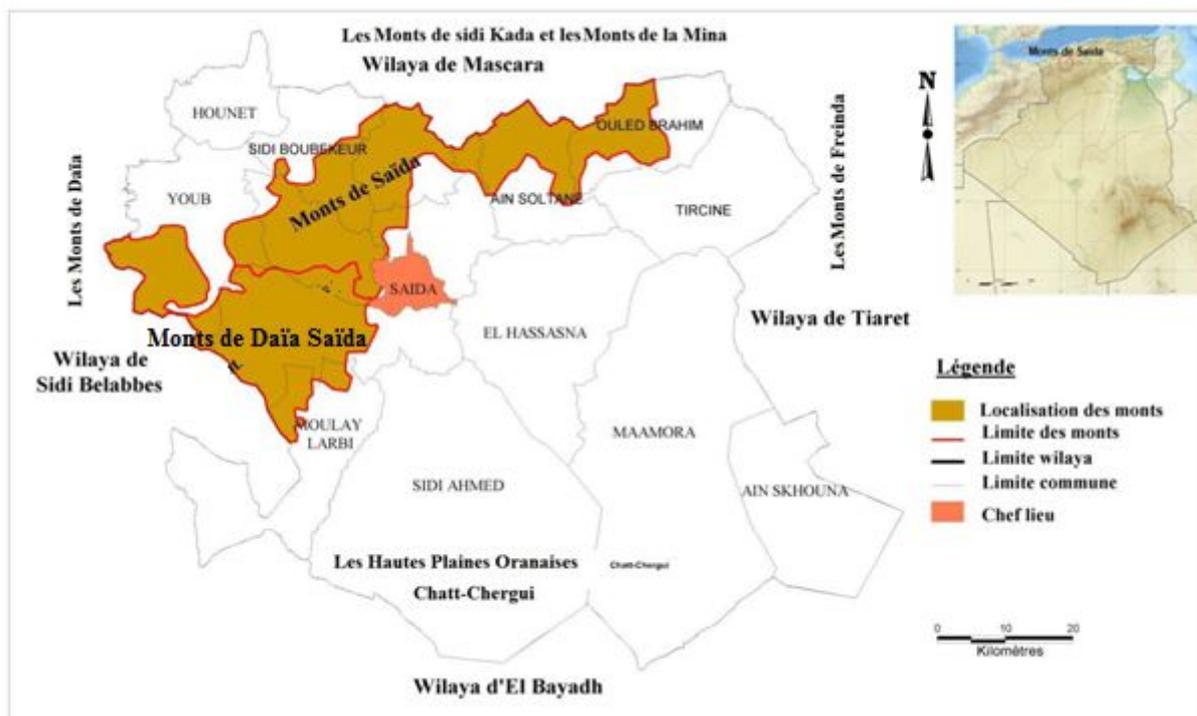


Figure 1: Localisation des Monts de Saïda

## 3. Hydrologie

Il y a pratiquement, à l'Ouest un passage continue des Monts de Daïa aux Monts de Saïda, mais les premiers sont presque exclusivement crétacés, alors que ces derniers sont essentiellement jurassiques. A l'Est de la zone d'étude passe par l'intermédiaire des Monts de Frenda, au Plateau de Sersou, c'est-à-dire aux Hautes Plaines Algéroises. (Fig. 1)

Ainsi définis, les Monts de Saïda forment un quadrilatère limité :

- au Nord, par les assises tertiaires des Monts de la Mina et les Monts de Sidi Kada ;
- à l'Ouest, par le haut cours de l'Oued Saïda, l'Oued Berbour et la partie moyenne de l'Oued Falette suivant le méridien 0°,
- au Sud, par les derniers affleurements jurassiques bordant la dépression du chott Chergui allant de Khalfallah à l'anticlinal d'Et Touil,

➤ à l'Est, par les plateaux constituant les Monts de Frenda : Kef de Aïn el Hadid et les plateaux de la rive droite de l'Oued Et Taht (W. Tiaret).

### 3.1. Délimitations hydrographiques

Avec une superficie planimétrique de 2134 Km<sup>2</sup>, le grand bassin des Monts de Saïda se compose essentiellement, selon les délimitations hydrographiques en trois sous bassins contrôlés par les principales stations hydrométriques. (Figure. 2)

- \* La station PK 50 sur oued Saïda ;
- \* La station de Tiffrit sur O. Tiffrit ;
- \* La station de S. Mimoune sur O. S. Mimoune.

Oued Saïda conserve sa pérennité relative durant presque toute l'année. Enrichi par les eaux des sources karstiques, ces cours d'eau sont caractérisés par des débits assez irréguliers au cours de l'année, les étiages peuvent atteindre des débits de l'ordre de 0,12 m<sup>3</sup>/s; L'alimentation importante et permanente de l'oued El Hammam est assurée en grande partie par ses trois affluents.

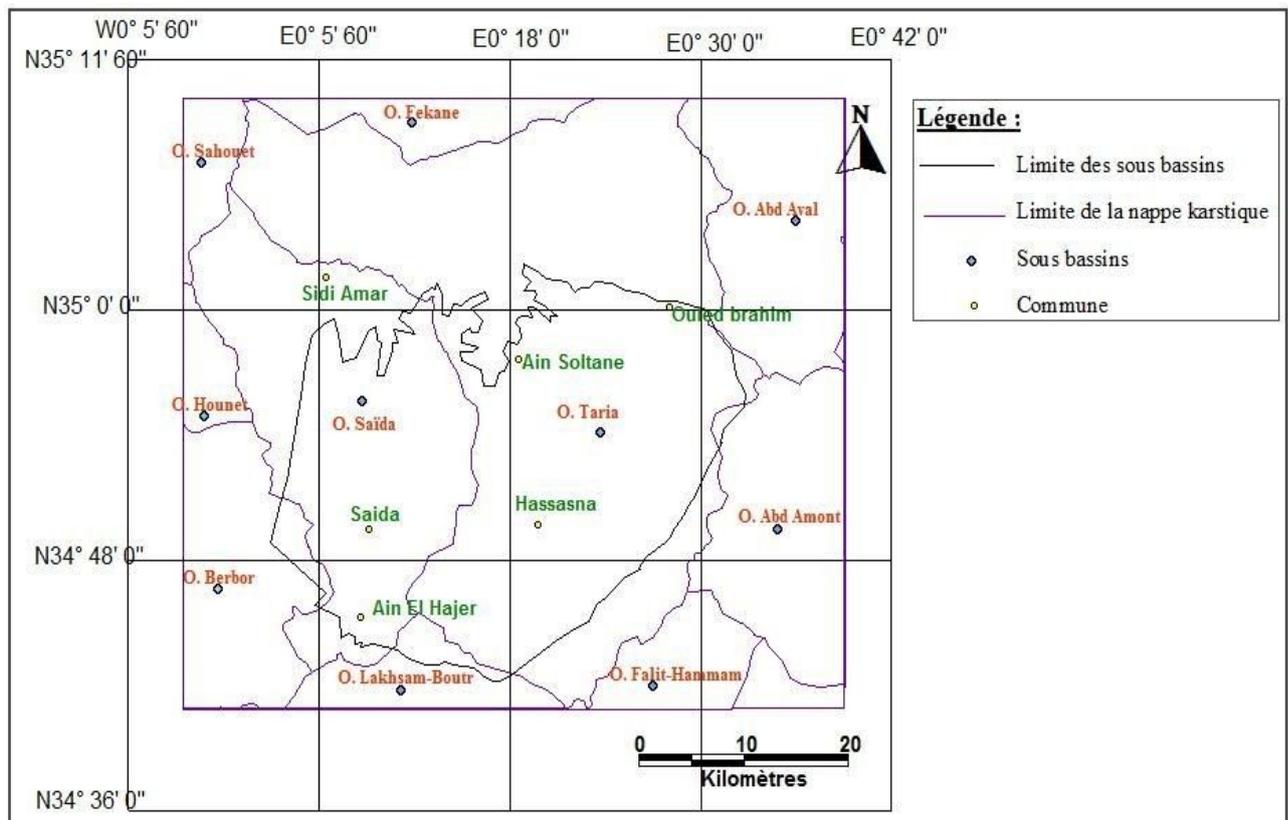


Figure 2: Les sous bassins hydrologiques

### 3.2. Relief

Le relief joue un rôle déterminant dans la définition de l'aptitude au ruissellement. Notre zone d'étude englobe l'Oued Saïda. Le périmètre part du plateau de Ain Sultane s'étant à la quasi-totalité du plateau des Hassasnas jusqu'à Djebel Sidi Youssef au Sud-Est et la plaine de Maâlif au Sud-Ouest. Cette vallée présente un relief assez diversifié de (03) trois zones géomorphologiques distinctes :

#### a) Zones montagneuses :

Elles sont formées essentiellement par la chaîne de Djebel Sidi Youssef d'une altitude de 1338 m et d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est et des rives gauches et droites de la vallée de Saïda et du massif de Djebel Khenifer d'une altitude de 1246 m.

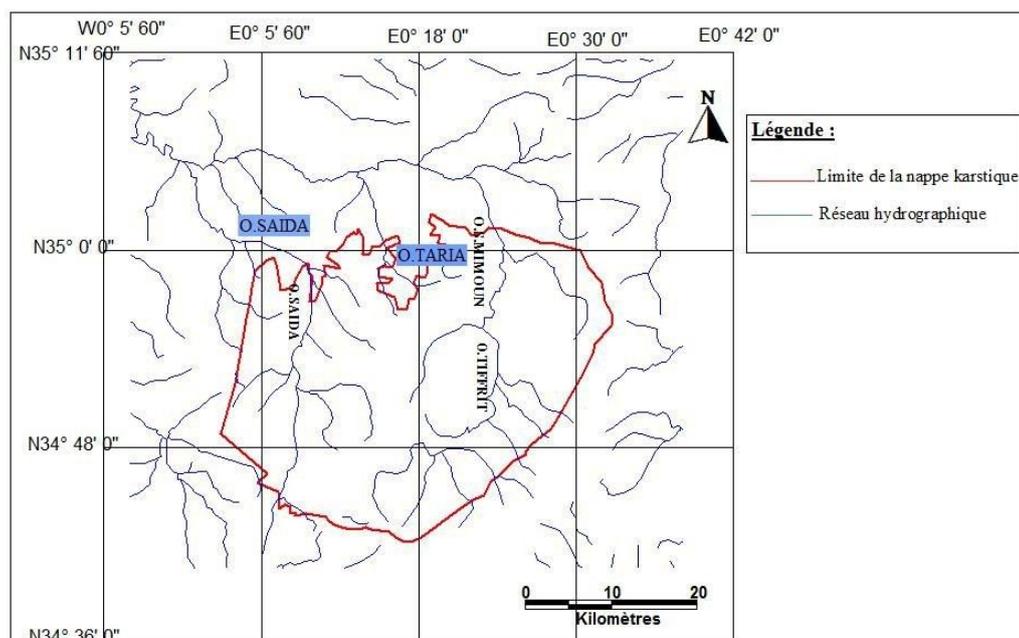
#### b) Zone des plateaux

Elle englobe les plateaux d'Ain Sultane et de Tidernatine, les plaines d'Oum-Djrane et de Tamesna.

#### c) La vallée de Oued Saïda.

La vallée de l'Oued Saïda est d'orientation Sud-Nord et d'une altitude de 800 m (hormis la partie la plus au Nord orientée Sud-Est/Nord-Ouest).

Le coefficient de compacité  $K_c$  est de 1,21. Le bassin versant des Monts de Saïda est de type modérément allongé et exodique. La topologie est marquée par un pic de 1338 m et une altitude minimale de 447 m, ce qui génère un ruissellement important.



### **Figure 3: Présentation du réseau**

#### **4. hydrographique**

Le chevelu hydrographique tout en état assez bien hiérarchisé représente un profil en long du cours principal long de 80 Km, avec des pentes très fortes comportant des cassures dues surtout à la lithologie du terrain donnant naissance à des cascades caractérisant les Monts de Saïda (région de Tiffrite) (Figure. 3).

##### **4.1. Ressources en eau superficielle**

La mobilisation des eaux superficielles n'a pu être effectuée d'une manière conséquente en raison de la structure du réseau hydrographique dont les principaux écoulements contribuent à l'alimentation des barrages situés à l'aval (triplex de Mascara et Sidi M'hamed Bénaouda de Rélizane).

Seules 11 petites retenues collinaires ont été réalisées durant des années 1980 pour un volume global de  $0.42 \text{ hm}^3$  / an et dont seules 02 sont en état de conservation pour une capacité globale de  $90.000 \text{ m}^3$ .

#### **5. Occupation du sol**

##### **5.1. Sols et végétation**

Les sols du bassin des Monts de Saïda sont composés de quatre grands ensembles :

- les terres alluvionnaires qui recouvrent les basses terrasses et les lits majeurs des oueds,
- les terres caillouteuses aux piémonts des Monts de Saïda,
- les terres rouges à encroûtement, localisées dans les plaines d'Oum Djerane et de Tamesna.

La végétation est un facteur déterminant de la rapidité du ruissellement superficiel, du taux d'évaporation et de la capacité de rétention du bassin : cette consistance joue un rôle régulateur dans le régime d'écoulement qui aura une influence directe sur l'écoulement fluvial aussi bien sur les facteurs orographiques que climatiques. La résistance à l'écoulement est d'autant plus grande que le couvert végétal est plus dense d'où l'influence de la forêt sur le régime des eaux en domaine méditerranéen.

Le paysage végétal du bassin des Monts de Saïda a été largement dégradé et défriché en montagne par les incendies, par l'agriculture extensive et un surpâturage endémique, ce qui a entraîné une perte d'eau par évaporation et une accélération de l'érosion.

Les cultures pratiquées sont dominées par des cultures maraîchères, quelques vergers d'agrumes et d'arbres fruitiers. Les forêts, les maquis et les broussailles occupent pratiquement toute la bande des Monts de Saïda.

Pour la distribution du couvert végétal de bassin, nous avons rassemblé et classé les diverses formes de culture de la façon suivante (Figure. 4) :

**- Cultures extensives :**

Elles rassemblent toutes les cultures annuelles telles que les céréalicultures, les cultures maraîchères et l'association entre l'arboriculture et le maraîchage.

**- Couvert forestier normal :**

Représenté essentiellement par les forêts et les maquis denses n'ayant subis aucune dégradation que ce soit par l'action de l'homme (pâturage sauvage, déboisement) ou par l'effet des incendies.

**- Arboriculture :**

Représentée principalement par les vignobles, l'olivieraie, les agrumes et vergers en quantité inférieure. (Tableau. 1).

**Tableau 1: Evolution de la surface agricole dans la wilaya de Saïda. (DSA)**

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Arboricole	3100	3 276	3300	4200	5838,6	6221,6	6493,1	6 536,1
cult herbacés	129846	128817	121183	112399	115010	117932	115878	116137
<b>Total</b>	<b>132946</b>	<b>128806</b>	<b>121513</b>	<b>116599</b>	<b>120848,6</b>	<b>124153,6</b>	<b>122371,1</b>	<b>122673,1</b>
Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Arboricole	6 570,5	6 645,5	6 378,5	6 173,5	5 844,5	5 786,0	6 064,0	136517
cult herbacés	120707	122077	123277	124477	125977	127796	129073	6 064,0
<b>Total</b>	<b>109277,5</b>	<b>128722,5</b>	<b>129655,5</b>	<b>130650,5</b>	<b>131821,5</b>	<b>133582</b>	<b>135137</b>	<b>130453</b>

**Tableau 2: Evolution de la surface agricole dans la wilaya de Saïda.(DSA)**

Communes	Superficie (Ha)	Typologie
Hounet	225860	Agro-sylvo-pastorale
Sidi Amar		
Doui Thabet		
Ain Soltane		
Ouled Brahim		
Tircine		
El Hassasna	40668	Agro-sylvicole
<b>Ain El Hadjar</b>		
Youb	151660	Agro-pastorale
Sidi Boubaker		
Ouled Khaled		
Saïda		
Sidi Ahmed	245700	Parcours steppiques
Moulay Larbi		
Mâamoura		
Ain Skhouna		

- **Couvert mort :**

Sont désignés par ce terme tous les terrains sur lesquels n'est présente aucune forme de végétation ou de culture utilisable, rendu nu par l'érosion ou par d'autres formes de dégradation.

- **Prairies et terrains de passage :**

Représentés par les surfaces qui sont utilisées pour la plupart en pâturage direct des animaux, les terres occupées par l'alfa et la lavande (Tableau. 2).

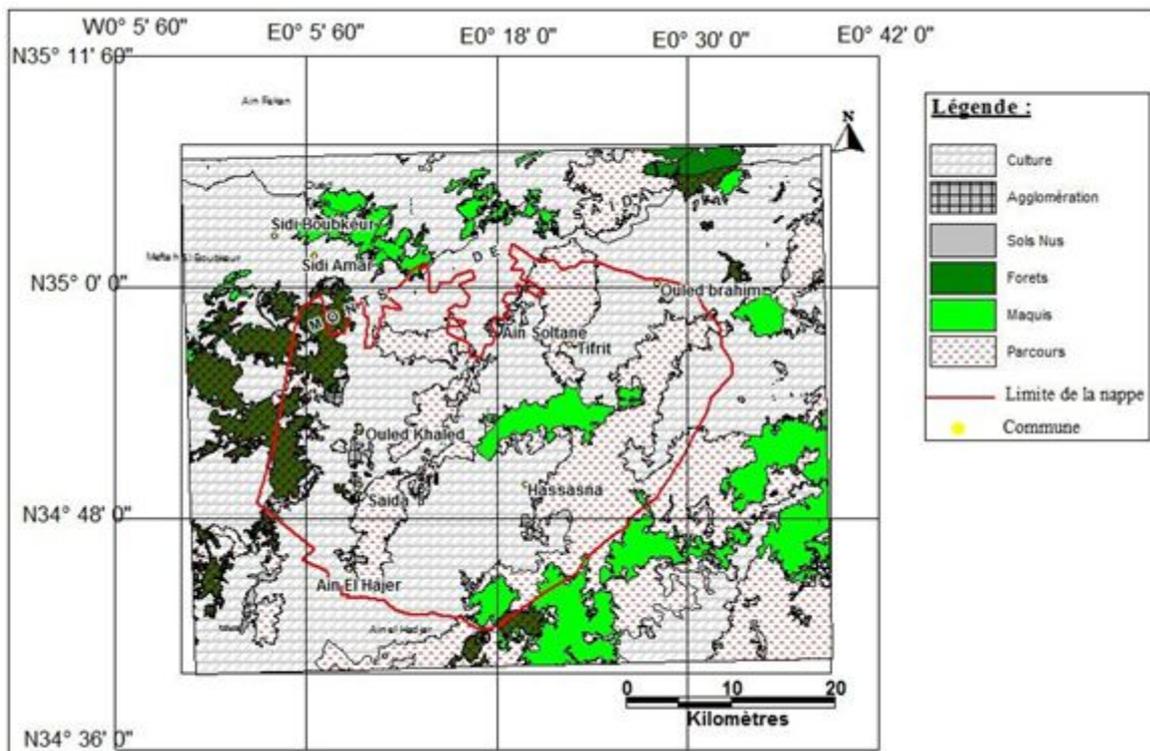


Figure 4: cartes d'occupation du sol du bassin versant d'Oued Saïda

**5.2. Le cheptel :**

La composition des troupeaux montre une prédominance écrasante du petit bétail, plus particulièrement des ovins qui occupent environ 90% des effectifs, suivie par les caprins et les bovins. (Figure. 5)

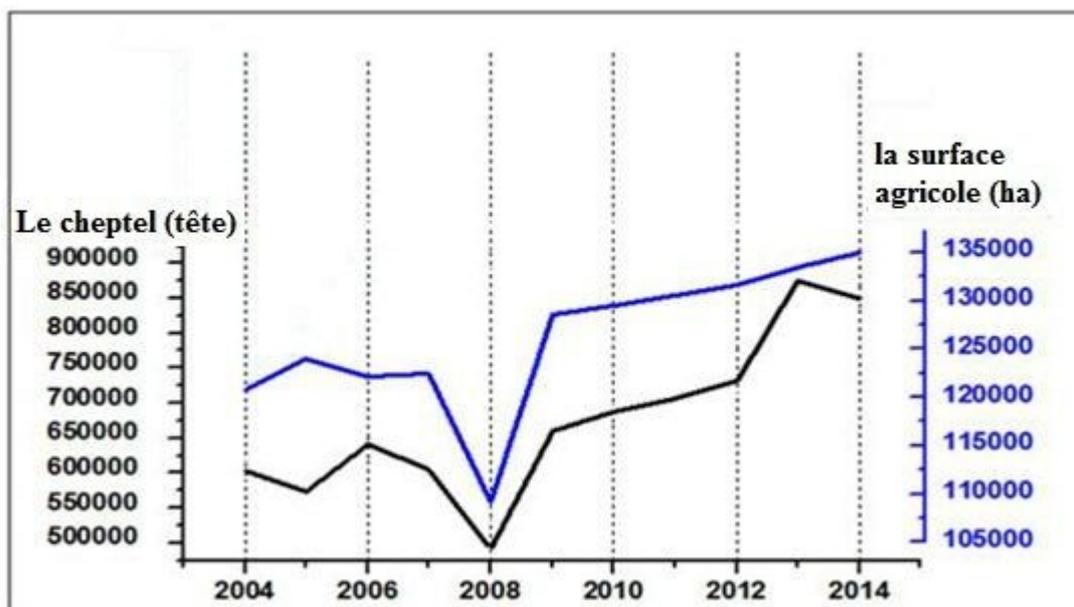


Figure 5: Evolution des cheptels et la surface agricole dans la wilaya de Saïda. (DSA)

## 6 Le Climat de la zone d'étude

### 6.1. Introduction

Qu'il s'agisse d'une approche hydrologique, hydrogéologique ou hydrochimique, la connaissance précise des précipitations et de l'évaporation constitue un préalable indispensable à l'étude du fonctionnement d'un système hydrologique et à l'évaluation de l'alimentation de ses réserves souterraines.

Plus encore que les facteurs orohydrographiques, morphologiques, lithologiques, et biogéographiques, les conditions climatiques du bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau : ce sont les précipitations qui constituent le référent essentiel influençant le régime d'écoulement par leur intervention sous forme de :

- Hauteur totale annuelle pour déterminer l'abondance fluviale ;
- Répartition mensuelle et saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques au sens strict ;
- Totaux journaliers et surtout les averses génératrices des crues.

### 6.2. Le réseau pluviométrique de la zone d'étude

L'étude climatologique porte sur les données enregistrées sur cinq stations du 1er septembre 1960 au 31 août 2014. Dans cette partie, on se propose de :

- Reconnaître les distributions spatiales et interannuelles des précipitations,
- Analyser les températures et l'évapotranspiration potentielle.

Le réseau pluviométrique de la région de Saida et parmi des plus anciens. Il est constitué des principales stations suivantes : Saida, Ain El Hadjar, Ain Balloul, Oum El Djerane, Ain Sultane.

### **6.3. Equipement du bassin et difficultés**

Les cinq stations pluviométriques citées ont servi pour l'étude des précipitations. Cependant, vu l'étendue du bassin 2134 km<sup>2</sup>, ce nombre s'avère très insuffisant surtout pour des régions montagneuses, d'autant plus que ces stations sont essentiellement implantées à basse altitude. Il existe d'autres stations surtout pluviométriques qui n'ont pas été retenues en raison de la non disponibilité de données mais aussi de leurs lacunes. Le tableau 3 résume les caractéristiques des cinq stations :

**Tableau 3: Caractéristiques des stations utilisées**

Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période
Saida	00° 09'E	34° 52'N	750	1960-2014
Ain El Hadjar	00° 09'E	34° 54'N	1003	1960-2014
Ain Balloul	00° 48'E	34° 99'N	1017	1960-2014
Oum El Djerane	00° 32'E	34° 54'N	1077	1960-2014
Ain sultane	00° 12'E	34° 80'N	1010	1960-2014

### **6.4. Collecte des données pluviométriques et leur présentation**

Toutes les données climatiques (précipitation, température, vent, humidité) ont été recueillies à leur état brut auprès de l'Office National de la Météorologie Régionale d'Oran. Ces stations étaient toutes défaillantes (avec des données manquantes) sauf celle de Saida qui dispose de données depuis 1961.

#### **1.1.1. Les précipitations moyennes mensuelles et régimes saisonniers**

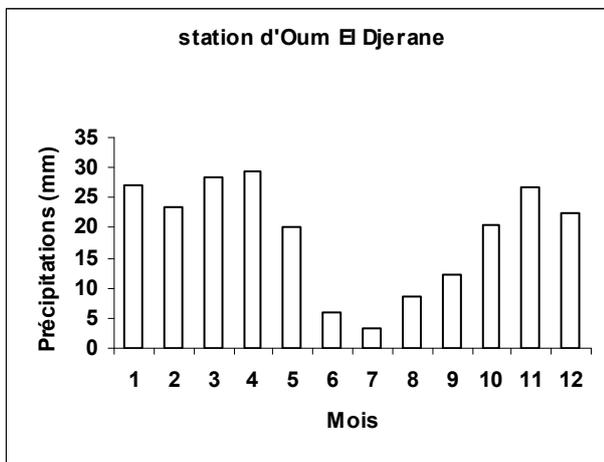
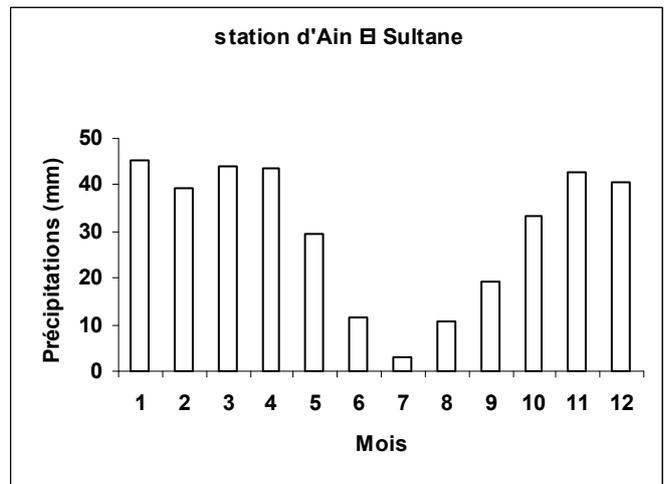
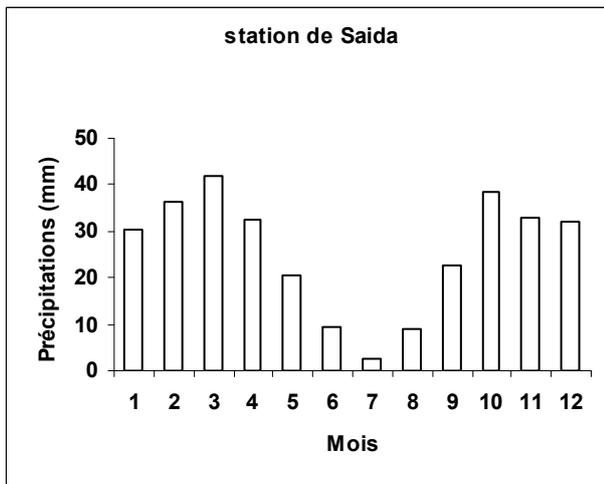
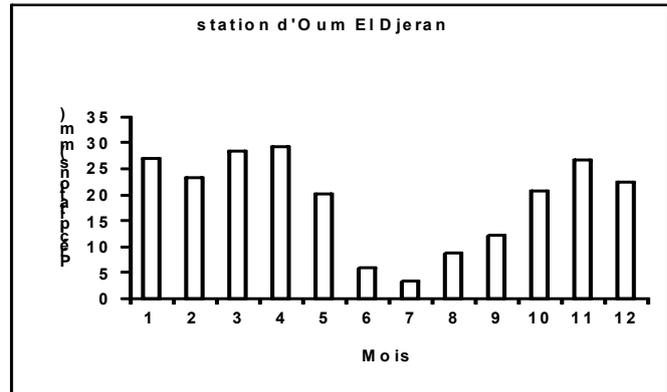
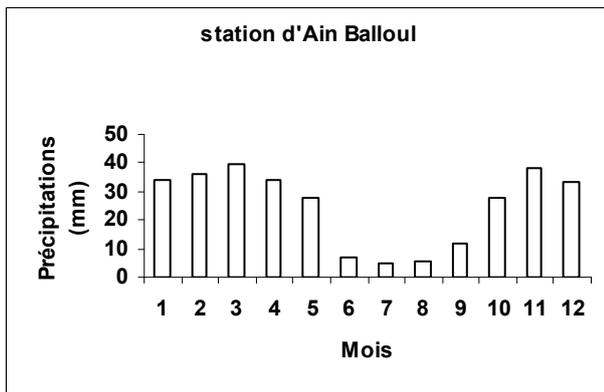
Le régime saisonnier, des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères, sont conditionnés en grande partie par la répartition mensuelle des pluies et leurs variations au cours de l'année où l'intérêt de la connaissance de cette répartition caractéristique des saisons. Le tableau 4 regroupe les moyennes mensuelles des précipitations au niveau du bassin.

La figure 6 nous montre l'évolution des précipitations mensuelle durant les mois de l'année et nous permet de constater que :

- La période pluviale s'étale de Décembre jusqu'à Avril ;
- La période sèche s'étale de Mai jusqu'à Septembre.

**Tableau 4: Précipitation moyennes mensuelles [mm]**

Station	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Période
AIN HADJAR	16,5	29	35,9	51,2	40,4	38,4	42,1	35,4	25,6	10,6	4,9	6,6	1973-2014
SAIDA	22,5	38,4	32,9	32,2	30,4	36,4	41,8	32,6	20,3	9,6	2,6	9	1973-2014
SYNDICAT	19,7	30,8	32,7	36,2	40,2	34,1	40,9	34,8	27,4	8,2	4,6	8,5	1973-2014
AIN ZERGA	18,6	33,2	33,5	36,7	31,9	37,6	43,1	34,6	30,7	8,7	4,8	9,7	1973-2014
O DJERANE	12,3	20,6	26,8	22,4	27	23,4	28,5	29,3	20,1	5,9	3,3	8,7	1973-2014
BALLOUL	11,6	28,1	37,9	33	34,2	36	39,9	34,1	28	6,7	4,9	5,4	1973-2014
AIN TIFFRIT	21	31,5	37,4	38,4	43,3	34,8	42,7	41,8	32,8	12,6	3,1	9,9	1973-2014
AIN SULTANE	19,2	33,3	42,9	40,5	45,2	39,3	43,9	43,5	29,5	11,7		10,7	1973-2014



**Figure 6: Précipitations moyennes mensuelles des Stations de la zone d'étude (1973-2015)**

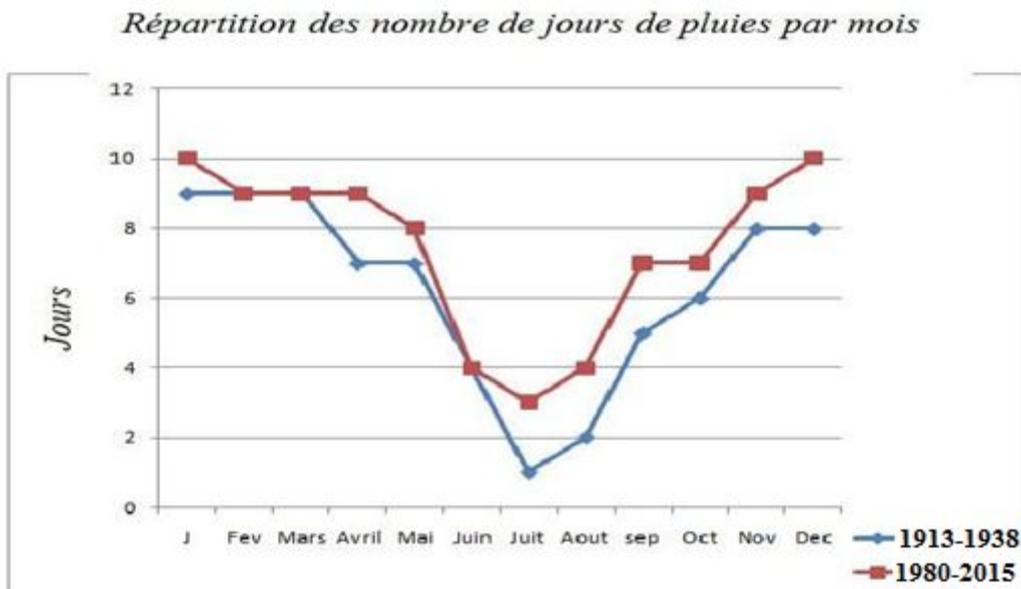
### 1.1.2. Précipitations saisonnières

On peut y constater que l'Hiver est la saison la plus pluvieuse par contre l'Eté est la saison la plus sèche ce qui est caractéristique d'un climat semi-aride.

- Nombre de jours de pluies : le nombre de jours de pluies est un paramètre important pour comprendre le mode de répartition et de chutes des pluies, des données climatiques en conclue que le nombre de jours de pluie y est très faible pour les deux périodes ; il était de 75 J/an pour la période 1913-1938 pour passé a 89 J/an pour la période 1980-20115 (Tableau. 5 et figure.7)

**Tableau 5: Précipitations moyennes mensuelles des Stations de la zone d'étude**

Saisons Station	Automne (S. O. N)	Hiver (D. J. F)	Printemps (M. A. M)	Eté (J. J. A)
	Pluie [mm]	Pluie [mm]	Pluie [mm]	Pluie [mm]
Saida	93.8	99	94.7	21.2
A.E. Alhadjar	81.4	130	103.1	22.1
A. Balloul	77.6	103.2	102	17
O. E Djerane	59.7	72.8	77.9	17.9
Ain Sultane	95.4	125	116.9	25.4
Moy dans le bassin	81.7	106	98.9	20.7



**Figure 7: Répartition mensuelle du nombre de jours de pluies**

### 1.1.3. Régime pluviométrique et variabilité des précipitations annuelles

Les histogrammes de variation des précipitations mensuelles représentés sur la figure. 8 révèlent des nuances géographiques dans la répartition des pluies au cours de l'année moyenne avec, cependant, une individualisation nette de la saison sèche d'été pour l'ensemble des stations : Juillet, Août, et Juin sont dans l'ordre des mois les plus secs de l'année en valeurs relatives.

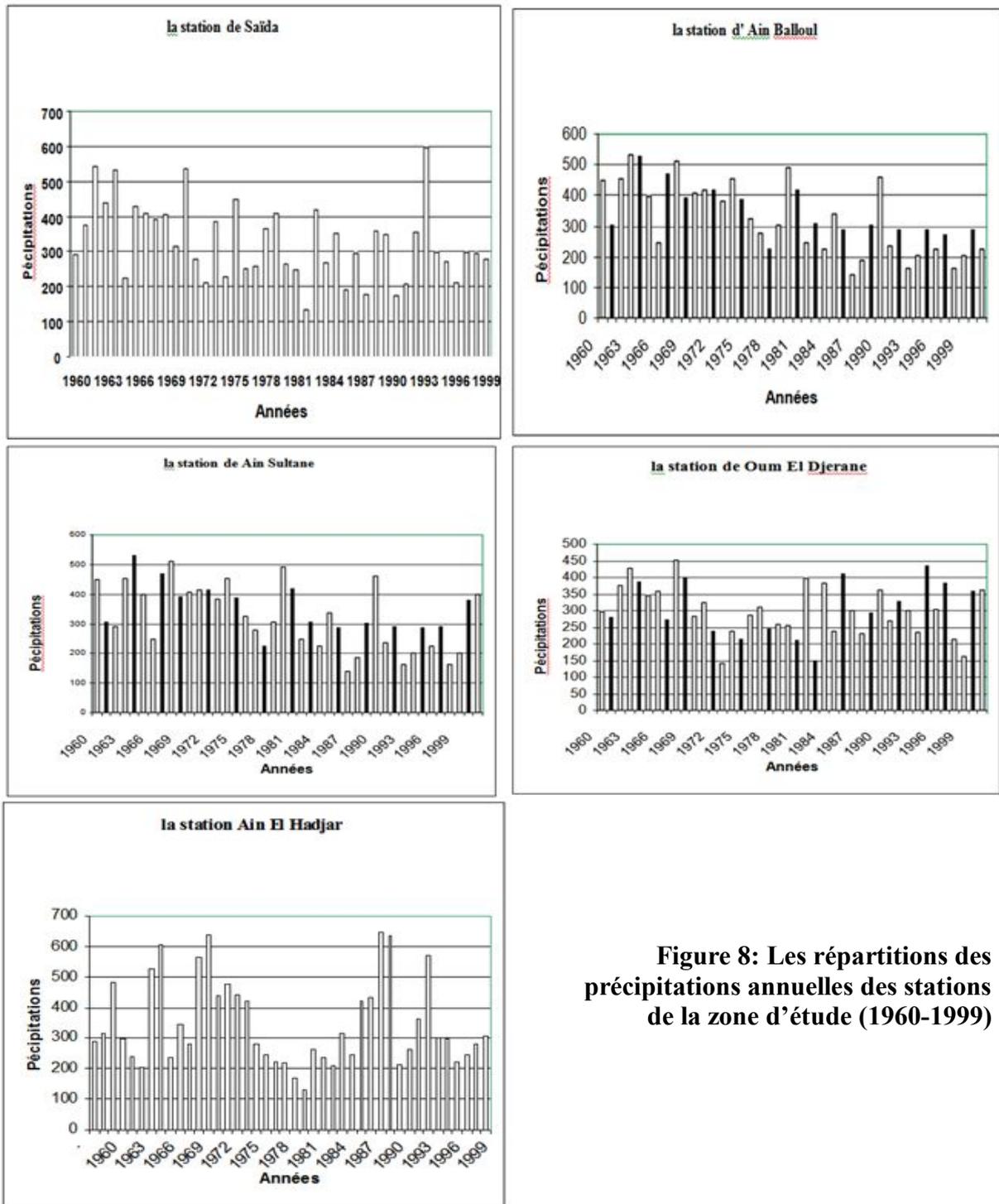
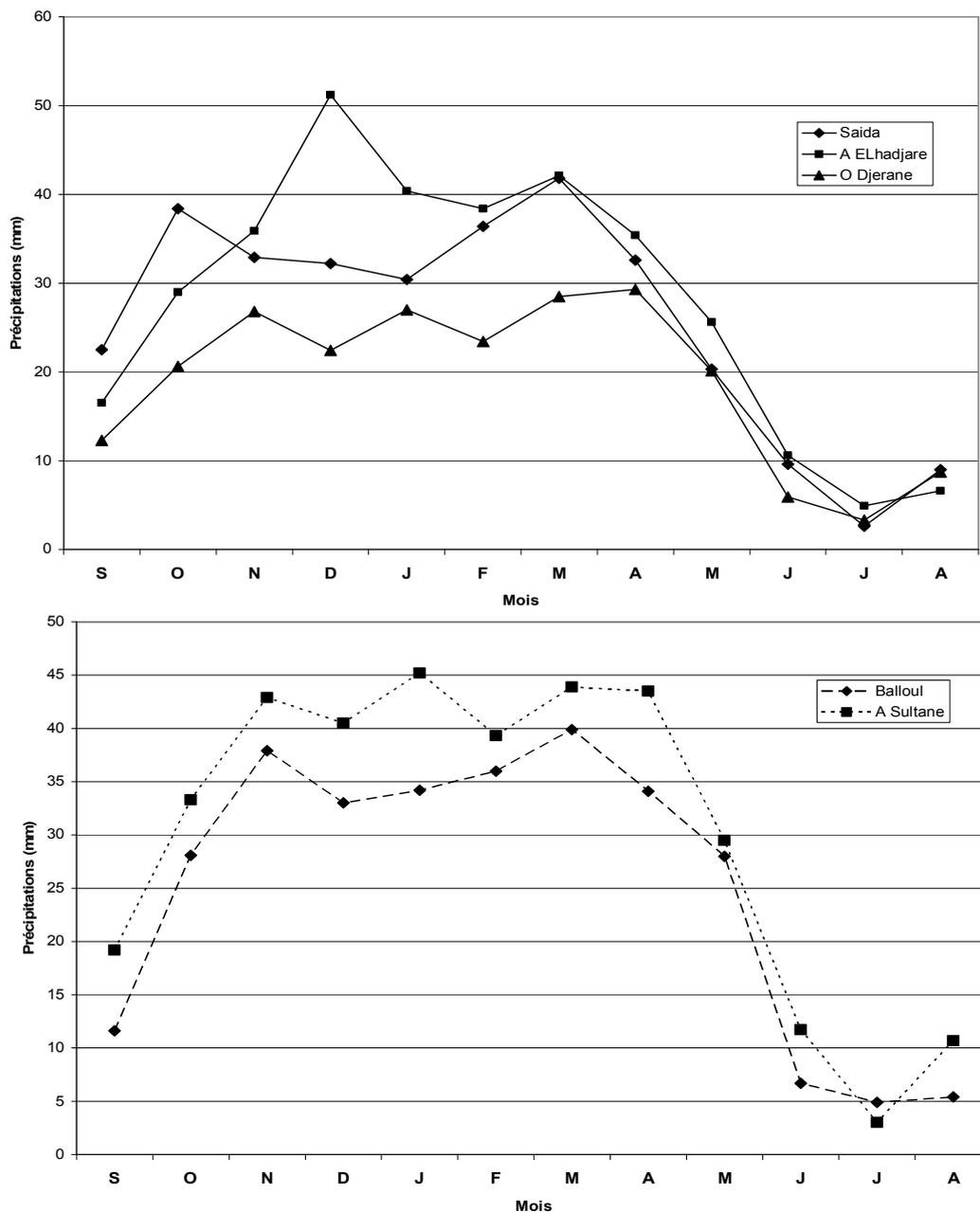


Figure 8: Les répartitions des précipitations annuelles des stations de la zone d'étude (1960-1999)

Cette période de sécheresse peut s'étendre jusqu'au mois de Septembre, notamment au niveau des stations de Ain Balloul et Oum El Djerane.

#### 1.1.4. La variation des précipitations mensuelles

Les fluctuations des précipitations annuelles des 5 stations : Ain El Hadjar, Saïda, Balloul, Ain Sultane Et Oum El Djerane. Les variations des précipitations annuelles pour ces stations concernées sont présentées sur les figures. 9



**Figure 9: la variation des précipitations mensuelles des stations de la zone d'étude (1973-2014)**

**6.5. Les autres facteurs climatiques**

**5.5.1. Les vents**

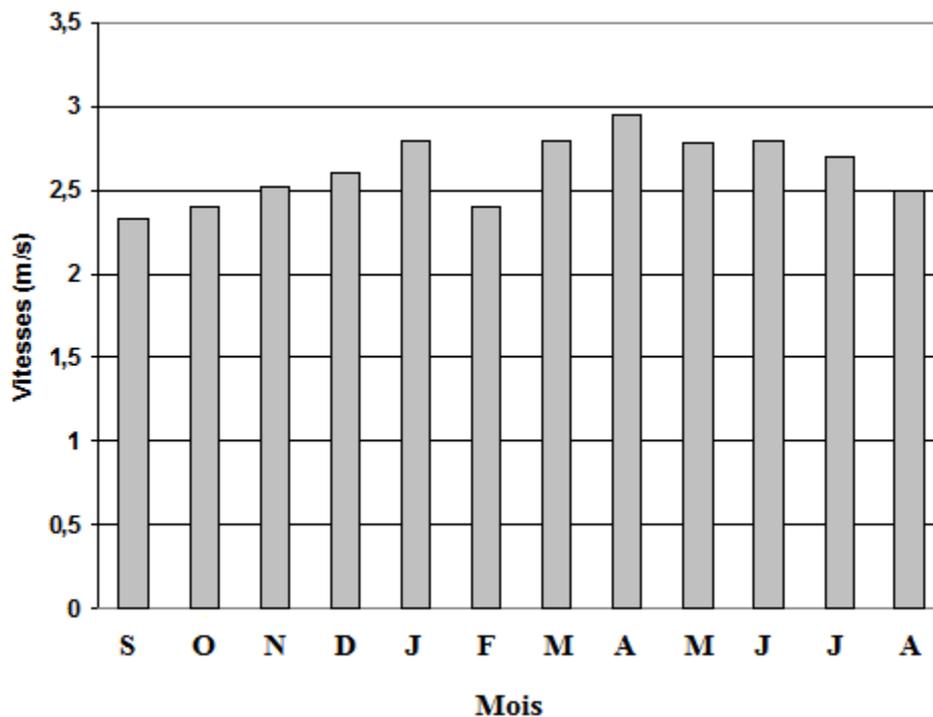
La région de Saïda, comme toutes les régions de l'Ouest de l'Algérie en général et les hauts plateaux en particulier ; est une région ventée surtout pendant la saison hivernale, durant laquelle les vents dominants sont ceux qui soufflent du Nord et Nord-Ouest. Ces types de vents ne sont pas nuisibles, contrairement au Siroco qui souffle du Sud, chargé de poussières et qui provoque des dégâts considérables sur les rendements des cultures, surtout en période printanière et d'Eté.

Le tableau. 6 et la figure. 10 représentent la variation de la vitesse moyenne mensuelle en m/s des vents dans la région de Saïda durant la période 1977-1914.

**Tableau 6: vitesse moyenne mensuelle de vent de la station de Saïda (m/s)**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
V [m/s]	2.33	2.4	2.52	2.6	2.8	2.4	2.8	2.95	2.78	2.8	2.7	2.6

Source : O. N. M. d'Oran



**Figure 10: Histogramme de variation des vitesses moyenne mensuelle du vent dans la région de Saïda (période 1977-1914)**

### 5.5.2. Les températures

La région de Saïda se caractérise principalement par deux périodes bien distinctes (Tableau.7 et Figure. 11) :

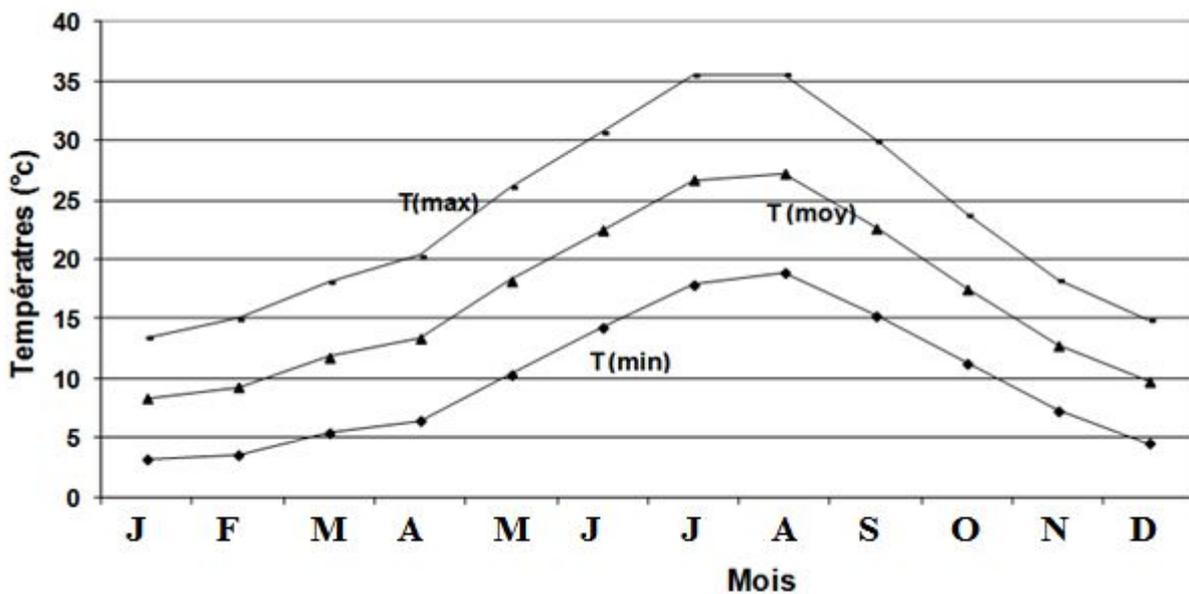
- Une période froide et humide durant laquelle la température moyenne est de 8.5°C et une humidité relative moyenne de 66.4%
- Une seconde période chaude et sèche avec une température moyenne de 27.6°C et une humidité relative moyenne de 37.5%

**Tableau 7: Température moyenne mensuelle en °C (1960-2014)**

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Tmin	15.2	11.3	7.38	4.5	3.5	4.1	5.42	6.8	10.3	14.3	18.1	18.7
Tmax	29.8	23.44	18.04	14.47	13.4	14.95	17.47	19.65	25.1	29.96	35.2	34.56
Tmoy	22.51	17.36	12.68	9.47	8.41	9.49	11.45	13.24	17.7	22.15	26.86	26.88

La température moyenne annuelle = 16.52 °c

Source : O. N. M. d'Oran



**Figure 11: Courbes des variations des Températures dans la région de Saïda (1960-2014)**

### 5.5.3. Le diagramme Ombrothermique de Gaussen:

La figure.12, représente le diagramme Ombrothermique de la région d'étude durant la période 1980-2014 ; où on remarque que :

- La saison sèche couvre les mois de Mai jusqu'à environ début d'octobre soit sur presque 165 jours.
- La saison humide couvre les mois de octobre jusqu'à la fin d'avril

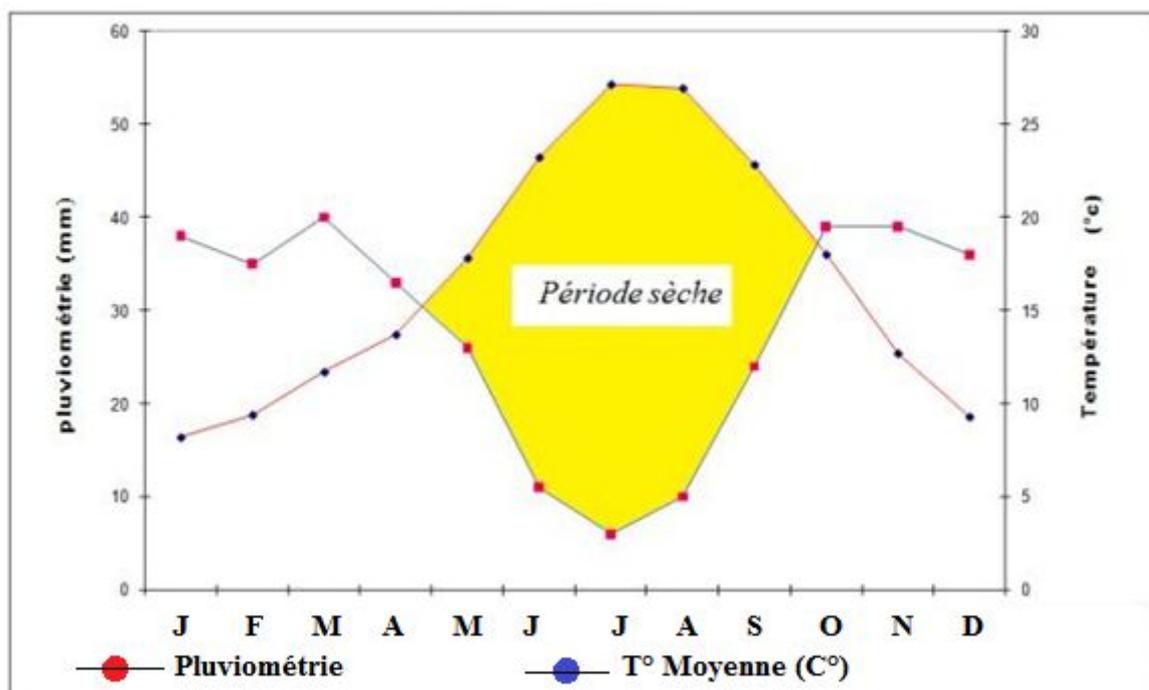


Figure 12: Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson de la région de Saïda (1980-2014)

## 7. Conclusion

Au niveau du secteur d'étude, les précipitations et les températures sont régies par l'altitude et l'exposition des versants.

Les précipitations annuelles sont caractérisées par de grandes irrégularités et un faible nombre de jours de pluie durant des périodes inappropriées.

L'analyse climatologique du bassin nous a permis de revoir tous les paramètres conditionnant le climat, de quantifier et déterminer les facteurs puis de caractériser notre bassin.

Pour ce qui est des précipitations, nous avons constaté que le réseau pluviométrique, malgré son ancienneté, comprenait des stations non fonctionnelles et d'autres défailtantes du point de vue chronologie des relevés. On a remarqué l'irrégularité des précipitations dans le temps et l'espace. La moyenne annuelle est de 327 mm et la période sèche peut atteindre les 5 mois.

La répartition des précipitations mensuelles montre deux grandes saisons bien distinctes. Une saison sèche et chaude qui s'étend du mois de Mai à Octobre, et une saison relativement humide, qui s'étale sur les mois de Novembre à Avril.

Les précipitations se concentrent essentiellement entre Novembre à Avril avec environ 80 % du total annuel.

On relèvera les caractéristiques climatiques suivantes

- Un climat de type semi-aride ;
- Une région ventée avec un vent caractéristique et causeur de dégât (le siroco)
- Des températures souvent élevées en été (près de 35.2 °C en Juillet et Août) pour descendre à des valeurs relativement basses (jusqu'à 3.5°C en Janvier).

Cependant, il faut signaler que ce type de climat n'a pas toujours été stationnaire : il a subi une série de variations cycloniques surtout durant cette dernière décennie. Cela s'est répercuté sur l'apport au réseau hydrographique et la raréfaction de l'eau.

Il faut noter que, les Monts de Saïda orientés WSW-ENE jouent le rôle d'écran qui empêche l'arrivée de toute influence maritime au niveau du bassin.

Enfin, on tient à souligner deux problèmes majeurs et dont la résolution pourrait améliorer les connaissances climatiques du secteur d'étude :

- L'insuffisance du nombre de stations vu la superficie du bassin versant,
- L'absence totale des stations au niveau en hautes altitudes.

## **Chapitre II : Géologie**

### **Introduction :**

La géologie joue un rôle primordial dans toutes les phases d'exécution d'un programme de mise en valeur des ressources en eaux. En effet, la lithologie des terrains, les structures géologiques et la tectonique sont parmi les facteurs qui conditionnent :

- Le ruissellement de surface et l'écoulement ;
- L'alimentation naturelle et la vidange de nappes ;
- La constitution et le renouvellement des ressources en eaux souterraines ;
- Les possibilités d'implantation et l'exécution d'ouvrages hydrauliques.

La région étudiée s'inscrit dans l'ensemble des terrains autochtones hercyniens de l'avant-pays de la chaîne d'Algérie. Entre les Hauts Plateaux Oranais au Sud d'âge secondaire et tertiaire et l'Atlas Tellien au Nord, d'âge tertiaire, apparaît une unité géologique d'âge secondaire constituée par les Monts de Saïda et qui s'étend jusqu'à la région d'Oum Djerane au Sud. Cette région est caractérisée par des roches paléozoïques constituant le socle de la plate forme épihercynienne et par des formations méso- cénozoïque constituant la couverture.

Le socle paléozoïque de Saïda, avec sa couverture tabulaire du Lias, s'étend sur une surface de 300 km<sup>2</sup> et forme le môle de Tiffrit. Il est bordé par les formations jurassiques et crétacées des monts de Daïa à l'Ouest, de Frenda à l'Est et de Saïda au Nord. C'est à la faveur d'un bombement à très grand rayon de courbure que les substratums enfouis sous les terrains secondaires des hauts plateaux se relèvent pour constituer cette région et disparaissent au Nord sous l'Atlas Tellien.

### **1. Les études géologiques antérieures des Monts de Saïda**

Les premiers travaux géologiques effectués sur la région remontent au début du siècle dernier où (Flammand 1911) élabore une description lithologique sommaire des sédiments des monts de Saïda et évoque des schistes, des grauwackes, des poudingues et des roches éruptives. En 1952, Lucas réalise la première synthèse stratigraphique du Paléozoïque et différencie, dans le môle de Tiffrit, le Silurien, le Dévonien et le Carbonifère. (Guardia,1975) souligne la parfaite similitude du «flysch à microconglomérats» du Dévonien sud oranais des Traras avec les «schistes à microbrèches» de Ghar Rouban et Tiffrit décrits par (Lucas 1942, 1952). En 1989, Midoun aborde la relation entre le Trias de l'Oranie et le socle.

L'impluvium des bassins versants est partagé entre des terrains dolomitiques plus ou moins karstifiés et des terrains plus récents appartenant au Jurassique supérieur, au Tertiaire et au Quaternaire. Ces différents terrains sont encaissés par les vallées de Tiffrit, Gernida et Oum Djerane (Hassasna) faisant apparaître des formations triasiques et paléozoïques altérées et très argileuses, respectivement volcano-détritiques et cristallines.

Ces différents ensembles constituant plusieurs aquifères dont le plus important est de nature karstique correspondant aux roches carbonatées, plus ou moins dolomitiques ou calcaires du Jurassique inférieurs et moyen. Ces terrains dolomitiques sont partiellement recouverts de terrains plus récents, d'origine détritique du Jurassique supérieur et du Tertiaire. Des lambeaux de terrains quaternaires apparaissent dans le fond des vallées.

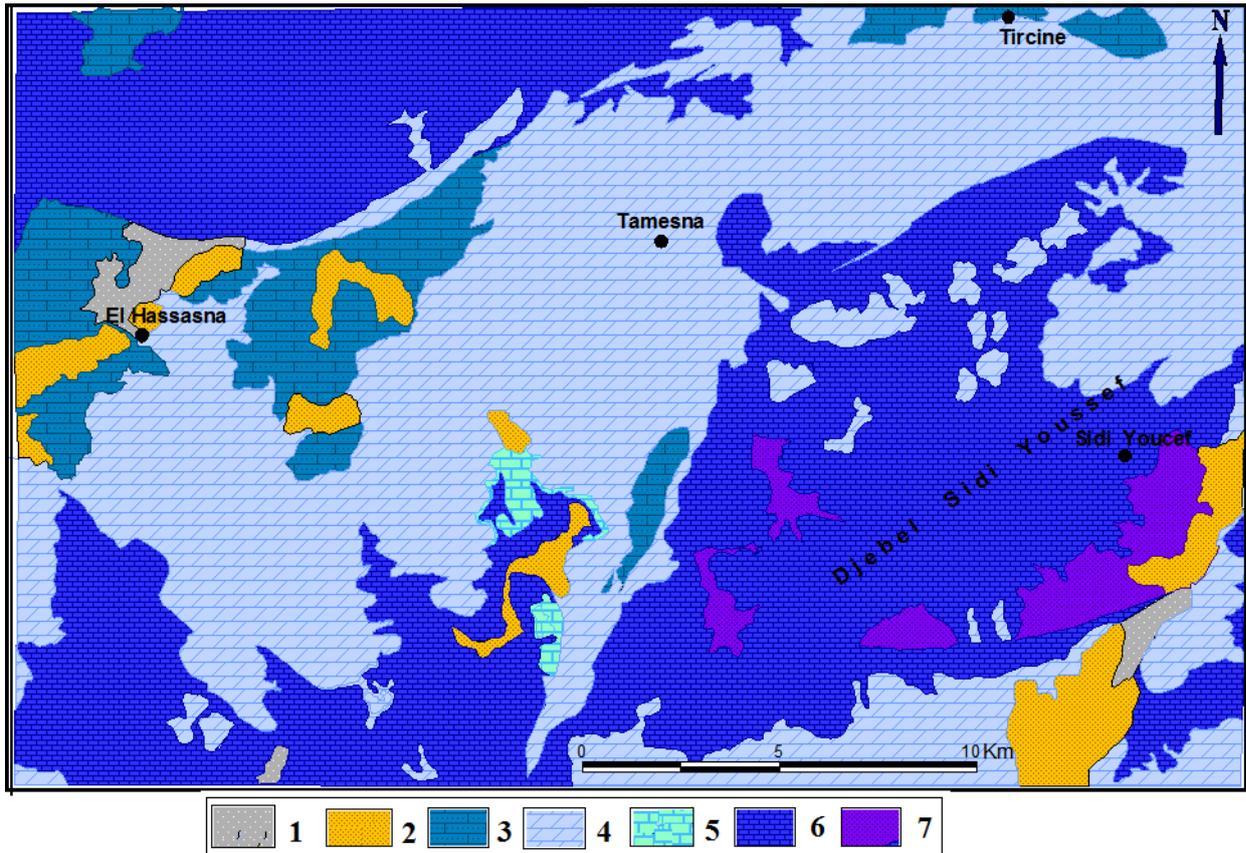
Ce vaste anticlinal d'âge secondaire est essentiellement constitué des terrains jurassiques moyens dolomitiques reposant en biseau sur le Trias au niveau du môle primaire de Tiffrit-Ain Soltane. La tectonique cassante, qui a affecté ces terrains carbonatés, est à l'origine des structures caractéristiques très particulières des régions karstiques. (Claire 1952 et Pitaud 1973) (Figure. 13)

## **2. Stratigraphie**

C'est la représentation graphique de la composition lithologique des couches, de leur succession et de l'âge des roches, c'est donc la datation et la chronologie des assises géologiques en plus de l'étude des caractéristiques physiques et chimiques des roches réservoirs.

Les faciès flysch observés sont attribués au Dévonien (Lucas, 1952) grâce à la présence d'empreintes de Psilophytales (*Halyserites* sp). De nouvelles observations micropaléontologiques et notamment palynologiques ont permis d'affiner la datation. Selon (Clair 1952 et Pitaud 1973) la région étudiée possède la succession géologique suivante (Figure. 13).

- le socle du Primaire (ère Paléozoïque);
- le socle du Secondaire (ère Mésozoïque);
- le socle du Tertiaire (ère Cénozoïque);
- le Plio-Quaternaire (ère Cénozoïque).



1- Quaternaire 2 - Plio-Quaternaire 3- Callovien moyen – Oxfordien 4 - Bajocien – Bathonien 5 - Bajocien 6 - Aalenien – Bajocien 7- Sinemurien – Pliensbachien

**Figure 13: carte géologique de Djebel Sidi Youssef de la région de Saïda (d'après le Service Géologique de l'Algérie (M. Gane v, K. Khistchev, J. Kolev, M. Moev))**

### 2.1. Le socle Triaso- Paléozoïque

Ce sont des roches plus anciennes, affleurant et ayant un développement borné en surface au niveau de la périphérie du Horst de Tiffrit (Oued Rigou, Oued Babkha et au Djebel Modzbab) et de la région de Ain Sultane, et qui ont pu être datées grâce à leurs lithologie, à leurs position stratigraphique, à la faune et à la flore qu'elles contiennent.

Ces formations sont rattachées aux affleurements du Trias, elles sont représentées par des basaltes, des albites et des sédiments bigarrés sensiblement limités en surface.

Le partage stratigraphique et la constitution lithologique de cette formation se présente ainsi :

### **2.1.1. Le Silurien :**

Les dépôts les plus anciens de la région de Saïda sont attribués à cet étage et sont représentés par un complexe de faciès schisteux à couches minces, gris-vertes, dans la partie inférieure et siliceux, dans la partie supérieure, répandu au Nord-Est d'Ain-Sultane et sur le cours de l'Oued Tiffrit. Le profil de cette formation prend fin avec une série épaisse de schistes siliceux à couches minces.

### **2.1.2. Le Dévonien :**

La coupe la plus complète du Dévonien est représentée par un faciès schisto- gréseux. Cette série répandue dans la région ; se caractérise par une prédominance de schistes dans sa partie inférieure et une alternance de schistes, de quartzites et de grés dans sa partie supérieure, elle est observée surtout dans la région Ez-Zeboudj et aux environs de Chet-Balal (affleurement de l'Oued Tiffrit)

### **2.1.3. Le Carbonifère (Viséen) :**

Ile se présente Sous forme d'affleurements de sédiments carbonifères, ces formations sont datées du Viséen grâce à la présence de faune assez riche en Brachiopodes recueillis par (Lucas 1952) dans les grés au pied du Djebel Aou-Zater. Ces formations sont rencontrées surtout dans la vallée de l'Oued Tiffrit près de la ferme Hamra et dans la région d'ez-zeboudj, et transgressent tous les sédiments anciens du Paléozoïque sous les dépôts du Trias qui les recouvrent. Les coupes les plus complètes des parties intermédiaires et supérieures du Carbonifère ont été observées sur le versant nord de Djebel Aouzater. La partie intermédiaire avec une épaisseur de 230 m est constituée de schiste argileux avec des bancs de lentilles de grés (0,5 à 2 m) contenant des Brachiopodes.

La surface érodée des schistes argileux est recouverte par des roches volcaniques (tufs et laves clastiques diacritiques et andésitiques).

Ces formations reposent sur une formation conglomératique composée de roches éruptives (granites, microgranites, rhyolites et dacites) et qui recoupe l'ensemble des formations. Le métamorphisme de contact est localisé aux bordures des terrains granitiques. Les assises sédimentaires sont plissées et montrent un léger métamorphisme épizonal.

## **2.2. Le Mésozoïque**

Les dépôts du Mésozoïque se rencontrent sur l'ensemble de la région et recouvrent les roches du Paléozoïque. Leur coupe synthétique épaisse de 200 à 700 m est représentée de bas en haut par :

- des roches terrigènes effusives,
- du Trias, carbonatées,
- du Jurassique inférieur et moyen, représenté par des roches carbonatées et détritiques.
- La diversité des faciès et la variation des épaisseurs dans des coupes peu distantes, caractérisent les dépôts de Mésozoïque transgressif sur les formations du Primaire. Les formations du Secondaire sont représentées par un complexe de roches volcaniques et sédimentaires.

### **2.2.1. Le Trias :**

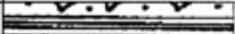
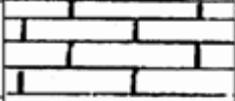
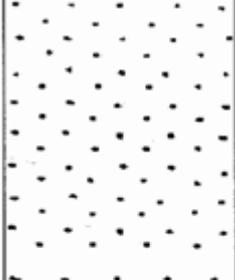
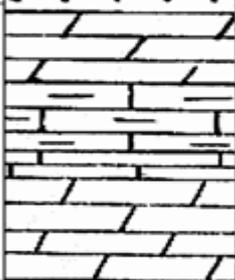
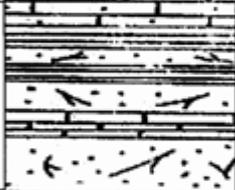
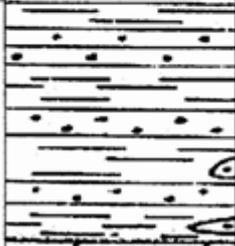
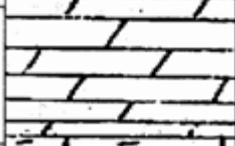
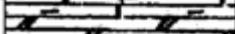
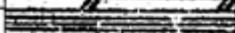
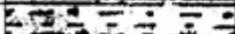
Reposant transgressivement sur une couche bigarrée du Paléozoïque, la série du Trias est recouverte par différents niveaux du Jurassique et des dépôts du Plio- Quaternaire. Il dessine le môle de Tiffrit (partout où ses frontières ne sont pas tectoniques) par ses affleurements. A la base de cette formation sont disposés, le plus souvent, des conglomérats basaltiques exotiques d'une épaisseur ne dépassant pas trois mètres. Ces conglomérats sont surmontés par des marnes grises à gris-jaunes, parfois avec des couches minces de calcaires argileux d'une épaisseur de 3 à 18 m recouvertes d'une couche de 4 m de calcaire gris à gris foncé solide, cryptocristalline, très souvent dolomitisée.

Au dessus de cette couche de calcaires vient un niveau volcanogène d'une épaisseur de 15 à 40 m représenté surtout par des basaltes noirs à vert gris et des tufs basaltiques, entrecoupés à plusieurs niveaux de grès, d'argiles siliceuses de grès quartzifiés. En fin le profil du Trias se termine par un niveau de 10 à 40 m d'argiles bigarrées.

### **2.2.2. Le Jurassique**

Les dépôts du Jurassiques sont représentés par les roches carbonatées du Jurassique inférieur et moyen (le Lias et le Dogger) et terrigènes carbonatées (le Malm). C'est la formation carbonatée de Tiffrit la plus répandue et la plus intéressante du point de vue hydrogéologique. Dans le Jurassique, on distingue trois groupes litho stratigraphiques : groupe carbonifère inférieur, groupe détritique et le groupe carbonifère supérieur (C. Augier, 1967).

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Épaisseur en mètre	Âge	Log	Description géologique
20	Quaternaire		Limons plus ou moins sableux et travertins.
75	Tertiaire		Argile brique sableuse ou gypseuse à intercalation de calcaire et de graviers, galets.
100	Sénonien		Calcaires gris clairs à pâte fine très altérés à la partie supérieure.
300	Barrémien		Grès de Youb (anciennement appelé Berthelot).
310	Kimméridgien		Dolomies de sidi Boubekeur (anciennement appelé Charrier), marno-calcaire de Raouraf, calcaire de Stah, antérieurement appelé dolomies de Tlemcen, enfin calcaires de Zarifet.
180	Lusitanien		Grès de sidi Amar anciennement appelé Franchetti, avec rares passées carbonatées et argiles sableuses. Les grès présentent une stratification entrecroisée.
250	Callovo-Oxfordien		Argiles de Saïda: (puissante série argilo gréseuse).
150	Aaléno-Bajo-Bathonien		Dolomies cristallines et calcaires fissurées.
25	Toarcien		Marne d'Essafah (marno-calcaire et marnes).
30	Domérien		Dolomies cristallines bréchiques avec argile.
90	Trias		Argiles saline, grès argileux, basalte.
30	Primaire		Schistes, granites, rhyolites, diorites.

**Figure 14: Coupe lithostratigraphique de la région de Saïda  
Source (Claire, 1952 et Pitaud, 1973)**

**a) Les formations de Lias (le Toarcien) :**

C'est une couche épaisse de 30 m de dolomies calcareuses de teintes foncées, à silex roses, à surface perforée et recouverte par des bancs de calcaires jaunes épais de 2 à 3 m très fossilifères. Le dôme de Tiffrit constitue le seul endroit où affleurent d'une façon

complète le Lias et l'Infralias (Figures. 14, 15). Par contre, la partie supérieure seulement du Lias et de l'Infralias apparaît en plusieurs points :

- Dans le dôme de Takhmaret, au Nord du fossé d'effondrement où l'Oued El Abed entaille profondément les dolomies du dôme anticlinal et fait apparaître de part et d'autre du fossé la partie supérieure du Lias à proximité de la grande faille ; au Sud-Est de Saïda, dans le ravin de l'Oued de Saïda où les dolomies supérieures surmontent des calcaires et dolomies argileux intercalés des niveaux de calcaires rognoneux et des marnes ;

- Prés de Djebel-Modzbab au Nord de Saida, où les dolomies peu épaisses recouvrent les basaltes infraliasiques ;

**b) L'Infralias :**

C'est un ensemble de poudingues noirs ou rouges à éléments de quartzites ou de schistes siliceux provenant du substratum après un plissement et arasage des schistes et quartzites du socle primaire sur le flanc nord du dôme de Tiffrit. Ces poudingues passent ensuite à une couche constituée uniquement par le magma feldspathique dans la partie supérieure de cette formation après diminution du volume du conglomérat. L'infralias est présent, en gros, sous forme d'assises grossières, épaisses des quelques mètres surmontées par des argiles jaunes ou grises, parfois calcaires peu épaisses, et des calcaires siliceux, gris jaunes ou bruns clairs passant à des dolomies siliceuses épaisses de 5 à 10 m faisant assises pour une série puissantes de 20 à 25 m d'argiles et de marnes grises, jaunes, vertes puis rouges.

Le Lias et l'infralias ont été aussi reconnus sous les calcaires marneux du Toarcien, par le Bureau des Recherches Minières de l'Algérie après une série de sondages qui ont permis d'identifier :

- 40 à 50 m de dolomies très fines et argileuses à leur base c'est le Lias moyen
- 8 à 10 m de grés rougeâtres grossiers ;
- 50 m de basaltes coupés d'horizons argileux, gréseux, dolomitiques ou gypseux plus ou moins développés ;
- Quelques mètres de dolomies surmontant une dizaine de mètres de schistes et d'argiles ;
- Le Microgranite.

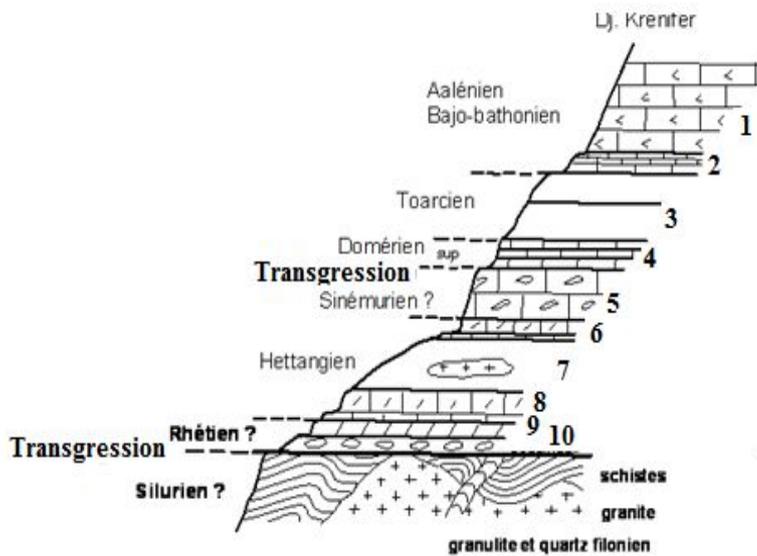


Figure 15: Coupe du jurassique à Tiffri (Claire, 1952)

1	Dolomies
2	Dolomies et Calcaires
3	Marno-calcaires à Harpocératidés calcaires marneux à Brochiopodes
4	Calcaires avec alternances marneuses calcaires à sillex raés
5	Calcaires siliceux à cypricards
6	Calcaires jaunes en plaquettes
7	Marnes argileuses métamorphiques intercalation de basaltes
8	Calcaires siliceux à cypricardia porrectadum
9	Calcaires jaunes en plaquettes antasé et grés feldspathiques
10	Poudingues à éléments de schistes et quartzites

#### c) Les formations du Dogger.

Les formations du Jurassique moyen, se subdivisent en trois niveaux stratigraphiques formés essentiellement de dolomies qui sont :

- L'Aaléno-Bajocien inférieur,
- Le Bajocien moyen,
- Le Bajocien supérieur-Bathonien.

#### • L'Aaléno-Bajocien inférieur :

Il est représenté par des dolomies silicifiées, des dolomies gréseuses emballant des galets de roches du Primaire et des calcaires silicifiés. Cette formation dénommée

« dolomie de Saïda » est entièrement dolomitique dans toute la région Nord du Horst de Tiffrit vers le Sud, au niveau du graben d'Oum Djerane, elle est moins dolomitique représentée en larges zones de calcaires blanc compacts. Dans la bordure nord du Horst de Tiffrit, cette formation diminue d'épaisseur en s'approchant du bassin subsidient.

C'est dans quelques niveaux de brèches conglomératiques qu'on aperçoit la minéralisation polymétallique. La faune recueillie par (G. Lucas, 1952) au Djebel Modzbab a permis d'attribuer avec certitude ces dépôts, à l'Aaléno-Bajocien inférieur.

- **Les dépôts du Bajocien moyen :**

Ils sont essentiellement carbonatés et reposent en discordance sur la formation dolomitique de l'Aaléno-Bajocien inférieur. Les dépôts sont constitués essentiellement de calcaires, de dolomies argileuses, de dolomies silicifiées, d'argiles, de grés et de marnes. La faune d'Ammonites recueillie du Djebel Modzbab date ces dépôts du Bajocien moyen (G. Lucas, 1952 et S. Elmi, 1972).

- **Les dépôts du Bajocien supérieur :**

Les dépôts du Bajocien supérieur occupent une grande superficie dans cette région, ils sont représentés par des calcaires argileux et des marnes. Cette formation est représentée dans la partie nord-ouest de Tiffrit, des calcaires à passées de dolomies et des dolomies à passées calcaires sur le reste du Horst. Les calcaires sont parfois très silicifiés passant à des quartzites secondaires, ils présentent alors des modules de barytine et une de fines particules de blende et de galène. C'est dans la partie sommitale de cette formation, constituée de brèches conglomératiques et de brèches, qu'est associée la minéralisation polymétallique du petit gisement de l'Oued Zebboudj, et des indices d'Ain Zerga, Khenifer et Hamra. De nombreux fossiles recueillis dans le graben d'Oum Djerane et dans la partie occidentale du Horst de Takhmaret (G. Lucas, 1952) ont permis d'attribuer avec certitude un âge Bajocien supérieur-Bathonien à ces dépôts.

- d) Les formations du Malm**

Les dépôts du Jurassique supérieur (Malm) occupent de grandes surfaces dans la région considérée. Sur les plans lithologiques et paléontologiques, ils se divisent en deux assises :

- une assise argileuse attribuée au Callovo-Oxfordien inférieur (argiles de Saida).
- une assise grés-carbonatée rapportée à l'Oxfordien moyen et supérieur (série gréseuse de Sidi Boubekeur).
- Le Callovo-Oxfordien indifférencié

Les dépôts de ce niveau sont partout représentés par des argiles à bancs de grés, d'aleurolites, de marnes, de calcaires et dolomies. Les faciès restent réguliers avec de légères

variations de leurs épaisseurs.

Les roches du Callovo-Oxfordien inférieur se caractérisent par des teneurs élevées de plomb, zinc, vanadium, baryum, nickel, et chrome. Il est très important de noter que les teneurs maximales en plomb ont été constatées dans les coupes où les dépôts Callovo-Oxfordien recouvrent les dolomies de l'Aaléno-Bajocien minéralisées. Les teneurs en cobalt, manganèse, molybdène, cuivre et strontium, de toutes les coupes échantillonnées sont caractérisées par des concentrations proches ou inférieures au clark. La faune recueillie par (G. Lucas, 1952) permet de considérer les roches comme étant du Callovo-Oxfordien inférieur.

### **2.2.3. Le Crétacé**

#### **2.2.3.1. Le Sénonien :**

Comparativement aux formations du Jurassique, les dépôts de cet étage ont un développement limité. Ils sont représentés par des calcaires cristallins, une alternance de marnes et de calcaires argileux enfin par des calcaires pélitomorphes massifs. Cet étage n'est représenté que dans la région d'Ain kermès, son épaisseur totale n'excède pas les 100m.

### **2.3. Le Cénozoïque**

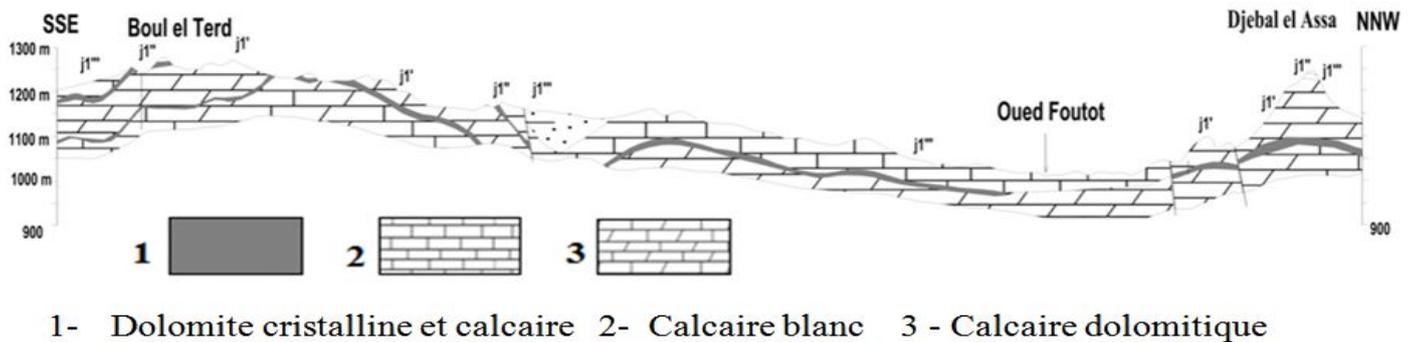
#### **2.3.1. Le Néogène et le Quaternaire**

Les dépôts du Néogène et du Quaternaire sont représentés par des tufs calcaires, des conglomérats, des gravellites, des limons et limons sableux remplissant les vallées des oueds de la région. Ces dépôts se caractérisent par des épaisseurs peu importantes et sont représentés par des formations continentales d'âge Plio-Quaternaire.

### **3. Cadre structural et tectonique**

D'après (Elmi et Benest, 1978), les plissements de la chaîne tellienne qui forme le socle de la région de Saïda ont résulté de mouvements verticaux du socle, ce qui a provoqué d'importantes fractures. Ces mouvements tectoniques sont aussi responsables de la formation des dômes (le plus important est celui de Tiffrit) et des différentes fosses d'effondrement. La surrection de mole a aussi provoqué la déformation de la couverture dolomitique du Jurassique alors qu'une fosse d'effondrement d'axe N-S s'est développée dans la vallée de Saïda. (Figure. 16).

Ces différents mouvements de surrection ont engendré une tectonique cassante à la région. Les directions privilégiées sont approximativement SO-NE à NNE-SSO. Les accidents tectoniques sont subverticaux pour la plupart. La trace de l'oued de Saïda résulte d'ailleurs celui d'une faille longitudinale.



**Figure 16 : Coupe géologique simplifiée : Sud Est-Nord Ouest de Djebel Sidi Youssef (d'après le Service Géologique de l'Algérie (M. Gane v, K. Khistchev, J. Kolev, M. Moev))**

### 3.1. Structure générale :

La région de Saïda étant comprise dans la zone des Hauts Plateaux Oranais sous forme d'une plate forme épi-hercynienne et constituée de roches du Trias et des sédiments du Jurassique, est caractérisée par une tectonique dictée exclusivement par des cassures ayant provoqué des dénivellations et des pentes différentes des blocs séparés dont les principaux sont: (Figures. 17).

- Blocs élevés :

a) Horst de Tiffrit : formé principalement par les sédiments du membre des carbonates d'Ain Dez et des roches plus anciennes du Jurassique, le Horst de Tiffrit est répandu au Nord-Est de la vallée. Au Sud, il se détache du gros ensemble des failles de Saïda.

b) Horst de Djebel Sidi Youssef : De localisation Sud-Est, le Horst du Djebel Sidi Youssef est représenté par les sédiments du Jurassique moyen. Il est limité au Nord par les cassures d'Es-Seridja et Djebel Harchoun, à l'Est par celle de Sidi Youssef et au Sud par les cassures de Rokbet-El-Hadj.

c) Horst d'Ain Dez : Il est formé par les sédiments du Jurassique inférieur et moyen et n'englobe qu'une faible partie du Sud-Est de la vallée.

d) Zone élevée d'El-Ammi : elle occupe le Sud-Ouest de la vallée et elle est formée par les sédiments carbonatés du membre d'Ain Dez. Elle est détachée du graben d'Oum-Djerane par la cassure de Koudiat El Hariga.

e) Zone élevée de Djebel Yhoudia : elle est érigée par les membres des carbonates d'Ain-Dez et le membre des couches bigarrées de Sidi Youssef.

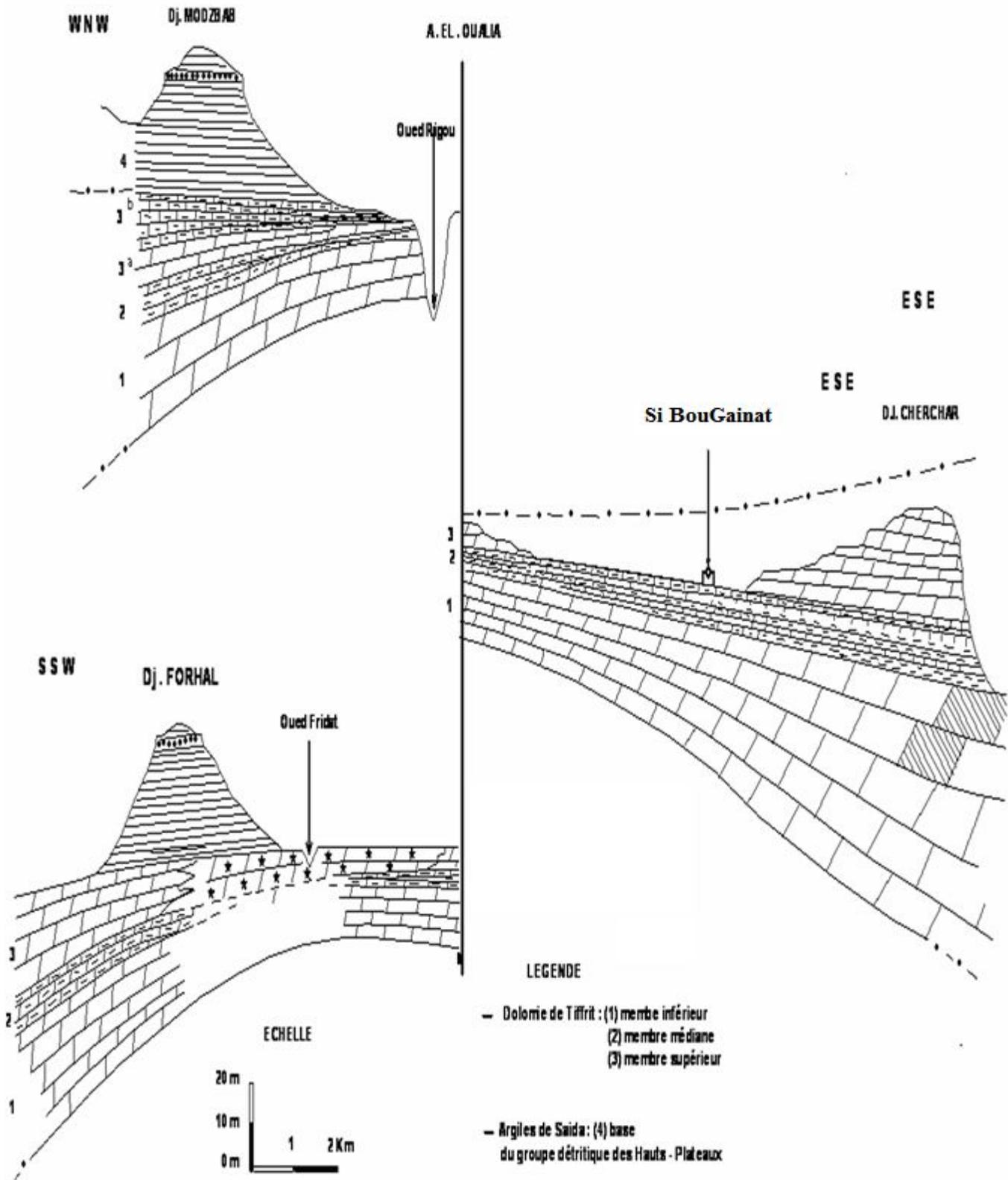


Figure 17: Dolomies de Tiffrit évolution lithostratigraphique sur le mole Tiffrit (d'après le Service Géologique de l'Algérie (M. Gane v, K. Khistchev, J. Kolev, M Moev))

- Blocs en subsidence :

a) Graben d'Oum-Djerane : D'orientation Sud-Ouest, Nord-Est, le graben d'Oum-djerane est formé par les sédiments du membre des carbonates d'Ain-Dez, du membre des carbonates de Zerzour, la formation grés-argileuse de Saïda et, dans une faible mesure, les dépôts Plio-Quaternaires. Il est séparé au Nord-Ouest du Horst de Tiffrit par la faille de Saïda, au Nord-Ouest par la cassure de Koudiat El-Hariga et au Sud-Est par les failles d'Es-Seridja et Djebel-Harchoun. Morphologiquement exprimé par une grosse dépression, ce graben occupe la partie sud de la vallée.

b) Graben d'Oued Khemziet : situé entre le Horst de Djebel-Sidi Youssef et celui d'Ain Dez en se prolongeant vers le Sud, ce graben est constitué par les dépôts du Jurassique moyen et Plio-Quaternaire.

c) Zone d'effondrement de l'Oued Saïda : Cette zone est constituée principalement par les dépôts de la formation grés-argileuse de Saïda, des grès de Franchetti, du Plio-Quaternaire et (dans une faible mesure) par les carbonates du membre de Zerzour et de la formation des dolomies de Tlemcen.

#### **4. La Fissuration :**

La vallée de l'Oued de Saïda correspond à un vaste anticlinal faille de direction atlasique (E-O à OSO-ENE) se noyant au nord et au sud. Un réseau de failles découpe la région en de nombreux panneaux parallélépipédiques, à la faveur d'accidents subparallèles orientés NNE-SSO.

Les roches du flanc sud-est de l'anticlinal des monts de Saïda sont affectées par un pendage très faible et vont s'enfoncer sous le Tertiaire du Chott Chergui (Elmi et Benest, 1978). Les roches du flanc nord-est de ce même anticlinal sont affectées par un pendage faible et des accidents subverticaux d'orientation générales NE-SO, visibles de la vallée de l'Oued de Saïda et laissant apparaître les dolomies de l'Aaleno-Bajo-Bathonien.

Les plissements de la chaîne tellienne ont engendré aussi une tectonique cassante qui affecte les roches carbonatées. Elle a eu comme résultat la constitution de blocs dolomitiques de dimensions et de formes extrêmement variées. Certains de ces blocs se sont effondrés, alors que d'autres apparaissent sous forme de horst. La nappe karstique est libre au niveau des horsts et captive dans les vallées, sous les terrains de recouvrement plus récents.

Cette tectonique assez développée accentue le taux d'infiltration des eaux souterraines qui vont suivre ce réseau de cassures. Par ailleurs, le système de fracturation très développé est en grande partie à l'origine du développement du karst caractérisant la zone de Saïda.

#### **4.1. Le résultat de la tectonique cassante**

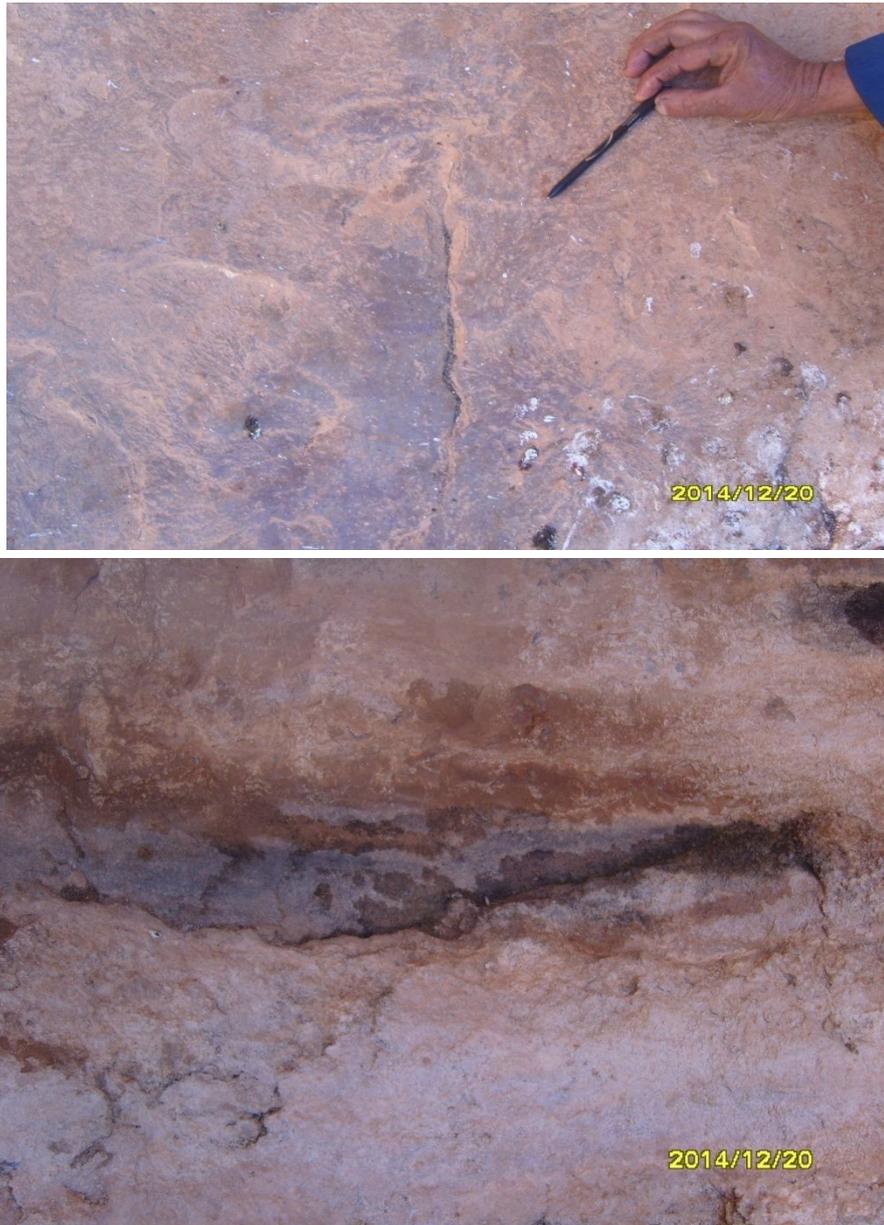
La tectonique cassante de la région détermine le caractère spécifique de la fissuration des roches surtout au niveau des deux principaux horizons du point de vue hydrogéologique : formation des carbonates de Bouloual et celle du Nador où trois directions principales ont été déterminées :  $40^{\circ}$ - $220^{\circ}$ ,  $140^{\circ}$ - $320^{\circ}$  et  $155^{\circ}$ - $335^{\circ}$  en plus d'autres formations de second ordre sont observées dans les directions :  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$ - $250^{\circ}$ ,  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$ ,  $160^{\circ}$ - $340^{\circ}$  et  $180^{\circ}$ - $360^{\circ}$ . La fissuration la plus faible est dans les directions :  $10^{\circ}$ - $190^{\circ}$ ,  $130^{\circ}$ - $310^{\circ}$  et  $170^{\circ}$ - $350^{\circ}$ .

Les fissurations prédominantes sont de largeur minimal d'environ 1 à 2 cm, verticales et de pentes  $75^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , elles peuvent, dans certains secteurs, atteindre jusqu'à 10 à 20 cm de largeur suivant les directions principales de fissuration :  $40^{\circ}$ - $220^{\circ}$ ,  $140^{\circ}$ - $320^{\circ}$  et  $155^{\circ}$ - $335^{\circ}$ . (Figure. 18)

Cette fissuration a engendré le phénomène caractéristique des Monts de Saïda : la karstification des roches. Ainsi, à l'Est de Oum-Djerane, la karstification des calcaires de membre des carbonates de Zerzour est clairement orientée en direction de la fissuration principale de ce secteur :  $60^{\circ}$ - $240^{\circ}$  et  $140^{\circ}$ - $320^{\circ}$ .

Au Nord apparaît le Horst de Tiffrit constitué par un butoir paléozoïque limité au Nord par une importante faille en forme d'arc de cercle orienté Est-Ouest et au Sud par les affleurements du Trias. Vers le Nord le Horst est en contact directe avec le Jurassique supérieur et il plonge vers le Sud selon un pendage mal déterminé sous le Trias volcano-ditritique et les dolomies du Jurassique inférieur et moyen.

Il faut noter, aussi, que la fissuration des sédiments est accompagnée d'une abondante minéralisation dans certains secteurs. L'ensemble de la région est formé d'un plateau pourvu de deux axes principaux tectoniques riches en failles, formant un plexus au centre. L'inclinaison générale des formations est orientée vers le Nord et vers le Sud à partir de l'axe du Djebel Sidi Youssef. Le système de failles du plateau est en communication avec le réseau faillé de la zone effondrée de la vallée de l'Oued Saïda au niveau de la région d'Ain Zerga. L'ensemble de cette tectonique déterminera la Karstification et le fonctionnement du système hydraulique de la région.



**Figure 18: les photos présentent la forme des fissurations prédominantes dans les Monts de Saïda (les photos prisent dans la zone de A. Zerga)**

## **5. Conclusion**

Globalement, l'échelle stratigraphique de la région de Saida peut être schématisée comme suit ainsi :

- **Socle Triaso-Paléozoïque**

Affleurant principalement dans le môle de Tiffrit et dans la zone de Djebel Modzbab se socle est développé en faciès volcano-détritiques.

- **Le Mésozoïque**

- **Le Trias**

C'est une formation représentée par des conglomérats, des grès rouge et des basaltes ; caractérisé dans la région de Horst de Tifrit.

- **Le Jurassique supérieur et moyen**

C'est une formation carbonatée caractérisée dans la région de Tifrit et comportant (du point de vue lithostratigraphique) :

La formation des carbonatées de Bouloual (Hétangien-Toarcien) la formation carbonatée du Nador (Aaléno-Bajo-Bathonien) formée par quatre membres :

- membre Aaléno-Bajo-Bathonien
- membre Bajocien de Sidi Youssef,
- membre Bajo-Bathonien de Zerzour
- membre Bajo-Bathonien (marnes de Modzebab) ;
- la formation des marnes d'Es Safeh (Toarcien).

- **Le Crétacé**

Il est formé par le Sénonien ; dont le développement est limité. Il est représenté par des calcaires cristallins et de calcaires argileux. Il affleure dans la région d'Ain Kermès

- **Le Cénozoïque**

Il est représenté par le Néogène et le Quaternaire, des formations anciennes de la vallée de l'Oued Saida couvertes par des conglomérats, des gravèlites, des limons sableux.

## **Chapitre III : Hydrogéologie**

## **Introduction**

Mis à part la partie nord-ouest de la région étudiée où la nature des réservoirs est gréseuse, l'ensemble du territoire est caractérisé par un réservoir généralement artésien. Les nappes souterraines sont à l'origine de plusieurs résurgences, dont les plus importantes sont Ain El Hadjar, Ain Sultane, Ain El Hallouf et Poirier.

L'aquifère karstique du Jurassique et moyen est constitué essentiellement de dolomies et de calcaires reposant sur le substratum triasique imperméable. Cet aquifère comporte, une partie libre sur le « plateau » et captive dans la région de la vallée de l'Oued Saïda sous les terrains plus récents du Callovo-Oxfordien et du Plio-Quaternaire et au Sud sous la plaine du Chott Chergui. Le jeu combiné des failles à rejets et de la puissance de l'aquifère peut avoir un rôle important.

### **1. Distinction des aquifères :**

A partir de la nature et de l'âge des roches calco-carbonique, il est possible de définir les aquifères suivants (figure. 19):

#### **1.1. Le Jurassique moyen (Bajo-Bathonien).**

Aquifère du Jurassique: selon (Clair, 1952 et Pitaud, 1973) cet aquifère est un réservoir dolomitique très perméable. Le toit de ce réservoir souterrain est constitué par les marnes d'Essafah.

Le Jurassique affleure :

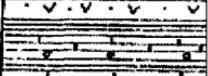
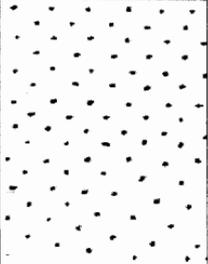
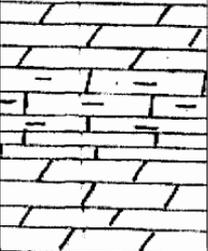
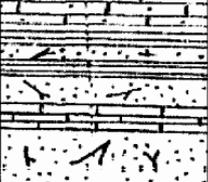
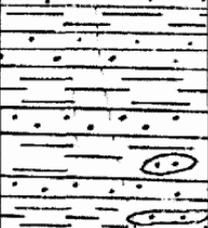
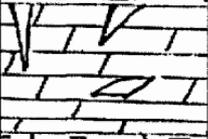
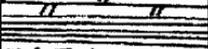
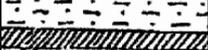
- dans les gorges de l'Oued Saïda, à l'Est de la faille (Vieux Saïda),
- au horst de Tifrit à l'intérieur du polygone délimité par les failles et par le plateau Bajo- Bathonien de Guentara,
- dans la vallée de l'Oued El Abd, dans la partie centrale du dôme de Takhemaret

#### **1.2. L'Aaléno-Bajo-Bathonien.**

Cet aquifère dolomitique et calcaire-dolomitique karstique constitue le réservoir principal d'eau pour la région de Saïda. Il est libre à l'Est de la ville, mais il devient captif lorsqu'il est surmonté par le Callovo-Oxfordien (argilo-gréseux) dont les roches constituent son toit. Le mur est représenté par les marno-calcaires du Toarcien, formant l'assise d'une nappe importante qui donne naissance à de nombreuses résurgences.

L'Aaléno-Bajo-Bathonien dolomitique et calcaire affleure largement au Sud entre Saïda et Takhemaret, nous avons :

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères  
Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Épaisseur en mètre	Âge	Log	Formations géologiques	Caractéristique aquifère
75	Tertiaire et Plio Quaternaire		Alluvions	Perméabilité d'interstices et/ou de fissures
100	Sénonien		Calcaires	Perméabilité de fissures et cavitaires (karst)
300	Barrémien		Grès	Perméabilité d'interstices
310	Kimméridgien		Dolomies et calcaires	Perméabilité de fissures
180	Lusitanien		Grès à passages argileux	Perméabilité d'interstices
250	Callovo-Oxfordien		Alternances d'argiles et de grès	Perméabilité d'interstices et parfois de fissures (en zones faillées)
150	Aaléno-Bajo-Bathonien		Dolomies supérieures	Perméabilité de fissures et cavitaires (karst)
25	Toarcien		Marnes	Imperméable
30	Domérien		Dolomie inférieure	Perméabilité de fissures
90	Trias		Argiles, grès, basalte	Imperméable
30	Primaire		Terrains métamorphiques	Imperméable

**Figure 19: Coupe lithostratigraphique et hydrogéologique de la région de Saïda.  
Source : (Claire, 1952 et Pitaud, 1973).**

**a) Le Causse de Tidernatine**

Les dolomies Aaléno-Bajo-Bathonniennes forment au Sud-Est de Saïda un vaste plateau s'élevant vers l'Est à la cote 1.100 m et s'abaissant vers l'Ouest jusqu'à la Côte 950 m. Le Causse de Tidernatine, limité à l'Ouest et au Nord par la grande faille de Saïda dont le rejet atteint 150 m aux environs de Saïda, mettant ainsi en contact la base des dolomies Aaléno-Bajo-Bajo-Bathonniennes avec la série argilo-gréseuse du Callovo-Oxfordien. Vers l'Ouest, ce prolonge par le plateau dolomitique de la partie nord des Hassasna dont il n'est séparé que par le lambeau Callovo-Oxfordien, vers l'Ouest épargné par l'érosion.

Les marno-calcaires du Toarcien constituent l'assise de retenue d'une nappe très importante située à une cote supérieure à 1000 m au Sud-Est et voisine de 900 m au Nord-Ouest, donnant naissance à de belles résurgences, l'Aïn El Hadjar (30 l/seconde) et l'Aïn Bent El Sultane (38 l/seconde). Ces sources sont toutes deux situées au contact faillé des dolomies Bajo-Bathonniennes et des argiles Callovo-Oxfordiennes.

Les sources du Vieux Saida, dans les gorges de l'Oued Saida, sourdent à la base des dolomies. A l'Est de Saida, la faille est jalonnée par de nombreuses émergences : Ain Zerga, Ain Krerba par exemple. (Figure. 20)

Les dolomies du « Causse » de Tidernatine ont été le siège de circulations importantes et sont creusées de nombreuses grottes constituant les «Anévrismes» du réseau très complexe de fissures qui drainent les eaux de ce Plateau. Ce réseau est souvent en contact avec la surface par des avens : « trous aux pigeons » et nombreux « rhar ».



**Figure 20: la source Ain Zerga**

Grottes et cavernes formant l'aboutissement du réseau complexe de galeries ont été, quand elles se trouvaient au-dessus de la cote du plan d'eau, le refuge de l'homme à la période préhistorique, (grottes de l'Oued Saïda par exemple). D'autres, comme celles de la Ferme Catroux, constituent de véritables cours d'eau souterrains et peuvent être suivies sur plusieurs centaines de mètres.

**b) Le plateau de Rebahia (ex.Nazereg)**

Le plateau de Rebahia est situé au Nord du Causse de Tidernatine entre les côtes 800m et 950m et s'en rapproche beaucoup. La nappe des dolomies drainant vers le Nord celle du Causse et vers l'Ouest celle du Plateau du Djebel Krenifer au Sud du dôme de Tifrit est située à faible profondeur, et les vallées des oueds sont jalonnées par de très belles résurgences donnant naissance à des cours d'eau permanents : Ain Kerma, Ain Fakroun, source du Poirier, d'un débit égal à plusieurs dizaines de l/s et utilisées pour l'irrigation. (Figure. 21 et 22)



**Figure 21: la source Poirier**

La source de l'Oued Meriouia, alimentant le centre de Rebahia, d'un débit voisin de 40 l/s, constitue l'émergence de trop-plein de cette nappe, et est située en bordure du fossé d'effondrement de Saïda, faisant buter les argiles Callovo-Oxfordiennes contre les dolomies.

**c) Le fossé d'effondrement de Saïda**

L'Oued Saïda emprunte, au Nord du vieux Saïda, une dépression naturelle formée par un fossé d'effondrement de direction sud-nord. La zone faillée le bordant à l'Est met en contact les dolomies Bajo-Bathonniennes qui n'y affleurent que rarement avec celles du Plateau de Rebahia et du Causse de Tidernatine dont la nappe se situe à la côte 890 à l'Aïn Bent El Sultane et à 765 près de Rebahia.



**Figure 22: la source Ain Teghat**

Au centre du fossé où la côte varie de 800 à Saïda à 750 à Rebahia, la nappe de dolomie recouverte par les argiles du Callovo-Oxfordien est artésienne et pourrait être utilisée pour l'alimentation en eau pour Saïda.

**d) Le plateau d'El Gentara.**

A l'Est du dôme de Tifrit, les dolomies et calcaires blancs du Bajo-Bathonien forment un vaste plateau limité au Nord par la faille d'Ain El Beranis (faille de l'Oued Mimouna), à l'Ouest et au Sud par les lambeaux Callovo-Oxfordiens de M'Zaïta, Tourouit et Tircine.

Dans la partie centrale et sud de ce plateau, la nappe du Bajo-Bathonien n'a été atteinte que par de rares puits, car elle est drainée vers l'Est et le Nord par les affluents de l'Oued Tifrit. En bordure du dôme, au niveau des assises calcaréo-marneuses, à la base des dolomies, les résurgences sont nombreuses quoique peu importantes : Ain Balloul, Ain Guercif, Aïn Sauig.

Au Nord, la faille menant en contact ces dolomies avec les argiles du Callovo-Oxfordien provoque une remontée du plan d'eau donnant naissance à l'Ain El Beranis.

**e) Le dôme de Takhemaret.**

Le dôme de Takhemaret, est formé par un mouvement anticlinal perpendiculaire à l'axe des Monts de Saïda et est coupé en sa partie médiane par un fossé d'effondrement.

La partie nord s'enfonce sous la série argilo-gréseuse du Callovo-Oxfordien ou sous les alluvions tertiaires et quaternaires, et toute l'eau des dolomies est ainsi drainée vers le Nord et l'Est. Il n'existe que de rares sources peu importantes dans la basse vallée de l'Oued El Abd.

Au contraire, la partie sud du dôme qui forme le prolongement des grands affleurements Bajo-Bathonien du Douar Tircine, donne naissance à de belles résurgences de trop-plein disséminées dans la vallée de l'Oued El Abd, depuis Maarad jusqu'au fossé d'effondrement. La principale résurgence est l'Ain Makhoulf qui sourd à la faveur d'un mouvement anticlinal au contact d'un niveau calcaire intercalé à la base des dolomies.

Toutes ces eaux des dolomies Bajo-Bathoniennes, dont celles de Ain Bent El Sultane peuvent être prises pour type, sont très peu chargées en sels dissous (350 mg/l) et contiennent essentiellement des carbonates de calcium et de magnésium. La présence de ces carbonates, produits de la dissolution de la roche. La formation des grandes masses de travertins que l'on retrouve à proximité de la grande faille de Saïda ou dans le fossé de Takhemaret.

Au Sud de ces affleurements dolomitique, c'est à dire dans l'axe et sur le flanc sud des Monts de Saïda, les dolomies constituant la base Bajo-Bathonien sont surmontées par des alternances des dolomies, calcaires et argiles formant un groupe de petits anticlinaux et synclinaux, très courts, parallèles à l'ensemble de la chaîne.

Il faut alors distinguer la nappe généralisée des dolomies et les petites nappes qui ont pu se former dans les synclinaux à la faveur d'assises imperméables.

La ligne de partage des eaux limitant la nappe des dolomies des Monts de Saïda de la nappe Bajo-Bathoniennes de la dépression du Chott Chergui passe à El Bahrour, Khalfallah, El Hadera et au Sud de la Daïet Ez Zraguet, c'est-à-dire au Sud des Monts de Saïda. La nappe de la base du Bajo-Bathonien s'y trouve à la côte 1045 à l'Ouest, et à une côte voisine de 1000 à l'Est. Au Nord de cette ligne, la nappe montre une pente vers le Nord pour atteindre le Causse de Tidernatine et vers l'Est suivant l'axe d'abaissement de la chaîne.

Par suite de la côte du terrain, souvent supérieure à 1150, cette nappe n'est pas exploitée. Cependant deux puits exécutés à l'Ouest en deux points bas par le Secteur Communal d'Hydraulique, et l'ont atteinte dans l'Oued Falette. À l'ouest à la côte 1040 (56 m de profondeur) et au Nord de l'anticlinal d'EL Tonal à l'Est à la côte 870 (67 m de profondeur).

Les alternances Calcaréo-dolomitiques et Marneuses surmontant les dolomies de la base du Bajo-Bathonien sont affectées de petits mouvements anticlinaux et synclinaux très courts, souvent érodés et coupés perpendiculairement par les Oueds. Les cuvettes synclinales ainsi formées peuvent retenir des nappes peu importantes par suite de la superficie réduite de leur impluvium. C'est à ce système hydraulique qu'appartiennent tous les points d'eau de la partie septentrionale et centrale des Hassasna, Puits de Sfia, de Tafraoua, de Sidi Yoccesef, Aïn Daz, pour ne citer que les principaux, qui tous sont situés sur l'axe du grand anticlinal, ou en sa bordure immédiate.

Au Sud, l'amplitude des petits mouvements secondaires est presque toujours inférieure à la pente du flanc de l'anticlinal, ou à celles de l'abaissement de son axe, et ne leur permet pas de retenir l'eau qui s'écoule vers le Sud pour alimenter les formations tertiaires de la dépression du chott, donnant rarement des sources à la bordure de Ain Beida, ou vers l'Est sous la série argilo-gréseuse du Callovo-Oxfordien des Monts de Frenda.

### **1.3. Le Callovo-Oxfordien.**

Cet étage est imperméable, localement forme le toit de l'aquifère Aaléno-Bajo-Bathonien. Les bancs de grés formant ce réservoir peu aquifères ou les débits mobilisés n'excèdent pas 2 l/s, seuls les bancs en contact avec le Bajo-Bathonien qui sont près de la zone faillée offrent des débits intéressants (le forage de Benadouane donne même un débit de 13 l/s).

Nous savons que le Callovo-Oxfordien constitue des affleurements importants sur le flanc nord et dans la partie orientale des Monts de Saïda.

Sur le flanc nord les bancs gréseux sont généralement peu développés et disséminés dans toute la série. Par suite de leur pente vers le Nord et de leur impluvium réduit, ils ne sont pratiquement pas aquifères. Seuls les bancs en contact direct avec les dolomies dans la zone faillée du fossé de Saïda ou bordant le polygone de Tifrit peuvent être nourris par les nappes du Bajo-Bathonien ou du Lias.

Au contraire, à l'extrémité orientale des Monts de Saïda, l'épaisseur de l'assise gréseuse de base croît considérablement et présente dans l'axe de la chaîne un impluvium qui alimente une nappe importante. C'est cette nappe, qui donne naissance aux nombreuses sources, situées entre le Djebel Ech Chebka et le Kef de Martimprey, l'Ouest d'Aïn-Kermes, Rass El Ain, Ain Es Smara, Ain Mzaïra, Ain Smicha..., alimentant la haute cour de l'Oued El Abd, tandis que plus au Nord, à partir du Kef de Martimprey, ce niveau gréseux important est recouvert par la série argileuse et s'enfonce rapidement tout en diminuant d'épaisseur.

Le Callovo-Oxfordien n'est alors pas plus aquifère qu'au Nord de Saïda, seules les petites barres de grès intercalés dans les marnes alimentent de petites résurgences tarées à la saison sèche.

Dans le Nord du Douar Hassasna et dans le douar Tircine parmi les petits synclinaux Bajo-Bathonien ont souvent comblés par des lambeaux de niveaux gréseux de la base du Callovo-Oxfordien épargnés par l'érosion. Ces cuvettes renferment alors des nappes peu profondes, souvent peu importantes, mais constituant les principaux points d'eau de cette région : El Mezioued, Tamesna, Tircine, Tourouit et M'zaida.

## **2. Les atterrissements tertiaires et quaternaires.**

Les atterrissements tertiaires et quaternaires qui comblent les dépressions, bien que d'origines très diverses, forment une seule unité Hydrogéologique et alimentent souvent par leur impluvium propre des nappes importantes, mais drainent en outre parfois les eaux des massifs qui les bordent.

Sur le flanc sud des Monts de Saïda, les atterrissements de la bordure nord de la dépression du Chott Chergui drainant les eaux du Bajo-Bathonien et constituant un vaste impluvium, renferment une nappe importante mais située à assez grande profondeur. Cette nappe est en effet à une cote voisine de 1000 m et à une légère pente vers le centre de la dépression, alors qu'en bordure du massif le terrain se trouve à une cote supérieure à 1050 m et souvent même 1075 m. (Figure. 24)

## **3. La piézométrie**

Sur le plan piézométrique, on peut relever un sens général de l'écoulement, allant du Sud-Est vers le Nord-Ouest. Les aquifères descendent de 1100 à 550 mètres. Les lignes de courant les plus importantes convergent en général vers les sources. Une zone charnière hydraulique apparaît entre Oum Djerane et Tiffrit. Elle correspond à l'articulation centrale des différents bassins et de leur zone tectonique. (Figure. 24)

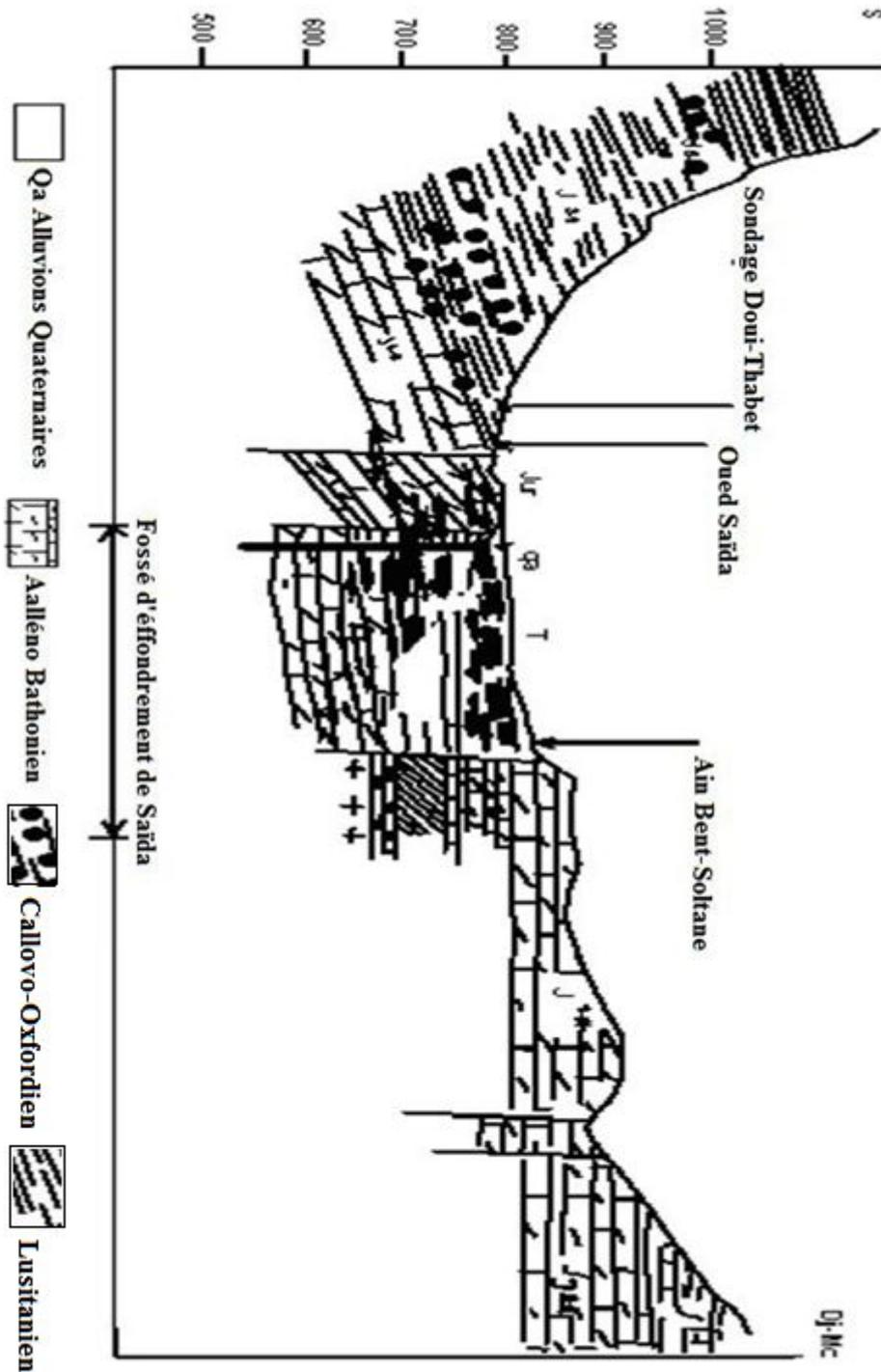


Figure 23: Coupe géologique au niveau de la vallée de l'Oued Saïda (G.Pitaud.1973)

- niveaux argileux décalés en désordre,
- failles avec rejet plus ou moins important,
- karstification hétérogène,
- variation brutale et irrégulière de l'épaisseur de l'aquifère.

3.2. Les points d'eau : (Figure. 25 et Tableau. 8)

Nous disposons dans la région étudiée de 300 points d'eau, dont environ la moitié dans l'aquifère karstique. La construction de la carte piézométrique se heurte rapidement à de nombreuses anomalies hydrodynamiques. En effet l'écoulement de la nappe est constamment perturbé par les facteurs suivants :

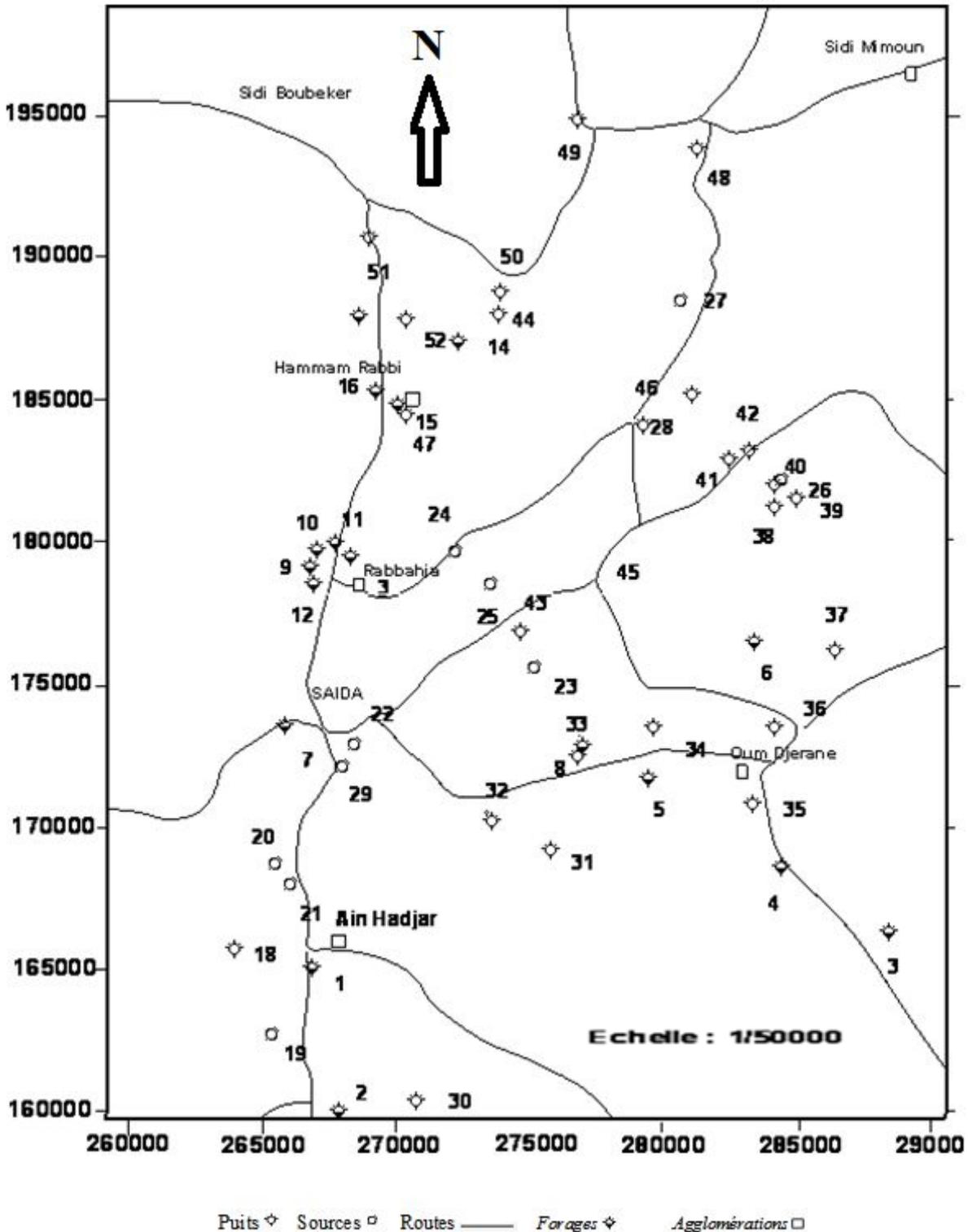


Figure 24: Localisation des points d'eau de la région de Saïda.

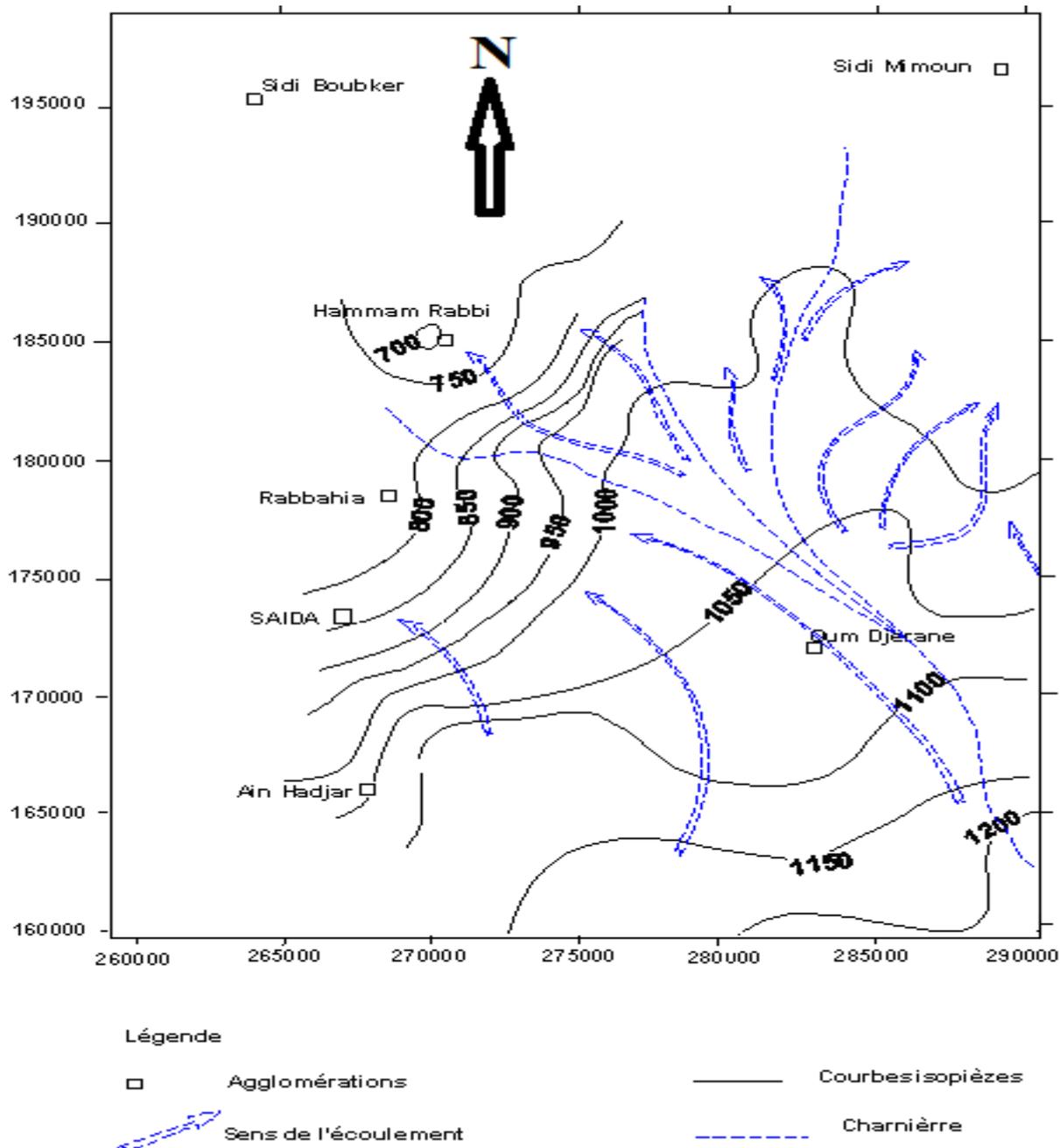


Figure 25: carte piézométrique des aquifères karstique des Monts de Saïda

**Tableau 8: Dénomination des points d'eau**

code	Dénomination	X	Y	code	Dénomination	X	Y
1	SONAREM	266,90	165,20	28	AIN SOLTANE	280,90	185,20
2	BOURACHED	267,85	160,10	29	AIN TOUTA	267,80	172,25
3	TAGOURAYA	288,30	166,30	30	BICENTI	270,70	160,00
4	S.N.M.C.	284,30	168,60	31	FERME AOUED	275,80	169,10
5	CHIF	279,50	171,80	32	FERME TIFOUR	273,50	170,10
6	ATHMANI	283,30	176,60	33	FERME BOUHRIT	276,80	172,30
7	DAOUDI MOUSSA	265,90	173,60	34	O. HMIDAT	279,60,	173,40
8	SIDI GACEM	277,00	172,900	35	EDIPAL	283,20	170,60
9	RABAHIA F27	266,85	170,10	36	ATHMANI	284,20	173,30
10	F N62	267,00	179,70	37	O.NSOUR	286,40	176,00
11	F4	267,70	18000	38	S.SLIMANE	284,20	181,10
12	TGHAT	266,80	178,60	39	TIFRIT	285,00	181,40
13	R.SONDAGE	268,20	179,50	40	FERME SEKRANE	284,10	181,90
14	H.RABBI FORAGE	2721,20	187,00	41	NEKHACHE	282,50	182,80
15	H.RABBI THERM.	270,00	184,80	42	NADHRI	283,30	183,10
16	H.RABBI SONDAGE	269,20	185,20	43	AIN ZERGA	274,50	176,70
17	SIDI AISSA	268,80	87,90	44	HMIDAT	273,70	187,90
19	AIN TBOUDA	265,41	162,85	45	E. KHALED	278,40	179,90
20	OUM RKHAIL	265,50	168,80	46	MATHNIA	279,2	184,00
21	AIN BEIDA	265,85	168,25	47	S. MIMOUN	270,30	184,40
22	A.BENT SOLTANE	268,30	173,10	48	A. BERGUIA	281,20	193,80
23	AIN ZERGA	275,15	175,65	49	FERME ROUX	276,80	194,80
24	AIN DECHRA	272,00	179,80	50	KERKAB	273,80	188,70
25	SOURCE POIRIERS	273,40	178,60	51	A. STIT	268,80	190,60
26	AIN TIFRIT	284,20	182,20	52	EPRO	270,30	187,80
27	G. ZAHZAH	280,50	188,50	18	TAMESNA	263,80	165,50

#### **4. Les conditions aux limites :**

L'aquifère karstique est libre sur toute la surface du plateau. Elle est captive sous le Callovo- Oxfordien et les marnes de Modz bab dans la vallée de Saida et devient captive vers l'Ouest.

Le substratum peut localement être constitué par l'un des niveaux argileux qui séparent les membres carbonatés de Bouloual, Ain Dez et Zerzour. Mais à l'échelle des bassins le substratum et le Trias reposent sur le Paléozoïque. Ce substratum est imperméable.

Contrairement au substratum qui constitue une limite vraiment étanche, le Callovo-Oxfordien comporte des bancs gréseux qui peuvent localement entrer en contact avec les dolomies. Certaines sources apparaissent ainsi sur le flanc est de la vallée de Saida. (Figure. 26)

Deux exemples très caractéristiques sont celui des "Eaux Chaudes" au Nord et celui de l'Ain Tebouda au Sud de la vallée.

##### **- Latéralement :**

Les limites extérieures de l'aquifère :

✓ Vers le Nord et l'Ouest :

A l'Ouest et au Nord-Ouest les limites pratiquement étanches, l'étude de la structure de l'aquifère montre que celui-ci est partiellement au contact avec le Callovo-Oxfordien au niveau de la bordure Ouest du fossé d'effondrement de la vallée de Saida. Dans la vallée, au Nord, l'aquifère très peu épais est en contact direct avec les marnes du Modz bab.

✓ Au Nord :

Il y a interruption de l'aquifère qui se termine en biseau sur les affleurements triasiques contre le horst de Tiffrit. Le long de cette interruption apparaissent des sources de débordement.

✓ Au Sud-Est et Nord-Est :

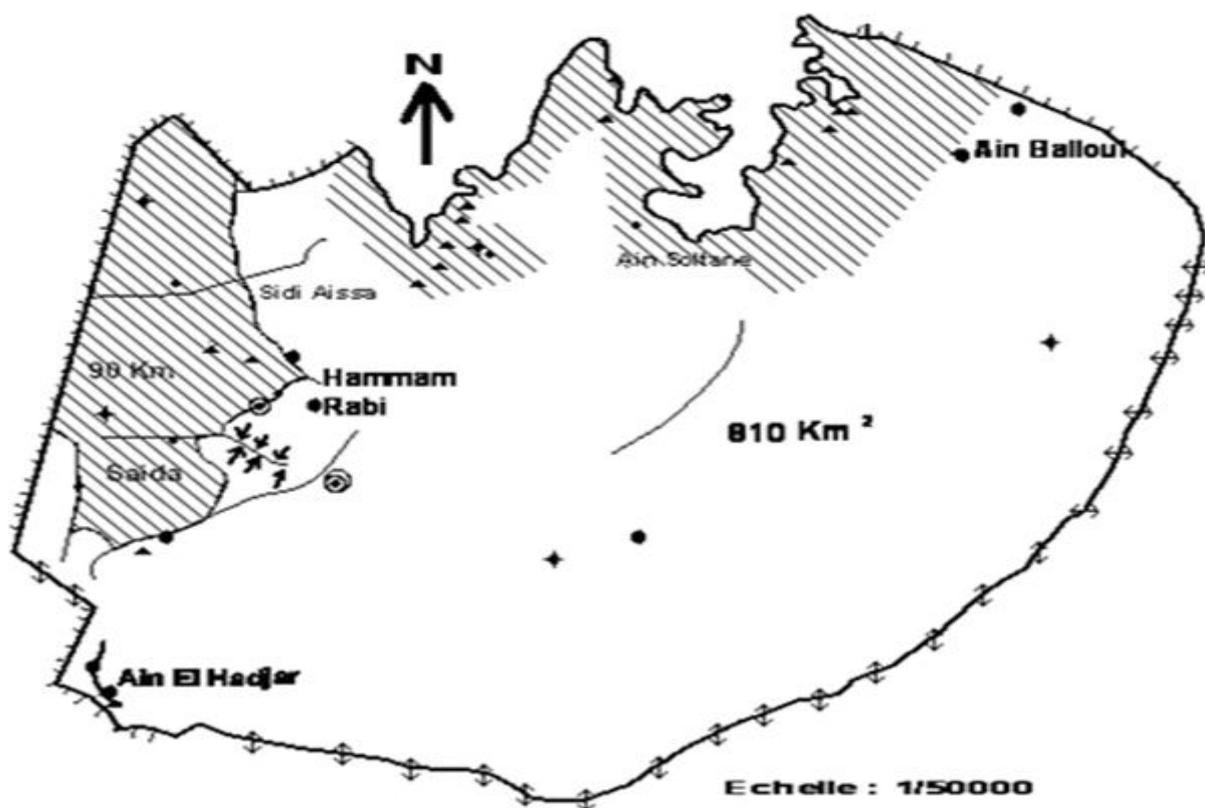
Dans ces directions, les lignes de partage des eaux limitent l'ensemble de la région étudiée.

✓ Au Sud :

Ces lignes correspondent avec la topographie et le pendage des couches qui s'inversent pour s'incliner vers la dépression du Chott-Chergui.

✓ A l'Est et au Nord-Est :

La même concordance s'observe notamment avec la topographie.



Parti Captive	
Linge de partage des Eaux Souterraines (Limites S et S-E de la nappe karstique)	
Contour imperméable (Faille à rejet important: limite O-NO et N-E)	
Zone de décharge: Contacte nappe Toarcien ou nappe socle Triaso-Palézoïque (limite N)	
Ligne tectonique interne importante du point de vue Hydrogéologique	
Ligne de drainage: plusieurs de sorties diffuse	
Source à débit supérieur à 100 l/s	
Source à débit de 10 à 100 l/s	
Source à débit inférieur à 10 l/s	
Forage et puits en exploitation	

Figure 26: Synthèse hydrogéologique de la nappe karstique

**- Limite séparant les différents bassins entre eux :**

Ce sont des lignes de partage des eaux, déterminées par le piézomètre uniquement, qui constitue ces limites. Celles-ci ne concordent pas avec le tracé des bassins versants topographiques.

Ainsi le bassin topographique de Tiffrit est envahi très largement par le bassin hydrogéologique de Saïda. Entre ces deux principaux bassins apparaissent deux enclaves hydrogéologiques constituées par le bassin des « Eaux Chaudes » (sous-bassin de Saïda) et la tectonique principale de Ain-Sultane. Ces quatre bassins hydrogéologiques s'articulent dans la zone tectonique principale déjà décrite entre Tiffrit et Oum-Djerane.

**Deuxième partie : Etude du fonctionnement des systèmes  
karstiques; (Rôle de la zone non saturée)**

**Chapitre I : Utilisation des traceurs climatiques  
pour la connaissance hydrogéologique des  
systèmes karstiques**

## **1. Utilisation de la température dans la caractérisation des systèmes karstique des Monts de Saïda**

### **Introduction**

La température est un paramètre physique qui s'est révélé très intéressant pour l'étude des systèmes karstiques en raison de la facilité d'acquisition des mesures et par les multiples informations qu'il transmet. Certains auteurs se sont penchés sur les mécanismes thermiques en essayant de quantifier les différents apports caloriques par les phénomènes conductifs (Roy et Benderitter, 1986 ; Benderitter et al, 1993) ou convectifs (Jeannin, 1990).

Les sources peuvent montrer une relation du point de vue thermique avec la température extérieur. Il s'agit alors d'aquifères très superficiels, du moins à proximité de l'émergence. Mais l'aquifère peut être à l'abri des variations saisonnières des températures. A l'émergence, les eaux ont alors des températures proches de la moyenne interannuelle de l'atmosphère.

Nous utiliserons la température essentiellement comme outil complémentaire à la connaissance des systèmes karstiques dans la région des Monts de Saïda, en particulier la caractérisation de la recharge par l'étude des variations thermiques aux exutoires et l'utilisation des relations altimétriques.

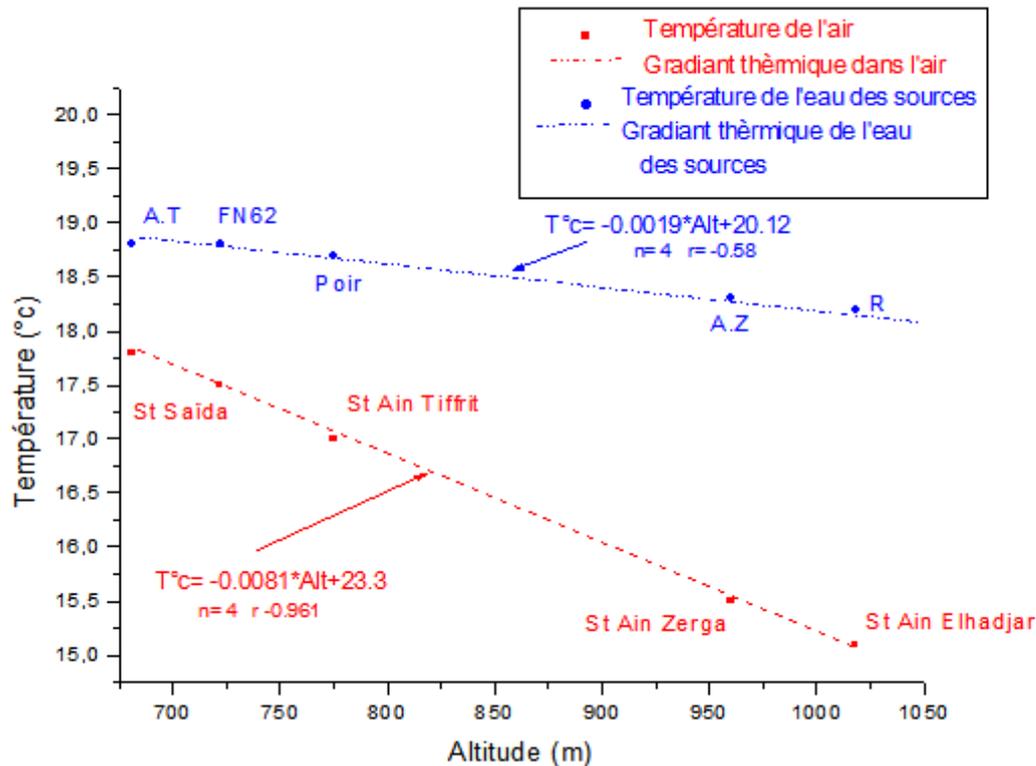
## **2. Equilibre thermique des sources à l'échelle annuelle**

### **2.1. Gradient altimétrique à l'échelle de la région des Monts de Saïda**

#### **2.1.1. Température de l'air**

Les stations météorologiques utilisées, pour déterminer le gradient climatique, couvrent un territoire assez important qui déborde largement notre terrain d'étude. Elles représentent au mieux les différents contextes rencontrés, montagne au sud et au nord, plateau, plaine. Cependant, comme pour l'étude des précipitations, ces postes climatiques ont des chroniques de données différentes et parfois restreinte. Pour notre étude nous avons utilisé les températures couvrant les périodes : 2004 à 2006 et 2014 pour les 4 stations. Nous avons déterminé pour notre période d'étude un gradient régional à l'échelle des Monts de Saïda (Figure. 27).

Nous avons remarqué que la relation température - altitude de l'air est hautement significative. La pente de  $-0,81^{\circ}\text{C}$  pour 100 m est proche de celles mentionnées dans la bibliographie (Mudry 1987).



**Figure 27: Gradients moyens des températures atmosphériques et des eaux des sources des Monts de Saïda (2014)**

### 2.1.2. Température des sources

Les études sur le karst ont établi qu'en général la température moyenne d'une source est égale à la température moyenne annuelle de l'air à l'altitude d'émergence de cette source (Trombe 1952). Cela suppose que l'eau qui transite à travers le système a eu le temps de se mettre à l'équilibre dans le réservoir. Mais en régime influencé le signal thermique de l'infiltration peut être transmis à l'exutoire d'où les variations observées au moment des crues. L'influence de ces eaux nouvelles sur le signal moyen dépendra alors du pouvoir mélanger du système. L'existence d'une zone noyée développée provoquera un amortissement du signal d'infiltration d'où une inertie thermique importante. Le signal annuel sera peu altéré. Par contre dans le cas d'un réservoir noyé réduite ou participant peu aux écoulements suivant les périodes hydrologiques (mauvaise transmissivité) le signal moyen pourra être perturbé. Seules les eaux d'étiage seront susceptibles de donner une température proche de celle de l'air.

Les auteurs ayant étudié la thermique du karst (Schoeller 1962 ; Andrieux 1974 ; Lacas 1975 ; Marjolet & Salado 1975 ; Mudry 1987 ; Lastennet 1994 ; Azzaz. 2008) ont montré que le déséquilibre thermique de l'eau à l'émergence provenait de la rapidité du transit à travers le système, l'eau n'ayant pas le temps d'acquérir la température stable du réservoir. Plus le système est karstifié, moins l'information thermique originelle est déformée. Par contre l'existence d'une zone noyée développée provoquera un amortissement du signal d'infiltration d'où une inertie thermique importante. Nous avons utilisé les quatre systèmes karstiques carbonatés pendant un cycle de notre étude couvrant les périodes de Mai 2004 à Février 2007 et Janvier 2014 à Janvier 2015 (Tableau 9).

**Tableau 9: caractéristiques des sources karstiques suivies et comparatif des moyennes de températures avec les valeurs calculées à partir des différents gradients**

Source	Code	Altitude (m)	contexte	Exposition du B V	Période de suivi	Moy des T (°C)	T°C des sources calculée	
							Gradient T°C (air)	Gradient T°C (eau)
Ain Zerga	A.Z	960	moyenne montagne	Nord	Mai 04 – fév 07 jan 14 –jan 15	18.3	15,5	18.3
Poirier	Poi	876	plateau	Nord	jan 14 –jan 15	18,4	17	18.7
Ain Teghat	A.T	725	plateau	Nord	jan 14 –jan 15	18,82	17.8	18.8
Forage N62	FN62	760	plateau	Nord	Mai 04 – fév 07 jan 14 –jan 15	20,1	17.5	18.8
Sc Ronde	R	1018	Moyenne montagne	Sud	Mai 04 – fév 07	17.03	15.1	18.2

Le gradient établi à partir de ces données est le suivant (Figure. 28)

$$T^{\circ}c = -0.0019 * Alt + 20.1 \quad r = -0.58 \quad n = 4$$

On remarque que la relation moyenne des températures – altitude des émergences est significative

La pente mesurée -0,19 °C pour 100 m est sensiblement faible que celle issue de la température de l'air (-0,81°C). Ce décalage observé qui est de l'ordre de plus de 0,5°C peut être expliqué par un transit final rapide des eaux entre les réserves situées en altitude et les émergences, qui n'ont pas le temps d'équilibrer leur température avec celle de l'encaissant situé plus en aval (à plus faible altitude). En effet, les circulations rapides, réservoirs superficiels – émergences, à travers les réseaux karstiques peuvent donc préserver en partie le marquage froid et par conséquent réduire l'amplitude des températures, ce qui explique la pente relativement faible des eaux des sources par rapport à celle de l'air.

### 2.1.2.1. Etude des cycles thermiques des sources karstiques

Les quatre sources plu forage karstiques mentionnées plus haut ont fait l'objet d'un suivi de température pendant les période (2014) et (2004-2007) afin de permettre l'analyse des variations thermiques en fonction du temps et de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes carbonatés. Nous avons pour cela confronté les courbes de température des différentes sources avec l'évolution du signal atmosphérique et de la pluviosité sur cette période.

#### 2.1.2.1.1. Application aux systèmes karstiques suivis durant l'étude

Les sources étudiées se trouvaient dans des contextes différents de par l'exposition des bassins ou leur topographie. Et l'utilisation d'un gradient local de température rend en compte les différences climatiques à l'échelle de ces bassins d'où les décalages ne sont pas importants qui sont observés entre les moyennes thermiques annuelles des sources et celles de l'air. Nous avons donc tenté à titre indicatif de comparer les températures mesurées aux sources avec les gradients locaux déterminés plus haut en fonction des caractéristiques des bassins d'alimentation (Tableau. 10)

**Tableau 10: Caractéristiques thermiques et hydrodynamiques des systèmes étudiés**

Période : 2014								
Source	Altitude (m)	T (°C) Moy	T (°C) min	T (°C) max	Ampl	Cv (%)	Débit / h moy	Débit / h max
A Zerga	960	18.3	16.27	18.68	2.41	4	269 l/s	
Poirier	775	18.4	18,08	18,7	0.62	1	36 cm	43.3 cm
A Teghat	681	18.82	17,48	20,28	2.8	5	1.45 l/s	1.63 l/s
ForaN62	722	20.1	19,33	20,53	1.2	2	71 l/s	
Période : 2004-2007								
A Zerga	960	18.35	17	19.8	2.8	4	269 l/s	
ForaN62	722	21.8	21,5	23	1.5	2	71 l/s	
S Ronde	1018	17.03	14	21	7	12	22 l/s	29,3 l/s

Cette étude a de plus montré les phénomènes suivants :

- Les mesures de température effectuées au versant nord montrent des amplitudes thermiques plus faibles qu'au versant sud.
- Les mesures effectuées en versant nord montrent des variations d'amplitude qui ne sont

pas corrélées avec les hauteurs ; cela on peut l'expliquer par le taux de développement karstification de chaque système. Pour les systèmes les plus karstifiés ont une amplitude thermique plus que les systèmes les moins karstifiés.

Les différences observées entre les sources nous permettent donc de classer les systèmes les uns par rapport aux autres et de nous donner une première idée sur le fonctionnement de ces systèmes karstiques.

Au vu des courbes de température et des paramètres reportés dans le tableau 11, nous pouvons distinguer grossièrement deux groupes de systèmes. On constate en effet que :

- les sources Ain Zerga, Poirier, Ain Teghat et Forage N62 sont moyennement stables en température avec des amplitudes et des coefficients de variation légèrement faible ( $Cv\%=1$  ;  $Cv\%=5$ ).

- A l'inverse la source Ronde montre des variations nettement plus importantes, le coefficient de variation atteindre ( $Cv\% = 12$ ).

#### **2.1.2.1.1.1. Les sources moyennement stables**

Ces sources montrent deux sous groupes :

- les sources des systèmes perchés de haute altitude ( $> 750$  m) dont les températures sont légèrement stables avec des pics exceptionnels à savoir : Ain Zerga et Poirier (Figure 28).

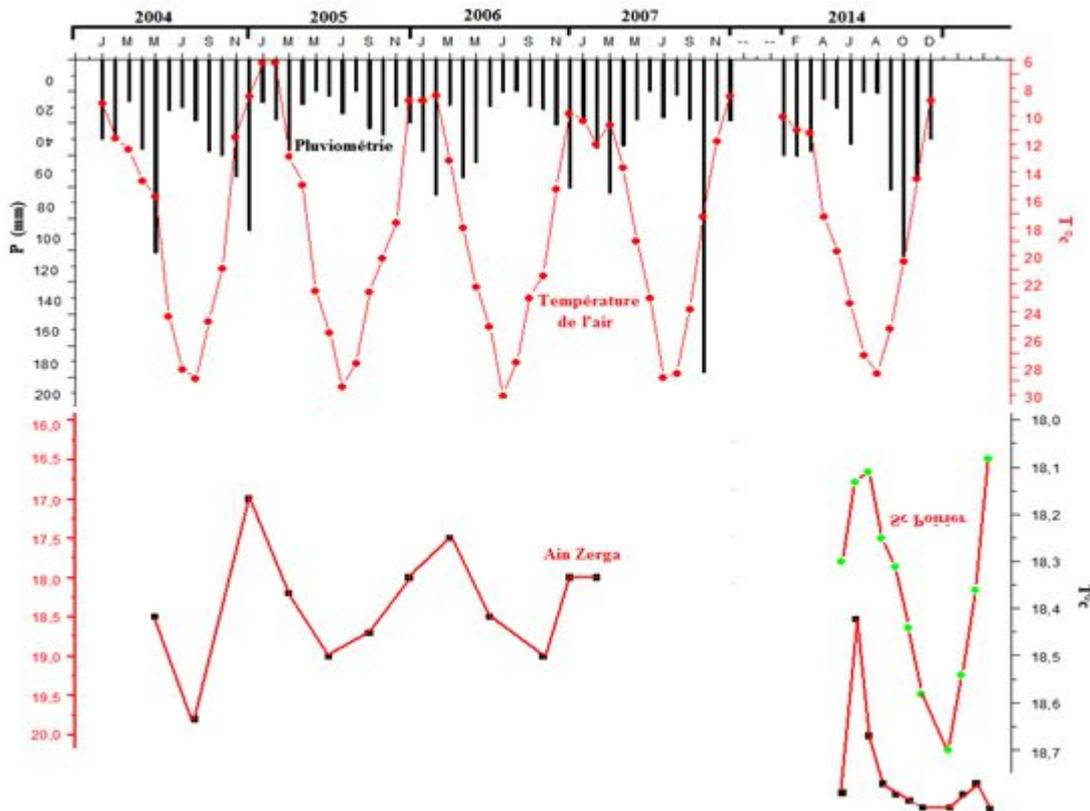
- les sources de basses altitudes ( $<720$  m) dont les variations thermiques relativement faibles avec cependant une sinusoïdale mieux marquée à savoir : Forage N62 et Ain Teghat (Figure 28).

Les sources de Ain Zerga possède une variation légère température au long des quatre cycles (2004 - 2006) et 2014. L'influence des périodes de reprise est très peu sensible puisque la source montre une baisse de 1,4 à 0,2°C. Le débit de cette source peut par contre montrer des hausses significatives en période de hautes eaux (automne, printemps) et atteindre des valeurs plus de 270 l/s.

La source poirier située dans un contexte très similaire à Ain Zerga montre un comportement thermique comparable. L'influence de la température atmosphérique est très peu marquée avec une augmentation de 0.02 à 0.14 en étiage. La hauteur du débit de cette source peut atteindre des valeurs significatives en période de hautes eaux (automne, printemps) ( $h>31$ cm).

Ces différentes observations indiquent que les systèmes possèdent des réserves régulées thermiquement, situées en altitude, drainée assez rapidement vers l'exutoire pour que le signal thermique soit conservé. Egalement, les dénivelées impluvium-émergence relativement faibles

(186m – 230m) notamment en altitude (1146 -1005m) favorisent la stabilité du signal thermique des eaux des sources.

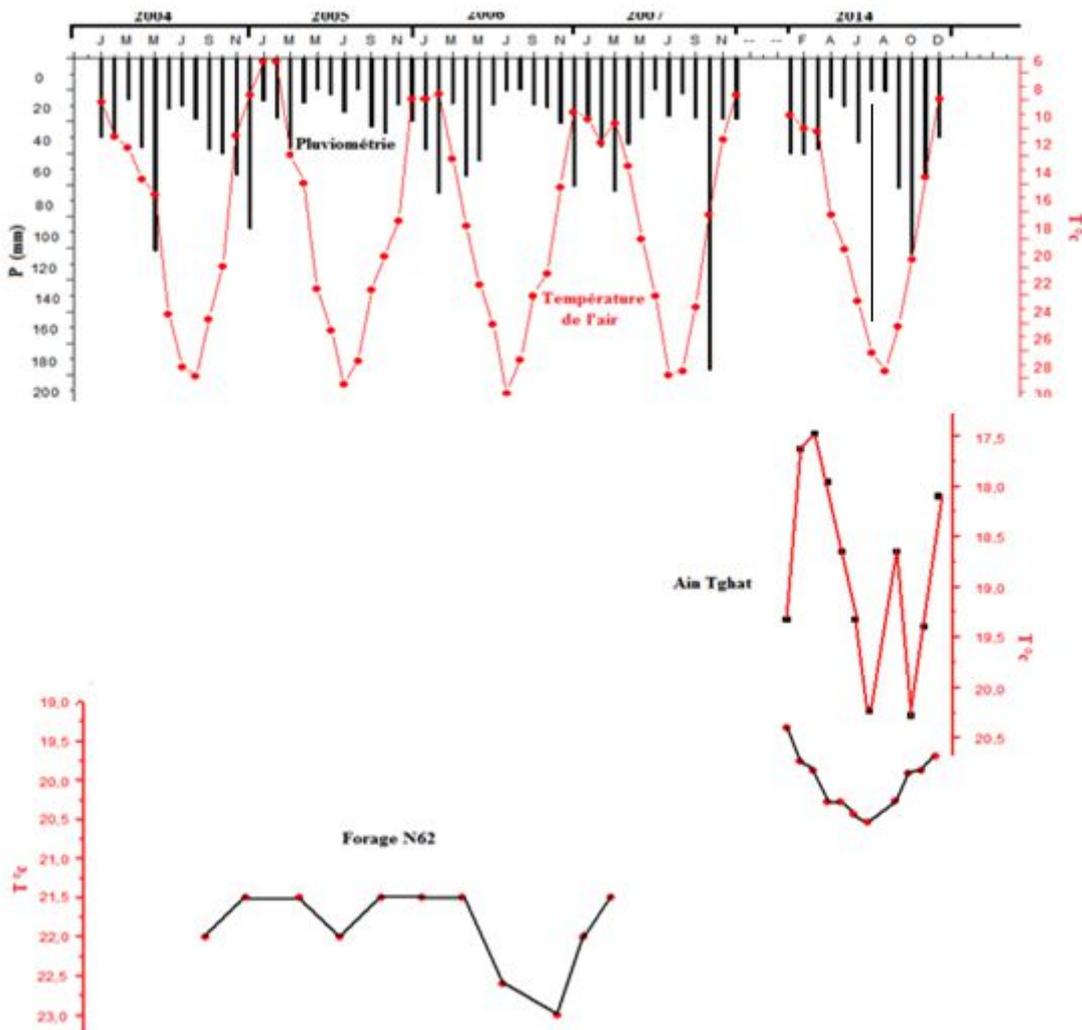


**Figure 28: Evolution de la température dans les systèmes Karstiques de la source Ain Zerga et la source Poirier dans les Monts de Saïda (2004 – 2014)**

Le Forage N62 montre de faibles variations thermiques ( $Cv\% = 5$ ) avec cependant une sinusoïde légèrement marquée. Nous avons vu sur le gradient thermique (Figure 27) que les eaux du forage N62 sont relativement proches des gradients thermiques (eau et air). Ce comportement thermique et hydrodynamique indique un système épikarstique de plus ou moins mauvaises circulations dans le réservoir et un faible degré d'organisation, ce qui entraîne par conséquent une relativement importante inertie du signal thermique.

La source Ain Teghat située au pied du premier relief nord à une altitude de 681 m, restitue une eau dont l'équilibre thermique n'est pas réalisé avec l'encaissant, à cause de la localisation en altitude de ses réserves. En crue comme en tarissement, cette source draine des eaux à transit rapide entre les réserves et la source. Les circulations peuvent donc préserver en partie le marquage froid pour de telles émergences de pente. Il s'agit donc d'un régime thermique "stable" (régime transitoire stable).

Toutefois, le pic de température de 20,2 °C à la suite de l'étiage de 2014 (débit relativement faible est de 1,3 l/s), indique l'arrivée des eaux de la zone noyée. (Figure 29)



**Figure 29: Evolution de la température dans les systèmes Karstiques du Forage N62 et la source Ain Teghat dans les Monts de Saïda (2004 – 2014)**

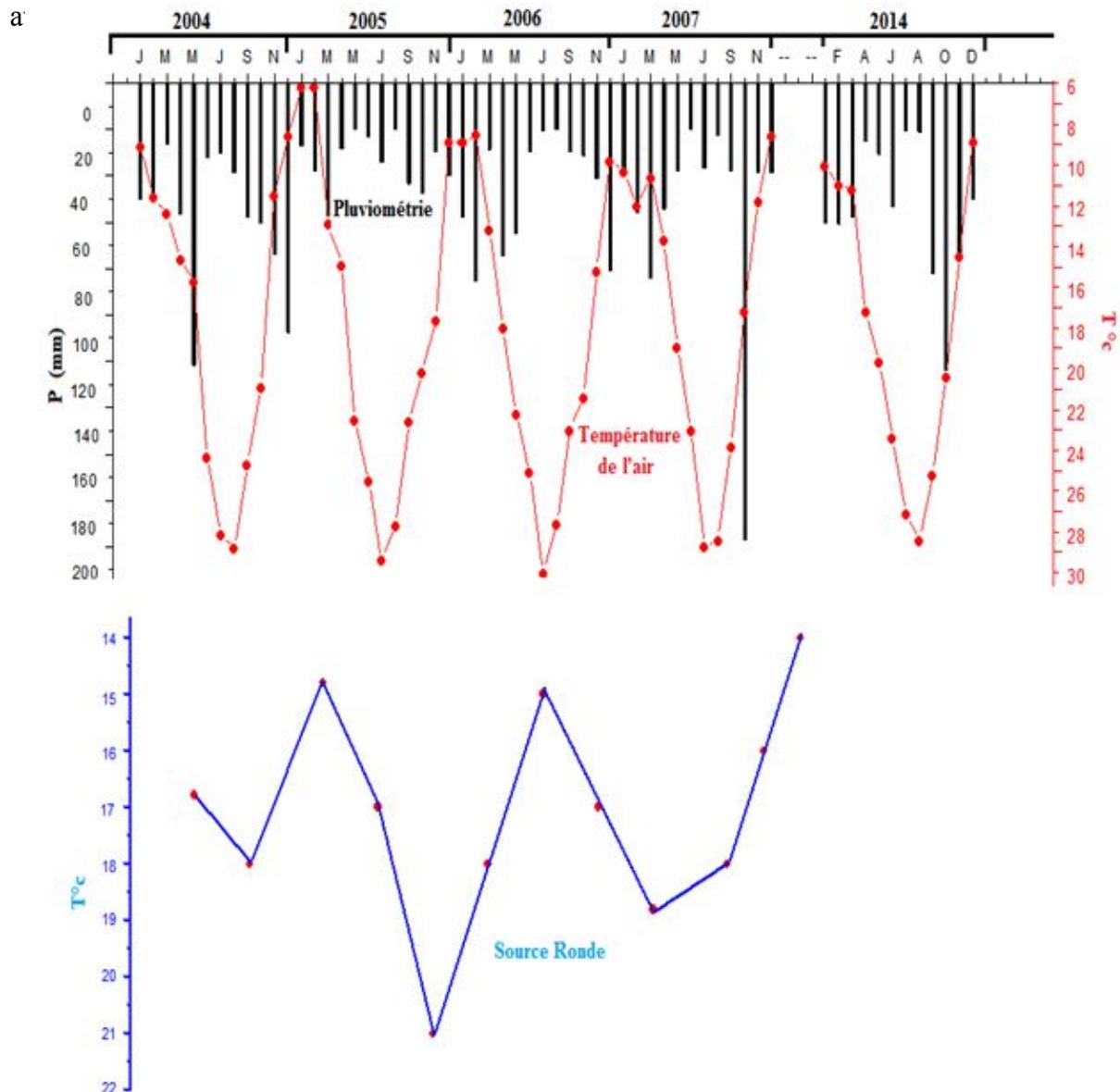
**2.1.2.1.2. La source à forte variations thermiques**

La source Ronde montre la plus forte amplitude ainsi que des coefficients de variation plus importants. Elle se caractérise de plus par des débits faibles.

La source Ronde située sur le versant sud du massif des Monts de Saïda à une altitude de 1018 m. L'amplitude de cette source atteindre la valeur de ( $A_m = 7$ ) et son coefficient de variation a une valeur de ( $C_v\% = 12$ ).

Nous avons vu auparavant que cette source montre une moyenne annuelle proche des relations générales températures (air et eau)-altitudes avec des valeurs ( $T_{air} = 15.3^{\circ}C$  et  $T_{eau} = 17.03^{\circ}C$ ) (voir Figure 27).

On peut remarquer que la courbe réagit rapidement aux périodes pluvieuses à condition que celles-ci soient suffisamment importantes. Elle suit quasiment le cycle saisonnier de l'atmosphère. Ces observations indiquent que l'émergence restitue une eau en quasi-équilibre



**Figure 30: Evolution de la température dans le système Karstiques de la source Ronde dans les Monts de Saïda (2004 – 2014)**

L'influence directe de la température atmosphérique (saisons) sur les eaux de ces différentes sources, la réaction rapide aux évènements pluviométriques et les faibles débits observés impliquent des aquifères de la zone non saturé avec de faibles réserves. Cette hypothèse est confortée par le cadre physique de ces points d'eau. L'épaisseur des calcaires étant

de plusieurs centaines de mètres, Cette source située dans la zone non saturée du système karstique des Monts de Saïda, elle est caractéristique d'un aquifère épikarstique. (figure 30)

### **3. Discussion**

Les mécanismes de transfert du signal thermique restent complexes et dépendent étroitement des particularités de chaque système. Il est clair que l'altitude, donc la température atmosphérique, joue un rôle fondamental sur les valeurs moyennes des sources de la région de des Monts de Saïda. Les variations en cours de cycle sont par contre dépendantes de nombreux facteurs.

L'influence thermique dans les aquifères superficiels, peut provenir:

- soit directement de la surface soit par conduction à travers la roche (Benderitter et Roy, 1986),
- soit par l'intermédiaire des circulations d'air dans la zone non saturée (Jeannin, 1990)
- Mais surtout par les circulations d'eau (infiltration).

Cela suppose dans le premier cas un aquifère très superficiel car l'amortissement du signal en profondeur est rapide (sources Ronde) et dans le deuxième cas une bonne ventilation dans la zone vadose du karst (Ain Zerga et Source Poirier) car le pouvoir calorifique de l'air est faible comparé à l'eau.

Le signal thermique de l'infiltration reste donc prédominant dans les variations observées. Il est clair que celles-ci dépendent étroitement des périodes hydroclimatiques pour l'ensemble des systèmes. Les réponses sont par contre spécifiques de chaque source. Elles sont liées à la structure même de l'aquifère donc au fonctionnement hydrodynamique du système (vitesse de transit) Mais aussi à la présence ou non de réservoirs intermédiaires (amortissement par mélange) entre la surface et l'exutoire.

### **4. Conclusion**

L'utilisation de la température au cours de cette étude s'est révélée intéressante et particulièrement appropriée à la connaissance des systèmes karstiques. Nous avons bénéficié d'un grand nombre de cycles de température très divers ce qui nous a permis d'établir des distinctions sur le fonctionnement et sur la structure des différents systèmes étudiés.

Nous avons vu que nous pouvons aller assez loin dans l'interprétation des phénomènes thermiques qui nous transmettent des messages clairs quant au fonctionnement des sources et nous renseignent sur les capacités de stockage de ces systèmes. Ces observations doivent bien sûr être juxtaposées à l'étude d'autres paramètres, elles permettent néanmoins de bien poser les problèmes et d'effectuer une première classification des systèmes étudiés. Cette approche préliminaire permettra ainsi de mieux aborder l'étude hydrochimique.

L'étude des moyennes thermiques à l'échelle du cycle nous donne un premier aperçu de l'état d'équilibre des systèmes et permet de déterminer les anomalies de température. Cette démarche est essentielle pour expliquer et comprendre les variations thermiques durant le cycle.

Nous avons défini deux grands groupes de sources à l'aide des courbes de température obtenues pendant les périodes 2004 - 2006 et 2014 ainsi que des paramètres calculée à partir de ces séries (amplitude, coefficient de variation). Ces groupes de sources sont: les sources moyennement stables et les sources à forte variation thermique.

Le gradient des moyennes thermiques à l'échelle des trois cycles de : 0,81 °C par 100 m de dénivelée nous a permis d'évaluer l'état d'équilibre des systèmes et de déterminer les anomalies de température. Ainsi les sources perchées de hautes altitudes drainent des eaux en quasi équilibre thermique avec la température atmosphérique des émergences.

Néanmoins, les groupes considérés englobent bien les différents types d'aquifère que l'on rencontre en milieu calcaire, c'est-à-dire épikarst, milieu fissuré, grand système plus ou moins karstifié.

Les sources des versants et des piedmonts écoulent des eaux dont le stockage se situait à une altitude supérieure à celle de l'émergence, il s'agit donc d'un déséquilibre thermique plus ou moins stable. Cette classification n'est pas exhaustive et il est certain que d'autres cas peuvent être possibles.

## **Chapitre II : Etude hydrochimique des sources**

## **Introduction**

L'hydrochimie est un moyen complémentaire privilégié d'étude de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques. Dans le cas des aquifères carbonatés, elle s'intéresse à la manière dont les éléments chimiques en solution transitent à travers le karst (Bakalowicz, 1979; Lepiller, 1980; Mudry, 1987).

Les fluctuations des paramètres physico-chimiques dans le karst restent sous l'étroite dépendance des variations du régime hydraulique. Ceci tient au fait que la minéralisation acquise par les eaux karstiques dépend à la fois de l'environnement géochimique qu'elles rencontrent au cours de leur transit, Mais également de leur temps de séjour au contact de cet environnement. On conçoit donc aisément que l'évolution de la chimie de l'eau dans le karst sera très différente selon que ces eaux auront transité rapidement ou non dans le système et selon qu'elles auront séjourné plus ou moins longtemps dans la zone d'infiltration ou bien dans la zone noyée.

La particularité de l'aquifère karstique réside dans l'existence d'axes de drainage où les écoulements sont rapides et peu propices à la réalisation de mélanges, ceci rend possible l'étude de l'hétérogénéité spatiale de l'aquifère à partir de l'examen de la variabilité temporelle du chimisme des eaux à son exutoire (Bakalowicz, 1979).

### **1. Approche hydrochimique**

L'eau est l'élément principal qui façonne les roches et transforme le paysage. Lors de son écoulement, elle dissout des minéraux, se sature et précipite d'autres minéraux. Par la suite, elle acquiert un chimisme qui est le résultat de ses interactions avec la roche et de l'influence des facteurs externes naturels ou anthropiques.

L'eau joue donc deux rôles complémentaires : (Bakalowicz, 1979)

- 1- Réactif chimique qui dissout les minéraux et les matières organiques
- 2- Agent transporteur d'énergie et de matière.

Le chimisme des eaux souterraines dépend essentiellement de la composition des milieux traversés, la structure géologique, les conditions d'écoulement et les conditions physico-chimiques locales et du temps de séjour dans chacun d'eux. La minéralisation d'une eau de source karstique subit des variations au cours du temps. L'étude de ces variations est susceptible d'apporter des renseignements sur le fonctionnement du karst (Drogue, 1969 ; Delay, B., and A. Aminot, 1974 ; Bakalowicz, 1979 et 1980 ; Muet, 1985; Blavoux et Mudry, 1986). Le pas de temps de l'étude hydrochimique conditionne l'interprétation des résultats.

L'hydrochimie est la connaissance des caractéristiques chimiques et physico-chimiques des eaux, des processus de leur acquisition et de leur évolution, ainsi que des lois qui régissent des échanges entre l'eau, le sol et le sous-sol, ou interaction eau/roche, elle inclut la géochimie des isotopes.

Elle permet, avant l'exploitation des eaux souterraines pour l'AEP ou pour l'irrigation, d'indiquer les eaux qui possèdent une qualité relativement bonne.

Les résultats obtenus permettent de dresser des cartes d'isoteneurs et des diagrammes de classification des eaux (Schoeller-Berkaloff, Piper), l'analyse statistique multivariée des éléments hydrochimiques, etc.

Plusieurs facteurs peuvent intervenir dans l'acquisition du chimisme de l'eau. Dans le cas présent, l'étude portera sur la comparaison du chimisme des eaux des sources principales dans le bassin afin de dégager des caractéristiques liées aux aquifères qu'elles drainent.

Les cinq principales sources dans les Monts de Saïda ont fait l'objet de prélèvements réguliers à pas de temps trimestriel durant la Période (Mai/2004 – Février /2007) les sources sont Ain Zerga, Forage N62 et la Source Ronde. Et à pas de temps mensuel durant la période (Janvier/2014 – Janvier/2015) : Ain Zerga, Forage N62, Ain Teghat et la source Poirier. Les paramètres suivants ont été mesurés pour l'ensemble des prélèvements : alcalinité, conductivité, pH, température,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{NO}_2^{-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4^{-}$ ,  $\text{SiO}_2^{+}$ .

## **2. Facteurs responsables de la chimie des eaux**

Tous les minéraux sont plus ou moins solubles dans l'eau. Cette solubilité n'est pas identique pour tous les minéraux : elle dépend de la nature du minéral, de variables physiques (température et pression) et de la composition chimique du solvant (l'eau).

Le temps joue un rôle principal dans les processus de dissolution. L'acquisition de la minéralisation d'une eau n'est pas instantanée, plus le contact avec la roche est long et plus l'eau aura le temps de se dissoudre et de se minéraliser pour tendre vers un équilibre fixé par les constantes de dissolution de chaque minéral. Certains facteurs peuvent faciliter la dissolution comme la surface de contact eau/roche et le régime d'écoulement. Les activités anthropiques peuvent également constituer un apport d'éléments importants au cas où leurs rejets aboutissent au karst noyé.

Généralement la minéralisation de l'eau résulte de trois facteurs :

1- le type de roche (minéralogie et taille des grains) : c'est le facteur principal qui donne les caractéristiques chimiques à l'eau. La minéralisation ou TDS (Total Dissolved Solids en mg/l) et la conductivité ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) sont fortement liés à la chimie de la formation géologique aquifère. Le TDS est élevé pour des eaux circulant sur des roches salines, gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), halite ( $\text{NaCl}$ ) ; il est associé à de fortes concentrations en Ca, Mg, Na, K, Cl et  $\text{SO}_4$ . Au contraire, le TDS est faible pour des eaux circulant dans des milieux granitiques, basaltiques et sableux quartziques ;

2- Le climat qui détermine le débit d'écoulement, la température et la pression de l'eau dans la nappe;

3- Les conditions d'écoulement déterminant spécialement la présence d'une phase gazeuse et le temps de contact entre l'eau et la roche.

Le deuxième et troisième facteur sont particulièrement responsables du taux de dissolution (masse de roche que l'eau peut dissoudre) qui est lié au débit d'écoulement et du contenu en ions qui dépend du temps de résidence des eaux dans l'aquifère. Plus le contact avec la roche est long et plus l'eau a le temps de se minéraliser jusqu'à ce que l'équilibre eau/minéral soit atteint. C'est en partie pour cela que les eaux souterraines, comme les eaux thermales et minérales, possédant un long temps de résidence, sont beaucoup plus chargées que les eaux de surface ou les eaux souterraines peu profondes, ayant circulé sur le même type de roches.

Enfin, une partie de la minéralisation de l'eau peut dépendre des facteurs externes naturels, comme la pluie, les poussières (sels marins et poussières continentales), des facteurs anthropiques dont les plus importants sont la pollution industrielle enrichissant l'air en  $\text{NO}_3$  et  $\text{SO}_4$  (responsable des pluies acides anthropiques), des produits chimiques comme le plomb et les hydrocarbures, les eaux usées qui concentrent les chlorures de sodium, potassium, les borates et enfin l'activité agricole qui peut introduire des nitrates et des sulfates.

## **2.1. Systèmes chimiques impliqués dans la chimie des eaux**

Dans ce paragraphe, nous donnerons un aperçu global sur les systèmes chimiques impliqués dans les eaux étudiés. Le système triphasique concernant la chimie des eaux carbonatées sera plus particulièrement détaillé ci-dessous.

### **2.1.1. Systèmes diphasiques**

Il s'agit des sels comme le chlorure, sulfate et nitrate. Ils sont liés généralement à la présence d'évaporite ou de polluant. Dans les eaux polluées,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  sont souvent d'origine domestique alors que  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  proviennent des fertilisants.

### **2.1.2 Systèmes triphasique : exemple de la chimie des eaux carbonatées**

Le système  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-carbonates}$  a été étudié en détail par Roques (1962) et par d'autres. Roques a été le premier à montrer les relations à prendre en compte entre les trois phases afin de décrire l'état de la solution et prédire son évolution.

Les concentrations en  $\text{HCO}_3^-$  et en  $\text{Ca}^{2+}$  sont entièrement déterminées par le contenu en  $\text{CO}_2$ , qui est donné par la pression partielle en  $\text{CO}_2$  ( $\text{pCO}_2$ ), et par la modification des conditions d'équilibre. La modification des conditions d'équilibre est donnée par la différence entre le pH d'équilibre de la calcite et le pH mesuré, de même pour la dolomite (pH d'équilibre de la dolomie). Cette différence ( $\text{dpH}$ ) n'est autre que l'indice de saturation de la calcite ou la dolomite ( $\text{ISc}$  ou  $\text{ISd}$ ) (Back et al. ,1966).

Ces deux variables  $\text{pCO}_2$  et  $\text{ISc}$  contrôlent totalement le système  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-carbonates}$ . Les concentrations en Ca, Mg,  $\text{HCO}_3^-$ , ainsi que le pH, y dépendent totalement. C'est pourquoi les deux variables,  $\text{pCO}_2$  et  $\text{ISc}$ , sont les indicateurs qui permettent de caractériser l'état de l'eau par rapport aux conditions d'écoulements et à son temps de contact avec la roche.

#### **2.1.2.1. Pression partielle en $\text{CO}_2$ ou $\text{pCO}_2$**

Le contenu en  $\text{CO}_2$  peut être exprimé en mg/l ; Mais il est préférable de l'exprimer en  $\text{pCO}_2$  comme un pourcentage de la pression atmosphérique totale. Ceci permet en calculant la  $\text{pCO}_2$  de comparer le contenu en  $\text{CO}_2$  dans les aquifères et d'expliquer des variations dans le temps et dans l'espace qui sont les conséquences de processus géologiques et hydrogéologiques. La variation dans l'espace montre quatre effets différents (Bakalowicz, 1994)

1- Un effet de nature du sol et du couvert végétal : le  $\text{CO}_2$  provenant des sols peut varier de 0.4 à 5%, il dépend de la nature du sol et du couvert végétal. La forêt produit plus de  $\text{CO}_2$  que les prairies et les terres cultivées.

2- Un effet d'altitude : plus l'aquifère est élevé, et plus la  $\text{pCO}_2$  est basse, car la production du  $\text{CO}_2$  dans les sols est thermo-dépendante. Les sources de haute montagne ont des  $\text{pCO}_2$  proches de 0.2%, alors que les sources dans les vallées ont des valeurs allant de 0.8 à 1 %.

3- Un effet d'aération : plus la zone d'infiltration est aérée, plus la  $p\text{CO}_2$  est basse. Généralement l'aération résulte de grandes galeries ou grottes qui sont en relation avec le milieu extérieur ( $p\text{CO}_2 < 0.1\%$ )

4- Une production interne de  $\text{CO}_2$  généralement dans les zones tectoniquement actives où du  $\text{CO}_2$  profond provient des processus de décarbonations et du dégazage du manteau terrestre. La  $p\text{CO}_2$  peut alors dépasser 10%.

#### **2.1.2.2. L'indice de saturation IS**

Le calcul de cet indice permet d'évaluer le taux de saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux (calcite, dolomite,...).

Si  $IS < 0$ , l'eau est sous-saturée, ce qui signifie que l'eau va dissoudre de la calcite jusqu'à atteindre l'équilibre.

Des valeurs proches de zéro ( $-0.05 < IS < 0.05$ ) sont significatives d'eau en équilibre avec la roche si le temps de résidence est suffisamment long.

Si  $IS > 0$ , l'eau est sursaturée, ce qui signifie que l'eau va précipiter de la calcite.

Dans le système calco-carbonique, la sous-saturation de l'eau circulant sur les carbonates est reliée à des temps de résidence courts des eaux en contact avec la roche. La sursaturation est liée à des temps de résidence longs ou à des dégazages dans l'aquifère.

### **3. Description des données**

La description peut être faite par plusieurs méthodes graphiques. Certains classent les échantillons suivant leurs compositions chimiques dans des diagrammes et d'autres décrivent la variation d'un paramètre en utilisant des histogrammes et d'autres techniques dérivées.

Dans cette optique et afin de suivre l'évolution du chimisme et de tenter de connaître l'origine des apports et le mécanisme des eaux karstiques des Monts de Saïda, nous avons procédé à des analyses d'espacement variable ; ainsi plusieurs campagnes et suivis ont été réalisés.

- campagnes de prélèvement (Mai et Novembre 1992);
- suivi trimestriel et mensuel pour la connaissance générale des eaux sur des secteurs choisis (Ain Zerga, Forage N62, Source Ronde, Ain Teghat et la source Poirier) (Mai/2004 – Février /2007) - (Janvier/2014 – Janvier/2015).

Les principaux objectifs de l'hydrochimie des eaux des Monts de Saïda se résument comme suit :

- caractériser chimiquement l'eau souterraine en fonction de la nature du réservoir ;
- montrer l'évolution spatiale et temporelle du chimisme des eaux souterraines ;
- traiter statistiquement les résultats des campagnes et des suivis ;
- évaluer la qualité des eaux souterraines.

### **3.1. Composition chimique des sources de la nappe karstique des Monts de Saïda**

#### **3.1.1. L'échantillonnage**

L'échantillonnage réalisé est représentatif de l'ensemble des types d'eau. Les différentes campagnes de prélèvement systématique réalisées des trois sources (source Ain Zerga, source Ronde, Forage N62, source Poirier et Ain Teghat) ont permis d'obtenir un cliché instantané des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe karstique des Monts de Saïda.

#### **3.1.2. Mesures physiques et analyses chimiques**

- Les mesures physiques (conductivité électrique, température et pH) sont réalisées sur place.
- Les analyses chimiques ont été effectuées dans le laboratoire d'analyse d'eau de l'A.N.R.H d'Oran.

Les paramètres qui ont fait l'objet d'analyses sont les suivants : alcalinité, conductivité, pH, température,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_2$ .

- Les méthodes d'analyses adoptées sont multiples :
  - dosage volumétrique a été effectuée pour :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{HCO}_3^-$ .
  - spectrophotométrie pour :  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$ .
  - spectrophotomètre à flamme pour :  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ .

### **4. Caractéristiques géochimiques**

L'hydrogéochimie fournit un ensemble d'outils et de méthodes permettant de comprendre le fonctionnement du système karstique. En effet, la variation du chimisme d'une source karstique au cours d'un cycle hydrologique ou au cours d'une crue permet d'analyser le fonctionnement et la structure de l'aquifère karstique. L'hydrogéochimie présente un grand nombre de variables d'identification et de méthodes de reconnaissance de diverses modalités d'infiltration, de l'importance des réserves noyées et de leur organisation.

Les éléments chimiques caractéristiques de l'aquifère ont été décrits au début de ce chapitre. Chaque prélèvement d'eau à la source est caractérisé par les variables suivantes : température (T), pH, conductivité (C), bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), chlorures ( $\text{Cl}^-$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), pression partielle de  $\text{CO}_2$  équilibrante de l'eau ( $p\text{CO}_2$ ), indice de saturation par rapport à la calcite ISc et par rapport à la dolomite ISd,...

Devant le nombre important de variables et de données ainsi recueillies, nous avons eu recours pour l'interprétation, à l'analyse en composantes principales. Cette méthode de traitement est bien connue pour une description objective des tableaux de données ; elle permet une mise en évidence de facteurs à l'origine de l'évolution des variables et de leurs relations. Au total, trois points d'échantillonnage ont été choisis : la source d'Ain Zerga, la Source Ronde et le Forage N62, source Poirier et Ain Teghat. Les cinq sources seront décrites brièvement

#### **4.1. Validité des données de terrain et méthodes d'interprétation**

La balance ionique est un moyen de détecter la majorité des erreurs commises. L'erreur sur la balance ionique est donnée en pourcentage par la formule suivante :

$$\text{Balance ionique (BI)} = 100 * (\text{SA} - \text{SC}) / (\text{SA} + \text{SC})$$

Où : SA = somme des anions =  $\text{HCO}_3^-_{\text{tot}} + \text{Cl}^-_{\text{tot}} + \text{SO}_4^{2-}_{\text{tot}} + \text{NO}_3^-_{\text{tot}}$

Et SC = somme des cations =  $\text{Ca}^{2+}_{\text{tot}} + \text{Mg}^{2+}_{\text{tot}} + \text{Na}^+_{\text{tot}} + \text{K}^+_{\text{tot}}$

Si BI n'appartient pas à l'intervalle (-5%, +5%), l'analyse est entachée d'une trop forte erreur et l'échantillon n'est pas gardé.

En réalité, la balance ionique doit être calculée d'une façon rigoureuse, en prenant en compte les concentrations totales de toutes les espèces dissoutes, et non pas les concentrations fournies par les analyses. En effet la concentration d'un composé donné par une analyse chimique comprend non seulement l'ion lui-même, Mais aussi toutes les paires d'ions et les complexes minéraux contenant cet ion. Par exemple le dosage du calcium par complexométrie donne la teneur en calcium minéral total présent dans la solution, soit :

$\text{Ca}^{2+}_{\text{tot}} = \text{Ca}^{2+} + \text{CaHCO}_3^+ + \text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4$  (Les deux derniers termes n'interviennent pas dans la balance)

Cependant, toutes les erreurs ne peuvent pas être détectées à ce stade. Les erreurs classiques sont notamment des inversions d'échantillons entre séries différentes, pendant l'analyse (erreur de référence), ou bien des erreurs systématiques sur un ion particulier, cas montrant une relation entre BI et l'ion concerné. Ces erreurs peuvent être mises en évidence par le traitement statistique, au moyen de l'analyse en composantes principales (ACP). Des erreurs de pH peuvent être identifiées seulement après le calcul de l'équilibre chimique. Elles apparaissent particulièrement pour des valeurs irréalistes de la  $p\text{CO}_2$  ou des indices de saturations

Le bilan ionique a été calculé pour tous les échantillons analysés par le programme «Diagrammes» mis au point par Roland Simler du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Le bilan obtenu sur chacun de ces échantillons est compris entre +5% et -4%. Toutes les données peuvent donc être prises en considération.

#### **4.2. Les éléments caractéristiques de la nappe karstique des Monts de Saïda**

**Mg<sup>2+</sup>** : les eaux de pluie sont pauvres en Mg<sup>2+</sup>. Il provient de la dissolution des dolomies et des calcaires dolomitiques. La présence du magnésium indique généralement des eaux à transit lent (Bakalowicz, 1994)

**Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>** : leur concentration est généralement faible dans les eaux karstiques et ils proviennent :

- Des précipitations : c'est le principal apport par lessivage des aérosols marins ; trois facteurs sont à prendre en compte :

- L'éloignement du littoral : la concentration diminue en s'éloignant de la mer, surtout avec la présence de la grande barrière des Monts de Saïda et les Monts des Béni-Chougrane qui précipite une grande partie des eaux de pluies, lessivant les aérosols.

- L'origine des précipitations : généralement les premières pluies de la saison sont bien chargées par le lessivage des poussières accumulées pendant la longue saison sèche et les vents provenant du Sahara.

- La dilution : les hauteurs de pluies les plus élevées montrent de faibles concentrations du fait de la grande dilution.

- leur concentration : plusieurs phénomènes d'origine chimique, biologique ou climatique, peuvent influencer sur la concentration des ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et Cl<sup>-</sup>.

- Le facteur biologique : K<sup>+</sup> est sélectivement absorbé par les plantes.

- Les échanges de base : les minéraux argileux ou les substances organiques sont

susceptibles d'échanger leur  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  contre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  des eaux à leur contact. Ceci peut induire une légère augmentation de ses éléments dans les eaux karstiques.

- L'évapotranspiration : la consommation d'eau peut aboutir à la concentration en solutés et surtout  $\text{Cl}^-$ .

Il est donc possible de caractériser les eaux d'origine épikarstique comme suit : l'ion  $\text{Cl}^-$  marqueur de l'eau stockée près de la surface et subissant l'ETR et même indicateur de sources de pollution alors que  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  sont plus souvent caractéristiques de la zone d'infiltration riche en matières susceptible d'échanger leurs cations.

$\text{SO}_4^{2-}$  : la variabilité des concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les eaux karstiques est liée à différents mécanismes :

- Eaux de pluies : les eaux de pluies contiennent des quantités non négligeables de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Il provient de l'oxydation du soufre dans l'atmosphère qui se trouve en abondance dans les zones industrielles. Cette oxydation est responsable des pluies acides.

- Origine agricole : les scories potassiques et certains phosphates utilisés comme engrais peuvent apporter des sulfates. L'activité agricole, très importante dans le plateau de Saïda, utilise des engrais et des pesticides massivement.

$\text{NO}_3^-$  : sa présence est généralement associée à l'agriculture ; c'est le meilleur signe de pollution d'origine agricole. Les nitrates proviennent également des eaux usées domestiques non traitées.

## **5. Caractéristiques générales des eaux des émergences**

Nous disposons pour les principales sources et forages des Monts de Saïda d'un certain nombre données physico-chimiques et hydrochimiques. La plupart des analyses ont été effectuées entre 2004-2007 et 2014-2015. Le Tableau.11 regroupe Les données moyennes des sources et de forage. L'utilisation du Diagramme de Schoeller Berkallof et les Variogrammes ont permis de comparer le fonctionnement hydrochimique des différents systèmes.

A partir de ces résultats, on peut déduire les conclusions suivantes :

- La température des eaux des Monts de Saïda varient entre 17.3 et 21 °C. On note une homothermie remarquable des sources avec une température moyenne annuelle qui s'établit autour de 18.7°C. Les différences de température sont minimales et elles sont liées à l'effet d'altitude. Ceci peut attester de l'importance des réserves ;

- La conductivité électrique moyenne des eaux est en général importante, elle dépasse 762  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Le forage N62 et la source Ain Teghat marquent une conductivité relativement plus importante atteignant 866  $\mu\text{s}/\text{cm}$  en moyenne.

- La moyenne des concentrations en Ca et en Mg varie selon les sources (successivement égale à 66,2 mg/l et 52,7 mg/l). Le rapport Ca/Mg est généralement supérieur à 1 (1.13 à 1.71). la prédominance de l'ion calcium indique la provenance de ces eaux de la zone non saturée. En effet ces eaux ont été chassées directement vers l'exutoire suite aux événements pluvieux.

**Tableau 11: Evolution de la température dans le système Karstiques de la source Ronde dans les Monts de Saïda (période : 2004 – 2014)**

Source	Forage N62	Ain Zerga	Poirier	Ain Teghat	Ronde	
Dates	2004-2007/ 2014-2015	2004-2007/ 2014-2015	2014-2015	2014-2015	2004-2007	
Nombre de prélèvements	22	22	11	11	11	
Cond (µs/cm)	826,23	753,2	674,45	905,27	647,50	
Temp (°c)	20,95	18,3	18,35	18,82	17,03	
pH	7,34	7,39	7,13	7,21	7,64	
Ca/Mg	1,20	1,71	1,50	1,14	1,13	
Cations (mg/l)	K <sup>+</sup>	1,55	1,9	1,27	2,00	1,92
	Na <sup>+</sup>	39,41	25,4	20,82	38,73	22,17
	Ca <sup>++</sup>	66,86	74,0	68,91	69,55	51,58
	Mg <sup>++</sup>	57,77	47,4	48,00	62,91	47,58
Anions (mg/l)	Cl <sup>-</sup>	66,05	51,4	40,91	72,09	49,33
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	29,32	31,7	36,45	55,91	39,00
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	372,41	350,3	355,18	353,18	257,58
	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	63,55	48,0	42,82	61,00	39,00

- Le Forage N62 et Ain Teghat Montrent des concentrations relativement élevées en sels dissouts nettement plus importante que des autres sources. Les eaux de prélèvements sont marqués principalement par la présence des éléments suivants : nitrate, sulfate, chlorure, sodium et potassium. C'est éléments résultent des activités anthropiques, que ce soit engrais, épandages, défauts de stations d'épurations collectives, fosses septiques ou puits perdus et protection des cultures etc. (Tableaux. 11, 12)

- Les cinq sujets étudiés n'ont pas les mêmes caractéristiques : la source Ain Zerga possède des concentrations en calcium systématiquement supérieures aux autres. L'indice de saturation de calcium des eaux de la nappe karstique a une moyenne >0, ce qui signifie qu'elles sont sursaturées, et qu'elles vont précipiter de la calcite.

- Les concentrations en Mg relativement élevées (57,8 mg/l et 63 mg/l) dans les eaux du forage N62 et Ain Teghat indiquent l'importance du temps de séjours des eaux et l'extension de ces systèmes

- Les teneurs en  $\text{HCO}_3^-$  varient entre 372,4 mg/l (forage N62) et 257,6 mg/l (la source Ronde). Cette différence est due au temps de séjour des eaux dans les aquifères carbonatés, et l'intervention des eaux superficielles d'irrigation dans la recharge de la nappe. Ces eaux proviennent de la zone non saturée où la production de  $\text{CO}_2$  est importante. Ceci a permis à l'eau d'acquérir un potentiel agressif élevé et ainsi de dissoudre le calcaire dolomitique à l'origine des fortes teneurs en bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). Ces observations suggèrent des aquifères fissurés en milieu carbonaté.

- le  $\text{Na}^+$  (Le sodium a un rôle relativement faible dans la minéralisation des eaux) présente des teneurs plus fortes dans les eaux d'Ain Zerga et forage (successivement 38,73 mg/l et 39,41 mg/l). Ces teneurs relativement élevées sont engendrées par l'infiltration des eaux d'irrigation. Les teneurs en  $\text{Na}^+$  sont généralement stables. Les teneurs en Cl indicateurs des eaux superficielles en relation avec le Na confirment l'origine de ces éléments (couche de sol).

- L'ion  $\text{Cl}^-$  varie entre 72.1 mg/l (Ain Teghat) et 66.1 mg/l (forage N62) pour une valeur moyenne de 55.9 mg/l. Cette teneur relativement plus forte dans les eaux de la source Ain Teghat pourrait être due à :

- a) L'intervention des eaux d'infiltration superficielles de l'irrigation et l'utilisation locale des engrais,

- b) L'évaporation des eaux durant leur infiltration au niveau de la zone irriguée.

- Les concentrations en  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  de la source Ain Teghat prennent des valeurs importantes par rapport aux autres sources (2 mg/l, 56 mg/l et 61 mg/l) Ceci s'explique par l'effet de pollution.

Le  $\text{K}^+$  montre généralement des teneurs relativement faibles (Source Ronde 1.9 mg/l et Ain Teghat 2 mg/l). Le Potassium provient de la dissolution des engrais chlorurés sodiques.

Lors de l'infiltration des eaux, les engrais qui contiennent du KCl se dissolvent très facilement dans les eaux, le potassium ( $\text{K}^+$ ) restant fixé sur les argiles et étant disponible pour la plante. Le chlore ( $\text{Cl}^-$ ) migre vers la nappe. Une pollution par les engrais minéraux est montrée par la corrélation entre  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Cl}^-$ . (Mudry J. en 1987) a montré que seuls les éléments caractérisant le signal entrée (chlorure, sodium, potassium, nitrate) étaient variables dans le temps.

Les teneurs en nitrate varient entre 39 mg/l (source Ronde) et 56 mg/l (source Teghat). Les teneurs relativement élevées pour Teghat révèlent une pollution par infiltration des eaux

d'irrigation superficielle. Ces valeurs sont issues des zones d'élevage et d'utilisation d'engrais

Les teneurs en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) varient entre 63,6 mg/l (forage N62) et 61 mg/l (Ain Teghat). Ces valeurs relativement élevées indiquent l'origine anthropique de ces éléments (utilisation des engrais sulfatés en agriculture).

- Les teneurs relativement élevées en  $\text{Mg}^{2+}$  pour la source Teghat (63 mg/l) et le forage N62 (58 mg/l) indiquent des eaux ayant un long temps de séjour.

**Tableau 12: Synthèse des données chimiques des eaux des sources (Mai/2004 – Février /2007) (mg/l)**

Point d'eau	Nbr d'écht	En mg/l	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	BI( % )	TDS mg/l	Dureté [TH en° f]
La source Ain Zerga	12	Max	104	70	35	3	403	79	41	93	4	721	43
		Min	33	31	23	1	195	45	16	12	-3	497	29
		Moy	74,4	48,5	26,5	2	348,1	56,75	27,92	57,75	-1.5	654.5	41.75
Le Forage N62	11	Max	78	76	58	2	406	123	30	173	+5	846	49
		Min	39	44	46	2	195	62	15	12	-4	617	30
		Moy	63,27	59,18	51,27	2	354,27	77,82	22,91	84,09	0.90	728.45	40.2
La source Ronde	12	Max	74	56	28	5	300	72	56	100	+3	611	43
		Min	33	36	16	1	176	40	23	27	-4	483	29
		Moy	51,58	47,58	22,17	1,92	257,58	49,33	39	59,67	-0.083	539.5	41.75

- Les eaux du forage N62 et la source Ain Zerga sont caractérisés par des indices de saturation de calcite et de dolomite légèrement sursaturés (respectivement sont comprises entre (0.42 et 0.34) et (0.35 et 0.4)). Ce qui indique qu'elles vont précipiter de la calcite

- Les eaux de la source Ronde sont caractérisées par des  $\text{SI}_c$  et des  $\text{SI}_d$  proches de l'équilibre, respectivement : 0,16 et -0,05. Ces valeurs révèlent que ces eaux ont subi un transit relativement long à travers ces aquifères.

- Le rapport Mg/Ca est relativement élevé (3.29 pour la source Ain Zerga ; 3.17 pour le Forage N62 et 2.8 pour la Source Ronde). Ceci souligne (d'après Bakalowicz, 1994) l'origine lithologique des aquifère fortement dolomitique et par conséquent le temps de transit relativement long. (Tableau. 14)

-Le rapport Cl/Na est compris entre 1 et 2,25. Les valeurs supérieures à 2 sont dues à l'introduction de chlore anthropique.

-La  $\text{pCO}_2$ , comprise entre 0.2% et 4%, est relativement basse. Ce fait peut être attribué à une production limitée du  $\text{CO}_2$  ou bien à un écoulement en contact avec l'atmosphère qui permet un dégazage du  $\text{CO}_2$ , a cause des fissurations. (Tableau. 13)

**Tableau 13: Synthèse des rapports des données chimiques  
des eaux des sources (Mai/2004 Février /2007)**

Point d'eau	Nbr d'écht		Mg Ca	Na/K	Cl/Na	SI <sub>c</sub>	SI <sub>d</sub>	pCO <sub>2</sub> 10 <sup>-2</sup> atm
La source Ain Zerga	12	Max	3.29	36.33	2.05	0.93	1.28	0.02
		Min	0.59	15.25	1	-0.14	-0.92	0.0023
		Moy	1.29	23.52	1.42	0.42	0.35	0.01
Le Forage N62	11	Max	3.17	49,41	1,56	0.97	1.59	0.04
		Min	1.15	39,22	0,75	-0.32	-0.97	0.0026
		Moy	1.605	43,74	0,99	0.34	0.4	0.012
La source Ronde	12	Max	2.8	50	2.25	0.68	0.93	0.019
		Min	0.91	7.58	1.02	-0.28	-1.01	0.002
		Moy	1.52	26.53	1.48	0.16	-0.045	0.007

## 6. Les faciès des eaux :

Le Diagramme décrivant la composition chimique des eaux le plus commun est le diagramme de Piper. Ce diagramme est construit pour les anions principaux ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) et pour les cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ). Il est bien adapté pour décrire la géochimie des roches, car le contenu ionique est exprimé en pourcentage de la masse de l'échantillon de roche. Par contre, pour les eaux, il ne prend pas en compte la minéralisation des eaux qui dépend du temps de résidence, du contact eau/roche,...

Le graphique le mieux adapté est le diagramme de (Schoeller et Berkallof 1962). L'axe des coordonnées représente les concentrations, en milliéquivalent par litre, sur une échelle logarithmique. Sur l'axe des abscisses, les cations et les anions sont distribués dans l'ordre suivant :  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , alcalinité ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) et  $\text{NO}_3^-$ . Cette méthode permet d'identifier aisément le faciès chimique et l'importance quantitative de la minéralisation.

### 6.1. Faciès chimiques des eaux des Mont de Saïda

Il devenait intéressant devant cette diversité d'aquifères d'essayer d'établir une caractérisation hydrochimique de ces systèmes, avec pour but de finaliser la compréhension de leur fonctionnement, par le biais des diagrammes de schoeller et de Piper.

D'après le diagramme Ombrothermique de Gaussen de la région d'étude; durant la période 1980-2009 (voir l'étude climatique); nous avons remarque que :

- La période des basses eaux couvre les mois de Mai jusqu'à environ début d'Octobre soit sur presque 165 jours.
- La période des hautes eaux couvre les mois de Octobre jusqu'à la fin d'Avril

## 6.2. Faciès chimique des eaux de la source Ain Zerga par le diagramme de Schoeler/Berkaloff

En période des hautes eaux la dissolution des roches carbonatés provoque une augmentation de la concentration en calcium dans les eaux de la source Ain Zerga (Figure.31) et, par conséquent, une sursaturation vis à vis de la calcite, par contre on observe une diminution  $Mg^{+}$ . Ces eaux sont à rapprocher de celles des aquifères épikarstiques (zones non saturée).

En période des basses eaux on observe une augmentation du Mg. Les eaux à long temps de séjour relativement riches en magnésium et pauvres en calcium correspondent aux périodes d'étéage. Ce sont des eaux fortement sursaturées provenant de la zone noyée ou ayant subi un long temps de transit au niveau de la zone non saturée. L'augmentation du  $Cl^{-}$  et le  $NO_3^{-}$  dans cette période indique qu'il y a une contamination anthropiques causé par le lessivage des sols.

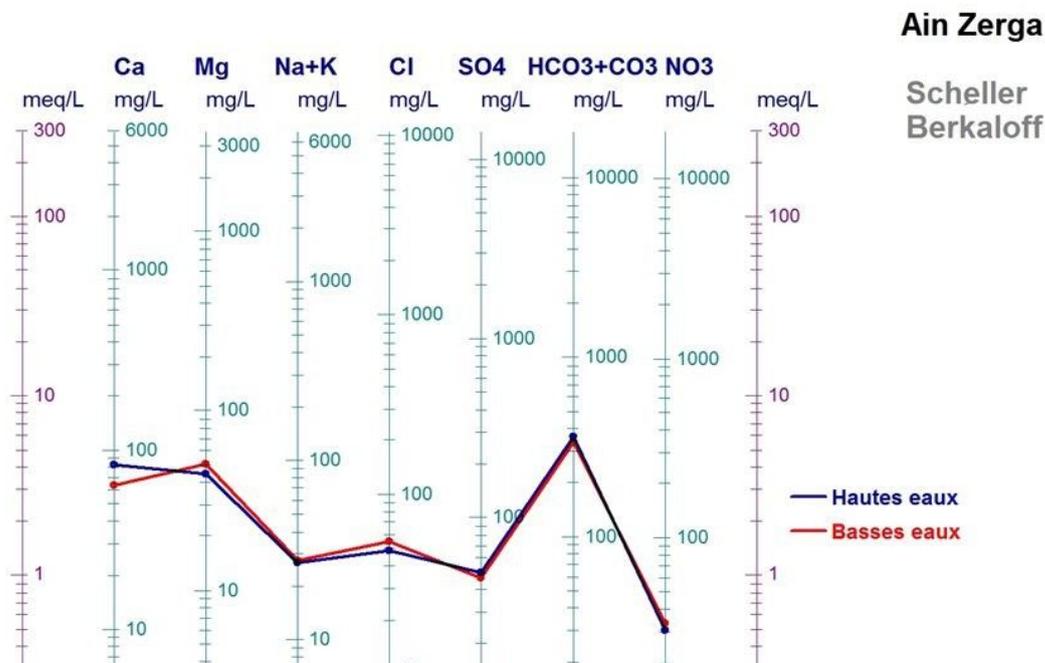


Figure 31: faciès chimique des eaux d'Ain Zerga pendant les périodes des hautes et basses eaux

### 6.1.1. Faciès chimique des eaux de la source Ain Teghat par le diagramme de Schoeler/Berkaloff

Les teneurs des éléments chimiques des deux périodes de la source Ain Teghat prennent presque les mêmes valeurs (avec une différence négligeable pour le  $Mg^{+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ ) se qui explique que les eaux nouvellement infiltrées sont d'abord stockées dans les réservoirs superficiels puis restituées avec un temps de retard important. L'eau qui transite doit avoir le temps de s'équilibrer avec l'encaissant. (Figure. 32)

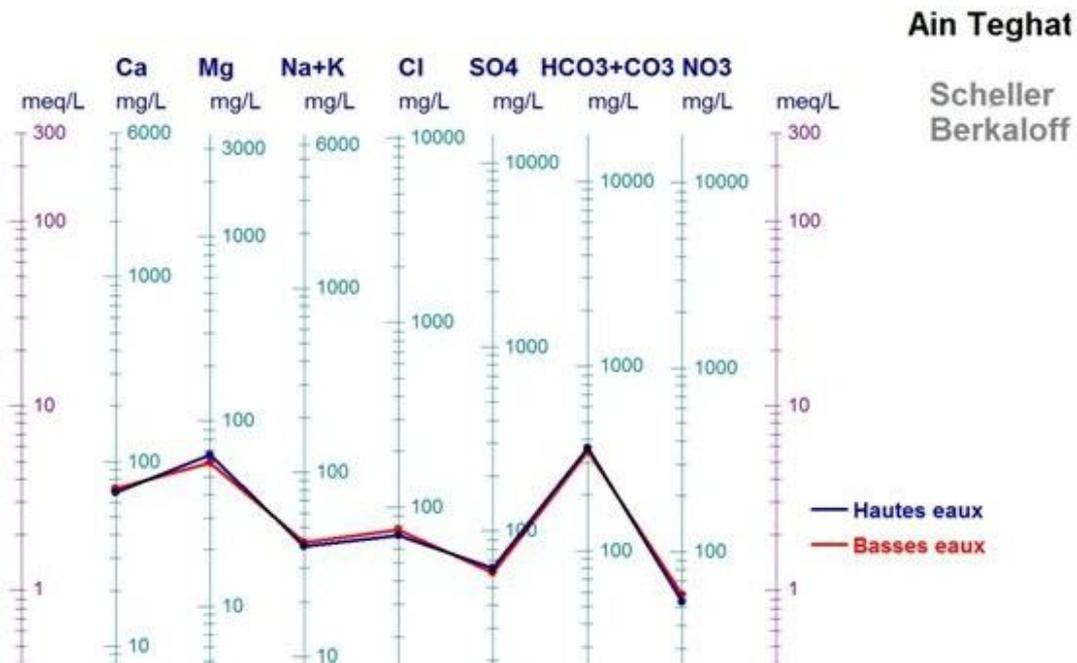


Figure 32: faciès chimique des eaux d'Ain Teghat pendant les périodes des hautes et basses eaux

### 6.1.2. Faciès chimique des eaux de la source Forage N62 par le diagramme de Schoeler/ Berkaloff

La proximité du forage N62 a environ 02 KM de la source Ain Teghat, influe sur la composition chimique des eaux qui est presque la même. Sauf pour la  $Ca^{2+}$  qui prend des valeurs plus grandes en période des hautes eaux par rapport au période des basses eaux.

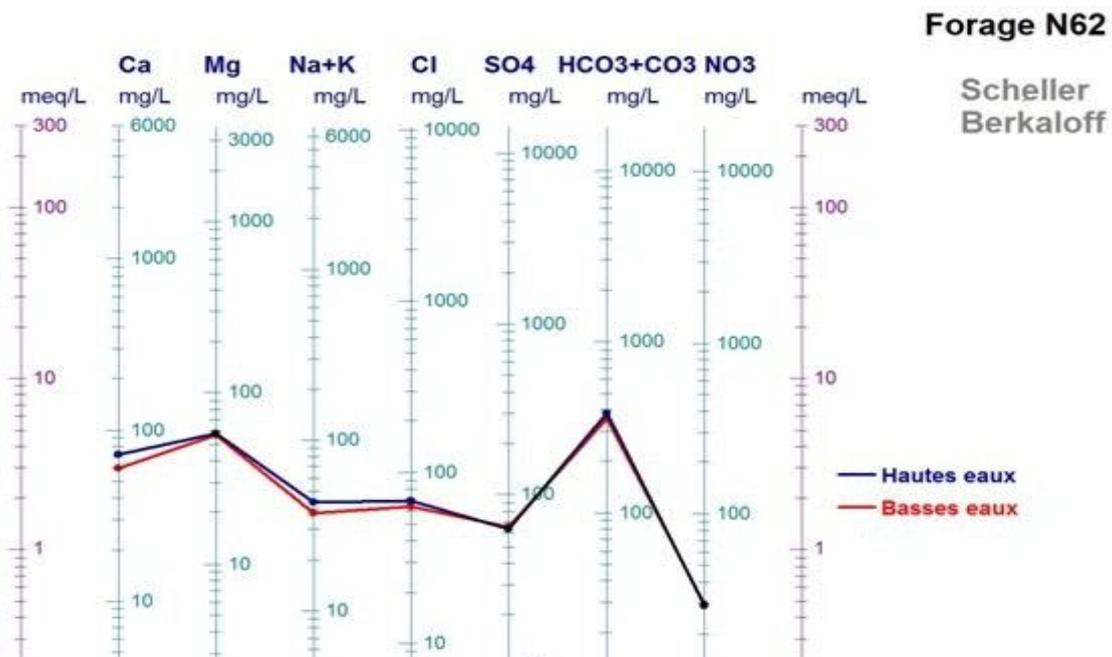
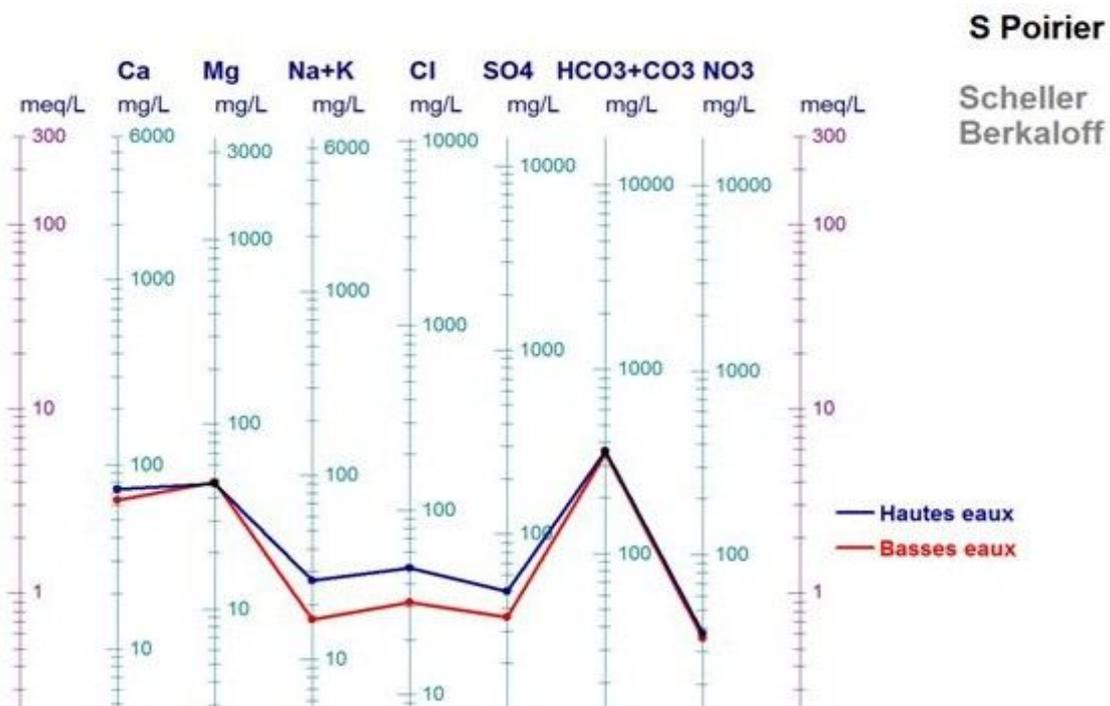


Figure 33: faciès chimique des eaux du forage N62 pendant les périodes des hautes et basses eaux

Cette différence qui est remarquable est due à la stagnation des eaux dans la zone non saturée par absence de pompage. Le forage recoupe probablement une zone de stockage (dans la zone épikarstique) à l'écart du drainage avec des temps de séjour de l'eau plus long. (Figure. 33).

### 6.1.3. Faciès chimique des eaux de la source Poirier par le diagramme de Schoe/ Berkal

Le système de la source Poirier, se caractérise par la forte pollution anthropique (teneurs élevées en nitrates). En effet, cette source émerge sur la périphérie d'une zone à intenses activités agricoles et dont l'irrigation se fait en forte proportion par les eaux de la source.



**Figure 34: faciès chimique des eaux de la source Poirier pendant les périodes des hautes et basses eaux**

Le nitrate est un marqueur des eaux contaminées par les activités anthropiques, donc des eaux récentes ; des zones de recharges (zone non Saturée) (Figure. 34). En période de hautes eaux les crues d'hiver et de printemps engendrent un effet de dilution avec un mélange entre l'eau du réservoir superficiel et l'eau nouvellement infiltrée (se qui indique cette hypothèse la même valeur de la teneur  $Mg^{2+}$  dans les deux périodes.

#### 6.1.4. Faciès chimique des eaux de la source Ronde par le diagramme de Schoel/ Berkal

La figure 35 montre que l'augmentation du  $\text{Ca}^{2+}$  des eaux de la source Ronde se produit en période des hautes eaux. Les grandes valeurs des bicarbonates témoignent d'un écoulement à surface libre même pendant la période des basses eaux. Les faibles valeurs des éléments anthropiques dans la période des hautes eaux indique qu'il y a une dilution des eaux de la zone saturée. Puis elles s'augmentent en période des basses eaux avec une stabilité de la valeur du  $\text{Mg}^{2+}$  dans les deux périodes.

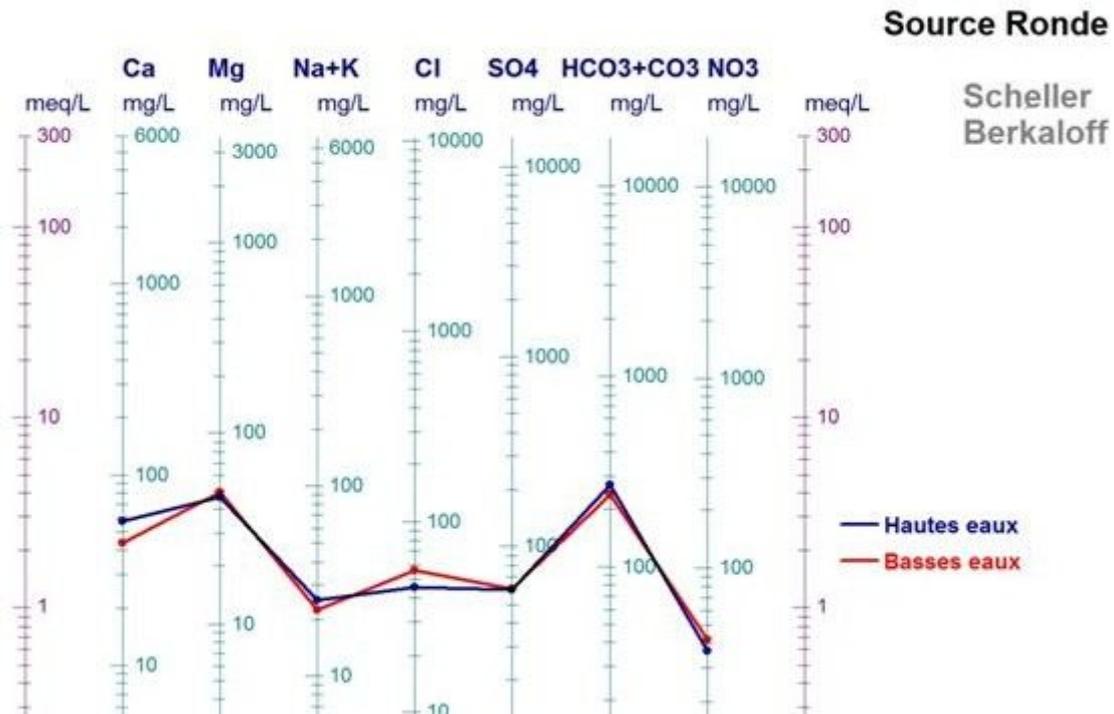
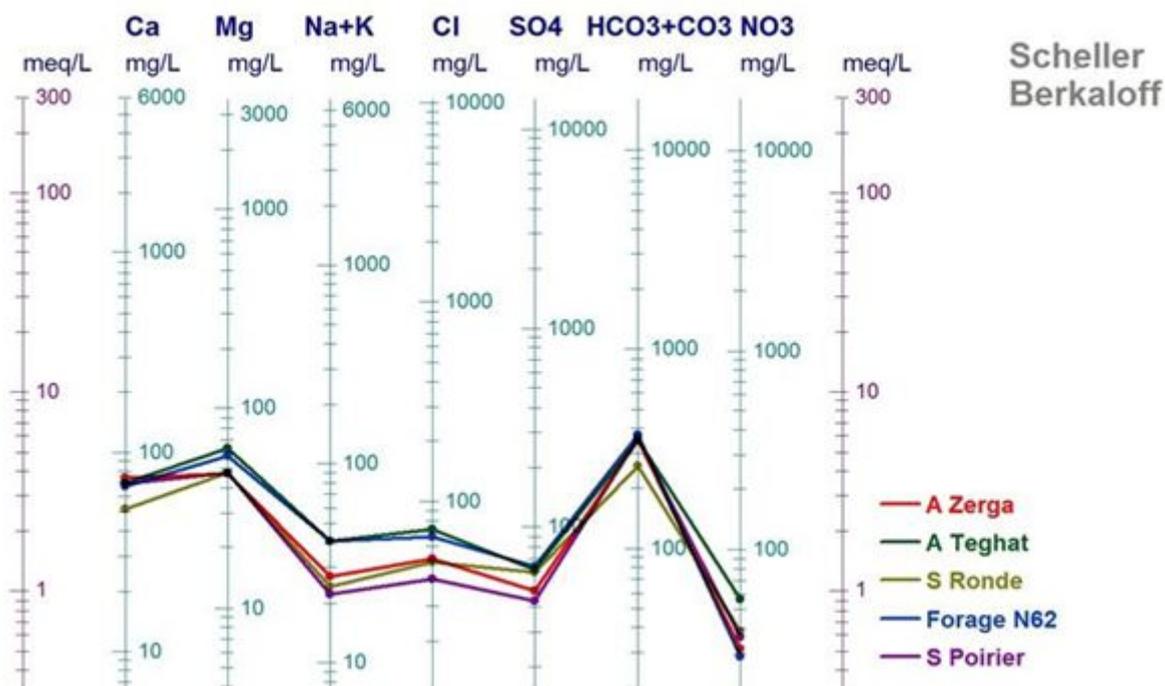


Figure 35: faciès chimique des eaux de la source Ronde pendant les périodes des hautes et basses eaux

#### 6.1.5. Comparaison des Faciès chimique des eaux des sources des Monts de Saïda par le diagramme de Schoeler/ Berkallof

Le rapport sur diagramme de Schoeler (Figure. 36) permet de comparer les valeurs moyennes pour chaque région et les faciès moyens entre chaque région. Les eaux Karstiques des Monts de Saïda sont bicarbonatées magnésiennes à calciques, moyennement minéralisées.

Il apparaît ainsi que les eaux de la source Ain Teghat et le forage N62 sont plus minéralisées, par rapport aux autres sources et avec une teneur de magnésium plus grande. Les valeurs moyennes montrent des teneurs élevées en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{K}^+$  (c'est une indication qu'il y a une pollution anthropique dans la zone d'étude).



**Figure 36: Diagramme de schoeller (faciès chimiques des eaux karstiques des Monts de Saïda)**

#### 6.1.6. Faciès chimique des eaux de la source Ain Zerga par le diagramme de Piper

La représentation des échantillons du groupe (A) dans le diagramme de Piper (Figure. 37) montre un faciès bicarbonaté calcique à magnésien, Cependant, quelques échantillons se dispersent vers le pôle chloruré et sulfaté calcique à magnésien le groupe (B). Cette dispersion provient des pollutions de surface comme nous allons le constater.

La zone symbolisée par la lettre (C) est de type bicarbonaté calcique à magnésien. Nous remarquons que la très grande majorité de nos analyses se situent dans ce faciès (flèche pleine (C)).

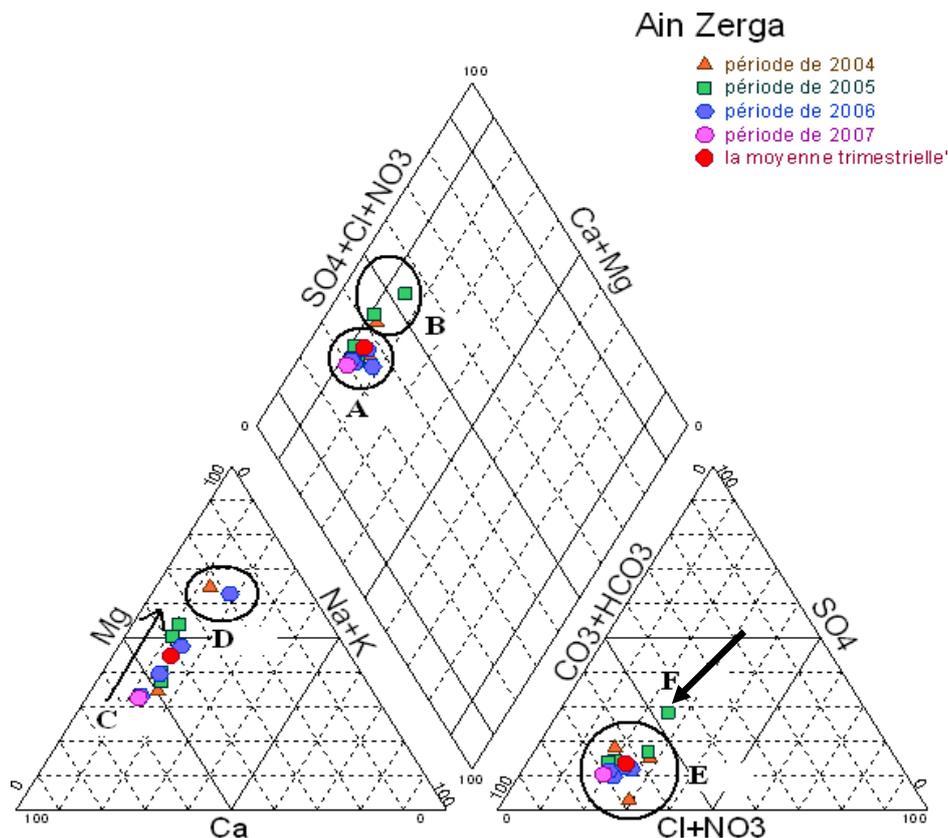
L'eau provenant des massifs dolomitiques de la zone saturée est de type bicarbonaté calcique à magnésien.

Le groupe (D) a une teneur élevée en magnésium ; démontrant par là le long séjour de ces eaux dans les dolomies de la zone saturée.

La zone symbolisée par la lettre (E) indique une eau bicarbonatée des récents de la zone non saturée. Cependant, la flèche (F) montre une tendance vers le faciès sulfaté ce qui indique une pollution causée par le lessivage du sol engendrée par les premières crues de Septembre. Ce sulfate provient :

- soit des eaux de pluies qui contiennent des quantités non négligeables, par l'oxydation du soufre dans l'atmosphère et qui se trouve en abondance dans les zones industrielles. Cette oxydation est responsable des pluies acides ;

- soit, plus probablement, d'origine agricole : les scories potassiques et certains phosphates utilisés comme engrais peuvent apporter des sulfates. En effet, l'activité agricole est très importante dans le plateau Ain Zerga, où l'utilisation des engrais et des pesticides est massive.



**Figure 37: faciès chimique des eaux de la source Ain Zerga pendant les périodes des hautes et basses eaux**

### 6.1.7. Faciès chimique des eaux de la source Ronde par le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper nous présente les résultats des analyses d'eaux (Figure. 38)

- Le faciès principal est de type bicarbonaté calcique et magnésien d'après le groupe (A). C'est eaux ont une teneur en magnésium importante, qui prouve qu'ils ont un temps de contact très long avec les roche dolomitique dans la zone saturée.

- Les échantillons (B) se rapproche vers le pôle chloruré et sulfaté calcique à magnésien. Ce qui explique qu'il ya eu un mélange des eaux récent chargé des éléments anthropique avec des eaux de la zone saturée.

- La flèche pleine (C) indique qu'il y'a une augmentation de la concentration en magnésium prouvant un long séjour dans l'aquifère.
- Pour la zone (E) et (F), les résultats sont identiques à ceux de la source Ain Zerga.

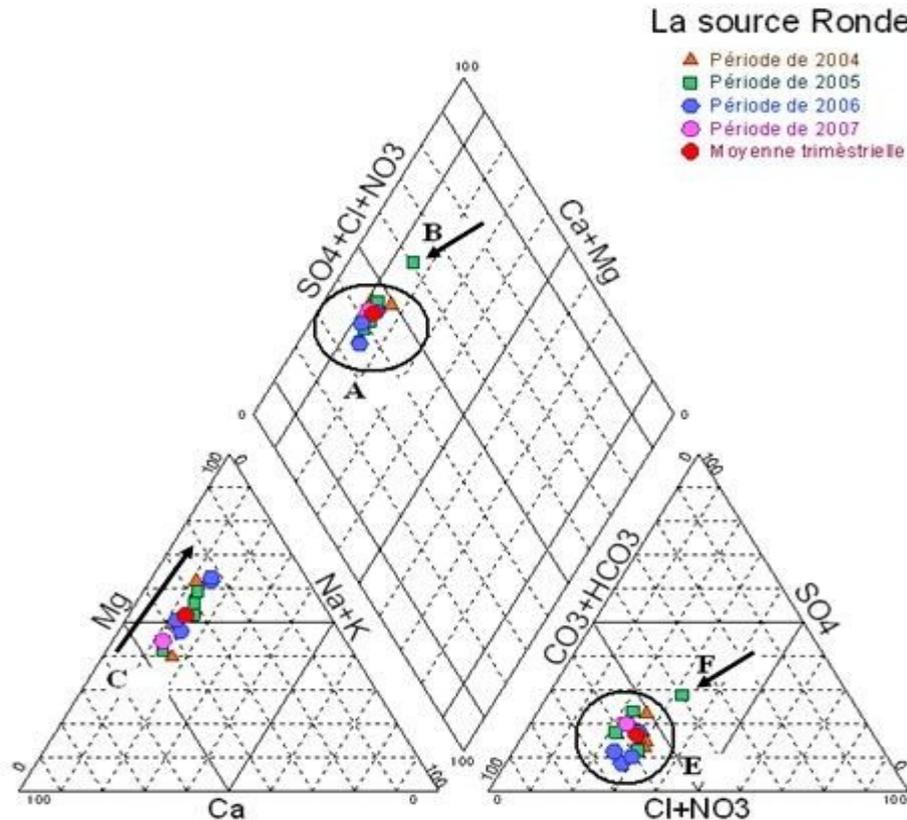
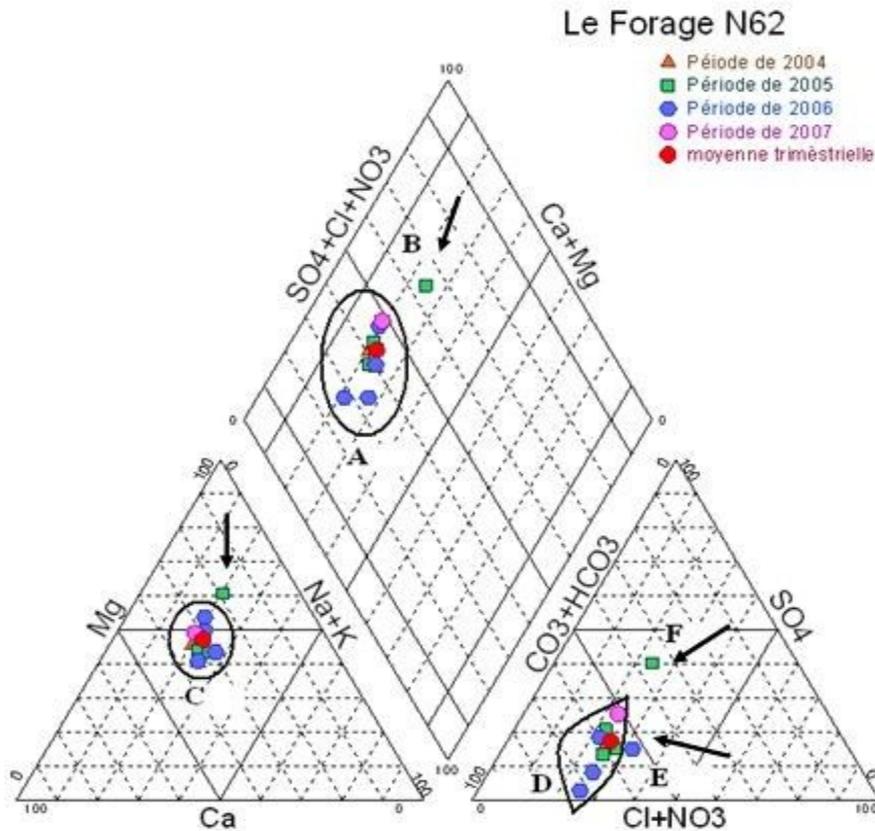


Figure 38: faciès chimique des eaux de la source Ronde pendant les périodes des hautes et basses eaux

### 6.1.8. Faciès chimique des eaux de Le Forage N62 par le diagramme de Piper

La Figure. 39 présente la répartition des analyses d'eaux du Forage dans le diagramme de Piper. L'on y relèvera que les zones (A, B, C, D, F) présentent les mêmes indications pour les deux diagrammes.

La flèche (E) nous indique que cette eau s'approche vers le faciès de la zone chlorurée et nitratée, révélant une pollution engendrée par le lessivage du sol par les pluies. La présence du nitrate est généralement associée à l'agriculture. Les nitrates et le chlore peuvent provenir également des eaux usées domestiques non traitées. Ce qui indique que cette eau provienne de la zone non saturée.



**Figure 39: faciès chimique des eaux de Forage N62 pendant les périodes des hautes et basses eaux**

## 7. Conclusion

L'interprétation des données hydrochimique a révélé des caractéristiques propres à chaque système. Les eaux de l'aquifère sont moyennement minéralisées en période hivernal et sont plus minéralisées en période d'été avec un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

La pollution anthropique est présente sur les systèmes de la source Ain Zerga, Forage N62 et Ain Teghat et elle est mise en évidence par les concentrations un peu élevées en chlorures qui sont d'origine domestique et agricole avec des concentrations en nitrates dépassant les 60 mg/l en période d'arrosage et de fertilisation.

**Chapitre III : Caractérisation hydrochimique par la  
méthode d'analyse multivariée (ACP)**

## Les analyses factorielles

### Introduction

Les concentrations chimiques dans les eaux souterraines sont variables dans le temps et dans l'espace en relation direct avec l'environnement et les conditions d'écoulement. Le nombre de variables est trop grand pour pouvoir faire une synthèse facile des données. Les analyses factorielles permettent d'observer des relations entre les différentes variables et objets ou échantillons (température, pH, concentration en ions, ...), elle a pour objectif de représenter les données dans un nouvel espace qui prend en compte plusieurs variables simultanément. La méthode qui est bien adaptée aux données chimiques : les analyses en composantes principales, ACP (Cailliez et Pagès, 1976 ; Bouroche et Saporta, 1980, Bakalowicz 1994). Cette méthode va être détaillée en l'appliquant aux données provenant des sources étudiées. Le logiciel XLSTAT2006 a été utilisé pour effectuer les traitements.

### 1. Traitement des données par la méthode d'analyse en composante principale.

Devant le grand nombre de données récolté en continu pendant plusieurs cycles hydrologiques, nous avons utilisé l'analyse en composante principale (ACP) pour globaliser l'information chimique (Lefebvre, 1980). Cette technique a été utilisée avec succès dans les études karstiques à la suite du travail de (M. Bakalowicz 1979), (Mudry J. 1987) dans le sud-est de la France et généralement en hydrologie (Melloule et Collin, 1992).

L'intérêt de cette méthode statistique réside dans le fait qu'un grand nombre de variable est pris en compte simultanément. Ces paramètres sont discriminés le long des axes factoriels en fonction de leurs variations relatives. Nous avons utilisé l'ACP centrée réduite de donner le même poids aux différents descripteurs. Tous les prélèvements ayant servi à l'établissement des paramètres statistiques précédents soit 16 individus ont fait l'objet d'un traitement global par l'ACP.

L'ensemble des échantillons des 16 éléments physico-chimiques qui ont fait l'objet d'analyse sont : T°C, pH, Conductivité (c25°C),  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PO}_4$  et  $\text{pCO}_2$ . Certains paramètres redondants ont été enlevés : (TDS/ dureté /  $\text{SiC}$  et  $\text{SiD}$ ).

Pour traiter ces données, de nombreuses ACP ont été réalisées. Nous ne pouvons les présenter toutes. Seules les plus caractéristiques ont été retenues pour aider à l'interprétation des données. L'ACP présentée est celle des 16 éléments sus cités des prélèvements trimestriels

de la période (Mai/2004–Février/2007) et mensuel de la période (Janvier/2014 – Janvier/2015) dont les données sont fortement structurées.

## **2.1. La source Ain Zerga**

L'Analyse en Composante Principale (ACP) a pour objectif de représenter les données dans un nouvel espace qui prend en compte plusieurs variables simultanément. Nous avons reporté dans le tableau (15) les corrélations entre les variables et les facteurs et sur (les figures 40) les cercles de corrélations suivant les plans (F1-F2) et (F2-F3).

Trois facteurs suffisent à expliquer 56,95 % de la variance totale. On remarque que la variance expliquée dans le plan (F1-F2) est relativement faible (44,93%), et dans le plan F2-F3 exprimant 29,44% de celle-ci. Ceci implique qu'une grande partie de l'information n'est pas expliquée certainement en raison des différences de comportement chimique entre les eaux (des basses et hautes eaux) Mais surtout par les importantes particularités chimiques de système karstique de la source Ain Zerga. Les descripteurs liés aux équilibres calco-carboniques apportent cependant des informations intéressantes pour expliquer la structure du nuage.

**L'axe F1** (27,51%) de la variance totale, il marque les eaux influencées par les éléments chimiques du sol, d'origine météorique ou anthropique qui est caractérisé par le regroupement du : Cl (0,765), pH (0,965), , IsC (0,863), IsD (0,936), et dans une moindre mesure Mg (0,420), SiO<sub>2</sub> (0,416) en opposition avec NO<sub>3</sub> (-0,524), pCO<sub>2</sub> (-0,924). (Tableau. 14)

Les variables définissant F1 (Figure. 40) met en opposition les eaux de la surface moins minéralisées plus fortes concentrations en nitrates et pCO<sub>2</sub>, avec les eaux de la zone saturée marquées par Mg et SiO<sub>2</sub>. L'opposition des éléments Magnésium, silicium et pH avec nitrates et pCO<sub>2</sub>, indiquant par l'interaction entre eau de la zone non saturée et de la zone saturée. L'opposition des variables pCO<sub>2</sub> et pH traduit en particulier le rôle de la zone d'infiltration dans les équilibres ainsi que les conditions de circulation dans le système qui sont liées, entre autre, à la structure même de l'aquifère. Les eaux sont sursaturées en raison des échanges gazeux continuels entre l'eau (CO<sub>2</sub> dissous) et la phase gazeuse du massif alimentée par les circulations d'air.

Tableau 14: Corrélations entre les variables et les facteurs

	F1	F2	F3
Ca	-0,316	<b>0,885</b>	-0,215
Cl	<b>0,765</b>	0,185	-0,133
Cond	0,239	<b>-0,600</b>	<b>-0,482</b>
HCO <sub>3</sub>	-0,133	<b>0,403</b>	0,375
K	0,136	0,240	<b>0,517</b>
Mg	<b>0,420</b>	<b>-0,719</b>	0,251
Na	0,255	0,249	0,320
NH <sub>4</sub>	-0,051	0,269	<b>0,706</b>
NO <sub>2</sub>	0,051	0,230	-0,192
NO <sub>3</sub>	<b>-0,524</b>	-0,058	<b>0,486</b>
pH	<b>0,965</b>	0,047	0,166
PO <sub>4</sub>	-0,236	-0,283	<b>0,401</b>
SiO <sub>2</sub>	<b>0,416</b>	0,347	<b>-0,430</b>
SO <sub>4</sub>	0,368	-0,210	-0,244
T°C	0,219	0,192	-0,257
Ca/Mg	-0,333	<b>0,837</b>	-0,260
IsC	<b>0,863</b>	<b>0,436</b>	0,146
IsD	<b>0,936</b>	0,170	0,222
_pCO <sub>2</sub>	<b>-0,924</b>	-0,037	-0,088

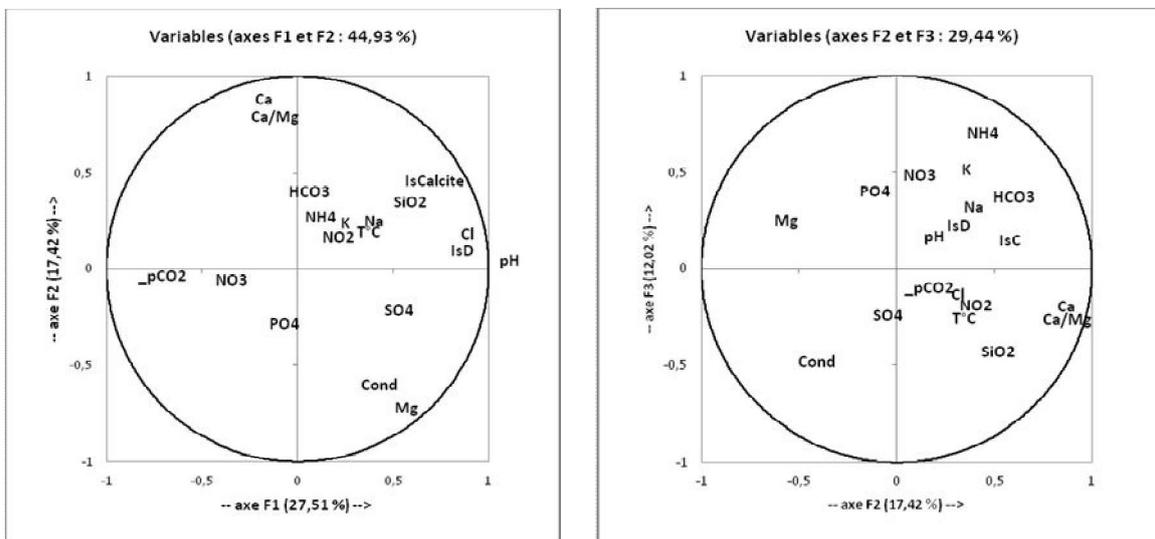


Figure 40: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Zerga Période (Mai/2004 – Février /2007) – (Janvier/2014 – Janvier/2015)

La silice apparaît regroupée avec le magnésium; Ces deux éléments varient généralement dans le même sens et l'augmentation de leur concentration indique la durée de séjour de l'eau dans l'aquifères. A l'opposé les nitrates, correspondent à une pollution anthropique dans les aquifères carbonatés.

**Le facteur F2**, (Tableau. 15) expliquant (17,42%) de la variance totale, est défini par : Ca (0,885), Ca/Mg (0,837), et dans une moindre mesure IsC (0,436), HCO<sub>3</sub>(0,403) en opposition avec Cond (-0,600), Mg (-0,719). Cet axe représente les équilibres calco-carboniques, et met en opposition les eaux d'infiltration de surface moins minéralisées (Zone non saturée) avec les eaux profondes marquées par une minéralisation relativement forte (zone saturée).

Le facteur carbonaté (Calcium, bicarbonates, conductivité) traduit les conditions environnementales de production de CO<sub>2</sub>. Cette dernière est liée au contexte physique, altitude du bassin (température), l'importance de la végétation et des sols et la morpho-structure de la zone qui alimente la source. Ainsi cet axe oppose les eaux de forte production de CO<sub>2</sub> et de minéralisation élevée aux eaux de peu production de CO<sub>2</sub> et de faible minéralisation. (Figure. 40)

**Le facteur F3**, (Tableau. 15) expliquant 12,02% de la variance, est défini par NH<sub>4</sub> (0,706), et dans une moindre mesure K(0,517), NO<sub>3</sub>(0,486), PO<sub>4</sub>(0,401), en opposition avec SiO<sub>2</sub> (- 0,430) Cond (-0,482). En effet, dans ce regroupement, l'association des ions de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>+</sup>, correspond au pôle d'origine anthropique de la minéralisation de l'eau. Cet axe définit clairement le pôle anthropique agricole. (Figure. 40)

**Sur le plan des individus**, cet axe discrimine les eaux des systèmes des deux zone (saturée et non saturée). La présence des eaux (Aout 2014) dans la zone des hautes eaux c'est que dans cette période il y a eu une crue très importante. Et la présence des eaux des périodes (Janvier 2014), (Décembre 2005) et (Mars 2014) dans la zone des basses eaux c'est que dans cette période il y a eu un manque important de pluviométrie. (Figure. 41)

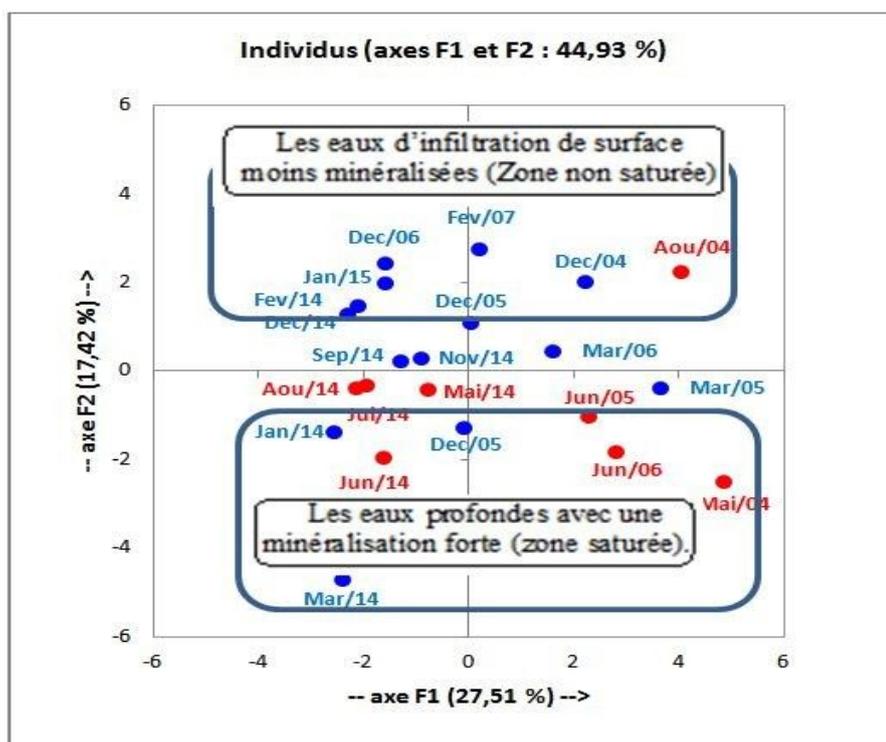


Figure 41: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Zerga (plan des individus) Période (Mai/2004–Fév/2007)–(Jan/2014 – Jan/2015)

## 2.2. La source Ain Teghat

Les résultats de cette analyse montrent que les différentes variables sont moyennement liées car les 3 facteurs n'expliquent pas plus que 64,49 % de la variance totale. On remarque que la variance expliquée dans le plan (F1-F2) est moyennement importante (51,98 %), et dans le plan F2-F3 est relativement faible 29,44% de celle-ci. Ceci implique qu'une grande partie de l'information est expliquée sur les importantes particularités chimiques de du système karstique de la source Ain Teghat. (Tableau. 15)

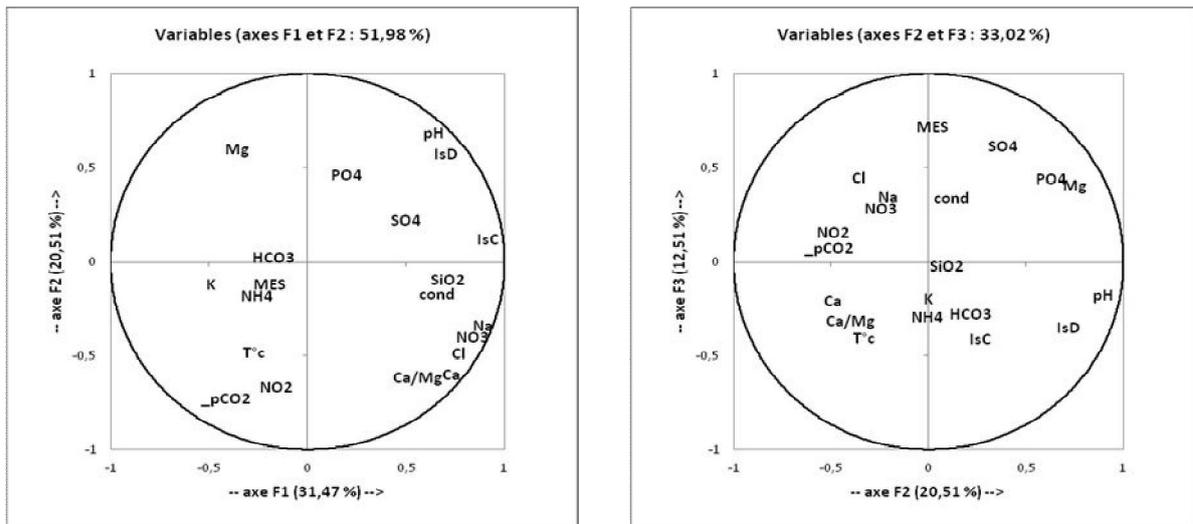
L'axe F1 explique 31,47 % de la variance totale et est défini par plusieurs variables : Ca (0,638), Na (0,815), Cl (0,638), NO<sub>3</sub> (0,740), pH (0,582), SiO<sub>2</sub> (0,536), Ca/Mg (0,612), IsC (0,873), IsD (0,631), et dans une moindre mesure la cond (0,475), en opposition avec Mg (- 0,511) , K (-0,608), pCO<sub>2</sub> (-0,632), et dans une moindre mesure T°C (-0,422), NH<sub>4</sub> (-0,427).

L'axe F1 montre un pôle de minéralisation caractérisé par l'opposition de Ca, pH, Ca/Mg, SiO<sub>2</sub>, IsC, IsD et cond, avec Mg, qui sont des indicateurs du milieu carbonaté. La présence des ions nitrates, chlorures, sodium potassium et l'ammoniaque indiquent que cet axe caractérise les conditions environnementales rencontrées sur les bassins. C'est un marqueur des activités anthropiques (agriculture, assainissement).

La source Ain Teghat possède des fortes teneurs en sodium et chlorures dues à sa zone de situation qui est dans le village Ain Teghat. (Figure. 42)

**Tableau 15: Corrélations entre les variables et les facteurs**

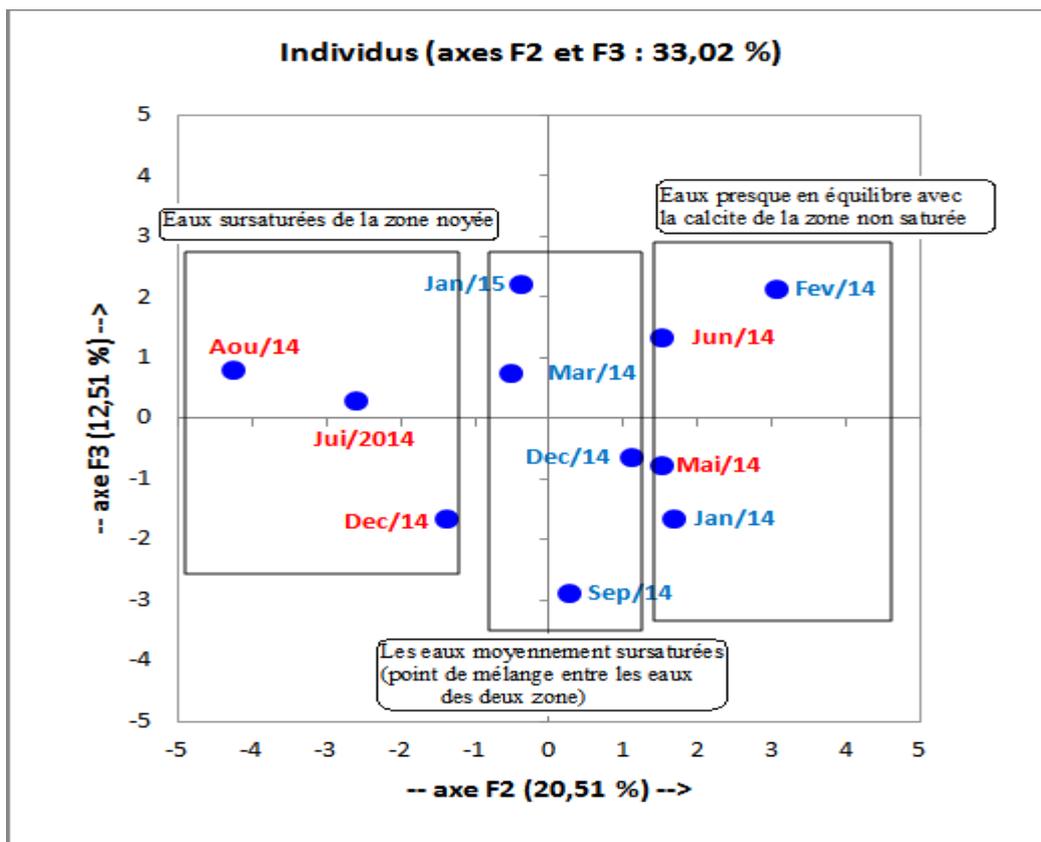
	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
Ca	<b>0,638</b>	<b>-0,629</b>	-0,203
Mg	<b>-0,511</b>	<b>0,598</b>	<b>0,406</b>
Na	<b>0,815</b>	-0,350	0,321
K	<b>-0,608</b>	-0,116	-0,195
Cl	<b>0,638</b>	<b>-0,486</b>	<b>0,443</b>
SO <sub>4</sub>	0,332	0,217	<b>0,611</b>
HCO <sub>3</sub>	-0,367	0,022	-0,277
NO <sub>3</sub>	<b>0,740</b>	<b>-0,421</b>	0,278
pH	<b>0,582</b>	<b>0,750</b>	-0,177
NO <sub>2</sub>	-0,335	<b>-0,664</b>	0,160
NH <sub>4</sub>	<b>-0,427</b>	-0,179	-0,206
PO <sub>4</sub>	0,026	<b>0,458</b>	<b>0,438</b>
MES	-0,365	-0,152	<b>0,715</b>
SiO <sub>2</sub>	<b>0,536</b>	-0,081	-0,022
cond	<b>0,475</b>	-0,065	0,337
T°c	<b>-0,422</b>	<b>-0,479</b>	-0,353
Ca/Mg	<b>0,612</b>	<b>-0,615</b>	-0,311
IsCalcite	<b>0,873</b>	0,123	<b>-0,409</b>
IsDolomite	<b>0,631</b>	<b>0,570</b>	-0,348
_pCO <sub>2</sub>	<b>-0,632</b>	<b>-0,725</b>	0,078



**Figure 42: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Teghat Période (Janvier/2014 – Janvier/2015)**

L'axe F2 (Figure. 42) explique 20,51 % de la variance totale et est défini les variables suivants: pH (0,750), Mg (0,598), IsD (0,570), et dans une moindre mesure la PO<sub>4</sub> (0,458), en opposition avec Ca (-0,629), Ca/Mg (-0,615), pCO<sub>2</sub> (-0,725), NO<sub>2</sub> (-0,664), , et dans une moindre mesure T°c (-0,479), Cl (-0,486), NO<sub>3</sub> (-0,421).( Tableau. 16)

L'opposition des variables pCO<sub>2</sub> et pH caractérise le facteur (2). Celui-ci traduit en particulier le rôle de la zone d'infiltration (zone non saturée) dans les équilibres ainsi que les conditions de circulation dans le système qui sont liées entre autre à la structure même de l'aquifère. Les eaux sont sursaturées en raison des échanges continuels entre eaux (CO<sub>2</sub> dissous) et la phase gazeuse du massif alimentée par les circulations d'air. On remarque que la source concernée (Ain Teghat) est justement le système de l'aquifères épikarstiques. Il faut remarquer que la pCO<sub>2</sub> est expliquée aussi par le facteur (1) ce qui traduit une certaine indépendance avec le pH donc une évolution terminal à l'abri d'échanges gazeux.



**Figure 43: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ain Teghat (plan des individus) Période (Jan/2014 – Jan/2015)**

### **Dans le plan des individus**

(Figure. 43) il met en opposition les eaux sursaturées et les eaux presque en équilibre avec la calcite. Entre les deux se trouvent les eaux moyennement sursaturées. Cet axe permet la discrimination du système de la source Ain Teghat fortement sursaturés (importante réserve de la zone non saturée) des autres systèmes épikarstiques des Monts de Saïda. L'ACP d'une campagne d'étiage est donc un accès au comportement des réserves des différents aquifères, en opposant les réponses physico-chimiques des systèmes à un instant donné.

### **2.3. Forage N62**

Les résultats de cette analyse montrent que les différentes variables sont moyennement liées car les 3 premiers axes n'expliquent pas plus que 69,99 % de la variance totale.

**L'axe F1** (Figure. 44), expliquant 40,36 % de la variance totale, est défini par les paramètres suivants : Cl (0,602), Cond (0,575), K (0,872), Na (0,884), pH (0,833), SiO<sub>2</sub> (0,608), T°C (0,841), IsC (0,694), IsD (0,757), et dans une moindre mesure la NO<sub>2</sub> (0,487), SO<sub>4</sub> (0,462), en opposition avec pCO<sub>2</sub> (-0,860) NO<sub>3</sub> (-0,882). (Tableau 16)

Le facteur (F1) oppose chlorures et sodium aux ions des nitrates. Cet axe caractérise les conditions environnementales rencontrées sur les bassins. C'est un marqueur des activités anthropiques (agriculture. assainissement). Le Forage N62 est bien discriminée en raison de ses teneurs élevées en nitrates montrant des variations importantes suivant les périodes hydroclimatiques. De la même façon que la source Ain Teghat , cette source est à l'origine du pôle nitraté.

Cette source épikarstique est particulièrement vulnérable aux pollutions de la surface. Cet axe opposant Cl, SiO<sub>2</sub>, T°C et pH au NO<sub>3</sub> caractérise l'origine spatiale de la minéralisation (Mudry et Blavoux, 1986). Les ions de nitrate et chlorure, traceurs météoriques et caractéristiques de l'apport anthropique. La silice, le pH et la température traceurs de temps de contacte eau-roche réservoir.

**L'axe F2** (Figure. 45), expliquant 15 ,85% de la variance totale, est principalement défini par SO<sub>4</sub> (0,699), et dans une moindre mesure la Cond (0,498), en opposition avec HCO<sub>3</sub> (-0,601), IsC (-0,673), IsD (-0,587), et dans une moindre mesure la NO<sub>2</sub> (-0,448), pH (-0,455). (Tableau. 17)

Cet axe correspond aux eaux récentes de la zone non saturée. Elle définit clairement le pôle anthropique domestique responsable des concentrations anormales en sulfates provenant des différentes collectivités. Le bicarbonate, Conductivité et pH sont des indicateurs du milieu carbonaté.

**Tableau 16: Corrélations entre les variables et les facteurs**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
Ca	-0,348	-0,342	<b>-0,527</b>
Cl	<b>0,602</b>	0,205	<b>0,454</b>
Cond	<b>0,575</b>	<b>0,498</b>	-0,309
HCO <sub>3</sub>	-0,395	<b>-0,601</b>	<b>0,519</b>
K	<b>0,872</b>	0,161	-0,062
Mg	0,105	0,270	<b>0,823</b>
Na	<b>0,884</b>	0,110	-0,005
NH <sub>4</sub>	0,359	-0,226	0,200
NO <sub>2</sub>	<b>0,487</b>	<b>-0,448</b>	-0,262
NO <sub>3</sub>	<b>-0,882</b>	-0,172	0,041
pH	<b>0,833</b>	<b>-0,455</b>	-0,002
PO <sub>4</sub>	0,339	-0,392	0,068
SiO <sub>2</sub>	<b>0,608</b>	0,207	<b>-0,482</b>
SO <sub>4</sub>	<b>0,462</b>	<b>0,699</b>	-0,283
T°C	<b>0,841</b>	0,146	0,117
Ca/Mg	-0,318	-0,339	<b>-0,792</b>
IsCalcite	<b>0,694</b>	<b>-0,673</b>	-0,035
IsDolomite	<b>0,757</b>	<b>-0,587</b>	0,130
pCO <sub>2</sub>	<b>-0,865</b>	0,161	0,036

#### **Dans le plan F2/F3**

(figure. 44), F3 n'explique que 13,78 % de la variance totale, est défini par : HCO<sub>3</sub> (0,519), Mg (0,823), et dans une moindre mesure la Cl (0,454). En opposition avec Ca (-0,527), Ca/Mg (-0,792) et dans une moindre mesure la SiO<sub>2</sub> (-0,482). Cet axe représente la minéralisation globale de l'eau.

L'opposition (magnésium / calcium) correspond aux interactions les eaux de la zone saturée / les eaux de la zone non saturée engendré par les équilibres calcocarbonique, « Cette opposition traduit la part de l'infiltration dans l'acquisition de la minéralisation en milieu carbonaté via les équilibres calco-carboniques entre le sol et la zone saturée de l'aquifère » (Lastennet, 1994).

Les fortes concentrations en chlorure indiquent clairement le pôle anthropique domestique de la minéralisation (sachant que le forage N62 se trouve proche à des agglomérations). L'opposition des bicarbonates aux silices traceurs de temps de contact eau roche réservoir indique qu'il y a un apport de la zone saturée.

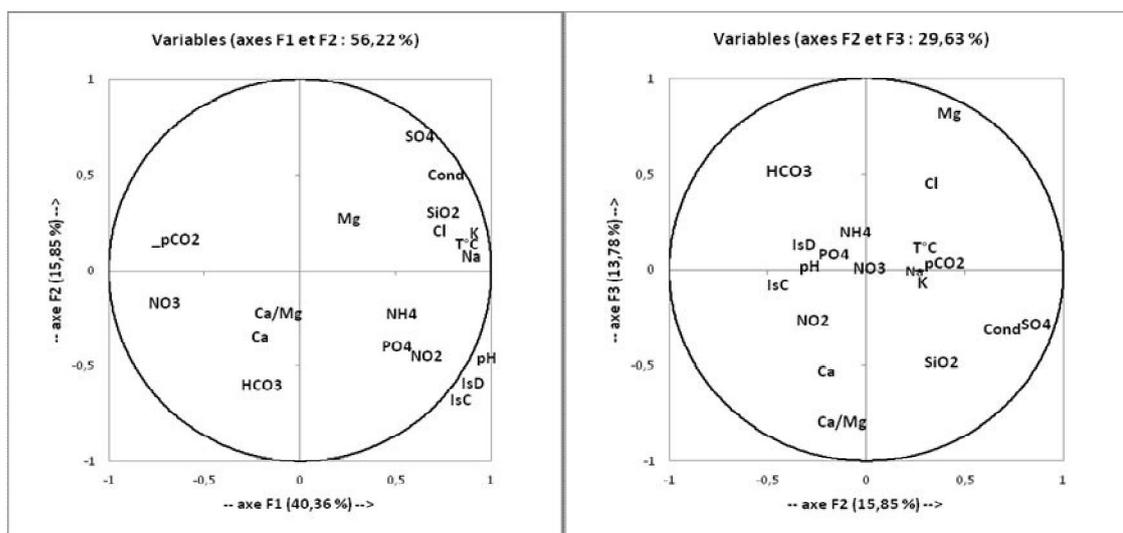


Figure 44: ACP sur les systèmes karstiques de la Forage N62 Période (Mai/2004 – Fév /2007) – (Jan/2014 – Jan/2015)

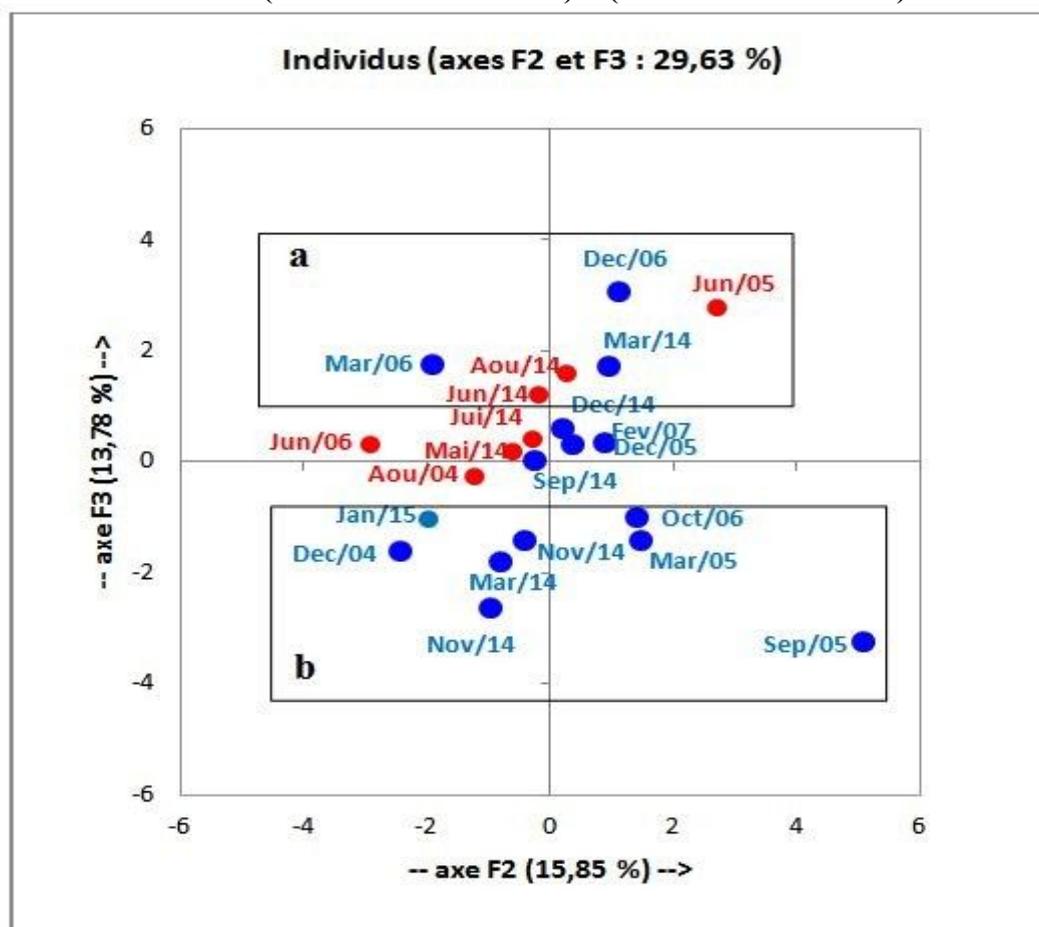


Figure 45: ACP sur les systèmes karstiques de la source Forage N62 (plan des individus) Période (Mai/2004 – Fév/2007) – (Jan/2014 – Jan/2015)

**Dans le plan des individus** (figure. 45) Il met en opposition deux groupes des eaux :

- **Le groupe des prélèvements (a)** : les eaux correspondent aux périodes où la concentration en pollution anthropique est assez élevée. Cette contamination est due à l'activité agricole ou domestique (c'est l'apport de la zone non saturée en période pluvieuse).

- **Le groupe des prélèvements (b)** : les eaux paraissent plus minéralisées et plus riche en magnésium et silicium (c'est l'apport de la zone saturée en période sec).

#### **2.4. La source Poirier**

Nous avons reporté dans le Tableau 17, les coefficients de corrélation linéaire entre les différentes variables et sur (Figure. 46) les cercles de corrélations suivant les plans (F1-F2) et (F2-F3). On remarque que la variance expliquée par l'axe (F1) est relativement faible (36,97 %), l'axe (F2) et (F3) exprimant encore 39,84 % de celle-ci. Ceci implique qu'une grande partie de l'information n'est pas expliquée certainement en raison des différences de comportement chimique entre les eaux de basses eaux et des hautes eaux. Les descripteurs liés aux équilibres calco-carboniques apportent cependant des informations intéressantes pour expliquer la structure du nuage.

**L'axe F1** (Figure. 46) explique 36,97 % de la variance totale et est défini par plusieurs variables : Mg (0,906), Na (0,950), K (0,904), Cl ( 0,905), SO<sub>4</sub> (0,844), NH<sub>4</sub> (0,784), SiO<sub>2</sub> ( 0,515), cond

(0,699), et dans une moindre mesure la pH (0,449), PO<sub>4</sub> (0,457), ISd (0,471), en opposition avec Ca/Mg (-0,716), et dans une moindre mesure la pCO<sub>2</sub> (-0,435). (Tableau 17)

**L'axe F1** montre un pôle de minéralisation caractérisé par les traceurs de temps de contact eau- roche dans la zone saturée (Mg et SiO<sub>4</sub>). Il marque les eaux influencées par les éléments chimiques du sol, d'origine météorique ou anthropique, et il distingue d'un côté les eaux caractérisées par de plus fortes concentrations en ions allochtones (sodium, potassium, chlorure, sulfate, ammoniacque, PO<sub>4</sub>) et de l'autre les eaux qui ne sont pas particulièrement riches en ces ions dissous. Le magnésium, bien que présent sur la partie positive de F2, n'est pas placé dans le même secteur que les autres ions et ne saurait être considéré comme allochtone. La vitesse de dissolution du carbonate de calcium supérieure à celle du carbonate de magnésium engendre une augmentation du calcium plus grande que celle du magnésium et par suite un rapport Ca/Mg plus grand en période de crue ou les écoulements sont rapides.

**Tableau 17: Corrélations entre les variables et les facteurs**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
Ca	<b>-0,501</b>	0,269	<b>-0,636</b>
Mg	<b>0,906</b>	0,035	0,347
Na	<b>0,950</b>	-0,174	-0,160
K	<b>0,904</b>	-0,331	-0,074
Cl	<b>0,905</b>	-0,190	-0,123
SO <sub>4</sub>	<b>0,844</b>	<b>-0,440</b>	-0,235
HCO <sub>3</sub>	-0,094	0,065	<b>-0,737</b>
NO <sub>3</sub>	0,343	<b>0,730</b>	0,220
pH	<b>0,449</b>	<b>0,784</b>	-0,066
NO <sub>2</sub>	0,069	0,397	<b>0,675</b>
NH <sub>4</sub>	<b>0,784</b>	-0,018	0,292
PO <sub>4</sub>	<b>0,457</b>	<b>-0,466</b>	-0,150
MES	0,308	-0,042	-0,355
SiO <sub>2</sub>	<b>0,515</b>	<b>0,645</b>	0,026
cond	<b>0,699</b>	-0,207	<b>-0,556</b>
T°c	-0,370	0,054	<b>0,869</b>
Ca/Mg	<b>-0,716</b>	0,125	<b>-0,574</b>
IsCalcite	-0,067	<b>0,851</b>	<b>-0,496</b>
IsDolomite	<b>0,471</b>	<b>0,821</b>	-0,155
pCO <sub>2</sub>	<b>-0,435</b>	<b>-0,737</b>	-0,018

**L'axe F2** (Fig. 46) explique 21,96 % de la variance totale et est défini par plusieurs variables : NO<sub>3</sub>(0,730), pH(0,784), SiO<sub>2</sub>(0,645), IsC(0,851), IsD(0,821), en opposition avec pCO<sub>2</sub>(-0,737) et dans une moindre mesure la SO<sub>4</sub> (-0,440), PO<sub>4</sub> (-0,466). (Tableau. 17)

L'opposition des variables pCO<sub>2</sub> et pH traduit en particulier le rôle de la zone d'infiltration dans les équilibres ainsi que les conditions de circulation dans le système qui sont liées, entre autre, à la structure même de l'aquifère. Les eaux sont sursaturées en raison des échanges gazeux continuels entre l'eau (CO<sub>2</sub> dissous) et la phase gazeuse du massif alimentée par les circulations d'air. Ce facteur représente la localisation spatiale de l'acquisition de la minéralisation. Le pôle négatif de l'axe (pCO<sub>2</sub>) souligne le caractère superficiel des aquifères. On remarque que les eaux concernées sont justement les eaux de l'aquifères épikarstiques de la source Poirier.

Le pôle positif (pH) caractérise la présence d'une zone noyée développée. Ce phénomène est particulièrement vrai pour les basses eaux riches en ions SiO<sub>2</sub> de temps de séjours (rôle importante de la zone noyée dans les circulations) et dans une moindre mesure pour les eaux de hautes eaux.

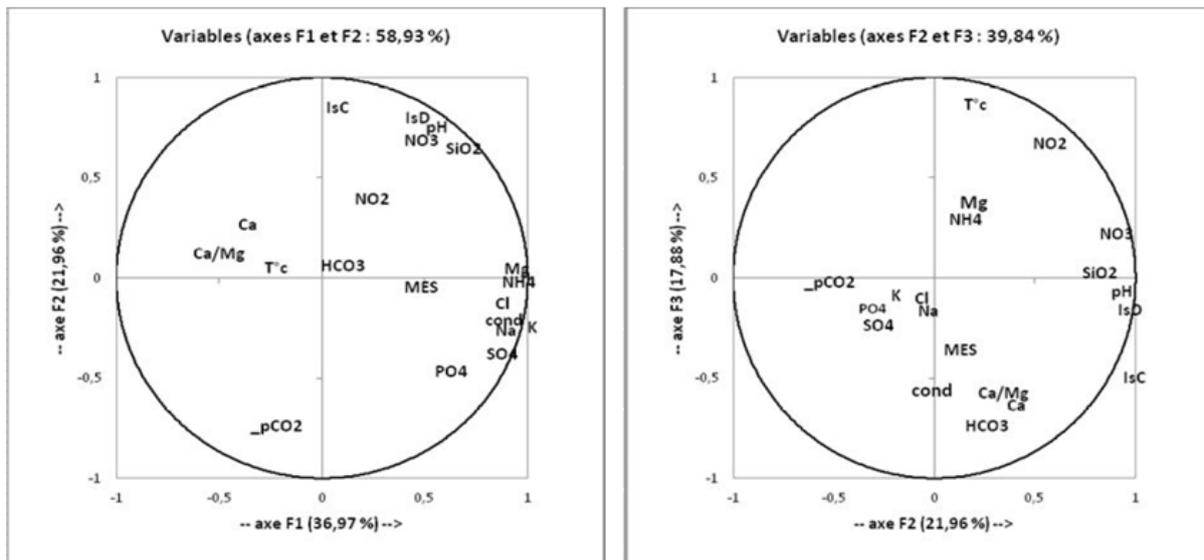


Figure 46: ACP sur les systèmes karstiques de la source Poirier (Jan/2014 – Jan/2015)

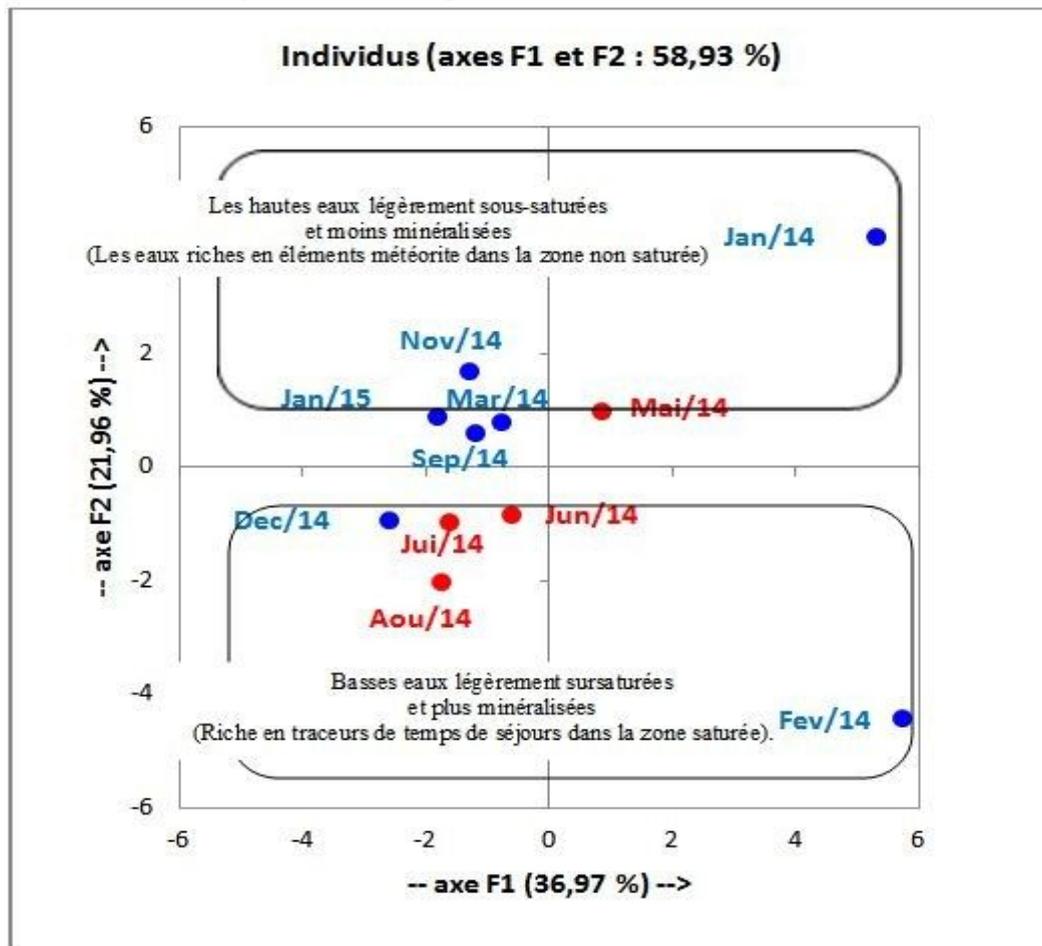


Figure 47: ACP sur les systèmes karstiques de la source Poirier (plan des individus) (Jan/2014 – Jan/2015)

**Sur le plan des individus** (Figure. 47) :

L'axe F2 qui se rapporte essentiellement aux conditions d'écoulement, montre un passage progressif entre les eaux de crues légèrement sous-saturées et moins minéralisées (les eaux riches en éléments météorite) aux basses eaux légèrement sursaturées et plus minéralisées (les eaux riches en traceurs de temps de séjours dans la zone saturée). En effet, en période de crue, les écoulements sont plus rapides et les eaux d'infiltration sous-saturées n'ont pas assez de temps pour s'équilibrer vis-à-vis la calcite et les eaux à l'exutoire sont légèrement sous-saturées.

## 2.5. La source Ronde

Les résultats de cette analyse montrent que les différentes variables sont moyennement liées car les 3 facteurs n'expliquent pas plus que 65,63% de la variance totale. On remarque que la variance expliquée dans le plan (F1-F2) est moyennement importante (48,66 %), et dans le plan F2-F3 est relativement faible 38,42 % de celle-ci. Ceci implique qu'une grande partie de l'information est expliquée sur les importantes particularités chimiques de du système karstique de la source Ronde. (Tableau 18)

**Tableau 18: Corrélations entre les variables et les facteurs**

	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>
Ca	-0,382	<b>0,743</b>	0,343
Cl	<b>0,552</b>	0,186	-0,308
Cond	<b>0,429</b>	<b>-0,605</b>	0,102
HCO <sub>3</sub>	-0,187	<b>0,678</b>	<b>-0,629</b>
K	-0,083	<b>-0,722</b>	<b>0,576</b>
Mg	<b>0,430</b>	-0,186	<b>-0,678</b>
Na	-0,268	0,388	0,213
NH <sub>4</sub>	-0,303	0,254	<b>-0,582</b>
NO <sub>2</sub>	<b>-0,533</b>	-0,268	<b>-0,575</b>
NO <sub>3</sub>	-0,004	<b>-0,518</b>	-0,046
pH	<b>0,927</b>	0,116	0,135
PO <sub>4</sub>	<b>0,573</b>	<b>0,453</b>	-0,135
SiO <sub>2</sub>	0,256	<b>0,425</b>	-0,015
SO <sub>4</sub>	0,066	-0,151	<b>0,685</b>
T°C	0,294	<b>-0,629</b>	-0,391
Ca/Mg	<b>-0,435</b>	<b>0,632</b>	0,563
IsCalcite	<b>0,829</b>	<b>0,504</b>	0,117
IsDolomite	<b>0,933</b>	0,276	-0,061
_pCO <sub>2</sub>	<b>-0,878</b>	0,066	-0,323



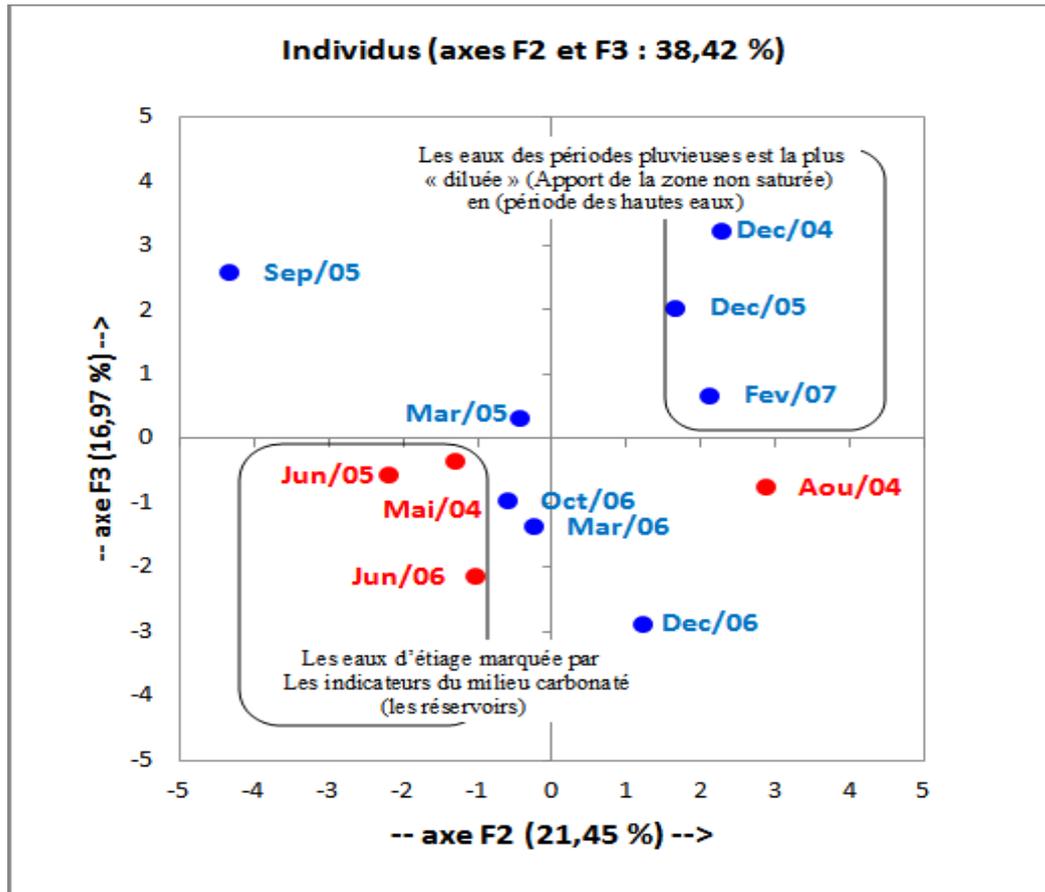


Figure 49: ACP sur les systèmes karstiques de la source Ronde (plan des individus) (Mai/2004 – Février /2007)

### 3. Conclusion

L'importante information hydrochimique récoltée pendant les années 2004-2006 et pendant la période hydrologique 2014 concernant un grand nombre d'aquifère carbonatés de la région des Monts de Saïda, et de surcroît de nature très diverses, nécessite une approche méthodologique adaptée

#### Les systèmes Ain Zerga et Poirier

- Les eaux sont sursaturées en raison des échanges gazeux,
- Le contexte physique, (altitude du bassin (température), l'importance de la végétation et des sols et la morpho-structure de la zone qui alimente la source) ainsi que pollution anthropique agricole sont traduits par les conditions environnementales de production de  $\text{CO}_2$  en présence des éléments carbonatés et par l'association des ions de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^+$ ,

- Le rôle de la zone d'infiltration est bien marqué par les variabilités des  $pCO_2$  et pH (les eaux de l'aquifères épikarstiques de la source Poirier) ce qui traduit les conditions de circulation dans le système qui sont liées et la structure même de l'aquifère.

- le rôle important de la zone noyée dans les circulations sont traduits par les basses eaux riches en ions  $SiO_2$  de temps de séjours.

#### **Forage N62 et Ain Teghat**

- Le Forage N62 est bien discriminée en raison de ses teneurs élevées en nitrates montrant des variations importantes suivant les périodes hydroclimatiques. De la même façon que la source Ain Teghat. Sachant qu'ils se trouvent proches à des agglomérations.

- Ces systèmes sont épikarstique et particulièrement vulnérable aux pollutions de la surface. L'opposition du Cl,  $SiO_2$ ,  $T^\circ C$  et pH au  $NO_3$  caractérise l'origine spatiale de la minéralisation.

- L'interaction des eaux de la zone saturée / les eaux de la zone non saturée engendré par les équilibres calcocarbonique qui est traduit la part de l'infiltration dans l'acquisition de la minéralisation en milieu carbonaté via les équilibres calco-carboniques entre le sol et la zone saturée de l'aquifère.

#### **La source Ronde**

- la participation de la zone non saturée est présente par les traceurs de la pollution anthropique correspond aux eaux récentes (Cond, K,  $NO_3$ ,  $T^\circ c$ )

- les eaux des périodes pluvieuses est la plus « diluée » et elle est plus influencé par la surface (apport de la zone non saturée en période des hautes eaux), ceci traduit un développement important de la karstification

Les deux groupes des eaux constatés sont :

- l'apport de la zone non saturée en périodes pluvieuses, périodes où la concentration en pollution anthropique est assez élevée).

- c'est l'apport de la zone saturée en période de basses eaux qui correspondent aux eaux plus minéralisées et plus riche en magnésium et silicium.

- les sources Ain Teghat, Ain Zerga et Poirier présentent une importante réserve de la zone non saturée épikarstiques des Monts de Saïda

## **Chapitre IV : Etude des équilibres calcocarboniques**

## **Introduction**

Devant le nombre important de données (plus de 80 prélèvements) il a été nécessaire de synthétiser l'information par Les méthodes statistiques multidimensionnelles (analyses en composantes principales) et par l'utilisation de paramètres caractéristiques du milieu carbonaté (indice de saturation,  $p\text{CO}_2$ , relation Mg-Ca).

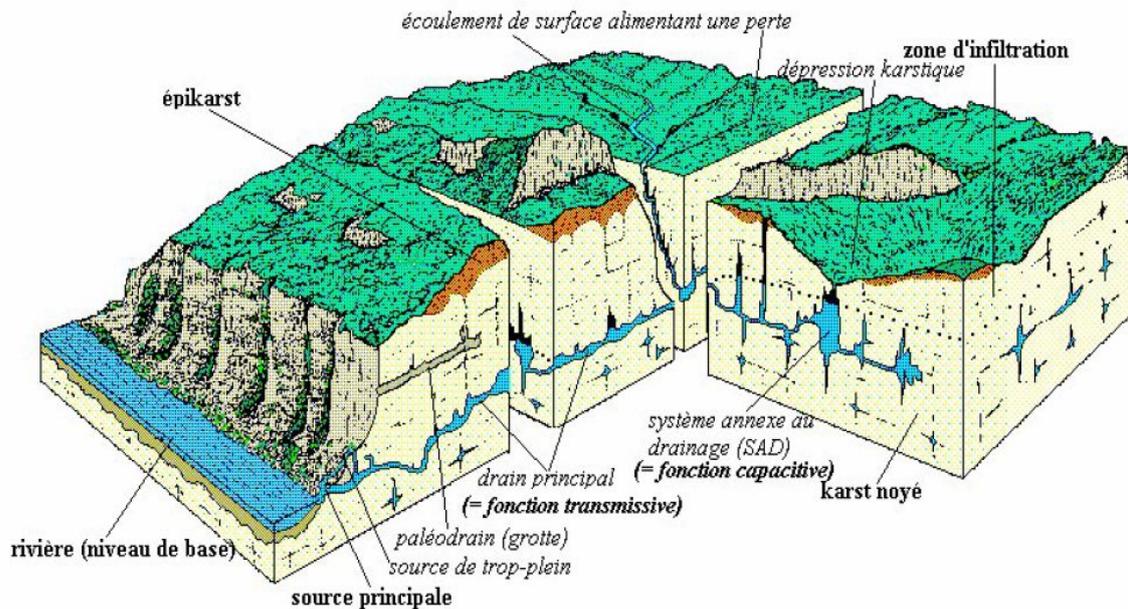
### **1. Rappel sur le rôle du $\text{CO}_2$ dans le processus de karstification**

La genèse des systèmes karstiques est étroitement corrélé aux conditions d'équilibre du milieu qui sont régies par les lois du système calco-carbonique. Les études effectuées dans ce domaine ont rapidement montré l'importance primordiale du gaz carbonique dans le processus de karstification (Bakalowicz, 1979). En effet c'est le  $\text{CO}_2$  dissous ou acide carbonique qui est à l'origine de la dissolution de la roche carbonaté suivant les réactions de base du système  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}/\text{CaMgCO}_3$ . Les équations théoriques étant posées, il restait à découvrir l'origine et les modalités de transport du gaz carbonique dans le milieu.

La seule participation du gaz carbonique atmosphérique ( $\sim 10^{-3,5}$  atm) ne suffisait pas à expliquer les teneurs parfois importantes observées dans les eaux karstiques. Les recherches sur ces processus ont mis en évidence le rôle primordial des sols dans la production de  $\text{CO}_2$ . Cette dernière dépend de processus biochimiques, oxydation de la matière organique catalysée par la présence de bactéries enzymatiques (in Plummer et al, 1978).

L'eau des précipitations, généralement à pH faible, s'infiltré dans le sol, se charge en  $\text{CO}_2$  d'origine pédologique et acquiert ainsi un potentiel agressif (acidité) qui lui permettra d'attaquer l'encaissant par dissolution de la calcite. Les variations saisonnières de la  $p\text{CO}_2$  observées aux exutoires ont été rapidement corrélées à la production de gaz carbonique dans le sol, laquelle est fortement dépendante des conditions hydroclimatiques (température, cycle végétatif, précipitations...).

Ainsi les caractéristiques physiques des bassins karstiques deviennent particulièrement importantes dans l'établissement des conditions initiales à la karstification. L'altitude des bassins, la présence de végétation, l'épaisseur des sols ou encore l'aspect géologique (structure, fracturation, lithologie) seront autant de paramètres qui expliqueront qu'un système est plus karstifié qu'un autre ou qu'il n'obéit pas au même fonctionnement. (Figure. 50)



**Figure 50: Représentation du système karstique avec les différents éléments de sa structure**

(conduits ou drains, lieux de stockage ou « système annexe au drainage », épikarst, formes de surface), et les différentes modalités d'écoulement associées (Mangin, 1975).

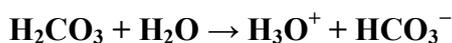
## 2. Processus de karstification des formations géologiques carbonatées

Dans le processus de « karstification », les roches carbonatées sont façonnées par solvatation selon les réactions chimiques suivantes :

- dissolution du dioxyde de carbone :



- dissociation aqueuse de l'acide carbonique :



- attaque acide des carbonates (« calcaires ») :



- équation bilan :



Dans la teneur en hydrogencarbonate, un atome de carbone provient de la matrice calcaire et l'autre du gaz carbonique (surtout d'origine biogénique car la concentration de ce dernier dans le sol est beaucoup plus importante que dans l'atmosphère). Ces deux sources sont d'ailleurs différenciables par leurs teneurs en isotopes du carbone (ségrégation du carbone 13 par la biomasse).

## Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique

La géomorphologie karstique est donc favorisée par :

- l'eau : -
  - son abondance ;
  - sa teneur en CO<sub>2</sub> (augmentant avec la pression) ;
  - sa faible température (plus une eau est froide, plus elle est chargée en gaz donc en CO<sub>2</sub>) ;
- les êtres vivants (qui rejettent du CO<sub>2</sub> dans le sol par la respiration, ce qui renforce considérablement sa teneur) ;
- la nature des formations lithologique (fracturations, compositions des carbonates...)
- le temps de contact eau-roche.

Une zone géographique froide, humide et calcaire est ainsi fortement prédisposée à la formation de karsts qui se répertorient cependant aussi dans les régions climatiques extrêmes. (Figure. 51)

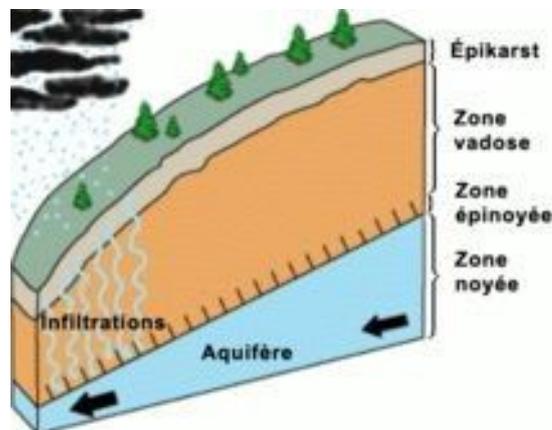


Figure 51: Schéma de l'hydrosystème karstique

### 3. Les phénomènes des roches karstifiables

L'étude des aquifères dont les roches karstifiables, montre que la karstification entraîne l'apparition d'une organisation des écoulements. La structure qui en résulte confère à cet aquifère des caractéristiques très particulières qui le distinguent nettement des aquifères poreux et fissurés. Sans approche nécessite souvent la reconnaissance préalable du degré de structuration des écoulements.

## **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Pour cela, deux méthodes sont proposées. L'une est fondée sur l'analyse des débits aux exutoires, l'autre sur les renseignements hydrogéochimiques fournis à ces mêmes exutoires.

L'aquifère karstique est particulièrement complexe et pose le plus de problèmes à l'hydrogéologue. Cela tient au fait que ses caractéristiques sont mal définies et que le mode d'écoulement des eaux y est tout à fait particulier.

Les phénomènes karstiques se rencontrent essentiellement dans les roches carbonatées, calcaires et dolomies. Ces formations possèdent une porosité primaire, qui peut parfois être importante (plus de 20 % pour certaines craies ou dolomies). Dans de nombreux cas, la porosité primaire est très faible, mais une importante fissuration détermine une nouvelle porosité qui est non négligeable. Il en résulte que les roches carbonatées sont le plus souvent des formations aquifères dont les caractéristiques peuvent être comparables à celles des milieux poreux.

Cependant, dans d'autres cas, des anomalies apparaissent fréquemment. Déjà, dans la craie (Mégny C. ; 1964), faisait remarquer le comportement très particulier des écoulements en hautes eaux. A maintes reprises, on a signalé, dans des formations carbonatées, une grande variabilité des niveaux piézométriques, avec manifestation de discontinuités. Parfois, lors de pompages, on note même des réactions inattendues et surprenantes (M. Bakalowicz, 1973 ; C. Drogue, 1971 ; G. Marjolle et J. Salado, 1975). Toutes ces observations indiquent clairement que ce type de roches peut être soumis à des modalités différentes de circulation des eaux. Dans les exemples cités, les auteurs attribuent la responsabilité de ces particularités à la karstification.

Il convient donc de savoir :

- si ces phénomènes sont bien dus à la karstification et s'ils peuvent conduire à mettre en évidence un karst fonctionnel ;
- si ces phénomènes correspondent à des effets locaux ou plus généraux

### **3.1. Caractéristiques de l'aquifère karstique, son originalité.**

La nature des mécanismes mis en jeu lors de la karstification a conduit à souligner le rôle primordial joué par les circulations d'eau. Il a ensuite été montré (A. Mangin, 1975, 1973) l'existence d'une interaction, entre la formation du modèle karstique et les écoulements d'eau. La morphologie qui découle de la karstification peut être identifiée par l'organisation d'un drainage des eaux à l'intérieur de la roche, et inversement, ce qui correspond à un phénomène analogue à celui que l'on observe pour les bassins versants de surface.

## **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

L'aquifère karstique apparaît donc comme très hétérogène. Toutefois, cette hétérogénéité est particulière, car elle ne résulte pas de la juxtaposition aléatoire de différents types de vides (porosité primaire, fissuration et vides karstiques). L'hétérogénéité de l'aquifère karstique tient son originalité de la répartition ordonnée des vides autour d'axes de drainage, selon une certaine hiérarchie; l'aquifère karstique est structuré par rapport à ce drainage. Une telle structure implique certaines conséquences :

1) Selon le degré de développement de cette structure, les écoulements sont plus ou moins organisés, ce qui traduit une certaine évolution de l'aquifère karstique. Le point de départ de cette évolution est l'aquifère poreux ou fissuré (correspondant au « diffuse flow system » des anglo-saxons) le terme ultime consiste en un écoulement limité aux seuls drains (c'est le « conduit flow system » des anglo-saxons).

Nous sommes ainsi conduits à distinguer l'aquifère poreux, ou fissuré, non organisé sur le plan du drainage, de l'aquifère karstique qui l'est. En fait, sous le vocable d'aquifère karstique, se rapportent tous les termes de l'évolution d'un drainage jusqu'à son point ultime.

2) L'existence de cette structure particulière contraint à préciser le niveau d'échelle convenant à la résolution de tout problème lié à cet aquifère. En effet, si l'on travaille à l'échelle s'étendant du mètre cube à l'hectomètre cube, on constate l'existence d'un caractère aléatoire de l'aquifère.

Par exemple, un forage peut rencontrer un vide karstique ou passer à quelques mètres, sans que l'on puisse le prévoir. En revanche, à l'échelle d'un massif karstifié on retrouve l'organisation mentionnée plus haut, donc une interdépendance des différents éléments de l'aquifère.

Ainsi, cet aquifère présente deux caractères apparemment contradictoires : l'un aléatoire, mais à grande échelle, l'autre structuré, à petite échelle. Il en découle deux propositions :

**Premièrement** : cette dualité des caractères des éléments du karst, aléatoires et structurés suivant le niveau d'échelle, correspond exactement à la définition des variables régionalisées, telle qu'elle a été donnée par (G. Matheron 1965).

Par conséquent on va traiter les variables du karst comme des variables régionalisées. Il apparaît donc fondamental de déterminer en premier lieu le caractère « régional » des variables étudiées, c'est-à-dire la structure du domaine karstique avant de procéder à toute autre investigation.

**Deuxièmement** : il convient de choisir une unité de référence à un niveau d'échelle suffisant et qui englobe l'ensemble de la structure. On est alors conduit à la notion de système karstique, identique à celle fournie par l'analyse des systèmes et qui correspond à l'unité structurale recherchée (A. Mangin, 1973). Toutes les méthodes d'investigations relatives à l'aquifère karstique imposent donc de définir les deux démarches énoncées ci-dessus.

En effet, si l'aquifère est peu organisé, l'étude pourra être entreprise sans grands risques avec les techniques appropriées aux aquifères poreux ou fissurés. Si le drainage est bien développé, les méthodes devront en tenir compte. De même suivant le niveau d'échelle du problème qui est posé, on fera ou non intervenir la structure des écoulements.

Par exemple lors de l'exécution d'un forage, si l'on est en dehors du drainage, les essais réalisés peuvent être conduits sans qu'il soit nécessaire de tenir compte de celui-ci, les drains intervenant alors comme une condition aux limites.

Mais si le forage est utilisé comme captage, la détermination du périmètre de protection ne saurait être faite sans l'introduction de la structure des écoulements, qui montrent la plus ou moins grande vulnérabilité du secteur étudié à une pollution. Dans ce qui suit seront développées par conséquent les diverses méthodes mises au point pour identifier le degré d'organisation de l'aquifère.

### **3.2. Identification du degré d'organisation d'un aquifère carbonaté par l'analyse des débits**

Le système karstique est caractérisé par une fonction, la réponse impulsionnelle, qui transforme les impulsions d'entrée (les précipitations) en autant de réponses (les hydrogrammes aux divers exutoires).

La forme de cette fonction traduit logiquement la nature du système karstique. Son analyse nous permet alors de mettre en évidence les caractères propres à l'aquifère karstique et son degré d'organisation.

L'information fournie à l'exutoire ne correspond pas à la réponse impulsionnelle (les précipitations ne pouvant être considérées comme une impulsion unitaire), mais au produit de convolution de cette dernière par la fonction d'entrée. De ce fait, il serait nécessaire en toute rigueur de rechercher d'abord l'hydrogramme unitaire.

Toutefois cette démarche est toujours difficile et délicate et il est apparu préférable, comme l'ont proposé plusieurs auteurs (H. Schoeller, 1962), notamment de travailler directement sur les hydrogrammes des sources sans traitement préalable. Cela tient au fait que ses caractéristiques sont mal définies et que le mode d'écoulement des eaux y est tout à fait particulier.

### **33. Identification du degré d'organisation d'un aquifère carbonaté par l'étude géochimique des eaux.**

Le contenu chimique des eaux souterraines est déterminé par des facteurs :

- intrinsèques de l'aquifère, tels que l'organisation des vides et la dynamique des circulations d'eau dans ces vides ;
- extrinsèques, que sont les conditions bioclimatiques, régissant la production du CO<sub>2</sub>, et les lois de la chimie réglant les équilibres et la cinétique des réactions.

Ces derniers sont désormais suffisamment bien connus dans le cas des eaux bicarbonatées (R. M. Garrels et C. L. Christ, 1965 ; D. Langmuir, 1965). C'est pourquoi plusieurs auteurs (E. T. Shuster et N. V. B. White, 1971 ; J. J. Drake et S. Harmon, 1973) ont proposé des méthodes statistiques permettant de distinguer les aquifères carbonatés fissurés des aquifères karstiques. Ces méthodes, reprises par de nombreux auteurs, s'appuient sur des hypothèses implicites, qui n'ont pas été vérifiées.

L'échantillonnage, à pas de temps mensuel ou trimestriel, effectué au cours d'un cycle hydrologique, est représentatif des variations saisonnières.

La loi de distribution de données géochimiques fournies par différents échantillonnages est unique, comme l'implique le fait d'utiliser des paramètres définissant cette distribution, tels que la moyenne, l'écart type ou le coefficient de variation.

Les nombreuses données hydrochimiques obtenues sur un système karstique expérimental, celui du Baget (Ariège) ont permis d'éprouver ces hypothèses et de proposer une méthodologie d'identification (M. Bakalowicz, 1976, 1977).

Seule a été considérée la conductivité électrique de l'eau, qui est représentative de son chimisme. C'est un paramètre géochimique global, très facile à obtenir sur le terrain, avec une bonne précision et une excellente reproductibilité (M. Bakalowicz, 1975).

Le recours à la théorie des variables régionalisées (G. Matheron, 1965) est apparu indispensable à la discussion de la représentativité d'un échantillonnage. Par ses variations temporelles, la conductivité de l'eau d'une source karstique répond exactement à la définition des variables régionalisées ; par conséquent, ses variations peuvent être étudiées grâce aux méthodes de la géostatistique.

### **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

L'outil de base de cette théorie est le variogramme. Sur les données enregistrées au Baget, il montre très clairement que les mécanismes qui engendrent les phénomènes observés sont les mêmes quelque soit le niveau d'échelle d'observation (M. Bakalowicz, 1971). En conséquence, un échantillonnage bimensuel fournit une estimation satisfaisante des variations du chimisme de l'eau au cours d'un cycle.

En outre, selon cette théorie, les valeurs prises par la conductivité doivent être considérées comme ayant été obtenues simultanément par un tirage au sort selon une loi de probabilité définissant la fonction aléatoire, fonction dont la réalisation est la courbe des variations de la conductivité au cours du temps.

#### **3.4. Les indicateurs chimiques de temps de séjour :**

Les indicateurs chimiques du temps de séjour montrant l'évolution la plus nette dans le contexte de l'aquifère bajo-bathoniens sont le  $\text{Ca}^{2+}$ , le  $\text{Mg}^{2+}$ , le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{K}^+$ . L'évolution de leurs concentrations est à mettre en relation avec la cinétique des interactions eau-roche dans le réservoir.

Les phénomènes d'échange de bases entre des argiles callovo-oxfordiennes et les eaux souterraines sont à l'origine d'une diminution des teneurs en calcium au profit d'une nette augmentation des teneurs en sodium. Parallèlement à ces échanges, les teneurs en magnésium présentent une évolution en deux phases : tout d'abord, une augmentation des teneurs liées au temps de séjour dans le réservoir (substitutions isomorphiques, précipitation/recristallisation de la calcite ou encore dissolution incongruente de dolomite) suivie, dans un second temps, d'un échange de base avec les argiles. Ces réactions entraînent une évolution des eaux du faciès bicarbonaté calcique au faciès- bicarbonaté magnésien dans l'aquifère captif.

La silice s'avère aussi un indicateur de temps de séjour intéressant bien que les concentrations dans la partie libre soient assez variables. Dans la partie captive de l'aquifère, les teneurs en silice, stables et élevées, peuvent contribuer de façon sûre à l'identification des eaux à long temps de séjour.

### **3.5. Utilisation de la relation d'indice de saturation et pression partielle de CO<sub>2</sub>**

L'étude de la pCO<sub>2</sub> et de l'indice de saturation d'une eau vis-à-vis de la calcite (ISc) est particulièrement bien adaptée à une première approche hydrochimique des systèmes étudiés. L'indice de saturation nous renseigne sur l'état d'équilibre des systèmes, donc sur les conditions d'écoulement existant dans le milieu. La pCO<sub>2</sub> calculée est un bon indicateur de l'origine des différents types d'eau rencontrés à l'exutoire. Nous rappellerons les équations suivantes :

#### **3.5.1. Indice de saturation :**

$$ISc = \log [IAP (T)/Kc(T)]$$

$$dpH = pHeq - pHmes$$

Avec IAP (T) : produit d'activité ionique (à la température de l'échantillon)

Kc (T) : constante d'équilibre de la calcite (à la température de l'échantillon) pHeq : pH d'équilibre

pHmes : pH mesuré

#### **3.5.2. Pression partiel de CO<sub>2</sub>**

$$pCO_2 = \frac{aHCO_3^- \cdot aH^+}{K_1(T) \cdot KCO_2(T)}$$

Avec

aHCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et aH<sup>+</sup> : activité des ions

K<sub>1</sub>(T) : constante de dissociation de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Kco<sub>2</sub>(T) : constante de la loi de Henry

La pCO<sub>2</sub> équilibrante et l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite ont été calculés pour l'ensemble des données à l'aide du logiciel Diagramme. Ce dernier, utilisant les réactions d'équilibre classiques du système carbonaté, prend en compte la force ionique des solutions, le coefficient d'activité des ions ainsi que certains ions appariés (MgCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

La figure. 52 ; représente l'indice de saturation en fonction de la pCO<sub>2</sub> pour l'ensemble des systèmes étudiés (05 sources). Ce mode de représentation (Harum et al, 1992) a l'avantage de synthétiser les observations et fournir des informations de différentes valeurs d'indice de saturation.

### **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

En compte tenu des erreurs relatives aux calculs des indices de saturation de la dolomite, en particulier la mesure toujours délicate du pH. Cette dernière rentre en effet pour 50% dans le calcul d'erreur sur ISc (olivier, 1978). Nous avons :

- $0,1 > \text{ISc} > -0,1$  les eaux sont considérées comme étant à saturation,
- $\text{ISc} > 0,1$  représentent les eaux sursaturées,
- $\text{ISc} < -0,1$  ces valeurs représentent les eaux sous-saturées.

On constate les points relatifs aux prélèvements effectués pendant les cycles 2004 et 2006 ainsi que le cycle 2014 s'alignent plus ou moins bien selon les systèmes considérés. Pour certains systèmes montrent généralement des eaux sursaturées, sauf quelques points en période de crue qui se rapprochent de la saturation (Forage N62, Ain Zerga, Ain Teghat, Source Ronde), la saturation est étroitement corrélée avec les variations de la  $p\text{CO}_2$ . Ces relations linéaires sont dues à des phénomènes de dégazage dans l'aquifère. En effet ces eaux des sources citées précédemment proviennent d'horizons proches de la surface où la production de  $\text{CO}_2$  est importante. Ceci a permis à l'eau d'acquérir un potentiel agressif élevé et ainsi de dissoudre le calcaire dolomitique à l'origine des fortes teneurs en bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ).

Ces rééquilibrations de la  $p\text{CO}_2$  à l'intérieur de la zone non saturée s'expliquent par le fait que les systèmes peuvent être ventilés, introduction d'air à  $p\text{CO}_2$  atmosphérique, ce qui provoque un nouvel état d'équilibre entre la phase gazeuse et liquide.

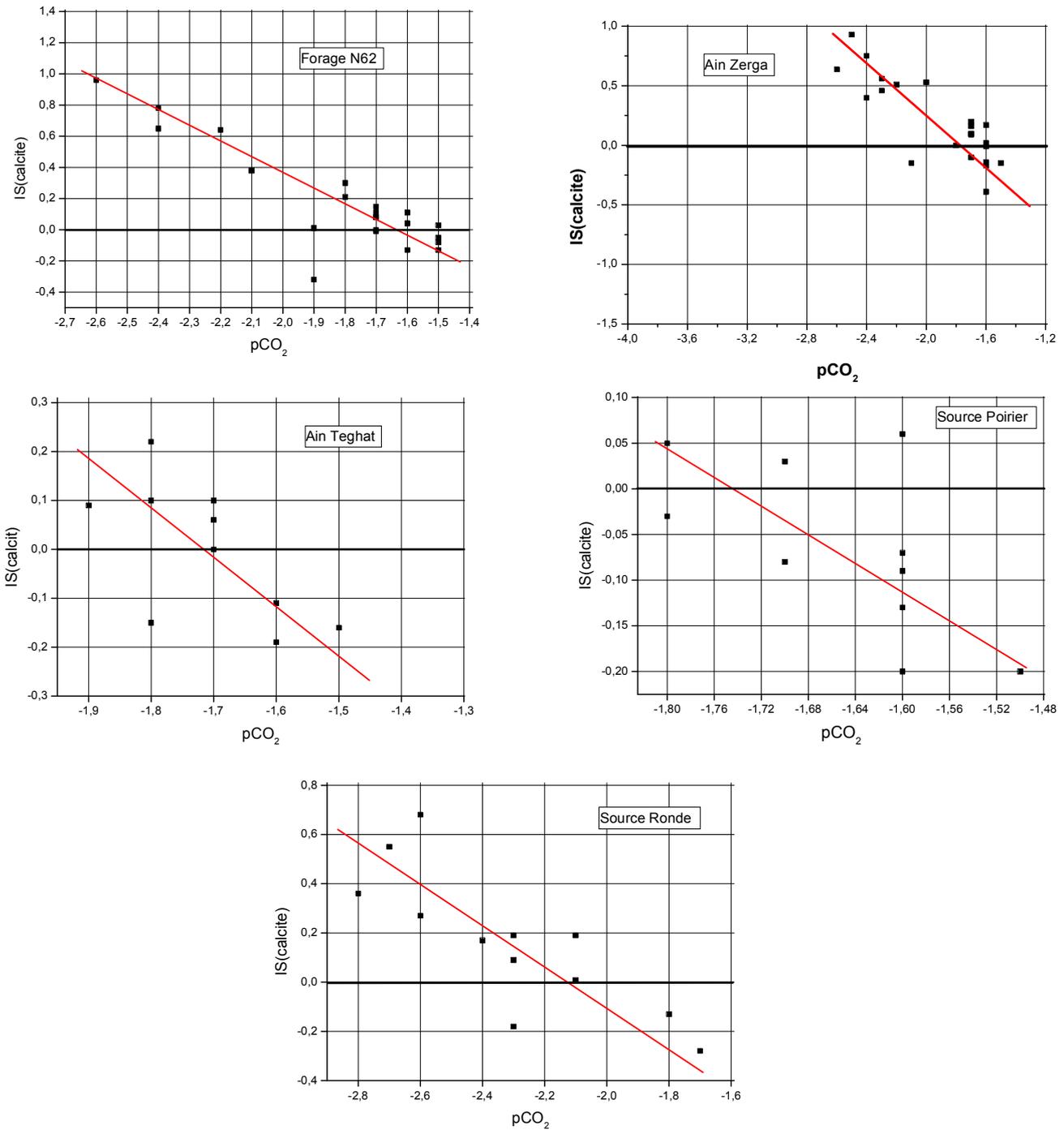
Ce phénomène avait conduit (J.Thraikill 1981) à distinguer deux types d'écoulement dans la zone non saturé :

- l'un correspondant à des écoulements en milieu ouvert (apport continu en  $\text{CO}_2$  atmosphérique)
- l'autre en milieu fermé en équilibre avec la  $p\text{CO}_2$  du sol.

Ces deux types d'eau peuvent bien entendu être mélangés dans le système et donner un équilibre caractéristique du réservoir. De même le dégazage dans la zone non saturée de l'aquifère peut provoquer une augmentation de teneur en  $\text{CO}_2$  de la phase gazeuse.

Dans de nouvelles conditions d'écoulement ce  $\text{CO}_2$  est susceptible d'enrichir à nouveau l'eau après dissolution, et ainsi de continuer la karstification en profondeur dans le massif (Bakalowicz, 1979).

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 52: Relation indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) et pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) dans les systèmes karstiques des Monts de Saïda**

## **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

- Les variations latérales observées sur le diagramme pour l'ensemble des systèmes s'expliquent par deux phénomènes :

**Premièrement**, il peut s'agir d'un déséquilibre causé par l'arrivée :

- soit d'eau nouvelle (infiltration directe),
- soit d'eau provenant de la zone non saturée (eau stockée en transit) dont l'alcalinité carbonatée serait différente des eaux de la zone noyée. Cette eau serait chassée au moment de la reprise.

**Deuxièmement**, il peut exister une évolution terminale des eaux à l'abri d'une phase gazeuse. Ce phénomène dans certains aquifères traduit la présence d'une zone noyée souvent importante ( $I_{Sc} = 0$ ,  $pCO_2$  variable). La variabilité de la  $pCO_2$  est alors liée aux conditions initiales rencontrées dans la zone d'infiltration.

La quasi-superposition des nuages de points des différents systèmes sur le diagramme  $pCO_2 - I_{Sc}$  montre d'une façon générale des comportements semblables (variations). Cependant, l'étude de la variation temporaire des différents éléments de l'équilibre calco- carbonique nous a permis d'établir des distinctions en particulier sur leur degré d'évolution et leur fonctionnement.

### **3.6. Interprétation des résultats**

La relation indice de saturation en fonction de la  $pCO_2$  souligne la forte variabilité des types d'eau (n droites) que l'on peut rencontrer entre les différents aquifères carbonatés de la région Karstique de Saïda. Cette variabilité est avant tout liée à l'origine des eaux parvenant aux exutoires ainsi qu'à leur histoire à travers les systèmes. Ainsi les teneurs moyennes en bicarbonates, plus ou moins élevées, reflètent des conditions initiales différentes sur les bassins (sols, altitude, exposition, géologie...).

L'état de saturation varie selon les systèmes en fonction de la taille et du contexte géo-morpho-structural de ces derniers. Ainsi les sources plutôt superficielles ou épikarstiques situées dans la zone non saturée auront un comportement différent des émergences karstiques possédant une zone noyée développé. Ceci s'explique par les temps de séjour plus ou moins important de l'eau dans différents milieux. Il est intéressant de constater que certains systèmes pourtant peu comparable s'alignent sur les mêmes droites d'équilibre ou possèdent des comportements (variations) semblables.

Cependant, l'étude de la variation temporaire des différents éléments de l'équilibre calco- carbonique nous a permis d'établir des distinctions en particulier sur leur degré d'évolution et leur fonctionnement.

### **3.6.1. Cas des aquifères perchés « superficiels »**

Nous rappellerons que ces sources pérennes se situent dans la zone non saturée du système karstique de Saïda à des altitudes supérieures de 1000m. Pour la majorité d'entre elles, l'eau se ré-infiltre à nouveau dans le système. L'étude de température nous a permis d'établir des distinctions en particulier sur le caractère superficiel de ces aquifères et sur leur degré d'évolution.

#### **3.6.1.1. La source Ronde**

La source Ronde est située à une altitude d'environ 1018 mètres ; au dessus de Ain Zerga (dont le bassin englobe des zones à faible végétation. Ces eaux de petit aquifère perché de haute altitude (plus de 1000m) sont très faiblement minéralisées. On s'aperçoit que la pression partielle de CO<sub>2</sub> est proche des valeurs de pCO<sub>2</sub> atmosphérique donnée dans la littérature (10<sup>-3,5</sup>atm). L'eau circulant dans les horizons superficiels s'équilibre continuellement avec la pCO<sub>2</sub> atmosphérique. (Figure 52)

#### **3.6.1.2. La source Ain Zerga**

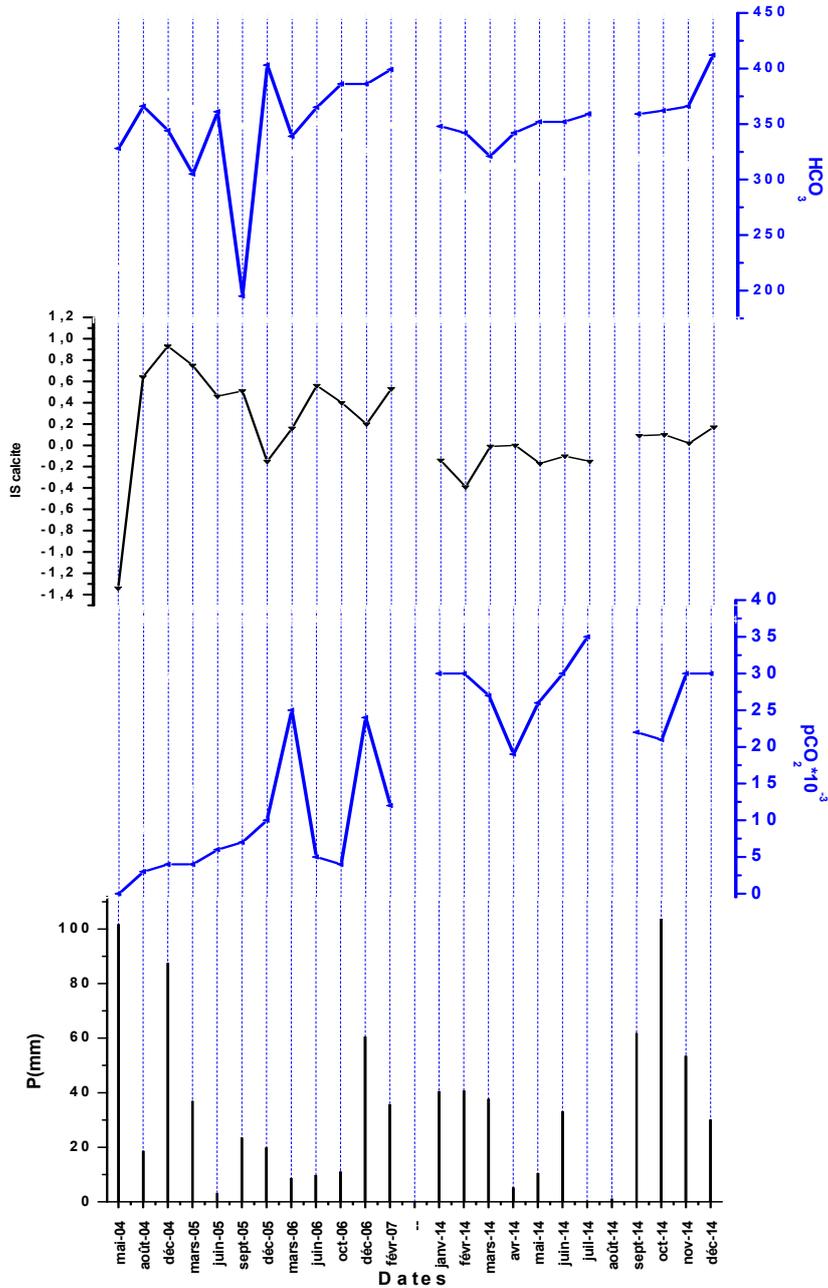
Le bassin de cette source se caractérise par la présence d'une couverture végétale un peu dense. Le couple (sol / végétation) a un rôle essentiel dans la production de CO<sub>2</sub>. Ce sont eux qui expliquent la forte pCO<sub>2</sub> et la minéralisation importante des eaux de la source Ain Zerga (Figure 53).

Le débit minimal observé est de 270 l/s, de même les observations de terrains indiquent de nombreux indices de karstification se traduisant par de fortes variations de débits en période de recharge. A l'évidence nous sommes en présence d'un système bien ouvert vis-à-vis de la calcite.

Les teneurs en bicarbonates sont importantes (proche de 412 mg/l) et calcium (proche de 104 mg/l). Les eaux sont sursaturées sauf pour quelques points en période de hautes eaux qui se rapprochent de la saturation. Cette eau provient d'horizons proches de la surface où la production de CO<sub>2</sub> est importante. Ceci a permis à l'eau d'acquérir un potentiel agressif élevé et ainsi de dissoudre le calcaire à l'origine des fortes teneurs en bicarbonates.

Il y'a d'abord un effet piston énorme dans les drains qui chasse l'eau en transit (l'écoulement différé) provenant des pluies précédents. Ce phénomène explique la très forte montée des teneurs en bicarbonates (indicateur de la zone non saturée). Il est clair que s'il y a eu mise en charge de la réserve noyée la participation de cette eau reste très inférieure à celles des drains et de la zone non saturée (Figure. 53).

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

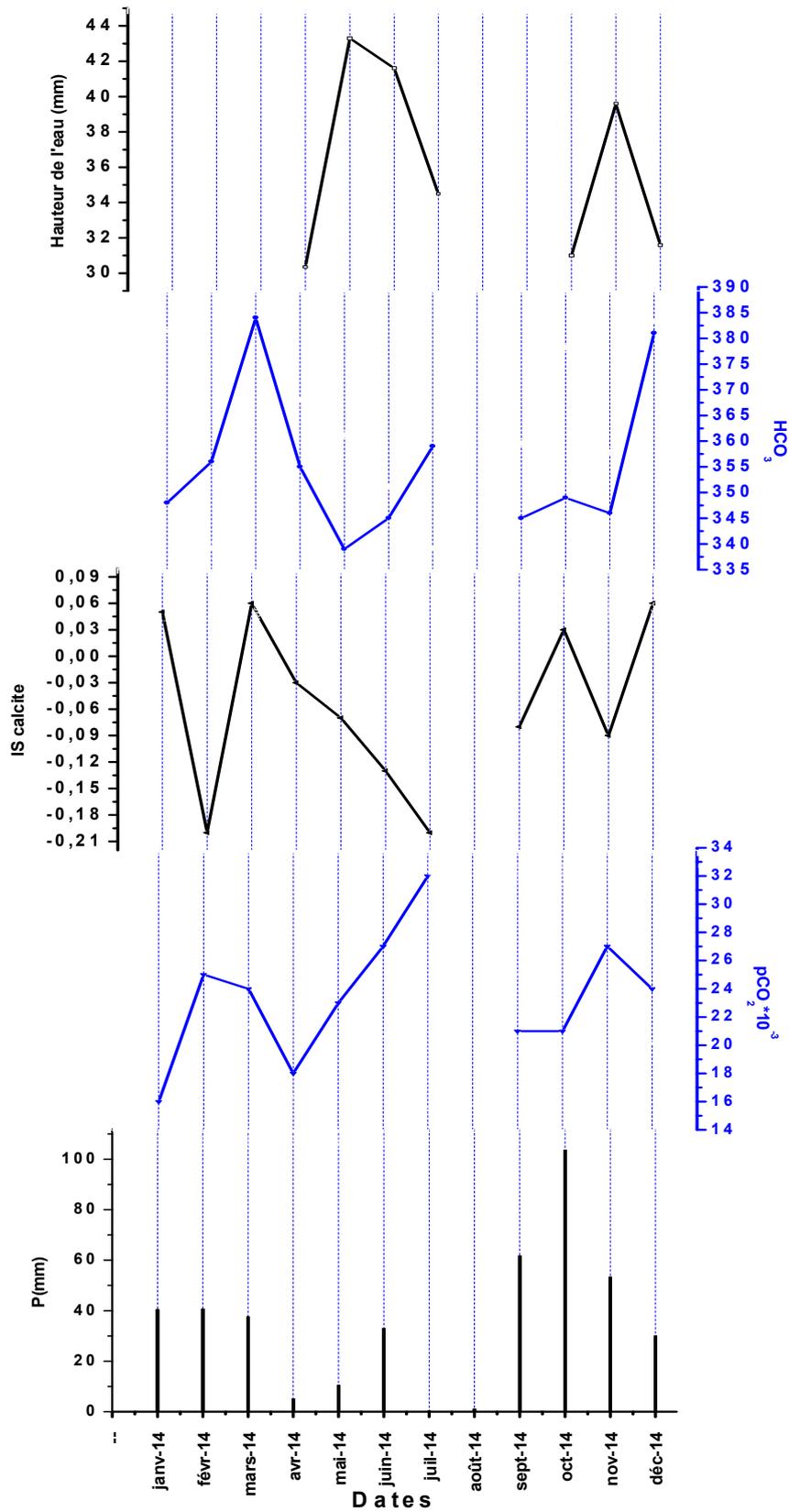


**Figure 53: Evolutions de la saturation dans les eaux d'Ain Zerga (2004-2007), (2014)**

**3.6.1.3. La source Poirier**

Les eaux de ce système sont en moyenne à l'équilibre ou légèrement sous-saturées. Par contre les variations importantes de la minéralisation soulignent la grande hétérogénéité du système déjà mise en évidence par la température. Les points de hautes eaux se décalent vers la droite de la ligne rouge (Figure. 54).

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 54: Evolutions de la saturation dans les eaux Source Poirier (2004-2007), (2014)**

## **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Ceci traduit une augmentation importante des teneurs en  $\text{HCO}_3^-$ , qui passent de 345 mg/l (période d'été) à 381 mg/l en Décembre 2014, et en  $\text{Ca}^{2+}$  de 64 à 80 mg/l. Ce type d'eau montre une  $\text{pCO}_2$  importante et une tendance à la saturation.

En effet, les pluies de fin Octobre et début Novembre (157 mm) ont provoqué la chasse des eaux ayant eu un temps de séjour relativement étendu au sein de la zone non saturée dont la teneur en  $\text{HCO}_3^-$  a atteint une concentration de 381 mg/l.

En période des hautes eaux, les points du système de la source Poirier se déplacent en dessous de la relation entre  $\text{Isc}$  et  $\text{pCO}_2$  pour se rapprocher de l'équilibre, il y a diminution de la charge ionique par effet de dilution Mais aussi augmentation de la  $\text{pCO}_2$  (Figure. 54). On observe donc un mélange entre l'eau du réservoir superficiel et l'eau nouvellement infiltrée. Ceci implique que la quantité de  $\text{CO}_2$  dans le sol est particulièrement importante au moment où intervient la reprise. Ces teneurs élevées peuvent être liées à l'activité organique dans les sols, activité particulièrement importante durant de l'été (Bachelier, 1968, in Bakalowicz, 1979a ; Tyaikill, 1981 ; Solomon, 1987). Dans le cas de la source Poirier ; il est probable qu'une quantité non négligeable de  $\text{CO}_2$  provient de la décomposition de matière organique. En effet le bassin à caractère agricole de cette source reçoit régulièrement des épandages d'engrais organique (Humus).

Les variations des débits de ce système n'est à l'évidence pas issues d'un écoulement en milieu fissuré. Ceux-ci sont caractérisés par de relatives fortes variations et nous observons des valeurs de la hauteur d'eau comprises entre 28 cm et plus de 55 cm. La différence entre le comportement hydrodynamique et hydrochimique à l'exutoire des systèmes pourrait être engendrée par un phénomène de "double porosité" (Emblanch, 1997). Ainsi le débit serait contrôlé par des fractures ouvertes affectant plutôt les zones calcaires alors que la fissuration fine et la porosité d'interstice des dolomies contrôlerait la minéralisation.

### **Discussion**

Ces aquifères suspendus, drainant la « zone non saturée » du système karstique des Monts de Saïda, sont susceptible de posséder des réserves conséquentes et certainement de fournir un débit important à ces systèmes. La mise en mouvement de ce type d'eau au moment de la reprise est provoquée, dans la majorité des systèmes étudiés, par effet piston. Suivant les conditions d'écoulement on observera des eaux sursaturées ou sous-saturées Mais dans tous les cas riches en  $\text{CO}_2$  pédologique.

Ce potentiel agressif est alors susceptible d'être introduit en profondeur et de permettre la karstification jusqu'à dans la zone noyée. Cette possibilité sera fonction bien entendu de la structure du système et de son fonctionnement hydrodynamique. Les quelques points qui se rapprochent de la sous-saturation sont des prélèvements effectués en hautes eaux (crues d'hiver).

### **3.6.2. Cas des aquifères de versant**

#### **3.6.2.1. Le Forage N62**

Le forage N62 située sur les versants nord des Monts de Saïda. Les points qui se rapprochent de la sous-saturation sont des prélèvements effectués en hautes eaux (crues d'hiver). (Figure 55). On observe donc une augmentation de la minéralisation en Septembre (Crues d'Automne). Ceci indique des eaux ayant eu un temps de résidence relativement long au sein de la zone non saturée

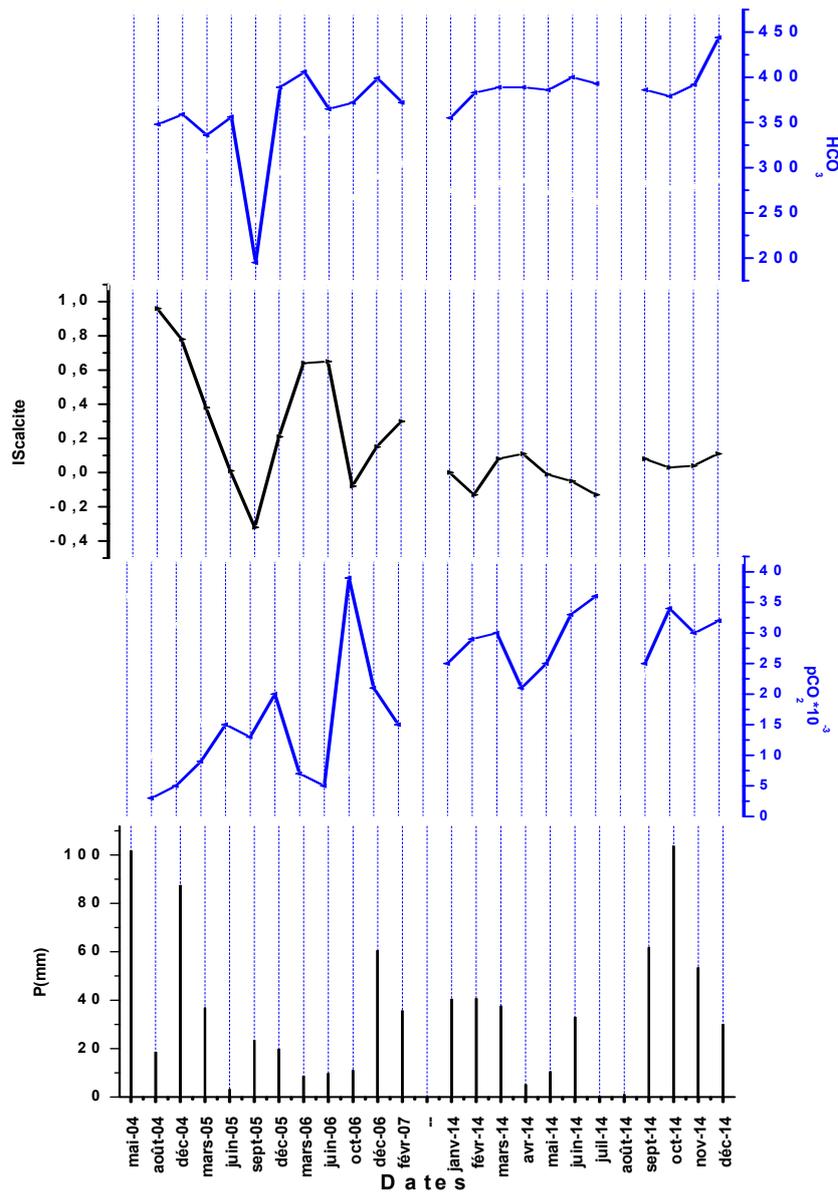
Les teneurs en bicarbonates (reflet de la conductivité pour les systèmes calco-carboniques) de ce point d'écoulement présentent une variation sinusoïdale saisonnière avec une tendance à l'augmentation au début de la période humide. Les fortes teneurs en bicarbonates caractérisent des eaux à temps de séjour moyen.

L'accroissement des teneurs s'accompagne d'une légère sursaturation pour les eaux de la reprise de l'année 2004 alors qu'au contraire on constate une sous-saturation pour celle de l'année 2005. Suivant les conditions d'écoulement donc le temps de séjour de cette eau dans l'aquifère superficiel, on observera soit des eaux sursaturées (reprise 2004) soit sous-saturées (reprise 2005). Dans les deux cas il n'y a pas de participation immédiate d'une eau nouvelle (pas de dilution) ce qui suggère une faible perméabilité de la zone d'infiltration (Figure 56).

Les teneurs les plus importantes en bicarbonates sont observées en étiage (444 mg/l) alors que pendant cette période la  $p\text{CO}_2$  à atteindre la valeur ( $32 \cdot 10^{-3}$  atm). Les eaux sont sursaturées et semblent atteindre un seuil de sursaturation ( $0,1 < ISc < 0,2$ ) qui pourrait correspondre à la participation des carbonates pour ce type d'eau. La relativement valeur  $p\text{CO}_2$  observée pour des valeurs importantes de  $\text{HCO}_3^-$  suggère deux hypothèses :

**la première est** : Le  $\text{CO}_2$  initial, élevé, a été consommé au cours du trajet de l'eau qui a dissous une quantité importante de calcaire. Ceci suppose un temps de transit suffisamment long et surtout que le système évolue en milieu fermé. Or les informations tirées de la température ont démontré le caractère superficiel de ce forage ;

**La deuxième est :** qu'il existe des échanges gazeux entre atmosphère et eau à l'intérieur même du réservoir, échanges favorisés par le faible niveau des réserves en période d'été. Ce phénomène conduit à un dégazage du CO<sub>2</sub> d'où les eaux fortement sursaturées et le bon alignement des points dans la relation ISc-pCO<sub>2</sub>.



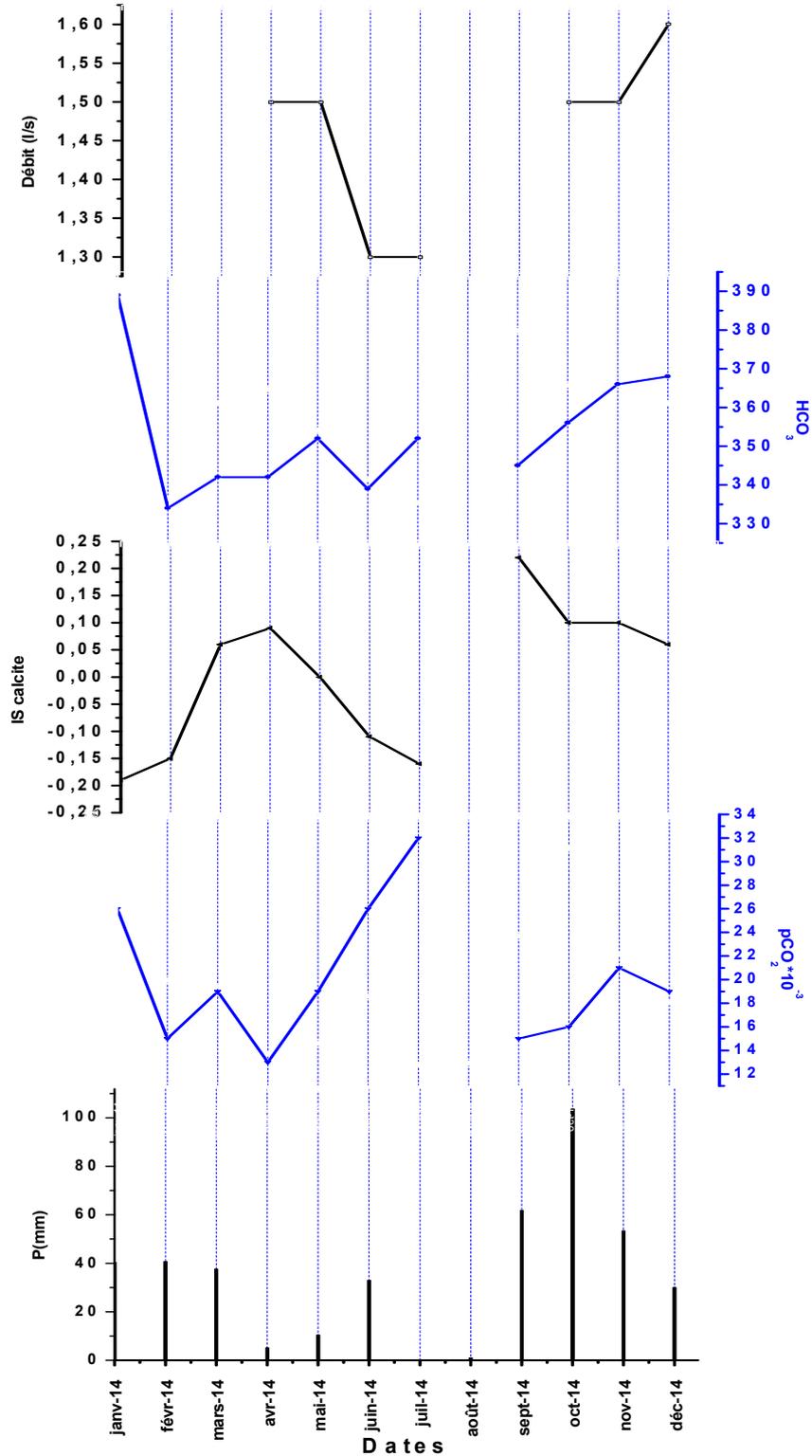
**Figure 55: Evolutions de la saturation dans les eaux du Forage N62 (2004-2007), (2014)**

### 3.6.2.2. Ain Teghat

La source Ain Teghat située dans le même secteur précédent répond à un fonctionnement similaire. On observe à une augmentation de la minéralisation en Septembre (Crues d'Automne) et des eaux systématiquement saturées à sursaturées. (Figure 56)

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Comme tous les systèmes de la zone non saturée étudiés auparavant la source Ain Teghat fonctionne avant tout par effet piston, les eaux de pluie étant stockées puis évacuées qu'il n'y a pas de dilution visible à la source.



**Figure 56: Evolutions de la saturation dans les eaux de la source Ain Teghat (2004-2007), (2014)**

## **Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

La source d'Ain Teghat a un débit de 1.6 l/s. la minéralisation de ses eaux est légèrement inférieure au forage Mais reste proche en raison des conditions naturelles similaires régnant sur ces bassins (exposition, topographie, lithologie). La différence peut s'expliquer par une altitude moindre du bassin d'Ain Teghat et la présence plus importante de sols.

Le comportement de cette source est semblable à celui de forage N62. On observe une augmentation de la  $p\text{CO}_2$  au cours de l'été, les eaux étant à saturation, et une forte diminution en hiver qui s'accompagne d'une sursaturation des eaux (dégazage de  $\text{CO}_2$ ). En période de crue, la minéralisation augmente en raison de la chasse d'une eau stockée dans des réservoirs superficiels Mais l'amplitude de variation de la chimie reste beaucoup plus faible qu'à le Forage N62. Ceci s'explique par le mélange avec une eau ancienne qui a un effet tampon sur les eaux en transit. Ces réserve intermédiaires sont certainement importantes et expliquent les forts débits observés à la reprise Mais aussi les débits constants en été.

On se rend compte alors de l'importance de la végétation dans la présence des sols et du rôle essentiel de ces derniers dans la production de  $\text{CO}_2$ . Ce sont eux qui expliquent la forte  $p\text{CO}_2$  et la minéralisation importante des eaux d'Ain Teghat et Forage N62 (Figures 55 et 56).

### **Discussion**

Le forage N62 et la source Ain Teghat ont une épaisseur des sols nettement plus importante (ceci s'explique par la présence des grandes parcelles cultivées). Ainsi en période non influencée, la  $p\text{CO}_2$  est moyenne plus élevée au Forage N62 ( $31,3 \cdot 10^{-3}$  atm) qui a pourtant un bassin d'altitude moyenne bien supérieur à celui de la source Ain Teghat ( $24,3 \cdot 10^{-3}$  atm) (voir Figure 52: Relation indice de saturation vis-à-vis de la calcite (ISc) et pression partielle de  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) dans les systèmes karstiques des Monts de Saïda)

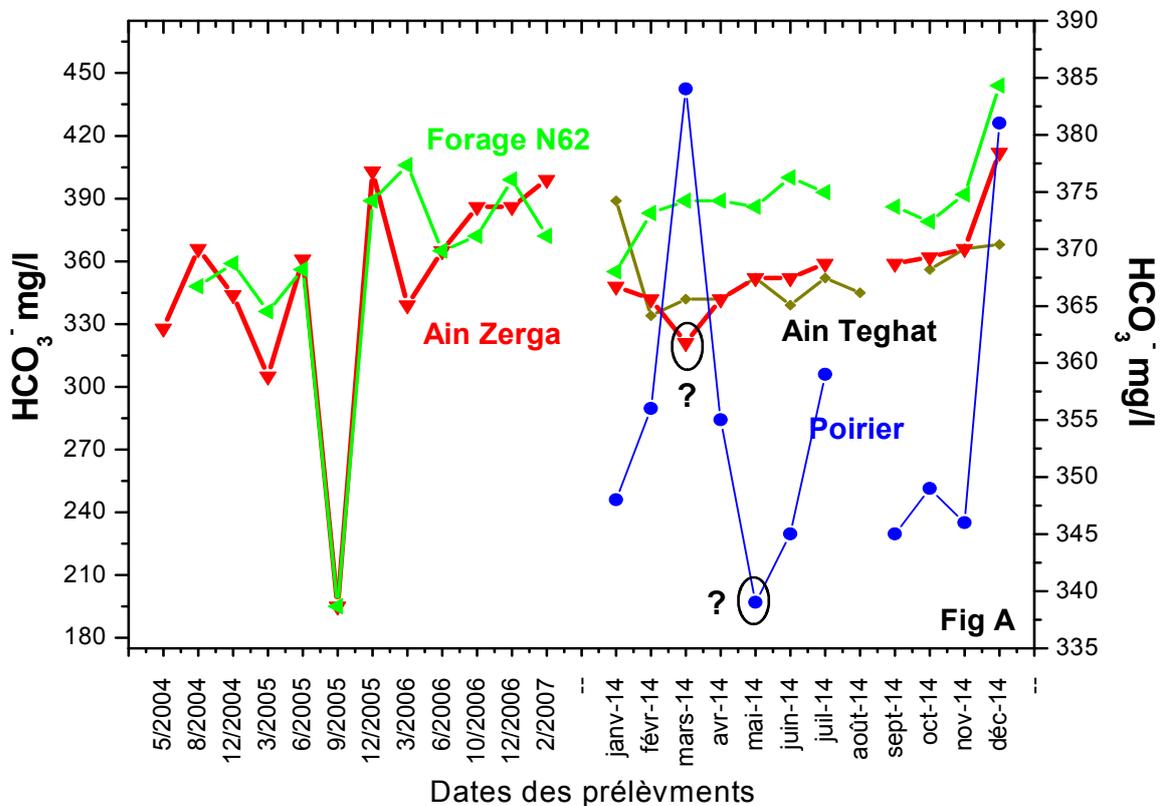
Cette observation est illustrée par la présence d'un cycle de  $\text{CO}_2$  au Forage N62. On constate en effet une augmentation de la  $p\text{CO}_2$  à partir de Mai jusqu'en Octobre ( $25 \cdot 10^{-3}$  jusqu'à  $34 \cdot 10^{-3}$  atm), puis une diminution pour atteindre des teneurs minimales en Hiver  $21 \cdot 10^{-3}$  atm au moment où l'activité biologique s'arrête. Cette production de  $\text{CO}_2$  pendant l'été permet une diminution de la saturation des eaux au Forage N62 contrairement aux observations faites à Ain Teghat.

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**

Le comportement quasi différent de ces deux points d'eau épikarstiques, surtout visible à la reprise des pluies (fin d'été), montre la diversité du fonctionnement de ce type d'aquifère. Le système d'Ain Teghat plus perméable est susceptible de faire transiter rapidement l'eau nouvelle vers l'exutoire d'où les dilutions observées et l'augmentation de pCO<sub>2</sub> durant cette période. Le drainage est moins bien réalisé au Forage N62 ce qui indique une faible karstification et un pouvoir tampon supérieur. Il est probable que les échanges avec l'atmosphère sont plus restreints dans ce système d'où un pCO<sub>2</sub> supérieur même en étiage.

**4. Comparaison des évolutions en bicarbonates et en Chlorures dans les systèmes karstiques**

Les différents types d'eau s'écoulant à l'exutoire et le fonctionnement hydrodynamique de l'émergence d'Ain Zerga ne sont pas sans rappeler les systèmes de la source Poirier ou Forage N62 ou d'autre système Mais à une autre échelle. La comparaison de l'évolution de certains éléments dans les systèmes karstiques de notre zone d'étude semble en effet particulièrement édifiante. (Figure 57)



**Figure 57: Comparaison des évolutions en bicarbonates dans les différents systèmes karstiques**

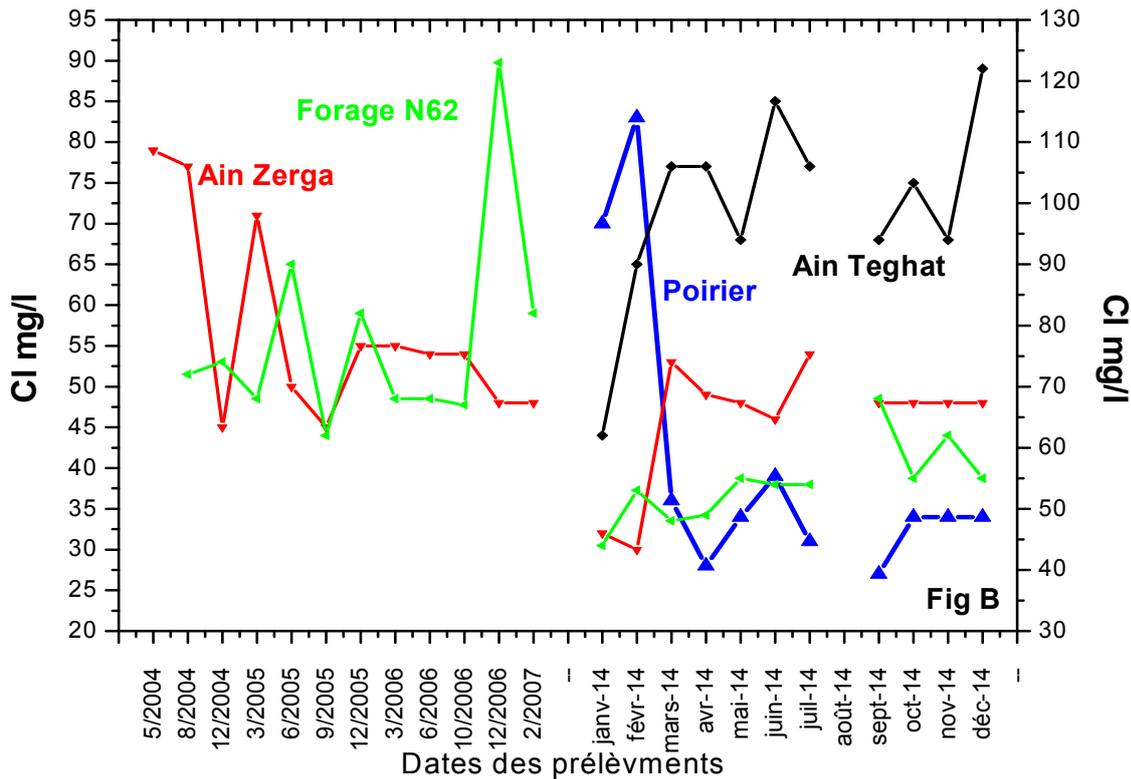


Figure 58: Comparaison des évolutions en Chlorures dans les différents systèmes karstiques

On constate une évolution des bicarbonates quasiment synchrone entre ces différents aquifères de la région karstique de Saïda. Il est clair que le fonctionnement de ces systèmes est proche et que les types d'eau rencontrés proviennent d'aquifères équivalents. Ces observations sont confirmées par les bicarbonates et les chlorures, éléments qui caractérisent l'origine superficielle des eaux.

Les courbes de chlorures des systèmes d'Ain Zerga et Forage N62 sont très semblables. On constate cependant un décalage systématique des pics survenant au moment des périodes pluvieuses. Le Forage N62 répond plus rapidement à l'arrivée des eaux de lessivage (voir la période 2014 dans la figure 58) en raison des eaux de lessivage et de la taille relativement réduite de son impluvium.

La montée des pics est décalée de 15 à 20 jours entre les deux sources, par contre l'influence des eaux d'infiltration est ressentie, suivant la période hydrologique, pendant une durée bien supérieure à Ain Zerga (un mois) (voir chapitre « Evolution temporelle des signaux chimiques en fonction de la pluie » titre « Etude de temps de réponse »). Ces observations montrent que les eaux nouvelles ne participent pas directement aux écoulements Mais sont d'abord stockées dans la zone non saturée.

Ces eaux parviennent ensuite plus ou moins rapidement à l'exutoire par des écoulements différés dans le système. De la même manière, l'évolution de tous les éléments a été comparée entre les deux sources et les observations ont été identiques. Ceci indique clairement que les variations hydrochimiques observées à l'exutoire du système karstique d'Ain Zerga dépendent exclusivement de la plus ou moins grande participation aux écoulements des eaux en transit dans la zone non saturée.

## **5. Etude de la relation magnésium-calcium**

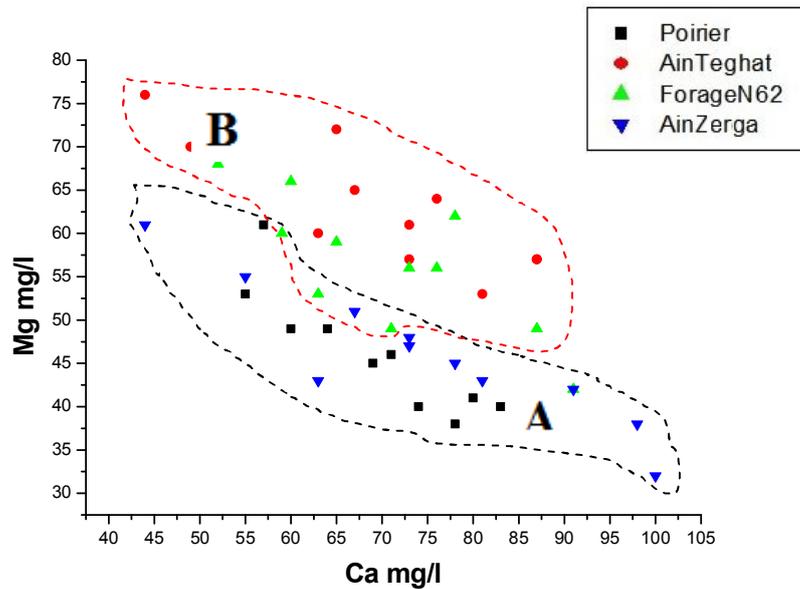
L'utilisation du rapport Mg/Ca est classiquement utilisé dans les études karstiques (Scanlon 1989 ; Crowther 1989. Harum et al, 1992 ; Lastennet 1994...). Il est utilisé pour la différenciation des types d'eau en fonction de leur origine (précipitation, eau de surface, non saturée, réserve noyée...) et de leur temps de séjour dans le réservoir (perméabilité). Une augmentation du rapport Mg/Ca est attribuée à la participation d'une eau ayant séjourné longtemps dans l'aquifère (Lepiller ,1980).

La solubilité de la dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) étant nettement inférieure à celle de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), l'accroissement de ce rapport pour un même type d'eau suppose que cette eau soit saturée vis-à-vis de la calcite. En effet, dans le cas d'une eau sous-saturée, la mise en solution de  $\text{Ca}^{2+}$  est toujours supérieure à celle du  $\text{Mg}^{2+}$  (Lastennet, 1994).

L'évolution de ce rapport étant lente à l'intérieur d'un même aquifère, les variations du rapport Mg/Ca dans un système sont dues avant tout à la participation aux écoulements de différents types d'eau possédant des teneurs en magnésium ou calcium propres. Ce sont les différences de concentrations entre les eaux d'origine diverses de ce système qui expliquent les variations observées à l'exutoire.

Il est clair cependant, que pour une analyse comparative de systèmes, la nature lithologique des bassin, présence de calcaire dolomitique, de calcaire magnésien ou d'argiles, et les conditions de dissolution de la roche ( $\text{pCO}_2$ , IS) sont les facteurs essentiels expliquant les proportions de magnésium et calcium dans les eaux.

Nous avons représenté sur la Figure 59 représente l'ensemble des prélèvements relatifs aux 4 sources suivies. Plusieurs ensembles peuvent être distingués en fonction de leur particularité.



**Figure 59: Relation magnésium-calcium dans les différents aquifères carbonatés dans les Monts de Saïda**

#### **Groupe A**

Nous avons placé dans ce groupe les sources suivantes : Ain Zerga et Poirier. Les teneurs en magnésium sont importantes, en raison certainement de temps de transit relativement plus longs. Les eaux saturées en calcite ont alors le temps de mettre en solution plus de magnésium. Les variations restent cependant faibles, en particulier à la source Poirier, ce qui confirme le faible degré de karstification de cet aquifère.

On note une légère relation inverse pour la source Ain Zerga. Ceci indique que les eaux riches en calcium sont pauvres en magnésium. Il s'agit probablement, de la chasse d'une eau stockée dans un aquifère superficiel.

#### **Groupe B**

Le comportement de l'émergence d'Ain Teghat se rapproche de celui de Forage N62 avec cependant une relation inverse plus nette entre le calcium et le magnésium. Les eaux à long temps de séjour riches en  $Mg^{++}$  et pauvres en calcium correspondent aux périodes d'étéage. Ce sont les eaux saturées décrites au paragraphe précédent provenant essentiellement de la réserve noyée. Nous verrons plus loin que ces eaux sont de même riches en silice et ont une température élevée. Les prélèvements effectués en hautes eaux sont les plus riches en  $Ca^{++}$  et montrent de faibles teneurs en  $Mg^{++}$ . Ces eaux résultent du mélange de la réserve noyée avec l'eau en transit dans la zone non saturée.

## 6. Relations $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$

Sur la Figure. 60, nous avons représenté les variations des teneurs en magnésium en fonction des teneurs en calcium des eaux. Nous y observons une évolution en trois étapes (AB, BC et AD).

La première correspond à une augmentation des teneurs en magnésium associée à une stabilité des teneurs en calcium (flèche AB). Les eaux du Forage N62 ont pris la plus grande concentration en Mg, expliquant par là la longévité de ces eaux par rapport aux autres.

La deuxième (flèche AC) met en évidence une diminution simultanée du magnésium et une augmentation du calcium. Cette spécificité est propre aux eaux d'Ain Zerga.

La troisième (AD) est représentée partiellement par une diminution de la teneur en calcium et une augmentation de magnésium ; cet axe concerne les eaux profondes de la source Ronde.

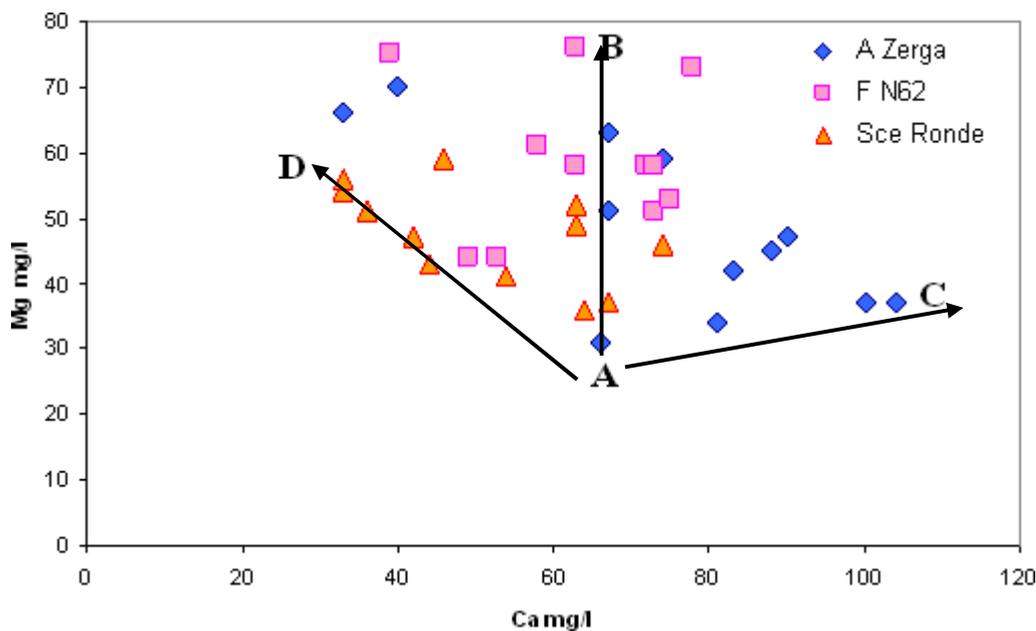


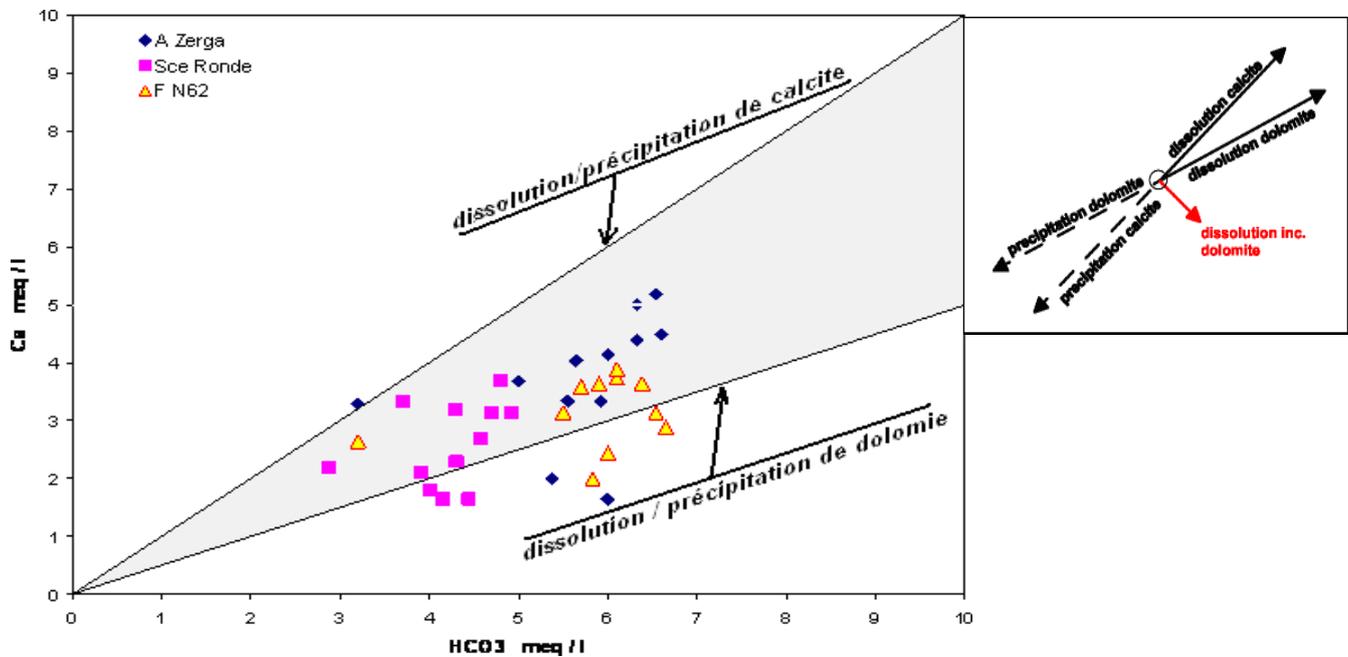
Figure 60: Evolution des teneurs en Mg en fonction des teneurs en Ca

A partir des réactions 1 à 3, cette première étape peut alors s'expliquer suivant deux mécanismes:

- des échanges  $\text{Ca}^{2+} \Leftrightarrow \text{Mg}^{2+}$  lors des réactions de précipitation ou de recristallisation de calcite à partir de calcite magnésienne (Edmunds et al., 1987);
- la dissolution incongruente de la dolomite, réaction équivalente à la précipitation de calcite associée à la dissolution congruente de dolomite.

A partir des réactions 1 et 3 et pour des pH proches de la neutralité, nous pouvons tirer des relations simples reliant les ions calcium, magnésium aux bicarbonates (Edmunds et al., 1982; Edmunds et al., 1987; Appelo et al., 1996; Brouste, 1997).

Sur la Figure. 61, nous avons reporté les teneurs en calcium par rapport aux teneurs en bicarbonates des eaux des aquifères. Nous observons une répartition tout à fait conforme aux équations 1 et 2. La majorité des eaux de forage et des sources sont dans le domaine situé entre les deux droites, qui est un domaine à la fois affecté par la dissolution/précipitation de la dolomite et de la calcite. On peut remarquer que certains points se situent en dessous de la droite de pente.



**Figure 61: Relation entre les teneurs en Ca en fonction des teneurs en HCO<sub>3</sub> des eaux karstiques des Monts de Saïda**

Le sens d'évolution de ces réactions dépend de l'état d'équilibre des phases minérales par rapport à l'eau. Cet état d'équilibre est donné par l'indice de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite ( $I_s$  calcite et  $I_d$  dolomite).

A partir des données du Tableau. 14, le calcul des indices de saturations vis-à-vis de la calcite et de la dolomite montrent que la plupart des eaux sont équilibrées ou quelquefois sursaturées. Les conditions des équilibres dans les eaux sont donc remplies pour expliquer l'augmentation du magnésium et la baisse du calcium.

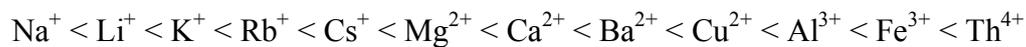
## 7. Le rôle des argiles

La transition du faciès bicarbonaté calcique et magnésien vers le faciès bicarbonaté sodique ne peut être expliquée que par la chimie des carbonates. Il faut alors tenir compte de la fraction argileuse du Callovo–Oxfordien (argiles de Saïda). En effet, les argiles sont des matériaux à fortes capacités d'échanges cationiques (Atteia, 2005).

### 1.1. Les échanges de bases

Les échanges de cations se déroulent selon l'équation globale du bilan de masse suivant (Drever 1997):  $pA\text{-argile} + qB^{p+} \rightarrow qB\text{-argile} + pA^{q+}$  Avec  $A^{p+}$  et  $B^{q+}$  cations échangés.

Il s'avère que les substitutions isomorphiques entre calcium et magnésium ne sont pas les substitutions privilégiées au sein des argiles, car il y a préférentiellement substitution d'un ion alcalino-terreux avec un ion alcalin (Appelo et al., 1996). En effet, la séquence dans laquelle les ions sont préférentiellement échangés dépend d'une part de la sélectivité de surface du minéral et d'autre part de la valence des ions échangés. Ainsi, la sélectivité de la phase argileuse peut être exprimée, de la plus faible à la plus forte affinité, selon la séquence suivante:

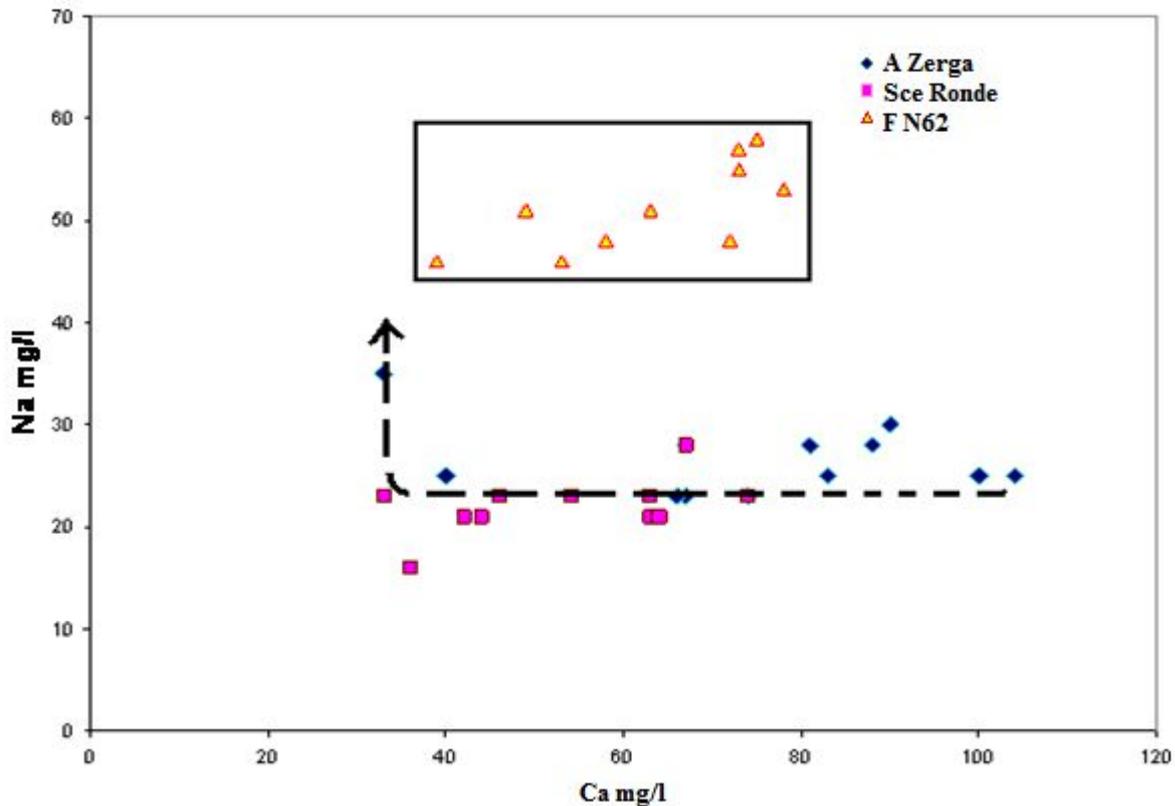


En d'autres termes, les ions de forte valence remplacent les ions dont la valence est plus faible et les ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  ont quasiment la même affinité avec la phase argileuse (Edmunds et al., 1987; Barbecot, 1999). Par ailleurs, il faut tenir compte de la capacité d'échange cationique des phyllosilicates. Elle se range selon la séquence suivante (par ordre décroissant) : la montmorillonite (80-150), l'illite (10-40), la kaolinite (1-10) puis la chlorite (<10) (Drever, 1997). Ainsi, nous voyons bien qu'au sein de la matrice aquifère les échanges de bases sont possibles.

- **Relations  $Ca^{2+}$ - $Mg^{2+}$ - $Na^+$**

Plusieurs phénomènes d'origine chimique, biologique ou climatique, peuvent influencer sur la concentration des ions  $Na^+$  :

- des précipitations : c'est le principal apport par lessivage des aérosols marins.
- les échanges de base : les minéraux argileux ou les substances organiques sont susceptibles d'échanger leur  $Na^+$  contre  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$  des eaux à leur contact. Ceci peut induire une légère augmentation de cet élément dans les eaux karstiques.



**Figure 62: Evolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium des eaux karstiques des Monts de Saïda**

La Figure. 62 montre l'évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium. Nous observons que pour la Source Ronde et Ain Zerga au-dessus de 30 mg/l de calcium, les teneurs en sodium restent dans une gamme stable de variation (20 mg/l).

Par contre le Forage N62 se démarque par de fortes teneurs en sodium (dans le rectangle). Ce positionnement est dû à l'origine complexe du calcium et du sodium (trace de gypse). A partir de 20 mg/l de calcium, les teneurs en sodium ont tendance à augmenter.

Sur la Figure. 63, nous avons représenté les teneurs en chlorure en fonction des teneurs en sodium. Dès lors que le rapport d'ions  $Cl^-/Na^+$  (rapport ionique en mg/l sur mg/l) se rapproche de 1,8 c'est qu'il est soit d'origine maritime, ou de mise en solution de halite (NaCl). Les prélèvements d'eau du Forage N62 le démontrent tout comme la tendance vers les échanges de bases. Les autres sources montrent certaines perturbations liées à des pollutions anthropiques.

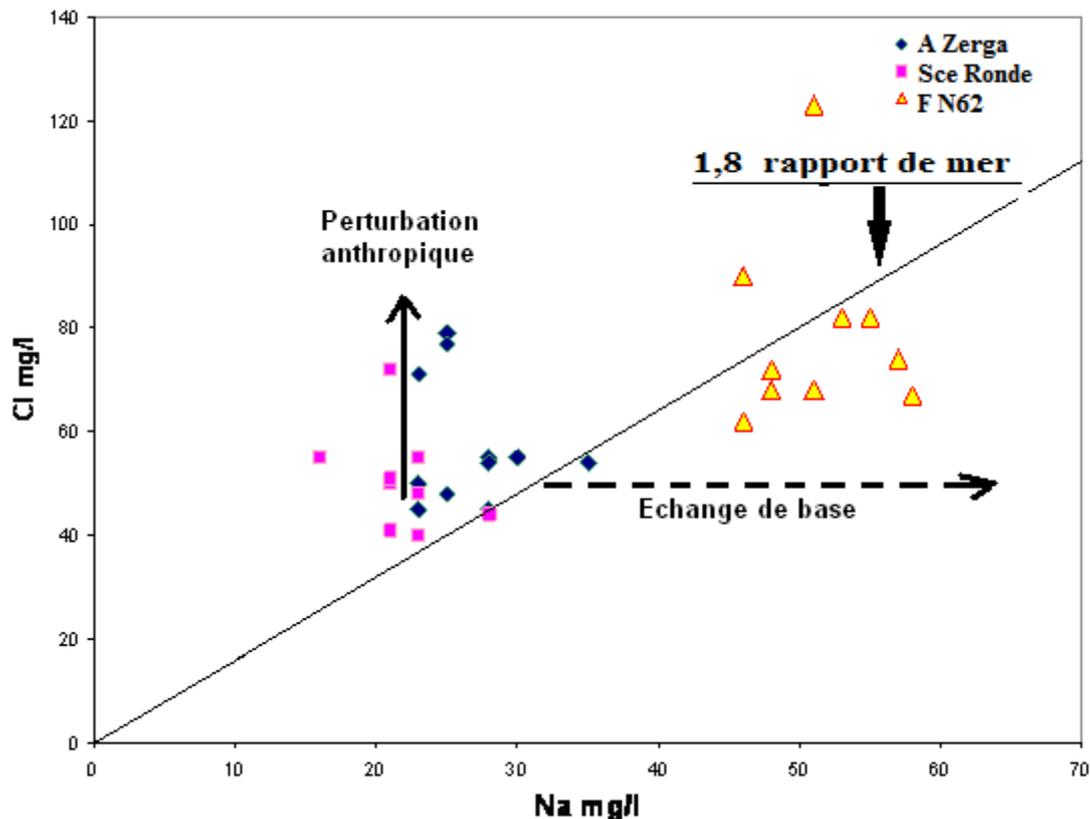


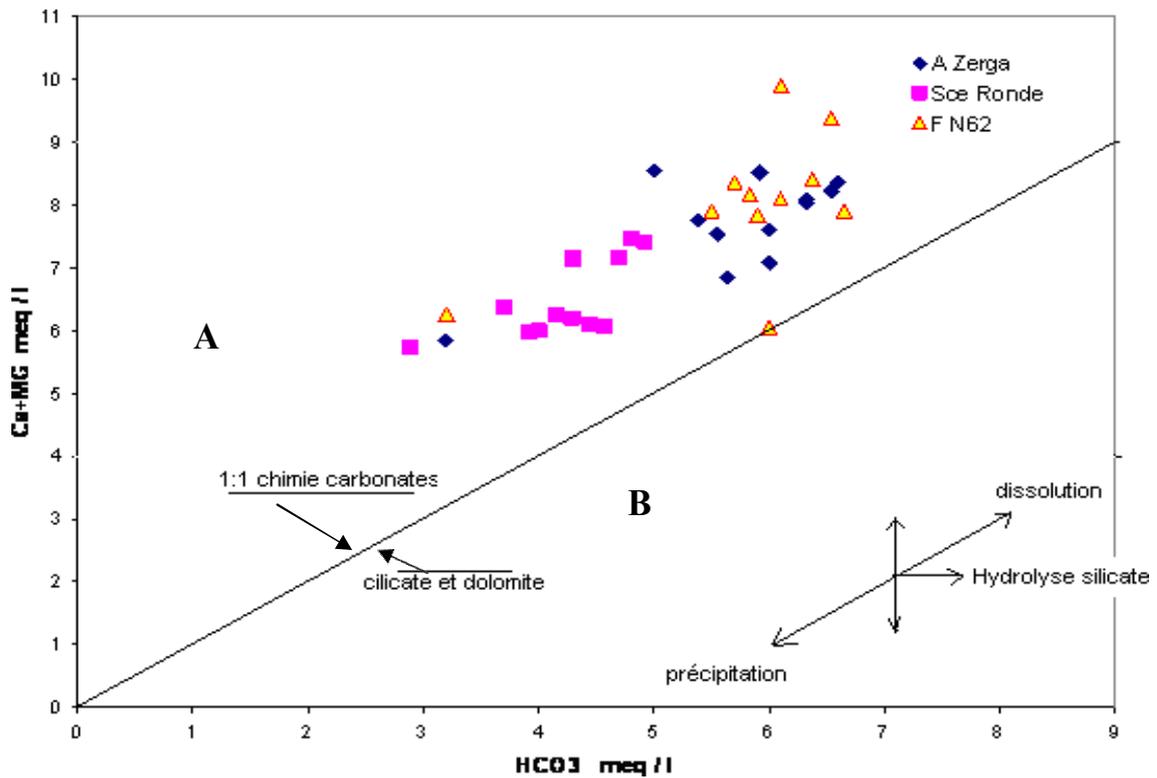
Figure 63: Evolution des teneurs en chlore en fonction des teneurs en sodium des eaux karstiques des Monts de Saïda

## 1.2. Pollutions ponctuelles

Les analyses des eaux révèlent, de plus, de faibles teneurs en sodium mais de fortes teneurs en calcium et en sulfates. Il y a un rapport de un à deux entre les ions calcium et les ions chlorures. L'ion chlorure est un élément conservatif dans les eaux souterraines à l'inverse du sodium.

On peut expliquer ce phénomène par les échanges de bases avec les argiles de la matrice aquifère (principalement illite-montmorillonite). De fait, en présence d'eau très minéralisée, comme les saumures, se sont les cations monovalents qui vont se fixer préférentiellement sur les argiles pour relâcher des cations divalents (Atteia, 2005).

Sur la Figure. 64 nous avons reporté la somme des ions calcium et magnésium (en meq/l) par rapport aux teneurs en ions bicarbonates. La droite de pente 1:1 correspond à la chimie des carbonates. Nous remarquons que tous les points se situent au-dessus de la droite. Or nous avons vu que le forage est le plus affecté par les échanges de bases.



**Figure 64: Relation Ca + Mg avec le bicarbonate des eaux souterraines (meq/l).**

## 2. Conclusion

Cette première caractérisation des différents systèmes de la région karstique des Monts de Saïda à partir des équilibres calco-carboniques a permis de préciser le fonctionnement des différents aquifères. Ce sont les eaux transitant dans la zone non saturée ou stockées dans les aquifères superficiels et donc au contact des zones de production du CO<sub>2</sub> qui permettront l'introduction dans les systèmes des conditions nécessaires à la karstification suivant les conditions d'écoulement rencontrées.

La pCO<sub>2</sub> initiale dépendra des différents facteurs et en particulier de l'importance des sols et de l'activité biologique qu'on y rencontre. Cette dernière est liée entre autres à la température ce qui implique que l'altitude des bassins et surtout leur exposition sud (la source Ronde) ou nord (la source Ain Tegat, Forage N62, Ain Zerga, la source Poirier) devienne primordiales.

L'évolution des systèmes dépendra étroitement de la facilité d'introduction de ce potentiel de dissolution à l'intérieur de l'aquifère. Celle-ci sera fonction d'une part de la morphologie du bassin Mais surtout des paramètres géologiques rencontrés (fracturation, pendages des structures). Il semble que dans le cas de la source Ronde ces facteurs soient défavorables d'où une mauvaise karstification de ce système. Au contraire ces conditions sont bien réunies pour les émergences Ain Zerga, Poirier, Ain Teghat).

L'étude du système karstique d'Ain Zerga a montré la diversité de fonctionnement de ce type d'aquifère. L'état de saturation des eaux dépend étroitement des périodes hydrologiques. Ce système mieux karstifié et surtout plus ouvert permet une circulation d'air (accru en étiage) qui provoque une rééquilibration de la  $p\text{CO}_2$  dans le milieu, d'où les eaux fortement sursaturées. Ces eaux se rapprochent de l'équilibre quand le remplissage des réserves est important car les circulations d'air sont moindres et le transit plus rapide, d'où une  $p\text{CO}_2$  qui rester élevée.

Dans les systèmes des sources Poirier et Ain Teghat, l'état de saturation des eaux semble lié au cycle de production de  $\text{CO}_2$  dans les sols. Du printemps jusqu'à l'automne la  $p\text{CO}_2$  s'accroît ce qui provoque une diminution de la saturation, contrairement à la période hivernal où les eaux sont très sursaturées et la  $p\text{CO}_2$  minimale. Comme dans la majorité des systèmes étudiés, la mise en mouvement des eaux en période pluvieuse provient d'un effet piston dans le milieu, d'où les augmentations de bicarbonates observées à la reprise.

Il est probable que l'acquisition de la chimie des systèmes karstiques des Monts de Saïda s'effectue essentiellement au niveau de la zone d'infiltration et dans le cas de Ain Zerga, Poirier et Ain Teghat qu'une bonne partie des écoulements à ces émergences provient directement de la zone non saturée. L'étude de la saturation pour ces systèmes indique une faible influence de la zone noyée. Pourtant les débits observés en étiage sont conséquents ce qui implique que le volume d'eau en transit dans la zone non saturée constitue une réserve suspendue permanente et non négligeable.

**Chapitre V : Evolution du signal chimique  
en fonction des périodes hydrologiques**

## **Introduction**

Nous avons vu dans le chapitre I de la deuxième partie de ce mémoire qu'il est possible de caractériser, à partir de la température, différents types de réservoir. Les cinq sources de notre secteur d'étude ont été classées en systèmes carbonatés superficiels, épikarstiques, fissurés, ou encore plus ou moins karstifiés.

Ainsi nous avons déterminé dans les chapitres précédents les principales caractéristiques chimiques des différents systèmes de la région de Saïda. L'étude de différents paramètres nous a permis de proposer une classification de ces aquifères carbonatés ainsi qu'une interprétation de leur fonctionnement hydrocinématique. Chaque aquifère se caractérise en effet par un marquage chimique spécifique suivant sa nature. Ces types d'eau se retrouvent aux exutoires des grands systèmes en conservant plus ou moins bien leurs caractéristiques initiales.

### **1. Etude du comportement hydrochimique des systèmes**

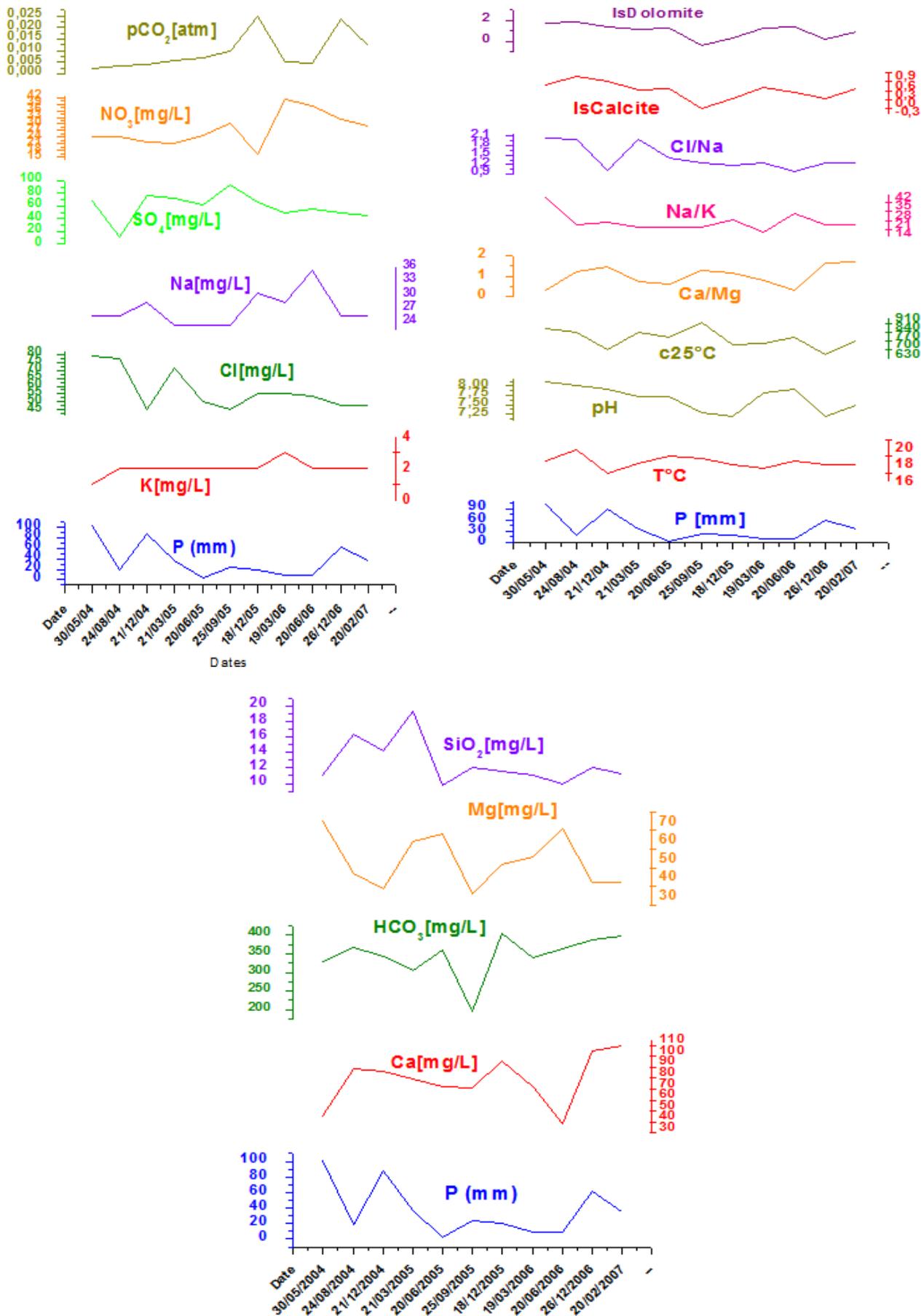
La description du chimisme des eaux est basée uniquement sur des valeurs moyennes et extrêmes des différents éléments chimiques, La conductivité par exemple, est apparue comme une démarche très insuffisante pour extraire l'information. De nombreux travaux, en particulier ceux de Bakalowicz, ont montré que l'évolution de la teneur des ions présents dans les eaux karstiques était directement liée à la structure et au fonctionnement de l'aquifère.

#### **1.1. La source de Ain Zerga**

Les figures suivantes présentent l'évolution du chimisme des eaux de la source d'Ain Zerga. Le sodium et le potassium montrent une variation relativement faible (Figures. 65). En revanche, le calcium, le magnésium, le bicarbonate, le chlorure et le nitrate, montrent des variations saisonnières relativement accentuées à faible amplitude. Les fortes concentrations de chlorure apparaissent en période d'étiage. Le nitrate et le sulfate montrent des teneurs généralement élevées en périodes de crues.

Le bassin d'alimentation de cette source est le siège d'une intense activité agricole et de plusieurs petites agglomérations (commune d'Ain Zerga) avec d'important rejet d'eaux usées à l'air libre. Ces eaux usées, accumulées dans la zone d'infiltration, vont être transportées par les eaux de recharge jusqu'à la zone noyée où elles vont aboutir à l'exutoire avec les premières crues par « effet de chasse ».

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 65: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de la source Ain Zerga (2004-2007)**

Les variations de la température sont relativement faibles (Figure. 65). Elles correspondent à des évolutions saisonnières (17 et 19.8 °C), les températures minimales sont relevées entre Octobre et Mai. Les faibles variations des températures indiquent l'importance de l'inertie du système, l'étendue de la zone noyée et le temps de transit des eaux relativement long au sein du système.

Les indices de saturations de la calcite et de la dolomite, généralement supérieur à zéro indiquent des eaux sursaturées. Les quelques valeurs inférieures à zéro correspondent aux épisodes pluvieux aux moments des hautes eaux par l'effet de dilution. Ces faibles valeurs sont synchronisées avec des valeurs de pCO<sub>2</sub> relativement élevées et attestent de l'arrivée à l'exutoire d'une eau récente.

Les rapports des éléments Ca/Mg, Na/K et la pCO<sub>2</sub> augmentent en période de crue. Quant au rapport Ca/Mg, les valeurs varient entre 0.3 et 1.72. En effet, les fortes teneurs en CO<sub>2</sub> provoquent la dissolution de la calcite, par endroits, magnésienne et introduit plus de calcium que de magnésium dans la solution car la vitesse de passage en solution du calcium est plus rapide que celle du magnésium.

L'augmentation du rapport Na/K peut résulter de la fixation d'une partie du potassium dans le sol car le potassium est sélectivement absorbé par les plantes.

Le rapport du Cl/Na reste proche de 2, valeur observée au moment des pluies généralisée sur la région.

Les concentrations en chlorures et sodium sont plus fortes que celles observées dans les fortes précipitations ; ceci laisse supposer qu'il existe un autre apport de ces éléments.

## **1.2. Le forage N62**

Les figures suivantes présentent l'évolution du chimisme des eaux du Forage N62 durant la période de 2004 - 2007. De même qu'à Ain Zerga ; le Forage N62 a une variation notable pour le calcium, magnésium, bicarbonate (Figures. 66).

Le chlorure, le sulfate et le nitrate montrent des variations saisonnières plus marquées qu'à Ain Zerga. Les concentrations élevées en nitrates et en chlorures sont liées comme à Ain Zerga aux rejets d'eaux usées et l'utilisation des engrais.

Les variations de la température sont relativement faibles. Elles correspondent généralement à des évolutions saisonnières qui oscillent entre 21.5°C et 23 °C. En effet, les faibles variations témoignent l'importance du réservoir et l'inertie du système. Ce système dolomitique se comporte comme un réservoir de type fissuré.

Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique

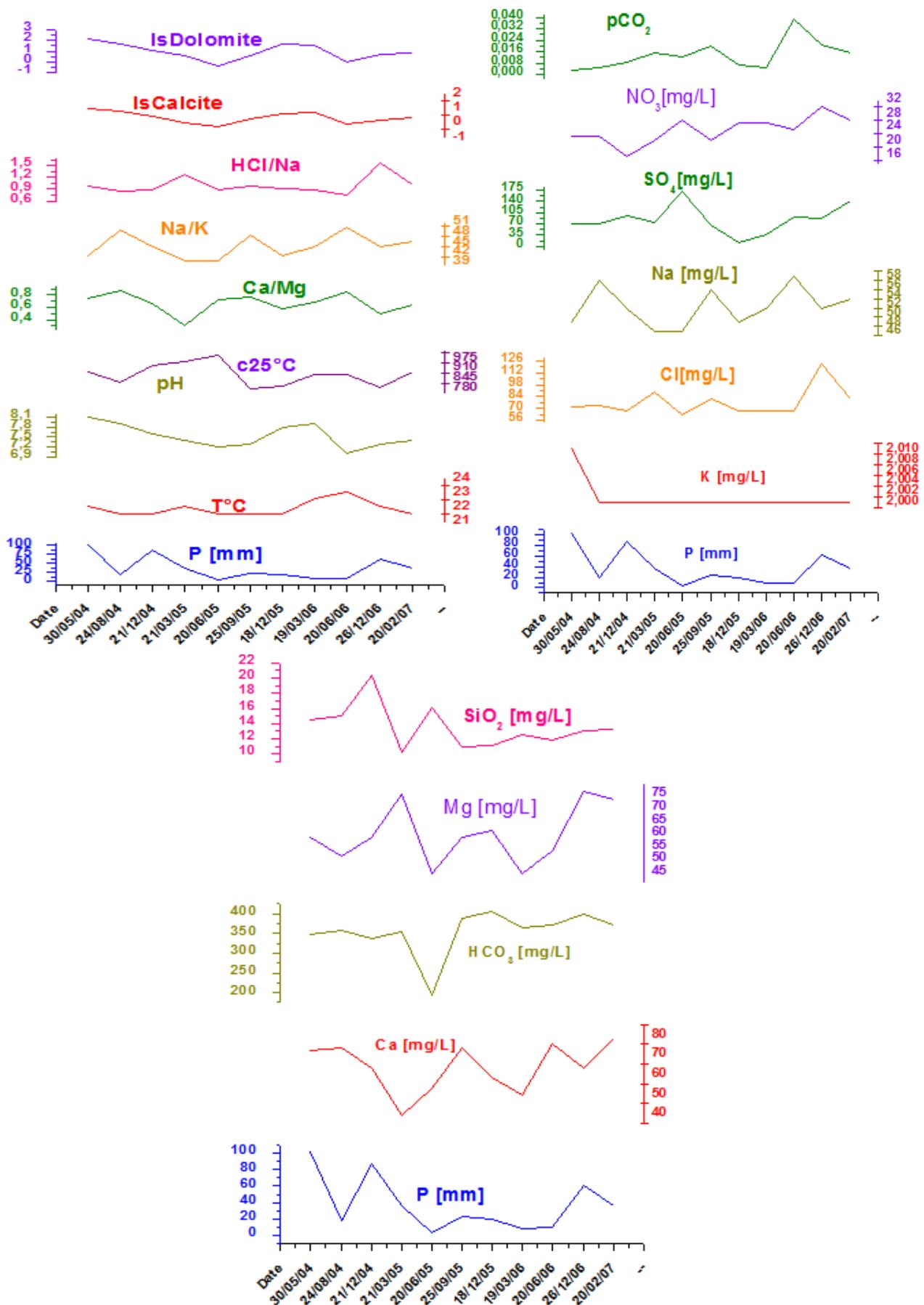


Figure 66: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de Forage N62 (2004-2007)

Les eaux du forage N62 sont généralement sursaturées en calcite et en dolomite durant les cycles hydrologiques. Elles le sont moins, à l'exception de quelques échantillons, prélevés aux moments des hautes eaux. En revanche, la  $p\text{CO}_2$  réagit inversement au phénomène de dilution (0,0026 - 0,018 atm).

La variation de  $p\text{CO}_2$  indique des indices de saturation pour la calcite et la dolomite. Cette variation se produit en période de crue, comme à Ain Zerga, avec l'apport des eaux de recharge sous-saturées. Les valeurs positives de ISc en période de crues témoignent d'un écoulement à surface libre même pendant la période des hautes eaux.

Le rapport Mg/Ca montre une faible variabilité avec une moyenne de 1.06. La variation du rapport Cl/Na est également faible, la valeur du rapport reste en moyenne proche de 0.99.

Le rapport du Na/K présente des valeurs élevées avec une moyenne de 43,74. L'augmentation du rapport Na/K peut résulter de la fixation d'une partie du potassium dans le sol car le potassium est sélectivement absorbé par les plantes tout comme pour la source Ain Zerga.

### **1.3. La source Ronde :**

Les figures suivantes présentent l'évolution du chimisme des eaux de La source Ronde (Figure. 67). Le nitrate et le sulfate sont soumis à une variation saisonnière qui rappelle celles d'Ain Zerga et du Forage N62, c'est-à-dire de fortes concentrations après les premières crues, dues au lessivage des sols des engrais.

Cependant les concentrations en chlorures restent élevées pendant l'été, et baissent en hiver, il s'agit généralement à la présence d'une pollution d'origine domestique. Les températures montrent des variations entre 14°C et 21 °C de janvier à juillet (figure. 67). (15,7°C). Il existe à priori un certain équilibre thermique entre les eaux souterraines et l'atmosphère.

La figure montre que la variation des indices de saturation de la calcite et de la dolomite est proportionnelle à la variation de la pression partielle en  $\text{CO}_2$ . L'indice de saturation de la calcite varie entre (-0,28 et 0,68), et celui de la dolomite varie entre (-1.01 et 0.93). Les valeurs faibles et légèrement négatives sont observées en période de crue. Elles sont en relation avec les écoulements plus ou moins rapides alors que sur le reste du cycle, les valeurs sont positives et témoignent d'un écoulement à surface libre avec un dégazage du  $\text{CO}_2$ .

-La  $p\text{CO}_2$  varie entre 0.002 atm en hiver et 0.019 en été atm.

-Le rapport Mg/Ca varie légèrement de 0.91 à 2.8.

Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique

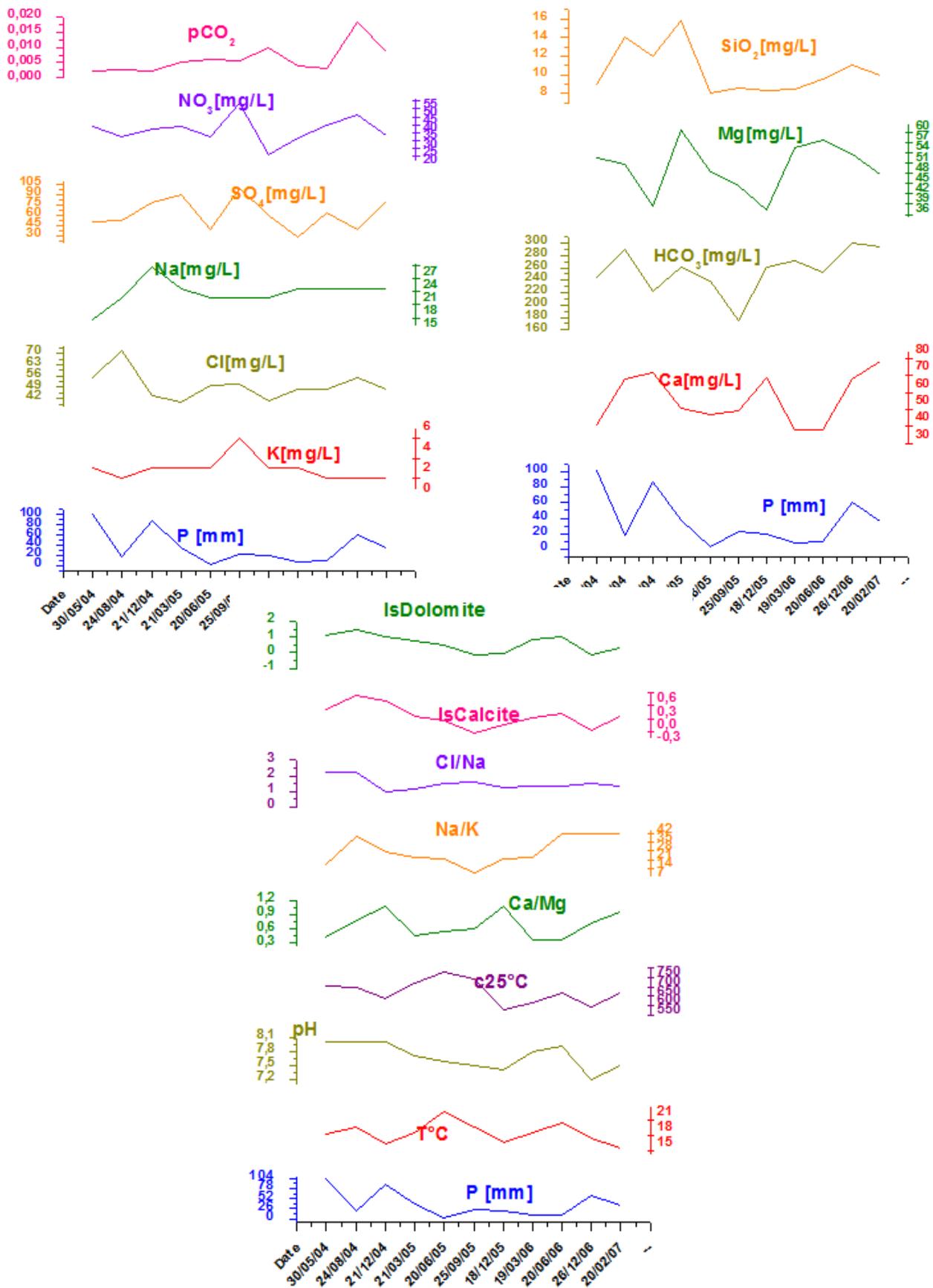


Figure 67: Variations physico-chimiques [mg/l] des eaux de la source Ronde (2004-2007)

-L'augmentation du rapport Na/K (entre 7.58 et 5) peut résulter de la rétention d'une partie du potassium de l'eau lessivant le sol car le potassium est sélectivement absorbé par les plantes.

-Le rapport du Cl/Na reste proche de 2, valeur observée à la source d'Ain Zerga.

## **2. Evolution temporelle des signaux chimiques en fonction de la pluie**

Pour l'étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique, nous avons utilisé une chronique de données pluviométriques et hydrochimiques de 5 ans :

-2004 à 2007 à pas de temps trimestriels ;

-2014 à 2015 à pas de temps mensuels

L'étude des eaux souterraines a été basée sur cinq systèmes représentatifs de notre région d'étude à savoir : Ain Zerga, Ain Teghat, Source Poirier, Forage N62 et source Ronde.

Les données mensuelles de la période 2013 à 2014 des saisons humides et des saisons relativement sèches, correspondent généralement et respectivement aux périodes : (Novembre à Mars) et (Juin à Aout) (Figure. 68).

**La période 1** s'étend de Novembre 2013 à Mars 2014 (période humide). Cette période est caractérisée par des événements pluvieux où le taux annuel a atteint 241.5 mm. Et que la moyenne mensuelle dans cette période a eu une valeur importante de 48.2 mm. Cette valeur est supérieure à la moyenne mensuelle entre les années 2003-2014 (34.8 mm). Sachant que l'année 2013 est une année humide avec une pluviométrie annuelle qui a atteint une valeur de 542.8 mm avec une moyenne mensuelle de 45.2 mm.

**La période 2** d'Avril à Aout 2014 (période sèche). Dans cette période la valeur de la moyenne mensuelle a atteint 10 mm.

**La période 3** de Septembre à Décembre 2014 (période humide) avec 248,6 mm avec une moyenne de 62,2 mm.

Les événements pluviométriques relativement important (241,5 mm, ayant eu lieu durant la période du Janvier au Mai 2013) ont engendrés la mise en charge et par conséquent l'engorgement des réseaux karstiques.

Du mois de Septembre au début d'Octobre ; le taux de pluie était faible (61,7 mm) ; cette période a été suivi par les crues du fin de mois d'Octobre et du début du mois de Novembre où le taux de pluie a atteint une valeur importante (157 mm). Cet événement de pluie a provoqué un rechargement de la zone non saturée et une chasse d'eau à temps de séjour relativement élevé. L'eau à temps de séjour prolongé qui y stagne est alors chassée vers les

drains principaux à l'aval des zones à fortes pertes de charge, en proportion suffisante pour modifier les caractéristiques physico-chimiques des eaux à l'émergence.

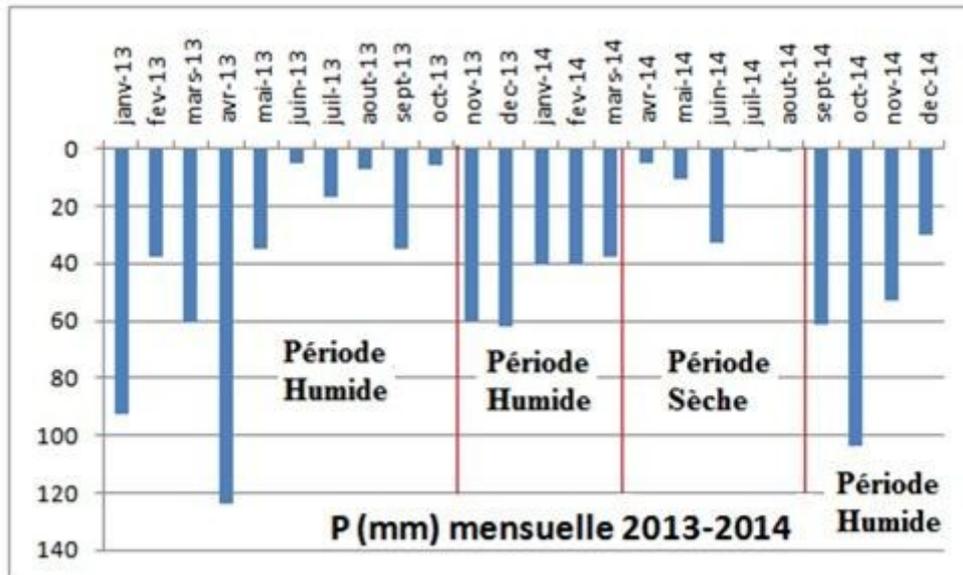


Figure 68: Découpage des années 2013- 2014 en période sèche et humide

Ce résultat est essentiel dans notre démarche qualitative concernant l'approfondissement des connaissances sur le transit de l'eau à travers la zone non saturée. Les trois grandes périodes sont présentées par des variations hydrochimiques relativement variées.

La première vision globale des comportements chimiques sur l'ensemble des périodes d'étude montrent que les paramètres physico-chimiques ont une variation sinusoïdale. L'amplitude de ces variations s'amortit au cours de la période sèche. Cet amortissement observé s'exprime surtout par une augmentation progressive des minima saisonniers.

Le fonctionnement hydrochimique et hydrodynamique des systèmes karstiques de notre région est étudié à travers des outils :

- hydrochimique, on se basant sur quatre années de mesures trimestrielles entre 2004 – 2007 et des mesures mensuelle de l'année hydrologique 2014
- l'hydrodynamique on se basant sur les mesures de quelques mois dans les sources (Ain Teghat et Poirier) et ainsi que les mesures pluviométriques.

L'hydrochimie classe les eaux en fonction, d'une part de leur répartition dans les compartiments karstiques et d'autre part, en fonction des caractéristiques de leurs unités de drainage. Certaines émergences présentent d'étroites relations. Ces relations sont mises en

évidence par la similitude de leurs concentrations chimiques.

Les variations chimiques au cours des cycles sont interprétées au regard des variations pluviométriques. À partir de ces interprétations, on peut définir les temps de réponse des systèmes. La comparaison de la réponse des systèmes aux événements pluvieux souligne leurs comportements particuliers et leurs vulnérabilités.

### **3. Evolution du signal chimique de l'année hydrogéologique 2013-2014**

L'objectif du travail qui va suivre est de localiser les différents volumes d'eau, de définir leur provenance ainsi que leur mode de circulation dans l'aquifère. Pour ce faire, nous allons utiliser l'outil chimiogramme.

#### **3.1. Forage N62**

L'allure générale des chroniques de la conductivité et les éléments indicateurs de long temps de séjours (Mg et Si) montrent de relatives augmentations des concentrations au début des périodes humides (Novembre, Décembre) avec néanmoins des pics de concentrations consécutifs aux faibles précipitations à la fin de la période sèche, ce qui est particulièrement visible entre Juillet et Août. Globalement on trouve une concordance de comportement entre Magnésium et Silicium ce qui est logique du fait de leur même évolution dans le temps. Cette augmentation brusque est causée par une chasse d'eau qui est provoquée par les premières pluies.

Ces observations montrent que les eaux nouvelles ne participent pas directement aux écoulements Mais sont d'abord stockées dans la zone non saturée. Ces eaux parviennent ensuite plus ou moins rapidement à l'exutoire par des écoulements différents dans le système. (Figure. 69)

##### **3.1.1. Conductivité**

Elle est considérée comme représentative de la minéralisation totale de l'eau. Elle intervient dans la solubilité des roches de l'aquifère en augmentant l'agressivité de l'eau. Pour une émergence donnée, les valeurs de la conductivité vont nous renseigner sur les vitesses de transit de l'eau, donc sur son mode de circulation et, qualitativement, sur les caractéristiques hydrodynamiques des secteurs de l'aquifère sollicités à un instant donné.

L'allure de courbe de conductivité de ce système (forage N62) est marquée par une baisse brusque de sa valeur de (799-814  $\mu\text{Scm}^{-1}$ ) à (649  $\mu\text{Scm}^{-1}$ ). A partir du mois de Juin elle marque une tendance à la hausse pour atteindre la valeur de (811  $\mu\text{Scm}^{-1}$ ). Ce phénomène

peut s'expliquer par le fait que les apports pluvieux de l'hiver provoquent une chasse et une dilution de l'eau existante. Les premiers volumes d'eaux arrivés à l'exutoire correspondent à ceux des écoulements rapides dont le siège préférentiel est les drains majeurs. Ces eaux n'ont pas eu le temps de faire des échanges avec l'encaissant et elles sont par conséquent peu minéralisées. En revanche, les eaux correspondant à l'écoulement retardé provenant des blocs et des micro fissures, s'imprègnent mieux des conditions du milieu et se retrouvent à l'exutoire avec une minéralisation plus importante.

Les eaux du forage N62 montrent une faible plage de variation, des valeurs de conductivité, ce qui indique la faible karstification de ce système.

### **3.1.2. Nitrates, sulfate et chlorures**

Le variogramme de Nitrates, Sulfates et le Chlorures montrent une baisse de concentration le mois de Janvier puis une légère augmentation à la fin de la période humide, puis une augmentation dans le printemps (période de traitement des cultures agricole) pour atteindre 36 mg/l de nitrates, 61 mg/l de sulfates et 55 mg/l de chlorures.

Les nitrates et les chlorures continuent leurs augmentations jusqu'au début du mois d'Octobre pour atteindre les valeurs ( $\text{NO}_3 = 39$  mg/l et  $\text{Cl} = 68$  mg/l).

Le comportement des teneurs de sulfates et chlorures ont subi les mêmes variations qui sont liées à l'intensité des activités agricoles (l'utilisation des produits phytosanitaires dans l'agriculture).

L'utilisation du soufre pour la protection des vignes contre le mildiou. Les scories potassiques et certains phosphates utilisés comme engrais peuvent générer des sulfates en quantités relativement élevées à travers les zones irriguées (Aïn Teghat) qui est proche du forage N62. Notamment pour les mois de Mars (5 mm) et Avril (10 mm) qui est la période de fructification de la plante.

Les teneurs plus élevées de ces éléments (Nitrates, Sulfates et le Chlorures) montrent une infiltration plus rapide des eaux de surface au niveau de ces écoulements temporaires. De fortes teneurs en ces ions allochtones caractérisent des eaux proches de la surface.

En effet une partie des nitrates est produite dans le sol et l'autre partie à une origine anthropique. A propos des sulfates et chlorures, ils peuvent se concentrer dans le sol lors des périodes d'étiage sous l'effet de l'évapotranspiration. Et classiquement les sulfates les chlorures sont associés aux eaux d'infiltrations qui ont une origine agricole eux même.

Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique

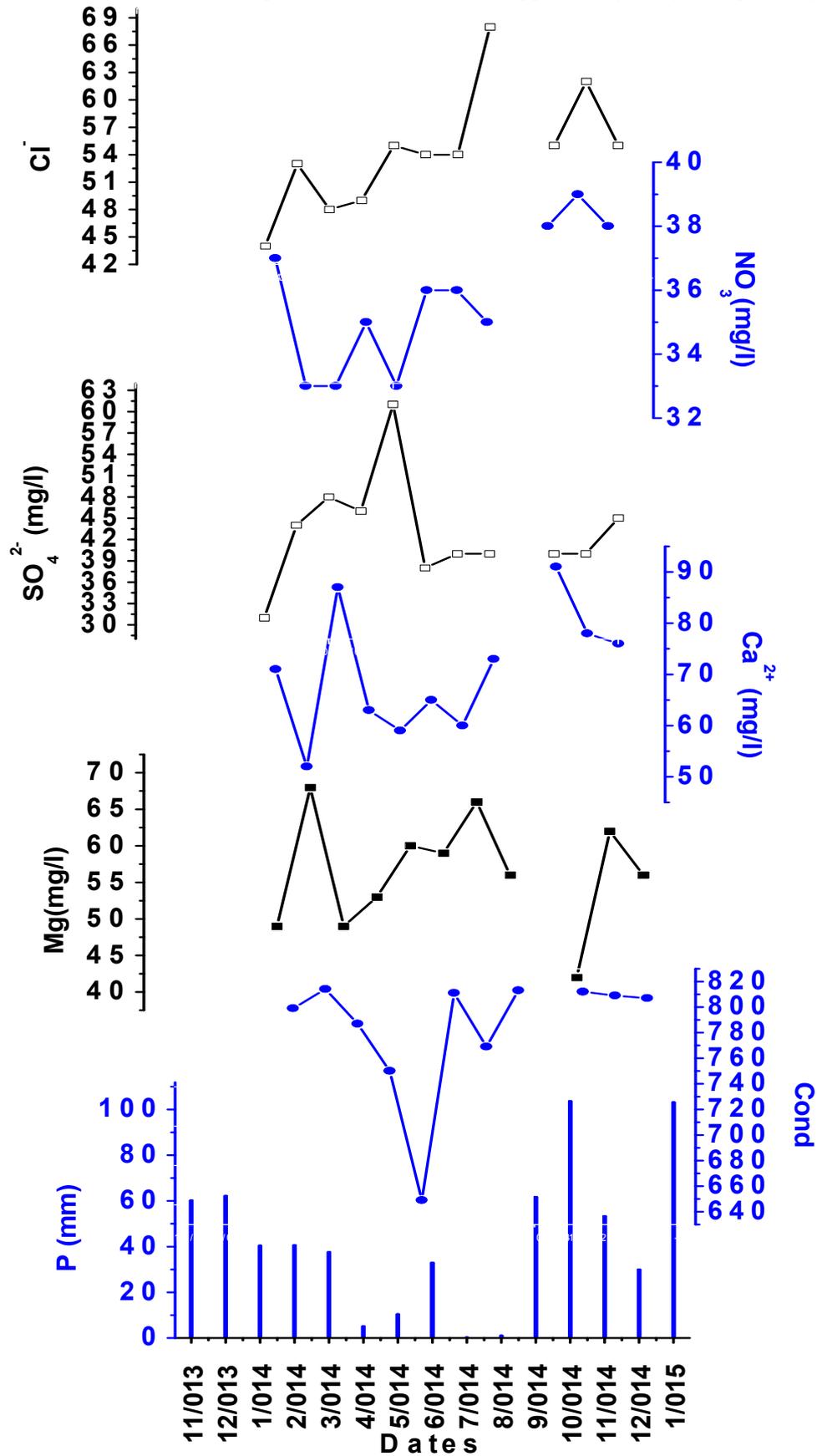


Figure 69: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de Forage N62

### **3.1.3. Calcium**

Rapidement mis en solution donne des indications voisines de la conductivité, donc de la minéralisation, ce qui est normal dans la mesure où il est responsable de plus de 90 % de cette minéralisation (Puig ; 1987).

Une fois l'eau est chassée, l'eau nouvellement infiltrée atteint l'exutoire, expliquant par la même occasion une dilution des teneurs en bicarbonates qui baisse à 355 mg/l, conjointe par une baisse des teneurs en calcium à 52 mg/l. Cette baisse, définissant une arrivée d'eau plus récente. En effet, nous observons pour cet écoulement deux types d'eaux, à savoir : les eaux plus minéralisées assimilables à des eaux de réserve non facilement mobilisables, des eaux plus récentes avec de faibles concentrations en calcium.

## **32. Ain Zerga**

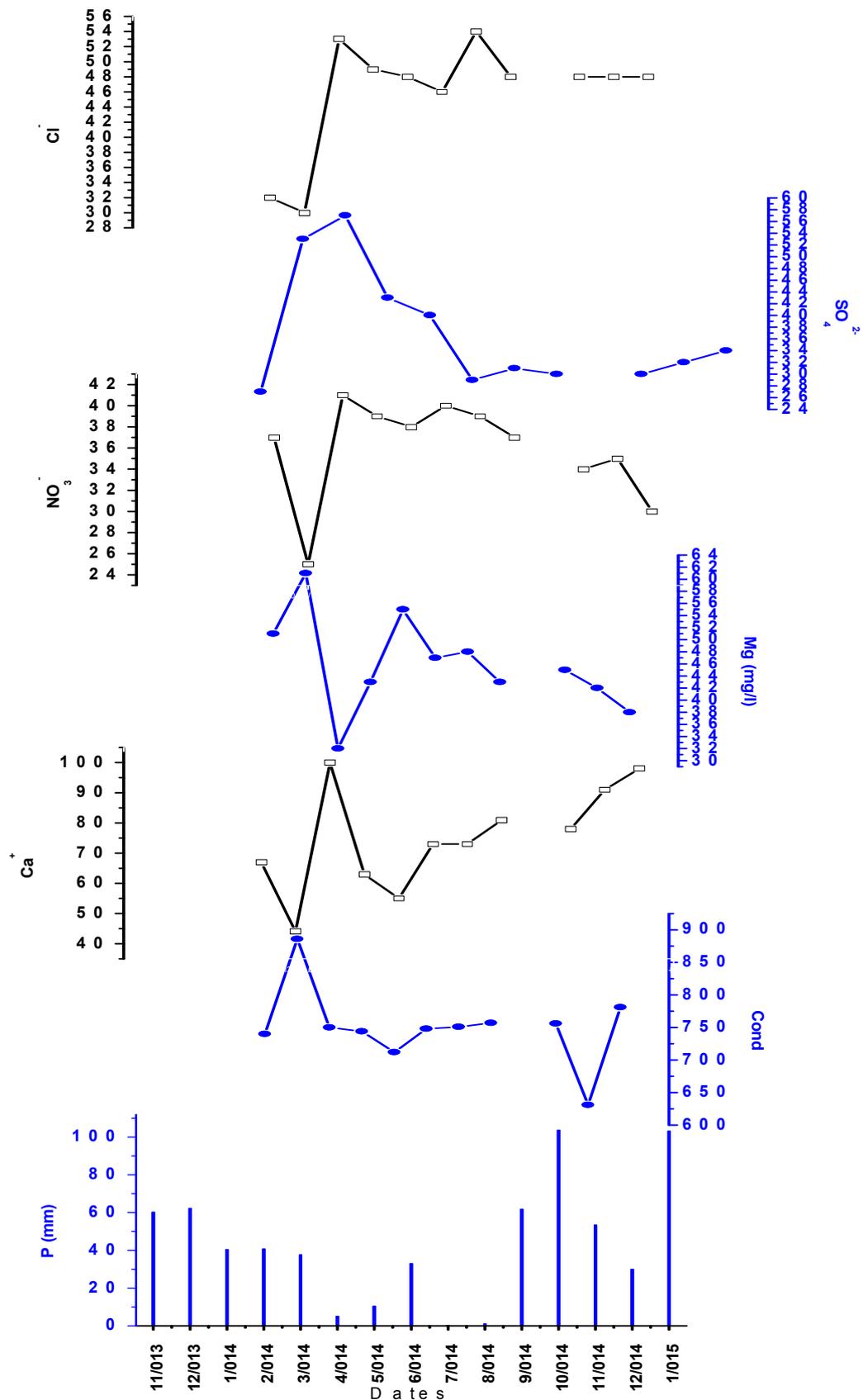
Les événements pluvieux du mois de Novembre 2013 jusqu'à la fin d'année 2014 offre un bon exemple de variations des paramètres chimiques. (Figure. 70)

Les pluies de Novembre-2013 jusqu'à Mars-2014 provoquent l'arrivée d'une eau très minéralisée qui se traduit par la forte augmentation de la conductivité avec des valeurs qui peuvent atteindre les 886 $\mu$ s/cm. Ceci se traduit par d'énormes effets pistons dans les drains qui chasse l'eau en transit (l'écoulement différé). Ce phénomène explique la très forte montée des teneurs en calcium (indicateur de la zone non saturée) 98mg/l et le magnésium qui varie légèrement (de 51 à 61 mg/l). Il est clair que s'il y a eu mise en charge de la réserve noyée la participation de cette eau reste très inférieure à celles des drains et de la zone non saturée.

On observe au mois d'Avril une forte chute du magnésium (31mg/l) et inversement une augmentation des sulfates, des chlorures, des nitrates et du calcium (57mg/l, 53mg/l, 41mg/l, 100mg/l) qui sont de bons marqueurs de l'écoulement retardé provenant des zones superficielles. (J. Mudry en 1987) avait montré que seul les éléments caractérisant le signal entée (Chlorure, sodium, potassium, nitrate) étaient variable dans le temps

L'augmentation des éléments anthropique (nitrates, sulfate, chlorure) après le décroissement du magnésium indique, un phénomène d'effet piston a poussé des eaux ayant un certain temps de séjour au sein de la zone non saturée.

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 70: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Ain Zerga**

### **3.2.1. Le chlorure :**

Est un bon marqueur des horizons de surface car il se concentre par évaporation Au niveau de cette zone. Sa remobilisation est rapide au moment des pluies grâce à sa forte solubilité

Les prélèvements des mois d'Octobre et Novembre se caractérisent essentiellement par une croissance des chlorures alors que les autres éléments anthropiques (nitrate et sulfate) décroissent. Ce mécanisme correspond certainement à un écoulement diffus provenant de la zone non saturée. Le non concordance entre les Chlorures et les Sulfates et Nitrates justifie la diversité des origines.

## **33. La source Poirier**

### **3.3.1. Les nitrates, les sulfates et chlorures:**

Ces éléments possèdent à l'évidence une origine agricole dans ce système. On observe en effet une bonne corrélation entre les trois éléments, indiquant une origine commune de ces ions dans les zones superficielles. Les teneurs s'accroissent au moment des pluies puis diminuent sensiblement. Ce phénomène correspond à une acquisition rapide et s'explique par un lessivage du sol. (Figure. 71)

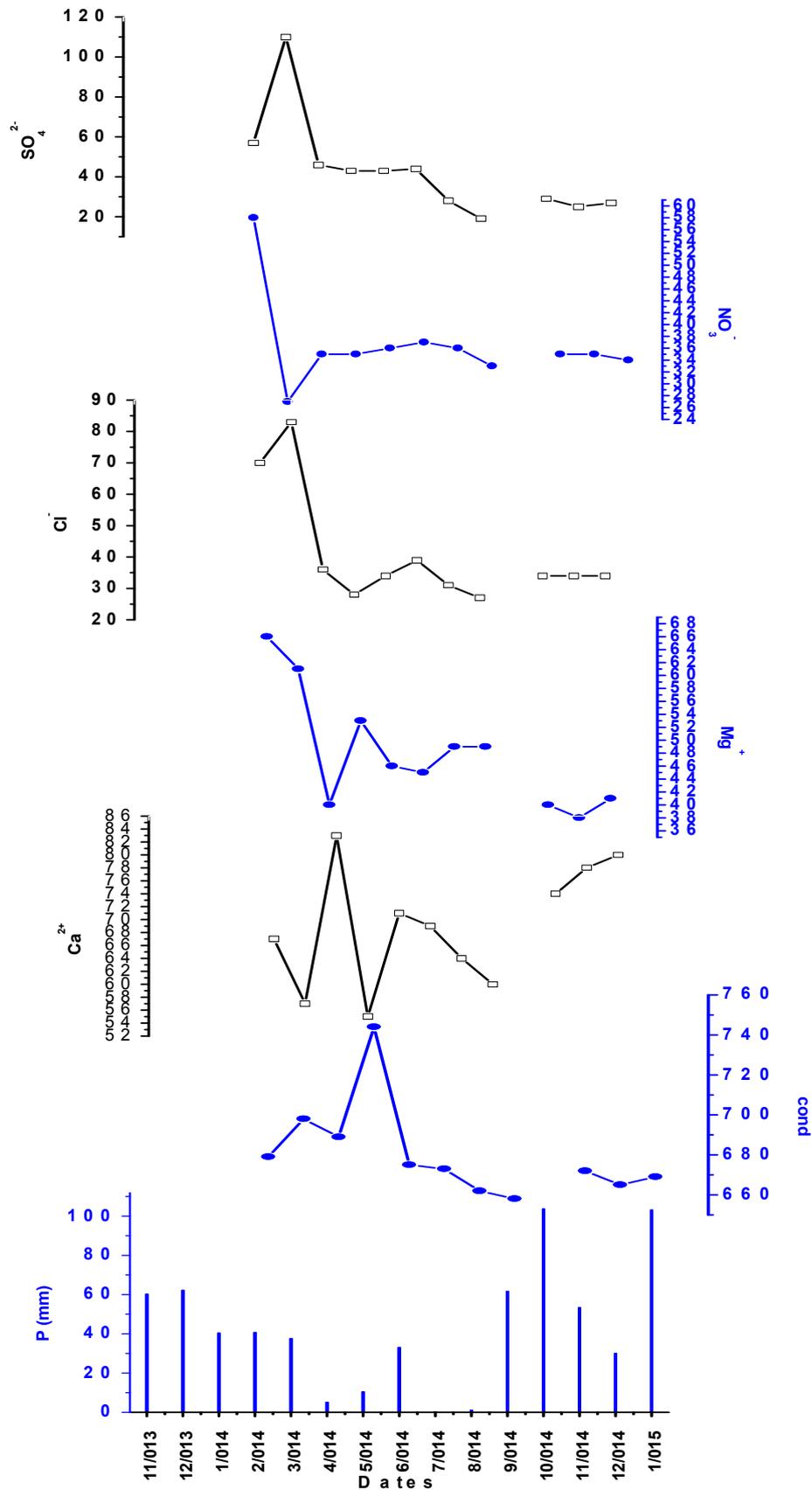
### **3.3.2. Le magnésium :**

Les variations du  $Mg^{++}$  sont cependant nettement plus importantes. Ainsi à la fin de la période humide (Mars-2014) une chute brutale des Mg et Si respectivement : 66 à 40 mg/l et 13,4 à 9,4 mg/l indique une disparité importante des teneurs à l'exutoire. La décroissance du magnésium est relativement plus lente pendant la reprise de Septembre - Décembre 2014.

### **3.3.3. Le calcium :**

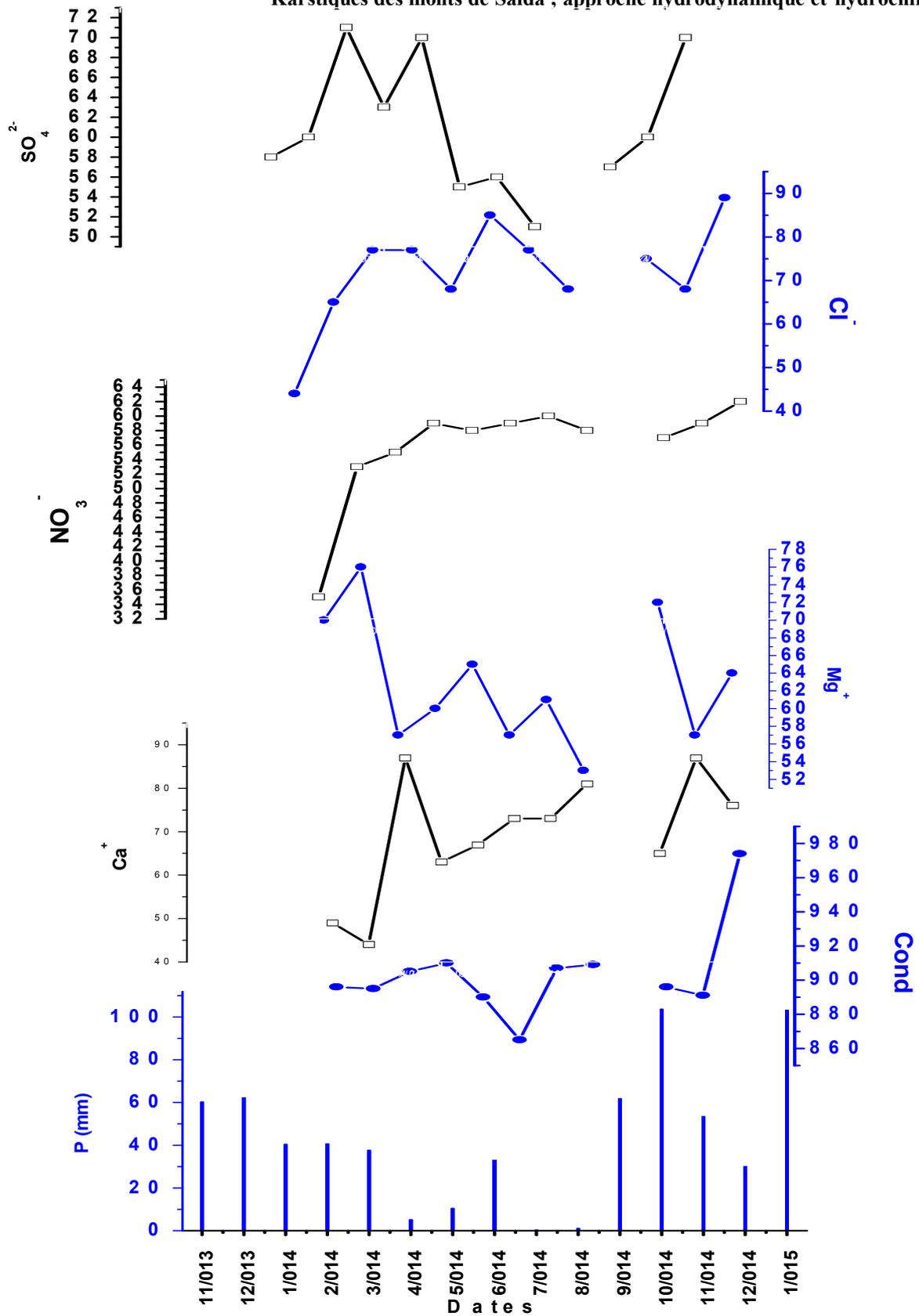
Les prélèvements effectués en hautes eaux sont riches en  $Ca^{2+}$  (80 mg/l) et  $HCO_3^-$  (381 mg/l). Ces eaux résultent du mélange de la réserve noyée avec l'eau en transit dans la zone non saturée. Ce mécanisme est en effet classique dans la très grande majorité des karsts étudiés dans la littérature. Le phénomène observé à la source Poirier s'explique par la participation à l'écoulement d'un ou de plusieurs réservoirs situés près de la surface correspondant aux aquifères superficiels. Ceci indique que le milieu non saturé joue un rôle particulièrement important tant en quantité qu'en qualité sur les eaux de l'émergence. (Figure .71)

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 71: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Poirier**

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 72: Variation des indicateurs chimiques du temps de séjours de la source Ain Teghat**

### **3.4. Ain Teghat**

L'allure générale des chroniques en conductivité et magnésium montre une augmentation de leur concentration au début des périodes humides. (Figure.72)

A la fin du mois de Novembre, la conductivité augmente à 974  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et le magnésium à 72 mg/l, de même pour le silicium (du 11 au 14 mg/l) et le débit (de 1,3 à 1,6 l/s).

Ceci implique qu'un potentiel de dissolution important peut encore exister à l'intérieur de la zone noyée. Ce mécanisme est certainement à l'origine du développement des conduites dans cette zone, d'où les fortes discontinuités hydrauliques observées.

Les variations hydrochimiques observées à l'exutoire du système Teghate expliquent l'importance de la participation de la zone non saturée et la discontinuité hydraulique de ce système.

#### **3.4.1. Nitrates, Sulfate et Chlorures**

L'allure des variogrammes des sulfates et des Chlorures montre une baisse de concentration en Février (44 mg/l pour le  $\text{SO}_4^{2-}$ , 58 mg/l pour le Cl) ensuite une augmentation relativement importante à la fin des périodes humides durant les mois de Mars –Avril (71 mg/l pour le  $\text{SO}_4^{2-}$ , 77 mg/l pour le Cl) et à la fin du mois de Décembre (70 mg/l pour le  $\text{SO}_4^{2-}$ , 89 mg/l pour le Cl). En revanche, les nitrates montrent des augmentations notables durant toute l'année. Sachant que la région d'Ain Teghat est une région agricole à périmètre irrigué.

Les teneurs relativement élevées en sulfate, nitrate et chlorure des eaux de la source montrent une infiltration rapide des eaux de surface. Le comportement de ces trois éléments sera détaillé au (impacte de l'activité agricole)

#### **3.4.2. Le Calcium**

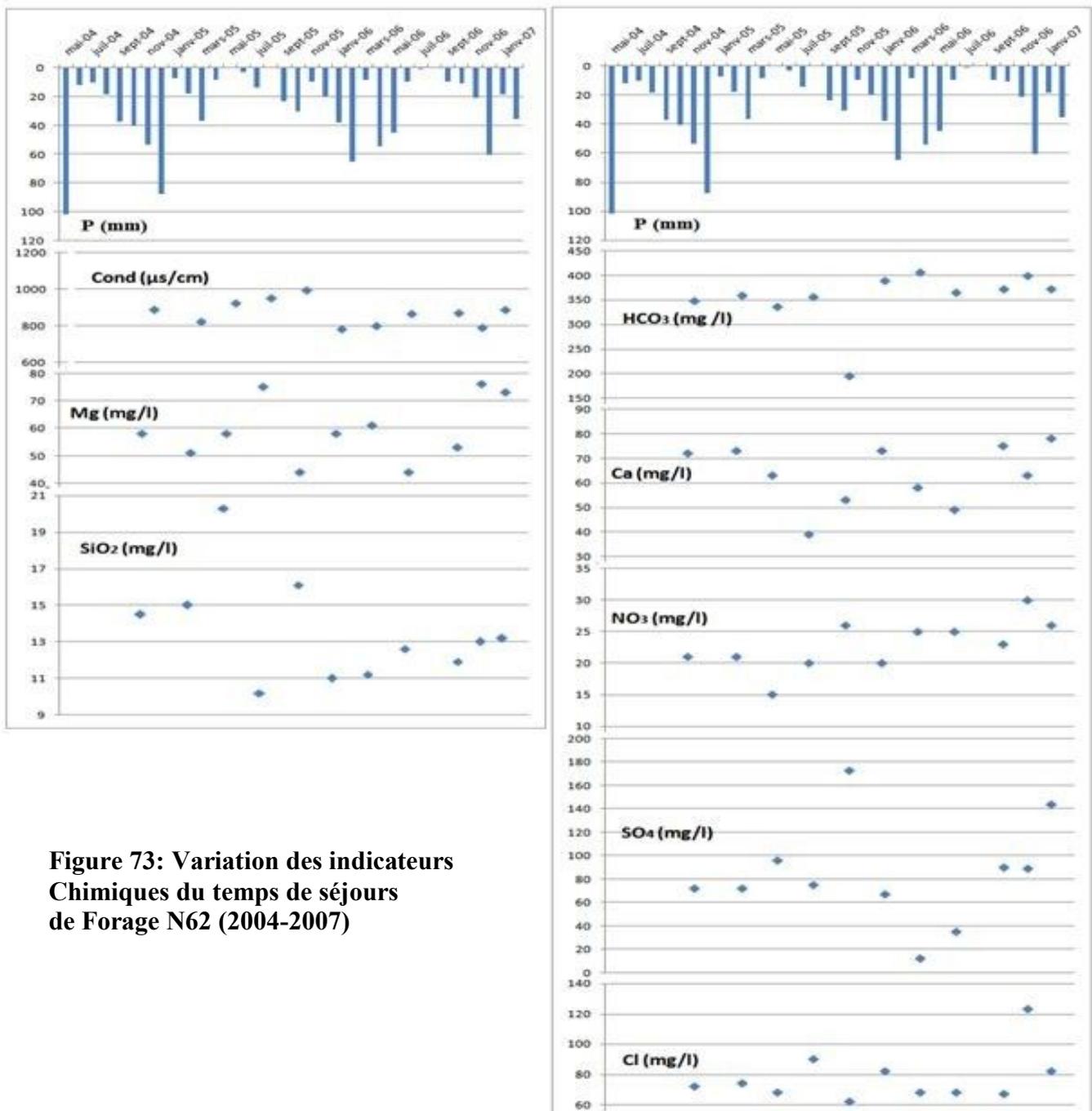
Le variogramme des teneurs en calcium présente une concordance avec le comportement des fortes pluies. Les teneurs relativement élevées indiquent un temps de séjour moyen ce qui correspond à l'apport de la zone non saturée.

## **4. Evolution du signal chimique (2004-2007)**

### **4.1. Forage N62 et Ain Zerga**

On remarque sur les figures 73 et 74, qu'au début des périodes humides il y'a une élévation de la teneur des éléments indicateurs de long temps de séjours, de même pour la conductivité et  $\text{Ca}^{2+}$  qui sont des indicateurs des eaux moyennement séjourné.

La synchronisation de l'augmentation de ces éléments font penser que l'infiltration a chassée de la zone saturée des eaux ayant séjourné assez longtemps. L'influence des événements pluvieux sur l'augmentation des éléments à court temps de séjour est remarquable, cela est traduit par l'élévation des teneurs en  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  et  $\text{Cl}$  qui ont subi un lessivage après une période sèche. (Figures 73 et 74)



**Figure 73: Variation des indicateurs Chimiques du temps de séjours de Forage N62 (2004-2007)**

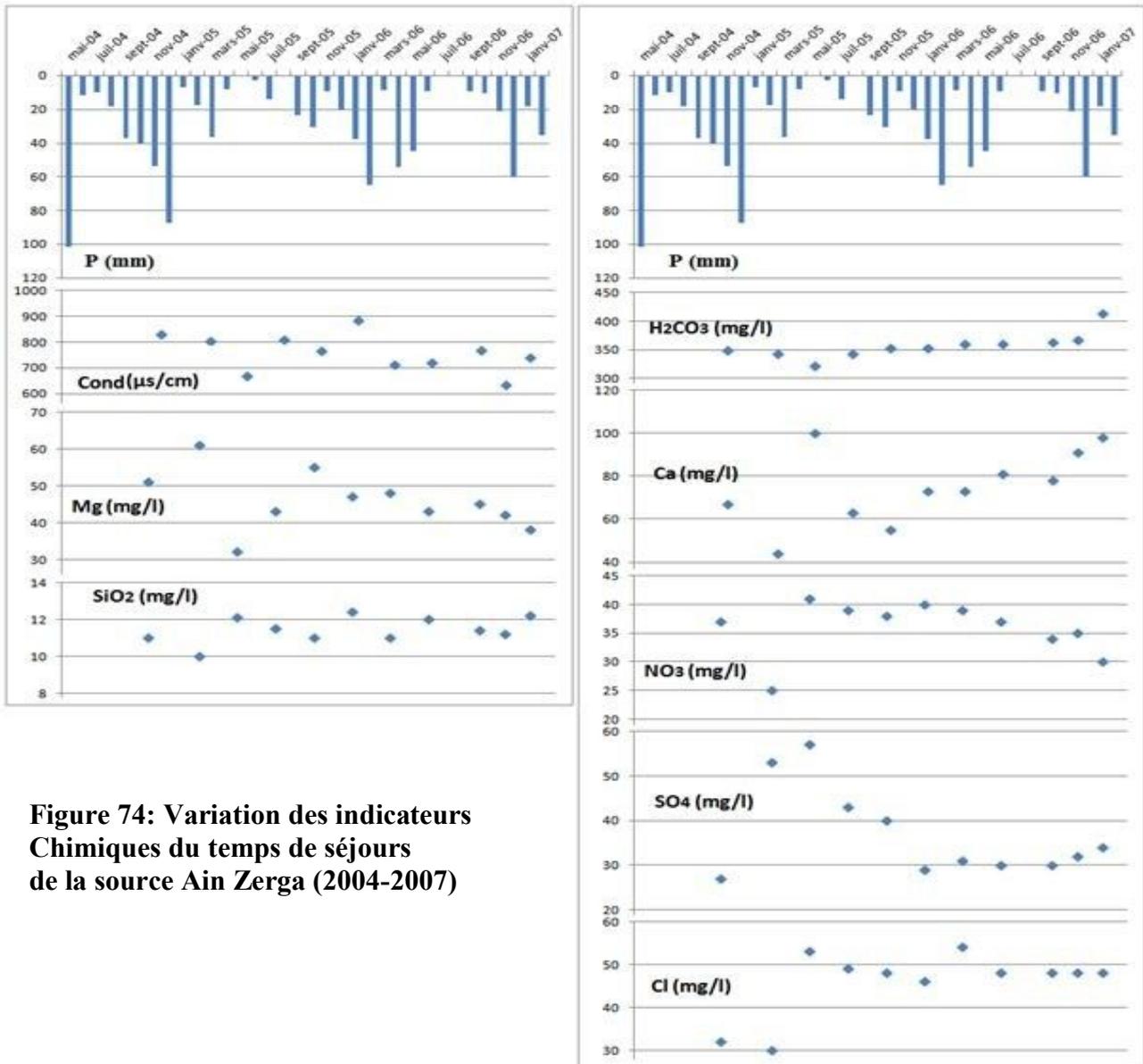


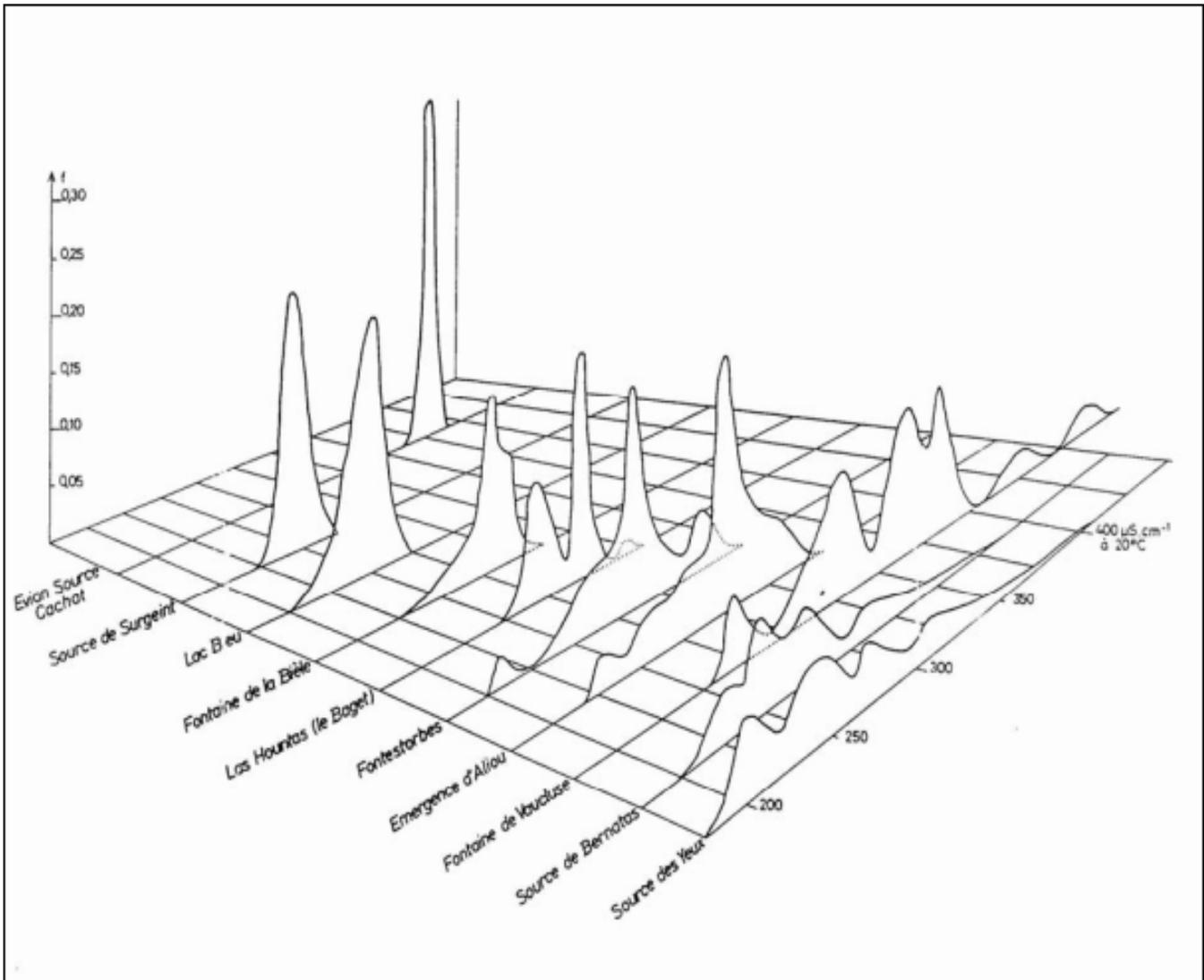
Figure 74: Variation des indicateurs Chimiques du temps de séjours de la source Ain Zerga (2004-2007)

## 5. Distribution de fréquence des conductivités

La variation de la minéralisation d'une source en fonction du temps peut être considérée comme une série aléatoire d'une variable régionalisée (Matheron, 1965). Dans la pratique, si l'échantillonnage est représentatif d'une variation saisonnière, la distribution de fréquence d'une telle variable représente la loi de probabilité définissant la fonction aléatoire. D'après (Bakalowicz 1979), la forme de cette courbe de distribution fournit une image du degré d'organisation des écoulements souterrains dans l'aquifère karstique. Il propose une classification des systèmes en milieu carbonaté en utilisant les distributions de fréquence de la conductivité. L'allure de ces courbes nous renseigne en effet sur les capacités du système à faire

transiter différents types d'eau jusqu'à l'exutoire. La perturbation du signal à la sortie est donc fonction de la plus ou moins grande perméabilité du système et de son degré d'organisation. Ainsi les aquifères poreux ou fissurés ont une distribution unimodale, ce qui traduit des eaux homogènes, hydrochimiquement stable. Les systèmes karstifiés au contraire ont des courbes plurimodales plus ou moins étalées suivant la complexité de la structure du réservoir.

Un catalogue de référence de distributions dans des aquifères karstiques a été construit à partir de données d'aquifères karstiques bien connus en France (figure. 75).



**Figure 75: Catalogue de référence de distribution de la conductivité (Bakalowicz, 1994)**

Ce catalogue montre clairement que les aquifères carbonatés poreux (type Evian Cachat) ou fissurés (Type Surgeint) montrent des distributions peu dispersées et unimodales. Ceci est la conséquence de l'homogénéisation des caractéristiques chimiques dans la zone phréatique sans aucune structure karstique fonctionnelle.

Les aquifères karstiques montrent une grande dispersion dans la distribution et l'apparition de plusieurs modes qui sont la conséquence de la non homogénéisation des caractéristiques chimiques circulant dans l'aquifère.

### 5.1. Application aux sources étudiées

La courbe de distribution des valeurs de conductivité d'une eau d'aquifère carbonaté, réparties sur un cycle hydrologique, permet donc de définir, de façon qualitative certes, le degré de développement du karst fonctionnel de ce type d'aquifère. Toutefois, même si le mode d'obtention est simple et fiable, la durée d'observation paraîtra longue aux hydrogéologues appliqués.

Les sources étudiées n'ont pas été soumises à des mesures en continu de la conductivité. Nous avons reporté sur les figures les distributions de fréquence des conductivités des principales sources des Monts de Saïda.

Les eaux des sources Ain Zerga et Source Ronde et le Forage N62 sont nettement plus minéralisée avec une plage de variation plus importante. Elles sont caractérisées par un mode principal (993  $\mu\text{Scm}^{-1}$  pour Forage N62) (886  $\mu\text{Scm}^{-1}$  pour Ain Zerga) (775  $\mu\text{Scm}^{-1}$  pour la Source Ronde) correspondant aux eaux de la réserve à long temps de transit drainées en dehors de toute influence hydroclimatique (étiage), ce sont des eaux écoulées pendant les fortes crues d'automne par effet de piston.

L'étalement de la courbe avec des modes secondaires à différentes amplitudes vers les faibles valeurs est la conséquence de l'arrivée d'eau nouvelle au moment des crues en période de hautes eaux. (Figures. 76, 77 et 78)

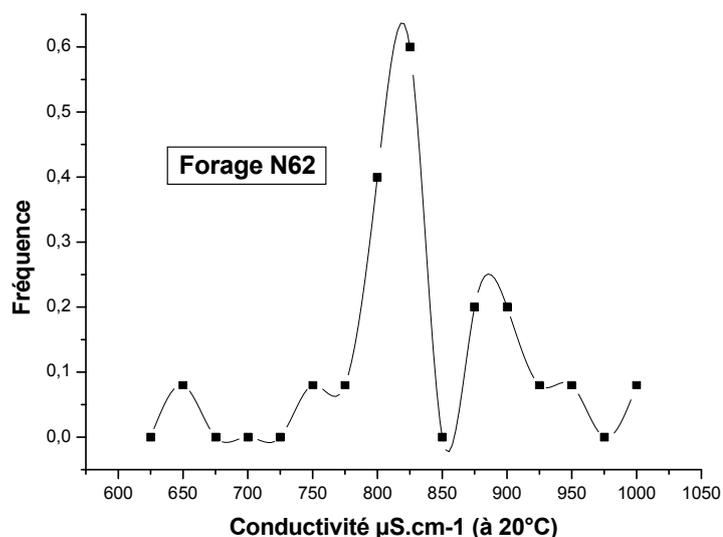


Figure 76: Distribution des fréquences des conductivités de Forage N62

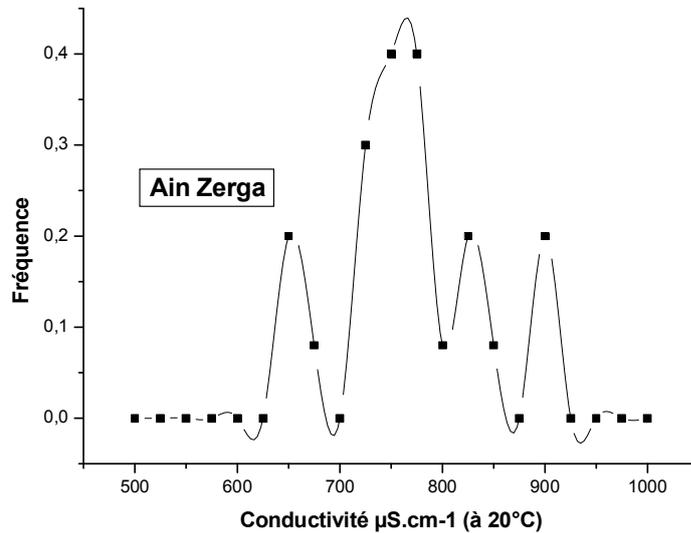


Figure 77: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ain Zerga

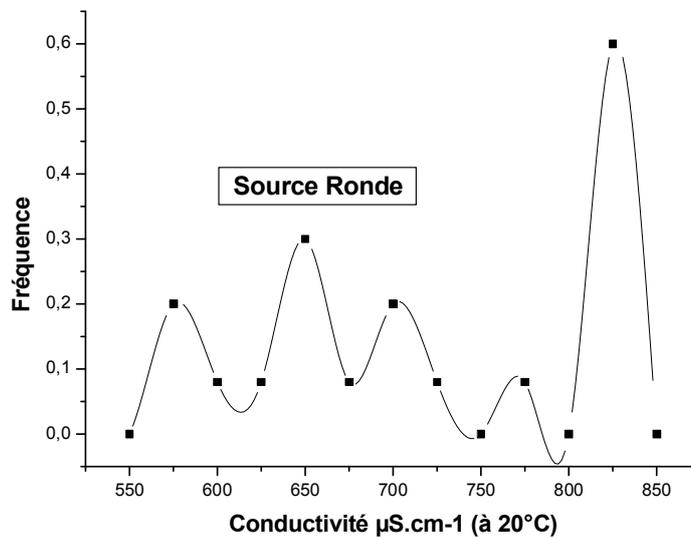
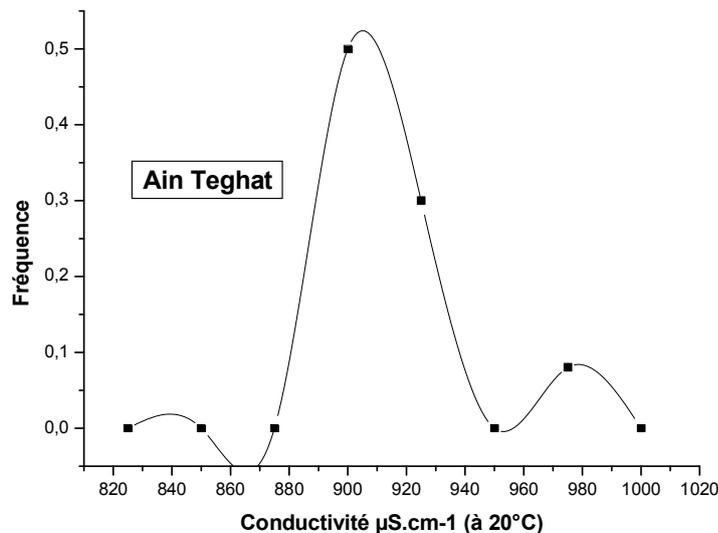


Figure 78: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ronde

### Source Ain Teghat

Le système karstique d'Ain Teghat, nettement plus minéralisé, se caractérise par un mode bien marqué à  $974 \mu\text{Scm}^{-1}$  et une dissymétrie vers des valeurs moins fortes, avec un mode secondaire à  $910 \mu\text{Scm}^{-1}$ . Les eaux fortement minéralisées impliquent une participation continue de la réserve suspendue (épikarst). Le mode principal ( $974 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) devrait correspondre au drainage de l'eau des horizons superficiels, fortement minéralisées, par effet piston au moment des périodes de crue de reprise d'automne et de fin printemps. L'amplitude relativement importante de ce mode principal souligne l'importance du fonctionnement par effet piston dans ce système.

Le mode secondaire ( $910 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) correspondrait à l'écoulement des eaux de la réserve suspendue, légèrement moins minéralisées durant les périodes de hautes eaux d'hiver et début de printemps. En effet ces eaux correspondent à un écoulement différé. La présence des eaux relativement minéralisées avec un mode principal vers les fortes minéralisations traduit un effet tampon important dans le système. Ceci suggère la présence d'une réserve importante qui contribue à cette homogénéité chimique des eaux de la source. Ce constat devrait nous faire conclure à une mauvaise karstification du système d'Ain Teghat. (Figure. 79)



**Figure 79: Distribution des fréquences des conductivités de la source Ain Teghat**

## 6. Etude de temps de réponse

Le but de cette étude est de calculer le temps de réponse des systèmes karstiques pour chaque évènement pluvieux. Les aquifères ayant un temps de réponse relativement courte représente des systèmes karstique vulnérable. Le temps de réponse correspond à la durée d'apparition des pics sur les variogrammes des éléments chimiques.

### 6.1. Ain Zerga

La variation des éléments chimiques après chaque période pluvieuse nous montre que : (Figure .80 et Tableau. 19)

- Le nombre de pics qui apparaissent après un évènement pluvieux = 13 pics
- Le nombre de pics qui apparaissent après un évènement sec = 10 pics

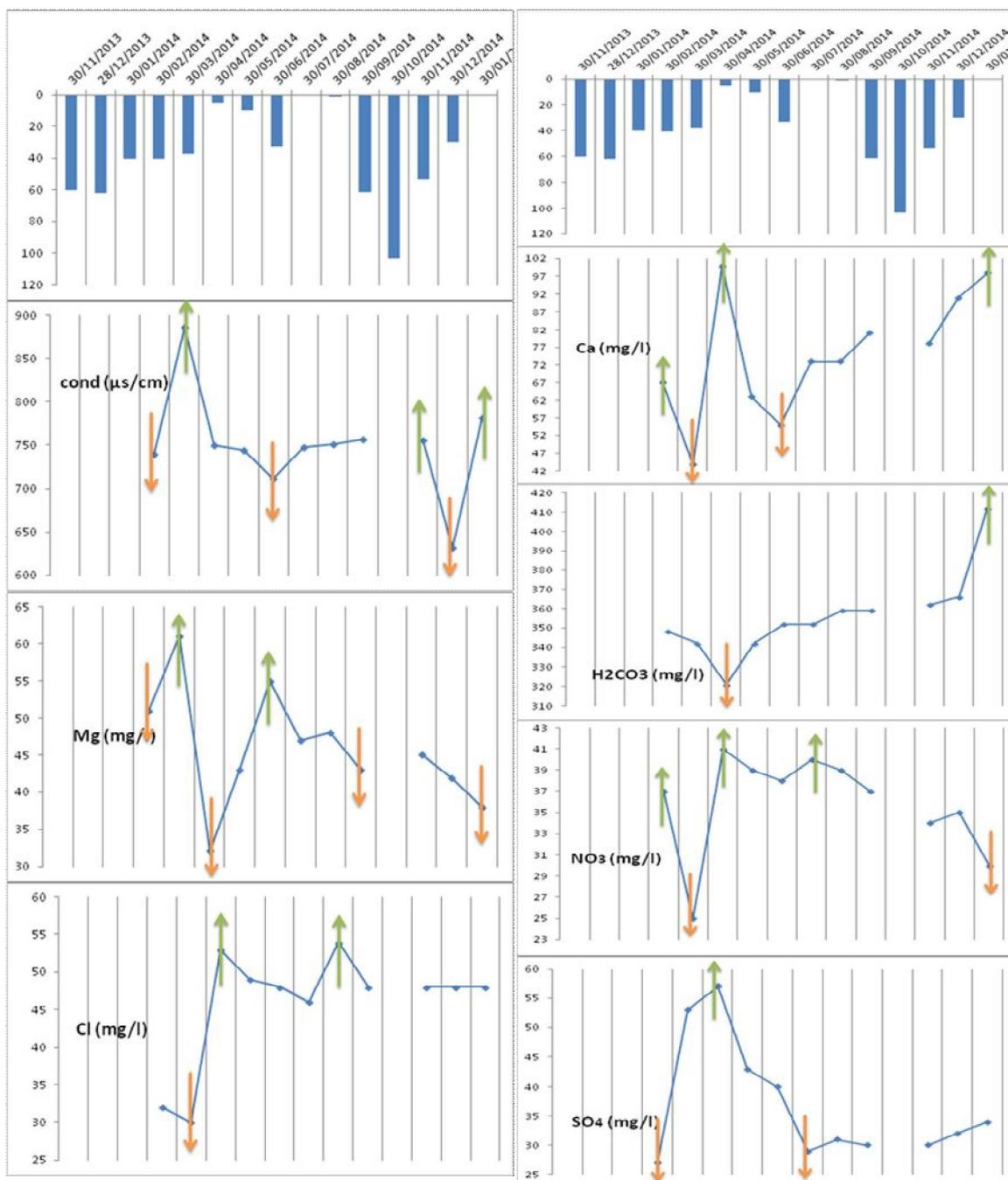


Figure 80: le nombre de pic des variations des éléments hydrochimiques durant la période pluviométrique 2013-2014 de la source Ain Zerga

**Tableau 19: Calcul du nombre de pic de réponse**

Evènement nombre de Mois	1 mois	2 mois	3 mois	Pas de réponse
évènement pluvieux	04	03	01	05
évènement sec	03	01	0	06
Le nombre de réponse par mois	7	4	1	11
% de réponse	1.8	1.04	0.01	2.9

On observe que le temps de réponse le plus dominant dans le système de la source Ain Zerga est un mois avec un pourcentage de 18%. En revanche le pourcentage de l'absence de réponse a atteint une valeur proche de 3%. A partir de ce tableau on peut conclure que le temps de réponse du système de la source Ain Zerga à tout évènement pluvieux est de moins d'un mois, et que :

- Le taux de karstification est important (le degré de karstification est « 1 »)
- La vulnérabilité du système est importante
- Absence des périmètres de protection

Pour la valeur de l'absence de réponse indique que le temps de recharge du système est long et qu'il a subi un épuisement important dans la période sèche. Cet épuisement est causé par l'utilisation non contrôlé de l'eau de la source pour l'irrigation et AEP.

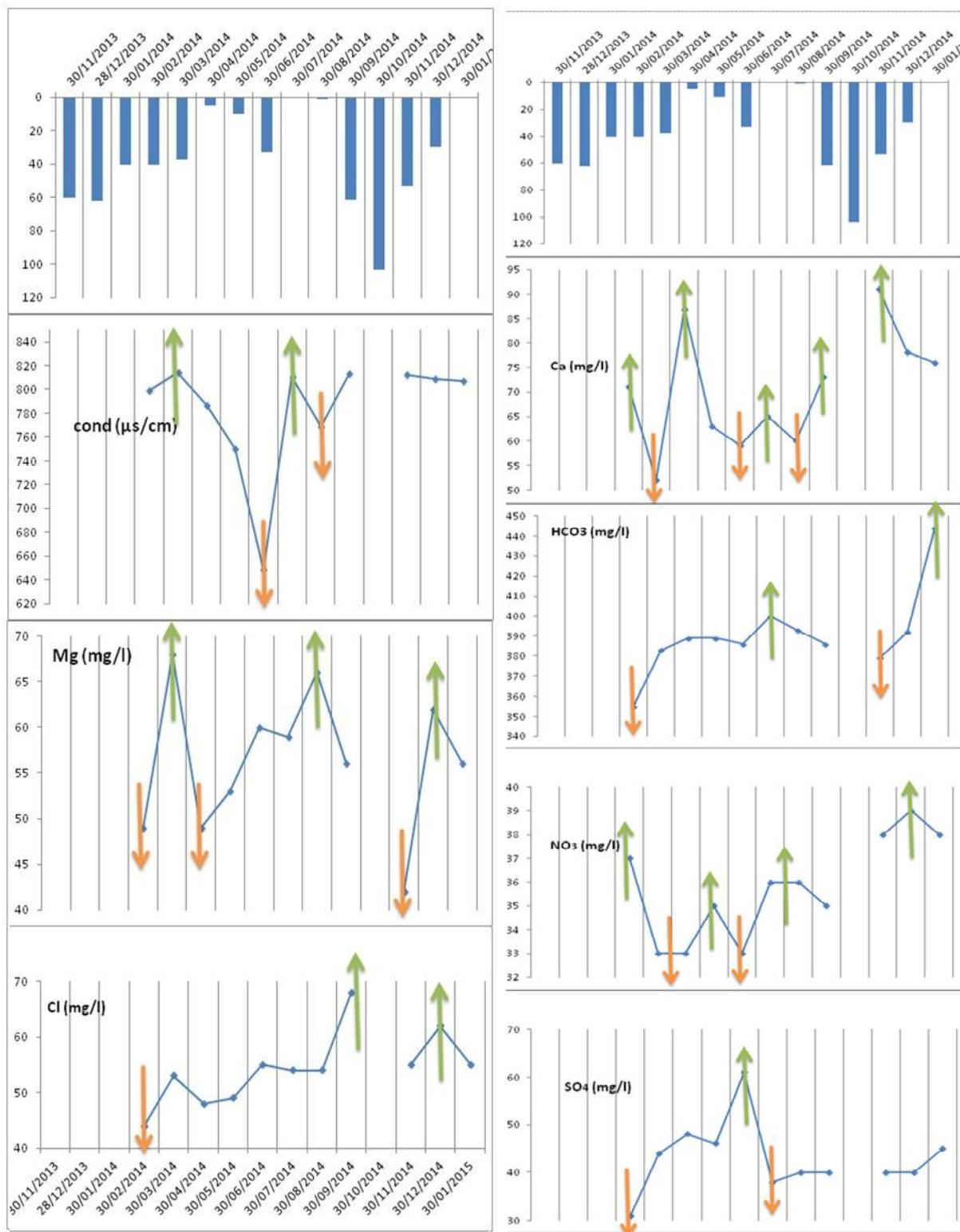
## **6.2. Forage N62**

La variation des éléments chimiques après chaque période pluvieuse nous montre que :

- Le nombre de pics qui apparaissent après un évènement pluvieux = 18 pics
- Le nombre de pics qui apparaissent après un évènement sec = 21 pics (Figure .81 et Tableau .20)

On observe que le temps de réponse le plus dominant dans le système de Forage N62 est inférieur d'un mois par rapport à Ain Zerga avec un pourcentage de 6,24% de même pour le pourcentage de l'absence de réponse qui a la même valeur. Pour la valeur de l'absence de réponse indique que le temps de rechargement du système est long et qu'il a subi un épuisement important. Cet épuisement est causé par l'utilisation de l'eau du forage dans l'AEP.

**Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique**



**Figure 81: le nombre de pic des variations des éléments hydrochimiques durant la période pluviométrique 2013-2014 de Forage N62**

**Tableau 20: Le nombre de pics de réponse**

Evènement nombre de Mois	Un mois	2 mois	3 mois	Pas de réponse
évènement pluvieux	06	03	01	08
évènement sec	10	02	0	08
Le nombre de réponse par mois	16	5	1	16
% de réponse	6,24	2	0.4	6.24

A partir de ce tableau on peut conclure que le temps de réponse du système de Forage N62 à tout évènement pluvieux est de moins d'un mois, et que :

- Le taux de karstification est important (le degré de karstification est « 1 »)
- La vulnérabilité du système est importante
- Absence de tout système de protection (naturel ou artificiel)

## 7. Conclusion

L'interprétation des données hydrochimique a révélé les caractéristiques de la nappe karstique des Monts de Saïda.

Les eaux de l'aquifère sont minéralisée avec un faciès bicarbonaté calcique magnésien. La pollution anthropique est présente. Elle est mise en évidence par les concentrations plus élevées en chlorures qui sont d'origine domestique.

La pollution d'origine agricole est présentée par les nitrates avec des concentrations qui varient selon les périodes d'arrosage et de fertilisation (l'utilisation excessive des engrais).

L'amplitude est légèrement accrue de la variation des compositions chimiques après chaque événement pluvieuses. Avec une relative stabilité de la concentration des ses compositions durant les périodes sec. Les valeurs de la  $pCO_2$  de la source d'Ain Zerga et du Forage N62 sont en moyenne de l'ordre de 0.011 atm. Par contre, elle est de l'ordre de 0.007 atm pour la source Ronde. Ces valeurs significativement inférieures peuvent être liées au dégazage permanent dû à un écoulement à surface libre juste avant l'émergence.

La faible perméabilité des fissures et le dysfonctionnement périodique du réseau de drainage, font que les eaux séjournent plus longtemps en moyenne dans l'aquifère.

Les indices de saturation de la calcite et dolomite sont positifs dans la nappe karstique témoignant d'un dégazage permanent dû à l'écoulement à surface libre.

Le potassium est sélectivement absorbé par les plantes ; ceci se traduit sur toutes les analyses par des concentrations faibles en potassium et par des rapports élevés de Na/K.

Les rapports Mg/Ca, relativement élevés, (1.29, 1.6 et 1.52) successivement pour Ain Zerga, Forage N62 et La Source Ronde révèlent la présence des dolomies d'Aaléno-Bajo-Bathonien.

- L'allure des courbes de distributions de fréquence des conductivités montrent des formes plurimodales avec cependant des plages de variation et des amplitudes plus ou moins importantes selon le système. Chacune de ces sources se caractérise par un mode bien défini correspondant aux eaux de la réserve ou à long temps de transit et par une dissymétrie causée par la participation à l'écoulement de différents types d'eau.

## **Troisième partie : Vulnérabilité des eaux souterraines**

**Chapitre I : Impact de l'agriculture sur les eaux  
des aquifères karstiques des Monts de Saïda**

## Introduction

Le développement de l'agriculture, par la fertilisation et la protection des cultures, a introduit ces dernières années divers éléments solubles dans les eaux souterraines dépassant parfois largement les normes de potabilité. Les nitrates, sulfates, chlorures et, dans une moindre mesure, sodium et potassium font partie du cortège d'éléments permettant d'identifier une pollution diffuse d'origine agricole. Les ACP effectuées sur les eaux montrent clairement que ce cortège est associé aux eaux récentes. Le nitrate étant le meilleur indicateur de pollution anthropique des eaux souterraines, nous l'avons comparé aux teneurs en sulfate, en chlorure, sodium et potassium pour en déduire leurs origines (naturelles ou anthropiques).

### 1. Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines

Nous remarquons sur la (figure. 82) que le sulfate et le nitrate sont bien reliés. Entre 10 et 50 mg/l de nitrate, le sulfate est assez élevé. L'origine des sulfates est d'apport anthropique. Les teneurs en sulfate supérieures à 70 mg/l, et en nitrate inférieure à 50 mg/l sont probablement dues aux apports anthropiques. Ces points se situent à proximité d'agglomérations et de terrains agricoles.

Or, les sulfates sont les composés les plus fréquemment utilisés pour la protection des cultures fruitières contre l'oïdium ou avec les engrais (les sulfates d'ammoniaque 21% de N et 60 % de  $SO_4$  et sulfates de potassium 50 % de  $K_2O$  et 45 % de  $SO_4$ ).

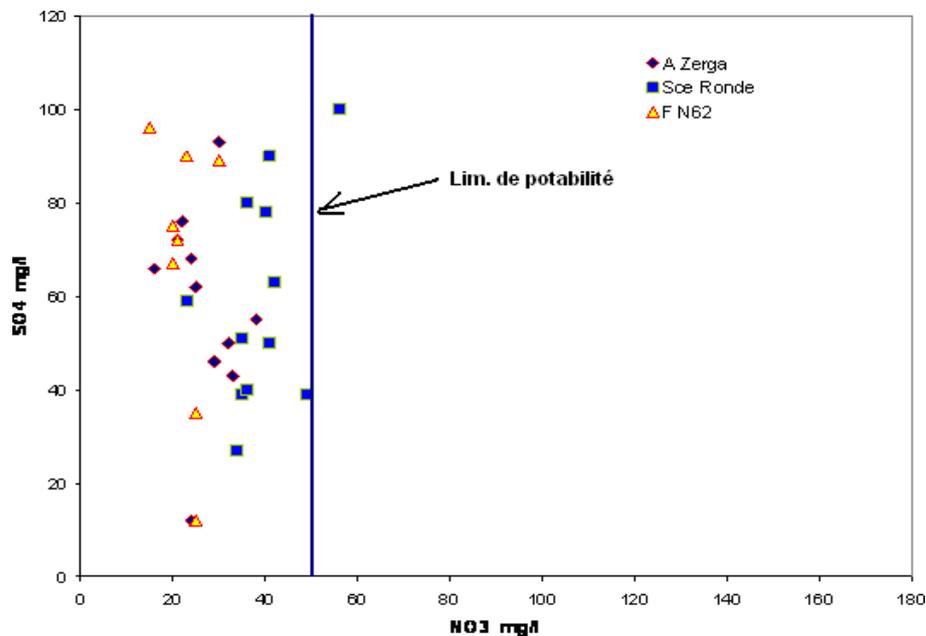


Figure 82: Relation entre sulfate et nitrate des eaux souterraines (mg/l)

## 2. Relation entre chlorure et nitrate

Sur la figure. 83, nous observons, de visu, une faible relation entre les ions chlorures et nitrates on était remarqué chez les eaux d'Ain Zerga et la source Poirier, d'après la matrice de corrélation de l'ACP des ces deux sources ; Le coefficient de corrélation entre les ions chlorures et nitrates était seulement de -0.313 et 0.42 et 0.25, ce qui indique que leur origine est différent (ces éléments provient des eaux usées et d'une origine agricole).

En revanche, pour les eaux d'Ain Teghat et le Forage N62 ; il y'a une bonne relation entre ces deux élément. Le coefficient de corrélation était 0.862 et -0.502. Ce qui indique que les nitrates et les chlorure de ces éléments ont une même origine

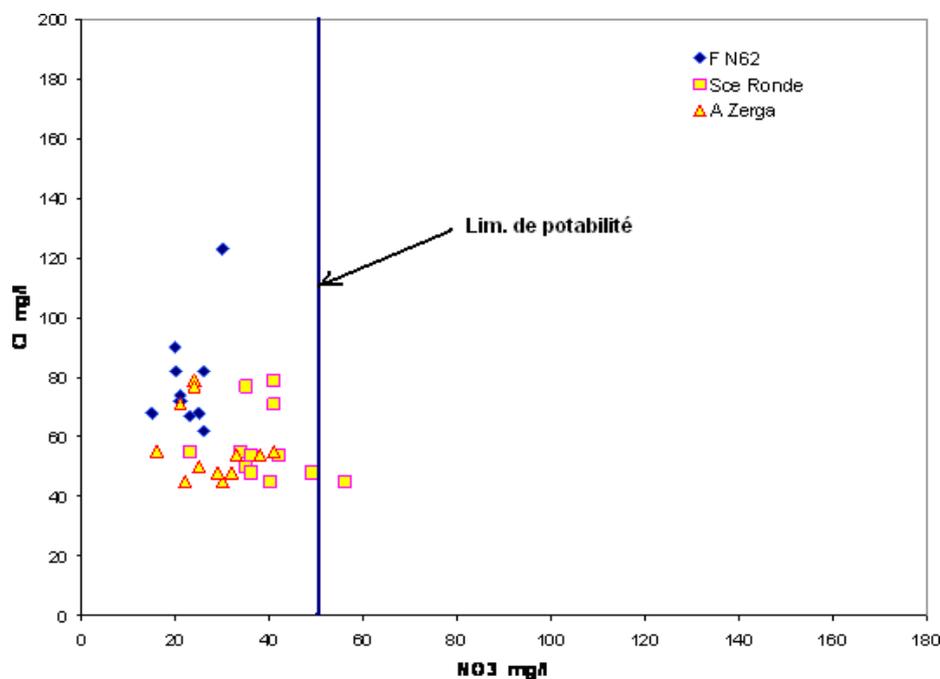


Figure 83: Relation entre chlorure et nitrate des eaux (mg/l)

## 3. Relation Sodium+Potassium et nitrate des eaux souterraines

Enfin, sur la figure. 84, le sodium et le potassium d'origine anthropique se décèlent plus dans les systèmes superficiels que dans les aquifères profonds. Dans la nappe profonde (Forage N62), l'évolution du sodium et potassium est surtout reliée aux phénomènes d'échanges de bases et d'hydrolyse des silicates.

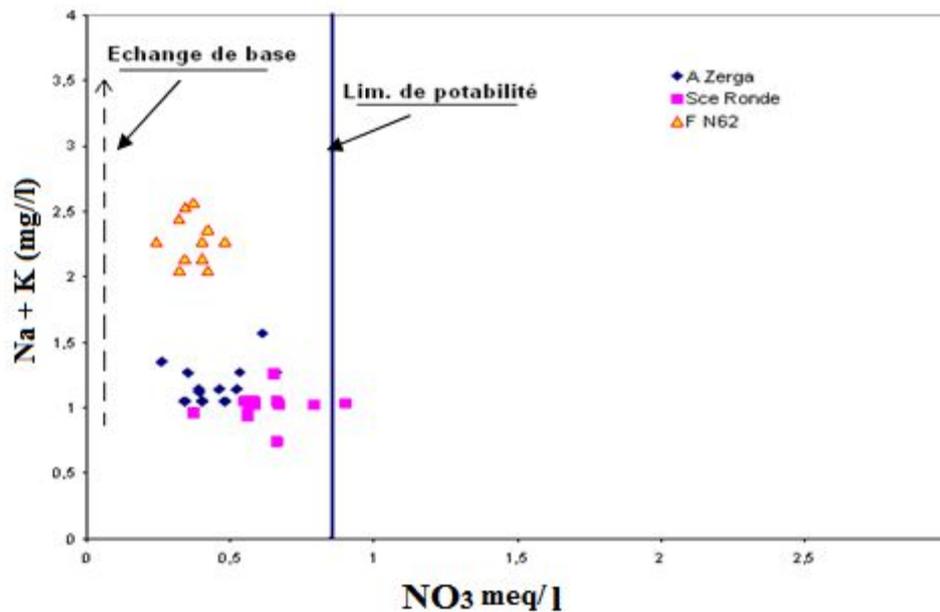


Figure 84: Relation Na+K et nitrate des eaux souterraines (meq/l).

#### 4. Impact de l'évolution des périmètres irrigués sur la qualité des eaux de la nappe karstique des Monts de Saïda

Les Monts de Saïda représentent un château d'eau très important pour le Nord-Ouest Algérien. Elles soutiennent le quasi totalité de l'approvisionnement en eau potable de la région. L'accentuation de la pression anthropique n'a pas cessé de modifier les caractéristiques physicochimiques des eaux de cet aquifère fragile. Les mesures des éléments anthropiques sur les points d'eaux présentent des valeurs critiques mettant ainsi en danger la santé des populations. L'interprétation des variogrammes des paramètres anthropiques de l'eau permet de montrer que l'origine de cette pollution est l'activité agricole. Cette dernière, activité agricole, a vu une évolution importante dans notre zone d'étude. Cependant les investigations de terrain et les entretiens menés avec les différents acteurs impliqués dans la gestion des ressources en eau, ont montré la persistance de grosses difficultés dans la mise en œuvre des actions de sauvegarde préconisée.

Ces eaux sont contrôlées qualitativement et quantitativement aux niveaux des principales émergences. Cette nappe souffre actuellement d'une dégradation notable, qui est engendrée par la surexploitation des eaux et l'utilisation abusive des engrais agricoles. La mise en protection de cette ressource devrait passer par l'évaluation des zones vulnérables et l'installation des périmètres de protections (Jean-Joel. Gril, N. Carluer et G. Le Hénaff., 2011 Mangin A.,1973 ; S. Fass et J.-C. Block., 2014).

#### **4.1. Ressources économiques**

Les Monts de Saïda présentent des potentialités économiques relativement importantes, basées essentiellement sur l'agriculture et l'élevage.

**Le pastoralisme** tient une place privilégiée. L'évolution des têtes du cheptel a montré une progression relativement importante entre l'année 1997 et 2014 où le nombre de tête a passé de 615060 à 866090 (Tableau. 21). Et une couverture végétale agricole qui atteindra environ 136517 ha.

**Le secteur agricole** (Durant la période 2001- 2005) a enregistré une nette croissance de la plantation d'arbres fruitiers, passant de 3276 ha en 2001 à 9500 ha en 2005. Par contre, une nette régression a été constatée pour la superficie occupée par les céréales, passant de 127030 ha en 2001 à 105000 ha en 2005. Selon les services agricoles des budgets relativement importants ont été débloqués pour le financement des différents programmes de développement agricoles. (Tableau. 22). Le secteur industriel est représenté par quelques entreprises à effets polluants relativement faibles.

**L'industrie** : vue la vocation agro-pastorale de la région des Monts de Saïda, l'espace industriel est relativement réduit. Le secteur industriel est représenté par quelques entreprises à effets polluants relativement faibles. A savoir : la cimenterie- plâtrerie (à El-Hassasna au sud), deux briqueteries (Sidi Aïssa), des industries agroalimentaires dans la zone industrielle de Saïda (laiterie, eau minérale, semoule, moulins) ainsi que des industries diverses (textile à Rebahia et sac en papier à Ain El Hadjar)

**Tableau 21: Evolution du cheptel (DSA ; Direction des Services agricole)**

Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	2000
Totale de tête	811341	788019	726200	703600	761700	610100	615060	443570
Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Totale de tête	355035	420540	443202	620216	591220	656920	622113	507120
Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	/	/
Totale de tête	677148	704178	722494	749933	892972	866090	/	/

**Tableau 22: Evolution des surfaces agricoles durant la période : 2000-2015 (DSA)**

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Surface Total	132946	128806	121513	116599	120848,6	124153,6	122371,1	122673,1
Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Surface Total	109277,5	128722,5	129655,5	130650,5	131821,5	133582	135137	130453

## 5. Pollution agricole :

Les principales cultures présentes dans la région sont représentées par les céréales (blé, orge) avec une surface d'environ 57423,50 ha, les cultures maraîchères avec une surface qui s'approche de 3686,5 ha, et les vergers avec une surface d'environ 136517 ha. Par conséquent, les divers produits utilisés (phosphates, azote et potasse et produits phytosanitaires) pour l'augmentation du rendement agricole, qualitatif et quantitatif, entraînent des risques de pollutions importantes pour les eaux souterraines. Les engrais utilisés pour l'amendement des sols sont facilement infiltrés vers la nappe, d'où le risque de contamination de ces eaux. Les principaux engrais utilisés dans cette région sont : l'ammonitrate 33% ( $\text{NH}_4^+ \text{NO}_3^-$ ), le sulfate de potasse et le nitrate de calcium  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ . (Tableau. 23)

**Tableau 23: Utilisation des engrais par type de spéculation dominante en quintaux (DSA, 2005)**

Engrais	La culture				Total (Quintal)
	Arboriculture	Viticulture	Céréaliculture	Maraîchage	
<b>Azote (Q)</b>	<b>6608</b>	<b>553</b>	<b>81500</b>	<b>1764</b>	<b>90425</b>
<b>Phosphore (Q)</b>	<b>3304</b>	<b>474</b>	<b>48900</b>	<b>1372</b>	<b>54050</b>
<b>Potassium (Q)</b>	<b>3304</b>	<b>316</b>	<b>48900</b>	<b>1372</b>	<b>53892</b>

Les faciès des eaux des Monts de Saïda sont dans l'ensemble bicarbonaté calcique à magnésien, avec une tendance vers le pôle nitraté, sulfaté et chloruré. Cette tendance liée à la pollution anthropique agricole. Le suivi temporel des éléments anthropiques a montré des teneurs relativement élevées à savoir : les sulfates (173 mg/l), les nitrates (58 mg/l) et les chlorures (123 mg/l).

Les nitrates proviennent généralement de la minéralisation des déchets organiques [Schenck, 1991] et d'engrais chimiques. En effet la matière organique est minéralisée à partir de l'oxydation biologique de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en  $\text{NO}_3^-$  (Canter, 1997).

- $\text{NH}_4^+ + 3/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_2^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$  (par les bactéries de la famille de Nitrosomonas)
- $\text{NO}_2^- + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{NO}_3^-$  (par la famille de Nitrobacter).

La comparaison des mesures des éléments physico-chimique (Tableau 24) avec les normes usuelles (OMS, 1986) montre que les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  (max = 58 mg/l) et  $\text{NO}_2^-$  (max = 0,2 mg/l) sont supérieures aux normes admissibles, alors que les conductivités électriques (max = 993) présentent des valeurs supérieures aux normes acceptables

**Tableau 24: Norme de potabilité chimique des ions majeurs (mg/l)**

Paramètres	Valeurs usuelles		Valeurs dans la nappe des Monts de Saïda		
	Admis	Accep	Moy	Min	Max
Cond ( $\mu\text{s cm}^{-1}$ )	2000	400	757,5	551	993
T (°c)	25	15	19,2	14	23
pH	9,5	6,5	7,3	7.6	8,1
$\text{Ca}^{2+}$	100	-	66,9	33	104
$\text{Mg}^{2+}$	50	30	51	31	76
$\text{Na}^+$	100	<20	28,8	12	58
$\text{K}^+$	12	<10	1,7	1	5
$\text{SO}_4^{2-}$	400	200	54,4	12	173
$\text{Cl}^-$	600	250	54,2	27	123
$\text{HCO}_3^+$	-	-	342,3	176	444
$\text{NO}_3^-$	50	45	32,9	15	58
$\text{NO}_2^-$	0,1	0	0	0	0,2

Admis : Admissibles ; Accep : Acceptables ; Moy : Concentrations Moyennes ;  
Min : Minimales ; Max ; Maximale

### 5.1. La pollution nitratée

De nombreux auteurs ont étudié le problème de nitrate avec une attention particulière à son origine et le comportement dans les eaux souterraine [J.-F. Didon-Lescot et al., 1998 ; Y. Guglielmi et al., 1994; B. Louche et al., 1998]. En 1997 Djidi a utilisé, les mesures de chimie des eaux acquise pour la nappe de Saïda, dans ces interprétations sur le double rôle que joue l'eau en traversant un aquifère (rôle d'agent chimique et de transport).

L'évolution des teneurs en  $\text{NO}_3^-$  ont subit une augmentation concomitante avec la progressions de l'activité agricole et animale. Pour l'année 2004, les teneurs nitrates a atteins 22,5 mg/l, durant cette année la surface agricole est évaluée à : 120599 ha et le cheptel était de l'ordre de : 620216 têtes. Vers l'année 2014, les teneurs est passée à 62 mg/l. Cette augmentation est en relation avec l'augmentation de l'espace agricole (135000 ha) et l'évolution

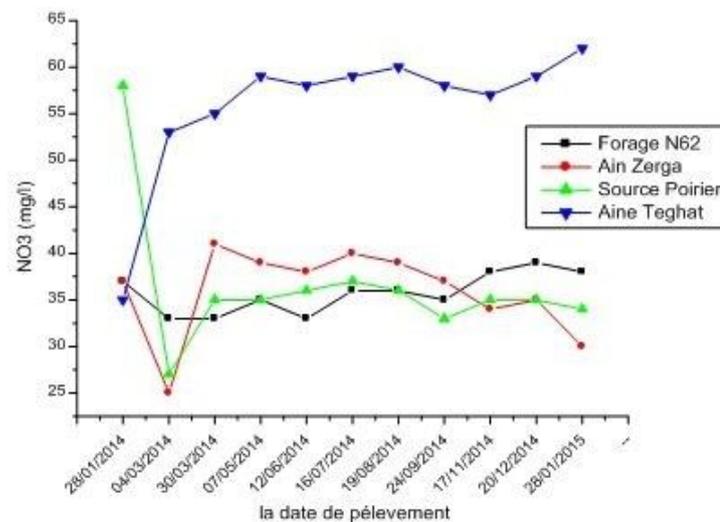
du cheptel (866090 têtes). (Tableau. 25).

**Tableau 25: Variation des nitrates des eaux karstiques des Monts de Saïda**

Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat	Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat
24/08/04	21	24	/	/	04/03/2014	33	25	27	53
21/12/04	21	24	/	/	30/03/2014	33	41	35	55
21/03/05	15	22	/	/	07/05/2014	35	39	35	59
20/06/05	20	21	/	/	12/06/2014	33	38	36	58
25/09/05	26	25	/	/	16/07/2014	36	40	37	59
18/12/05	20	30	/	/	19/08/2014	36	39	36	60
19/03/06	25	16	/	/	24/09/2014	35	37	33	58
20/06/06	25	41	/	/	17/11/2014	38	34	35	57
31/10/06	23	38	/	/	20/12/2014	39	35	35	59
26/12/06	30	32	/	/	28/01/2015	38	30	34	62
20/02/07	26	29	/	/	04/03/2014	33	25	27	53
28/01/14	37	37	58	35	30/03/2014	33	41	35	55

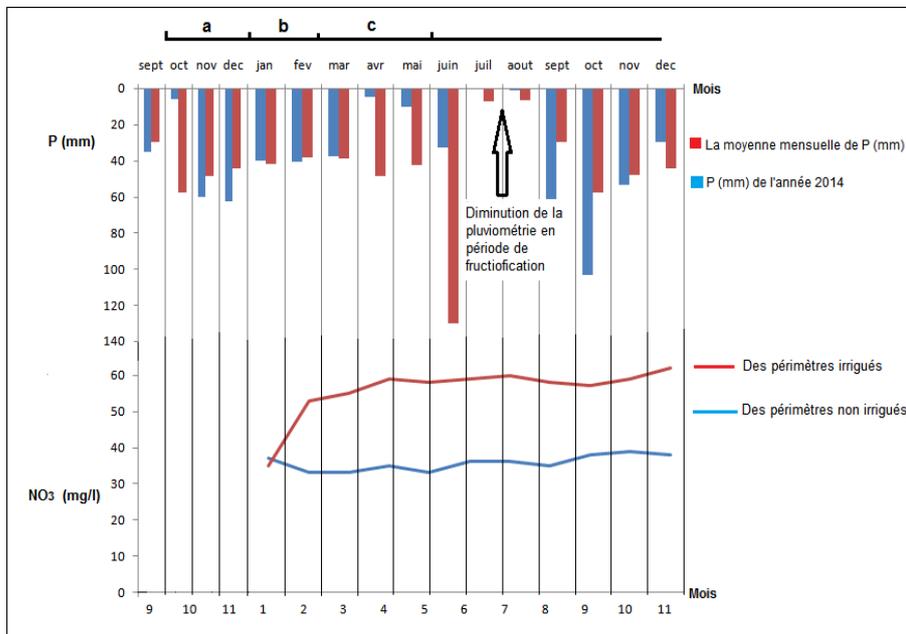
### 521. L'influence de l'irrigation

Dans notre zone d'étude où le climat est semi-aride, La variation de l'activité agricole est influencée par la pluviométrie. La moyenne des teneurs en nitrates dans les périmètres irrigués a atteint une valeur importante qui s'approche de 56 mg/l en 2014, par contre dans les périmètres non irrigués la moyenne a atteint 36 mg/l (Figure. 85)



**Figure 85: la variation de la teneur en Nitrate (2014)**

Cette évolution de la concentration en nitrate suggère que la pollution de la nappe est un phénomène relativement récent. La moyenne des nitrates du 2004 au 2007 était de 25,2 mg/l puis elle a augmenté en 2014 d'une moyenne de 41mg/l. Le taux d'augmentation des nitrates du 2007 au 2014 est de l'ordre de 2,14 mg/l par an.



**Figure 86: La variation des teneurs en Nitrate en fonction de la pluviométrie (2014)**

Cette pollution est due à une source de contamination beaucoup plus importante que les teneurs en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> des pluies qui rechargent la nappe et qui sont de l'ordre de 1 mg/l (Travi et al. 1987). Et puisque notre zone d'étude a un climat semi aride où le taux de pluviométrie est faible, alors le nitrate (qui est de source pluvial) est négligeable.

Les teneurs des nitrates des eaux d'Ain Teghat en 2014 ont atteint la valeur de 62 mg/l, où la région de cette source est occupée par des périmètres irriguées. L'irrigation par submersion est le système le plus généralisé dans cette région. (Figure. 86)

La pollution nitraté peut être responsable de plusieurs pathologies chez les animaux et chez les humains (Olson et al., 1972 ; Blood et Henderson,1971 ; Davison et al., 1964, 1965 ; Bennet et al.,1968) avec notamment la méthémoglobinémie chez les bébés et le cancer chez les adultes (Colmy, 1945 ; Lijinski et Epstein, 1970).

### 522. L'origine des teneurs en nitrates

En remarquant le (Tableau. 26) ci-dessus on trouve que :

En 1992, les valeurs de la teneur en nitrate varient entre 5 et 8 mg/l (d'après l'Agence National des Ressource Hydraulique) avec une présence du nombre de cheptel important qui est de 788019 têtes et une culture agricole faible.

A partir de l'an 2000, qui est la période de la subvention étatique pour le développement agricole, les teneurs en nitrate ont augmenté à des valeurs importante qui sont de l'ordre de 22.5 mg/l en 2004, 28.8 mg/l en 2006 jusqu'à 41mg/l en 2014 avec une évolution importante de la surface agricole, par contre les nombres des cheptels restent proche des nombres de cheptel des années 90.

**Tableau 26: la variation des teneurs en nitrate avec le taux de cheptel et la surface**

Dates	Période de la subvention étatique de développement Agricole										
	1992	1993	1994	2000	2001	2004	2005	2006	2007	2014	2015
NO <sub>3</sub> (mg/l)	5-8	/	/	/	/	22.5	22.4	28.8	27.5	41.02	41
Cheptel (Tête)	788019	726200	703600	443570	355035	620216	591220	656920	622113	866090	/
Surface agricole (ha)	Une culture agricole faible			Début de l'agriculture subvention- née		120848	124153	122673	122673	135137	130453

Pour préciser la quelle des activités agricole (la culture agricole ou l'élevage) a la plus grande influence sur l'augmentation de la teneur en nitrates. En faisant une comparaison entre les années 1992 et 2014, on remarque que :

- Dans ces deux années, les nombres de cheptel sont proche (788019 et 866090 tête).
- la surface de la culture agricole est faible en 1992 mais elle est importante en 2014 avec une valeur qui atteint 135137 ha.
- la concentration en nitrate de l'année 1992 varie entre 5 et 8 mg/l par contre en 2014 la moyenne a atteint 41mg/l.

On conclue que, dans notre zone d'étude, l'influence de la culture agricole sur l'augmentation de la teneur de nitrate dans la nappe karstique est plus grande que l'influence de l'élevage.

## **52. La pollution sulfatée :**

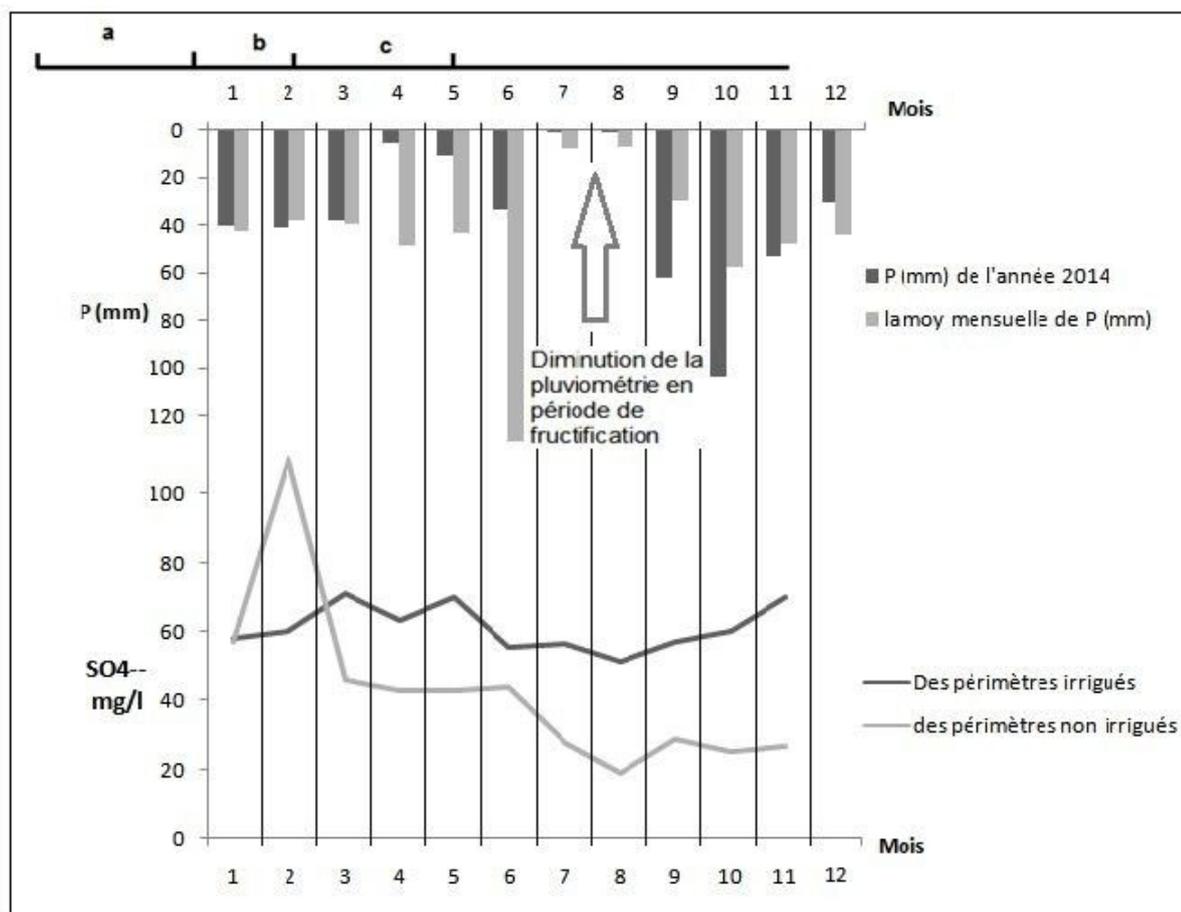
Les valeurs des teneurs on sulfate montrent que la presque totalité de la nappe est contaminée par les sulfates. (Tableau. 27) et (Figure. 87)

**Tableau 27: Variation des sulfates des eaux karstiques des Monts de Saïda**

Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat	Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat
24/08/04	72	68	/	/	04/03/2014	33	25	27	53
21/12/04	72	12	/	/	30/03/2014	33	41	35	55
21/03/05	96	76	/	/	07/05/2014	35	39	35	59
20/06/05	75	72	/	/	12/06/2014	33	38	36	58
25/09/05	173	62	/	/	16/07/2014	36	40	37	59
18/12/05	67	93	/	/	19/08/2014	36	39	36	60
19/03/06	12	66	/	/	24/09/2014	35	37	33	58
20/06/06	35	50	/	/	17/11/2014	38	34	35	57
31/10/06	90	55	/	/	20/12/2014	39	35	35	59
26/12/06	89	50	/	/	28/01/2015	38	30	34	62
20/02/07	144	46	/	/	04/03/2014	33	25	27	53
28/01/14	31	27	57	58	30/03/2014	33	41	35	55

Les sulfates proviennent généralement des produits phytosanitaires. L'utilisation du soufre pour la protection des vignes contre le mildiou. Les scories potassiques et certains phosphates utilisés comme engrais peuvent générer des sulfates en quantités relativement élevées. La moyenne des concentrations de cet élément durant les années 2004-2007 a atteint des teneurs relativement importantes (84,1 mg/l). En 2014 les concentrations en sulfate sont diminuées à moitié (43 mg/l).

Cette abaissement pourrait s'expliquer par la réduction de l'activité agricole durant l'année 2014 qui est du à la faible pluviométrie, notamment pour les mois de Mars (5 mm) et Avril (10 mm) qui est la période de fructification de la plante. Toutefois, les teneurs en sulfates à travers les zones irriguées (Aïn Teghat) ont resté élever (71 mg/l).



**Figure 87: La variation des sulfates en fonction de la pluviométrie (2014)**

a= période d'ensemencement. b= période de l'épandage de nitrate et engrais organique.

c= période de traitement phytosanitaire en période de fructification de la plante.

### 53. La pollution chlorurée

L'utilisation abusive des produits phytosanitaires dans le domaine de l'agriculture à engendré durant ces dernières années une grave pollution des eaux souterraines. Durant la période 2004-2006, les teneurs en chlorure montrent des valeurs relativement élevées (123 mg/l et 90 mg/l), ces concentration ont subit un abaissement durant l'année 2014 (85 mg/l et 62 mg/l) (Tableau. 28).

Comme pour le comportement des sulfates, les teneurs en chlorures ont subit les mêmes variations qui sont liées à l'intensité des activités agricoles expliquées précédemment.

**Tableau 28: Variation des chlorures des eaux karstiques des Monts de Saïda**

Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat	Date	Forage N62	Ain Zerga	Source Poirier	Ain Teghat
24/08/04	72	79	/	/	04/03/2014	53	30	83	65
21/12/04	74	77	/	/	30/03/2014	48	53	36	77
21/03/05	68	45	/	/	07/05/2014	49	49	28	77
20/06/05	90	71	/	/	12/06/2014	55	48	34	68
25/09/05	62	50	/	/	16/07/2014	54	46	39	85
18/12/05	82	45	/	/	19/08/2014	54	54	31	77
19/03/06	68	55	/	/	24/09/2014	68	48	27	68
20/06/06	68	55	/	/	17/11/2014	55	48	34	75
31/10/06	67	54	/	/	20/12/2014	62	48	34	68
26/12/06	123	48	/	/	28/01/2015	55	48	34	89
20/02/07	82	48	/	/	04/03/2014	53	30	83	65
28/01/14	44	32	70	44	30/03/2014	48	53	36	77

## 6. Commentaire

La répartition spatiale de la pollution relative au  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2+}$  et  $\text{Cl}^-$  est étroitement liée à l'activité agricole dans les périmètres irrigués. Les facteurs climatiques ont une relative influence sur le comportement des engrais appliqués à la surface du sol. D'autre part, l'intensité et la distribution des précipitations vont moduler la quantité d'eau disponible pour l'entraînement des composés dissous au travers de la zone karstique.

## 7. Recommandations

L'utilisation abusive des engrais dans les zones identifiées comme vulnérables, telle que notre zone (où les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines destinées à l'alimentation en eau potable dépassent 50 mg/l ou menacent de l'être). Les règles qui s'appuient sur des lois réglementaires pour minimiser cette menace sont :

- l'utilisation excessive d'engrais augmente les frais de dépense sur l'agriculteur d'une part et augmentent la teneur en nitrates dans la nappe d'autre part. En Réduisant le taux de dosage d'engrais par hectare on diminue les frais de dépense et les teneurs en nitrates ;
- Création de fermes pilotes dirigés par des ingénieurs et l'université pour les utilisés comme référence par les agriculteurs ;

- La couverture permanente des sols est plus efficace sur l'abaissement de nitrates, par :
  - \* des végétaux qui ne demandent plus d'engrais
  - \* ou des végétaux qui demandent moins d'engrais
  - \* ou par des résidus de culture.

## **8. Conclusion**

Les impacts anthropiques engendrés principalement par les activités agricoles sont de plus en plus lourds et représentant le facteur essentiel de la dégradation des eaux de l'aquifère karstique.

Une pollution anthropique relativement évoluée a été mise en évidence par les résultats des analyses hydrochimiques représentées par les éléments : nitrate, sulfates et chlorures.

Les ordres de grandeur des teneurs sont : NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (60 mg/l), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (173 mg/l) et Cl<sup>-</sup> (123 mg/l).

Les engrais et les produits phytosanitaires utilisés dans l'agriculture dans les périmètres irrigués représentent la principale source de pollution des eaux souterraines.

## **Conclusion générale**

## **Conclusion**

Cette étude à la fois hydrogéologique et hydrochimique avait pour but de comprendre le fonctionnement de la nappe karstique des Monts de Saïda. A l'issue de ce travail, il convient de regrouper nos principaux résultats afin de faire apparaître une vision globale du fonctionnement de ce système.

L'objectif de ce travail était d'abord d'améliorer les connaissances sur les ressources en eau et le fonctionnement du karst des Monts de Saïda. L'intérêt des résultats obtenus a permis de situer dans un cadre plus général correspondant aux systèmes karstiques évoluant dans un contexte climatique et tectonique spécifique de la région. Malgré leur situation en milieu semi-aride, les sources karstiques de Saïda, plus particulièrement Ain Zerga, Poirier, Ain Teghat, Source Ronde et le Forage N62, présentent des débits relativement élevés avec des réserves importantes.

Les Monts de Saïda présentent un grand intérêt économique, comme en témoignent les sources et les forages profonds.

Le socle paléozoïque de Saïda est bordé par les formations jurassiques et crétacées des monts de Daïa à l'Ouest, de Frenda à l'Est et de Saïda au Nord

Les aquifères karstiques des Monts de Saïda susceptibles de présenter une grande capacité de stockage autorisant une gestion active de leurs ressources destinées à alimenter en des populations importantes et particulièrement dans les zones à ressources limitées et à fortes demandes en eau.

Une grande capacité de stockage et un temps de résidence des eaux longues peuvent permettre la régulation du débit à une échelle multi-annuelle, en prenant en compte les variations climatiques interannuelles. Par le fait de la présence de structures karstiques, le stockage peut être facilement restauré pendant la période de recharge. Les aquifères karstiques possédant des capacités de stockage importantes sont les plus convenables si les caractéristiques des aquifères et l'extension du système karstique sont bien connus, et si les agences gérant les ressources en eau ont à leur disposition une base de données bien fournie sur les prélèvements.

Le traitement hydrodynamique a mis en évidence une nouvelle catégorie de systèmes karstiques qui ne sont pas pris en compte dans la classification de Mangin. Cette catégorie correspond aux systèmes karstiques possédant de grandes réserves et des structures de drainage complexes responsables de temps de résidences très longs, pluriannuels, voir séculaires.

Dans ce but, nous recommandons d'élargir l'étude faite sur les systèmes karstiques des Monts de Saïda par les axes suivants :

- Actualiser le réseau de mesures des pluies et des débits afin de faire des analyses de données actuelles fiables.
- Mettre en place un plan de gestion des eaux pour contrôler les prélèvements et gérer les périodes de pénurie en eau.
- Installer des stations de mesures en altitude pour concrétiser le rôle de la neige dans la recharge de ces aquifères. Les mesures de la neige peuvent être introduites dans des modèles pour pouvoir étudier l'impact d'un changement climatique sur la ressource en eau.
- Faire des études géophysique afin d'obtenir plus d'informations sur la profondeur de la karstification.

Le problème de la pollution des eaux souterraines par les activités domestiques et agricoles n'a pas été envisagé dans cette étude. Mais le suivi chimique des émergences a mis en évidence des contaminations de l'aquifère karstique liées aux activités humaines (agriculture, eaux usées des agglomérations, troupeaux). Dans ce but, l'étude détaillée de la vulnérabilité de ces aquifères permettra de proposer des dispositifs de protection de cette ressource importante. La pollution anthropique sur le karst, la fertilisation des sols sans contrôle ainsi que l'absence de toutes structures d'assainissement sera un facteur limitant de l'exploitation de cette ressource karstique essentielle pour le développement régional.

Les différents indicateurs de temps de séjour montrent donc la présence d'eaux anciennes dans le système. Cependant, il faut garder à l'esprit la taille importante du bassin versant des Monts de Saïda,

- Les entrées :

Les pluies constituent l'entrée principale du système,

- Les sorties :

L'exutoire de l'aquifère est complexe et plusieurs composantes peuvent être identifiées.

Il est en effet nécessaire de tenir compte du fonctionnement passé de l'aquifère,

Un drainage superficiel de la partie libre est assuré par les cours d'eau de l'oued Saïda.

Un drainage superficiel est également réalisé par des sources de débordement. La baisse de niveau piézométrique limite de nos jours ce phénomène. Comme exemple : Au Nord, la faille menant en contact des dolomies avec les argiles du Callovo-oxfordien, où une remontée du plan d'eau donnant naissance à d'autres sources.

– La base de l'oued Saïda constitue un autre exutoire possible pour les eaux. Celle-ci est essentiellement constituée de dépôts de type conglomératique dont le rôle sur le drainage profond de l'aquifère ne peut être négligé.

– Enfin, l'exutoire le plus évident à l'heure actuelle est constitué par les pompages agricoles responsables de la baisse du niveau piézométrique. Ces pompages sont répartis sur la presque totalité du bassin avec une concentration particulièrement importante de forages à fort débit dans les environs de la ville de Saïda.

- Menaces sur la ressource

Cette étude a également mis en évidence la vulnérabilité du système karstique. Les zones d'alimentation de l'aquifère montrent de forts indices de contamination avec de fortes teneurs en nitrates, sulfates et potassium. Ces marqueurs de contamination sont liés aux pratiques agricoles, et ne constituent que les indices les plus évidents d'une contamination insidieuse par tout un cortège de produits phytosanitaires dans la région de Saïda. L'absence de couverture argileuse imperméable dans ce secteur rend les horizons superficiels très sensibles à ces flux de polluants.

La zone sous couverture des cultures agricoles semble réunir les conditions physico-chimiques favorables à la dénitrification et possède ainsi une certaine capacité d'auto-épuration. Une trop grande pression agricole induisant des prélèvements importants dans cette zone risquerait de rompre cet équilibre.

Une meilleure gestion de la ressource en eau semble ainsi urgente à envisager, car il semble difficile de continuer à irriguer la vigne avec des eaux à long temps de séjour indemnes d'influence anthropique, et de réserver la nappe karstique pour l'alimentation en eau potable. Les eaux Bajo-Bathonien devraient faire l'objet d'une gestion patrimoniale d'intérêt stratégique étant donné leur parfait confinement. Si ces conditions ne sont pas mises en place rapidement, la pérennité et surtout la qualité de la ressource ne sera plus assurée.

- Perspectives

D'un point de vue qualitatif, cette étude a permis d'identifier toutes les entrées et sorties du système. Elle a aussi permis de proposer un schéma de fonctionnement de l'aquifère qui puisse rendre compte de la composition chimique des eaux.

Néanmoins, la quantification de tous les phénomènes mis en évidence est difficile car, soit l'information n'existe pas (débits des cours d'eaux, drainage par la base de l'oued Saïda, contribution des reliefs périphériques), soit elle n'est que peu fiable (débits prélevés pour l'irrigation). Ceci rend une estimation du bilan du bassin difficile ; celle-ci pourra être améliorée par la confrontation des données géochimiques et isotopiques avec une modélisation mathématique des écoulements. Il sera également nécessaire de tenir compte des changements climatiques enregistrés dans la zone d'étude (modélisation de l'impact des fluctuations climatiques sur la recharge de l'aquifère). La mise en place d'un réseau de surveillance piézométrique mais aussi chimique des eaux doit aussi être envisagée.

## **Références bibliographiques**

- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 1973.** Système d'Information National (*National Information System*). Journal de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques en Algérie, 6,22-45.
- Andrieux.C et M. Baka lowicz :** le système karstique du Baget (Ariège). Les éléments du climat. Ann. Spéléol., 29, 3, p 267-282. 1974
- Anonyme .1982,** Etude isotopique et-hydrochimique des eaux souterraines de la région de Tlemcen et Saida. Publ. Sèrv. Géol. Algérie (nouvelle série) Bull n°34.
- Appelo, C.** "Contamination of Groundwaters." Applied Geochemistry, vol. 11, no. 3, May 1996, pp. 491–491.
- Atteia, O. 2005.** Chimie et pollution des eaux souterraines. Lavoisier. Paris. 398 p.
- Atrops, François, and Michel Benest.** 1984: "Les Formations Du Jurassique Supérieur Du Bou Rheddou Au Nord de Tiaret (Bordure Sud-Tellienne, Algérie): Âge et Milieux de Dépôt." Geobios, vol. 17, no. 2, Jan. pp. 207–219.
- Auclair. D et Biehlerj, 1967 :** Etude géologique des hautes plaines Oranaises
- Augier C.** 1967. Quelques éléments essentiels de la couverture sédimentaire des Hauts Plateaux. Publication du Service Géologique de l'Algérie, 34 : 47-80.
- Azzaz. H.** 2008: caractérisation du fonctionnement des systèmes karstiques des Monts de Tlemcen par les méthodes hydrochimiques et isotopiques application à la vulnérabilité. Thèse de doctorat Université des Sciences et de Technologie d'Oran.
- Bakalowicz, M.,** 1979. Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de sa karstification, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Paris VI, 269 p.
- Bakalowicz, M., Mangin, A.,** 1980. L'aquifère karstique. Sa définition, ses caractéristiques et son identification. Mém. h. sér. Soc. géol. France, 11, pp 71-79.
- Bakalowicz, M.,** 1996. Les processus de karstification et les différents types de karst associés. Mém. Soc. géol. France, 169, pp 363-371.
- Bakalowicz, M., Plagnes, V.,** 1998. La protection des ressources en eau souterraine en région karstique. Eléments de réflexion pour une politique d'aménagement raisonné. Hydrogéologie,(4), p 23- 27.
- Bakalowicz, M., Aunay, B., Le Strat, P., Dörfliger, N., Fleury, P., 2003.** Karst development potential and base level changes in Mediterranean regions : a unique reference model, International Conference on karst Hydrology and Ecosystems, Bowling Green, Kentucky.
- Bakalowicz, M., Fleury, P., Dörfliger, N., Seidel, J.L.,** 2003. Coastal karst aquifers in Mediterranean regions. 1. A valuable ground water resource in complex aquifers. Proceedings TIAC'03 conference, Alicante, IGME.

- Bakalowicz, M.**, 2004. Comments on "Carbon isotope exchange rate of DIC in karst groundwater by R. Gonfiantini and G.M. Zuppi". *Chemical Geology*, 204 (1-2): 183-185.
- Bakalowicz, M.**, 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13 (1): 148-160.
- Bakalowicz, M., Hachache, A.**, à paraître. Main characteristics of carbonate aquifers and groundwater resources in Lebanon as shown by environmental isotopes and water geochemistry. Soumis à *Journal of Hydrology*
- Ballesio, R.** 1972. Etude stratigraphique du Pliocène rhodanien. Thèse de doctorat Lyon I 315p
- Barbecot, Florent, et al.** 2000: "Hydrochemical and Isotopic Characterisation of the Bathonian and Bajocian Coastal Aquifer of the Caen Area (Northern France)." *Applied Geochemistry*, vol. 15, no. 6, July, pp. 791–805.
- Banton, O, M. Laroque, M. Cormier,** 1995. Modélisation du transport des nitrates dans la zone non saturée pour l'évaluation de la contamination des eaux souterraines, *Hydrogéologie* 4 (1995) 23–30.
- Barrat, A. et Y. Gouisset** 1988. Etude hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné, évaluation de l'alimentation de la nappe. BRGM 14 p.
- Barrat, A. et Y. Gouisset** 1988. Etude hydrogéologique de la molasse miocène Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné, Synthèse finale orientations pour l'exploitation. BRGM 46 p.
- Batiot, C.** 2002. Etude expérimentale du cycle du carbone en régions karstiques. Apport du carbone organique et du carbone minéral à la connaissance hydrogéologique des systèmes. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse 247 p.
- Benderitter, Yves, Bernard Roy, and Alain Tabbagh.** 1993 "Flow Characterization through Heat Transfer Evidence in a Carbonate Fractured Medium: First Approach." *Water Resources Research* 29, no. 11, 3741–47.
- Benmansour, R.**, 1993: Contribution à l'étude hydrogéologique des massifs calcaires des Monts de Saïda, Mémoire d'Ing , Institut d'Agronomie Centre Universitaire de Mascara.
- Bennet, R.C, Seath, D.M, Olds, D,** 1968. Relation ships between nitrate content of forages and dairy herd fertility. *Journal Dairy Sciences* 51, 629.
- Beven, K.J.**, 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16, pp 41-51.
- Bezès, C.**, 1976. Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques ; établissement du modèle Bemmer ; son application à quatre systèmes karstiques du midi de la France. *Sciences de la Terre – Géologie appliquée*. Thèse de doctorat ès Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 135p.

- B. Louche, N. Crampon, P. Bracq**, 1998 Qualité et comportement de l'aquifère crayeux sur le littoral Nord-Pas-de-Calais (*Quality and behavior of the chalky aquifer on the Nord-Pas-de-Calais coast*), C. R. Acad. Sci. Paris, France Ser. Ila 327 (1998) 463–470.
- Blavoux, Bernard, et al.** 1992: "Bilan, Fonctionnement et Protection Du Système Karstique de La Fontaine de Vaucluse (Sud-Est de La France)." *Geodinamica Acta*, vol. 5, no. 3, Jan. pp. 153–172.
- Blavoux, Bernard, et al.** 1992 : "The Karst System of the Fontaine de Vaucluse (Southeastern France)." *Environmental Geology and Water Sciences*, vol. 19, no. 3, May, pp. 215–225.
- Blavoux, B., and J. Mudry.** 1986 : "Influence Des Pluies Estivales Sur La Qualite Des Reserves de l'aquifere Karstique; Role Du Sol et de l'epikarst Dans La Concentration Des Chlorures." *Bulletin de La Société Géologique de France*, vol. II, no. 4, 1 July, pp.
- Blood, D.C, Henderson, J.A, 1971.** *Medicine Veterinaries*, vol I. Paris, Vigot, 1017p.
- Boisson, M., Thierry, D.,** 1991. Logiciel Gardénia. Guide d'utilisation. Rapport BRGM, R 32 209.
- Bouchalaa, A.E.,** 1991. Hydrogéologie d'aquifères karstiques profonds et relations avec le thermalisme : exemple de la partie occidentale du massif du Mouthoumet (Aude, France). Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, 316 p.
- Bouillin, O., Flandrin, J., Forkasiewicz, J., Paloc, H., Poitrinal, D.,** 1973. Contribution à la connaissance hydrodynamique d'un réservoir aquifère calcaire d'après l'exemple fourni par la Fontaine de Vaucluse, 2ème colloque interne sur les eaux souterraines, Palerme (Italie), pp 93-103.
- Box, G.E.P. , Jenkins, G.M., 1974. *Time series analysis : forecasting and control.*, Holden Day, San Francisco, , 575 p.
- Bombart, H. 1990.** Lutte contre la pollution par les nitrates - canton de Bourg-de-Péage (Drôme). Diagnostic des pratiques agricoles. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes 65 p. (rapport).
- BRGM.,** 1962, Méthode d'étude et de recherche des nappes aquifères .Bull., Edit- Dunodq Paris, 120p.
- BRGM 1977.** Recherches sur la géologie profonde - Fosse de Valence (26). Ministère de l'Industrie et de la Recherche 58 p.
- Brouste, Laurent, et al.** 1997 : "Geochemistry and Residence Time Estimation of Groundwater from the Upper Aquifer of the Chihuahua Desert (Comarca Lagunera, Northern Mexico)." *Applied Geochemistry*, vol. 12, no. 6, Nov. pp. 775–786.
- Burdon, D.J., Safadi, C.,** 1964. The karst groundwater of Syria. *Journal of Hydrology*, 2, pp 324-347.

- Buttler, R., Griffiths, H., Spencer, S.,** 1996. Late Cenozoic tectonics of Lebanon-Fault array evolution in a strike-slip regime. Annual meeting of the tectonics studies groupe, University of Bermingham.
- Buttler, R., Griffiths, H., Spencer, S.,** 1997. Tracing Active Faults and Uplift in Continental Transforms: Morpho-tectonics and the continuity of the Dead Sea Transform in Lebanon. European Union of Geoscientists, Biannual Meeting, Strasbourg 1997.
- Buttler, R., Spencer, S, Griffiths, H.,** 1997. Interactions between transtension and transpression in a distributed continental transform : insights from the neotectonics of Lebanon. Continental transpressional and transtensional tectonics, Tectonics studies groupe, Burlington House, p5-6.
- Buttler, R., Spencer, S, Griffiths, H.,** 1997. Transcurrent fault activity on the Dead Sea Transform in Lebanon and its implications for plate tectonics and seismic hazard. Journal Geolical Society London, 154, pp 757-760.
- Buttler, R., Griffiths, H. et al.,** 1998. Seismotectonics and fault zone segmentation: active tectonics of the Dead Sea Transform in Lebanon. Geosciences 98, Keely University.
- Buttler, R., Spencer, S,** 1999. Landscape evolution and the preservation of tectonic landforms along the northern Yammouneh Fault, Labanon. Special publications Geologic Society London, 162, pp 143-156.
- Caballero, Y.,** 2001. Modélisation des écoulements d'origine pluvio-nivo-glaciaire en contexte de haute montagne tropical. Application à la haute vallée du Zongo (Bolivie). These de Doctorat, Université Montpellier 2.
- Cadilhac, L., V. Réthoré, R. de La Vaissière, B. Blavoux et G. Faure,** 2005. Contamination des eaux souterraines par les pesticides sur le bassin du Rhône et des cours d'eau côtiers méditerranéens. Perspectives dans le nouveau cadre imposé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau. L'eau souterraine et les produits phytosanitaires. (coll./conf.), Orléans, CFH-AIH, p. 9.
- Caille, F., Pagès, JP.,** 1976. Introduction à l'analyse des données. Smash edition, 616 p.
- Castany, G.,** 1967. Traité pratique des eaux souterraines. Paris, Dunod.
- Canter, L.W,** 1997. Nitrates in groundwater. Ed. Lewis Publishers, 263p
- Castany.G,** 1967, Traité pratique des eaux souterraines .Edit Dunod.
- Castany .G,** 1968, Prospection et exploitation des eaux souterraines. Edit Dunod ,325pp.
- Castany.G.,** 1982, Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edit Dunod.
- Castany, G.** 1998. Hydrogéologie: principes et méthodes. Dunod. Paris. 238 p.
- Castro, M. C. et P. Goblet,** 2005. *Calculation of Ground Water Age - A Comparative Analysis.* Ground Water 43 (3) p. 368-380.

- Clair.A.**, 1949, Etude hydrogéologique du Chott-Echergui.
- Clair, A.**, 1952. Etude Hydrogéologique des Monts De Saida (*Hydrogeological study of the Saida Mountains*). Paris: Presse Universitaire France.
- Clair.A.**, 1959 Etude hydrogéologique des Monts de Saida. XIX Congrès International de géologie, Alger.
- Clair.A.**, 1960, Etude hydrogéologique d'Ain tiant soltane (Saida) ,Rapport S.E.S.
- Colmy, H.**, 1945. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water. Journal American Medical Association 129,112.
- Collignon.B.**, 1985, Interprétation des essais de pompage dans les aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. Communication in Forage hydraulique Journées techniques Tipaza 18/19-11-1985.
- Collignon.B.**, 1985, Le forage hydraulique dans les roches calcaires très karstifiées. Etude des difficultés rencontrées et des solutions adoptées lors des travaux dans les Monts de Tlemcen. Communication in Forage hydraulique
- Cormary, Y., Guilbot, A.**, 1971. Ajustement et réglage des modèles déterministes. Méthode de calage des paramètres. La Houille Blanche, 2, pp 131-140.
- Cosandy, C., Robinson, M.**, 2000. Hydrologie continentale, édition Armand Colin, 360 p.
- CPGF**, 1980. Etude géochimique de la nappe du Miocène du Bas-Dauphiné - 1 ère phase. SRAE 9 p. (rapport).
- CPGF**, 1982. Etude des concentrations en nitrates dans la plaine de Valence (Drôme) 1 ère partie. SRAE, DDAF 27 p. (rapport).
- Crowther J.**, 1989: Groundwater chemistry and cation budgets of tropical karst outcrops, Peninsular Malaysia, I. Calcium and magnesium. J. Hydrol., 107 ; 169-192.
- Daeron, M., Benedetti, L. et al.**, 2004. Constraints on the post 25-ka slip rate of the Yammouneh fault (Lebanon) using in situ cosmogenic <sup>36</sup>Cl dating of offset limestone-clast fans. Earth and Planetary Science Letters, 227, pp 105-119.
- Daeron, M.**, 2005. Rôle cinématique et comportement sismique à long terme de la faille de Yammouneh. Thèse de Doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris, 178 p.
- Dasarathi, N.** 1965. Etude géologique de la bordure occidentale du Vercors. Thèse de doctorat Université de Grenoble 85 p. Journées techniques Tipaza 18/19-11-1985.
- Davison, K.L, Hansel, W, Grook, L, McEntee, K, Wright, M.J**, 1964. Nitrate toxicity in dairy heifers. Effects on reproduction, growth, lactation and vitamin A nutrition. Journal Dairy Sciences 47, 1065-1073.

- Davison, K.L, McEntee, K, Wright, M.J**, 1965. Responses in pregnant ewes fed forage containing various level of nitrate. *Journal Dairy Sciences* 48, 969-977.
- Dawdy, D.R., O'Donnel, T**, 1965. Mathematical models of catchment behaviour. *ASCE*, 91 (HY4): pp 123- 137.
- Debrand-Passard, S. et S. Courbouleix**, 1984. Synthèse géologique du Sud-Est de la France - Atlas. BRGM, Orléans.
- Debrand-Passard, S., S. Courbouleix et M.-J. Lienhardt**, 1984. Synthèse géologique du Sud-Est de la France - Stratigraphie et paléogéographie. BRGM, Orléans. 615 p.
- De Bellegarde, B. et J. Lafosse** 1977. La nappe du miocène Nord-Drôme. Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France. (coll./conf.), Nice, DDA de la Drôme, p. 16.
- De Bellegarde, B. et J. Lafosse** 1980. La nappe du Miocène du Nord de la Drôme. SRAE Rhône-alpes, Valence 13 p.
- Decamps.P.**, 1970, Etude hydrogéologique de la région de Saida -Tagrémaret. État des connaissances et des études en cours .Rapport S.E.S.
- Decamps.P.**, 1970, Etude hydrogéologique de la région de Saida -Tagrémaret. État des connaissances et des études en cours .Rapport S.E.S.
- Delay, B., and A. Aminot**. 1974: "Contribution à l'étude de La Matière Organique Disponible Dans Les Milieux Aquatiques Souterrains." *Journal Français d'hydrologie*, no. 14, pp. 35-44, 10.1051/water/.
- Delannoy, J.-J.** 1997. Recherches géomorphologiques sur les massifs du Vercors et de la transversale de Ronda (Andalousie). Les apports morphogénétiques du karst. Thèse de doctorat Grenoble I 678 p.
- Demarcq, G.** 1970. Etude stratigraphique du Miocène rhodanien. Thèse de doctorat faculté des sciences de Paris 257 p.
- De Marsily, G.**, 1978. De l'identification des systèmes hydrogéologiques, Thèse de Doctorat Sciences Naturelles, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Tome 1, 206p
- De La Vaissière, R.** 2003. Hydrogéologie de l'aquifère molassique du Bas-Dauphiné. Bilan année 1. SIE Plaine de Valence 45 p. (rapport).
- De La Vaissière, R.** 2004. Hydrogéologie de l'aquifère molassique du Bas-Dauphiné. Bilan année 2. SIE Plaine de Valence 63 p. (rapport).
- De La Vaissière, R., G. Faure, G. Clauzon et B. Blavoux** 2006. *Impact of the Messinian salinity crisis on the hydrogeology of the Valence plain*. Duran, J.J., Andreo, B. y Carraco, F. Karst, cambio climatico y aguas subterraneas. Publicaciones del IGME. Hidrogeologia y Aguas Subterraneas. (coll./conf.), Madrid, N°18. p. 385-393.

- Dercourt, J.** 1997. Géologie et géodynamique de la France. Dunod. Paris. 320 p.
- Detay, M.,**1997. La gestion active des aquifères. Paris, Masson.
- De Valley, C.D.,** 2004. Mesozoic and Cenozoic paleogeographic maps of the Lebanon Area: An introduction. American University of Beirut.
- Dèzes, P., S. M. Schmid et P. A. Ziegler** 2004. *Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere.* Tectonophysics 389 p. 1-33.
- Dia, A.,** 1993. Cycle des principaux paramètres physico-chimiques de deux rivières libanaises (Oronte et Yahfoufa. Département des Sciences Naturelles, Faculté des Sciences, Université Libanaise, 13 p.
- Diren** 2001. Département de la Drôme - bilan hydrogéologique départemental. DIREN Rhône-alpes 121 p. (rapport).
- Djidi, K ,**1997. Apport des Systemes d'Informations Geographiques a la determination des zones a risques de pollution des ressources en eau (*Contribution of Geographical Information Systems to the determination of areas at risk of pollution of water resources*). Mémoire de maitrise en techniques spatiales, Centre National des Techniques Spatial d'Oran.
- D. Langmuir,** 1965: Stability of carbonates in the système MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O –journal of geology 73, 730-754.
- Drake, John J., and Russell S. Harmon.** 1971 : “Hydrochemical Environments of Carbonate Terrains.” Water Resources Research, vol. 9, no. 4, Aug. 1973, pp. 949–957,
- Drever, J. I.,** 1997. *The geochemistry of natural waters. Surface and groundwater environments.* London. 436 p.
- Droque. C.** 1969 : Contribution à l'étude quantitative des systèmes hydrologiques karstiques, d'après l'exemple de quelques karsts périméditerranéens. Thèse de doctorat. Sc .Nat., Univ. Montpellier, 462p.
- Droque. C :** De l'eau dans les calcaires. Sc. Progrès et découvertes, (Dunod, Paris),3433, 39-46 .
- Duploux, R.,** 1978. *Etude du Miocène du Nord de la Drôme. SRAE-DDAF, Valence 27 p*
- Dumas, D.** 1988. Le paléogène salifère du bassin de Valence. Géométrie et sédimentologie des dépôts. Synthèse de bassin. Thèse de doctorat Lyon 1 - Claude Bernard 293 p.
- Edmunds, W. M., A. H. Bath et D. L. Miles** 1982. *Hydrochemical evolution of the East Midlands Triassic sandstone aquifer, England.* Geochimica et Cosmochimica Acta 46 p. 2069-2081.

- Edmunds, W. M., J. M. Cook, W. G. Darling, D. G. Kinniburgh, A. H. Bath, M. Morgan-Jones et J. N. Andrews** 1987. *Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, UK: a basis for groundwater quality management*. Applied Geochemistry 2 p. 251-274.
- Edmunds, W. M. et P. L. Smedley** 2000. *Residence time indicators in groundwater: the East Midlands Triassic sandstone aquifer*. Applied Geochemistry 15 p. 737-752.
- Elmi, Serge.** 1971: "Les Faunes a Prohctioceras (Oppeliidae, Ammonitina) Du Bathonien Inferieur et Moyen Des Confins Algero-Marocains." Geobios, vol. 4, no. 4, Jan. pp. 243-264,
- Elmi S. & Benest M.** 1978 : Les Argiles de Saïda, faciès flyschöide du Callovo-Oxfordien du sillon tlemcenien (Ouest algérien) ; stratonomie, environnement, interprétation et évolution paléogéographique. In : Livre jubilaire Jaques Flandrin. Documents des Laboratoires de Géologie, Lyon, 4 : 203-262.
- Emblanch, Christophe, et al.** 1998 : "Dissolved Organic Carbon of Infiltration within the Autogenic Karst Hydrosystem." Geophysical Research Letters, vol. 25, no. 9, 1 May, pp. 1459-1462.
- Emblanch, C.** 1997. Les équilibres chimiques et isotopiques du carbone dans les aquifères karstiques: étude en région méditerranéenne de montagne. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des pays de Vaucluse 198 p.
- E. T. Shuster et W. B. White** 1971: Seasonal fluctuation in the chemistry of limestones springs ; a possible means for characteristing carbonate aquifers. J. Hydrol., 1, 93-128, 34 fig., 2 tab.
- F Cailliez, and J -P Pages.** 1976 : Introduction À l'analyse Des Données : Avec Des Contributions de J.C. Amiard, u.A. Paris, Société De Mathematiques Appliquées Et De Sciences Humaines.
- Flammand, G.B.M.,** 1911. Recherches géologiques et géographiques sur les hauts pays de l'Oranie et sur le Sahara (Algérie et Territoire du Sud). Thèse ès Sciences, Université de Lyon, 1003 pp.
- G Bachelier, and France.** 1968 ; Contribution À l'étude de La Minéralisation Du Carbone Des Soils - Sa Mesure En Laboratoire et Sur Le Terrain Sa Nature, Son Dynamisme et Son Intérêt. Paris, France, Orstom.
- G.D. Smith, R. Wetslaar, J.J. Fox, R.H.H. van de Graaf, D. Moeljohardo, J. Sarwono, X. Wiranto, S.R. As'raji, S. Tjojudo, Basuki,** 1999 – The origin and distribution of nitrate in groundwater from village wells in Kotagede, Yogyakarta, Indonesia, Hydrogeol. J. 7

(1999) 576–589.

**G. Marjollet et J. Salado** 1975: Contribution à l'étude de l'aquifère karstique de la source du Lez (Hérault) – Etude du chimisme des eaux de la source de Lez et de son bassin CERGH, 9, 2, 101 p.

**G. Matheron** ; 1965 : Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris, 305 p.

**Guardia P.** 1975 : **Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie Nord occidentale Thèse de doctorat s'état. Université de Nice, 286 p.**

**Haouaia.M.**, 1995, Etude des caractéristiques hydrodynamiques des principales sources de Saïda. Mémoire d'Ing Institut d'Agronomie Centre Universitaire de Mascara.

**Harum et al**, 1992: Long-terme investigations with natural tracers. 6th International Symposium on Water Tracing, Karlsruhe , p 64-77.

**H. Roques** 1964: Contribution à l'étude statistique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate. Ann. Spéléo., 19, 2, p 455-94.

**H Schoeller.** 1962 : Les Eaux Souterraines. Paris, Masson.

**Jean-Marie Bouroche, and Gilbert Saporta.** 1980 :L'analyse Des Données. Paris, Puf,.

**Jeannin.** 1990 :Temperature dans la zone vadose du karst . Bull. n°9, centre d'Hydrogéologie de l'université de Neuchatel, p, 89-102 ,

**Jean-Joel. Gril, N. Carluer et G. Le Hénaff,** 2011. Des zones tampons pour limiter la pollution des eaux par les pesticides dans les bassins versants (*Buffer zones to limit water pollution by pesticides in watersheds*). TSM, Numéro 7/8, Juil-Ao 2011 ; 20 – 32

**J.-F. Didon-Lescot, B. Guillet, F. Lelong,** 1998. Le nitrate des ruisseaux, indicateur de l'état sanitaire et des perturbations de l'écosystème forestier. Exemple du mont Lozère, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 327 (1998) 107–113.

**J.Thraikill ., Robi. T** 1981: Carbonate geochemistry of vadose water recharging limestone aquiferes. In W. Back and R. Lettole (Guest-Editors). Symposium on geochemistry of groundwater- 26th International Geological Congress. J, Hydrol., 54: 195-208.

**Kopić, J, Loborec, J, Nakić. Z.** 2016. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics of a wider area of the regional well field Eastern Slavonia. The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin (Rudarsko-geološko-naftni zbornik), volume, issue, page's range, doi 10.17794

**Lacas. J. C.** 1975 : introduction à la méthodologie d'étude et d'utilisation des champs hydrothermiques des aquifères karstiques. Thèse 3e cycle USTL et CERCH mém, 10 (3)

- Lastennet. R.**, 1994 : Rôle de la zone non saturée dans le fonctionnement des aquifères karstiques ; approche par l'étude physico-chimique et isotopique du signal d'entrée et des exutoires du massif du Ventoux (Vaucluse). Thèses de doctorat ; Université d'Avignon.
- Lefebvre. J.** 1980 : Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles, 2e ed., 259 p. Masson (Paris)
- Lepiller. M.** 1980: Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires, Etudes de quelques systèmes karstiques du massif du Semnose. Et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France). Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble, 478p.
- Lijinski, W, Epstein, S.S**, 1970. Nitrosamines as environmental carcinogens. Nature 21-23.
- Lucas G.** 1942. Description géologique et pétrographique des monts de Ghar Roubane et de Sidi el Abed. Bulletin du Service Géologique. Carte géologique. Alger, 16 : 539 pp.
- Lucas G.** 1952. Bordure nord des Hautes-Plaines dans l'Algérie occidentale – XIXe Congrès International de Géologie, Alger (Monographie Régional., série 1), 21 : 139 pp.
- Maiga. Y.**, 1993, Contribution à l'étude hydroclimatologique du bassin versant de l'oued Saïda. Mémoire d'Ing Institut d'Agronomie Centre Universitaire de Mascara.
- Mangin.A.** 1975 : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstique. Thèse doct. D'Etat. Univ. Dijon, Ann. Spéléol., 29, 285-332, 495-601 ; 30, 21-124.
- Mangin. A.** 1973 : Sur les transferts d'eau au niveau des karstes noyé à partir des travaux sur la source de fontestorbes. Ann. Spéléol., 28, 1, p. 21-40.
- Mangin. A** ; 1973 : Sur la dynamique des transferts en aquifère karstique. Actes 6° Cong. Int. Spéléol., Olomouc, Tchécoslovaque,
- Marjolet G., Salado J.** 1975 : Remarques sur les relations observées entre crues et variations chimiques de l'eau d'une exurgence karstique –In : PUIG, JM. 1987.
- Massaad EL Hakim**, 2005 : Les aquifères karstiques de l'anti-Liban et du nord de la plaine de la Bekaa: caractéristiques, fonctionnement, evolution et modélisation, d'après l'exemple du système karstique Anjar-Chamsine (Liban); Thèse doctorat, De l'université Montpellier II et de l'université Saint Joseph
- Mégnien** 1964 : Observations hydrogéologiques dans le Sud-Est du Bassin du Paris. Mém. BRGM, 25, 288 p.
- Melloule. A** et Collin. M. 1992 : The principal components statistical methode as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application ti the Coastal Plain aquifer of Israel. J.Hydrol., 140 : 49-73.

- M. Ganev, K. Khistchev, J. Kolev, M. Moev**, coupe géologique effectué de 1968 à 1969.  
Service Géologique de l'Algérie
- Midoun. M. 1989.** Etude du Trias d'Oranie (Algérie) et des relations avec le socle polymétamorphique. Implication géodynamiques régionales. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 242 pp
- Miloudi.M.,** 1995, Etude hydrogéologique du bassin versant de l'oued Sidi-Mimoun (Saida)  
Mémoire d'Ing Institut d'Agronomie Centre Universitaire de Mascara.
- Mudry.j et Blavoux. B.** 1986 : Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude de fonctionnement hydrodynamique de trois aquifères karstique du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*, 1 ; 53-59,
- Muet P.** 1985. Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes karstiques du nord du Causse de Martel, Corrèze., Thèse de l'Université d'Orléans, 386 p.
- Olson, J.R, Oehme, F.W, Carneham, D.L.,** 1972. Nitrate level in water and livestock feeds. *Veterinary Proceedings/Small Animal Clinician* 67,257.
- Pitaud.G.,** 1973, Etude hydrogéologique de la région de Sidi Youssef (Saida).
- Pitaud. G,** 1973. Carte géologique des Monts de Saida (*Geological map of the Saida Mountains*). Agence National des Ressources Hydraulique Oran –Algérie.
- Pitaud. G;** 1973. Etude hydrogéologique pour la mise en valeur de la vallée d'oued de Saïda (*Hydrogeological study for the development of the valley of Wadi Saïda*). Paris: Presse Universitaire France.
- Plummer L.N., Wigley T.M.L., Parkhurst D.L.** 1978: The kinetics of calcite dissolution in CO<sub>2</sub>-water systems at 5 to 60°C to 1 atm. *Am. Jour. Sci.*, 176
- Puig J. M.,** 1987 : Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse. Thèse Hydrogéol, Univ. Avignon (doc BRGM, 180, 1990) 208 p.
- Remenieras.G.,** 1976, Hydrologie de l'ingénieur .Édit Eyrolles.Paris.
- Rémi de La Vaissière,** 2006: Etude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-Est de la France); thèse doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- Roy, B., & Benderitter, Y.** 1986 : Transferts thermiques naturels dans un système aquifère carbonate fissure peu profond. *Bulletin de La Société Géologique de France*, II(4), 661–666.
- Scanlon B. R.** 1989 : Physical controls on hydrochemical variability in the inner bluegrass karst region of Central Kentucky, *Ground Water*, 27, 5; 639-646. **S. Elmi.,** 1972. L'instabilité

- des Monts de Tlemcen et de Rhar-Roubane (Ouest algérien) pendant le Jurassique. Interprétation paléogéographique. Comptes Rendus Sommaires de la Société Géologique de France. Paris, 5 : 220-222.
- Scheebeli.G.**, 1978, *Hydraulique souterraine*. Edit Eyrolles Paris.
- S. Chakravarty**, 1989. Nitrates in groundwater, *Water. Res. J.* 163 (1989) 1109–1110.
- Schenck. Ch**, 1991. L'azote : nécessité, risques et remèdes (*Nitrogen: necessity, risks and remedies*). APRIA, Annales du Colloque sur l'Azote. Paris 29-30 janvier 1991, 17-25. Paris, France, 213p.
- Serra Bertral.G.**, 1979, *Cours d'hydrologie de surface 1<sup>er</sup> partie*, poly.I.N.A El- harrach Alger.
- Sodmi.B. Et Boualem.A.**, 1992, Etude des potentialités hydro-agricoles d'un périmètre irrigué en zone semi-aride : Le périmètre de Daiet-ez- zeraguet (Saida).Mémoire d'ing I.N.E.S.Agronomie de Mascara-
- S. Fass, and J.-C. Block**. 2014: "SecurEau : Sécurité et Décontamination d'un Réseau d'eau Potable." *Techniques Sciences Méthodes*, no. 3, pp. 23–37,
- Solomon D. K., Ceriling T. E.**, 1987 : The annual carbon dioxide cycle in a montane soil; observations, modeling, and implications for weathering. *Water Resources Research*, 23, 12: 2257-2265.
- Sybille Kilchmann, et al**. 2009 : Résultats de l'observatoire National Des Eaux Souterraines (NAQUA) : État et Évolution de 2004 À 2006. Berne, Commande, 2009
- Travi, Y, Gac, J.Y, Fontes, J.C, Fritz, B**, 1987. Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de la pluie au Sénégal (*Chemical and isotopic recognition of rainwater in Senegal*). *Géodynamique* 2, 43-53.
- Vojo Mirčovski, Biljana Gičevski, Gorgi Dimov**, 2018. Hydrochemical characteristics of the groundwaters in Prilep's part of Pelagonia Valley – Republic of Macedonia. *The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin (Rudarsko-geološko-naftni zbornik)* 10.17794
- Y. Guglielmi, B. Blavoux**, 1994. Détermination de l'origine des nitrates dans un aquifère alluvial au moyen du marquage isotopique des eaux : exemple de la nappe du Var (Alpes- Maritimes, France) (*Determination of the origin of nitrates in an alluvial aquifer using isotopic water marking: example of the Var aquifer ; Alpes-Maritimes, France*), *C. R. Acad. Sci. Paris, France Ser. II* 319 (1994) 325–330

## **Annexe**

## **Résumé**

Les eaux des systèmes carbonatés gardent la mémoire des épisodes responsables de leur recharge. L'origine et la proportion des différents types d'eau parvenant aux exutoires des systèmes karstiques sont des problèmes fondamentaux pour la compréhension du fonctionnement de ce type d'aquifère. La zone non saturée joue un rôle crucial dans la dynamique des aquifères karstiques, même si le fonctionnement de cette zone est encore mal compris. Le traçage naturel hydrochimique, s'est révélé un moyen d'investigation performant. Il est nécessaire cependant de réunir le maximum d'informations différentes échelles de temps d'espace afin de caractériser au mieux les différentes composantes de l'écoulement pour un aquifère donné.

Pour répondre à ces problématiques, ce travail s'appuie sur l'analyse individuelle, puis croisée, des données pluviométriques, hydrodynamiques et hydrochimiques. La finalité de ce travail est de proposer un schéma conceptuel du fonctionnement de la zone non saturée qui soit le plus générique possible. 04 sources et un forage en milieu carbonaté ont été sélectionnés dans la région du massif des Monts de Saïda, en fonction de leur spécificité (aquifères épikarstiques, suspendus, fissurés ou plus ou moins karstifier). Un suivi a été réalisé sur quelques cycles, ainsi que une étude de la pluviométrie sur systèmes les étudier.

L'eau stockée ou en transit dans la ZNS du karst acquiert une minéralisation spécifique et conserver un potentiel corrosif important. C'est la facilité et la vitesse d'introduction de cette eau dans les systèmes (transport du CO<sub>2</sub>) qui expliquent le développement de la karstification jusque dans la zone noyée.

Ce volume d'eau en transit ou momentanément stockée dans ce milieu constitue la réserve suspendue du système. Cette participation peut devenir prépondérante dans certains systèmes, particulièrement en période de crue (effet piston). L'influence de ces écoulements sur la chimie des eaux à l'exutoire (mélange) et sur les paramètres hydrodynamiques (coefficient et volume de tarissement) sera très dépendante des facteurs hydroclimatiques et des conditions hydrologiques antérieures du réservoir. Ces constatations entraînent qu'une partie du volume d'eau écoulée en tarissement est expliquée par des réserves n'appartenant pas à la zone noyée.

L'accentuation de la pression anthropique n'a pas cessé de modifier les caractéristiques physicochimiques des eaux de cet aquifère fragile. Les mesures des éléments anthropiques [NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (56 mg/l), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (61 mg /l), Cl<sup>-</sup> (72,1 mg/l)] sur les points d'eaux présentent des valeurs critiques mettant ainsi en danger la santé des populations.

Les aquifères karstiques des Monts de Saïda souffrent actuellement d'une dégradation notable, qui est engendrée par la surexploitation des eaux et l'utilisation abusive des engrais agricoles. La mise en protection de cette ressource devrait passer par l'évaluation des zones vulnérables et l'installation des périmètres de protections

## **Abstract**

The waters of carbonate systems keep the memory of the episodes responsible for their recharge. The origin and proportion of the different types of water reaching the outlets of karst systems are fundamental problems for understanding the functioning of this type of aquifer. The unsaturated zone plays a crucial role in the dynamics of karst aquifers, even if the functioning of this zone is still poorly understood. Natural hydrochemical tracing has proven to be a powerful means of investigation. However, it is necessary to gather the maximum of information from different space time scales in order to best characterize the different components of the flow for a given aquifer.

To answer these issues, this work is based on individual analysis, then cross-analysis, of pluviometric, hydrodynamic and hydrochemical data. The purpose of this work is to propose a conceptual diagram of the functioning of the unsaturated zone which is as generic as possible. 04 springs and a carbonate borehole were selected in the region of the Monts de Saïda massif, according to their specificity (epikarstic, suspended, cracked or more or less karstified aquifers). Monitoring was carried out over a few cycles, as well as a flood study on two systems.

Water stored or in transit in the karst ZNS acquires specific mineralization and retains significant corrosive potential. C'est la facilité et la vitesse d'introduction de cette eau dans les systèmes (transport du CO<sub>2</sub>) qui expliquent le développement de la karstification jusque dans la zone noyée.

## Le rôle de la zone non saturée dans les processus d'écoulement des aquifères Karstiques des monts de Saïda ; approche hydrodynamique et hydrochimique

This volume of water in transit or temporarily stored in this medium constitutes the suspended reserve of the system. This participation can become preponderant in certain systems, particularly during floods (piston effect). The influence of these flows on the chemistry of the outflow water (mixture) and on the hydrodynamic parameters (coefficient and drying volume) will be very dependent on the hydroclimatic factors and the previous hydrological conditions of the reservoir. These findings imply that part of the volume of water drained by dry-up is explained by reserves that do not belong to the drowned area.

The increase in anthropogenic pressure has constantly modified the physicochemical characteristics of the waters of this fragile aquifer. Measurements of anthropogenic elements [NO<sub>3</sub>- (56 mg / l), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (61 mg / l), Cl<sup>-</sup> (72.1 mg / l)] on water points present critical values thus endangering the population health. The karstic aquifers of the Saïda Mountains are currently suffering from significant degradation, which is caused by the over-exploitation of water and the excessive use of agricultural fertilizers. The protection of this resource should go through the assessment of vulnerable areas and the installation of protection perimeters.

### ملخص

تحافظ مياه أنظمة الكربونات على ذاكرة التساقطات المسؤولة عن إعادة شحنها. يعد أصل ونسبة الأنواع المختلفة من المياه التي تصل إلى منافذ أنظمة الكارست من المشاكل الأساسية لفهم عمل هذا النوع من طبقات المياه الجوفية. تلعب المنطقة غير المشبعة دوراً حيوياً في ديناميكيات طبقات المياه الجوفية الكارستية، حتى إذا كان عمل هذه المنطقة لا يزال غير مفهوم بشكل جيد. وقد أثبتت عمليات التتبع الهيدروكيميائية الطبيعية أنها وسيلة قوية للبحث العلمي. ومع ذلك، من الضروري جمع الحد الأقصى من المعلومات من المقاييس الزمنية والمكانية المختلفة من أجل تحديد أفضل مكونات التدفق المختلفة لطبقة مياه جوفية معينة. للإجابة على هذه القضايا، ويستند هذا، الهيدروديناميكية والكيميائي و الأمطار. العمل على تحليل فردي، ثم عبر التحليل والبيانات تم اختيار 04 عيون وبنر في منطقة كتلة جبال سعيدة، و وفقاً لخصائصها (طبقات المياه الجوفية، المعلقة، المتشققة، أو أكثر أو أقل من طبقات المياه الكارستية).

تم إجراء الرصد على مدى بضع دورات، بالإضافة إلى دراسة التساقطات على الانظمة المدروسة. تكتسب المياه المخزنة أو العابرة في المنطقة الغير مشبعة للكارست تمعدناً محددًا وتحتفظ بإمكانية تآكل كبيرة. إن سهولة وسرعة إدخال هذه المياه في أنظمة (نقل ثاني أكسيد الكربون) هي التي تفسر تطور الكارستية في المنطقة المشبعة. يشكل هذا الحجم من المياه العابرة أو المخزنة مؤقتاً في هذه الوسيلة الاحتياطي المعلق للنظام. يمكن أن تصبح هذه المشاركة راجحة في أنظمة معينة، خاصة خلال الفيضانات (تأثير المكبس). يعتمد تأثير هذه التدفقات على كيمياء المياه الخارجة (الخليط) وعلى المعلمات الهيدروديناميكية (حجم المعامل والتجفيف) اعتماداً كبيراً على العوامل المناخية المائية والظروف الهيدروولوجية السابقة للخران. تشير هذه النتائج إلى أن جزءاً من حجم المياه التي يتم تجفيفها بواسطة التجفيف يتم تفسيره من خلال الاحتياطيات التي لا تنتمي إلى المنطقة المشبعة. أدت الزيادة في الضغط التلوث البشري إلى تعديل الخصائص الفيزيائية الكيميائية لمياه هذا الخزان الهش باستمرار. تمثل قياسات العناصر التلوث على نقاط الماء قيماً حرجة وبالتالي تعرض للخطر صحة السكان. وتعاني طبقات المياه الجوفية الكارستية في جبال سعيدة حالياً من تدهور كبير، ناجم عن الإفراط في استغلال المياه والاستخدام المفرط للأسمدة الزراعية. يجب أن تتم حماية هذا المورد من خلال تقييم المناطق المعرضة للخطر ووضع محيطات الحماية.