

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de L'Enseignement Supérieur*  
*et de la Recherche Scientifique*  
**Université Mentouri Constantine**  
Faculté des Sciences de la Terre,  
de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire  
Département des Sciences de la Terre

*Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme*  
*de DOCTORAT D'ETAT*

*Thème*

*Etude hydrogéochimique et impact de la  
pollution sur les eaux de la région d'el Eulma*

*Présenté par*

**Demdoum Abdeslam**

Année universitaire : 2010

	<b>Page</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>Première partie Synthèse bibliographique</b>	<b>4</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>1-1- Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1-2- Situation du bassin d'El Eulma</b>	<b>5</b>
<b>1-3- Délimitation et planimétrie du bassin d'El Eulma</b>	<b>6</b>
<b>1-4- Caractéristiques de forme</b>	<b>10</b>
<b>1-4.1- Indice de compacité ou coefficient de Gravilius</b>	<b>10</b>
<b>1-5- Réseau hydrographique et densité de drainage</b>	<b>20</b>
<b>1-6- Sols et végétation</b>	<b>21</b>
<b>1-7- Géomorphologie</b>	<b>22</b>
<b>1-7.1- Les surfaces aplanies</b>	<b>22</b>
<b>1-7.2- Marques de l'endoréisme</b>	<b>24</b>
<b>1-8- Conclusion</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre II</b>	
<b>2-1- Introduction</b>	<b>26</b>
<b>2-2- Disposition general</b>	<b>26</b>
<b>2-3- Dispositions des domaines de l'Algérie nord-orientale</b>	<b>29</b>
<b>2-3.1- Le socle Kabyle</b>	<b>30</b>
<b>2-3.2- La dorsale Kabyle</b>	<b>30</b>
<b>2-3.3- Les Flyschs</b>	<b>30</b>
<b>2-3.4- La zone Tellienne</b>	<b>30</b>
<b>2-3.5- La plate forme sétifienne</b>	<b>31</b>
<b>2-3.6- Le parautochtone et autochtone Hodnéens .</b>	<b>32</b>
<b>2-4- Géologie locale</b>	<b>32</b>
<b>2-4.1-lithostratigraphie</b>	<b>32</b>
<b>2-4.1.1- Trias</b>	<b>32</b>
<b>2-4.1.2- Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen</b>	<b>32</b>
<b>2-4.1.3- Formations Telliennes</b>	<b>38</b>
<b>Séries à jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun .</b>	<b>38</b>
<b>Bérriasien à Vallenginien .</b>	<b>39</b>
<b>2-4.1.4- Ensemble allochtone Sud-Sétifien .</b>	<b>39</b>
<b>2-4.1.5- Nappe néritique constantinoise .</b>	<b>43</b>
<b>2- 4.1.6- Nappe Djemila .</b>	<b>43</b>
<b>2-4.1.7- Mio-Pliocène continental</b>	<b>44</b>
<b>2-4.1.8- Quaternaire</b>	<b>45</b>
<b>2-4.2- Tectonique</b>	<b>45</b>
<b>2-4.2.1- Description des unités</b>	<b>47</b>
<b>Le Parautochtone et autochtone Hodnéens</b>	<b>47</b>
<b>2-4.2.2- Principales phases tectoniques</b>	<b>50</b>
<b>La phase atlasique (structuration Eocène)</b>	<b>50</b>
<b>La phase Alpine</b>	<b>50</b>
<b>2-5- Essai de reconstitution paléogéographique</b>	<b>50</b>
<b>2-6- Conclusion</b>	<b>54</b>

<b>Chapitre III</b>	
<b>3-1- Introduction</b>	55
<b>3-2- Principe de la prospection par sondage électrique</b>	55
<b>3-3- Résultats et interprétation</b>	58
<b>3-4- Conclusion</b>	63
<b>Deuxième partie : Hydrologie</b>	65
<b>Chapitre IV</b>	
<b>4-1- Introduction</b>	66
<b>4-2- Paramètres climatiques</b>	67
<b>4-3- Les facteurs thermiques</b>	94
<b>4-4- Déficit d'écoulement</b>	99
<b>4-5- Etablissement d'un bilan hydrique : méthode de Thornthwaite</b>	107
<b>4-6- Conclusion</b>	108
<b>Chapitre V</b>	
<b>5-1-Introduction</b>	109
<b>5-1- Notions sur les standards</b>	109
<b>5-2- Caractéristiques des isotopes lourds</b>	110
<b>5-3- Les réactions d'échange dans la nature</b>	112
<b>5-4- Notion de fractionnement</b>	112
<b>5-5- Facteur d'enrichissement</b>	114
<b>5-6- Les différents comportements isotopiques</b>	115
<b>5-7- Corrélation des isotopes stables deutérium (<math>^2\text{H}</math>) et Oxygène -18 (<math>^{18}\text{O}</math>)</b>	120
<b>5-8- Evaporation</b>	121
<b>5-9- Caractéristiques isotopiques des précipitations en Algérie nord orientale</b>	124
<b>5-10- Conclusion</b>	128
<b>Chapitre VI</b>	
<b>6-1- Introduction</b>	129
<b>6-2- Systèmes aquifères</b>	129
<b>6-3- Conclusion</b>	149
<b>Troisième partie : Géochimie et Environnement</b>	149
<b>Chapitre VII</b>	
<b>7-1- Introduction</b>	150
<b>7-2- Validation des données</b>	151
<b>7-3- Paramètres physico-chimiques</b>	152
<b>7-4- Les processus hydrogéochimiques : concept théorique</b>	154
<b>7-5- Hydrogéochimie du système aquifère</b>	162
<b>7-6- Equilibres de la solution avec les minéraux carbonatés et les sels minéraux</b>	184
<b>7-7- Analyse en composantes principales</b>	192
<b>7-8 – Conclusion</b>	196
<b>Chapitre VIII</b>	

	<b>8-1- Introduction</b>	198
	<b>8-2- Normes et potabilité des eaux</b>	199
	<b>8-3- Pollution par les eaux usées</b>	199
	<b>8-4- Déchets solides</b>	201
	<b>8-5 Qualité des eaux en vue de l'A.E.P</b>	201
	<b>8-6- Qualité des eaux en vue de leur utilisation agricole</b>	202
	<b>8-7- Pollution par les nitrates</b>	203
	<b>8-8- Conclusion</b>	205
2	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	206
3	<b>REFERENCE BIBELIO</b>	211
4	<b>TABLE DES MATIERES</b>	221
5	<b>TABLE DES TABLEAUX</b>	229
6	<b>TABLE DES FIGURES</b>	231

## INTRODUCTION

Le domaine qui a fait l'objet de notre étude appartient aux Hautes Plaines Sétifiennes, il se situe par 37° de Latitude Nord et 4° de Longitude Est.

Les Hautes Plaines Sétifiennes se présentent comme une surface légèrement ondulée s'étendant entre les Monts du Hodna au Sud et les Montagnes de Petite Kabylie au Nord.

Le sous bassin d'El Eulma montre des limites nettes au Nord et au Sud dans des secteurs où les lignes de partage des eaux de surface suivent rigoureusement les lignes de crêtes.

A l'inverse à l'Est et à l'Ouest les lignes de partage des eaux auront un tracé flou en raison de la limite imprécise entre endoréisme et exoréisme.

La ville d'El Eulma se trouve sur l'axe routier RN5 entre Alger-Sétif et Constantine à 327 kilomètres d'Alger à l'Est et 101 kilomètres de Constantine à l'Ouest,

Les Hautes Plaines Sétifiennes se développent au Sud de la RN5 à une Altitude moyenne de 950 mètres.

La bordure méridionale est marquée par des reliefs isolés : Djebel Brao (1263 mètres), Djebel Tnoutit (1193 mètres). Djebel Tella (1055 mètres).

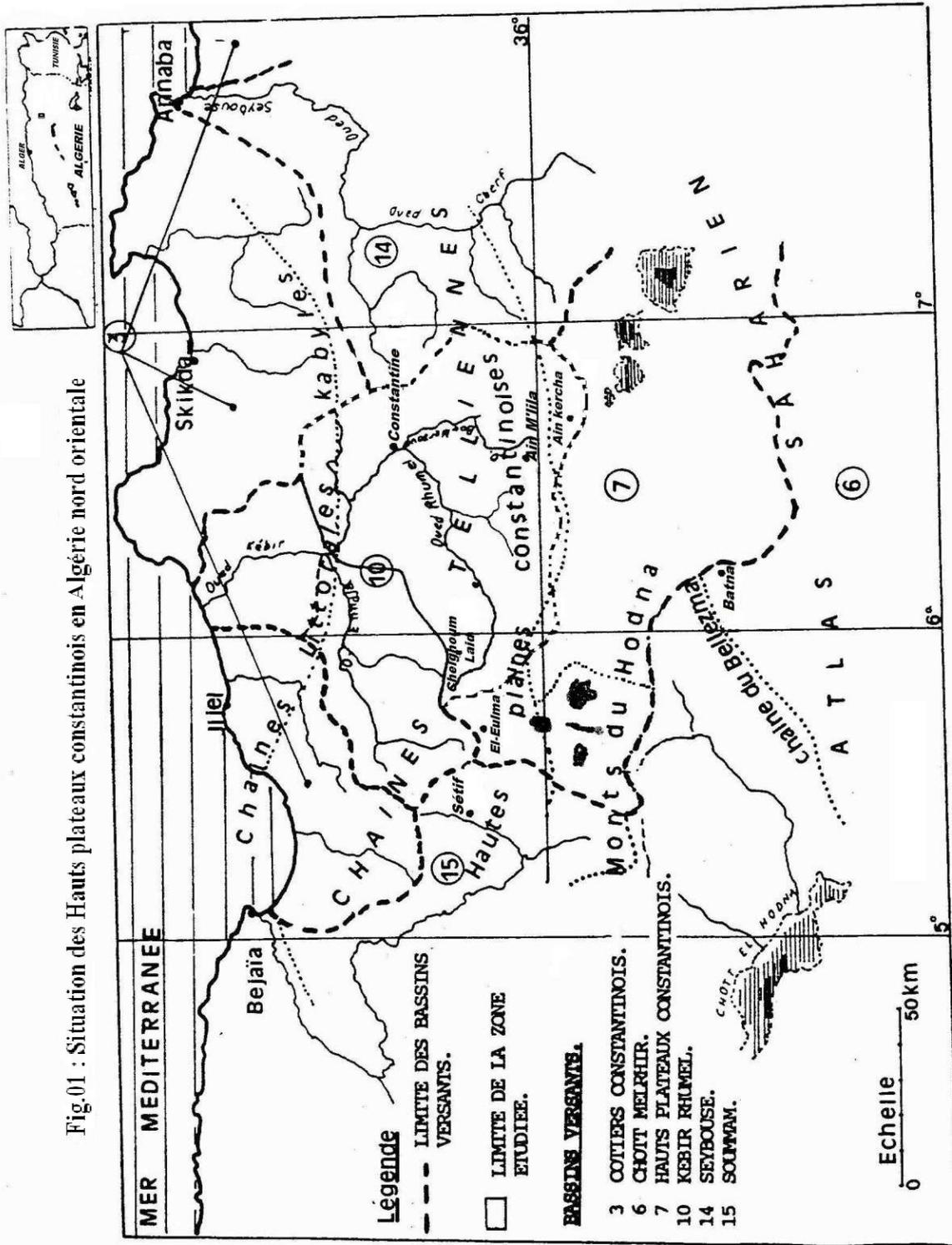
Au Sud d'El Eulma, on peut observer dans les Plaines des dépressions fermées, qui sont : La Sebkhet Bazer, la Sebkhet El Hamiet, le Chott El Fraïn et le Chott El Beida. (Fig. 1)  
En zone aride et subaride, l'eau étant l'un des principaux facteurs limitant la mise en valeur d'une région.

L'exploitation intensive des ressources en eau superficielle et souterraine a servi de base au développement socio-économique qu'a connu la région d'El Eulma. Autrefois toute l'économie de la région d'El Eulma était vouée essentiellement à l'agriculture.

Aujourd'hui la ville d'El Eulma a acquis un caractère économique avec l'implantation du marché de « Dubaï » et industriel avec quelques unités de transformations : minoteries, unité de montages des compteurs (AMC°), des unités de transformations des aliments de bétails...

Dans le cas de notre étude, nous essayerons d'apporter notre contribution à la connaissance des comportements hydrogéochimiques des aquifères, de ses causes naturelles et anthropiques afin d'améliorer d'une part la connaissance des données hydrogéochimiques d'une région à climat semi aride et d'autre part de fournir une synthèse hydro climatologique, hydrogéochimique et isotopique des aquifères en vue des utilisations futures.

Fig.01 : Situation des Hauts plateaux constantinois en Algérie nord orientale



La corrélation graphique  $\delta^2\text{H}\text{‰}$  vs  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ , a permis de distinguer deux familles d'eaux. La première famille appartenant au domaine des eaux de paléorecharge, indique un mélange d'eaux douces avec la sebkha par condensation en période d'été et/ou par intrusion d'eaux saumâtres. Tandis que la deuxième famille, comprenant l'eau des forages et de la source thermale, et située près de la droite des eaux météoriques mondiales, indique une recharge d'origine météorique.

L'objectif principal de ce travail est donc la caractérisation de la ressource tant au plan qualité que quantité.

Cette étude s'articule en trois parties :

- synthèse bibliographique
- Hydrogéochimie et mécanique des eaux
- Hydrologie isotopique

Au travers de ces parties nous allons essayer de définir les points suivants :

--cadre général, préciser les caractéristiques de l'environnement des bassins versants de la région d'El Eulma : caractéristiques morphométriques d'une région qui se signale par son endoréisme, géologique, hydro climatologique (pour évaluer les apports d'eau limitant les réserves souterraines). Et enfin hydrogéologique qui nous a permis d'identifier les principaux aquifères et qui sont l'aquifère du Mio-plio-quaternaire et l'aquifère profond carbonaté des Jurassique et Crétacé.

-étude hydro géochimiques des précipitations et des eaux souterraines afin de déterminer l'origine et le mode d'acquisition de la minéralisation

-hydrologie isotopique repose le traçage isotopique à l'aide des isotopes de la molécule d'eau (Deutérium  $^2\text{H}$  et Oxygène  $^{18}\text{O}$ ).

-Localiser les pollutions et leurs effets sur la qualité des eaux.

## **Avant propos**

*Situé dans la région de Sétif, le système hydrogéologique d'El Eulma appartient à un site géologique de transition entre le Tell et les bassins sahariens septentrionaux. Les terrains mésozoïques à Jurassique carbonaté et à Crétacé carbonaté intercalé de marnes et de grès, y sont subsidents. Structurées en plis intensément fracturés, les dépressions constituent des combes remplies de sédiments tertiaires principalement marno-gréseux et argilo-gréseux, disposés sur un Miocène transgressif.*

*Ces caractéristiques géologiques des hauts plateaux sétifien, en particulier du sud-sétifien, annoncent des unités hydrogéologiques à aquifère multicouches des dépôts mio-plio-quadernaires, à fonctionnement cependant systémique avec les carbonates sous-jacents.*

*L'aquifère thermique est alimenté par les massifs intensément fissurés ; tandis que d'autres massifs mettent à jour la décharge de leur aquifère au travers des terrains de couverture. Ainsi, le bassin hydrogéologique d'El Eulma, annonce la caractéristique hydrogéologique des bassins hydrogéologiques méridionaux du domaine atlasique.*

*Outre la configuration d'aquifère multicouche, les bassins des hauts plateaux sud-sétifien présentent une seconde particularité, voire, des bassins endoréiques à plans d'eau connectés par les réseaux hydrographiques. L'aspect géomorphologique avec les dépressions fermées des sebkhas et chotts est subséquent à la morphotectonique et au climat semi-aride à fort pouvoir évaporant avec une nuance sub-humide.*

*En contexte environnemental, le milieu superficiel à salinité élevée ainsi que le développement économique tant culturel qu'industriel a notablement affecté la potabilité de la ressource souterraine.*

*Parmi les quelques travaux portant sur le système hydrogéologique d'El Eulma, une approche différente est présentée dans ce travail particulièrement en contexte hydrologie isotopique et hydrogéochimique.*

*L'élaboration de ce mémoire de thèse a été réalisée au Laboratoire de géologie et Environnement, Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'aménagement du Territoire, Département des Sciences de la Terre, Université Mentouri de Constantine, et au **Laboratoire d'Hydrogéochimie isotopique, Institut des Sciences de la Terre, Université de Turin.***

*Au terme de ces travaux, je remercie, Feu, Monsieur P. VERDEIL, Professeur, Laboratoire d'Hydrogéochimie, Université de Narbonne..... , de m'avoir proposer le thème de cette thèse et guidé dans les grandes lignes de ce sujet.*

*Comme je remercie Madame M. DJEBBAR, Maître de Conférences, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire l'Ingénierie des Procédés de l'Environnement (LIPE), Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri, pour avoir accepté de poursuivre la direction de ces travaux.*

*J'exprime toute ma gratitude à Monsieur G. M ZUPPI, Directeur de Recherches, Laboratoire d'Hydrogéochimie, Université de Turin, de m'avoir accueilli au Laboratoire d'Hydrogéochimie, toutes les fois que j'ai sollicité son aide aussi bien pour la bibliographie nécessaire à mes travaux de recherche, que pour les critiques apportées aux discussions de certains résultats.*

*Je remercie vivement Monsieur H. SHOUT, Professeur, Faculté des Sciences de Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du territoire, Université Mentouri, pour l'honneur qu'il me fait en Présidant le Jury de cette thèse.*

*Je tiens également à remercier Madame F. ASSASSI, Maître de conférences, Département des Sciences de la Terre, Université d'Annaba, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examineur.*

*Je tiens à remercier Monsieur A ROUABHIA , Maître de Conférence, Département des Sciences de la Terre, Université Tébessa,, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examineur.*

*Comme je tiens à remercier Monsieur N. CHABOUR, Maître de conférences, Département des Sciences de la Terre, Université Mentouri Constantine, d'avoir accepté de participer au Jury de cette thèse en qualité d'Examineur.*

*Que tous veuillent bien trouver ici le témoignage de mes plus vifs remerciements.*

*Mes plus vifs remerciements vont plus particulièrement :*

*- à Ma défunte mère que dieu tout puissant lui accorde sa grâce et sa miséricorde,*

*- à mon père ,*

*- ma femme qui m'a toujours soutenu moralement,*

*-à Ma sœur et amie Mounira Djebbar qui sans son aide précieuse, ce travail ne serait pas arrivé à bout .*

*Mes remerciements s'adressent aussi au Personnel de l'IST des services de Documentation, de Cartographie, et du Laboratoire de Géologie et Environnement, pour toute l'aide qu'ils m'ont apporté au cours de mes travaux.*

*Mes remerciements vont aussi à mes collègues pour l'amitié et le soutien moral qu'ils m'ont constamment apportés au cours de mes travaux.*

**“DE L’EAU , NOUS AVONS CREE TOUTE CHOSE VIVANTE”  
CORAN ,XXI ,30**

“Plutarque ...soutient à l’égard de l’eau que, sans elle , la vie ne serait pas incommode , mais qu’ il serait absolument impossible de la conserver . Il aurait été fondé à ajouter que **sans l’eau** , le globe terrestre ne serait qu’un morceau stérile de poussière de et de cendres ; que l’air serait un espace inhabitable à cause de la subtilité du sec et du froid ; qu’**il ne se formerait ni minéraux, ni plantes ,ni animaux** : qu’en un mot **sans l’eau rien n’aurait vie** ,rien ne pourrait croître ni subsister.”

Fabricius J.A. ,Théologie de l’eau ou Essai sur la bonté ,la sagesse et la puissance de Dieu  
,manifestées dans la création de l’eau ,  
Chaubert et Duran ,Paris 1743

***Dédicace***

*Je suis très reconnaissant à ma famille pour m’avoir constamment soutenu moralement  
et encouragé à aller de l’avant, face aux difficultés rencontrées.*

**A la mémoire de ma défunte mère,  
que Dieu tout puissant lui accorde grâce et miséricorde. ;  
A mon père ;  
A ma femme  
pour sa patience et ses encouragements ,  
A mon fils Achraff El Hossein ;  
A ma fille Schahinaz ;  
A mes sœurs ;  
A tous les miens et proches ;  
Et surtout  
A mes amis sincères.**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABU-SHARAR, T.M., BINGHAM, F. T., RHOADES, J. D. (1987). Reduction in hydraulic conductivity in relation to clay dispersion and disaggregation. *Soil Science Society of American Journal*, 51:342–346.

AL DROUBI, A., GRONDIN, J. L., FRITZ, B., TARDY, Y. (1978). Calcul des équilibres dans le système CaCO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>. Rappel des conditions de dissolution et de précipitation de la calcite. *Sci. géol.Bull.*, 31(4) :195–202.

ANONYMES (1990) : Inventaire des points d'eau de la région de Sétif, 01 carteDHW<sup>2</sup> de Sétif.

ANONYMES ( 1993) : Logs stratigraphiques des forages d'eau, 17 pages D.H.W<sup>1</sup> de Sétif.

APPELO C.AND POSTMA,D.(1993).*Geochemistry,groundwater and pollution*. Balkema.479 p.

ARAAR Z E : ( 1991) Etude hydrologique de la plaine Sud d'El Eulma Mem.Ing IST<sup>2</sup> de Constantine 1991, 107 pages

ARNORSSON, S. (1983). Chemical equilibria in Icelandic geothermal systems - *Geothermics* 12:119-128

ASTIER JL (1971) : Géophysique appliquée à l'hydrogéologie, Masson & Cie Paris 277 pages

AYACHE K (1991) : Etude hydrogéologique de la plaine d' Ain Azel, Mem.Ing.IST<sup>2</sup> de Constantine: 1991: 117pages

ALLISON G.B, 1982- The relationship between 18O and deuterium in water in sand columns undergoing evaporation. *J. of Hydrol.*, 55 : 163-169.

ALLISON G.B., BARNES C.J., 1985 – Estimation of evaporation from the normally "dry" lake from in south Australia, *J. Hydrol.* 78 : 229-242.

A.N.R.H (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Alger), (1993)– Quelques données géologiques, hydrogéologiques et climatologiques (compte-rendus des missions, fiches techniques de forages,...).

ARANYOSSY J.F., 1978 – Contribution à l'étude des transferts d'eau et de soluté dans la zone non saturée par traçage cationique et isotopique. *Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Paris sud, 132p.*

BAKALOWICZ M. (1979),Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification , *Thèse de doctorat Es sc.unive P et M Curie ,Paris VI France 260p.*

BAKALOWICZ M., FORD D. C., MILLER T., PALMER A.N., PALMER M.V. (1989), "Thermal genesis of dissolution caves in the Black Hills, South Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, 99: 729-738.

---

1)-Direction de l'hydraulique de la wilaya de Sétif.

2)-Institut des Sciences de la Terre Université de Constantine

3)-Campanie Générale de Géophysique

- BANTON, O. ET BANGOY, LM. (1999). Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec/AUPEL-UREF, 87 figs, p. 460.
- BARBERIO, L. ET VALLES, V. (1992). Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (République du Niger). *Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie*, 27(2) :143–152.
- BARNES C.J. , AND ALLISON G.B., (1983)- The distribution of deuterium and oxygen 18 in dry soils : I. Theory. *J. of Hydrol.* 60 :141-156.
- BARNES C.J., AND ALLISON G.B., (1984) – The distribution of deuterium and oxygen 18 in dry soils : III. Theory from non isothermal water movement. *J. of hydrol.* 74 : 119-135.
- BARNES C.J., ALLISON G.B. AND HUGUES M.W., (1989)- Temperature gradient effects on stable isotope and chloride profiles in dry soils. *J. of Hydrol.*, 112 :69-87.
- BECHTEL (1971) : Plan de développement de la région de Sétif. Rapport interne, DHW de Sétif.
- BELLOUCHE MA (1996) :L'eau dans les mines et les travaux souterrains :cas de la mine de Kherzet Youssef(Ain Azel –Sétif), Mémoire de magister, univ.de Constantine ,140p.
- BERNOUX, M. (2008). La matière organique des sols. *Colloque Les matières organiques du sol : rôles, risques et enjeux GESSOL 2*, Paris.
- BOUDOUKHA A (1984) : Contribution à l'étude hydrogéologique de la région d'El Eulma  
DEA université de Franche Comté, 64 Pages
- BOUDOUKHA A. (1988) : Etude hydrogéologique et modélisation du système aquifère fermé d'El Eulma-Ain Lahdjar (région Est de Sétif – Algérie). *Thèse de Doctorat. Labo. Géologie structurale et appliquée. Univ. Franche comté. France.* 186 pages.
- BOUDOUKHA A. (1998) : Hydrogéologie des hautes plaines Sétifiennes at qualité chimique des eaux souterraines. *Thèse de doctorat. Inst. Chimie. Univ. Annaba.* 230 pages.
- BOUDIAF A., PHILIP H., COUTELLE A., RITZ J.-F(1999), Découverte d'un chevauchement d'âge Quaternaire au sud de la Grande Kabylie(Algérie), *Geodin. Acta* 12 71–80.
- BOUILLIN J.-P, (1986) Le bassin maghrébin : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes, *Bull. Soc. géol. France* 8 (4) 547–558.
- BUHMANN, D. AND DREYBRODT, W. (1985). The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 1. Open system. *Chemical geology*, XXVII, 2:143–152.
- BURKHARD M., CARITG S., HELG U, ROBERT-CHARRUE C., SULAIMANI A. (2006). Tectonics of the Anti-Atlas of Morocco, *C. R. Geoscience* 338
- BRGM (1974) : Essais de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux Souterraines, Orléans, 50 pages.

- BRGM (1975) ; Interprétation des données de pompage d'essais pour l'évaluation des paramètres des aquifères, Orléans, 50 pages.
- CAIRE A .(1970) .tectonique de la méditerranée centrale .Ann .Soc. Publ. Serv .carte géol. Algérie. p 307-346
- CAIRE A .(1975) :Etude géologique de région des Bibans ,Algérie ) *Thèse de doctorat Es sc Nat..unive Paris,Paris 613p.*
- CASTANY G (1967) : Traité pratique des eaux souterraines, Dunod-édil. Paris 661 pages.
- CASTANY G (1968) : Prospection et exploitation des eaux souterraines Dunod-édit., Paris, 709 pages.
- CASTANY G ET MARGAT J. (1977) : Dictionnaire français d'hydrogéologie, BRGM, SGN Orléans France , 249 pages.
- CASTANY G (1980) : L'eau propre, Hachette-édit., Paris, 283 pages.
- CASTANY G (1982) Principes et méthode de l'hydrogéologie, Dunod-édit., Paris 236 pages
- C.D.T.N (1989) :Données hydroclimatologiques et isotopiques des villes de Batna et Annaba .doc.inedit 102 pages Alger.
- C.G.G (1972) : Etude par prospection géophysique dans la plaine de Ain Djasser (ex Bourzhel). *Ministère de l'hydraulique. DHW de Batna. Algérie. 22 pages.*
- C.G.G (1973) : Etude par prospection géophysique sur les hautes plaines de Sétif. *Ministère de l'hydraulique .DHW de Sétif. Algérie. 53 pages.* CGG<sup>3</sup> (1973) : Etude et prospection sur les hautes plaines sétifiennes. Rapport intern.DHW de Sétif 53 pages.
- CHADI M. (2004) : Cadre géologique et structural des séries crétaées néritiques du constantinois (Est-Algérien).*thèse de doctorat. Départ. Sciences des la terre. Univ. Constantine. 219 pages.*
- CHAUMMONT M ET PAQUIN C (1971) : Carte pluviométrique d'Algérie société d'HIst.Nat., Alger, 1971, 1 carte au 1/500 000, en 4 feuilles + Notice (24 pages).
- CHEVALIER-LEMIRE G, PIGASSOU R, RIGAILL R, VILMUS T (1990). Étude des variations naturelles du débit des sources thermales à Luchon (Haute-Garonne, France). *BULL BRGM*; 4:287-296.
- COTE M (1981 ) : Mutations rurales en Algérie, IST de Constantine, 159 pages, cartes.
- CONDOM, N., KUPER, M., MARLET, S., VALLÈS, V., KIJNE, J. (1999). Salinization, alkalinization and sodification processes in Punjab (Pakistan). Characterisation of geochemical and physical processes of soil degradation. *Land Degradation and Development*, 10 :123–140.
- CONDOM, N. (2000). Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger (Mali). Thèse Doct. Science du Sol. École Doctorale de Biologie Intégrative. Montpellier.

CRAIG H., (1957 – Isotopic standards for carbon and hydrogen correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12 :133-149.

CRAIG H., (1961)a – Isotopic variation in meteoric waters. *Sc. 133 :1702-1703*.

CRAIG H., (1961)b – Standards for reporting concentration of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Sciences*, 133 :1833-1834.

CRAIG H.,(1963) – The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas. In "Nuclear Geology in Geothermal areas". *CNR – laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa*, 17-53.

CRAIG H. AND GORDON L.I., (1965)- Deuterium and oxygen-18 variation in the ocean and marine atmosphere. *Proc. Conf. Stable Isotope in Oceanog. Studies & Paleotemps., Lab. Geol. Nucl. Pisa*, pp.9-130.

DANSGAARD W.,( 1964 )– Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, XVI, 435-468.

DAOUD D., FONTES J.CH., MICHELOT J.L. ,( 1995 )- Caractérisation géochimique et isotopique des eaux souterraines dans le bassin du Chott Chergui (Algérie). *Int.Symp., IAEA, Vienna. 20-24 mars 1995. No. IAEA-SM /336/13*

DEMDOUM, A. ET DJEBBAR, M. (2009). Caractérisation hydrochimique et apport isotopique sur la salinité du bassin d'El Eulma en région sud-Sétifienne (Algérie nord orientale) ,rev .sce. et tech. Dec 2009Unive mentouri constantine

DEMDOUM A. (1996), "Étude hydrogéologique de la plaine d'El Eulma et le problème de la qualité des eaux", Thèse Magister, Uni. Constantine, , p. 205.

DJEBBAR M. (2006), "Le système karstique hydrothermal constantinois (Algérie nord orientale) : structure et fonctionnement", 8<sup>ème</sup> Colloque d'hydrogéologie en pays calcaire, UFC-CHYN, Neuchâtel, Presses universitaires de Franche-Comté, Université de Franche-Comté, pp. 89-92

DE MARSILY G. (1986) Quantitative Hydrogeology. Academic Press, London, pp.440,

DÉVERCHÈRE J., YELLES K., DOMZIG A, MERCIER DE LEPINAY B., BOUILLIN J.P., GAULLIER V., BRACÈNE R., CALAIS E., SAVOYE B., KHERROUBI A, LE ROY P., PAUC H., DAN G, (2005)Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria, and its relations to the 2003 *Mw* 6.9 earthquake, *Geophys. Res. Lett.* 32 L04311, doi:10.1029/2004GL021646

DE VRIES J. J., SELAULO E. T., AND BEEKMAN H. E. (2000) Groundwater recharge in the Kalahari, with reference to paleo-hydrologic conditions. *Journal of Hydrology* 238,110-123.

DIB A ( J981 ) : La pluviométrie du Nord Est Algérien, Thèse 3ème cycle, Unive.de Grenoble.

DIB-ADJOUL H. (1985) : Le thermalisme des l'Est Algérien. *Thèse de doctorat troisième cycle. IST. USTHB. Alger.* 281 pages.

DUBREUIL P. (1974) Initiation à l'analyse hydrologique, ORSTOM. Masson-édit 216 pages, 40 figures.

DOGLIONI C., FERNANDEZ M., GUEGUEN E, SABAT F., On the interference between the early Apennines–Maghebides back-arc extension and the Alps-Betics orogen in the Neogene

geodynamics of the Western Mediterranean, Bull. Soc. Geol. Ital. 118(1999) 75–89.

DOMZIG A. LE ROY, C., DEVERCHERE J., YELLES K., BOUILLIN J.-P., BRACENE R., MERCIER DE LEPINAY B., LE ROY P., CALAIS E., KHERROUBI A., GAULLIER V., SAVOYE B., PAUC H (2006)., Searching for the Africa–Eurasia Miocene boundary offshore western Algeria (Maradja'03 cruise), C. R. Geoscience 338

DURAND-DELGA M., FONBOTE J.-M., (1980) -LE CADRE STRUCTURAL DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE, IN : J. AUBOUIN, J. DEBELMAS, M. LATREILLE (EDS.), Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys, Colloque no 5, 26e Congrès géologique international, Paris, Mém. BRGM 115 67–8

DUROZOY G. (1960) : Etude géologique de la chateaudain du RhumeJ, service géologique 456 pages, cartes.

DUBREUIL P. (1974) Initiation à l'analyse hydrologique, ORSTOM. Masson-édit 216 pages, 40 figures.

EDMUNDS W.M., (1981) – The hydrogeochemical characterization of groundwaters in the Sirte basin, using strontium and other elements. *In: The geology of Lybia, pp. 703-714. Academic San Diego, Calif.*

EDMUNDS W.M., COOK J.M., DARLING W.G., KINNIBURGH D.G., MILS D.L, BATH A.H., MORGAN-JONES M. AND ANDREWS J.N., (1987)- Baseline geochemical conditions in the chalk aquifer, Berkshire, U.K. : a basis for groundwater quality management. *Applied Geochemistry, vol. 2, p. 251-274.*

EDMUNDS W.M., SMEDLY P.L., DARLING W.G.,( 1993)- Indicators of paleoclimate and groundwater recharge in the East Midlands Triassic aquifer. *IAEA-SM-329/68, p. 570-573.*

ELLIS A J.,(1979) Chemical geothermometry in geothermal systems *Chemical geology* 25pp. 219-226

FAVRE, F. (2000). *Interactions entre oxydoréduction et dynamiques salines dans un vertisol irrigué par submersion*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Rural, 157 pp.

FEDDES, R. A., KABAT, P., VAN BAKEL, P. J. T., BRONSWIJK, J., HALBERTSMA, J. (1988). Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone. State of the art. *Journal of Hydrology*, 100:69–111.

FONTES J.CH., (1976)– Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles : quelques aspects. *Thèse Doctorat ès Sciences, Univ. Paris VI , 208p.*

FONTES JC ET ZUPPI G M. (1976) , “Isotopes and water chemistry in sulphide-bearing springs of central Italy” In Conference on Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, Vienna, Austria, Panel Proceedings Series, IAEA, STI/PUB/429, pp. 143-158.

FONTES J.-C. AND GAMIER J.-M. (1979) Determination of the Initial  $\delta^{13}C$  Activity of the Total Dissolved Carbon: A Review of the Existing Models and a New Approach.

Water Resources Research 15(2), 399-413.

FONTES J. C. (1980). A geochemical and isotopic approach to recharge evaluation in semi-arid zones; past and present. In *Arid Zone Hydrology; Investigations with Isotope Techniques*, pp. 47-68. International Atomic Energy Agency.

FONTES J.CH., (1980)- Environmental isotopes in groundwater hydrology. In *Handbook of environmental Isotope Geochemistry, edited by P. Fritz and J. Ch.Fontes. vol. 1: The Terrestrial environmental, A.*

FONTES J.CH., (1983) – dating of groundwater. In: *Guidbook on nuclear techniques in Hydrology, Tech. Rep. Ser. No. 91, IAEA., Vienne, p. 285-317.*

FONTES J. C. (1986). Environmental Isotopes in groundwater hydrology. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. Vol. 1, The Terrestrial Environment B* (ed. P. Fritz and J. C. Fontes), Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 74-140.

FONTES J.CH. AND EDMUNDS.W.M., (1989)- The use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology. *A Critical review. I.H.P III, Project 5.5, UNESCO, 75p.*

FONTES J.CH., ANDREWS .J.N., EDMUNDS.X.M., GUERRE.A. & TRAVI.Y.,(1991)- Paleorecharge by the Niger river (Mali) deduced from groundwater geochemistry. *Water ressources Research. vol. 27, N° 2, pp. 199-214.*

FONTES J.CH., (1992)- Chemical and isotopic constrains on <sup>14</sup>C dating of groundwater. *Radiocarbon After Four Decades. Springer – Verlag, New-York. Pp. 242-261.*

FONTES J.CH. & MATRAY J.M., (1993) –Geochemistry and origin of formation brines from the Paris basin, France. 1- Brines associated with Triassic salts. *Chem. Geology, 109: 149-175. Elsevier Sc. Pub. B.V. Amsterdam.*

FOUCAULT A. ET RAOULT JE: (1980): *Dictionnaire de Géologie Masson&cie-édit Paris, 334pages.*

FOURNIER, R.O. ET TRUSDELL, A.M. (1973). An empirical Na K Ca - Geothermometer for natural waters - *Geochimica et cosmochimica acta* 37: 1255-1275

GAUCHER G. ( 1942) : Les terrains salés de la plaine deBazer, 14 pages rapport interne DHW de Sétif,

GAUSSEN H ; BAGNOULS M.F. (1948) : Carte des précipitations de l'Algérie (moyenne 1913-1947) au 1/500 000 4 feuilles Paris.

GAUTHIER M. (1955) : Données de l'hydrogéologie Algérienne. ressources aquifères rapport interne DHW de Sétif.

GLAÇON J. (1967) ; Recherches sur la géologie et les gites métallifères du Tell Sétifien Bull. serv. géol. Alger, 2 volumes; cartes.

GONFIANTINI R., (1972) – Notes on isotopes hydrology. *Internal publication, AIEA, Vienne.*

GONFIANTINI R., BORSI S., FERRARA G., PANICHI C., (1973) – Isotopic composition of waters from the Danakil depression (Ethiopia). *Earth Planet Sc. Lett., 18,*

n°1,13-21.

GONFIANTINI R.,( 1978 )– Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271-534.

GONFIANTINI R.,( 1981) – The notation and the mass spectrometric measurements techniques. In : *Deuterium and oxygen-18 in the water cycle, technical reports series No 210, AIEA., Vienne. Pp. 35-81.*

GONFIANTINI R., DINCER T. AND DEREKOY A.M.,( 1974) – Environmental isotope hydrology in the Hodna region, Algeria. Isotope techniques in groundwater hydrology. *Proc.Symp., IAEA, Vienna, 1974, vol.1 , p. 293-316.*

GUENDOZ A., (1985) – contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est septentrional, Algérie. Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, université de Paris –sud, centre d'Orsay, 243 p.

GUIRAUD R. (1969) : Les traits principaux de l'hydrogéologie du bassin Chott El Hodna (Algérie du Nord). Bull N° 39 Sev, géol. Algérie.

GUIRAUD R (1977), Sur la néotectonique des régions ouest-constantinoises, Bull. Soc. géol. France XIX (3) 645–650.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY ,( 1983) – Isotope techniques in the hydrogeological assesment of potential sites for the disposal of high-level radioactive wastes. *Technical Report Series N° 228, I.A.E.A, Vienna, 151p.*

ISSAADI A. (1981) : Etude hydrogéologique des massifs du Guerioun et Fortass (dans le sud constantinois). *Thèse de doctorat troisième cycle.IST. USTHB. Alger. 253 pages.*

ISSAADI A. (1992) : Le thermalisme dans son cadre géostructural, apports à la connaissance de la structure profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales. *Thèse de doctorat d'état. IST. USTHB. Alger. 274 pages.*

KAZI TANI N. (1986). – Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine le domaine intraplaque: nord-algérien. Approche mégaséquentielle– Thèse Sci. Univ. de Pau, 871 p.

KEDAID, F.Z.(2006).Développement de la base de données géothermiques de l'Algérie par un système d'information géographique ; *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9, 4 : 253 –258

KIEKEN M. (1962) : Esquisse tectonique de l'Algérie (Algérie du Nord). Exposé sur les connaissances actuelles de la Géologie structurale de l'Algérie et présentation d'une carte tectonique. Pub. serv. carte Géol. de L'Algérie.

LABAT C. (2004)., “Soufre””. Biosciences de l'Environnement, Chimie et Santé/Milieu Marin/, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II, DEA,

LÉTOLLE R., LEROY P., GÉGOUT PH., 1988 – fractionnements isotopiques cinétiques du <sup>13</sup> C dans le système CO<sub>2</sub>-CaCO<sub>3</sub>. *C.R. Acad. Sc. Paris, 306 :799-802.*

MABILLOT A. (1971) : Les forages d'eau-Guide pratique Crépine Johnson. France S A. 86 Naintre, 237 pages.

MAGLIONE G(1974),., “Géochimie des évaporites et silicates néoformés en milieu continental confiné“. Thèse Doct. Paris. O.R.S.T, p. 331.

MAHJOUBE M., (1971) – fractionnement en oxygène 18 et en deuterium entre l’eau et sa vapeur. *J. Chim. Phys.* 68 :1423-1436.

MARGAT J, ( 1963) : Notice explicative du diagramme d'analyse. BRGM Orléans. S.63 A. 31. 13 pages.

MEBARKI A . ( 1982) : Le bassin du Kébir Rhumel-Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau Thèse 3 ème cycle. Nancy 303 pages.

MEYBECK M., (1984) – Influence des précipitations atmosphériques sur la composition chimique des eaux de surface. *In : les fleuves et le cycle géochimique des éléments, Thèse Doct. ès Sciences, Univ. Paris VI.*

NEZLI, E., ACHOUR S., DJABRI L. (2007). Approche géochimique des processus d’acquisition de la salinité des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l’Oued M’ya (Ouargla). *Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, 06: 121-134*

NIR A. ,( 1967)– development of isotope methods applied to groundwater hydrology. *Am. Geophys. Union, monographie, 11-09.*

O.N.M. (Office National de Météorologie, Alger) – Données météorologiques.

Ollier Ch. et Poirrée, (1981) : Irrigation, édit. Eyrolles, Paris 503 pages.

OTI (Ingeniors consultants) (1973) : Projet de la ferme pilote d'El Eulma, rapport interne DHW de Sétif, 15 pages.

REMINIERAS G. (1976) : Hydrologie de l'Ingénieur. Eyrolles-édit Paris, 456 pages fig. et tableaux.

ROCHE M. (1963) : Hydrologie de surface Gauthier villars édit Paris, 430 pages, fig.et 1 abaque.

RODIER (1936) : Analyse de l'eau Dunod-édit Paris, 642 pages.

SAVORNIN F: ( 1920) Etude géologique de la région du Hodna et du plateau Sétifien. Thèse es sce Nat . Lyon p 44-45 S

SCHOELLER H. (1934). Sur la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines. *Comité Études eaux souterraines, Rabat, p. 46-54.*

SCHOELLER H. (1941). L'influence du climat sur la composition chimique des eaux souterraines vadoses. *Bull. Soc. Géologique France, (5), t. xr, p. 267-289.*

SCHOELLER H. (1948). Les variations de la composition chimique de l'eau dans une même nappe. *U.G.G.I., A.I.H.S., Assemblée Oslo, p. 124-144.*

SCHOELLER H. (1951). Relation entre la concentration en chlore des eaux souterraines et les échanges de bases *C.R. Ac. Se, t. 232, p. 1432-4.*

SCHOELLER H. : (1955) : Géochimie des Eaux souterraines. Application aux eaux des gisements de pétrole. *Revue IFP*, Paris, I : 213 p.

SCHOELLER H. :(1962): Les eaux souterraines-Hydrologie dynamique et chimique recherches, exploitation et évaluation des ressources Masson & cie Paris, 642 pages.

SELTZER P. (1948) : Le climat de L'Algérie. Bull. Hors série Inst. de Météo, et de physique du Globe Alger 219 pages.

SERVANT, J. (1986). Dynamique des sels à la surface du globe : la salinisation des sols. Dans *Seminaire drainage et salinité / AFEID* (réd.), p. 99–152, Montpellier, France.

SIMUNEK, J. AND SUAREZ, D. L. (1994). Two dimensional transport model for variably saturated porous media with major ion chemistry. *Water Resources Research*, 30(4) :1115–1133.

SONATRACH ET VILA JM. ( 1977) : Carte géologiques au 1/200000, Feuille.de Sétif.

STRAHLER AW. (1952) Hypsométric (Area altitude) analysis of érosional topography Bull, of thé Géological society of America vol. 63 pp , 1117-1142,23 Fig.

SUAREZ, D. L. (1981). Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Science Society American Journal*, 45:469–475.

SUAREZ, D. L. & SIMUNEK, J. (1997). UNSATCHEM : unsaturated water and solute transport model with equilibrium and kinetic chemistry. *Soil Science Society of America Journal*, 61 :1633–1646.

SUMNER, M. E. (1993). Sodic soils : new perspectives. *Australian Journal of Soil Research*, 31:683–750.

TABET, D. H. (1999). *Intérêt d'une approche spatiale pour le suivi de la salinité des sols dans les systèmes irrigués. Cas de la subdivision de Chistian dans le Punjab (Pakistan)*.. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génère Rural des Eaux et des Forêts, 325 pp.

TAKHERIST, D AND LESQUER, A. (1989). Mise en Evidence d'Importantes Variations Régionales du Flux de Chaleuren Algérie, *Canadian Journal Earth Science*, 26 : 615 – 626.

THORNTHWAITE, C. W. AND MATHER, J.R. (1955). The water balance. *Climatology* 8(1), 104 pp.

TRUESDELL A H, ET FOURNIER R O., (1977) "Procedure for estimating the temperature of a hot-water component in a mixed water by using a plot of dissolved silica versus enthalpy". *J. Res. U.S.G.S.5*, pp. 49-52.

TYAGI, N. (1996). Salinity management in irrigated agriculture. Dans : *Sustainability of irrigated agriculture/ Pereira, L. S. (réd.)*, p. 345–358.

UREY U.H., LOVENSTAN H.A., EPSTEIN S., KINNEY M.C., 1951 – Measurements of paleotemperatures of the upper Cretaceous of England, Denemark and the Southestern United States.*Geol.Soc.Am.Bull.*, 62: 399-416.

VALLES, V. ET BOURGEAT, F. (1988). Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils. I. Development of the thermodynamic model GYPSOL simulating the irrigation water-soil chemical interaction. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 44(3):157–163.

VERDEIL P. (1988) : Abaque de calcul de l'ETR (Régions semi-arides), 01 abaque.

VERDEIL P. Introduction à l'hydrologie superficielle et souterraine des bassins de l'Aude de l'Agly et du haut bassin de l'Hers. Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine Bordeaux N°178, 603 pages. 209 tab., 180fig., 26 cartes.

VILA JM. (1980) : Chaîne alpine de l'Algérie orientale et des couffins Algéro-Tunisiens Thèse Doct. Etat univ. Paris VI, 2t., 586 pages, 199 fig.

VILA JM. (1977) : Notices explicatives des cartes géologiques au 1/50000d'EL Eulma Bir Arch Ain Lahdjar et Ain azel, édit-Sonatrach.

WALLICK E I ., KROUSE H R., ET SHAKOUR A. (1984), “Environnemental isotopes: principles and applications in groundwater geochemical studies in Alberta, Canada”, IST Canadian –American Conf. Hydrogeology, NWWA, Ohio, , pp. 249-266.

YERTSEVER Y. AND GAT J.R., (1981) – atmospheric waters. *In: Deuterium and oxygen 18 in the water cycle, technical reports series n° 210, AIEA, Vienna. Pp. 103-142.*

ZOUARI K., (1982) – Etude géochimiqueet isotopique de l’infiltration en zone non saturée sous climat semi-aride. *Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Univ. Paris-sud. Orsay, 153p.*

ZOUARI K., ARANYOSSY J.F., MAMOU A., FONTES J.CH., (1985) – Etude isotopique et géochimique des mouvements et de l’évolution des solutions de la zone aérée des sols sous climat semi-aride (sud tunisien). *In : stable and radioactive isotopes in the study of the unsaturated soil zone. IAEA-TECDOC-357, Vienna. pp. 121-144.*

\* Cartes de base et photographies aériennes.

-Cartes topographiques au 1/50000 d'El Eulma. Bir El Arch, Ain Lahdjar et Ain Azel. IGN Paris édit. 1960.

-Cartes Géologiques, au 1/50000 d'El Eulma, Bir El Arch, Ain Lahdjar et Ain Azel, édit 1977 Sonatrach,.

\* Cartes pluviométriques :

-Carte pluviométrique de l'Algérie (1913-1938) au 1/00000, établie par Seltzer P. Univ. Alger 1946.

-Carte des précipitations de l'Algérie (1913-1947) au 1/500000 2 planches, établie par Gaussen et Bagnouls MF., I.G.N Paris 1948.

-Carte pluviométrique de l'Algérie (1913-1963), au 1/50000, 04 planches, établie par Chaumont M. et Paquin C. Soc. Hist. Nat. Afri. N. Alger 1971.

-Couverture photographies aériennes (1972-1973) au 1/20000 INC Alger.

## Chapitre I

### CARACTERES MORPHOMETRIQUES

#### 1-1- Introduction

Quelles que soient les conditions climatiques auxquelles il se trouve soumis, le Bassin Versant a une fonction de collecteur : il recueille les précipitations et les transforme en écoulements qui rejoindront la mer ou les cuvettes endoréiques.

Cette transformation ne va pas sans perte d'une partie des eaux précipitées, ces pertes dépendant tout autant des conditions climatologiques qui règnent sur le bassin que des caractéristiques physiques de ce dernier. La nature du sol et la couverture végétale intervenant en dernier ressort.

#### 1-2- Situation du bassin d'El Eulma

Le bassin d'El Eulma qui se situe dans l'Est Algérien (Fig. 1-1), appartient aux hauts plateaux Constantinois (Fig. 1-2).

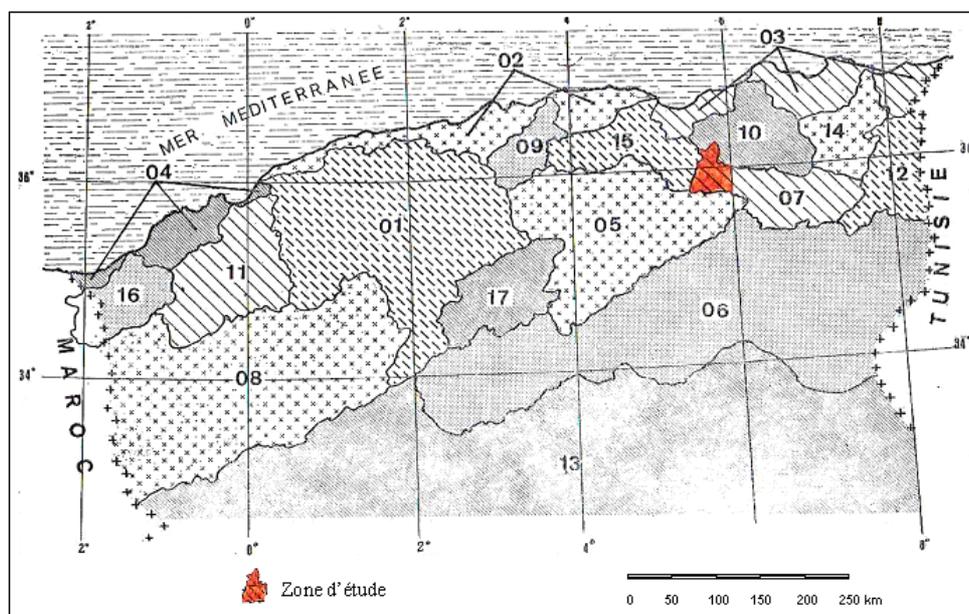


Figure 1-1 : Situation géographique du bassin versant des hauts plateaux constantinois

Code	Bassin	Code	Bassin	Code	Bassin
01	CHELIFF	07	H. PLATEAUX CONSTANTINOIS	13	SAHARA
02	COTIERS ALGEROIS	08	HAUTS PLATEAUX ORANAIS	14	SEYBOUSE
03	COTIERS CONSTANTINOIS	09	ISSER	15	SOUMMAM
04	COTIERS ORANAIS	10	KEBIR RHUMEL	16	TAFNA
05	CHOTT HODNA	11	MACTA	17	ZAHREZ
06	CHOTT MELRHIR	12	MEDJERDAH		

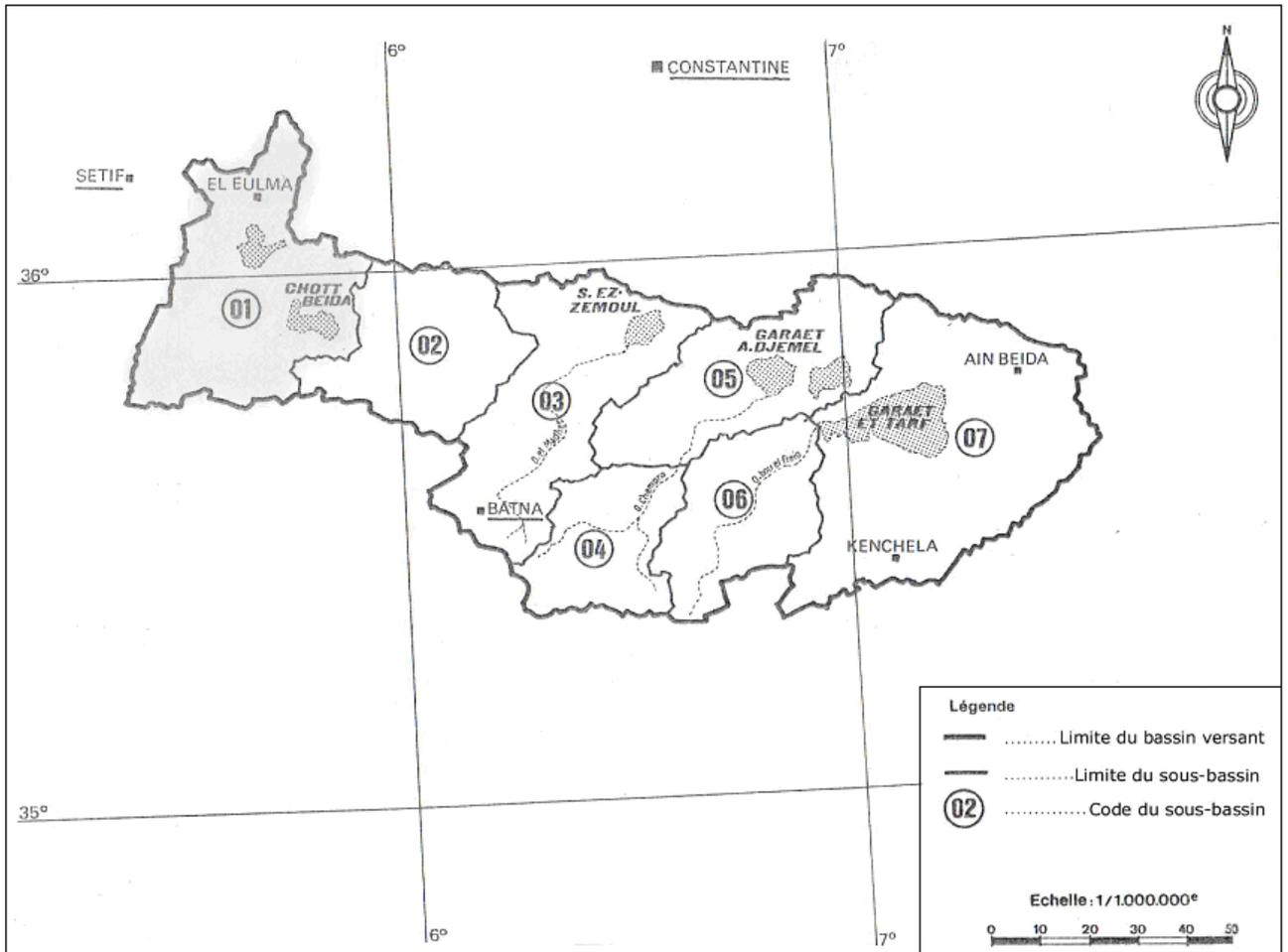


Figure 1-2 : Carte des sous-bassins des hauts plateaux constantinois

### 1-3- Délimitation et planimétrie du bassin d'El Eulma

Le bassin d'El Eulma couvre une surface de 1598 km<sup>2</sup> (Fig.1-3).

Il est composé de six sous bassins.

- Le sous bassin de Bazer (357,1 Km<sup>2</sup>)
- Le sous bassin d'El Guinguet (107,1 Km<sup>2</sup>)
- Le sous bassin d'El Madjene (23,2 Km<sup>2</sup>)
- Le sous bassin d'El Hamiet (399 Km<sup>2</sup>)
- Le sous bassin d'El Frain (126 Km<sup>2</sup>)
- Le sous bassin du Chott El Beida (584,5 Km<sup>2</sup>)

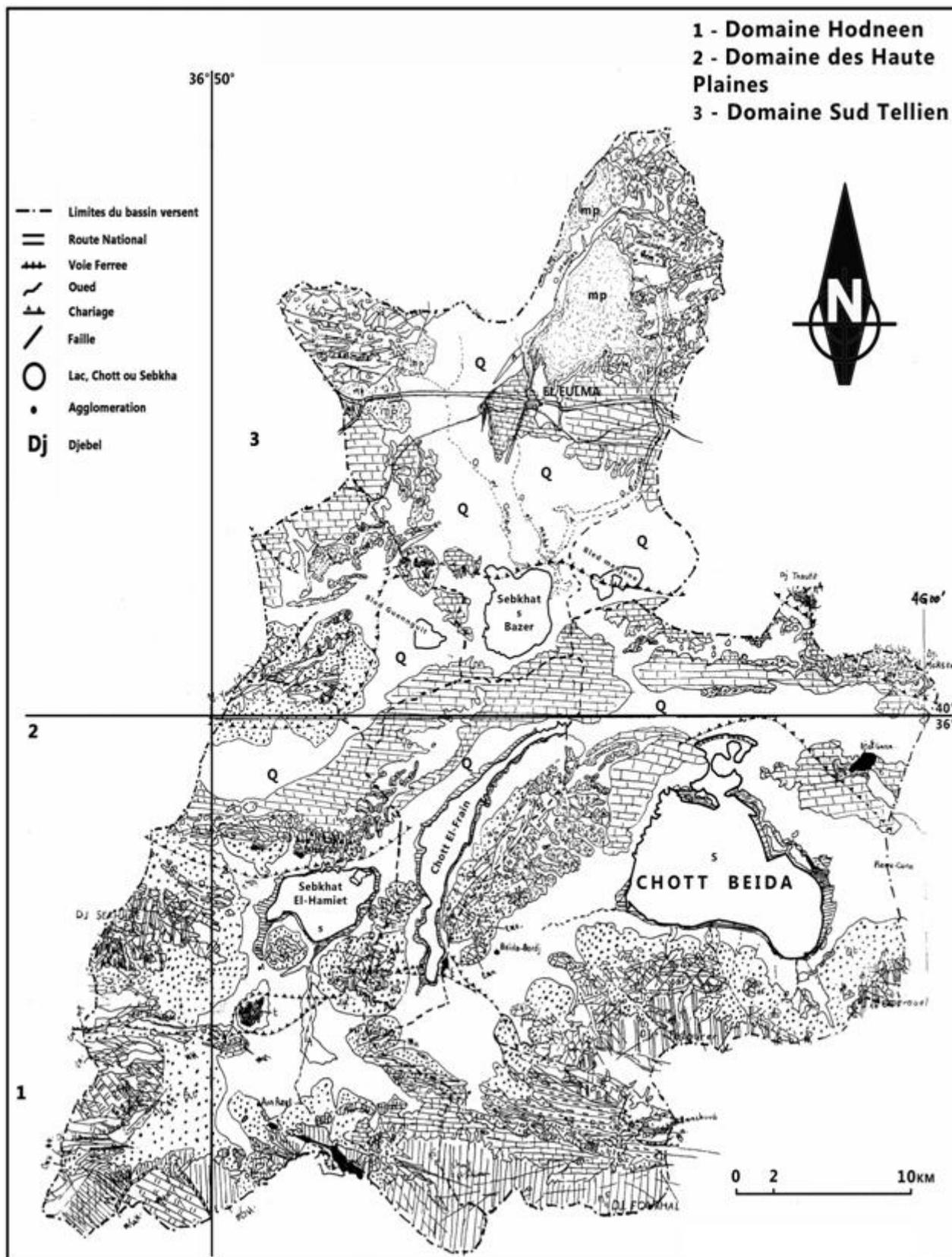


Figure 1-3 : Réseau hydrographique dans son cadre morpho-structural

### Formations récentes

- A  - Alluvions actuelles et récentes  
Q  - Terrasses, formation de pente.  
Q<sup>b</sup>  - Glacis polygéniques nappant les reliefs  
Q<sup>c</sup>  - Calcaires lacustres villa frachien formations récentes  
S  - Socls de Sebkhass et Chotts  
Q<sub>s</sub>  - Sols salés non inondables  
mp  - Mio-pliocène continental

### Nappe de Djemila (Domaine Sud Tellien)

- e<sub>m</sub>  - Ypresien Lutetien inferieur (calcaires)  
e<sub>c</sub>  - paleocène (Marneux).  
c<sub>e</sub>  - Sénonien superieur (calcaires Domes Setifiens).

### Nappe néritique Constantinoise

- n<sup>5n</sup>  - Aptien calcaire.  
n<sup>4n</sup>  - Barrémien.

### Ensemble Allochtone Sud Setifien

- e<sub>mn</sub>  - Eocène.  
ss  - Sénonien superieur.  
C  - Cénomaniens supérieur - Turonien.  
V<sup>n</sup>  - Albien - Vraconien.  
n<sup>5</sup>  - Aptien (calcaires).  
n<sup>5a</sup>  - Aptien (marneux).  
n<sup>4</sup>  - Barrémien.  
n<sup>1-3</sup>  - Néocomien.  
J  - Jurassique supérieur.  
J<sup>d</sup>  - Jurassique moyen-supérieur.  
L  - Lias.

### Série a Jurassique intermediaire de l'unité inferieur de Djebel Kalaoun

- n<sup>i</sup>  - Berriasien à valanginien.  
J<sup>s</sup>  - Malm.  
J<sup>d</sup>  - Jurassique dolomitique.

### Ensemble parautochtone et autochtones Hodneens (Domaine Hodneen)

- m<sup>H</sup>  - Miocène.  
O<sup>H</sup>  - Oligo-Miocène.  
C<sub>m</sub><sup>H</sup>  - Cénomaniens supérieur et Turonien.  
V<sup>h</sup>  - Albien-Vraconien.  
n<sup>5H</sup>  - Aptien (Carbonatés-Dolomitique).  
n<sup>5H</sup>  - Aptien (marneux).  
n<sup>4H</sup>  - Barremien.  
L<sup>H</sup>  - Lias  
T  - Trias



#### **1-4- Caractéristiques de forme**

Ce sont des caractéristiques purement géométriques des bassins que l'on peut atteindre par la seule analyse des documents topographiques.

La limite de précision de calculs sera bien évidemment liée à celle des cartes topographiques utilisées.

La forme des bassins est importante à étudier car elle conditionne directement le temps de réponse du bassin aux précipitations c'est à dire la durée du ruissellement de surface et le temps de parcours à travers le réseau de drainage.

Dans cette étude des caractéristiques de forme, plusieurs modèles ont été proposés par Gravelius, Schumm, Caquot et bien d'autres.

Pour ce qui nous concerne, nous nous limiterons ici à la méthode proposée par Gravelius.

##### **1-4.1- Indice de compacité ou coefficient de Gravelius**

Pour cet Auteur, si U en kilomètres est la longueur de la ligne de partage des eaux d'un bassin de surface f en Km<sup>2</sup>, on peut les comparer avec la plus petite circonférence que cette surface f pourrait avoir.

Les auteurs actuels utilisent une procédure simplifiée qui donne une valeur très approchée de l'Indice Gravelius.

Si Kc représente l'Indice de compacité de Gravelius, P le périmètre du bassin et, A, l'aire du bassin, on aura :

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Sur le plan morphologique, les valeurs élevées du coefficient de compacité traduisent l'allongement du bassin et donc la prédominance de l'érosion régressive où l'existence de conditions structurales entraînant une érosion linéaire.

Dans le domaine de l'hydrologie, la forme du bassin influant directement sur l'écoulement, la mesure du coefficient de Gravelius permettra d'obtenir la configuration de l'hydrogramme résultant d'une averse donnée (Tableau 1-1).

Tableau 1-1 : Résultats des calculs des altitudes maximales, minimales et dénivelées simples

S/BV	Hmax(m)	Hmin (m)	H 5%	H95%	D(m) h5%-h95%	S (km <sup>2</sup> )	A (km <sup>2</sup> )
Sebkhet Bazer Sakra	1298	907	1180	980	272	14,92	357,13
Sebkhet El Guinguet	1351	899	1080	910	170	2,3	107
Chott El Frain	1136	897	982	881	101	16,9	126,3
S/BV Sebkhet El Hamiet	1560	897	1220	900	320	12,96	400,2
Chott El Beida	1748	871	1460	875	385	62	584,76

H= altitude (m)      S= surface total (km<sup>2</sup>)  
Sous bassins      A= surface (km<sup>2</sup>)  
Sebkha ou Chott      D= dénivelées (m)

Un bassin allongé ne réagissant pas de la même manière, toutes choses étant égales par ailleurs qu'un bassin compact.

Le calcul du coefficient de compacité est simple mais un problème se pose quant aux conditions de stylisation du contour du bassin : un contour trop tourmenté où seraient enregistrées toutes les petites irrégularités conduisant à des valeurs exagérées du périmètre.

A l'inverse, une stylisation trop importante risquerait de fausser les valeurs de l'indice de raccourcissement exagéré du périmètre.

Les valeurs de l'indice de compacité (Tableau 1-2) sont très rapprochées, ce qui traduit l'homogénéité de forme des différents sous-bassins.

Tableau 1-2 : Résultats de calcul des coefficients de compacité des S/BV d'El Eulma

Sous-bassin versant	Sebkhet Bazer	Bled El Guinguet	Chott El Frain	Chott Beida	Sebkhet El Hamiet
Superficie (Km <sup>2</sup> )	357,13	126,36	107,08	400,2	584,76
Périmètre stylisé P (Km)	84	52	42	92	112
Indice de compacité (Kc)	1,24	1,29	1,13	1,28	1,29
Forme	losange assez compact	losange assez compact	ramassée légèrement étiré	ramassée	ramassée

En valeur absolue, les indices sont peu élevés : cela signifie que les temps de concentration des crues seront plus spécialement liés à la pente des thalwegs alimentant les dépressions fermées.

#### 1-4.2- Relief et indice de Pente

Ne serait-ce que par le bon sens, il est aisé de comprendre que le relief à une forte influence sur l'hydrogramme de crue.

Une pente plus forte provoque un écoulement plus rapide donc un temps de concentration plus court et une montée plus raide de la partie de l'hydrogramme correspondant à la crue.

##### a- Etude et représentation des altitudes

Le tableau 1-3 nous donne une répartition altimétrique par tranche de 100 mètres pour le sous bassin du Chott El Beida.

Tableau 1-3 : Répartition des fréquences altimétriques du bassin versant de Chott El Beida

Tranches d'altitude (m)	Dénivelée (m)	Surfaces partielles (km <sup>2</sup> )	Surfaces cumulées (km <sup>2</sup> )	Surfaces partielles %	Surfaces cumules %
> 1600	-	0,88	0,88	0,15	0,15
1600- 1500	100	1,93	2,81	0,33	0,48
1500- 1400	100	4,44	7,25	0,76	1,24
1400 - 1300	100	10,23	17,48	1,75	2,99
1300- 1200	100	25,32	42,80	4,33	7,32
1200- 1100	100	23,62	66,42	4,04	11,36
1100- 1000	100	48,60	115,02	8,31	19,67
1000-900	100	270,80	385,82	46,31	85,98
<900	-	198,93	584,75	34,02	100

La zone d'étude se présente comme une immense surface plane, parsemée de quelques Djebels ou reliefs vigoureux dont les plus importants sont Djebels Fourhal 1748 m, Drâa Akhennchoub 1578m, Djebel Mahdjouba 1492 m et Djebel Tafouner 1449 m, au sud du chott El beida.

Les Djebels Tafeliount 1616 m. Tazila 1560 m et el Menés 1444 m forment la limite sud du sous bassin El hamiet alors qu'à l'Est le sommet le plus élevé est celui Djebel Sekrine et Kef El Ahmer avec respectivement 1453 m et 1351 m d'altitude.

Au Nord de la zone d'étude, seuls les sommets de Djebel Tavoudeche au Nord-Ouest. Djebel Braou à l'Ouest de Bazer et Djebel Tnoutit à l'Est dépassent 1150 m d'altitude.

Les secteurs d'altitude supérieure à 1400 m ne représentent que 16 km<sup>2</sup>; soit environ 1% de la superficie totale; ils correspondent aux sommets déjà cités précédemment.

Les zones d'altitude comprises 1400-1200 m sont très peu étendues; dans le bassin, avec seulement 71 km<sup>2</sup>; soit, environ 4,5% de la surface total du bassin versant.

Les secteurs d'altitudes comprise entre 1200-900 m couvrent presque la totalité du bassin versant avec 1278km<sup>2</sup>, soit environ 80% de la superficie totale.

Enfin les zones d'altitudes inférieures à 900 m. représentant plus de 235km<sup>2</sup> de la superficie totale.

Les quatre dépressions (chott El Beida. chott Frain. Sebkhath El Hamiet et Sebkhath Bazer) couvrent à elles seules une superficie de 15 %.

### **b- courbe hypsométrique et altitude moyenne**

La plupart des facteurs météorologique (Température, pluie) et hydrologique (débit spécifique en particulier), sont étroitement liés à l'altitude.

D'après Strahler (1952), une courbe hypsométrique est le reflet de l'état d'équilibre dynamique potentiel du bassin versant.

Toutes les courbes tracées des sous bassins de notre région sont caractéristiques d'un système, pénéplaine disposant de buttes résiduelles ou état de monadnock (Figs. 1-5 à 1-10).

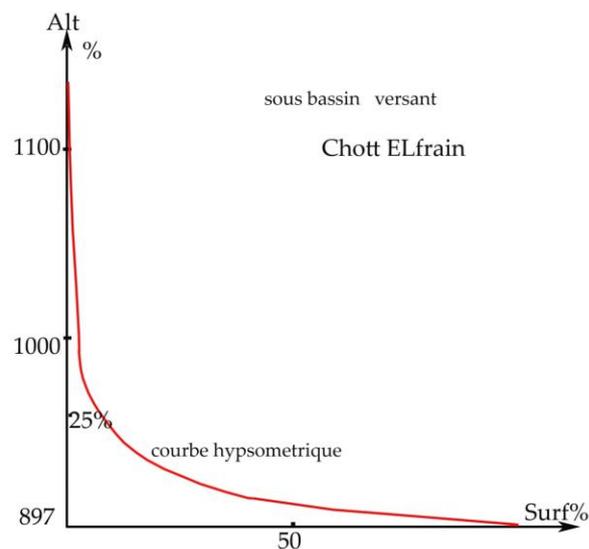


Figure. 1-5 : Courbe hypsométrique  
Du sous bassin versant de Chott El Frain.

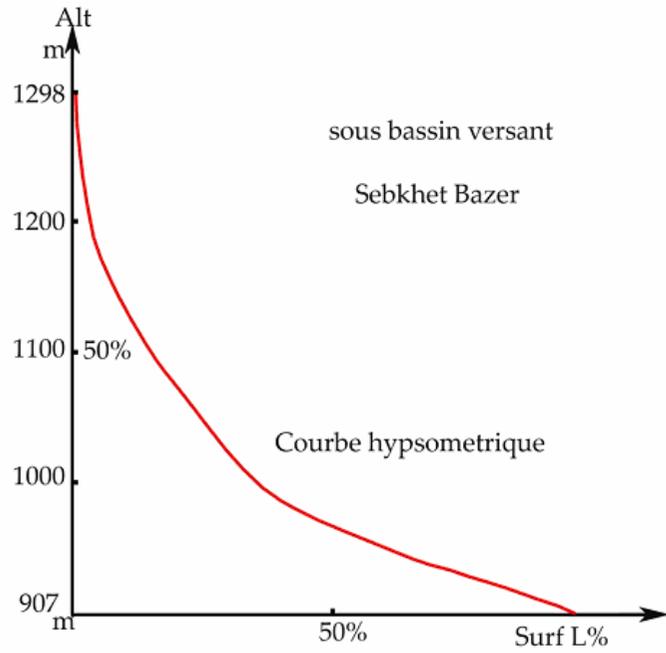


Figure. 1-6 : Courbes hypsométriques  
du sous bassin versant de Bazer

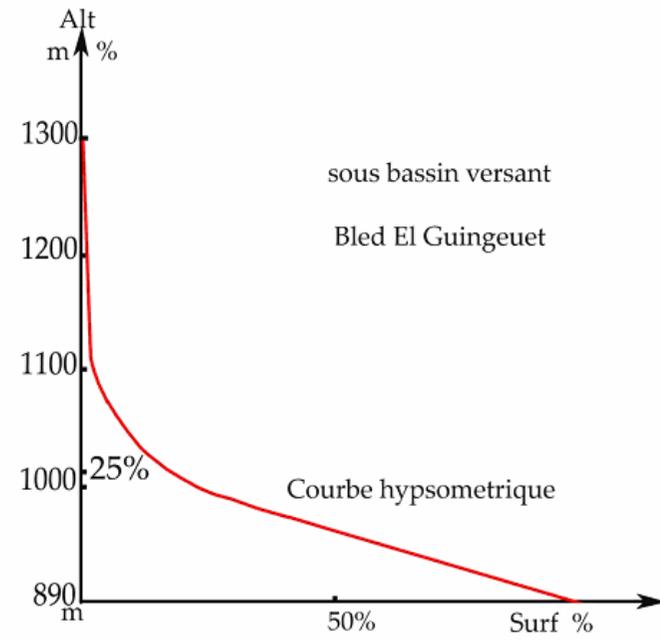


Figure. 1-7 : Courbes hypsométriques  
du sous bassin versant d'El Guinguet

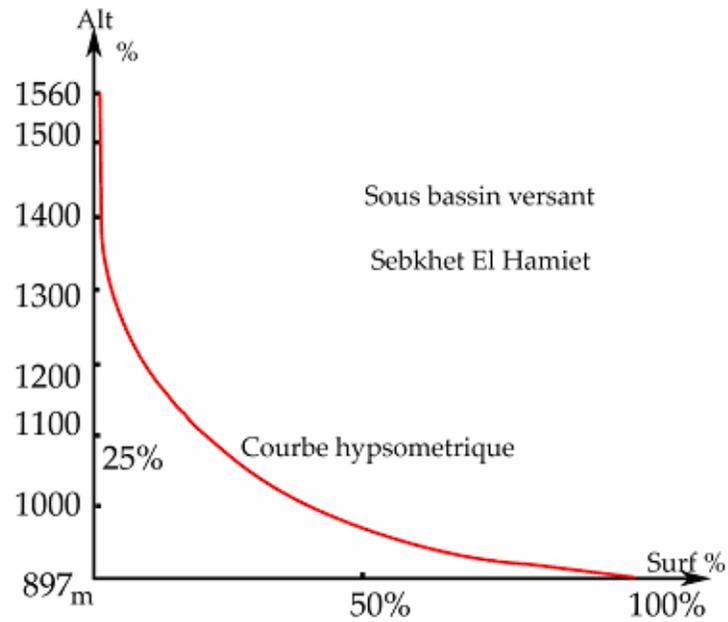


Figure 1-8 : Courbe hypsométrique du sous bassin versant d'El Hamiet

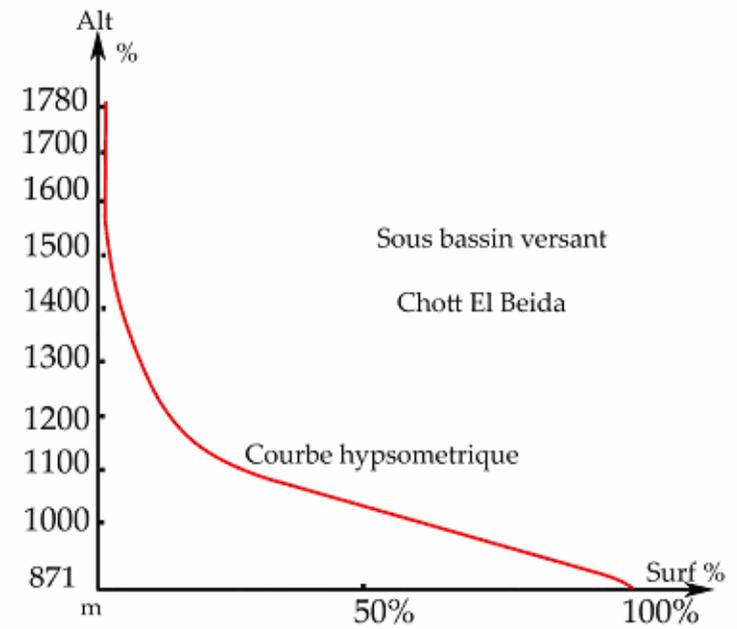


Figure 1-9 : Courbes hypsométriques du sous bassin versant d'El Beida

L'influence du relief apparaît nettement sur les courbes tracées et sur la courbe hypsométrique synthétique (Fig. 1-10). Il en ressort, qu'étant donné les faibles pentes, il apparaît clair qu'il y a des risques d'inondation lors des pluies torrentielles.

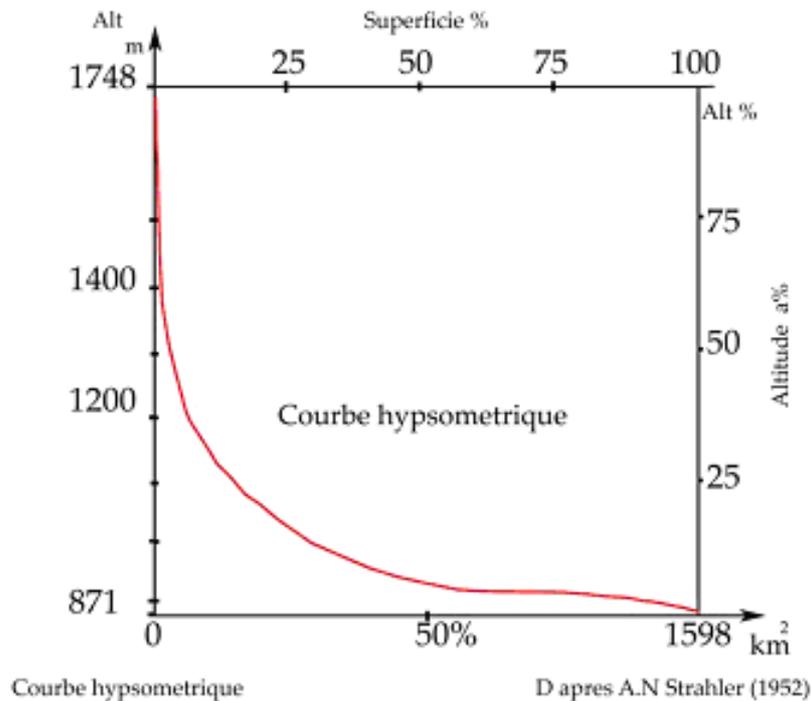


Figure 1-10 : Courbe hypsométrique synthétique des sous bassins

L'altitude moyenne et l'altitude médiane du bassin versant est fonction de la dispersion différentes tranches d'altitude. Elles sont obtenues de la courbe hypsométrique et du diagramme des fréquences altimétriques (Figs. 1-11 et 1-12).

Les résultats sont présentés au tableau 1-4.

$$h_{\text{moy}} = s/L$$

$h$  = Hauteur moyenne à partir du plan de base adopté

$s$  = Surface planimétrée de la courbe enveloppe représentant la valeur du bassin versant;

$L$  = longueur abscisse de la courbe représentant, par définition la surface du bassin versant en projection sur un plan horizontal qui est celui de la carte.

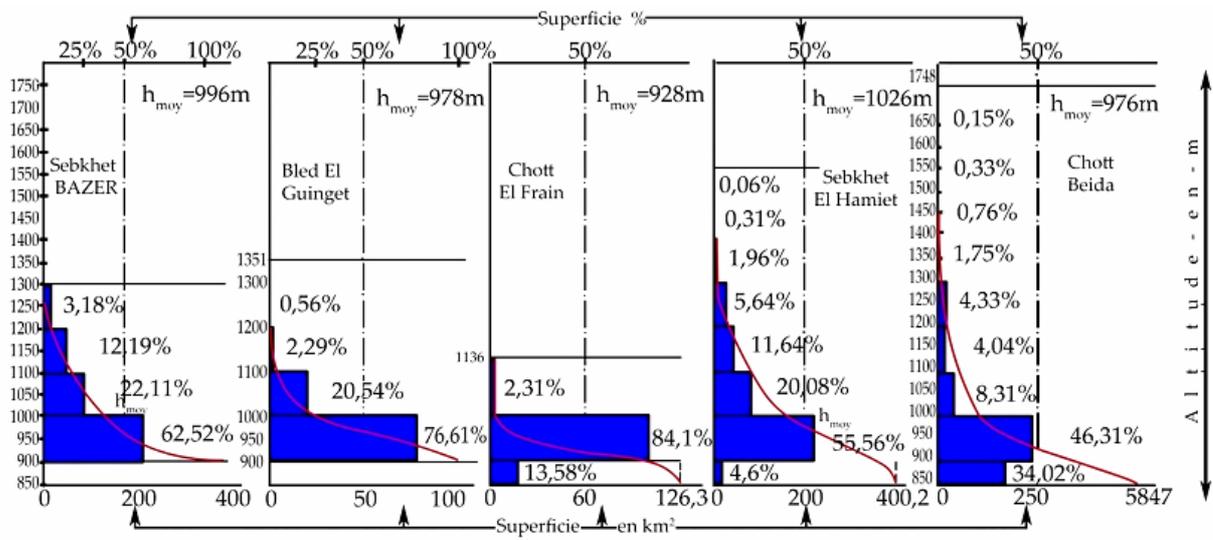


Figure 1-11 : Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques des sous bassins du bassin versant du pays des lacs

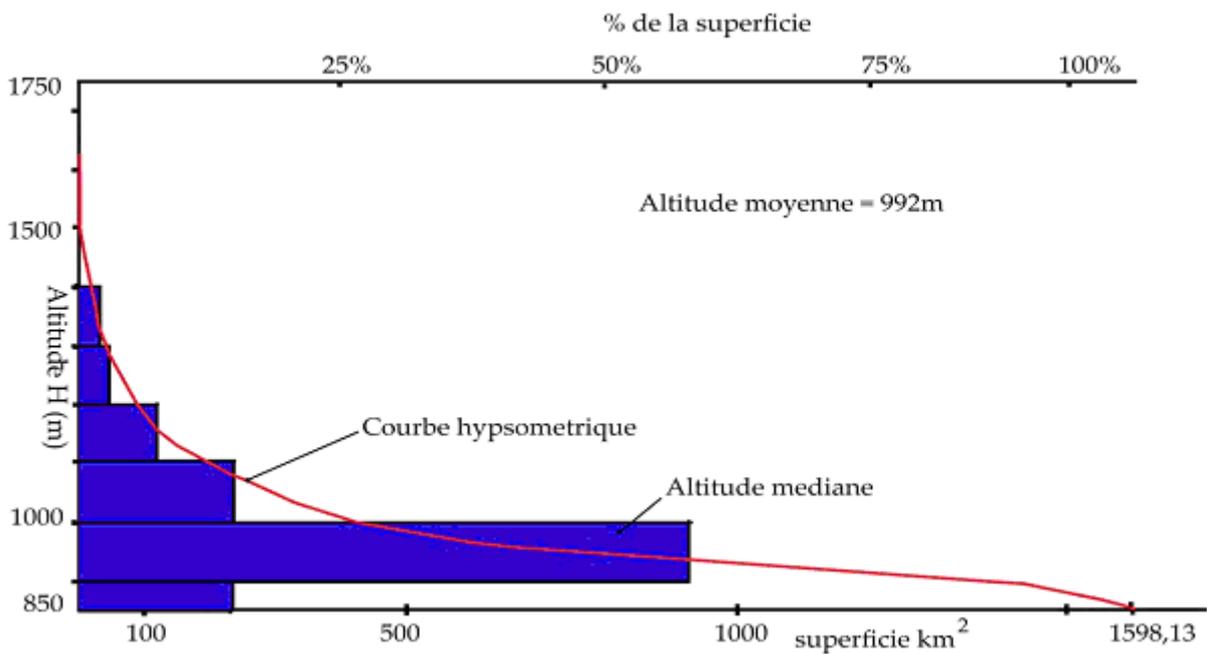


Figure 1-12 : Courbe hypsométrique et diagramme des fréquences altimétriques du bassin versant du pays des lacs.

Tableau 1-4 : Altitudes moyennes et altitudes médianes des bassins d'El Eulma

	Sebkhet Bazer	Bled El Guinguet	Chott El Frain	Chott Beida	Sebkhet El Hamiet
H (m) Altitude moyenne	996	978	928	976	1026
h 50%	960	965	923	926	984

### c- Recherche d'un modèle de représentation "rectangle équivalent"

Ce modèle (Roche, 1962) permet de comparer facilement les bassins entre eux par rapport aux caractéristiques relatives à l'écoulement. Par une simple transformation géométrique, le contour devient un rectangle de même périmètre, les courbes de niveau des droites parallèles au petit côté du rectangle, l'exutoire l'un des petits côtés du rectangle appelé "Rectangle équivalent".

Si les côtés du rectangle sont respectivement L et I ; Kc l'indice de compacité ou de Gravelius, nous obtenons :

L'aire du bassin A ; soit,  $A = L \times I$

Et le périmètre du bassin ; soit,  $P = 2(L + I)$

Les valeurs de L et I sont donc les racines d'une équation de 2ème degré et nous aurons :

$$L = \sqrt{A} \frac{Kc}{1,12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$$

Et

$$I = \sqrt{A} \frac{Kc}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,12}{Kc} \right)^2} \right]$$

Les résultats sont exposés au Tableau 1- 5

Tableau 1- 5 : Longueur du rectangle équivalent des sous bassins d'El Eulma des sous-bassins Bazer, Guinguet, El Frain, El Hamiet et Chott El Beida.

Sous-bassin	Sebkhet Bazer	Bled El Guinguet	Chott El Frain	Chott Beida	Sebkhet El Hamiet
Kc	1,24	1,13	1,29	1,28	1,29
A (Km <sup>2</sup> )	357,13	107,08	126,08	400,22	584,76
A	18,89	10,34	11,24	20,00	24,18
L (Km)	29,88	11,81	19,36	33,92	41,66

#### d- Indice de Pente

Partant du rectangle équivalent, M. Roche a introduit la notion d'indice de pente  $I_p$  qui est la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments compris entre deux courbes de niveau  $d_i$  et  $d_{i-1}$ .

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i \cdot d_i}$$

$I_p$  : Indice de pente de Roche.

$L$  : Longueur du rectangle équivalent en km.

$d_i$  : Distance ou dénivelle qui sépare les deux courbes de niveau sur le rectangle équivalent.

$a_i$  :  $a_i - a_{i-1} / A$ ; fraction en pour cent (%) de la surface totale du bassin comprise entre les côtes  $a_i$  et  $a_{i-1}$

$A$  : surface totale du bassin en  $km^2$ .

Dans l'ensemble les pentes sont faibles et dépassent en rares exceptions les 12%. Les plaines alluviales notamment et les glacis à croûtes, dans leur majorité présentent des pentes inférieures à 2% et ce n'est que dans les parties en amont de ces dernières ou dans les secteurs tectonisés que se notent des dénivelées plus importantes.

#### e- Indice de pente globale

L'indice global  $I_g$ , plus facile à estimer que l'indice de pente  $I_p$ , est également défini par M. Roche (1963). Les résultats montrent des valeurs faibles de  $I_g$  (relief modéré) caractérisant les Hautes Plaines Sétifiennes, relativement plate et homogène (Tableau 1-6).

Tableau 1-6 : Résultats des calculs de l'indice de pente global  $I_g$  avec les classes de reliefs correspondants selon l'ORSTOM.

Sous bassin versant	Sebkhet Bazer	Bled El Guinguet	Chott El Frain	Chott Beida	Sebkhet El Hamiet
D(M)	275	170	70	322	400
L(Km)	29,88	11,80	19,36	33,92	41,66
$I_g(m/Km)$	9,20	14,39	5,16	9,49	9,60
Classe de relief	Faible	faible ou modéré	très faible	faible	faible

$I_g = D/L$

$L$  = Longueur du rectangle équivalent

$I_g$  = Indice de pente global (ORSTOM)

$D$  = Dénivelée simple, déduite directement de la courbe hypsométrique.

Elle représente la distance verticale (en m) qui sépare les altitudes ayant 5% de surface du bassin versant au dessus et en dessous d'elles.

Les valeurs de  $I_g$  calculées pour les différentes unités sont seulement indicatives.

### 1-5- Réseau hydrographique et densité de drainage

Le réseau hydrographique s'est trouvé désorganisé par l'effet combiné des phases tectoniques du Pliocène supérieur et l'assèchement du climat. Ainsi s'explique l'existence des phénomènes endoréiques dans les Hautes Plaines, traversés autrefois par des branches supérieures de l'Oued Rhumel en particulier Oued Dehamcha et Oued Dehab (Fig. 1-13).

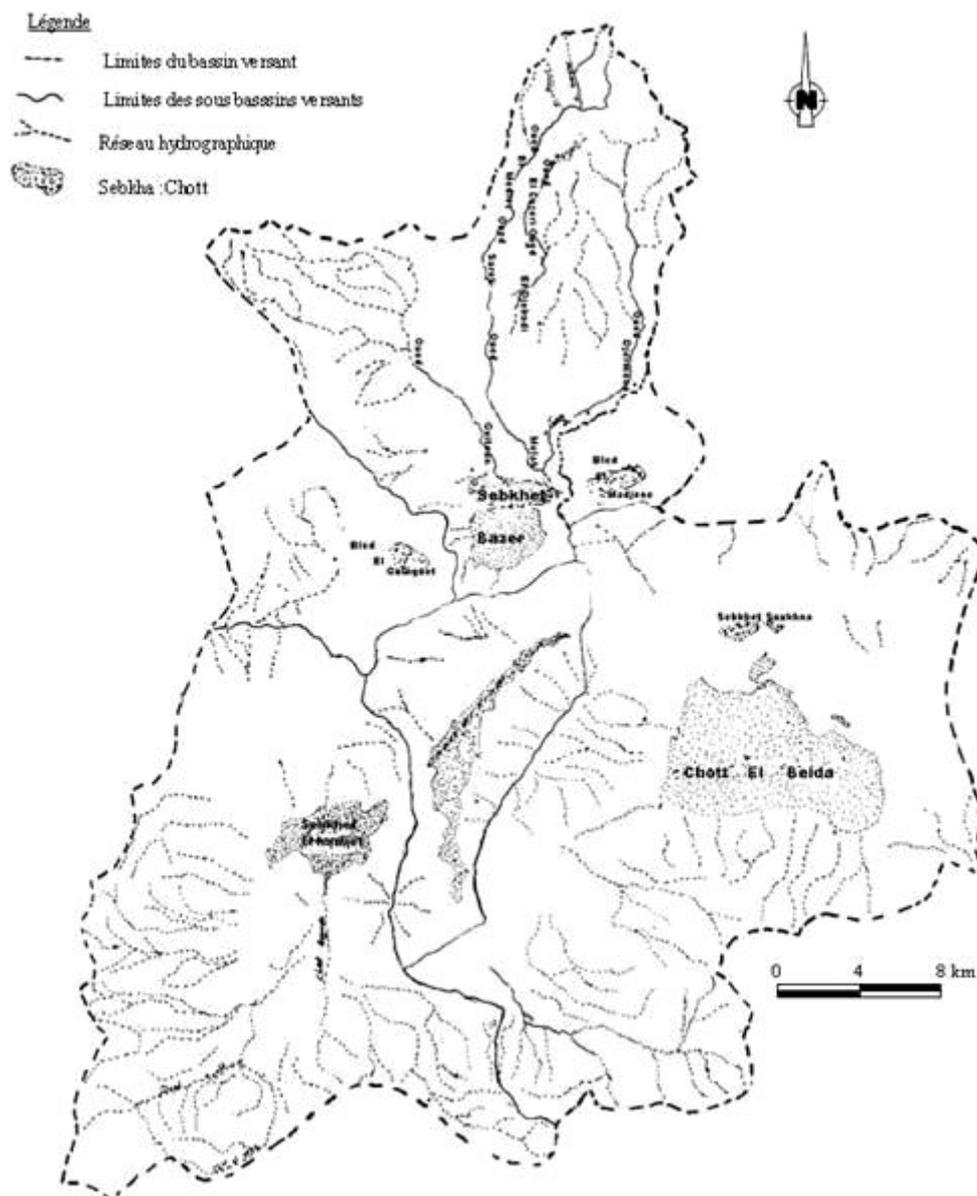


Figure 1-13 : Chevelu Hydrographique des sous Bassins Versants D'El Eulma

La densité de drainage représente le rapport entre la longueur des cours d'eaux drainant le bassin et la superficie du bassin. Elle donnée par la relation :

$$D_p = \frac{\sum_1^s L_x}{A} \quad \text{En km/km}^2$$

$L_x$  : Longueur totale cumulée des cours d'eaux en km et  $A$  : surface du bassin en  $\text{Km}^2$ .

Dans l'ensemble, la densité de drainage temporaire est nettement plus élevée dans la région des hautes plaines (cas de notre zone d'étude) où la majeure partie, des drains est à sec la plupart du temps. En effet la faible densité de drainage permanente est étroitement liés à 2 facteurs principaux : la lithologie et l'abondance des précipitations, ainsi que l'évapotranspiration très élevée (Tableau 1-7).

Tableau 1-7 : Densité de drainage du bassin de Bazer

longueur totale des drains pérennes (km)	$L_p$	49,3
Longueur totale des drains remittants (km)	$L_t$	153.7
Longueur totale des drains pérennes et remettants	$L_p + L_t$	203,0
densité de drainage pérenne ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ )	$D_p$	0,13
densité de drainage rémittante ( $\text{km}/\text{km}^2$ )	$D_t$	0,43
densité de drainage totale ( $\text{km}/\text{km}^2$ )	$D_p + t$	0,56
densité drains pérennes / densité totale (%)	$D_p/D_p+t$	23
Aire du bassin $\text{km}^2$	$A$	357.1

### 1-6- Sols et végétation

Les sols sont composés de matériaux divers et la végétation y est appropriée essentiellement au climat. On distingue :

- les milieux en général non productifs sur le plan biologique, lieux urbanisés, routes principales et secondaires, réseau hydrographique, sebkhas et chotts (1.6%) ;
- terres cultivées vouées aux céréales, non irriguées (67% ) ;
- terres cultivées irriguées (4,9%) ;
- prairies des végétaux halophiles (1,7%) ;
- friches, parcours, divers (7,4%) ;
- ravins ou zones très érodées (0,4%) ;
- zones reboisées (1,2%) ;
- forêts (10,2%) ;
- zones cultivées non irriguées (5,6%).

La presque totalité des surfaces est cultivée et seules quelques terres alluviales et glaciaires à croûte calcaire superficielle qui pour la plupart appartiennent à l'Etat servent de pâturage pour le bétail. Sur les alluvions, on relève les associations végétales à cynodon dactylon et hordeum martimum. Sur les terrains salés proches de la sebkha de Bazer apparaissent des groupements halophiles représentés par Sueda fruticosa et diverses Atriplex. Les croûtes superficielles sont caractérisées par thymus algériensis etc.

### **1-7- Géomorphologie**

On peut schématiser les unités géographiques par deux types (Fig. 1-14).

- Une série de glacis étages conduisant du versant montagneux à une gouttière. Les remblaiements Plio-quadernaire ont généralement moins de 100 mètres d'épaisseur, les formes dominantes sont assurées par les glacis anciens.

- Les piémonts sont beaucoup moins différenciés, les glacis très courts. Les remblaiements peuvent atteindre 300 à 500 mètres d'épaisseur. Les formes dominantes sont assurées par l'immense plaine d'accumulation sub-horizontale non encroûtée.

Les Hautes Plaines se présentent comme une mosaïque de petits éléments juxtaposés.

Les composantes sont relativement simples : massifs calcaires, glacis encroûté, Merdja; sebkha.

#### **1-7.1- Les surfaces aplanies**

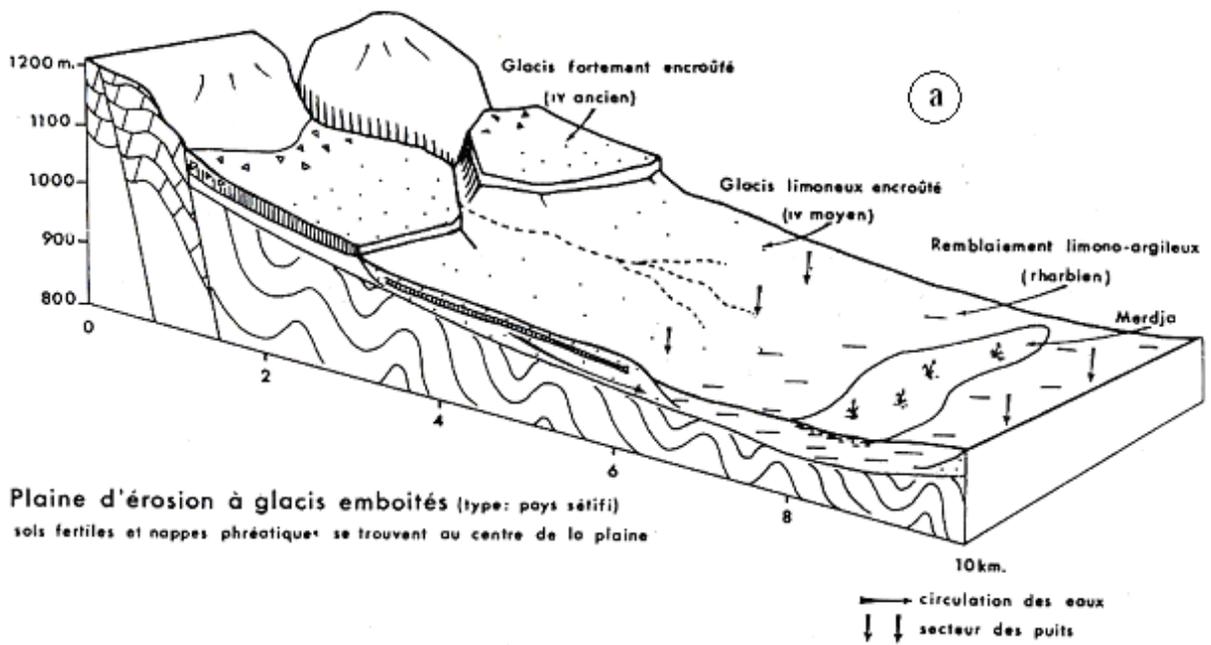
L'aplanissement peut avoir deux causes.

- La rigidité de la structure (Meseta), le socle ancien proche permet de considérer qu'elle est constituée par la "dalle" calcaire (néritique). Cette dernière s'étant trouvée déplacée vers le Sud lors des grandes poussées septentrionales de la fin du Tertiaire.

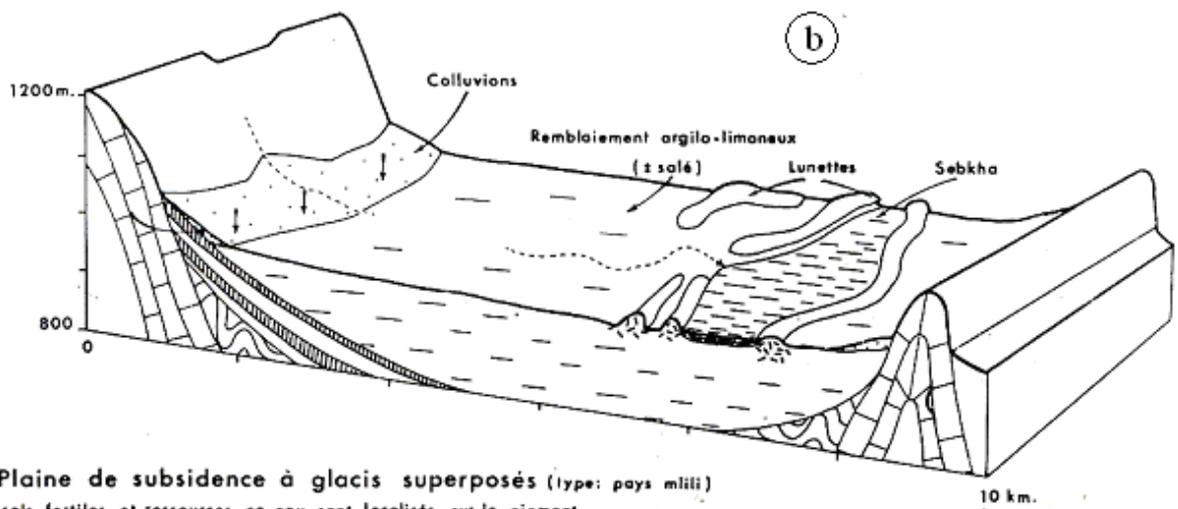
Cette dalle calcaire (néritique) portée en position haute et réfractaire aux plissements sous-tend toute la région.

- La faible épaisseur des sédiments post-Crétacés explique que les grandes phases orogéniques du Tertiaire se sont traduites par une tectonique plus cassante que plissée, les massifs sont plus des horsts que des anticlinaux, et les bassins sont plus des grabbens que des synclinaux.

Les Hautes Plaines ont évolué comme une série de petits compartiments. Les érosions postérieures, limitées sur ces massifs durs, et les remblaiements limités également n'ont pas modifié cette topographie contrastée léguée par la tectonique.



**Plaine d'érosion à glacis emboîtés (type: pays sétifi)**  
sols fertiles et nappes phréatiques se trouvent au centre de la plaine



**Plaine de subsidence à glacis superposés (type: pays mlili)**  
sols fertiles et ressources en eau sont localisés sur le piémont

Figure 1-14 a et b : Types d'organisation des milieux physiques dans les hautes plaines (D'après Cote 1981)

C'est la rigidité de cette structure qui explique à la fois l'individualité des Hautes Plaines faces aux autres domaines et le morcellement en petites imités.

Le bâti est très complexe géologiquement (nappes charriées) mais très simple : Structurellement, le plancher est troué ça et là par un petit massif calcaire qui peut prendre l'allure d'un inselberg (ex. Dj. Braou,...)

La rigidité des paysages des Hautes Plaines est encore accrue par un second phénomène : Les coups de rabots du Quaternaire, toutes (es phases humides du Quaternaires se sont traduites par une érosion de surface, façonnant en glacis les marnes argiles ou autres matériaux des plaines. Tous les hauts niveaux du pays des lacs ont été façonnés au Plio-villafranchien. Des niveaux Moulouyen s'inscrivent en contre bas des glacis récents ont retouché l'ensemble. Les Hautes Plaines sont des plaines d'érosion.

La topographie des Hautes Plaines relativement jeune façonnée au Quaternaire est aujourd'hui figée parce que les eaux de ruissellement ne les ont que rarement attaquées. Elles ont conservé leurs surfaces aplanies héritées du Quaternaire.

Les Hautes Plaines semi-arides sont le domaine des croûtes calcaires : dalle croûtes et encroûtements favorisent la circulation phréatique.

### **1-7.2- Marques de l'endoréisme**

La conjonction des phénomènes topographiques et la semi aridité du climat ont donné naissance à un phénomène d'endoréisme qui se traduit par la présence de cuvettes fermées (sebkhas, Chotts) qui jalonnent d'Ouest en Est le pays des lacs. Les dépressions s'expliquent essentiellement par la tectonique.

### **1-8- Conclusion**

La forme du bassin versant peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment sur la relation pluie-débit et sur l'évolution des écoulements en période de crue. Autrement dit, outre la nature de l'averse, ce sont les caractéristiques morphologiques du bassin qui conditionnent la forme des hydrogrammes observés à l'exutoire. Les formules et indices cités précédemment permettent de chiffrer ces caractéristiques.

L'une des crues les plus meurtrières et dévastatrices qui frappé la ville d'El Eulma fut celle du 01 septembre 1981 qui survint consécutivement à une situation météorologique propice au développement des orages. Un orage exceptionnel sur l'amont du bassin versant, a provoqué une crue violente et de courte durée. Cette crue dévastatrice (avec des dégâts humains et matériels) fut consécutive à une pluie intense, couplée à cet environnement

géomorphologique propice au ruissellement.

Toutefois ce phénomène de crues dévastatrices qui ont des effets parfois catastrophiques pour les populations locales peut être endigué en amont par l'action de l'homme, au travers d'actions maîtrisables et à l'efficacité reconnue comme :

- le reboisement en amont des sous bassins versants à risque surtout pour la zone septentrionale du bassin versant ;

- la construction de barrage comme c'est le cas de l'oued Medjez au niveau de sous bassin versant de Bazer ou de retenues collinaires. Ces barrages ou retenues collinaires en plus d'atténuer l'ampleur des crues, ils permettent la recharge de formation perméables (exemple les calcaires du Maestrichtien de la nappe de Djemila).

Toujours au point de vue risque d'inondations, nous avons noté que de nouvelles constructions ont été édifiées ces dernières années sur d'anciennes dayas (zones inondables) ; exemple, dans les dépressions de Bled Guinguet et Bled El Madjene dans le bassin de Bazer et dans la dépression de sebkhet El Hamiet au sud- ouest de la sebkha de Bazer.

## Chapitre II

### GEOLOGIE

#### 2-1- Introduction

Depuis les anciens travaux (Savornin, 1920), la région des Hautes Plaines Sétifiennes est restée en marge des préoccupations des géologues travaillant en Algérie,

La seule étude apportant une révision de fond est celle de Caire (1970); mais, ses levés tant au 1/50 000 qu'au 1/200000 sont inédits.

Glaçon (1967) a essentiellement traité les aspects miniers en se servant des travaux de Savornin (1920) pour de nombreux massifs tels que les Djebels Youssef, Zdimm ...etc. Puis, Guiraud (1973), apporta des précisions stratigraphiques grâce aux observations au niveau du Djebel Brao. Benzerga (1974) a regroupé les séries des massifs des Djebels Brao et Youssef avec celles du môle néritique constantinois.

Les travaux de Vila et Leikine (1974-76), dans le cadre de mise en valeur de la région de Sétif, ont précisé la cartographie des Hautes Plaines Sétifiennes, reprenant ainsi les travaux récents de Guiraud. Puis en 1980, les travaux relativement récents de Vila ont apporté une synthèse de la géologie du Nord de l'Algérie orientale.

C'est en nous appuyant sur ces différentes études que nous avons établi la série litho-stratigraphique que nous présentons ici.

#### 2-2- Disposition générale

L'aire étudiée appartient à la chaîne Alpine qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale au Nord de la flexure saharienne. Cet orogène n'est lui même qu'une partie des chaînes qui ceignent la méditerranée occidentale depuis les Iles des baléares. (Fig. 2-1).



Figure 2-1 : Structure générale de la chaîne des Maghrébides dans le cadre Alpin de la méditerranée occidentale (D'après Durand-delga et Fontboté, 1980)

Le sud sétifien se rattache aux zones externes septentrionales des Maghrébides d'Algérie nord-orientale.

Cette chaîne est un tronçon de la chaîne alpine d'Afrique du Nord qui s'étend du Rif à la Sicile le long du littoral africain de la méditerranée (Fig.2-2). Le domaine orogénique maghrébin, d'âge Cénozoïque, comporte le Tell-Rif (« Maghrébides ») et les Atlas. Le Tell-Rif est interprété classiquement comme une chaîne de type alpin, c'est-à-dire résultant de la fermeture de la Téthys maghrébine; les Atlas, à l'inverse, sont compris comme des orogènes intracontinentaux.

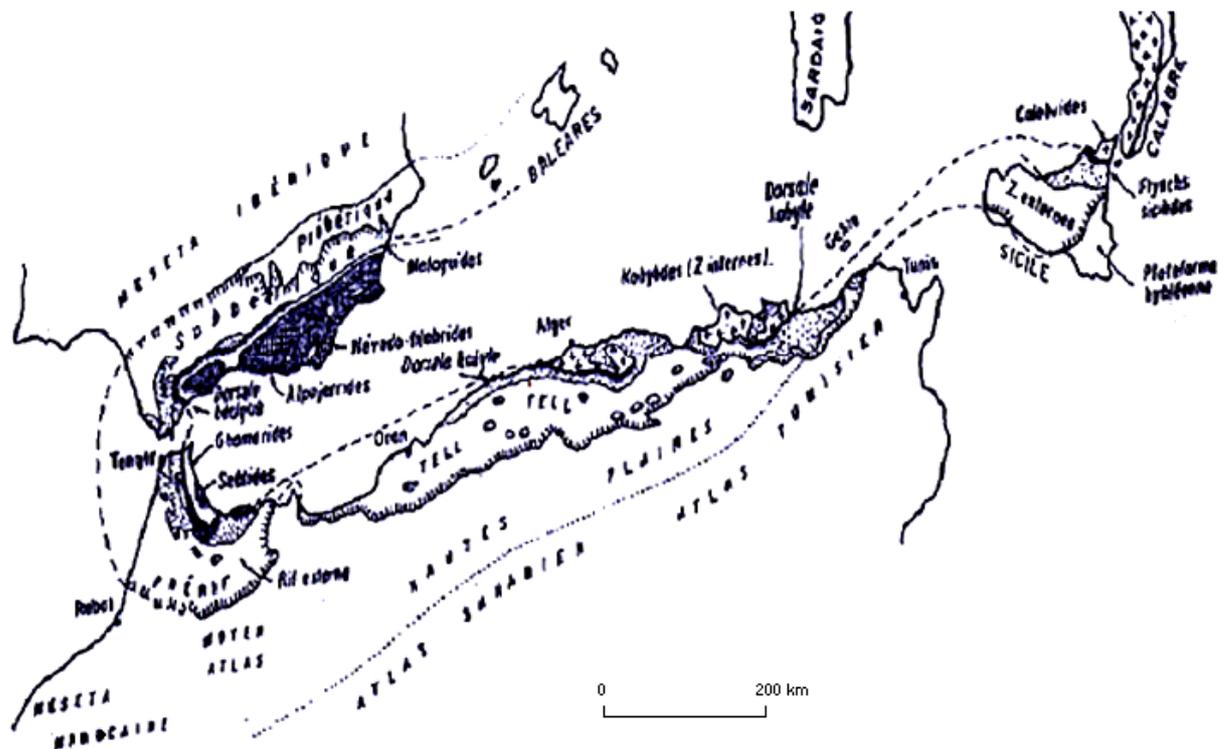


Figure 2-2 : L'orogène alpin périméditerranéen (D'après Durand-delga, 1969)

Si on considère une coupe transversale de la chaîne alpine, à l'échelle de la méditerranée occidentale (Fig.2-3), on rencontre la distribution suivante :

- Au centre, une zone interne caractérisée par la prédominance des affleurements métamorphiques.
- Latéralement, apparaissent successivement les séries sédimentaires du mésozoïque et du cénozoïque qui constituent les chaînes calcaires, bande étroite et discontinue.
- A l'extérieur, ce sont les domaines parautochtones et autochtones : mésétas Ibériques et Marocaines auxquelles on peut rattacher en Algérie l'ensemble atlasique.

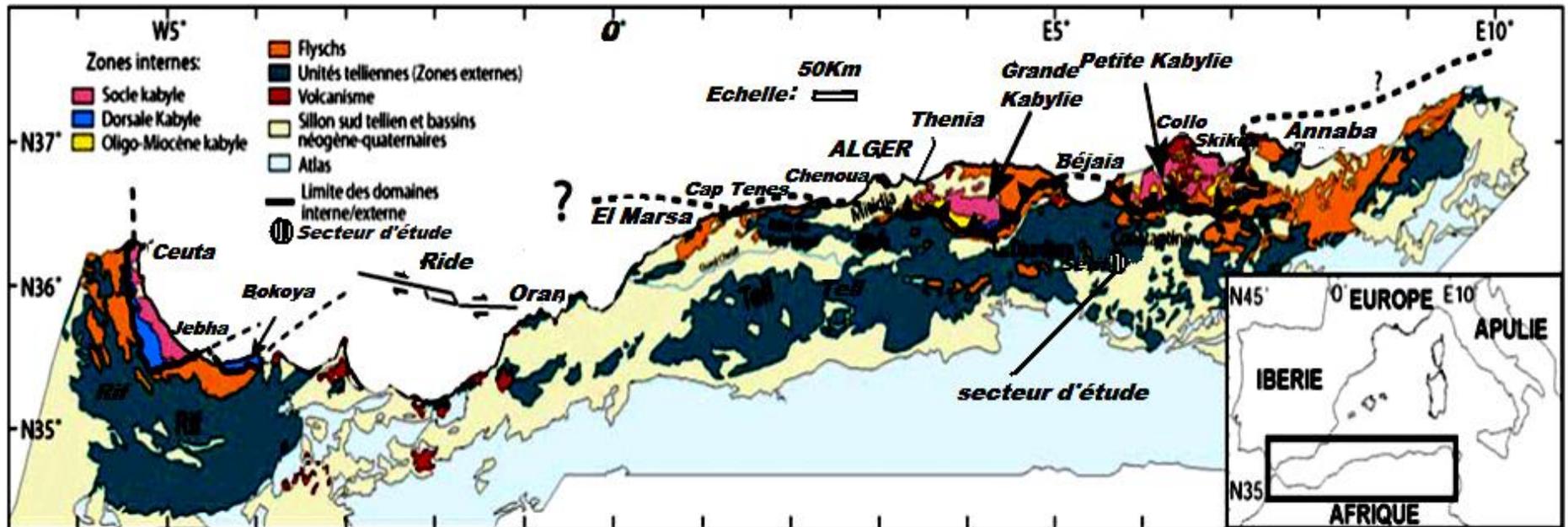


Figure 2-3 : Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (D'après Domzig, 2006)

Le long et au sud de cette frontière de plaques, entre l'Afrique et l'Europe, cette limite de plaques complexe est accommodée, soit par subduction en méditerranée orientale, soit, en Méditerranée occidentale où les failles inverses d'orientation ENE–WSW sont les structures dominantes. L'édifice orogénique de la chaîne des Maghrébides (Fig.2-4) résulte de la structuration du bassin maghrébin de ses marges (qui se situait entre les marges continentales africaine et européenne) lors des phases tectoniques tertiaires. Ce bassin était le siège d'un coulissage Afrique –Europe synchrone de l'ouverture de l'atlantique et de la Téthys au Jurassique (Wildi, 1983 ; Kazi-Tani, 1986 ; Mahdjoub, 1992 ; Bouillin, 1992)

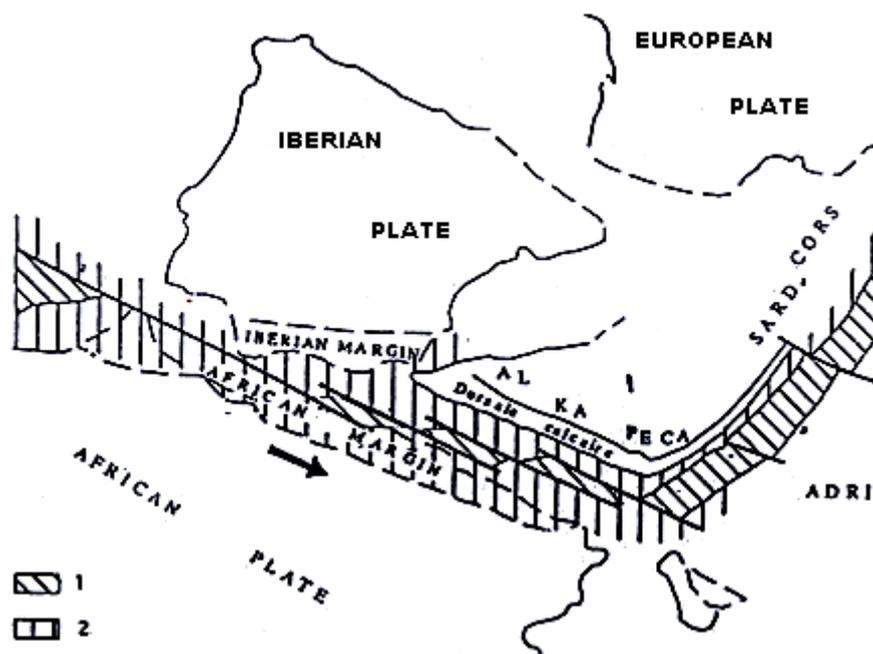


Figure 2-4 : Position des zones internes et du bassin des flyschs (D'après Bouillin et Al, 1986)  
1 : Croûte Océanique ; 2 : Croûte continentale amincie.

### 2-3- Dispositions des domaines de l'Algérie nord-orientale

L'orogène maghrébin comprend, au Nord, les zones internes marquée par les massifs primaires de petite et grande Kabylie, le socle Kabyle métamorphique et la dorsale Kabyle sédimentaire. Les zones internes, issues du domaine Alkapecca (Alboran–Kabylies–Péloritain–Calabre) ou domaine méso-méditerranéen, représentent un terrain éclaté d'origine européen ou adriatique). Les zones externes ou zones Telliennes correspondant aux différents domaines situés paléo géographiquement sur la paléomarge Africaine. Ces zones présentent un caractère chevauchant vers le Sud (Fig. 2-5).

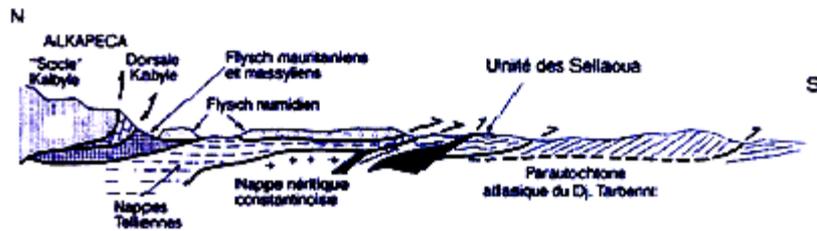


Figure 2-5 : Coupe générale des Maghrébides dans l'Est algérien (Vila, 1980)

Les flyschs correspondant à la couverture sédimentaire de l'ancien océan Téthys sont composés par une double série occupant une position essentiellement par rapport aux zones externes. Ils reposent avec des modalités variées sur les zones internes ou chaînes calcaires. A l'échelle de l'Algérie du Nord-est, une zonation plus fine peut être établie. Sur une transversale Nord-Sud (Fig.2-6), les principales zones définies à la fois par leurs caractères sédimentaires et structuraux sont :

**2-3.1- Le socle Kabyle :** Ensemble métamorphique (quartzites, micaschistes, Phyllades) surmonté en discordance par du Paléozoïque :

Surmontant ces terrains anciens, vient ensuite une épaisse série marine d'âge Oligo-Miocène comprenant des formations conglomératiques, gréseuses et carbonates.

**2-3.2- La dorsale Kabyle :** C'est une zone étroite, discontinue qui correspond à un ensemble de lames empilées. Elle est subdivisée en dorsale interne, médiane et externe.

**2-3.3- Les Flyschs :** composés par les séries mauritaniennes et massyliennes, elles sont très peu représentées.

**2-3.4- La zone Tellienne :** Ils s'agit d'importantes masses allochtones caractérisées par le développement des faciès marneux et marno-calcaire.

- Les nappes ultra telliennes.

Structuralement, les nappes telliennes présentent un caractère chevauchant vers le sud.

- Les nappes telliennes au sens-strict, (nappe de Djemila).
- Les nappes pénitelliennes.

D'après les travaux récents de Durand-delga (1980), les Bibans et les Babors ne sont plus considérés comme autochtones mais sont rattachés aux nappes telliennes.

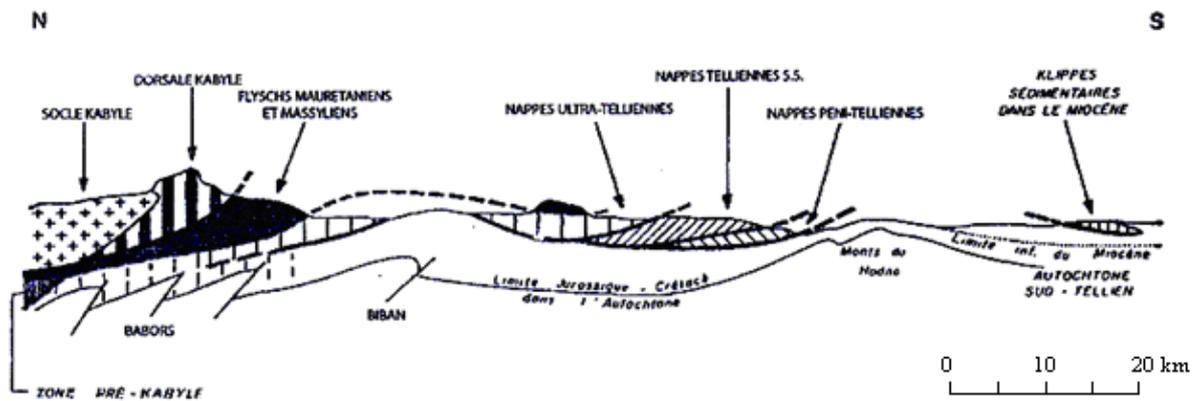


Figure 2-6 : Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (Caire, 1970, modifié, Durand-delga, 1980).

### 2-3.5- La plate forme sétifienne

On peut y distinguer plusieurs unités (Fig. 2-7) :

- Les nappes néritiques constantinoises à l'Est.
- Les nappes de l'ensemble allochtone sud-sétifien à l' Ouest.
- Les séries de l'unité inférieure du Djebel Kalaoun forment un jalon entre la plate forme allochtone et l'autochtone Hodnéen.

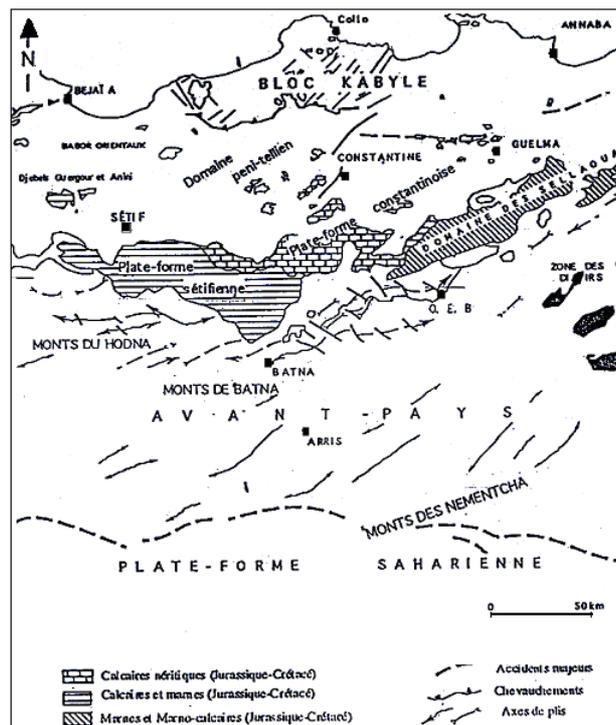


Figure 2-7 : Situation actuelle des plates-formes sétifienne et constantinoise par rapport aux domaines des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale (Vila, 1980)

### **2-3.6- Le parautochtone et autochtone Hodnéens**

Les formations parautochtones et autochtones sont représentées par les Djebels Kenneder et Mzaita des monts du Hodna. Ces massifs constituent le début de l'Atlas Saharien qui développe ses grandes structures plissées et faillées jusqu'aux portes du désert.

### **2-4- Géologie locale**

Dans ce contexte nous présentons la lithostratigraphie et les structures des domaines de la région à l'étude (Fig. 2-8).

#### **2-4.1-lithostratigraphie**

##### **2-4.1.1- Trias**

Il affleure en masses chaotiques, sans aucune stratification. Dans ces masses divers éléments sont reconnaissables calcaires dolomitiques sombres, dolomies noirâtres, cargneules jaunâtres, argiles bariolées, gypses rosés ou blancs, des grès verdâtres à ciment argileux et des roches vertes altérées à tendance ophitique.

Les principaux affleurements du Trias sont situés près du Djebel Gouzi, de Koudiat El Bassour qui constitue un ensemble de petits mamelons au Nord d'Ain Azel (au milieu de la plaine).

##### **2-4.1.2- Ensemble parautochtone et autochtone Hodnéen**

Les formations parautochtones sont représentées par la série du col Tifelouine, Djebel Hadjer Labiod (Ain Azel) et Djebel Gouzi, alors que les séries autochtones n'occupent qu'une frange mince (Figs. 2-9 à 2-11).

**Lias carbonate massif** : c'est une masse essentiellement dolomitique avec au sommet quelques niveaux de calcaires à silex et des dolomies à nodules siliceux. Cette série affleure sur une centaine de mètres d'épaisseur. Il s'agit de Lias moyen à inférieur à Toarcien (*Derocras* sp et *platypleuraceras*).

**Lias supérieur (Toarcien)** : ce sont des marnes blanchâtres avec des plaquettes calcaires et des marno-calcaires grumeleux en petits bancs de 2 mètres. L'ensemble ne dépasse pas une vingtaine de mètres, comme faunes on a des *Lytoceras* et *Belemnite* associés à des Foraminifères (*Nodosaria* sp).

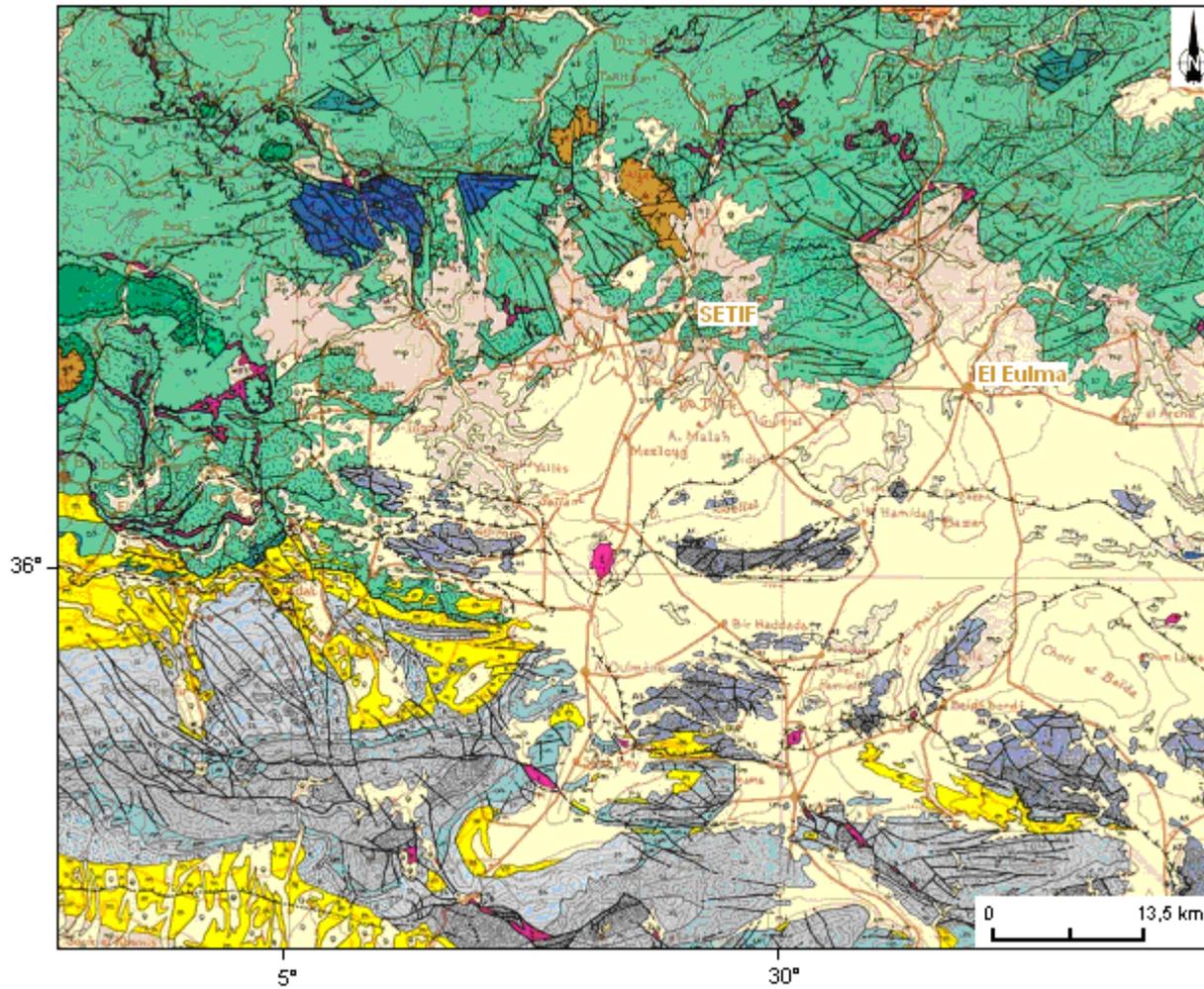


Figure 2-8 : Carte géologique de la région de Sétif

(D'après carte structurale au 1/500.000 de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale et des confins algéro-tunisiens, Vila, 1978)

## Légende

### ROCHES RECENTES ET CYCLES POSTERIEURS AU BURDIGALIEN INFÉRIEUR

q	Quaternaire indifférencié (Villafran- chien à actuel).
p	Pliocène marin des zones côtières.
mp	Mio-Pliocène continental.
m'	Burdigalien supérieur-Langhien de la marge littorale.
m	Miocène marin transgressif indifféren- cié des nappes telliennes et de leur avant-pays allochtone, parautochtone ou autochtone.

### NAPPES TELLIENNES S.S

**BB : TYPE BARBACHA**      **GA : TYPE GOURAYA-ARBAIOU**  
**DA : TYPE DRAA EL ARBA**    **BA : TYPE BENI-ABDALLAH**  
**BI : TYPE BIBANIQUE**      **DJ : DE DJEMILA**  
**T : UNITÉS TELLIENNES NON DIFFÉRENCIÉES PARFOIS RÉDUITES**  
**A LEUR EOCÈNE DÉCOLLE**

1	1- Yprésien à Priabonien basal(?).
2	2- Crétacé moyen à Paléocène
3	3- Crétacé inférieur
4	4- Jurassique.

### ENSEMBLE ALLOCHTONE SUD-SETIFIEN

1	1- Eocène à Thersitèes et à galets des écaillés méridionales.
AS 2	2- Crétacé moyen et supérieur.
AS 3	3- Crétacé inférieur.
4	4- Jurassique carbonaté.

### SÉRIE MÉRIDIIONALE DU DJEBEL KALAOUN

K	Jurassique d'abord carbonaté puis marno-calcaire (points serrés) et Néocomien (points lâches).
---	--

### TRIAS EXOTIQUE OU EXTRUSIF

tr	Argiles, gypses broyés et glaçons calcaro-dolomitiques.
tr	Trias résédimenté.

### NAPPE NÉRITIQUE CONSTANTINOISE

#### SÉRIES ENTièrement CARBONATÉES A SÉNONIEN TRANSGRESSIF RÉDUIT

1	1- Cénomarien, Turonien et Sénonien trans- gressif.
2	2- Crétacé inférieur (Néocomien à Albien).
3	3- Jurassique et Trias de la station du Nador.

#### SÉRIE INTERMÉDIAIRE DU DJEBEL DJAFFA

1	1- Crétacé moyen et supérieur.
2	2- Crétacé inférieur.
3	3- Jurassique supérieur carbonaté.

### SIGNES CONVENTIONNELS

1	1- Contacts stratigraphiques
2	2- Principales failles
3	3- Charrriages et chevauchements (les barbelures sont du côté chevauchant).
4	4- Trace des olistolites telliens du bassin du Hodna.

a- visibles  
b- caché(e)s ou supposé(e)s  
c- déduits de données géophysiques

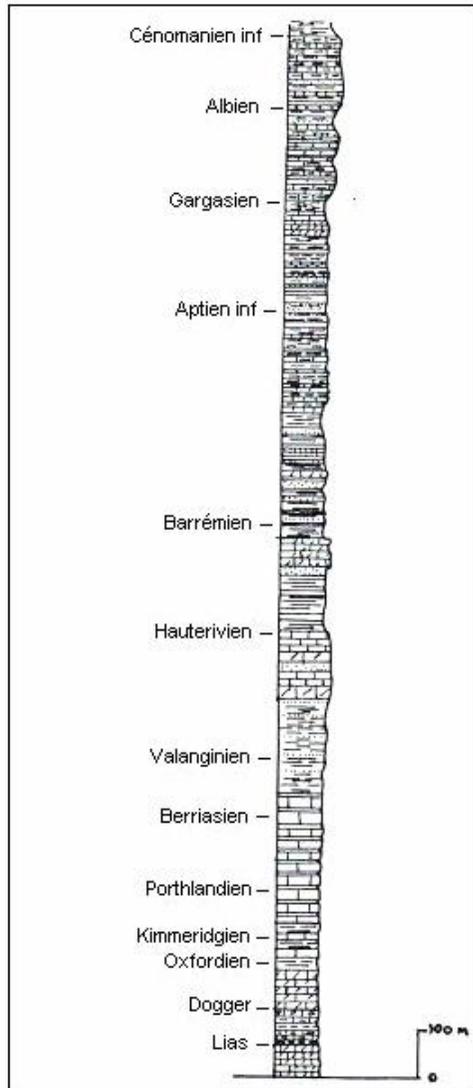


Figure 2-9 :Log.lithostratigraphique de l'autochtone Hodnéen (Vila, 1980)

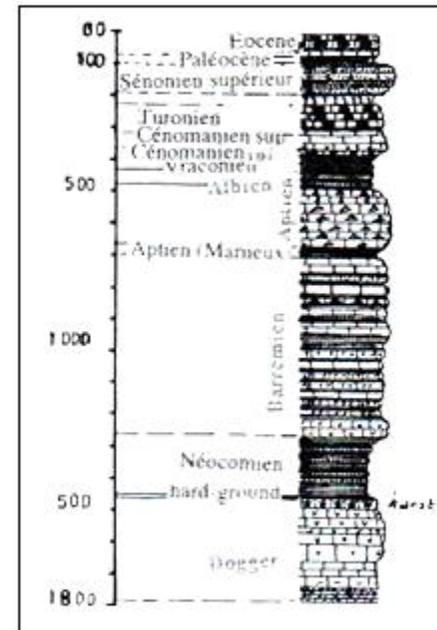


Figure 2-10 : Log. Lithostratigraphique du Jebel Hadjar Labiod (Vila, 1980)

**Jurassique moyen et supérieur** : il est dans l'ensemble pélagique.

+ Dogger : calcaires noduleux rouges et marnes à Ammonites. Ce sont d'abord une centaine de mètres de calcaires argileux, puis 40 mètres de couches marneuses, puis 50 mètres de dolomies et en fin de la série se termine par 40 mètres des formations marneuses à nombreuses intercalations de calcaires à Bélemnites et Cancellophycus (Dogger).

+ Jurassique supérieur : marnes et calcaires marneux : calcaires fins à Saccocomidés, biomicrites à Calpionelles et à Pygopes. La série débute par 150 mètres de marnes à nombreuses intercalations de micrites ; au dessus, on a 100 mètres de micrites en petits bancs datés du Portlandien. On y trouve comme faune des Saccocoma, des Radiolaires et Ostracodes.

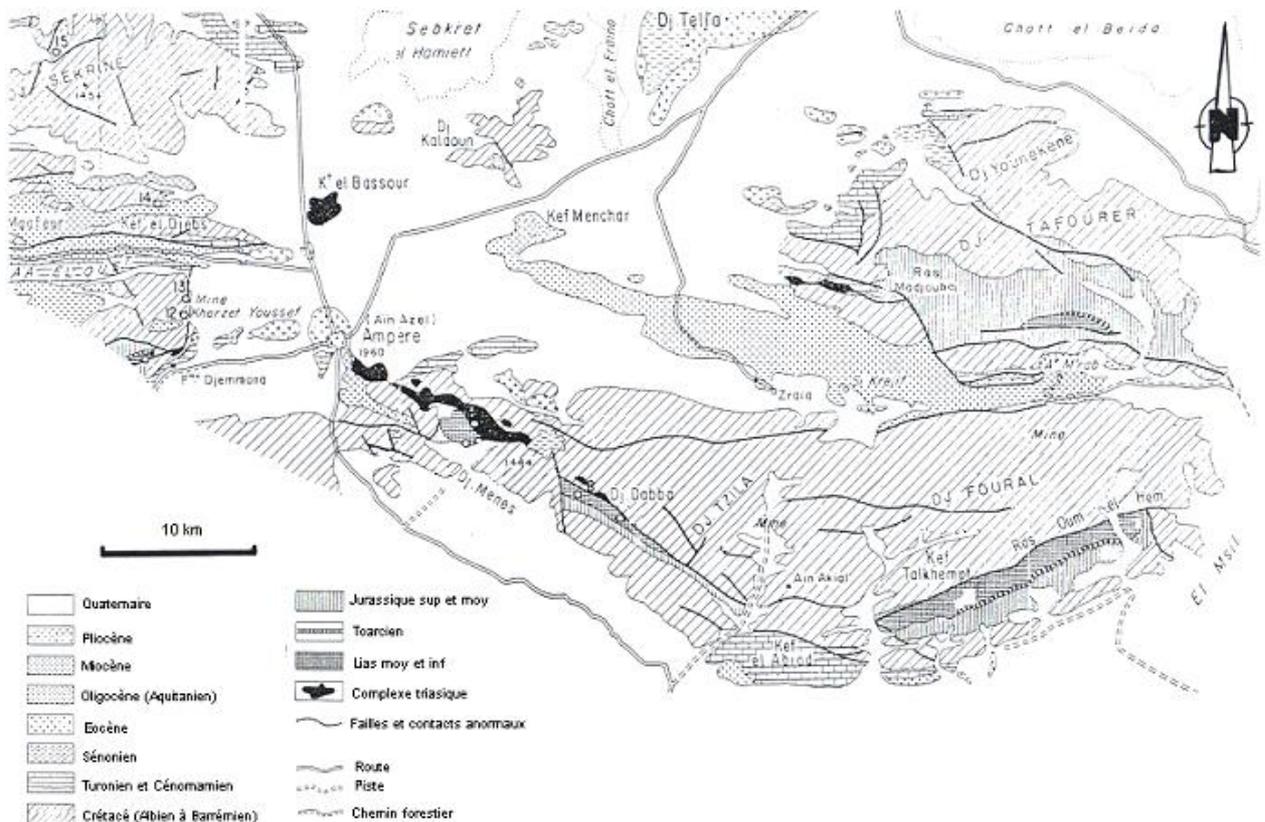


Figure 2-11 : Carte géologique de la région D'Ain Azel (D'après Glaçon, 1967)

**Néocomien** : cette formation n'est visible qu'au pied du Djebel Mahdjouba. Ce sont des marno-calcaires et des marnes, au dessus se développent des argiles, des marnes et surtout des petites. L'épaisseur peut atteindre 300 mètres. Comme faune, on a Alectryonia cf, débris de

Pygope. Ammonites ; le sommet de la série est daté du Valanginien par la présence de *Phylloceras sérum*.

**Barrémien** : la lithologie du Barrémien est très variée, on y rencontre des dolomies, des grès roux, des intercalations argileuses et marneuses, des calcaires divers. Le Barrémien n'est caractérisé que dans l'anticlinal du Djebel Mahdjouba, Djebel Fourhal ; l'épaisseur varie entre 650 à 700 mètres. Les calcaires à algues (*Salpingoporella muelhbergir* et à *Nautiloculina*, des niveaux Lurnachelliques ont livré près de Kherzet Youssef, *Exogyra*, *Toucasia* sp.

**Aptien** : l'Aptien est composé d'une formation marneuse et d'une formation carbonatée.

+ Aptien marneux : cette formation de 60 à 80 mètres d'épaisseur à dominante marneuse avec des intercalations d'argiles verdâtres dures et de petits bancs de grès et de calcaires marneux. Les marnes ont livré *Exogyra latissima* et *Toucasia carinata*.

+ Aptien Carbonaté : la série commence par une barre dolomitique de 10 à 15 mètres d'épaisseur, se poursuit par des calcaires en gros bancs bien lités riches en Rudistes à Huîtres et à Orbitolines. L'ensemble a une épaisseur de 300 à 350 mètres. Au Djebel Mahdjouba (anticlinal) et dans le col Tifelouine (série renversée), les derniers 100 mètres sont des calcaires riches Miliolites et en Ovalveoline reichien, *Pseudocyclernina vasconica*, *Cuneolina* sp, *Orbitalina* sp, *Quinqueloculiria* sp. *Spiroloculina* sp.

**Albien-Cénomaniens** : l'Albien inférieur n'a pas été caractérisé. Au Djebel Hadjar Labiod, le Vraconien (80 à 100m) repose directement sur l'Aptien calcaire ; il est constitué par un ensemble de calcaires en petites dalles de grès et de marnes gréseuses jaunes à *Nautilus* élégant, *Oxytropidoceres* sp. Au dessus, on a des intercalations de calcaires marneux en plaquettes et enfin au sommet, le Cénomaniens marneux épais de 250 à 300 mètres avec une très riche faune de Lamellibranches et de débris d'Echinides

**Cénomaniens supérieur et Turonien** : barre calcaire très développée au pied du Djebel Mahdjouba et dans la série de Tifelouine. A la base des calcaires dolomitiques à rognons de silex clairs et à lits de chailles blanches ou beiges contiennent *Pseudorhepydionina dubia*, *Spiroloculina* sp; *Valvulina picardi*, c'est le Cénomaniens supérieur (100 m). Au dessus des marnes et des calcaires dolomitiques à débris d'hippuritidés représentent le Turonien (100m).

**Sénonien Inférieur** : la série ne dépasse pas 150 mètres d'épaisseur et montre des marnes jaune-verdâtres, sableuses à petits galets roulés (grés, silex) et une barre de quelques mètres de calcaires à galets dans les marnes. La série se rencontre à la périphérie du Djebel Otsmane et l'anticlinal Ouled Tebben, dans le bassin versant de Boussellam.

**Sénonien supérieur** : le Campanien débute par une série marneuse avec des intercalations lumachéllique, puis vient le Maestrichtien avec des calcaires. L'ensemble ne dépasse pas 350-400 mètres, la microfaune bentonique est très abondante avec *Orbitoides média*, *Cuneolina* sp, *Laffitteina* sp, et des Milioles. Cette série n'est pas visible dans notre région d'étude.

**Dano-Paléocène à Ypresien** : ce sont les "marnes Suessoniennes" (Savornin, 1920) correspondant aux marnes argileuses noirâtres, avec des rares intercalations de lumachelles, avec *Exogyra-overwegi*.

**YPresien-Luietien inférieur** : l'Eocène n'a été reconnu que dans l'écaillé du col de Tifelouine. Ce sont des calcaires massifs biosparitiques à débris de Gastéropodes (*Thersiteés*) et à petits galets de silex ne dépassant pas 100 mètres d'épaisseur.

**Lutetien supérieur** : argiles gypsifères et calcaires : la série est absente dans notre aire d'étude.

**Oligo-Miocène** : cette formation n'a été repérée que dans le Col de Tifelouine. Ce sont des couches rouges d'argilites et de conglomérats.

**Miocène** : le Miocène forme une longue bande depuis le kef Munnchar jusqu'au Sud du Djebel Tafourer. C'est une série complexe avec des bancs de poudingues. Des calcaires gréseux, des grés blancs, des marnes grises, des argiles à gypses, des marnes jaunes et des calcaires. Cette complexité provient des caractères lenticulaires de la plupart des niveaux ; l'épaisseur du Miocène varie de 200 à 250 mètres surtout au Djebel Tifalouin.

#### **2-4.1.3- Formations Telliennes**

**Séries à jurassiques intermédiaires de l'unité inférieure de Djebel Kalaoun** : cette série inférieure de Djebel Kalaoun dessine un anticlinal sur le versant Sud du Djebel Kalaoun sous la masse de dolomie. Les dolomies à grains fins, de puissance environ 100 mètres,

constituent le coeur de l'anticlinal. Le Malm en bancs métriques est composé de biomicrites à Calpionelles. La base de la série est composée de calcaires fins à Radiolaires et Saccocoma datant le Kimmeridgien –Portandien. L'ensemble ne dépasse guère une dizaine de mètres.

**Bérriasien à Valenginien** : il s'agit d'un ensemble bien lité de calcaire fin en petits bancs de 5 à 60 cm dont l'épaisseur est de 150 à 200 mètres. Ces calcaires sont à patine claire, blanche ou jaunâtre; la cassure a les mêmes teintes. *Tintinnopsella longa*, *Calpionellites darderi* ont daté le Valenginien inférieur, le Berriasien daté à *Tintinnopsella Carpathice*.

#### **2-4.1.4- Ensemble allochtone Sud-Sétifien**

Il compose les séries des Djebels Youssef, Brao, Tnoutit, Sekrine, Tafourer, Agmerouel, Ecaille de Ain Lahdjar, Koudiat Tella et séries supérieures du Djebel Kalaoun (Fig.2-12 à 2-16).

**Lias** : il est composé de marnes à Ammonites, calcaires et dolomies. Au Drâa Akhenchoub, on a une dizaine de mètres de marnes verdâtres à jaunâtres à petits bancs de calcaires (Ammonites). Le Lias calcaro-dolomitique peut dépasser la centaine de mètres d'épaisseur. Au Djebel Tafourer, on a retrouvé des Ammonites du Toarcien (*Pseudogrammoceras*).

**Dogger** : c'est une formation de calcaires marneux fins à patine claire à cassure grise d'une épaisseur de 250 à 300 m avec à la base des niveaux gris bleus à rognons de silex roux. Ces niveaux contiennent des débris de Laméllibranches, Echinodermes (spicules). On y rencontre aussi des calcaires marneux lités.

**Jurassique moyen et supérieur** : les dolomies jurassiques englobent de vastes lentilles de calcaires gris à grains fins en bancs de 20-50 m avec débris d'Ammonites; épaisse de 150 m. Au sommet on a une masse dolomitique azoïque.

**Jurassique supérieur** : le passage Crétacé Jurassique est marqué par un faciès carbonate graveleux beige à polypiers sur une épaisseur de 20 mètres à Djebel Tafourer. On note la présence de niveaux de débris de Gastéropodes silicifiés riches en Dasycladacés; le sommet n'a qu'une masse de calcaire massif en gros bancs de 80 mètres d'épaisseur. Cette série a fourni *Kurribia palastiniensis* ; *Clypeina jurassica* et *Salpingoporella annulata*.

**Néocomien** : les faciès du Néocomien sont variables d'Ouest en Est ; il s'agit d'une série à dominante argileuse mais riche en intercalations carbonatées, notamment, des calcaires à algues et Ammonites. La série commence presque toujours par un hard-ground. Savornin (1920) a signalé au Djebel Guestar la présence des *Exogyras couloni*, *Nautiloculina* sp, des Miliolites et des Ostracodes. L'épaisseur du Néocomien atteint en général une centaine de mètres.

**Barrémien** : c'est une formation complexe composée de calcaires, dolomies, et de grés avec de minces intercalations argileuses ou marneuses. Cette série a une épaisseur de près de 500 mètres. Cet étage est représenté au Djebel Youssef (série chevauchante et série chevauchée) et constitue la totalité du Djebel Tnoutit. C'est une série calcaro-dolomitique et gréseuse à grosses barres dolomitiques rousses de 25 à 30 mètres d'épaisseur. Le Barrémien inférieur est caractérisé par *Choffatella decipiens*, *Salpingoporella muchlbergi*, alors que le Barrémien supérieur a livré *Palorbitolina lenticularis*, des *Dasycladaceés*.

**Aptien** : l'Aptien débute par des calcaires bien lités en gros bancs de 50 cm à 2 m; à patine rousse ou brune, cassure beige ou grise, et des calcaires à *Orbitolines* et couches à *Ovalveoline reicheli* au sommet. La microfaune est abondante et indique l'Aptien avec *Mésorbitolina texana*, *Orbitolinopsis* sp, *Dasycladaceés* et Miliolites. Dans cette formation dominant les marnes jaunâtres très caractéristiques, datée par *Paleo-bitorbitolina lenticularis*. L'épaisseur de la formation varie de 250 m à 300 mètres.

**Albien-Vraconien** : argiles, marnes jaunes, grés et biosparites à *Melobesiées*. Les marnes contiennent des Echinides (*Hemiaster batnensis*, *Hétérodiaderna Libycum*). Cette série ne saurait excéder la soixantaine de mètres d'épaisseur.

**Cénomaniens supérieur-Turonien** : il s'agit d'une série de calcaires fins ou graveleux à Miliolites en bancs de façon assez dispersée par fracturation. Au Nord du Djebel Kalaoun et au Nord-Ouest de Djebel Tafourer on a une épaisseur de 100 à 120 mètres, alors que près de Djebel Braou l'épaisseur n'est plus que de 50 mètres. La microfaune des calcaires est riche avec *Chrysalidina gradata*, *Cunueolina pavonia*.

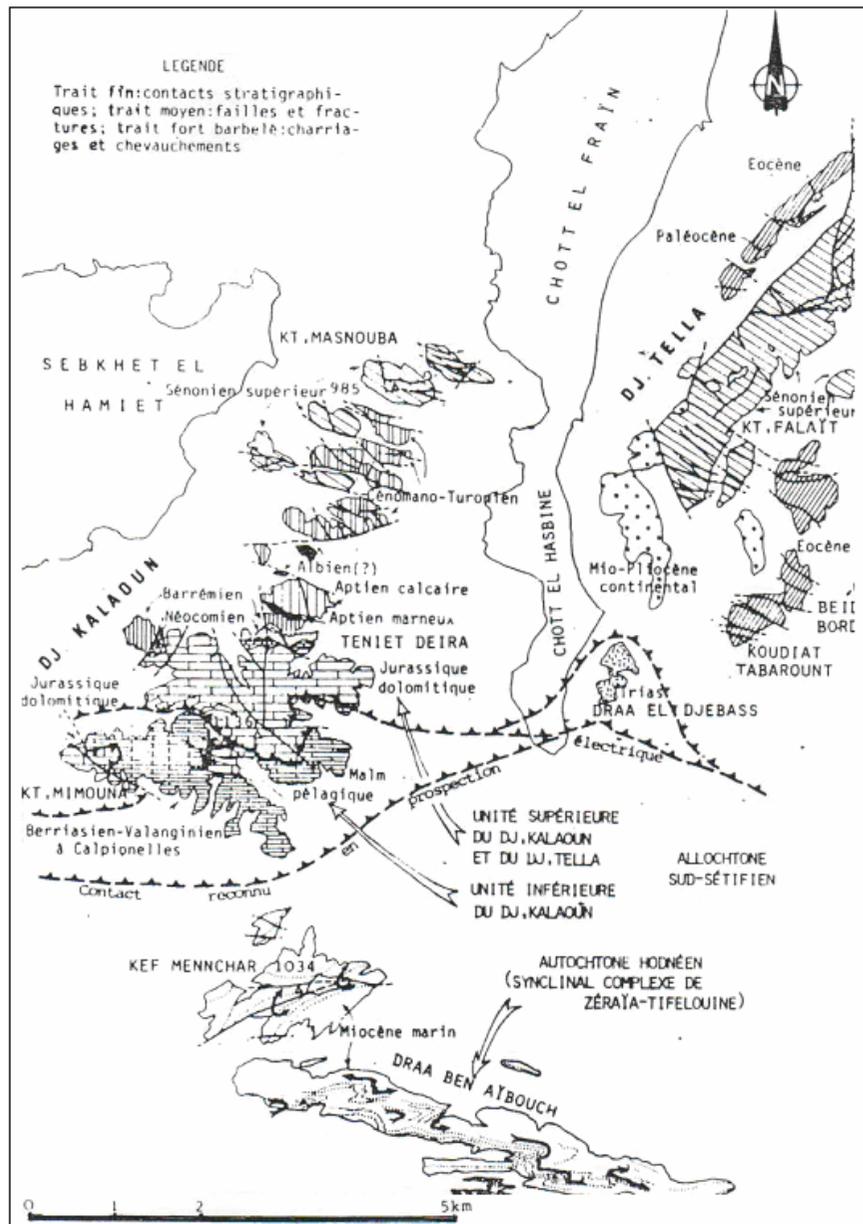


Figure 2-12 : Carte géologique du secteur des Djebel Kalaoun et du Djebel Tella (Vila, 1980)

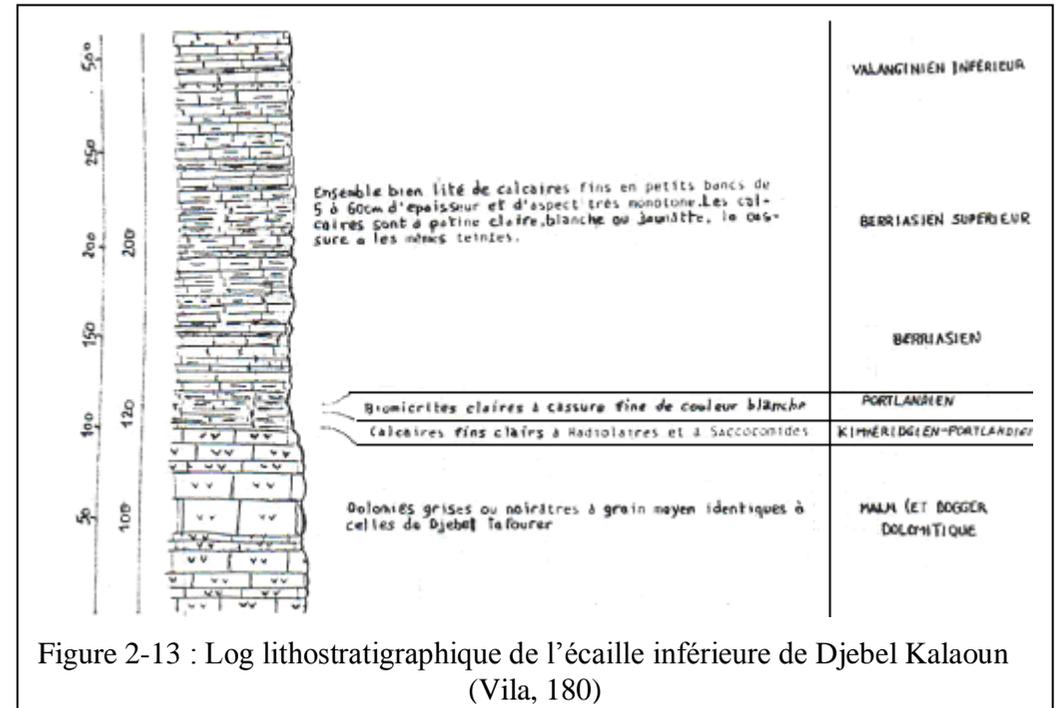


Figure 2-13 : Log lithostratigraphique de l'échelle inférieure de Djebel Kalaoun (Vila, 1980)

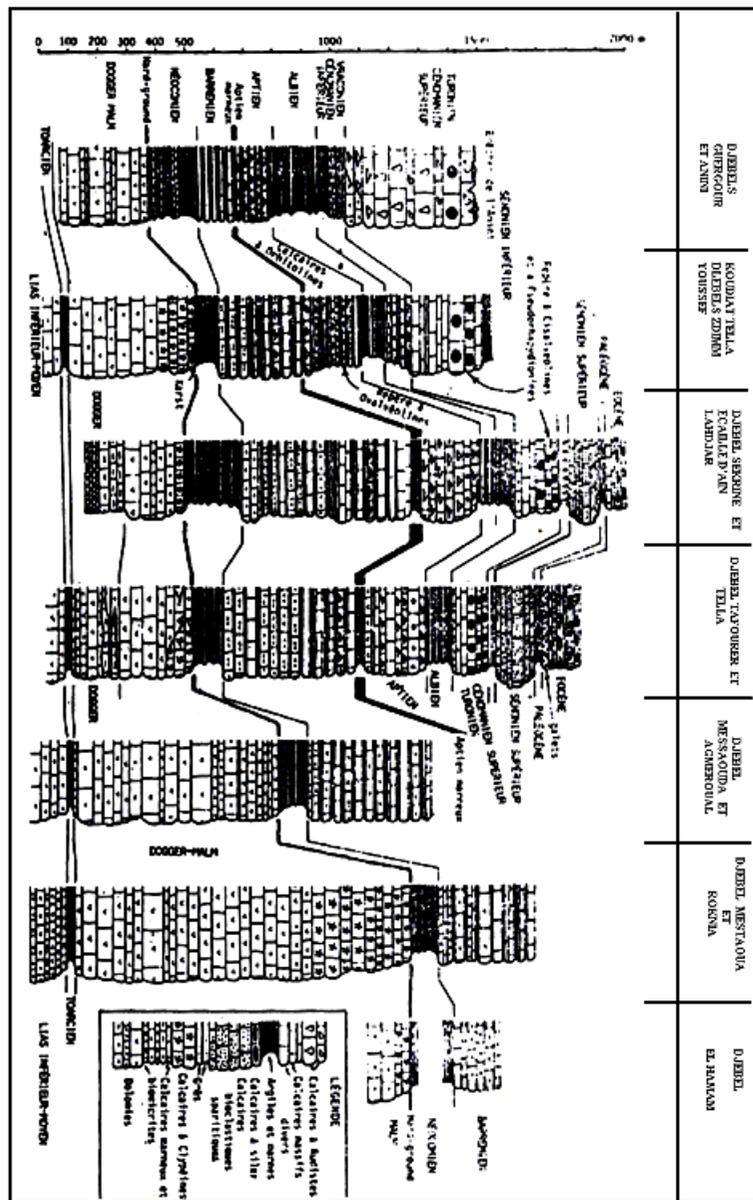
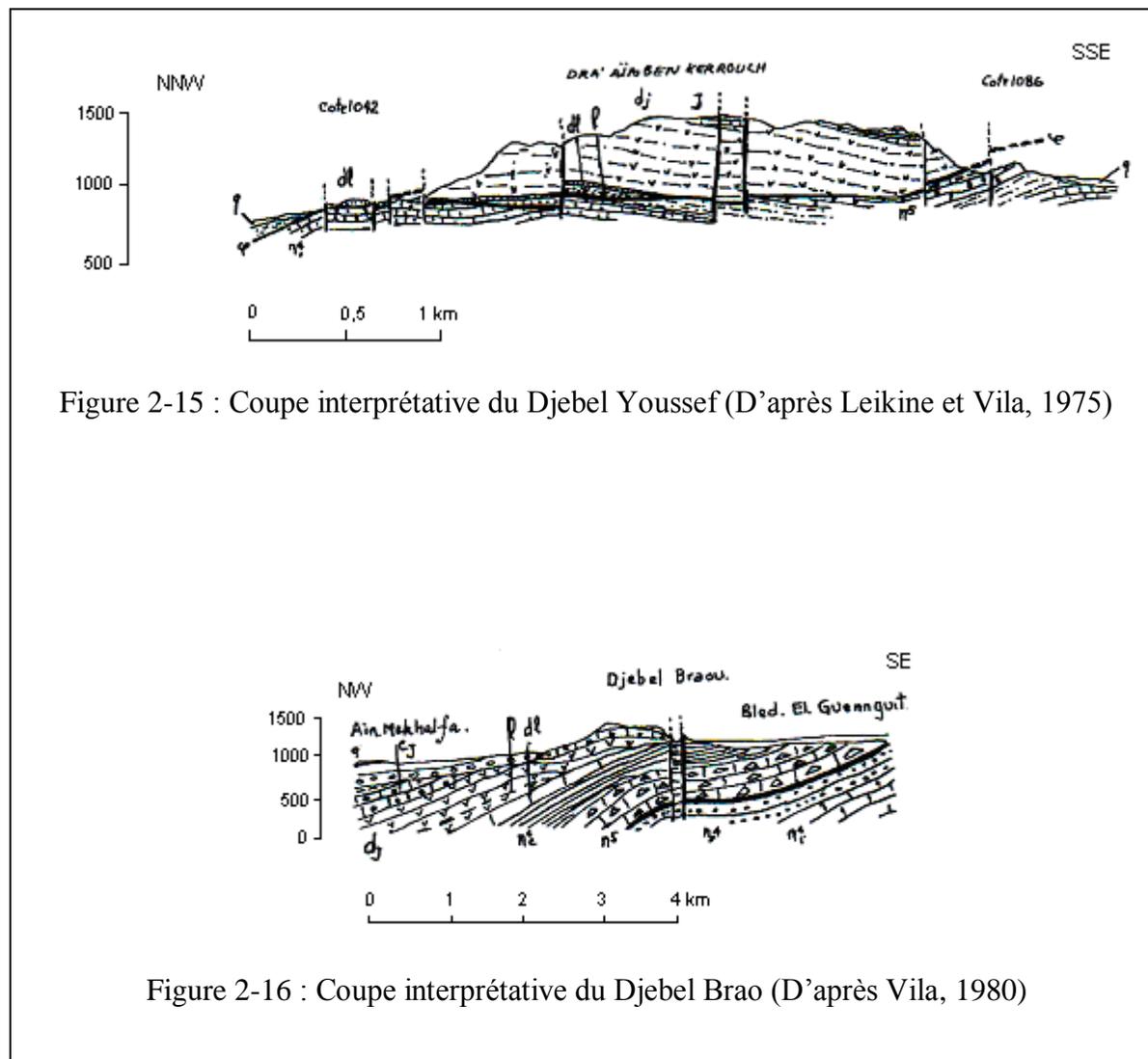


Figure 2-14 : Corrélation des séries typiques de l'ensemble allochtone sud-sétifien (D'après Vila, 1980)



**Sénonien supérieur** : le Sénonien supérieur affleure au Nord de Djebel Sekrine, au Djebel Kalaoun, et à la Koudiat Tella. Il est composé d'une centaine de mètres de calcaire roux, parfois gréseux en banc de 1 à 2 mètres. Les calcaires sont à cassure brillante car il s'agit de biosparites à Orbitoides, Bryozoaires et Echinodermes. L'épaisseur est de 100 mètres. La microfaune rencontrée est *Rotalia* sp et *Globotruncana* sp.

**Paléocène** : ce sont des marnes à débris d'*Exogyra overwegi* et des argiles brun-jaunâtres d'épaisseur 40 m, en surface, grises en profondeur gypsifères avec de petits bancs de calcaire marneux. Les marnes n'ont fourni que des Ostracodes et comme microfaune *Globogérina* et *Globorotalia*. On note également des niveaux de phosphates.

**Eocène** : ce sont des calcaires blancs biosparitiques et détritiques (quartz et galets de silex noirs) surmontés de calcaires massifs à Thersitées (*Hemithersitea ventricosa* et de Gastropodes). Cette formation a une épaisseur variable à Oum Ladjoul 100 m alors qu'à Ain El Ahdjer et Beida Bordj elle est de 50 mètres.

**Miocène** : il est marin, transgressif à conglomérats, grés roux, argiles et marnes à Huitres. Le Miocène débute par des conglomérats rougeâtres et ravine son substratum (pendage de la discordance avoisine 30°). Il repose sur le Barrémien et au dessus des calcaires gréseux roux et des biosparites. La série se termine par marnes jaunâtres ou rosées {200-250 mètres d'épaisseur) à gros débris d'*Ostréa crassissima*.

#### **2-4.1.5- Nappe néritique constantinoise**

La nappe néritique constantinoise n'est visible que dans la partie Est et plus exactement au Djebel Meksem et au Djebel Chebka au Sud-Est du Djebel Tnoutit.

La série renversée du Djebel Chebka débute par une barre calcaire aptienne (15 mètres) à rudistes surmontée de calcaires bien lités à *Salpingoporella dunarica* et *Ouvalveolina reicheli* d'épaisseur 150 mètres.

#### **2- 4.1.6- Nappe Djemila :**

Elle n'apparaît que dans la partie Nord du secteur d'El Eulma.

**Santonien supérieur à Campanien** : il s'agit d'une alternance de marnes grises ou gris noir et de calcaires cristallins en bancs métrique ocre ou blanchâtre lumachelique à Huitres

(Ostreidés), plicatules, Pectens, Inocerames. Le sommet est Campanien. L'épaisseur de cet ensemble est d'environ 100 mètres.

**Campanien-Maestrichtien inférieur :** l'aire d'affleurement de cette série ne dépasse guère 1,5 km<sup>2</sup>, il s'agit de marnes noires à boules jaunes de très petite taille avec à leur sommet quelques intercalations de calcaires marneux. L'épaisseur de cette formation atteint 150 m.

**Campanien supérieur et Maestrichtien :** cet ensemble est essentiellement carbonaté organogène. Les Lamellibranches sont abondants dans ces niveaux lumachellique (Huîtres, Inocèrames), on y trouve aussi des Gastéropodes et des Echinodermes.

Cette série est présente par des calcaires jaunes en bancs de métriques alternant avec des minces niveaux marno-calcaire gris constituant la partie supérieure de cet ensemble qui totalise environ 200 m d'épaisseur. On trouve comme microfaunes, Globotruncana stuarti, Globotruncana élévata..., et Globotruncana formkata datant le Campanien supérieur et Globotruncana calcarata au sommet de la série qui date le Maestrichtien.

**Maestrichtien supérieur à Paléocène :** cet ensemble qui affleure sur de faibles étendus, est représenté par des marnes noires à grises à rares boules de calcaire jaunes, au sommet de la série apparaissent des calcaires décimétriques à Huitres et Inoceramus. Cette série à une épaisseur très variable suivant les affleurements à cause de la réduction ou répétition tectonique (d'environ 100m à 150m). Comme microfaune, Globotruncana contusa, Globotruncana. Stuarti.

**Yprésien-Lutétien inférieur :** il est constitué de trois termes lithologiques.

+ Des calcaires marneux noirâtres contenant deux intercalations déci m étriques de calcaires roux finement gréseux à grains dispersés de glaucome .d'une épaisseur de 20 mètres daté Yprésien inférieur par Globigerina linaperta, Globorotalia aequa.

+ Des calcaires massifs gris ou blancs noirs à la cassure riche en silex noirs (rares intercalations glauconieuses), d'épaisseur 80 mètres.

+ Alternance de marnes et de calcaires, puis calcaires et de marno-calcaires en bancs épais de 100 mètres.

#### **2-4.1.7- Mio-Pliocène continental**

C'est un ensemble très complexe de formations continentales occupant de vastes espaces

sur notre région d'étude. Ce sont des conglomérats à gros graviers surmontés d'argiles grises-rougeâtres à niveaux micro conglomératiques avec un niveau de lignites d'une épaisseur de près de 40 mètres. Au dessus de cette série, on a des argiles et des marnes parfois gypsifères alternant surtout vers le haut avec quelques niveaux de calcaires lacustres à Hélix sebsenilis (en bancs de faible puissance ou en plaquettes). L'épaisseur varie entre 150 et 200 mètres. Au sommet, la série devient très variable avec de grosses intercalations lenticulaires de poudingues grossiers, des argiles à lentilles de lignites friables, des lits gréseux gypsifères à petits bancs minces de calcaires. Cet ensemble peut atteindre une puissance de 150 à 200 mètres d'épaisseur. Enfin la série se termine par des dépôts fluvio-lacustres de composition variable : poudingues, calcaires stratifiés, lentilles de cailloutis non cimentés, argiles noires, argiles rutilantes, sur une épaisseur de moins de 150 mètres (probablement du Pliocène).

#### **2-4.1.8- Quaternaire**

**Villafranchien :** le villafranchien est composé de calcaires lacustres, sols à croûtes, cailloutis fluviaux. Ces formations sont caractéristiques des Hautes Plaines Sétifiennes. Elles sont datées à Ain Bouchent et Ain Hanech au Nord de la ville d'El Eulma dans des conglomérats situés sous les calcaires, par des restes abondants de vertébrés.

On distingue :

+ Un Villafranchien inférieur avec *Anancus osiris*, *Eléphas africanus*, *Hippopotamus amphibius*.

+ Un Villafranchien supérieur avec *Libytherium* sp.

Ces niveaux sont ravinés par des argiles rouges, puis dessus on a des marnes (rouges.) jaunes plastiques qui surmontent en légère discordance les calcaires lacustres. On a une épaisseur de l'ordre de 10 à 15 mètres.

Le long des tranchées routières et de la voie ferrée Alger-Constantine, on observe une zonation avec à la base un horizon tuffacé calcaire précédant une croûte calcaire qui a parfois 2 à 3 mètres d'épaisseur. Cette zonation atteignant parfois une puissance de l'ordre de 10 mètres.

On note une déformation des croûtes Villafranchiennes (accident Quaternaire) entre la Koudiat Dourdour et la terminaison Nord du Djebel Tella.

**Glacis polygéniques nappant les reliefs :** on note un glacis ancien encroûté constitué de cailloutis roulés de teinte brun rougeâtre à morphologie typique de glacis, visible

uniquement aux environs d'Ain Lahdjar (d'âge Amirien).

Les glacis polygéniques nappant les reliefs constituent la forme de relief caractéristique des Hautes Plaines Sétifiennes. Prés des plaines, les glacis présentent des .pentes faibles, qui augmentent vers le Djebel et butant sur une rupture de pente (knik). Ils sont recouverts d'un matériel élastique, très fragmenté vers le bas devenant plus anguleux et plus grossier au voisinage du knik. Les traces d'encroûtement sont très fréquentes en profondeur et datées Tensiftien.

**Terres arables, formations de pente, alluvions anciennes et Quaternaire indéterminé :** les terres arables sont déposées sur des placages limoneux et supportent un sol brun ou calcaire. Ils ont un intérêt économique, car ce sont les seules surfaces qui permettent une culture extensive.

**Alluvions actuelles et récentes :** ce sont des sables, des limons, des graviers et des cailloutis. Ces formations ne sont développées que le long des Oueds.

**Sols de sebkhas; chotts :** ce sont des vases salées qui garnissent la Sebkhât El Hamièt, le chott El Frain et le Chott El Beida. Ces vases sont périodiquement inondables surtout pendant la saison des pluies et recouvertes par des croûtes salines pendant la saison sèche. La végétation est réduite à de rares touffes de salsolacées. La récolte de sel purement artisanale n'est pratiquée qu'à la périphérie du chott El Frain.

**Sols salés non inondables :** ce sont des limons salés à végétation typique d'halophyte correspondant à des sols hydro-morphes incultes.

**Formations dunaires (lunettes) :** ce sont des amas éolisés de sables calcaireux et de poussières limoneuses mêlés à des débris coquilliers (Gastéropodes) ou végétaux qui témoignent d'une époque d'aridité plus marquée.

#### **2-4.2- Tectonique**

Selon Vila (1980), les structures plissées et déplacées sont la conséquence de crises tectoniques successives de l'orogène alpin.

Les unités telliennes présentent de nombreuses klippe témoins de leurs charriages. Dans notre région, elles constituent la nappe de Djemila.

La nappe néritique a été déplacée en bloc, transportant les structures sénoniennes et priaboniennes.

L'ensemble allochtone sud-sétifien regroupe des unités qui s'enfoncent sous la nappe néritique constantinoise. Le style du chevauchement Zdimm-Youssef-Brao est représentatif des cisaillements plats recoupant une structure plissée préexistante.

Enfin, les anciennes déformations de l'autochtone bien organisées, ont été embouties suite à la phase tortonienne.

#### **2-4.2.1- Description des unités**

##### **- La nappe de Djemila**

Elle est représentée uniquement dans la partie Nord de notre bassin d'étude

##### **- La nappe néritique Constantinoise**

Elle n'est représentée que par un minuscule petit affleurement au Djebel Meksem au Sud-Est du Djebel Tnoutit.

##### **- L'allochtone Sud-Sétifien**

Il comporte trois ensembles (Figs. 2-17 et 2-18). On distingue du Nord au Sud et de haut en bas, le système septentrional du Djebel Anini au Nord de Sétif; le domaine médian aux Djebels Zdimm, Youssef, Brao et Tnoutit, et enfin l'ensemble méridional des Djebels Sekrine, Kalaoun. Koudiat Tella et Djebel Tafourer.

##### **+ Le domaine médian des Djebels Zdimm, Youssef, Brao et Tnoutit**

Possède une série carbonatée allant du Lias au Cénomaniens. Cet ensemble affecte la disposition d'un anticlinal cisailé au Djebel Youssef. Le contact de base des dolomies Jurassiques du Djebel Youssef est faiblement incliné vers le Nord. On note l'absence d'affleurements du Sénonien et de l'Eocène.

L'étude géophysique de la CGG (1973), notamment, aux Djebel. Brao, Tnoutit, a montré une continuité des massifs carbonates en profondeur jusqu'à plus de 900mètres.

##### **+ L'ensemble méridional des Djebels Sekrine, Kalaoun, Tafourer et Koudiat Tella**

On observe le même dispositif structural une masse de dolomie jurassique repose tectoniquement sur une série marno-calcaire du Crétacé inférieur.

Cet ensemble montre une série où le Miocène marin fossilise les structures cisailées par le contact de base. On note aussi que cette série possède une mince couverture Sémoniennes et Eocène; où l'abondance des biosparites (présence de galets attestant d'un milieu agité) indique un milieu peu profond.



Figure 2-17 : Plan de position simplifié des formations Alloctones sud-sétifiennes

- **Série inférieure du Djebel Kalaoun**

Elle constitue une zone de transition entre les domaines.

- **Le Parautochtone et autochtone Hodnéens**

Constitués de grands plis très lourds repris par les failles nombreuses NNW-SSE.

On note trois phénomènes dans les formations Hodnéennes :

+ Les torsions d'axes sont responsables de l'orientation WNW-ESE du pli du Djebel Gouzi (Sud-Est d'Ain Azel).

+ Les décrochements dextres visibles dans le Djebel Hadjar Labiod.

+ La compression supplémentaire

La superposition de la compression Miocène à l'édifice atlasique (NNW-SSE), elle s'observe dans le vaste anticlinal d'Ain Azel Djebel Fourhal; pli dont l'axe primitivement orienté Nord-40° est actuellement un pli à axe courbé à concavité Nord.

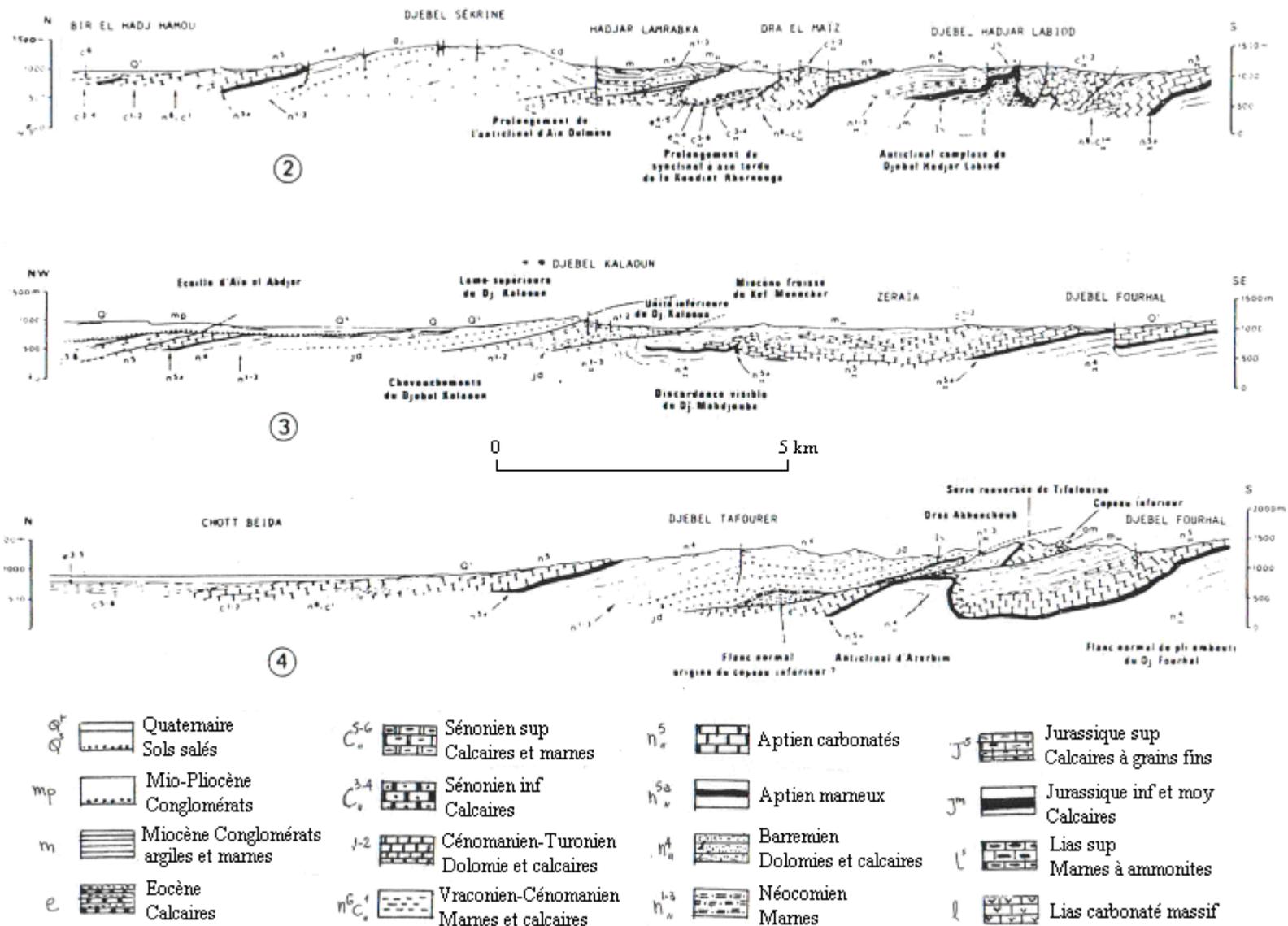


Figure 2-18 : Coupes interprétatives sériees du front de la chaîne Alpine et du Nord des monts du Hodna dans la région d'Ain Azel et d'Ain Lahjar

### **2-4.2.2- Principales phases tectoniques**

#### **- La phase atlasique (structuration Eocène)**

Toutes les séries sont plissées suivant la direction SW-NE et E-W. Dans les zones méridionales de l'aire d'étude, les soulèvements en blocs de certains compartiments et la formation de petits grabbens démontre la rigidité de la couverture : un chevauchement vers le Sud se dessine à cette époque.

#### **- La phase Alpine**

Les mouvements alpins se traduisent par deux phases :

##### **+ Phase post-Burdigalienne :**

C'est la phase la plus violente ayant affecté au cours des temps géologiques les séries Secondaires et Tertiaires ainsi que les structures anciennes. Tout se passe comme si une poussée s'exerçant en direction du Sud. Dans la partie méridionale et dans les compartiments surélevés, sont fortement écaillés et "chevauchant" vers le Sud, alors que les anticlinaux sont étirés en lames. Dans la partie septentrionale les séries tertiaires sont très intensément plissées écaillées et décollées du substratum Secondaires.

Les torsions d'axe de plis, décrochements et compressions supplémentaires observées dans les nappes telliennes et le parautochtone et autochtone Hodnéen sont dus à la phase Alpine.

##### **+ Phase post-Pontienne et post-Pliocène (néotectonique)**

Cette phase est responsable de l'orographie actuelle. La tectonique récente est marquée par l'effet des grandes failles verticales. Le résultat le plus évident de cette néotectonique est la création des bassins intercontinentaux où se déposent des molasses et des dépôts lacustres.

### **2-5- Essai de reconstitution paléogéographique**

#### **- Trias**

Le Trias connu est de faciès très uniforme, avec une sédimentation lagunaire (ou de bassin type transitionnel annonçant une transgression) peu profonde. Aux horizons carbonates et dolomitiques de cette période (associés à quelques minéralisations) ou a apparition de roches vertes (volcaniques ou semi effusives).

#### **- Lias**

Il est caractérisé par un dépôt carbonate puissant dans un bassin de plate forme mobile, peu

profonde avec des calcaires zoogènes et une dolomitisation diagénétique locale. Dans le cœur des anticlinaux Hodnnens, les formations du Lias sont marneuses et marno calcaires pélagique, A partir du Toarcien, la sédimentation n'est plus uniforme, ni dans le temps, ni dans l'espace.

- **Domérien**

La diversité des bassins n'est pas bien prononcée, elle le deviendra beaucoup plus au Jurassique supérieur avec une sédimentation fine et siliceuse au Nord, argilo-calcaire au Sud et franchement récifale à tendance positive (Djebel Tafourer).

- **Dogger-Malm**

Une diversification commence à apparaître: La vaste plate forme Sétifienne présente des formations dolomitiques ou micritiques à Algues, Les formations du domaine atlasique présentent des séries plus épaisses que celle du sillon tellien (caractères pélagiques).

- **Malm-Berriasien**

Le passage se fait par une surface durcie (hard-ground) dans la plate forme Sétifienne. La série inférieure du Djebel Kalaoun représente la transition des deux domaines juxtaposés.

- **Néocomien**

Les minces séries de la plate forme sétifienne sont toujours alimentées d'éléments détritiques, alors que le domaine atlasique présente des séries plus subsidantes.

- **Néocomien- Albien**

Les formations restent marneuses ou pelitiques dans le sillon tellien, alors que la sédimentation carbonatée à intercalations détritiques caractérise la plate- forme sétifienne et le domaine atlasique (Fig. 2-19).

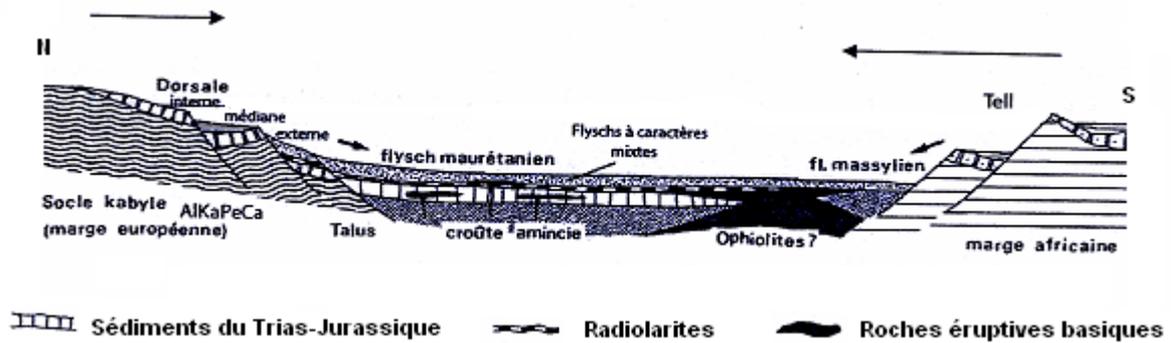


Figure 2-19 : Paléogéographie des différents domaines des Maghrébides au Crétacé inférieur (D'après Bouillin, 1986)

#### - **Albien-Cénomanién**

Dans le sillon tellien, les formations deviennent marneuses et marno-calcaire avec présence des niveaux conglomératiques. Le Cénomanién présente des séries néritiques massives à microfaunes benthoniques au Nord de la plate forme Sétifiénne.

#### - **Cénomanién-Turonien**

Le passage céno-mano-turonien est marqué par un repère à silex dans le domaine tellien, au Sud dans le domaine atlasique la sédimentation est toujours carbonatée. On peut conclure qu'il s'agit d'une vaste plateforme néritique à très faibles oscillations verticales.

#### - **Sénonien**

Le Sénonien est le seul étage qui propose une image d'ensemble de la région d'étude. Le domaine tellien présente des séries marneuses à marne calcaires pélagiques vers le Nord et s'enrichit progressivement vers le Sud en éléments néritique. On note que la plate forme Sétifiénne présente une couverture sénonienne très réduite de quelques 10 mètres de marnes à la Koudiat Tella; et un Sénonien supérieur sparitique aux Djebel Tella, Kalaoun et Tafourer peu épais. Alors que le domaine atlasique montre des séries plus épaisses.

#### - **Paleocène-Eocène**

Les faciès du sillon tellien pélagiques au Nord s'enrichissent en apports néritiques au Sud. Alors dans la plate forme Sétifiénne, on ne connaît pas d'affleurement éocène, sauf dans sa frange méridionale (Ecaille de Ain Lahdjar). Il s'agit d'un Eocène très néritique avec des faciès régressifs (avec comme faune Ostracodes), ou des faciès littoraux (biosparites et

niveaux à galets-Lutetiens). L'hypothèse d'une immersion s'impose d'autant plus qu'à la fin l'Eocène intervient la première phase de structuration ( $\Phi$  fini-Eocène).

- **Priabonien**

Le Priabonien est le siège de la première phase tectonique (structuration probable en nappes du domaine tellien et plissement dans les domaines plus au Sud).

- **Miocène**

La mer miocène paraît avoir recouvert la partie méridionale des nappes tellienne et du parautochtone et autochtone du Hodna.

- **Burdigalien-Tortonien**

Des formations argilo-gréseuses à microfaunes littorales se déposent au Sud du domaine tellien et dans les autres domaines.

- **Pliocène**

Après émergence de la plupart des reliefs actuels, les Hautes Plaines Sétifiennes se sont comportées comme un bassin continental fermé rempli de sédiments détritiques grossiers.

- **Quaternaire**

On distingue quatre types de dépôts, différents les uns des autres et étages dans le paysage de la manière suivante :

Les parties hautes caractérisent des glaciers à surfaces tabulaires fossilisés par une croûte calcaire qui peuvent avoir subi des mouvements tectoniques daté du Quaternaires ancien.

Au dessous de ce niveau, on a des limons rouges profonds à taches calcaires datés de l'Amirien.

A la base des limons rouges, on a un glacier à croûte calcaire daté du Tensiftien.

Dans les parties les plus basses apparaissent les sédiments alluviaux localement hydromorphes ou même salés qui représentent les derniers dépôts du Quaternaire.

En bordure des Sebkhass dépourvues de toute végétation, on note une ceinture d'halophytes généralement étroite avec parfois des lunettes de Sebkhass.

## **2-6- Conclusion**

Selon les auteurs privilégiant une thèse allochtonistes (Guiraud, 1973 ; Vila, 1980), l'avant pays est subdivisé en deux grands ensembles

- Un avant pays septentrional comprenant d'Ouest en Est la plate forme sétifienne, la plate forme néritique constantinoise et le bassin des Sellaoua.

- Un avant pays méridional correspondant au domaine atlasique représenté par des ensembles calcaires et marno-calcaires allant du jurassique au miocène et affleurant entre les Monts de Batna et du Hodna à l'ouest et les monts d'Ain el Beida à l'Est.

Selon Vila (1980), seuls les Djebels Guergour et Anini, qui apparaissent en fenêtres sous les nappes telliennes qui ont le caractère d'autochtone.

D'autres auteurs privilégiant une thèse autochtoniste (Kazi-Tani, 1986 ; Lahondère, 1987 ; Chadi, 1991 ; Coiffait, 1992) considèrent que l'avant pays septentrional est resté solidaire au soubassement de la marge nord-africaine .Le front de nappe est ainsi repoussé au nord de la plate -forme sétifienne et constantinoise et plus à l'Est sur le domaine des Sellaoua.

En effet, pour Chadi (1991), le Miocène servant de couverture de l'ensemble sud-sétifien et engagé sous la nappe néritique constantinoise n'est que du Cénomani en couverture normal.

## Chapitre III

### APPROCHE GEOPHYSIQUE

#### 3-1- Introduction

La recherche et l'exploitation des ressources hydrauliques souterraines d'une formation géologique donnée sont étroitement liées à la connaissance de la nature géologique des sédiments et leur extension aussi bien horizontale ou verticale (épaisseur).

Une campagne géo-électrique a été réalisée en 1972 par la compagnie générale de géophysique (C.G.G) pour la direction de l'hydraulique de wilaya de Sétif (D.H.W).

Cette étude avait pour objectif essentiel l'exploitation de la ressource en eau de la région. Ainsi, l'identification de la situation des aquifères profonds, la délimitation du recouvrement Mio-Plio-Quaternaire, ainsi que les limites de l'extension de l'allochtone Sud-Sétifien et de la zone d'écaillés de l'avant pays des monts du Hodna, permettront de déterminer les formations aquifères et leurs modalités d'alimentation. En ce qui concerne les formations carbonatées, la détermination des structures des carbonates crétacés permettra de présumer du potentiel de l'aquifère karstique qu'elles contiennent. Par ailleurs, la détermination de l'extension des sédiments du Trias est importante du fait de l'impact de cette formation riche en évaporites sur la salinité des nappes.

#### 3-2- Principe de la prospection par sondage électrique

Le sondage électrique est la recherche de l'épaisseur des couches de résistivités différentes en faisant varier AB du quadripôle (Fig. 3-1)

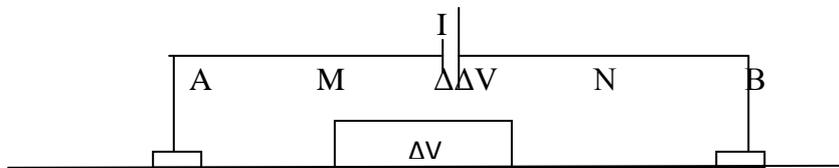


Figure 3-1 : schéma du montage utilisé en prospection électrique.

Au lieu de réaliser un sondage électrique (S.E), en augmentant progressivement la longueur AB, on peut maintenir celle-ci constante et déplacer le dispositif sur le terrain. On réalise ainsi des profils électriques. Leur synthèse permettra de tracer une carte à isorésistivité.

Dans cette étude, on ne dispose que de peu de forages pour étalonner les résistivités des diverses formations. D'autre part du fait que l'on a affaire sous le recouvrement Mio-Plio-Quaternaire à des nappes de glissements (allochtone sud-Sétifien) comportant des couches pentées (non horizontales), les sondages électriques (SE) ne peuvent fournir que des renseignements qualitatifs.

### **3-2.1- Disposition des profils électriques**

Les sondages électriques (S.E) ont été disposés suivant des profils Nord-Sud, espacés de 4 Km, les sondages électriques (S.E) sont distants d'environ 2 Km (sur les profils FG,G,GH,H,HJJ,JK,K,KL,L,LM,M) (Fig. 3-2 ).

### **3-2.2- Coupes géoélectriques**

Dans l'ensemble, on distingue quatre cas.

- Les formations très conductrices attribuées au Trias du fait qu'elles rejoignent souvent les affleurements.

Ces formations conductrices peuvent paraître très épaisses pour le Trias, en supposant que celui-ci ne constitue qu'une mince couche à la base des chevauchements. Le choix de la résistivité 3 à 4 Ohm-mètre explique cette grande épaisseur relevée sur certaines coupes géoélectriques. En prenant une résistivité de 1 à 2 Ohm-mètre des épaisseurs de 400 mètres attribuées au Trias seraient réduites à 100-200 mètres.

En réalité, il est probable que les épaisses formations conductrices représentaient, outre le Trias, d'autres formations marneuses salées (comme les marnes sénoniennes ou même Cénomaniennes des nappes de chevauchement).

- La présence de masses très résistantes, épaisses attribuées au Crétacé inférieur (Les calcaires et dolomies du Barrémien et de l'Aptien). Ces masses résistantes sont plus ou moins coupées par des horizons plus conducteurs qui surmontent parfois une formation conductrice (Crétacé inférieur et éventuellement Trias).

- Entre les deux cas cités ci-dessus, il y a des zones où le Trias ne semble pas exister et où le substratum résistant est profond. Par ailleurs, l'allure synclinale peut être liée à un entassement de plusieurs couches successives (conductrices et résistantes), ou à une série d'écaillés voire même une nappe de glissement tel que les grands accidents chevauchants (Vila 1972).

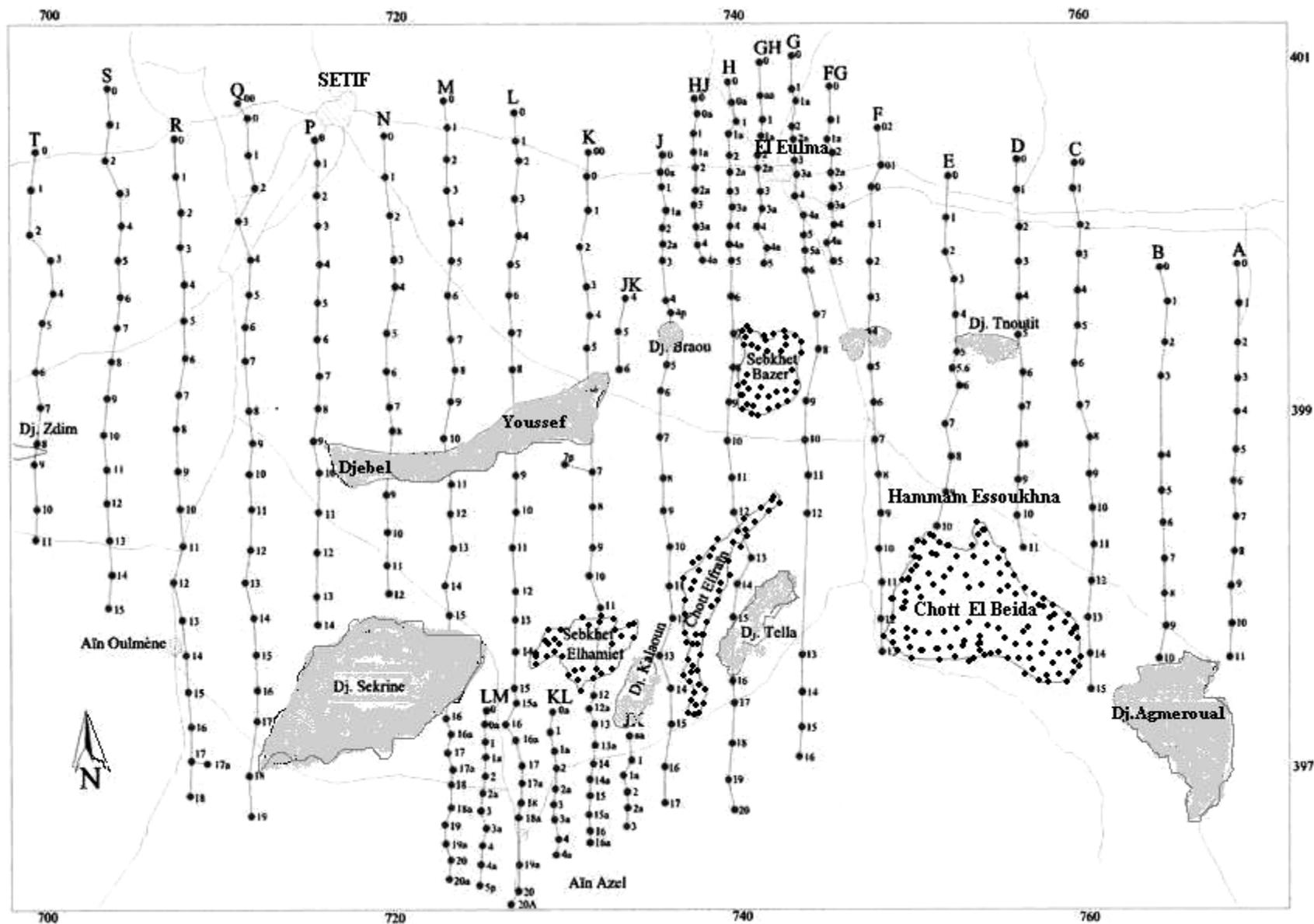


Figure 3-2 : Carte de disposition des profils électriques

- Les zones salées sont en rapport avec les plans d'eau salée ou au formations triasiques. La zone salée peu profonde et très étendue au Sud d'El Eulma est en rapport avec Sebkhet Bazer. Par contre les zones salées entre les Djebels Youssef et Brao sont liées à la présence du Trias sous-jacent.

### **3-3- Résultats et interprétation**

#### **3-3.1- Zone de Tadjenanet (Profil C)**

- Allure synclinale au Nord comportant une épaisse formation résistante (C6-C9b).
- Remontée des calcaires Aptiens jusqu'au Djebel Tnoutit.
- Accident chevauchement important avec remontée du Trias.
- Allure monoclinale avec nouvelle remontée de Trias jusqu'à l'affleurement,
- Allure synclinale remplissage marneux très épais (Cénomaniens).
- Remontée au Sud des calcaires du Crétacé inférieur.

La coupe E (annexe) a également la même allure, mais l'extension du Trias vers le sud est limitée (Annexe).

#### **3-3.2- Zone d'El Eulma (Profil G)**

- Apparition de niveaux très conducteurs au Nord qui peuvent appartenir à la nappe épitellienne (Trias et Sénonien) d'où la salure élevée de la Sebkhas de Bazer.

- Injection et débordement du Trias vers de sud.
- Remontée des calcaires (Turonien, Cénomaniens) sur Djebel Tella.

Sur les coupes G et H (annexe), le Trias prend l'importance au Nord.

Sur le profil J (annexe) les formations de la nappe épitellienne supposée (avec Trias à la base) sont marquées par l'érection à l'Aptien du Djebel Braou.

#### **3-3.3- Zone de Sétif : Djebel Youssef (Profil H)**

- Le Trias du Nord n'est pas visible, mais existe en profondeur et le front de la nappe reste bien marqué.

- Allure synclinale (Crétacé moyen et supérieur) ;
- Remontée des calcaires Aptiens sur le Djebel Youssef;
- Accident chevauchant à la limite Sud du Djebel Youssef;
- Allure synclinale avec du Trias à la base;
- Remontée des calcaires Turoniens et Aptiens au Djebel Sekrine, allure synclinale au Sud avec formations en écailles.

On note au Nord une remontée du Trias et l'avancée de la nappe triasique vers le Djebel Youssef (annexe).

### 3-3.4- Zone ouest de Sétif (Profil G)

On note une épaisse masse conductrice au Sud (annexe).

### 3-3.5- Cartes à isorésistivité en ligne AB = 200 m

Le recouvrement superficiel est fréquemment conducteur. Mais on doit noter aussi la présence de formation superficielle (20-50QΩm) que l'on peut rattacher au Pliocène.

Ce niveau présente alors une allure sub-horizontale que l'on peut confondre avec des formations du substratum, mais il reste toujours très peu épais au maximum 50 mètres. La profondeur dépasse rarement 100m. Ce niveau est sans doute exploitable par endroits. La carte traduit la résistivité moyenne d'une tranche de près de 50 m d'épaisseur à partir de la surface (Fig. 3-3). Elle intéresse donc principalement le recouvrement Pliocène sauf aux abords des massifs calcaires. Les résistivités sont de l'ordre de 7,5 à 50 Ωm :

- 7,5 à 15 Ω m : formations limoneuses
- 15 à 40 Ω m formation plus sableuse (seule zone exploitable du Pliocène)
- 7.5 à 5Ω m formations salées, limons, subies Miocène et Quaternaire,

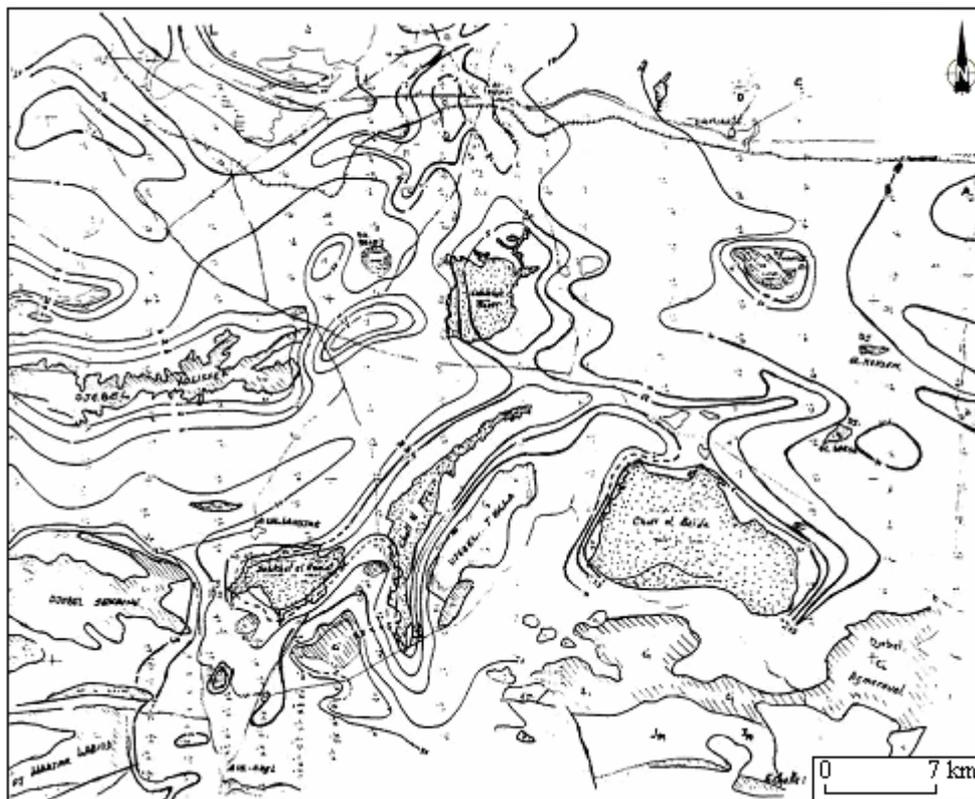


Figure 3-3 : Carte d'isorésistivité en ligne (AB = 200m)

### 3-3.6- Carte à isorésistivité (AB = 4000 m)

Cette carte (Fig. 3-4) a été établie pour mettre en évidence l'extension en profondeur vers 500-800 m de profondeur ; la formation très conductrice que nous avons attribué au Trias ou au moins aux formations de nappes liées aux Trias et par là très salées. Cette carte est très intéressante, car elle montre l'importance et la grande extension des formations conductrices.

La zone dont le cœur se trouve à El Eulma s'étend également vers le Sud jusqu'à la sebkhet de Bazer et rejoint le chott El Frain et de là semble rejoindre la zone de Sétif en contournant au Sud le Djebel Youssef.

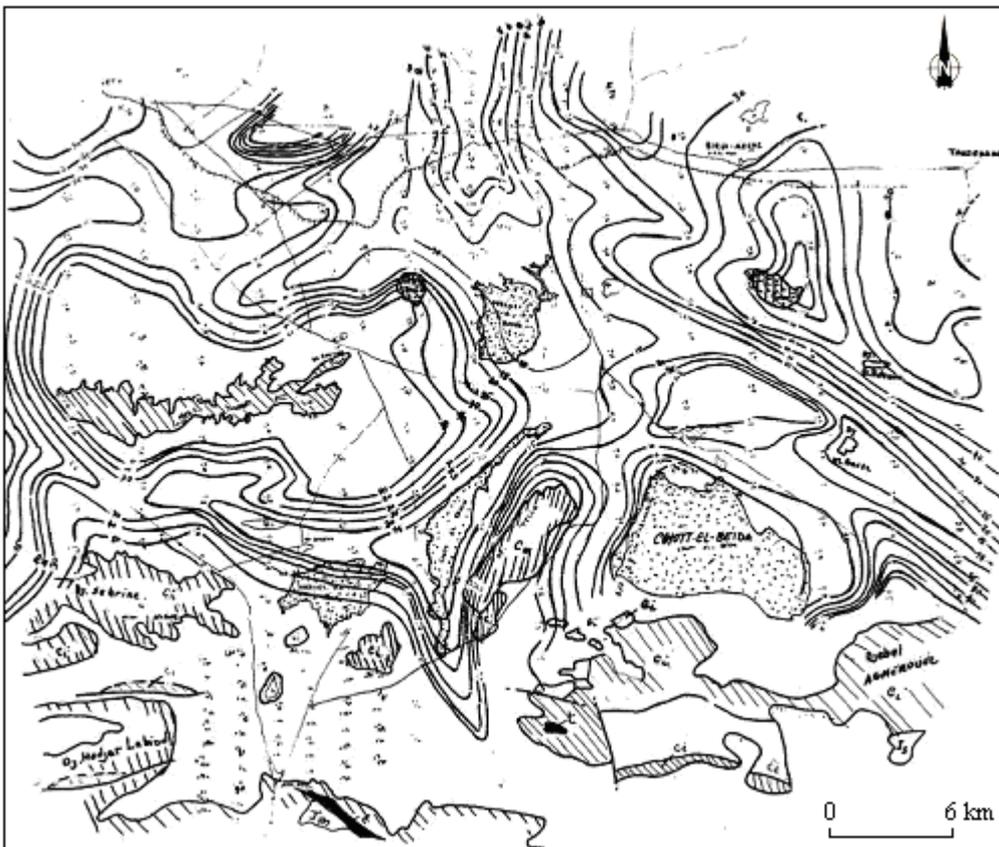


Figure 3-4 : Carte d'isorésistivité en ligne (AB = 4000m)

Le fait que ces plages conductrices soient jalonnées d'affleurements de Trias permet d'établir l'hypothèse que les formations conductrices appartiennent à des niveaux probablement charriés comportant des éléments de cette formation.

### 3-3.7- Carte du Trias du Crétacé inférieur

Les calcaires du Crétacé inférieur (Aptien-Barrémien) représentent l'objectif le plus intéressant de la région dans la zone autochtone du Sud et même dans la zone d'écaillés et de chevauchement du centre, en dehors du recouvrement des nappes triasiques.

Les zones où cet objectif peut être atteint dans les limites d'étude ont fait l'objet de carte en courbe de niveau du toit de la formation résistante (Fig. 3-5), sans distinction du niveau géologique ; ces zones sont :

- Le flanc Nord du Djebel Zdimm à l'Ouest,
- Le flanc Nord des Djebels Tnoutit. Et Meksem, Rokbet et Djemel à l'Est.
- Le flanc Nord et Ouest du Djebel Sekrine au Sud.

Ce sont les seules zones où les calcaires du Crétacé inférieur peuvent être exploités car elles sont exemptes de Trias, le Trias y est relativement profond, et peuvent bénéficier d'une alimentation par les Djebels qui offrent des superficies d'affleurement assez importantes (sauf Djebels Zdimm, Tnoutit et El Meksem).

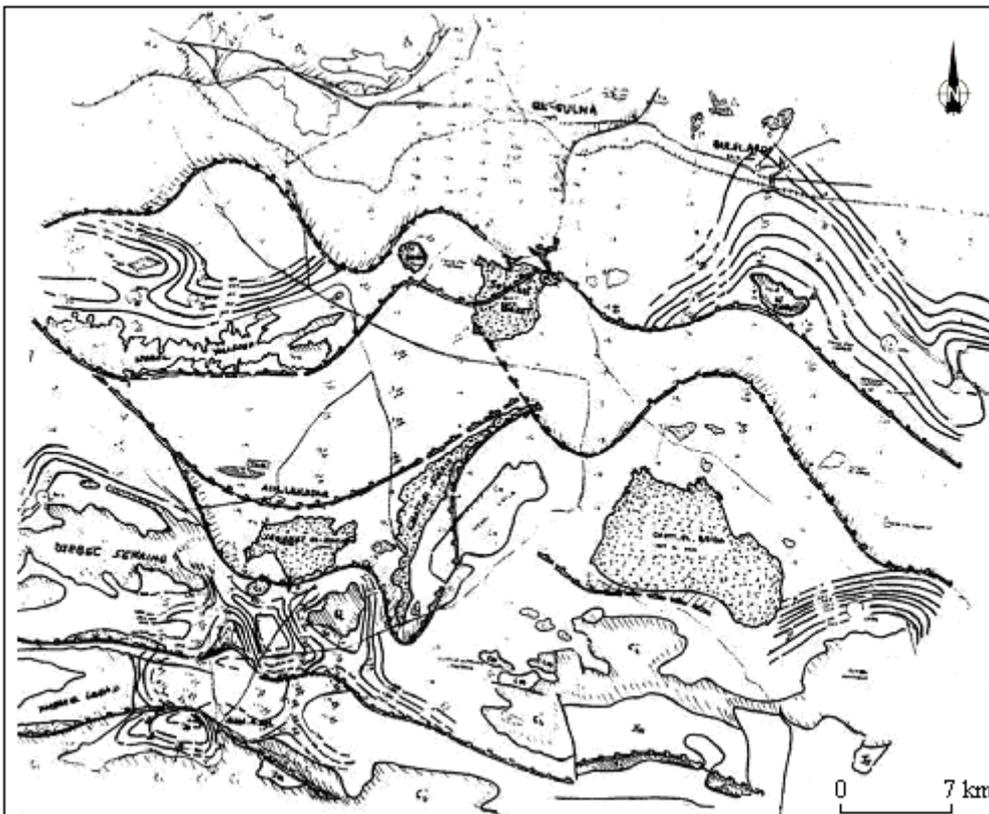


Figure 3-5 : Carte du toit Crétacé inférieur

- Zone du Djebel Youssef : les calcaires Aptiens sont visibles jusqu'à des profondeurs de 900 m au Nord, mais présentent des profondeurs relativement faibles (jusqu'à 6 km d'affleurement à l'Ouest jusqu'à 2 km à l'Est). On a des grandes surfaces d'alimentations avec des forages qui peuvent atteindre 400 m de profondeur.
- Zone des Djebels Tnoutit et El Meksem : les calcaires affleurant sur une distance de 6

km sont atteints à de faibles profondeurs, moins de 500 m.

- Les Calcaires Aptiens au Nord (Djebel Tnoutit) et les calcaires Hauterivien ou Valanginien au Sud-Est. Quelques réserves sont à formuler au sujet de cette zone où seuls les affleurements de Rokbet El Djemel présentent une grande surface d'alimentation et où le Trias est présent sous le Crétacé inférieur. Cependant, vu la grande épaisseur des calcaires, on peut proposer des forages de 500 m de profondeur (sondage C, annexe).

### **3-3.8- Carte du toit des horizons résistant du crétacé moyen et supérieur :**

Outre le Crétacé inférieur exploitable seulement dans les zones d'autochtones ou d'écaillés rigides, les formations du Crétacé moyen ou supérieur offrent également des objectifs possibles compris dans les zones allochtones.

Ces formations peuvent être les calcaires du Sénonien supérieur, les calcaires Turoniens ou Cénomaniens.

Les coupes (annexe) montrent qu'il est difficile de faire une hypothèse sur l'âge de ces terrains même dans les nappes du Nord. On a affaire à des calcaires du Sénonien ou même à des calcaires du Crétacé moyen.

- Zone où les formations résistantes peuvent recevoir une alimentation.
- Zone où elles sont suffisamment éloignées du Trias sous-jacent ou voisin
- Zone où elles sont à moins de 500 m de profondeur ou suffisamment épaisses.
- Zone de Bir El Arch.
- Zone d'El Eulma proprement dite qui est finalement à rejeter du fait de la présence de Trias peu profond (profils J à C, annexe). Par contre plus à l'Est où le Trias est plus profond, les formations allochtones présentent à nouveau un l'intérêt plus important (Nord des profils F, E, D, C; annexe). On a affaire ici à des calcaires Sénoniens et au dessus des calcaires Eocènes (forages proposés de 400 m pour S.E. D1 et 500 m pour S.E. C1).

- Formations Eocènes :

Dans la plupart des coupes, on a au dessus du Sénonien un niveau résistant de quelques 500 m d'épaisseur que l'on peut attribuer au calcaire à Silex.

### **3-3.9- Carte structurale schématique (Extension du Trias).**

On a hachuré les zones où le "Trias est à moins de 500 m de profondeur. On obtient ainsi :

- Au Nord, une nappe dont le front passerait au Sud immédiat de Sétif.
- Une nappe conductrice très importante sous-jacente qui s'avance jusqu'à Ain Oulmène entre les môles du Djebel Zdim et du Djebel Youssef et couvre la zone Sud d'El Eulma,

C'est la nappe à base de Trias épais, la plus importante et couvre une grande partie de la région d'étude (qui correspond d'après JM. Vila à la nappe tellienne).

- Les zones qui constituent la partie centrale de la région d'étude non recouverte par  
Du nappe triasique.

Les Djebels Zdimm. Youssef et Braou (Crétacé inférieur) représentent des chevauchements importants. Cependant l'alignement des Djebels Tnoutit. El Meksem et Rokbet El Djemel plus à l'Est sont sans doute à rattacher à ces chevauchements qui sont injectés de Trias et donnent même naissance à une nappe triasique s'avancant de 5 à 6 km vers le Sud. C'est la nappe infra-tellienne d'après Vila (180). Cette carte permet de délimiter les zones de recherche des eaux à grande profondeur (de l'ordre de 500 m) et à éliminer les zones où le Trias est peu profond. Dans la zone (autochtone Sud), on observe de grands accidents plus ou moins chevauchants (avec ou sans injection de Trias) comme l'indique la carte de JM. Vila. On remarque l'allure (rectiligne) des accidents de l'autochtone alors que les chevauchement et fronts de nappe de la région allochtone présentent une convexité vers le Sud.

### **3-4- Conclusion**

La prospection par sondages électriques a fourni de précieuses informations géologiques quand à l'exploitation de la ressource en eau souterraine.

Dans les zones d'écaillés (Djebels Youssef...etc.), les calcaires bien qu'affleurant sur d'assez grandes superficies sont probablement affectés de nombreuses failles (qualité des aquifères moins sûre). Dans les zones de chevauchement (Djebel Tnoutit) les affleurements sont réduits, les structures très faillées et le Trias relativement proche, néanmoins ces zones sont les seules pratiquement aquifères. Ces zones sont les seules accessibles au centre de la plaine. Les formations allochtones calcaires constituent de bons aquifères.

La carte en ligne AB=200 mètres a permis de délimiter les formations salées (inexploitables) superficielles alors que la carte AB=4000 a permis de connaître l'extension de ces formations salées en profondeur.

L'étude établie par la CGG (Campanie Générale de Géophysique) vient de confirmer les thèses de J.M. Vila et par là expliquer l'origine des sebkhet et chotts qui est liée aux dépressions jalonnant le front de la nappe tellienne la plus méridionale.

Ainsi, pour l'implantation d'ouvrage de captages dans l'aquifère poreux mio-plio-quadernaire, le Trias étant localement présent à faible profondeur (moins de 50 m), il est à prévoir l'impact de cette formation salifère sur la qualité des eaux.

Enfin, pour optimiser l'exploitation de la ressource tant du point de vue hydrodynamique que de la qualité des eaux, il est préférable d'exploiter l'aquifère développé dans les calcaires du Crétacé inférieur (Aptien. Barrémien), aussi bien dans l'autochtone du Sud, que dans les régions d'écaillés du centre.

## Chapitre IV

### HYDROCLIMATOLOGIE

#### 4-1- Introduction

Le régime climatique des Hautes Plaines Sétifiennes est commandé aussi bien par la Morphologie du secteur que par sa position en latitude et en altitude. En été elles sont soumises à l'influence des hautes pressions subtropicales qui repoussent vers le Nord le Front Polaire. Il en résulte un climat chaud et sec. En hiver le Front Polaire descendant vers le sud repousse les zones de haute pression vers des latitudes plus basses. L'effacement partiel de l'anticyclone des Açores permettra l'apparition d'une circulation d'Ouest et l'établissement de courants perturbés. Sur la base d'une série de situations météorologiques qui se répètent régulièrement, on peut dire que se développent en Méditerranée trois types de perturbations : en Décembre, Janvier, et Février.

- Les perturbations d'origine Nord Atlantique suivent une direction N.NW.S.SE.

- Les perturbations d'origine Sud Atlantique Ouest, Sud-Ouest à Est, Nord-Est. En Mars et Avril ainsi qu'en Octobre et Novembre, la région subit aussi des perturbations d'origine Africaine. Dans le détail, il est possible d'observer un certain nombre de situations spéciales qui commandent autant de types de temps.

Les masses d'air humides venues de la mer sont contraintes dans leur cheminement à franchir les crêtes de la chaîne Kabyle. De ce fait elles se débarrasseront d'une grande partie de leur humidité et les versants de Kabylie orientés vers la mer recevront un volume très important de précipitations et ce d'autant plus que nous sommes dans un secteur où le Front Polaire dérivé est fréquemment présent. Lorsqu'elles descendront vers les Hautes Plaines, les masses d'air se réchaufferont par effet de Föhn. Plus au Sud, il y aura une nouvelle augmentation de la pluviosité liée au franchissement de la chaîne du Hodna ou de celle des Aurès et à la présence des Fronts Méditerranéens I et II. De la même façon, il y aura augmentation du volume des précipitations au niveau des massifs calcaires disséminés sur les Hautes Plaines. A l'inverse. Les couloirs ouverts entre les Monts des Hodna et ceux, des Aurès permettront l'avancée vers le Nord des influences Sahariennes.

Les Hautes Plaines Sétifiennes occupant une position élevée en altitude seront soumises à un climat de montagne chaud pendant la journée. Froid la nuit. De la même façon. Les hivers seront froids et la neige fréquente. A El Eulma comme à Ain Al Ahdjar, la saison pluvieuse se développe de Septembre à Juin, la période sèche se limitant aux mois de Juillet et d'Août.

Ces quelques observations montrent bien la complexité du climat qui règne sur les Hautes Plaines Sétifiennes. Malheureusement l'absence ou le très faible nombre de stations climatologiques ne nous a pas permis d'utiliser des données récentes pour une période de référence. Ainsi, nous présenterons la pluviométrie globale pour la période 1970-2007. Pour l'étude hydroclimatologique on s'est appuyé sur la période 1970-1985 pour laquelle nous disposons d'une série de données pluviométriques continues.

#### **4-2- Paramètres climatiques**

L'effet combiné des conditions climatiques (précipitations, température et évapotranspiration surtout) et des paramètres physiques (orohydrographiques morphologiques, lithologiques et biogéographiques) commande le comportement hydrologique des cours d'eau (n oueds) et l'alimentation des nappes d'eau souterraines.

Les précipitations annuelles constituent le facteur essentiel de l'abondance fluviale, alors que la pluviosité journalière et surtout les averses sont Génératrices de crues en particulier dans la région que nous avons étudiée. Malgré l'insuffisance et le manque de fiabilité des données, la faible densité du réseau d'observations météorologiques; nous avons tenté une étude de la variabilité de la pluviosité temporelle et spatiale. Un découpage de l'année pluviométrique des mois de Septembre au mois d'Août (année agricole) à été adopté du fait de l'absence quasi totale des précipitations pendant la saison d'été.

La région étudiée fait partie du grand bassin versant des Hauts Plateaux Constantinois (Fig.4-1). La faible densité du réseau pluviométrique nous a conduits à retenir des postes à l'extérieur des sous bassins versants (Fig.4-2). Le tableau 4-1 réunit les différents postes pluviométriques intéressant notre étude.

##### **4-2.1- Variabilités des précipitations**

Le tableau 4-2 donne un bref aperçu sur les données d'observations pluviométriques allant de 1913 jusqu'à 1968, et permet de constater l'hétérogénéité générale des séries.

Des études du régime des précipitations ont été élaborées par Seltzer (1946) pour la période 1913-1938, Gaussen et Bagnouls (1948) pour la période 1913-1947, et Chaumont et Paquin (1971) pour la période 1913-1963 (Fig. 4-3).

La série 1930-1960, correspondant à la période standard a été retenue comme représentative par l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale).

Pour l'étude climatique de notre région d'étude nous avons choisi une série récente 1985-2007, qui couvre une longue période de 22 ans.

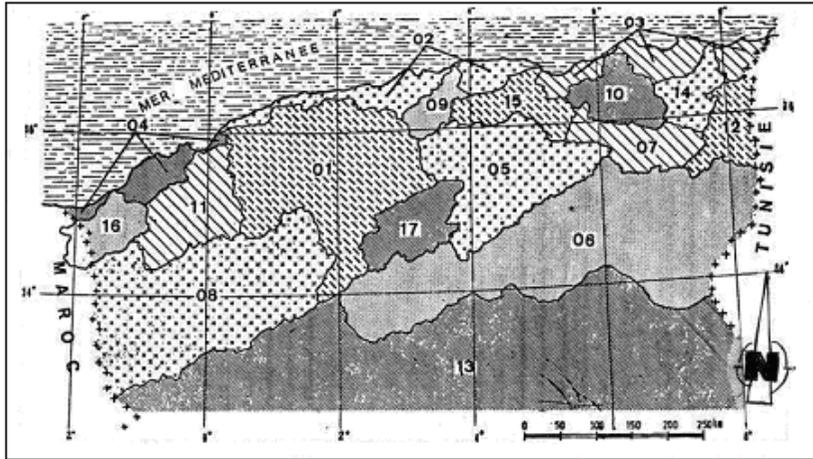


Figure 4-1 : Situation géographique du bassin des hauts plateaux constantinois

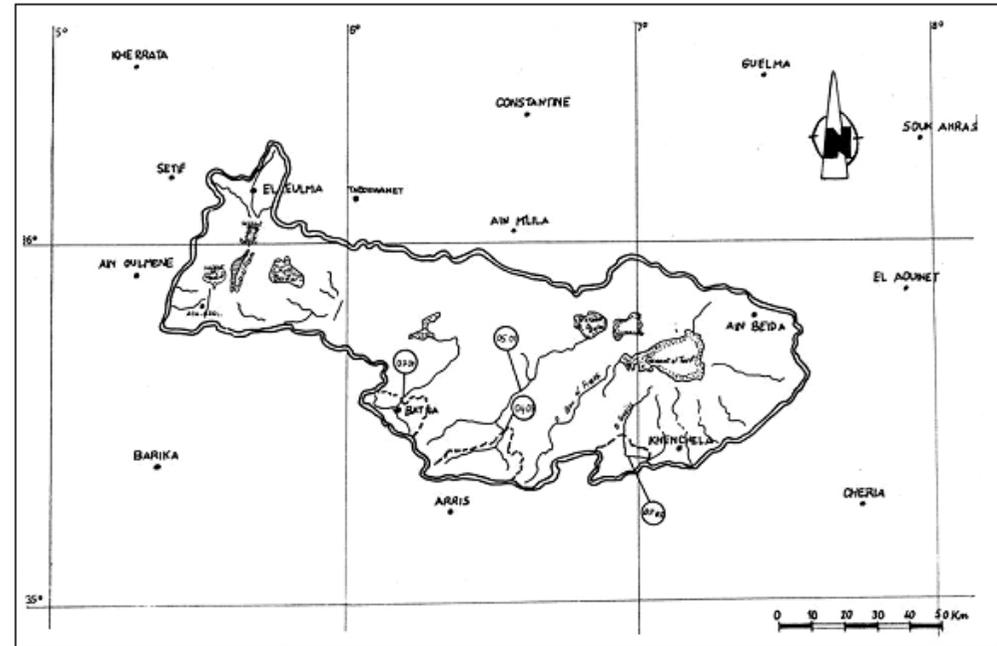


Figure 4-2 : Carte de situation des postes pluviométriques des Hauts plateaux constantinois

CODE	BASSIN	CODE	BASSIN
01	CHELIFF	07	H. PLATEAUX CONSTANTINOIS
02	COTIERS ALGEROIS	08	HAUTS PLATEAUX ORANAIS
03	COTIERS CONSTANTINOIS	09	ISSER
04	COTIERS ORANAIS	10	KEBIR RHUMEL
05	CHOTT HODNA	11	MACTA
06	CHOTT MELRHIR	12	MEDJERDAH
03	COTIERS CONSTANTINOIS		
13	SAHARA		
14	SEYBOUSE		
15	SOUMMAM		
16	TAFNA		
17	ZAHREZ		

Tableau 4-1 : Inventaire des stations pluviométriques existantes dans le bassin.

Bassin Versant	Stations	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Hauts Plateau de Constantine	El -Eulma	5° 42' E	36°09'N	960
	Ain-lahdjar	5° 32' E	36°56'N	920
	Ain Azel	5°31'E	36°49'N	960
Bassin Versant de la Soumam	Sétif	5° 25'E	36°11'N	1081
	Guellal	5° 20' E	36°02'N	908
	Ain-Oulmen	5° 17E	36°55'N	960
Bassin Versant du Kebir Rhumel	Ain El-Kebira			1020
	Tadjenanet			855

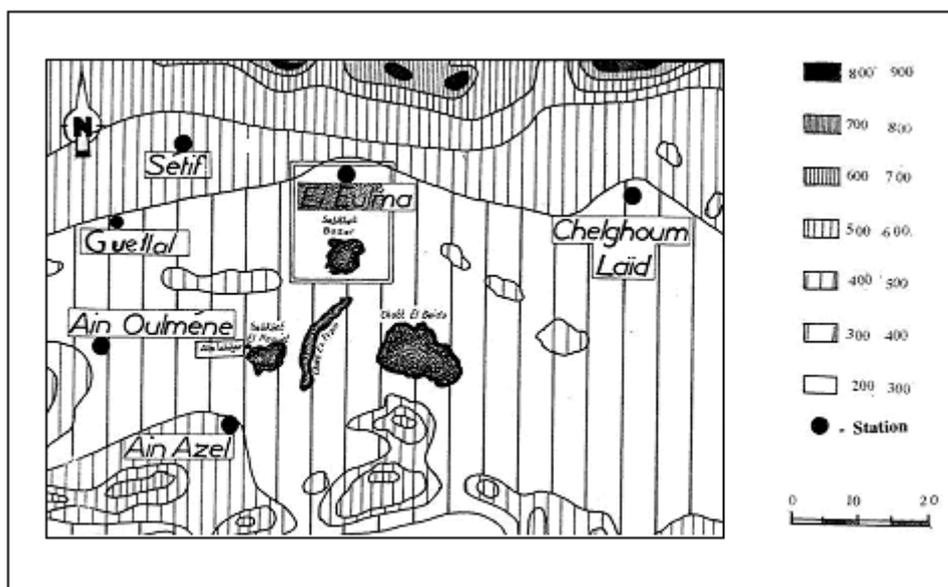


Figure 4-3 : Carte des précipitations annuelles (D'après Chaumont et Paquin)

Tableau 4-2 : Les séries d'observations pluviométriques sur les différents postes.

Stations	Périodes									
	1910	1920	1930	1940	1950	1950	1960	1970	1980	1990
Ain Lahdjar										
El -Eulma										
Ain Azel										
Sétif										
Tadjenanet										
Guellal										
Ain Kebira										

#### 4-2.1.1- Critique des données pluviométriques par la méthode des "doubles cumuls" ou de la double masse

Cette méthode consiste à comparer les totaux cumulés relevés aux postes pluviométriques à ceux d'un poste de référence ayant fonctionné sur une période longue et continue, et dont la série est jugée homogène.

On procède à l'analyse graphique de la liaison en portant sur papier millimétré en abscisses les totaux annuels cumulés du poste de référence et en ordonné les totaux annuels cumulés des postes à vérifier. On conclut que la série est homogène si les points sont distribués de façon linéaire, si au contraire il apparaît une ou plusieurs cassures, on conclut que la série n'est pas homogène.

L'homogénéisation de la série sera faite en affectant la valeur du rapport correctif aux totaux annuels considérés comme erronés. A l'échelle de la région d'étude les stations d'El Eulma et de Guellal ont été choisies comme stations de références (Fig. 4-4).

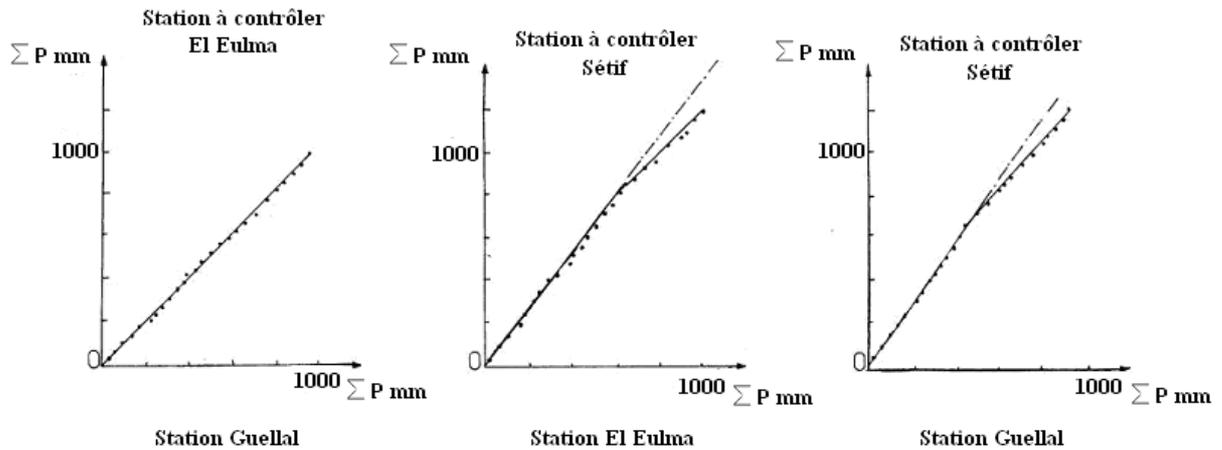


Figure 4-4 : Critique des données pluviométriques par la méthode des "doubles cumuls" ou de la double masse

#### 4-2.1.2- Comblement des lacunes d'observations

##### - Méthode des rapports

Les stations d'El Eulma, de Sétif et d'Ain Lahdjar présentent des lacunes d'observations sur plusieurs mois voire sur plusieurs années. La méthode des rapports a été employée pour reconstituer les séries récentes communes aux postes de Sétif et d'El Eulma (1969-70/1982-83).

Cette méthode admet que le rapport des hauteurs de pluies tombées pendant un même mois et pendant une série de mois de même nom était le même en des stations voisines. Les couples de postes à confronter doivent avoir des affinités aussi bien climatiques que géographiques (selon A. Halimi 1980) la distance séparant un couple de postes doit être inférieure à 80km.

$$P_y = K P_x$$

$P_x$  : représente la valeur observée au poste x.

$P_y$  : représente la valeur inconnue pour le même mois ou la même année pour le poste y.

K : constante d'ajustement égal au rapport de la somme des précipitations observées pour les deux postes x et y pendant une période commune.

La démarche suivie est illustrée par l'exemple d'ajustement des données du poste de Sétif (y) à partir de celles du poste d'El Eulma (x) pour le mois de janvier. Les deux postes se trouvent dans le même contexte climatique et géographique.

Le total de la lame d'eau précipitée au mois de janvier pour la période commune (1969/70 - 1985/86) est de 695 mm au poste de Sétif et de 823, 9 mm au poste d'El Eulma.

La constante d'ajustement :

$$K = \frac{\sum P_y}{\sum P_x} = \frac{695 \text{ mm}}{823 \text{ mm}} = 0.84$$

On sait que la hauteur de la lame d'eau précipitée du mois de janvier 1969 était de 22.4 mm, donc la valeur correspondante à Sétif serait de :

$$P_y = P \text{ Sétif} = 0,84 \times 22,4 = 18,8 \text{ mm}$$

#### - Méthode de régression linéaire

A partir des observations pluviométriques d'un poste pris comme poste de référence, la méthode de régression linéaire permet d'estimer la lame d'eau précipitée dans un autre poste voisin (Fig. 4-5). La droite de régression de y en x est de la forme :

$$y = ax + b$$

Avec :  $a = R \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$  et  $b = \bar{y} - a\bar{x}$

D'où y l'équation de régression :

$$y = R \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}) + \bar{y}$$

$\sigma_x$  .  $\sigma_y$  : écarts types des séries X et Y.

$\bar{x}$  et  $\bar{y}$  : moyenne de la lame d'eau précipitée aux poste de référence(X) et au poste de la série incomplète Y sur n années commune aux deux postes X et Y

$$R_n = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) \sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum (xy)_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) \sigma_x \sigma_y}$$

$R_n$  : Coefficient de corrélation entre Y et X estimé à partir de n couples de valeurs observées simultanément au deux postes X et Y sur n années communes.

n : nombre d'années {ou de mois d'observation communes aux deux postes y et x

K : le nom de l'année (ou du mois) inconnue (manquante).

$y_k$  : valeur de la lame d'eau précipitée possible manquante pour Tannée (ou le mois) inconnue.

Les plus faibles coefficients de corrélation se situent aux mois d'Octobre, Mars, Avril, et Juillet pour le couple de postes EI Eulma ; Ain Lahdjar, alors que la meilleure corrélation entre ces postes se situe au mois de Septembre.

Les lacunes d'observations ont été comblées mois par mois:un exemple graphique d'application de la méthode de régression linéaire faite à l'échelle annuelle et une autre h l'échelle mensuelle a été élaborée. (Fig. 4-5).

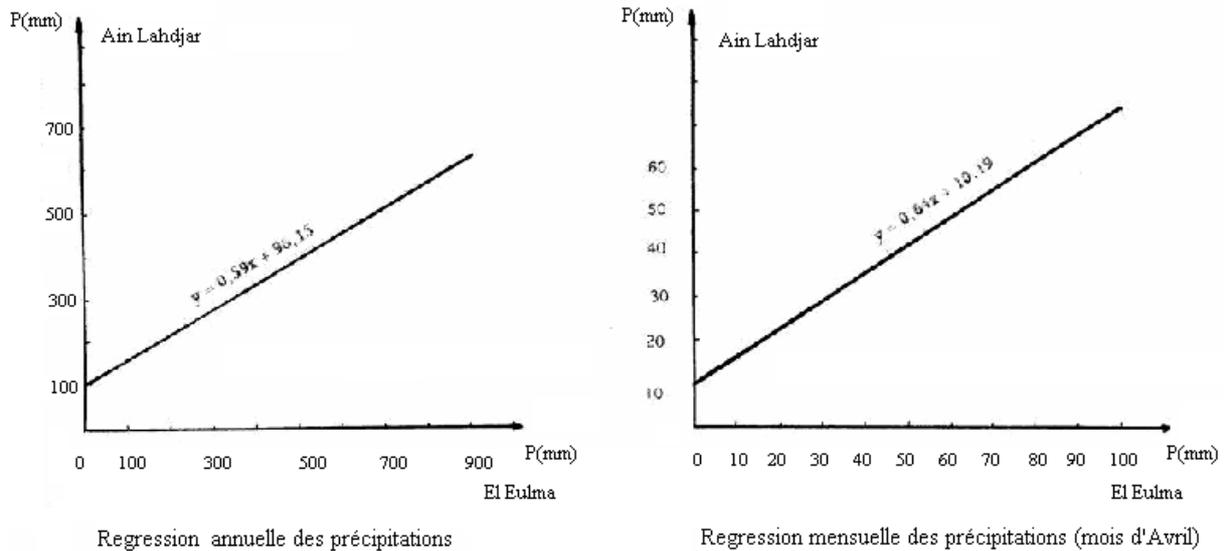


Figure 4-5 : Exemples de régression des précipitations annuelle et mensuelle

#### 4-2.2- Etude de la pluviosité annuelle

La variabilité des précipitations sur de longues périodes d'observations doit être précisée par des moyens statistiques qui permettent de lier les hauteurs de pluie précipitées à leur période de retour.

##### 4-2.2.1- Comparaison des séries pluviométriques

- Pluies annuelles (série de 1985-2007)

Une nouvelle série de données (1985-2007) correspond à une forte pluviosité comme le montrent les histogrammes pour les différentes stations fournies par l'ONM. On remarque que les plus fortes pluies sont enregistrées au cours des années agricoles 2003 et 2004 avec lames d'eau les 550 mm pour les trois stations, alors que la moyenne interannuelle est de 388.8mm (Figs. 4-6a, b, c).

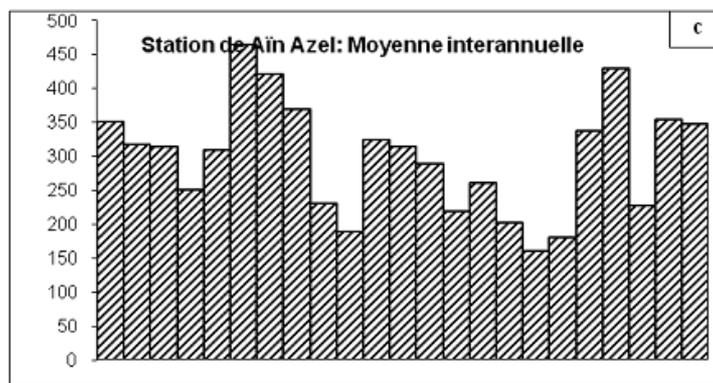
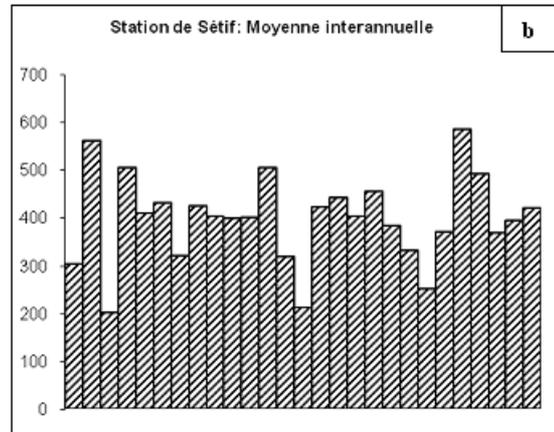
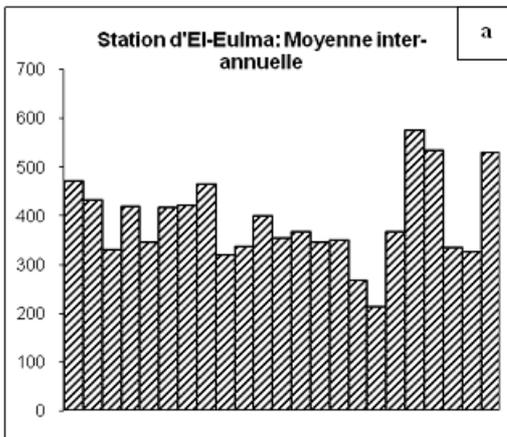
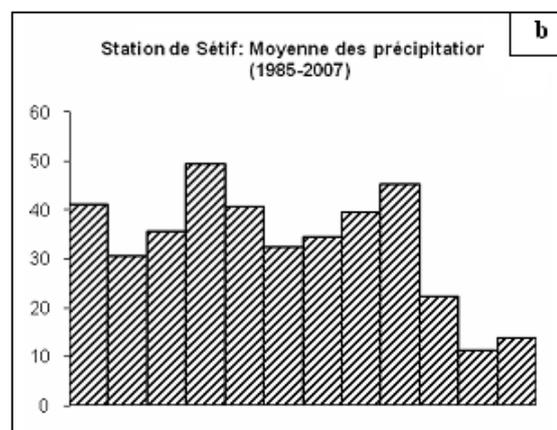
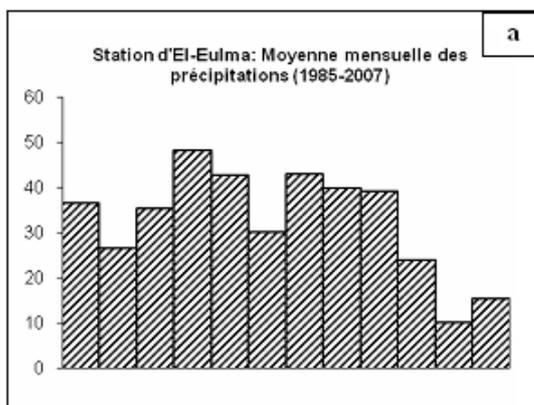
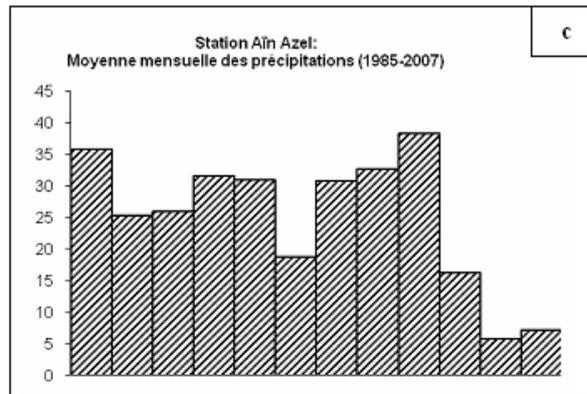


Figure 4-6a, b, c : Histogrammes des hauteurs moyennes de précipitations annuelles pour les stations d'El Eulma et de Sétif (Série récente 1985/86-2006/07)

- Pluies mensuelles

Les précipitations sont extrêmement variables d'un mois à l'autre. Les plus pluvieux de l'année pour les trois stations sont les mois de Décembre et Janvier. Alors que les plus secs sont dans l'ordre Juillet-Août, et enfin Juin, pour les trois stations (Figs. 4-10a, b, c).





Figures 7a, b, c : Histogrammes des hauteurs moyennes de précipitations mensuelles pour les stations d'El Eulma, Sétif et Ain Azel (Série récente 1985/86-2006/2007)

Dans l'ensemble, il y a une certaine homogénéité des valeurs d'observations de la pluviosité annuelle moyenne quelque soit la période. Dans le contexte de ce chapitre nous avons choisi d'utiliser les données pluviométriques de la période 1970-1985 que nous corrélons avec la série de Seltzer et Chaumont et Paquin afin de définir les caractéristiques climatiques de la région d'étude (Tableau 4-3).

La comparaison des trois séries permet de constater différentes hauteurs de précipitations moyennes annuelles.

La série de Seltzer (1913-1938) est caractérisée par des moyennes annuelles plus élevées que celles des autres périodes ; alors que la série de Chaumont et Paquin (1913-1963), montre des moyennes très inférieures à celles des autres séries (Fig. 4-3).

Le graphique de la figure 3-8 représente l'évolution des précipitations à El Eulma sur une période de 76 ans (1933-1989).

Par rapport à cette période de référence, la série (1930-1960) de l'O.M.M (Organisation Mondiale de la Météorologie) a été plus ou moins sèche, la série de Seltzer (1913-1938), a enregistré des hautes précipitations supérieures à la moyenne, pendant une période de 14 ans, et des hauteurs de précipitations inférieures à la moyenne, pendant une période de 18 ans.

Par ailleurs, la série récente 1969-1989 correspond à une période de forte pluviosité.

Les fluctuations de précipitation annuelles indiquent l'existence d'oscillations climatiques dues à l'instabilité du temps.

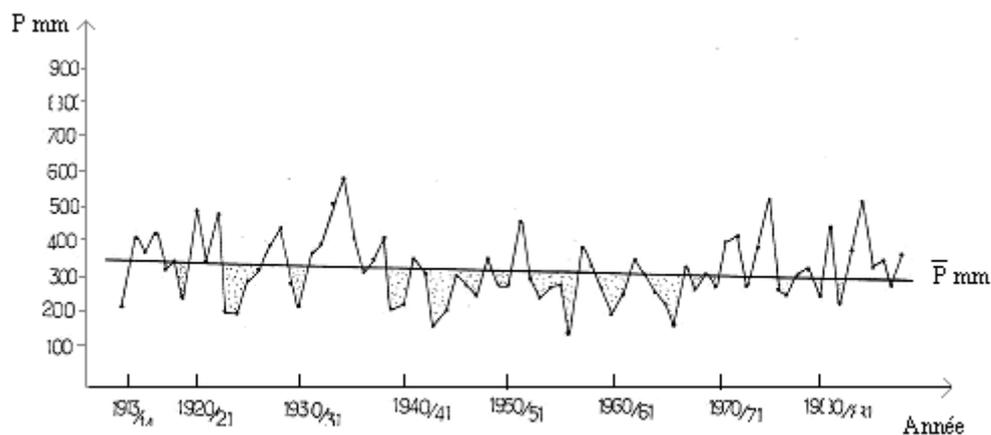


Figure 4-8 : Evolution annuelle des précipitations (Station d'El Eulma)

Tableau 4-3 : Tableau comparatif des hauteurs de précipitations moyennes annuelles des différentes séries

Stations	Altitude (m)	Seltzer 1913-1938 25 ans	Bagnouls-Gaussen 1913-1947 34 ans	Chaumont-Paquin 1413-1963 50ans	ASD 1930-1960 30 ans
SETIF	1081	469	458	417	390
EL-EULMA	960	386	366	363	355
AINLAHDJAR	920	329	316	314	324
AIN AZEL	960	427	-	-	354**
TADJENANET	855	408	399	409	391*
GUELLAL	908	414	349	344	323
AIN OULMENE	960	358	-	-	336* *
AINKEBIRA	1020	734	688	662	649*

\*\* Valeur établie sur données très limitées

\* Série établie par A. Mebarki (1982).

#### 4-2.2.2- Répartition spatiale des précipitations annuelles

##### a- Méthode des isohyètes

##### - Etablissement de la carte en isohyètes:

La carte en isohyètes (Fig. 4-9), ne constitue en effet qu'une esquisse des variations spatiales des précipitations moyennes annuelles (1930-1960). Sa mise en oeuvre s'est heurtée à la faible densité des postes de mesures qui se traduit par de larges espaces vides et à la fiabilité des données d'observations.

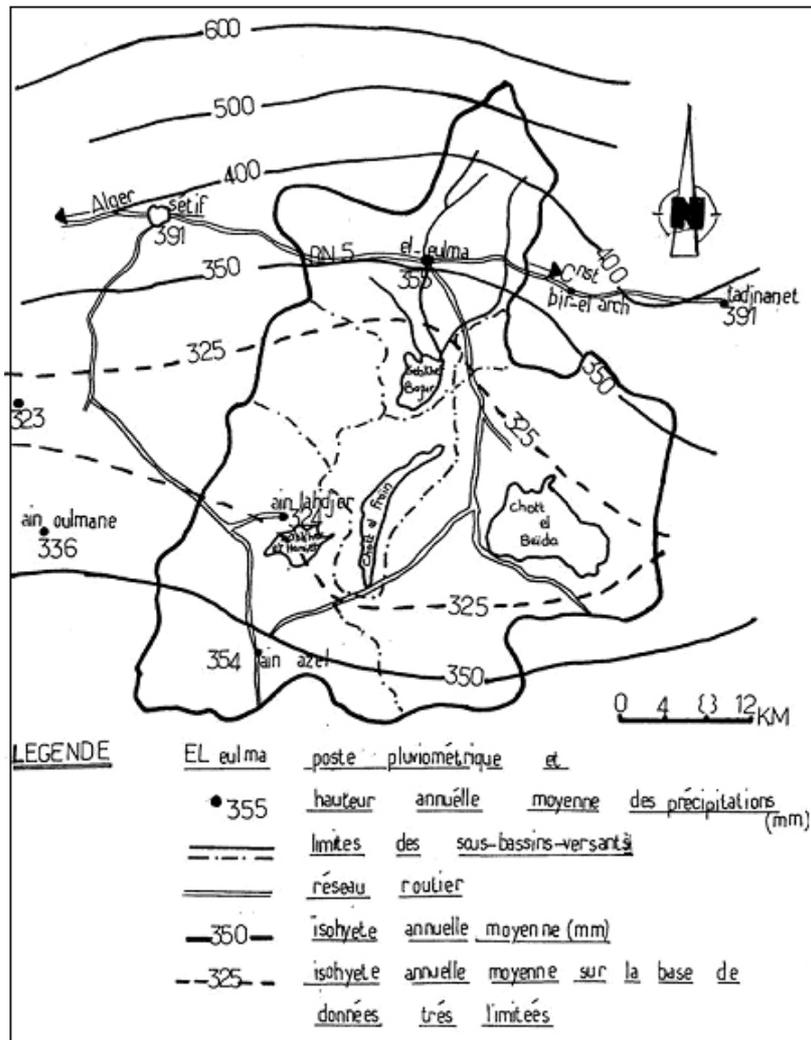


Figure 4-9 : Esquisse pluviométrique.  
Carte en isohyètes sur une moyenne de 30 ans (Série 1930/31-1959/60)

**- Evaluation des lames d'eau précipitées sur chacun des sous bassins versants :**

Cette méthode consiste à calculer une moyenne par planimétrie des zones comprises entre les courbes d'égales précipitations (isohyètes) qui ont été tracées à partir des stations.

La superficie de chaque aire comprise entre deux isohyètes est affectée de la moyenne arithmétique des valeurs de ces deux isohyètes (P(n) ; il suffit alors d'additionner les volumes d'eau précipités obtenus pour chaque aire et de diviser l'ensemble par la superficie totale de chaque sous bassin versant soit :

$$P \text{ (mm)} = \sum p_n A_n / A$$

La presque totalité des sous bassins de notre zone d'étude se trouve sous l'influence de l'isohyète 325 mm .On remarque aussi une augmentation plus ou moins progressive des moyennes pluviométriques du Sud au Nord due probablement à l'effet de l'altitude surtout

dans la partie Nord du sous bassin d'El Eulma (Bazer). De même qu'a la plus grande proximité de la mer.

### b- Méthode du Gradient Altimétrique ou relation précipitation-altitude

La faible densité des postes de mesure pluviométrique rend difficile tout calcul du gradient pluviométrique. La méthode consiste à établir la courbe de régression linéaire reliant la pluviosité à l'altitude.

$$P = R \sigma_p / \sigma_h (H_i - \bar{H}) + \bar{P}$$

R : coefficient de corrélation ( $\bar{H}$  et  $\bar{P}$ ),

$\sigma_p$  : Ecart type (précipitation).

$\sigma_h$  : Ecart type (altitude).

$\bar{H}$  et  $\bar{P}$  : moyenne précipitation et altitude.

Nous avons essayé d'établir une courbe de régression linéaire pour la partie nord des sous bassins versants mais en l'absence de relation entre l'altitude et les lames d'eau précipitées nous n'avons pu atteindre notre but à cause de l'effet de la latitude.

Tableau 4-4 : Lame d'eau moyenne annuelle précipitée sur les sous bassins d'El Eulma (Méthode des isohyètes).

S/BV			S/BV Sebkhet El Guinguet			S/BV			S/BV Chott El Fraïn			S/BV		
PM mm	SI km <sup>2</sup>	VE 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	PM mm	SI km <sup>2</sup>	VE 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	PM mm	SI km <sup>2</sup>	VE 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	PM mm	SI km <sup>2</sup>	VE 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an	PM mm	SI km <sup>2</sup>	VE 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /an
550,0	4,84	2,66	—											
450,0	45,12	20,30	—									375	13,22	4,95
375,0	162,51	60,94	—			350	142,12	49,74				350	34,32	12,01
337,5	98,86	33,36	337,5	12,48	4,21	337,5	142,64	48,14				337,5	243,86	82,30
325,0	46	14,95	325,0	94,52	30,71	325	115,44	37,51	325	126,4	41,08	325	293,36	95,34
Total	357,3	132,21	—	107,00	34,92		400,2	135,39		126,4	41,08	—	584,76	194,6

PM : précipitations moyennes ; SI : Surface entre deux isohyètes ; VE : Volume d'eau

#### 4-2.2.3- Répartition temporelle des précipitations annuelles

La variabilité interannuelle des précipitations est bien exprimée par le coefficient de variation. Qui traduit la dispersion relative des pluies, les valeurs du coefficient de variation

relatives à la période (1930-60) oscillent entre 0,32 et 0.17, ce qui indique une variabilité faible.

La variabilité interannuelle des précipitations augmente du Nord au Sud Ain Kebira 0,17, Guellal 0.32. 11 semble donc que l'on puisse admettre que plus les lames d'eau précipitées sont faibles plus l'irrégularité pluviométrique est grande.

Le tableau 4-5 résume la variabilité du coefficient de variation pour les stations d'Ain Kebira, Tadjenanet, Sétif, Ain Lahdjar, El Eulma et Guellal.

Tableau 4-5 : valeurs du coefficient de variation (1930/31-1959/60).

Station	Ain Kebira	Tadjenanet	Sétif	Ain Lahdjar	El Eulma	Guellal
$\bar{P}$ moyenne	649	391	390,5	324.61	355.56	323,32
$\sigma_p$	111,4	83,8	88,46	90.64	98.213	104,64
$CV = \sigma_p / \bar{P}$	0,17	0,21	0.226	0.279	0.276	0,32

Gumbel a démontré que dans le calcul de la fréquence expérimentale les relations,  $F=i/n$ ,  $F- (i-1)/n$  et  $F= (i-0,5)/n$  étaient à rejeter. Seule la relation  $F-i / (n+1)$  qui représente l'espérance mathématique de la probabilité affectée à la ième valeur peut recevoir une justification théorique.

L'étude des variations interannuelles des précipitations mérite d'être complétée par une étude fréquentielle. L'objectif de cette analyse est naturellement la prévision de la période de retour d'une pluie donnée ou à l'inverse l'estimation de la quantité de pluie selon la période que l'on se fixe au préalable.

La distribution des précipitations annuelles passe par le choix (recherche) de la loi statistique la mieux adaptée (appropriée) pour ensuite estimer les paramètres d'ajustement suivant cette

Loi (moyenne P et écart type cv): ainsi que la variable réduite servant au calcul des différentes quantités.

L'application de cette méthode consiste à classer les modules pluviométriques par ordre croissant ou décroissant en attribuant à chaque module son rang dans la série classée. On calcule alors les fréquences expérimentales suivant la relation :

$$F= i / (n+1) ; <i:rang \quad (n : \text{taille de l'échantillon}).$$

Gumbel a démontré que dans le calcul de la fréquence expérimentale les relations  $F=i/n$ ,  $F=(i-1)/n$  et  $F=(i-0,5)/n$ , étaient à rejeter. Seule la relation  $F-i / (n+1)$  qui représente l'espérance mathématique de la probabilité affectée à la  $i$  ième valeur peut recevoir une justification théorique.

On reporte sur papier gausso-arithmétique les fréquences en abscisse Gaussique et les valeurs observées des hauteurs de pluie en ordonnée, puis on trace la droite d'ajustement permettant d'envisager la loi de probabilité.

La loi de probabilité utilisée, loi Normale de Gauss, na pas permis un ajustement satisfaisant de la courbe de fréquence. La distribution statistique qui s'adapte le mieux aux séries de précipitations observées est la loi Galton (Fig. 4-10). L'estimation numérique des précipitations fréquentielles (PF) en année humide et en année sèche, se fait en appliquant l'équation de la variable réduite de Gauss (UF).

$$\mu_F = \log(P-P_0) - (\sqrt{\log(p-p_0)}) / P-P_0 \sigma_{10}$$

Avec  $P_0$  : paramètre de position ;  $\mu_F$  : variable réduite de Gauss.

L'ajustement à une loi de Galton (Gauss -logarithmique) comporte un paramètre de position ( $x_0$  ou  $P_0$ ) choisi par tâtonnement, ici dans notre cas on pose :  $P_0 = 0$ .

On peut aussi estimer les précipitations fréquentielles (PF) pour une loi log normale (Galton ou Gausso logarithmique) en appliquant :

$$\sqrt{P_{F\%}} = \mu_{F\%} \sqrt[3]{P} + \sqrt{P} \quad \text{Et} \quad F\% = a.b$$

$$\text{Avec les paramètres d'ajustements : } a = \frac{\bar{P}}{\sqrt{Cv^2 + 1}} \quad \text{Et} \quad b = \sqrt{Cv^2 + 1}$$

$P$  : module des précipitations ;  $cv$  : coefficient de variation égal au rapport de l'écart type à la moyenne

Les valeurs des variables réduites correspondantes aux fréquences retenues (2, 10, 50 et 100 ans) sont données par la table de Gauss.

On remarque que la lame d'eau précipitée sur la station d'El Eulma de durée de récurrence centennal (Tableau 4-6) serait en année humide près de deux fois plus élevé et en année sèche près de deux fois plus faible que la pluie médiane ( $PF= 0,5$ ).

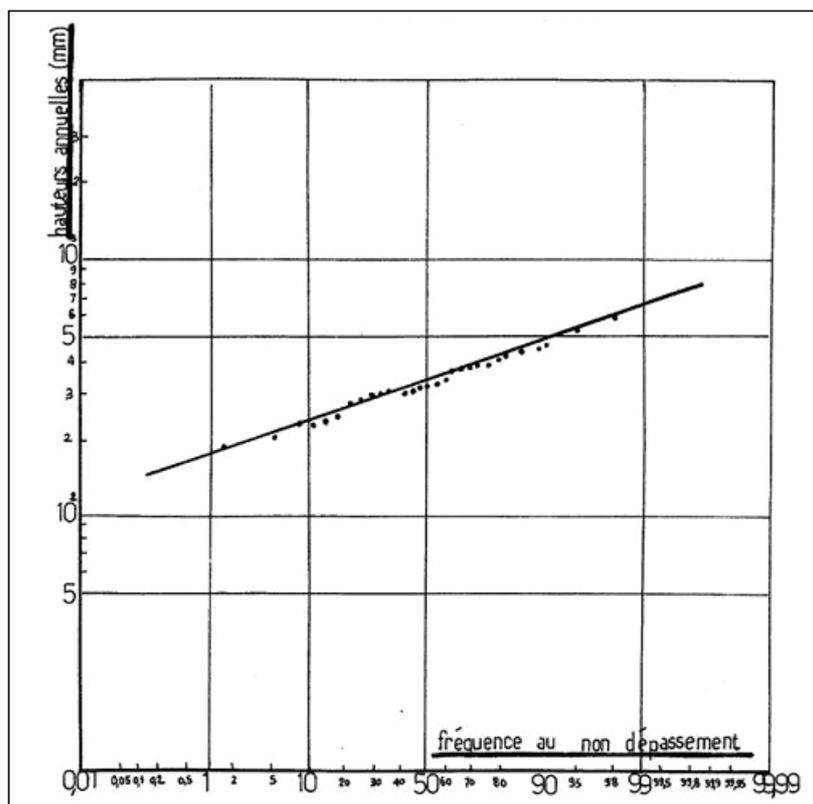


Figure 4-10 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Gausso-logarithmique Station d'El Eulma (Série 1930/31- 1959/60)

Tableau 4-6 : Précipitations moyennes annuelles et durée de récurrence. Période 1930-31/1959-60.

Stations	Paramètres	Année humide				Biennale	Année sèche		
		année	*10 Ans	**50 Ans	***100 Ans		*10 Ans	**50 Ans	***100 Ans
	Gausso-Log	F(x)	0,99	0,98	0,90	0,5	0,10	0,02	0,01
		U	2,32	2,05	1,28	0	-1,28	-2,05	-2,32
El Eulma	Log P = 2,535 log P = 0,121		654,50	607,0	489,8	342,90	240,0	193,7	179,7
Ain Lhdjar	Log P = 2,4959 log P = 0,1165		583,7	542,9	441,6	313,26	222,2	180,7	168,1
Sétif	Log P = 2,581 log P = 0,0945		632,62	596,51	504,4	381,79	288,95	244,3	230,42

(\*Décennale ; \*\*Quinquennale ; \*\*\*Centennale)

#### 4-2.3- Etude de la pluviosité mensuelle :

L'irrégularité mensuelle des précipitations au cours de la période de référence (1930-1960) ressort parfaitement des valeurs du coefficient de variation calculé pour les deux stations d'El Eulma et d'Ain Lahdjar et pour les différents mois de l'année (Tableau 4-7).

Il apparaît en effet que les précipitations mensuelles sont extrêmement variables d'un mois à l'autre; pour certains mois le coefficient de variation dépasse largement l'unité (1) et il est compris dans l'ensemble entre 0,60 et 1,75.

Les valeurs du coefficient de variation les plus élevées concernent les mois d'été Juillet et Août le maximum apparaissant en Juillet en particulier pour la station d'Ain Lahdjar.

Le coefficient de variation le plus faible avec une valeur de 0.60 à El Eulma se présente en Février.

La forte variabilité intermensuelle des précipitations en particulier en été s'explique par la faiblesse de la pluviosité ainsi que par le caractère orageux des averses.

Tableau 4-7 : Variabilité des précipitations mensuelles (série 1930-60).

Station		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
El Eulma	$\bar{P}$	34,99	34,59	27,73	43,84	42,31	34,55	28,61	30,78	36,88	6,39	20,43	14,82
	$\sigma$	31,42	33,78	20,43	33,90	35,53	20,91	20,20	25,33	24,77	8,52	19,08	19,65
	$C_v$	0,897	0,97	0,73	0,77	0,83	0,60	0,70	0,822	0,669	1,33	0,933	1,325
Ain Lahdjar	$\bar{P}$	29,78	38,45	31,60	34,07	30,03	24,94	26,96	36,48	39,66	4,53	16,30	11,89
	$\sigma$	24,63	44,20	24,12	22,34	28,53	16,51	23,81	30,71	32,69	7,96	18,97	12,94
	$C_v$	0,82	1,15	0,76	0,65	0,95	0,66	0,88	0,84	0,82	1,75	3,16	1,08

#### 4-2.3.1- Répartition fréquentielle des précipitations mensuelles :

Nous avons estimé pour les postes d'El Eulma et d'Ain Lahdjar les précipitations fréquentielles avec des durées de récurrences identiques à celles retenues dans l'étude de la pluviosité annuelle (Figs. 4-11 et 4-12).

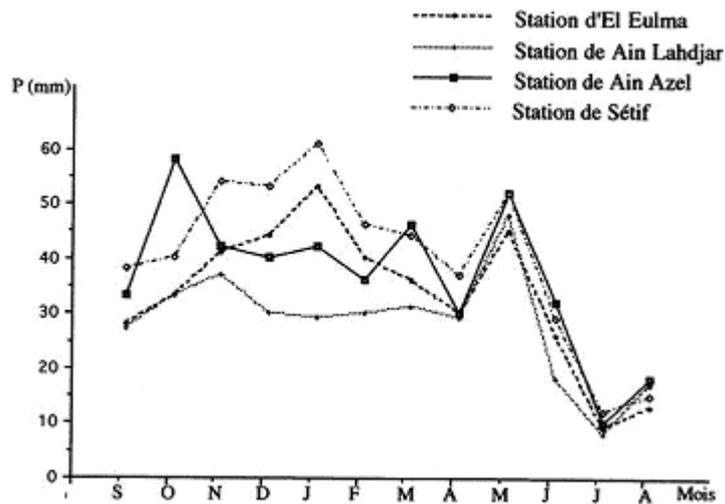


Figure 4-11 : Graphique des hauteurs moyennes des précipitations mensuelles (Série 1913-1938)

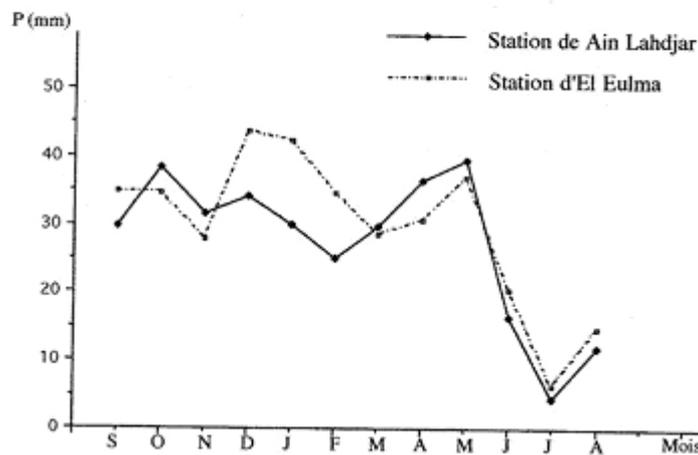


Figure 4-12 : Graphique des hauteurs moyennes des précipitations mensuelles (Série 1930-1960)

La loi d'ajustement la mieux adaptée aux précipitations mensuelles est la loi racine, (qui s'établit par anamorphose en racine carrée des valeurs mensuelles) .Le graphique (Fig. 4-13) confirme la validité de cette anamorphose.

L'estimation des quantiles se fait par l'application de la variable réduite de Gauss ; mais en transformant les moyennes en racines carrées :

$$\sqrt{P_{F\%}} = \mu_{F\%} \sqrt{P} + \sqrt{P}$$

Avec  $\mu_{F\%}$  : variable réduite de Gauss

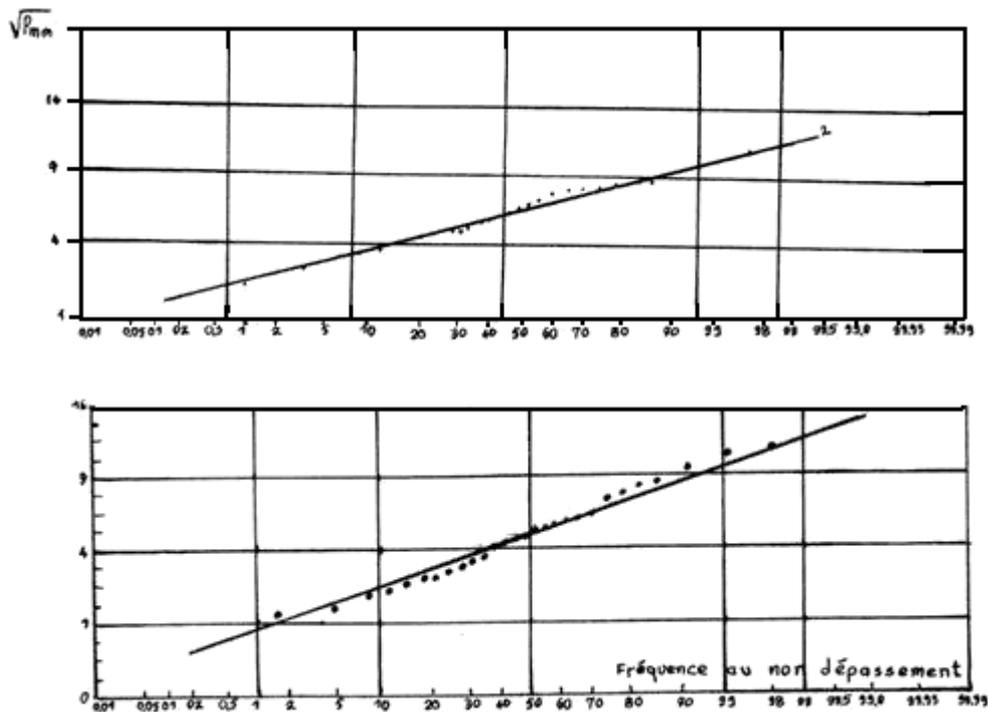


Figure 4-13 : Ajustement des précipitations à une loi de racine.  
Station d'El Eulma, mois de Décembre (2)-Octobre (1), période 1930-1960.

Nous avons calculé pour les poste d'El Eulma et Ain Lahdjar les précipitations mensuelles ayant une durée de récurrence de 2 ; 10 ; 50 et 100 ans en année sèche et en année humide (Tableau 4-8).

Décembre est le mois le plus pluvieux de l'année pour le poste d'El Eulma. La valeur atteinte ou dépassée une fois sur 10,50 et 100 ans en phase humide serait respectivement de 2.2, 3.2 et 3.6 fois plus élevée que la pluviosité médiane pour le poste d'El Eulma alors qu'elle serait respectivement de 3.0, 4.8 et 5.5 fois plus élevée que la valeur médiane pour le poste d'Ain Lahdjar (situé plus au Sud) et ce pour le mois d'Octobre.

L'irrégularité pluviométrique mensuelle est plus forte en période sèche, Pour ce qui est du mois le plus sec de l'année (Juillet), la hauteur de pluie de durée de récurrence de 10 ans s'annulerait pour les deux postes et les mois les plus secs de l'année sont dans l'ordre Juillet, Août et Juin.

On peut conclure que l'irrégularité est plus accentuée pour les mois d'été que pour les mois d'hiver et plus marquée lorsque l'on se dirige du Nord au Sud.

Tableau 4-8 : Précipitations mensuelles (Période 1931-1960)

Station	Fréquence	Variable (U) réduite de	Période	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Av r	Mai	Jun	Jt	Août
El Eulma	F = 0,99	+ 2,32	100	133	132	93	136	152	103	97	106	121	80	34	70
	F = 0,98	+2,05	50	117	116	83	122	134	92	86	94	108	70	29	60
	F = 0,98	+1,28	10	76	75	56	85	89	65	58	63	74	45	17	37
	F = 0,50	0	2	28	27	23	38	34	30	24	26	31	16	3	10
	F = 0,10	-1,28	10	3	3	5	10	6	9	5	5	7	2	0	0
	F = 0,02	-2,05	50	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0
	F = 0,01	-2,32	100	0	0	0	01	0	1	0	0	0	0	0	0
Ain Lahdjar	F = 0,99	+ 2,32	100	111	161	112	103	114	79	99	114	145	74	27	56
	F = 0,98	+2,05	50	98	140	99	93	100	70	87	101	128	64	22	49
	F = 0,90	+1,28	10	64	88	66	65	65	49	58	68	85	39	12	29
	F = 0,5	0	2	24	29	26	30	24	22	22	28	32	11	2	8
	F = 0,10	-1,28	10	3	2	4	9	3	5	3	5	5	0	0	0
	F = 0,02	-2,05	50	0	0	0	2	0	11	0	0	0	0	0	0
	F = 0,01	-2,32	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

#### **4-2.4- Les précipitations saisonnières**

Pour distinguer les pluies saisonnières survenant dans des conditions de température et à des phases de développement de la végétation différentes, nous avons calculé le pourcentage des précipitations de chaque saison (mois) par rapport au total annuel et ce pour les périodes 1913-1938; 1930-1960 et 1970-1986.

##### **4-2.4.1- Série de Seltzer 1913-1938**

Le pourcentage cumulé des précipitations de printemps été s'accroît régulièrement du Nord au Sud : 39% et 44.7%. Le maximum enregistré se situe en Janvier pour les stations du Nord (Sétif et El Eulma) alors que pour les stations du Sud, il se situe en Octobre (Novembre).

On peut aussi noter l'apparition d'un maximum secondaire en Mai pour toutes les stations (Tableau 4-9).

##### **4-2.4.2- Série 1930-1960**

Les résultats montrent que l'hiver avec 34% des précipitations est la saison la plus pluvieuse avec un maximum de 12.3% en Décembre pour la station d'El Eulma ; tandis que pour la station d'Ain Lahdjar le printemps sera plus pluvieux que l'hiver avec 31.8% des précipitations. L'Eté correspond toujours à la saison sèche et ce pour les deux stations (Tableau 4-10).

##### **4-2.4.3- Série 1970-1986**

A partir de 1970, les services responsables ont procédé à un changement de l'emplacement des postes d'El Eulma et de Sétif et donc une modification de l'environnement, et de l'altitude (peut-être de l'observateur). Les résultats montrent que la saison la plus pluvieuse est le printemps avec un maximum en Mars à 13,5% et 13,7% respectivement pour les stations d'El Eulma et Sétif (Tableau 4-11).

Tableau 4-9 : Fraction pluviométrique.

Station \ Mois		Sep	Oct	Nov	Auton	Dec	Jan	fev	Hiv	Mar	Avr	Mai	Priat	Jun	Jlt	Aot	Eté
El Eulma 1913-38	moy (mm)	27	37	40	99	43	57	39	134	35	79	44	108	75	8	12	45
	%	7,0	8,3	10,3	25,6	11,1	13,5	10,1	34,7	9,1	7,5	11,4	28	6,5	2,1	3,1	11,7
Ain Lahdjar 1913-38	moy (mm)	26	32	36	94	29	28	29	86	30	28	47	105	17	7	16	40
	%	8.00	9.8	11.1	28.9	8.9	8.6	8.9	26.5	9.2	8.6	14.5	32.3	5.2	2.1	5.0	12,3
Ain Azel 1913-38	moy (mm)	32	57	41	130	39	41	35	115	45	29	51	125	31	9	17	57
	%	7,1	13.4	9.6	30.4	9,1	9.6	8,2	27	10,5	6.8	11.9	29,2	7,3	2,1	4.0	13,4
Sétif 1913-38	moy (mm)	37	39	53	129	52	60	45	157	43	36	51	130	28	28	14	53
	%	7.9	8,3	11.3	27,5	11.1	17.8	06	33.5	9.2	7.6	10.9	27.7	6,0	6	3.0	11.3

Tableau 4-10 Fraction pluviométrique

Station	Mois;	Sep	Oct	Nov	Aut	Dec	Jan	Fev	Hiv	Mar	Avr	Mai	Prn	Jun	Jlt	Aot	Eté
El Eulma	moy (mm)	34,9	34,5	27,7	97,3	43,8	42,3	34,5	120,7	28,6	30,7	36,8	96,3	20,4	6,3	14,8	41,6
	%	9,8	9,7	7,8	27,3	12,3	11,9	9,7	33,9	8,0	8,6	10,3	27,0	5,7	1,8	4,1	11,7
Ain Lahdjar	moy (mm)	29,7	38,4	31,6	99,8	34	30	24,9	89,0	26,9	36,4	39,6	103,1	16,3	4,5	11,9	37,7
	%	9,1	11,8	9,7	30,7	10,4	9,2	7,8	27,4	8,3	11,2	12,2	31,8	3,7	1,4	5,0	10

Tableau 4-11 : Fraction pluviométrique

Station	Mois	Sep	Oct	Nov	Aut	Dec	Jan	Fev	Hiv	Mar	Avr	Mai	Prn	Jun	Jlt	Aot	Eté
El Eulma	moy (mm)	30,0	31,6	33,4	95,0	37,5	49,2	46,9	133,6	55,8	47,3	45,0	148,1	19,9	4,5	13,2	37,6
	%	7,2	7,6	8,1	22,9	9,0	11,9	11,3	32,2	13,5	11,4	10,8	35,7	4,8	1,1	3,2	9,1
Sétif	moy (mm)	22,6	29,5	33,8	85,9	39,6	41,2	42,9	123,7	52,4	42,4	41,9	136,7	17,9	5,5	11,6	35
	%	5,9	7,7	8,9	22,5	10,4	10,8	11,2	32,4	13,7	11,1	11,0	35,8	4,7	1,4	3,0	9,1

#### 4-2.5- Coefficient pluviométrique relatif

Le coefficient pluviométrique mensuel relatif est le rapport entre la hauteur de précipitation observée réellement à celle que l'on aurait mesurée si la répartition de la hauteur de précipitation annuelle était uniformément répartie au cours de l'année (précipitation mensuelle fictive). Les mois sont d'autant plus secs ou plus humides que le coefficient s'écarte de l'unité.

##### 4-2.5.1- Série de Seltzer 1913-1938

On remarque que les valeurs les plus faibles (inférieures à l'unité) correspondent toujours à la saison sèche et ce pour toutes les stations. Les valeurs les plus fortes (supérieures à l'unité) correspondant aux mois les plus humides (Tableau 4-12).

Tableau 4-12 : Coefficients pluviométriques relatifs.

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jl	Août
El Eulma (1913-38)	0,85	0,97	1,26	1,31	1,58	1,31	1,06	0,91	1,34	0,78	0,24	0,36
Ain Lahdjar (1913 – 38)	0,97	1,15	1,34	1,05	1,01	1,16	1,08	1,04	1,70	0,63	0,25	0,57
Ain Azel (1913-38)	0,91	1,57	1,16	1,07	1,13	1,06	1,24	0,82	1,40	0,88	0,24	0,46
Sétif (1913-38)	0,95	0,97	1,37	1,30	1,50	1,25	1,07	0,93	1,28	0,72	0,27	0,35

##### 4-2.5.2- Série de L'OMM. 1930-1960

Le tableau 4-13, montre que les mois les plus secs correspondent toujours à la saison sèche (Juillet, Août et Juin).

Tableau 4-13 : Coefficients pluviométriques relatifs.

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Aot.
El Eulma (1913-38)	1,19	1,14	0,94	1,44	1,39	1,26	0,94	1,04	1,21	0,69	0,20	0,49
Ain Lahdjar (1913-38)	1,11	1,39	1,18	1,23	1,08	0,99	0,97	1,36	1,43	0,61	0,16	0,43

##### 4-2.5.3- Série de 1970-1986

Les saisons (mois) les plus pluvieuses sont l'hiver et le printemps, alors que la saison Sèche est l'Eté (Tableau 4-14).

Tableau 4-14 : Coefficients pluviométriques relatifs.

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Aot
El Eulma	0,88	0,89	0,98	1,06	1,40	1,46	1,58	1,39	1,27	0,58	0,12	0,37

#### 4-2.6- Etude des précipitations journalières

L'étude des précipitations journalières ou des averses peut donner une idée sur l'importance de l'écoulement fluvial ayant trait aux crues. Nous nous baserons sur les quelques données fournies par l'étude de P. Seltzer (1946).

##### 4-2.6.1- Coefficient de fréquence

Le coefficient de fréquence représente le rapport du nombre de jours de précipitation au nombre de jours dans le mois.

Les valeurs du coefficient de fréquence (Tableau 4-15) les plus faibles concernent les mois les plus secs (Juillet, Août, Juin et Septembre), tandis que les valeurs les plus fortes coïncident avec les mois les plus pluvieux de l'année.

Tableau 4- 15 Coefficients de fréquences.

Station	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Août
El Eulma 1928-39	0,13	0,16	0,23	0,19	0,25	0,25	0,22	0,16	0,16	0,10	0,06	0,09
Ain Lahdjar 1922-38	0,13	0,13	0,16	0,19	0,22	0,17	0,22	0,16	0,16	0,10	0,06	0,09
Sétif 1913-38	0,10	0,13	0,20	0,16	0,16	0,17	0,19	0,13	0,16	0,13	0,06	0,09
Sétif 1981-86	0,23	0,25	0,36	0,38	0,38	0,35	0,32	0,30	0,25	0,20	0,09	0,13
Sétif 1981-86	0,30	0,42	0,40	0,48	0,42	0,46	0,42	0,33	0,38	0,20	0,09	0,19

##### 4-2.6.2- Variabilité des pluies journalières

En l'absence de données suffisantes et continues sur les stations d'El Eulma et d'Ain Lahdjar, nous nous sommes basé sur quelques données de P. Seltzer (1946) et sur la courte série de 1981-1986 de la station de Sétif. Le tableau 4-16 nous donne un aperçu sur la variabilité des pluies journalières.

On relève que l'automne et le printemps apparaissent comme les saisons où l'intensité des précipitations est la plus forte.

Les précipitations atteignent un maximum entre Décembre et Janvier, et sont presque inexistantes en Juillet. Elles sont plus fréquentes en hiver et plus intenses en automne et au printemps.

Tableau 4-16 : Nombre de jours de pluies observées à différentes périodes.

Station		Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Août
El Eulma 1928-39	Nombre de Jours	4	5	7	6	8	7	7	5	5	3	2	3
	P moy (mm)	38,8	37,5	39,3	53,6	45,7	46,7	32,1	28,2	50,8	20,5	8,9	20,2
	I (mm/J)	9,7	7,5	5,6	8,6	6,5	6,6	4,5	5,6	10,1	6,8	4,4	6,7
Ain Lahdjar 1922/38	Nombre de Jours	4	4	5	6	7	5	7	5	5	3	2	3
	P moy (mm)	30,4	37,8	36,3	40,7	28,6	27,9	30,0	23,6	44,2	12,16	7,8	15,9
	I (mm/J)	7,6	9,4	7,2	6,7	4,0	5,5	4,2	4,7	8,8	4,0	3,9	5,3
Ain Azel 1914/38	Nombre de Jours	3	4	6	5	5	5	6	4	5	4	2	3
	P moy (mm)	32,0	57,0	41	39,0	41	35	45	29	51	31	9	17
	I (mm/J)	10,6	14,2	6,8	7,8	8,2	7,0	7,5	7,2	10,2	7,7	4,5	5,6
SETIF 1913/38	Nombre de Jours	7	8	11	12	12	10	10	9	8	6	3	4
	P moy (mm)	36,4	38,8	81,4	39,6	60,3	44,5	43,3	36,4	51,1	28,2	30,7	14,6
	I (mm/J)	5,2	4,8	7,4		5,0	4,4	4,3	4,0	6,3	4,7	3,5	3,6
SETIF 1981/86	Nombre de Jours	9	13	12	15	13	13	13	10	12	6	3	6
	P moy (mm)	33,3	47,2	27,5	51,2	45,8	38,1	47,3	37,7	42,4	16,5	6,7	21,0
	I (mm/J)	3,7	3,6	2,2	3,4	3,5	2,9	3,6	3,7	3,5	2,7	2,2	3,5

#### 4-2.7- Répartition fréquentielle des pluies d'averse

On remarque que la fréquence des pluies maximales (Tableau 4-17) coïncide avec les mois de plus forte pluviosité. Vu la proximité de la station de Sétif de notre bassin versant d'étude, on peut considérer que les données sont valables pour le bassin en question.

Tableau 4-17 : Hauteurs maximales des précipitations observées (P mm/ 24H) pour la station de Sétif sur une période de 12 ans.

Année	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961
Mois	Mai	Mai	Avril	Déc	Mars	Sept	Mai	Oct	Jan	Nov	Déc	Nov
P max mm/24	34	30,6	38,2	17,9	46,9	46,1	31,4	60,9	87,5	33,7	38,7	25,2

Plusieurs lois d'ajustement ont été appliquées, cependant celle qui s'adapte le mieux aux précipitations journalières maximales s'est révélée être la loi de Gumbel (Tableau 4-18, Fig. 4-14).

$$F(P_{jx}) = e^{-e^{-a(P_{jx} - P_0)}}$$

Les paramètres d'ajustements de la loi de Gumbel sont : paramètre d'échelle :  $s=1/a=0.78$   
 $\sigma \neq 0$  ; paramètre de forme :  $P_0 = P_{jx} \cdot 0.577/a$

La représentation graphique (Fig. 4-15) est faite sur papier Gumbel et le calcul des quantiles se fait comme suit :

$$U = P = a (P_{jx} - P_0) = P_{jx} - P_0/s, P_{jx} = US + P_0 = u/a + P_0$$

Tableau 4-18 : Valeurs des hauteurs de précipitations maximales et durées de récurrence (Station de Sétif)

T (ans)	ANNEE HUMIDE				ANNEE SECHE		
	100	50	10	2	10	50	100
F %	0,99	0,98	0,90	0,5	+ 0,10	+ 0,02	+0,01
U	4,60	3,90	2,15	0,367	-0,83	- 1,36	- 1,93
P <sub>jx</sub> (mm)	98,61	88,57	63,48	37,91	20,74	13,14	4,97

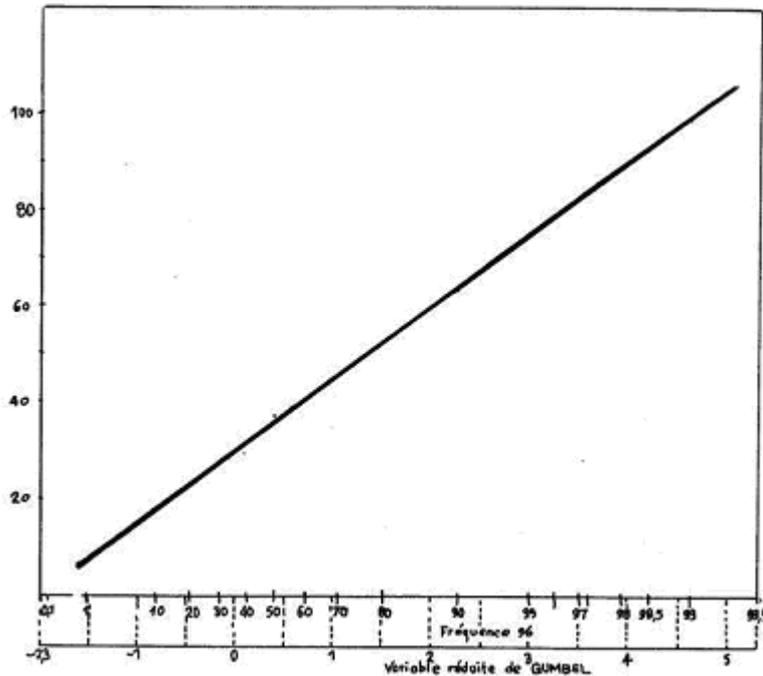


Figure 4-14 : Ajustement des hauteurs de précipitations maximales à une loi de Gumbel (Station de Sétif ; série 1950-1961)

#### 4-2.8- Les précipitations nivales

On sait que la neige intervient dans l'écoulement superficiel et l'alimentation des nappes souterraines. Sur les plaines, les chutes de neige sont annuellement assez régulières, mais toujours très faibles et l'enneigement est de très courte durée.

Les seules données moyennes (Tableau 4-19) qui existent concernent la période 1952-1961 et une période courte et récente 1981-1984 et ce pour la station de Sétif.

Tableau 4-19 : Nombre moyen de jours de neige (Station de Sétif).

Station	Période	Sep	Cet	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	JUL	Aot	Année
SETIF	1952-61	0	0	0,3	2,3	5,8	4,1	1,4	0,8	0	0	0	0	14,7
	1981-84	0	0	0,3	4,0	5,7	5,5	2,7	0	0	0	0	0	18,2

On note que la répartition mensuelle de chute des neiges montre qu'au total, six à cinq mois de l'année de Novembre à Avril sont concernés par des chutes de neige avec une plus forte fréquence pour le mois de Janvier et surtout la saison hivernale.

### **4-3- Les facteurs thermiques**

Les facteurs thermiques (températures moyennes, annuelles et mensuelles) constituent avec les autres facteurs météorologiques (insolation, déficit hygrométrique, vents, pressions barométriques et précipitations) et biogéographiques : les paramètres essentiels de l'évapotranspiration et du déficit d'écoulement.

#### **4-3.1- Données générales**

Les seules données de mesures thermométriques qui existent concernent les stations d'El Eulma et de Sétif sur une longue série (série de Seltzer, 1946) 1913-1938, et une série récente 1971-1986. On prendra également en considération les données de la station d'Ain Oulmène, (station située hors du bassin), pour la période 1979-1986 ; mais bien représentative du secteur Sud des Hautes Plaines Sétifiennes. Les moyennes calculées sur les périodes citées précédemment sont portées dans le tableau 4-20.

Selon les données des trois stations, il s'avère que les mois les plus chauds pendant lesquels les températures sont supérieures à la moyenne annuelle sont les mois de Mai à Octobre pour la saison chaude, et de Novembre à Avril pour la saison froide.

Ainsi si Janvier est globalement le mois le plus froid, on peut cependant noter que c'est en Février et Décembre qu'apparaissent les températures les plus basses. A l'inverse, c'est en Juillet ou Août qu'apparaissent aussi bien les températures moyennes les plus élevées que leurs maxima.

On note enfin que les données mettent en évidence l'effet de la continentalité qui s'affirme dans les Hauts Plaines Sétifiennes. Dont le relief en cuvettes se trouve isolé des influences maritimes par la chaîne Tellienne qui constitue un écran montagneux.

#### **4-3.2- Indice de De Martonne**

Le géographe De Martonne (1923) en se fondant sur le régime des précipitations et des températures a défini un indice d'aridité portant son nom :

$$A=P/T+10$$

P: les précipitations moyennes annuelles en mm,

T : la température moyenne annuelle en °C.

Pour la station d'El Eulma (Fig. 4-15), l'indice d'aridité est de 17,3 sachant que selon De Martonne les valeurs comprises entre 10 et 20 caractérisent le domaine semi-aride.

Tableau 4-20 : Données thermiques enregistrées au niveau des stations  
d'El Eulma, Sétif et Ain Oulmène

Stat	Série P.Seltzer 1913-1938						Série récente 1971-1986						Série récente 1979/86		
	Sétif			El Eulma			Sétif			El Eulma			Ain Oulmène		
T°C	T min	T max	T moy	T min	T max	T moy	T min	T max	T moy	T min	T max	T moy	T min	T max	T moy
Jan	0,4	9,2	4,8	0,5	9,9	5,2	1,8	10,3	6,0	0,8	10,3	5,5	2,9	13,7	8,3
Fev	1,1	11,0	6,0	0,1	10,3	5,2	2,0	11,7	6,8	1,8	12,1	6,9	3,0	13,1	8,0
Mar	3,2	14,0	8,6	2,0	14,8	8,4	3,5	14,7	9,1	3,1	14,5	8,8	9,0	14,4	11,7
Avr	5,5	18,1	11,8	3,6	19,4	11,5	6,0	17,6	11,5	5,2	17,8	11,5	5,9	18,1	12,0
Mai	9,2	24,4	15,8	6,7	22,1	14,4	9,8	22,8	16,3	9,3	23,0	16,3	9,6	22,9	16,2
Jun	13,5	27,7	20,6	11,8	29,2	20,5	14,9	24,0	21,9	13,8	29,1	21,6	14,2	30,0	22,1
Jlt	16,9	32,5	24,7	15,0	33,2	24,1	18,4	33,1	25,7	16,2	33,2	24,7	17,2	34,5	25,8
Aot	16,7	31,9	24,3	14,9	32,8	23,8	18,5	32,4	25,4	15,7	32,7	24,2	17,2	33,4	24,2
Sep	13,9	27,0	20,4	12,6	27,9	20,2	14,2	26,9	20,6	12,5	26,4	19,3	11,0	29,3	20,1
Oct	9,1	20,4	14,7	8,1	21,2	14,6	9,6	20,2	14,8	8,2	19,5	13,8	9,9	22,2	15,6
Nov	4,5	14,0	9,2	3,1	14,8	8,9	5,2	14,7	9,9	3,5	14,9	9,2	5,1	14,8	9,9
Dec	1,3	10,1	5,7	0,6	10,5	5,5	2,7	10,6	6,7	1,0	10,9	6,0	1,2	12,8	7,0
Moy	7,9	19,5	13,9	6,6	20,5	13,5	8,9	20,3	14,6	7,6	20,4	14,0	8,7	21,5	15,1

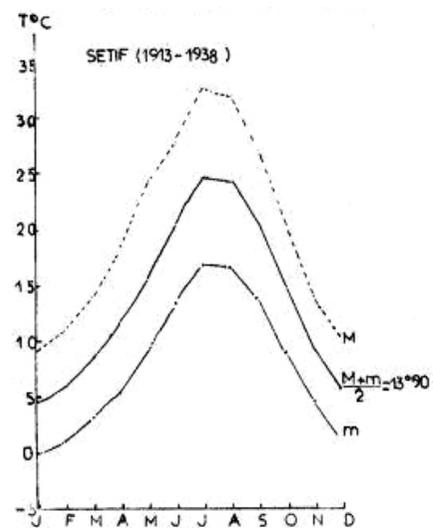
Les élèves de De Martonne ont proposé un indice mensuel d'aridité pour montrer les liens entre la variabilité des précipitations et l'indice d'aridité, on le calcule par l'application de la relation :

$$A=12P/T+10$$

Pour De Martonne l'indice d'aridité mensuelle (a), compris entre 20 et 30, caractérise un climat tempéré ce qui est le cas des mois de Novembre à Avril et pour (a), compris entre 5 et 10, caractérise un climat désertique, alors que pour des valeurs inférieures à 5 le régime est hyper désertique et aréique (Tableau 4-21 et Fig. 4-16).

Tableau 4-21 : Indice mensuel d'aridité (De Martonne).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jlt	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	Année
Indice d'aridité mensuel (a)	38,1	33,3	33,6	26,5	20,3	7,6	1,5	4,7	12,3	15,8	21,2	27,9	17,3



M : Moyenne des maximums du mois  
m : moyenne des minimums du mois  
 $\frac{M+m}{2}$  : moyenne mensuelle

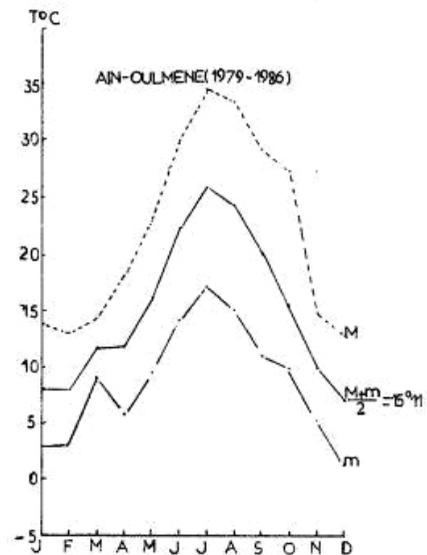
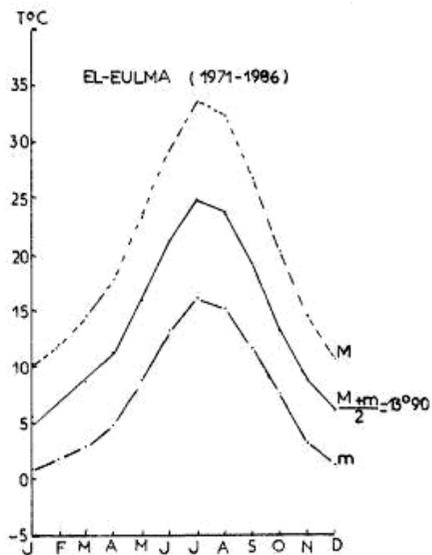
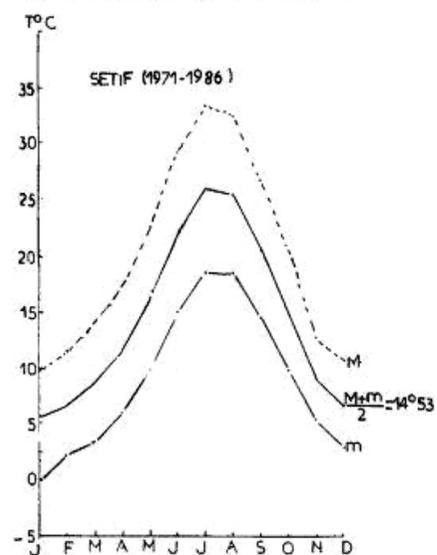
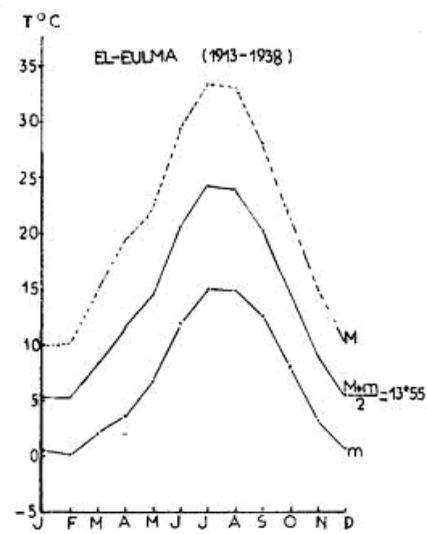


Figure 4-15 : Régime thermique

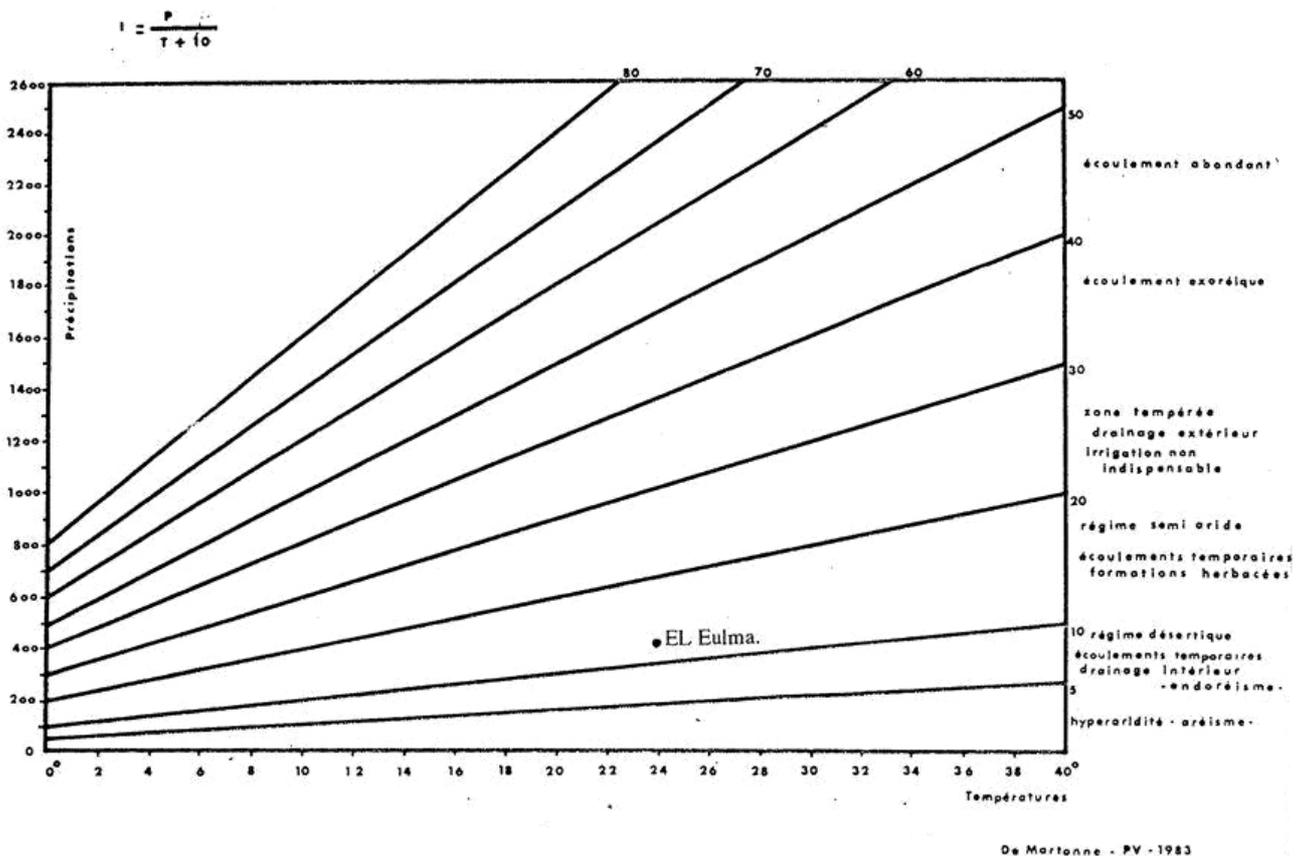


Figure 4-16 : Abaque d'indice d'aridité De Martonne

### 4-3.3- Etages bioclimatiques

La classification bioclimatique la plus utilisée en Afrique du Nord et en Algérie en particulier est celle d'Emberger.

La définition des limites se fait en détectant les changements floristiques le long d'un gradient climatique qui permet de définir les zones de même étage floristique et de situer les postes météorologiques en fonction de ces zones.

Le coefficient pluviométrique est calculé par l'application de la relation :

$$Q = \frac{1000P}{(M+m)(M-m)/2}$$

P: précipitation en mm du mois de Janvier

M : température maximale du mois de Janvier

m : température minimale du mois de Janvier

Le diagramme pluvio-thermique d'Emberger (Fig. 4-17) sur lequel les stations sont placées en fonction de m (abscisse) et Q (ordonnée) permet une expression synthétique du bioclimat. Le tableau 4-22 résume les principales données, on y joint la station Thalla (Tunisie).

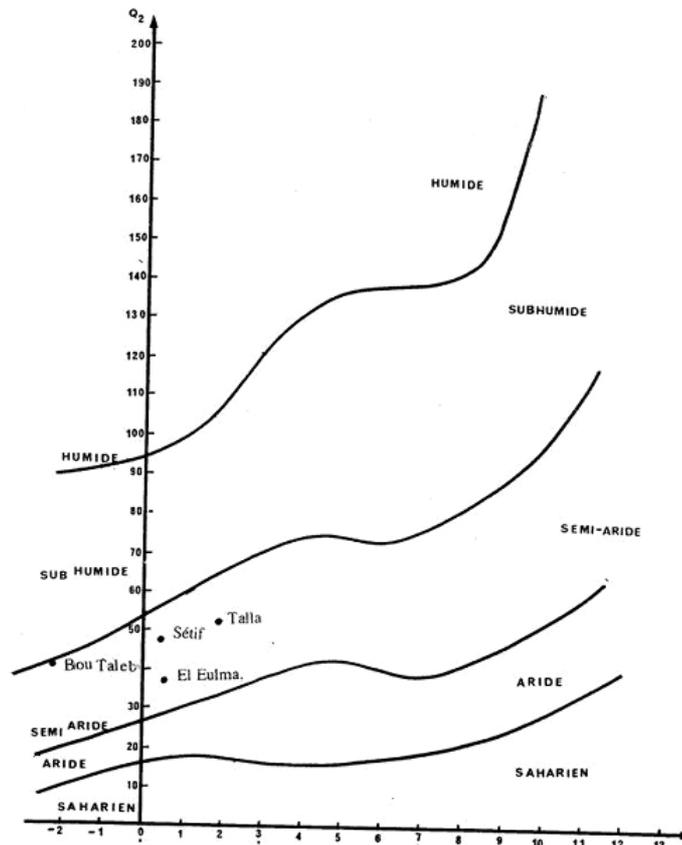


Figure 4-17 : Climagramme d'Emberger

Tableau 4-22 : Classification bioclimatique.

Station	P (mm)	Q	M (°C)	M <sup>1</sup> (°C)	M (°C)	M-m (°C)	Altitude (m)	Etage bioclimatique
Thalla (Tunisie)	473	52,0	1,9	10,2	33,4	31,5	950	semi-aride sup
EL Eulma	336	38,6	0,5	9,9	32,2	32,7	960	semi-aride moy
Sétif	443	47,7	0,4	9,2	32,5	32,1	1081	semi-aride sup
Boutaleb	414	37,0	-2,3	8,0	32,2	34,5	1250	semi-aride moy

Les données exploitées dans ce tableau sont celles de Seltzer (1946) pour les températures et de H. Gausson et M. K Bagnouls pour les pluies (moyennes annuelles ramenées à la période 1913-1947).

P : Pluviosité moyenne annuelle en mm.

Q : Coefficient pluvio-thermique d'Emberger.

m : moyenne des minimales, mois le plus froid, en degrés absolus.

M' : moyenne des maximales, mois le plus froid, en degrés absolus.

M : moyenne des maximales, mois le plus chaud, en degrés absolus.

Mm : amplitude moyenne annuelle.

#### 4-4- Déficit d'écoulement

Le déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes par évapotranspiration. Pour l'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration, à défaut de mesures directes nous utiliserons des méthodes approchées fondées sur la mise en œuvre de formules empiriques.

#### 4-4.1- Diagramme pluviothermique

##### 4-4.1.1- Méthode Gaussen et Bagnouls

Pour Gaussen et Bagnouls, la combinaison des deux principaux facteurs température et précipitation, est intéressante dans la mesure où elle permet de déterminer les mois véritablement secs qui correspondent selon la définition basée sur le comportement de la végétation aux mois où le total des précipitations est égal ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle, soit :

$$P \text{ (mm)} \leq 2T^{\circ}\text{C}$$

Comme le montre le graphique pluviothermique (dans lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations) d'El Eulma qui permet de donner une idée générale sur les bassins ; les mois secs se succèdent de la mi-mai à la mi-septembre. (Figs. 4-18 et 4-19).

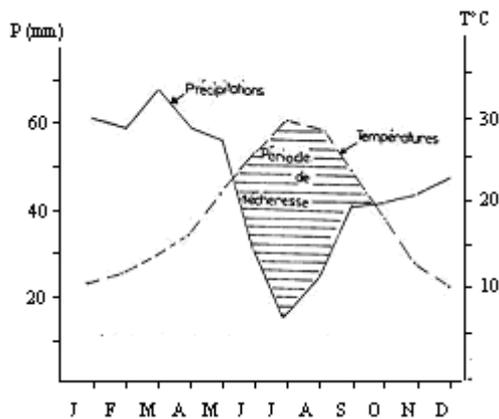


Figure 4-18 : Diagramme pluviothermique (D'après Bagnouls et Gaussen)

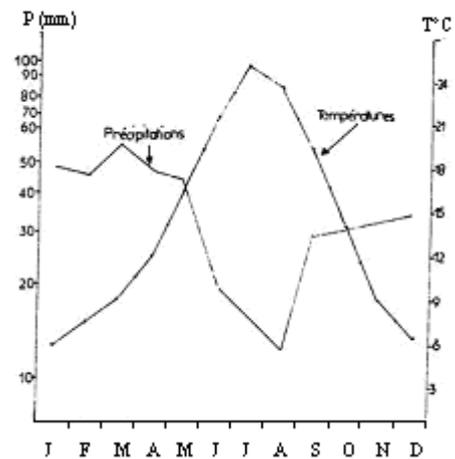


Figure 4-19 : Diagramme pluviothermique (D'après Euverte)

Station d'El Eulma (Série 1971-1986)

#### 4-4.1.2- Méthode de G. Euverte

Pour Euverte (1959). Une meilleure approximation peut être faite en considérant l'action de la chaleur et de l'humidité vis à vis de l'activité biologique. En effet, les besoins en eau des végétaux suivent une progression de forme exponentielle lorsque les températures progressent arithmétiquement. Euverte a établi un diagramme ombrothermique en adoptant une progression linéaire pour l'échelle des températures et logarithmique pour des l'échelle précipitations (Fig. 4-20).

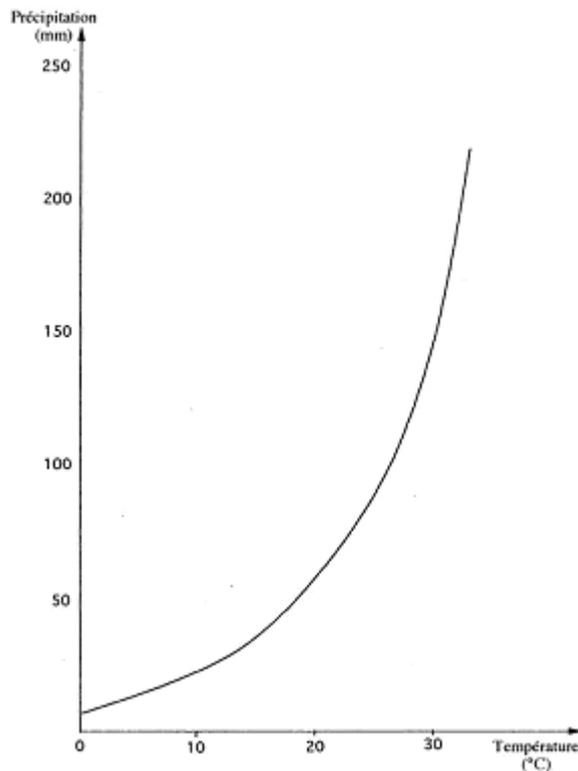


Figure 4-21 : Variation des besoins en eau avec la température  
Méthode d'Euverte

-Lorsque P et T sont superposés, ces besoins en eau sont couverts.

Dans notre exemple à El Eulma, cela se produit :

Au printemps pour  $P = 43,5$  mm et  $T = 16,2^{\circ}\text{C}$ .

En Automne pour  $P = 31,1$  mm et  $T = 13,3^{\circ}\text{C}$

Lorsque T passe au dessus de P, la période correspondante est déficitaire. La différence des abscisses donne la durée de la période qui à El Eulma va de Mai à la mi- octobre.

Lorsque P passe au dessus de T, la période correspondante est humide et ou a reconstitution des réserves.

Le graphique d'Euverte permet également de préciser la période de végétation active (Température supérieure à 10°C) qui va d'Avril à Novembre. En outre une expression chiffrée de cette intensité nous est donnée par le rapport précipitation/température (P/T).

Les valeurs (P/T) les plus faibles sont celles des mois de Juillet et d'Août qui traduisent l'influence saharienne (Tableau 4-23).

Tableau 4-23 : Rapport précipitation /température (P/T)  
(Station d'El Eulma)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jun	JIL	Aot	Sep	Oct	Nov	DEC
P/T	8,80	6,79	6,32	4,14	2,80	0,94	0,18	0,55	1,56	2,26	3,74	6,09

#### 4-4.2- L'évapotranspiration

Le terme le plus important du bilan hydrologique après les précipitations est l'évapotranspiration. Ce paramètre climatique peut être mesuré directement sur le terrain par des appareils (évaporomètres, bacs d'évaporation). On calcule par des formules empiriques de certains auteurs comme Thornthwaite, Turc, Contagne et Wundt.

##### 4-4.2.1- Evaluation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

###### - Formule de Turc modifiée

Pour l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle. L. Turc (1962) a proposé une formule simplifiée tenant compte de la durée de l'insolation et de l'humidité relative relevée dans la région d'étude.

$$ETP \text{ (mensuelle)} = 0,4 t (I g + 50) K / (t + 15)$$

t : température moyenne mensuelle en °C du mois considéré.

I g : radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale, elle est exprimée en calories par cm<sup>2</sup> et par jour (cal/ cm<sup>2</sup> /jour)

0,4 : Coefficient valable pour les mois de 30 et 31 jours ; pour le mois de Février, on remplacera le coefficient 0,40 par 0,37.

I g = I g<sub>A</sub> (0,18 + 0,62h/H, formule de calcul de la radiation solaire globale du mois considéré.

Ig<sub>A</sub>: radiation maximale théorique calculée d'après les données astronomiques, à partir des tables d'Angot.

H : durée astronomique du jour; durée du jour du lever du coucher du soleil, donnée par des tables.

h : durée d'insolation effective (mesurée par héliographe).

$K=1$ , si l'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est supérieure à 50%

$K=1 + (50-H_r/70)$  L'humidité relative mensuelle de l'atmosphère est inférieure à 50%.

H<sub>r</sub> : humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré (en %)

Les résultats d'applications de, cette méthode de Turc pour la station d'El Eulma sont présentés dans le tableau 4-24.

#### - **Formule Thornthwaite**

La formule de calcul de l'évapotranspiration potentielle selon G.W.Thornthwaite (1944) tient compte de l'indice thermique et de la température moyenne mensuelle

$ETP$  (mois, non corrigée) =  $16 (10t/I)^a$  avec  $I = \sum i$  et  $i = (t/5)^{1.514}$

$ETP$  (mois, non corrigée) est l'évapotranspiration potentielle non corrigée du mois considéré exprimée en mm.

I : Indice thermique annuel égal à la somme des douze indices mensuel s(i) i:Indice thermique mensuel

a : exposant dont la valeur est donnée en adoptant des simplifications de la longue formule de Thornthwaite proposée par Serra par l'expression :

$$a = (1.6 I / 100) + 0.5 = (16 I / 1000) + 0.5$$

$$ETP \text{ (mois, corrigée)} = 16(10t/I)^a \cdot K$$

K. : coefficient de correction qui dépend de la latitude du bassin et de la durée moyenne d'ensoleillement du jour.

Les résultats de calcul de l'ETP par la méthode G.W. Thornthwaite pour notre bassin d'étude sur une moyenne de seize ans (1970/71-1985/86) sont présentés dans le tableau 4-24.

#### - **Formule de Thornthwaite avec un pas de temps journaliers**

La méthode de Thornthwaite en régime aride et subaride (cas de notre secteur d'étude) est celle qui donne les plus mauvais résultats cela parce que les pluies importantes et les fortes températures sont décalées dans le temps et c'est justement de ce décalage dont il faut tenir compte.

La solution proposée serait de transformer la méthode de G.W. Thornthwaite en lui donnant un pas de temps journalier (Tableau 4-25).

Pour cela nous avons calculé pour chaque jour un indice thermique fictif :

$i_j = (t/5)^{1.514}$  avec la température moyenne journalière et on l'ajoute à la somme des 11 indices thermiques mensuels "i" calculé à partir des températures moyennes des mois précédents celui sur lequel le calcul sera effectué avec un pas de temps journalier.

Tableau 4-24 : Evapotranspiration potentielle (ETP) selon la méthode Turc et Thornthwaite. Station d'El Eulma 1970/71-1985/86.

Mois		Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Av	Mai	Jun	Jlt	Août	Année
Température C°		19,23	13,96	8,93	6,15	5,59	6,90	8,82	11,41	16,04	21,18	24,86	23,75	13,90
P (mm)		30,0	31,6	33,4	37,5	49,2	46,9	55,8	473	45,0	19,9	4,5	13,20	414,3
Durée insolation (heures) Sétif 81/86		270,5	224,3	180,8	158,7	182,8	171,3	212,3	236,4	277,9	320,1	358,4	325,5	-
Fréquence siroco (jours) 1913/38	El Eulma	1,6	-	-	-	-	-	-	1,0	0,2	4A	5,6	3,9	16,7
	Ain Lahdjar	3,0	0,2	0,2	-	-	-	0,7	3,6	2,8	5,2	6,6	4,3	26,5
	Sétif	1,6	0,7	0,8	-	0,2	0,5	1,8	1,7	1,2	2,4	2,6	1,8	153
Méthode de Turc	I g <sub>A</sub>	749	597	459	396	436	559	718	856	947	978	956	874	-
	H heure	372	350	310	304	312	307	371	392	453	435	442	417	-
	H heure	270,5	224,3	180,8	158,7	182,8	171,3	212,3	236,4	277,9	320,1	358,4	325,5	-
	h2%S 81-86	57,0	70	77	82	79	78	77	69	63	48	37	44	-
	K	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,028	1,185	1,085	-
	I g	472,5	344,6	248,6	199,5	236,8	294,0	383,9	474,1	530,6	622,2	652,7	580,3	-
	ETP (mm)	117,4	76,0	44,5	29,0	31,14	43,3	64,2	90,5	120,1	161,8	207,7	167,3	11,53
Méthode de Thornthwaite	i	7,68	4,73	2,40	1,36	1,18	1,62	2,36	3,48	5,85	8,89	11,33	10,58	61,46
	a	1,483												
	ETP (mm)	86,85	54,01	27,84	16,01	13,9	18,99	27,33	40,04	66,55	100,2	127,1	137,7	-
	K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	-
	ETP (mm)	89,45	52,38	23,94	13,44	12,09	16, H	28,14	44,04	80,52	122,2	157,6	-	777,7

Ce qui nous donne un indice thermique "I" qui aura chaque jour une valeur différente :

$$I = \sum_{j=1}^{n=11} i + i_j$$

$\sum i$  : Somme des 11 indices thermiques mensuels précédents ;  $i_j$  : indice thermique journalier.

L'évapotranspiration potentielle avec de pas journalier sera :

$$ETP_j \text{ (mm)} = 16(10t_j/I_j)^a k \quad \text{Avec: } a = (1.6I_j/100) + 0.5$$

ETP: évapotranspiration potentielle avec un pas journalier.

tj : température moyenne journalière en °C.

I : indice thermique journalier égale à la somme des 11 indices mensuels des mois précédents plus l'indice thermique journalier fictif.

K : coefficient de correction qui dépend de la latitude et de la durée moyenne du jour.

Tableau 4-25 : Evapotranspiration potentielle (ETP) avec un pas de temps journalier  
Station d'El Eulma 1970/71-1985/86

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Juit	Aot
1	91,25	61,84	32,19	1,76	14,03	15,99	22,38	38,14	59,29	105,65	177,94	151,03
2	87,31	68,63	30,94	10,56	15,34	15,82	23,22	25,37	62,48	107,21	187,98	172,90
3	87,97	69,83	29,71	10,56	13,06	15,47	21,5	25,70	62,48	106,20	197,13	160,84
4	91,25	75,14	29,30	11,15	14,03	14,17	24,52	36,08	63,80	104,81	182,90	165,48
5	84,70	72,43	30,52	12,36	14,33	16,13	20,29	24,91	64,46	107,9	169,27	156,47
6	92,60	60,72	30,94	13,60	14,03	16,47	21,51	19,16	69,70	11,13	55,16	151,07
7	96,54	59,16	30,10	14,88	12,43	16,81	21,15	29,62	87,87	116,71	169,27	151,07
8	100,67	50,50	30,52	14,23	11,50	19,58	21,93	31,07	79,27	115,52	64,42	128,29
9	100,62	47,38	31,77	14,88	12,11	18,87	23,22	36,08	78,66	115,91	61,69	42,43
10	100,94	45,89	31,36	16,52	13,06	19,22	22,79	45,62	77,24	122,41	64,42	142,43
11	97,92	57,43	24,58	18,21	11,81	14,82	22,38	51,23	76,54	116,71	55,16	139,96
12	97,23	55,24	16,95	18,21	16,00	13,53	28,06	52,37	69,70	113,52	46,14	130,77
13	96,54	66,37	17,30	17,87	10,84	11,37	31,74	50,08	73,13	110,25	50,75	134,03
14	94,52	65,22	17,64	18,21	10,00	12,90	37,52	53,53	67,00	112,71	49,87	123,44
15	95,20	59,60	19,05	16,85	12,11	14,17	45,69	50,08	79,27	106,43	51,62	132,40
16	93,27	57,93	22,39	14,88	14,68	13,53	34,11	43,45	82,13	124,8f	152,50	133,20
17	95,86	56,33	23,06	14,83	15,34	12,90	17,47	42,89	86,39	136,81	160,79	134,94
18	95,20	49,93	23,44	13,60	14,03	11,97	25,38	45,06	82,27	129,88	156,07	136,45
19	96,54	54,20	23,83	14,23	15,34	12,90	22,38	39,72	45,76	131,71	156,97	138,92
20	95,20	53,12	23,06	13,60	14,03	12,59	28,47	40,23	45,03	130,69	154,26	138,29
21	97,92	43,38	26,13	12,66	12,11	13,53	36,55	45,62	84,30	131,72	155,16	127,58
22	95,86	47,38	25,74	12,36	8,56	18,87	25,38	58,04	83,58	129,88	142,68	123,42
23	95,20	42,89	26,91	11,72	8,01	16,13	30,72	58,69	82,13	129,88	146,1	133,20
24	97,23	43,40	27,32	11,72	8,56	17,49	37,52	56,47	80,70	129,02	147,84	128,37
25	92,60	42,39	24,58	10,86	9,70	14,84	24,52	45,06	87,87	120,75	145,27	126,77
26	68,59	38,52	15,93	12,04	10,59	19,58	38,53	52,37	102,92	136,8	146,14	130,77
27	65,09	37,60	14,61	11,76	10,00	25,48	34,50	50,65	104,49	140,43	147,04	129,98
28	63,90	38,52	15,27	11,45	11,81	22,84	36,55	50,08	101,37	138,54	148,	129,16
29	62,78	37,60	15,60	11,76	10,50	25,10	27,61	54,13	102,14	133,39	148,77	129,16
30	62,20	38,05	14,94	11,15	12,11		47,84	51,81	103,70	143,7,	148,77	127,58
31		38,05		10,86	11,81		38,02		102,92		154,61	128,37
Moy	89,76	52,70	24,20	13,51	12,16	16,25	28,83	44,25	81,86	121,90	157,90	138,02

Les formules utilisées pour le calcul de l'ETP ne font intervenir que les températures. Les tableaux 4-24 et 4-25 montrent que le pouvoir évaporant de l'atmosphère atteint des valeurs maximales pendant la période sèche. Les valeurs trouvées concordent avec celles des autres paramètres météorologiques (la durée d'insolation et la fréquence du siroco),

On note que le total potentiel évapotranspiré annuel serait respectivement près du double (selon formule G.W, Thornthwaite) et près du triple (selon la formule Turc) du total pluviométrique

En saison froide l'ETP décroît progressivement et atteint des valeurs inférieures à celles des précipitations, l'accumulation en eau souterraine se trouve favorisée.

#### 4-4.2.2- L'évapotranspiration réelle

Du fait des conditions qui règnent sur les zones arides et subarides, toutes les formules de calculs qui suivent, mise au point en régime tempéré n'auront qu'une valeur très aléatoire. C'est le cas pour Wundt, Coutagne, Turc et Thornthwaite.

##### - Formule de Turc

Cette méthode fait intervenir uniquement les températures et les précipitations.

$$ETR(mm) = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

P: précipitation annuelle en millimètres

$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$  = pouvoir évaporant de l'atmosphère

T : température annuelle moyenne de l'air en degrés Celsius

Après calcul, on trouve :  $ETR = 381,25mm$

##### - Formule de Coutagne

Cette méthode fait intervenir les températures et les précipitations. Elle s'écrit :

$$D = ETR = P - P^2 Y \text{ avec : } Y = 1 / (0,8 + 0,14T)$$

D = ETR : Déficit d'écoulement (ETR) en mètre par an

P: Précipitation annuelle en mètres

T : Température moyenne annuelle en degrés Celsius

Cette formule ne sera valable qu'après la vérification de la condition suivante :

$$1/8Y \leq P \leq 1/2Y.$$

La valeur trouvée selon la formule de Coutagne est  $D = 351,8 mm$

**- Diagramme de Wundt**

L'hydrologue Wundt a établi un diagramme permettant d'obtenir une valeur du déficit d'écoulement à partir d'un abaque des courbes modifiée par M Coutagne. Son application nous donne  $D = 385 \text{ mm}$  (Fig. 4-22).

Abaque de Wundt modifié par Coutagne

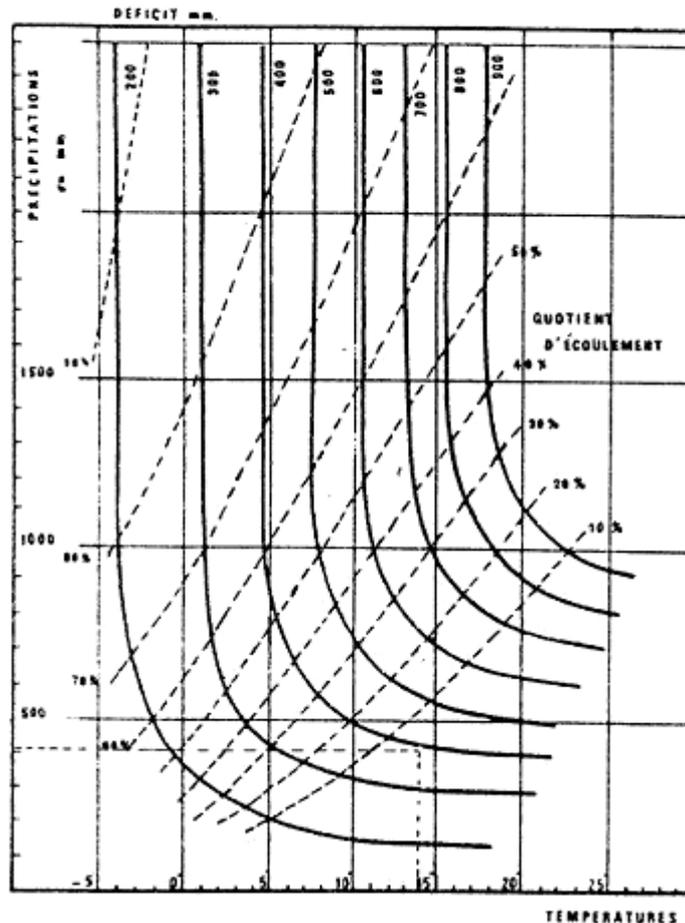


Figure 4-22 : Evaluation de l'écoulement et du déficit d'écoulement en fonction des températures moyennes et des précipitations.

**- Abaque de P. Verdeil**

Afin d'estimer les valeurs de l'évapotranspiration réelle ou déficit d'écoulement Verdeil (1988), a établi un abaque bilogarithmique pour les régions semi-arides en [tenant compte uniquement des précipitations annuelles. Ainsi pour la station d'El Eulma (Fig. 4-23), on trouve :  $ETR = D = 390 \text{ mm}$

Les résultats de ETR obtenue par différentes méthodes sont exposés au Tableau 4-26.

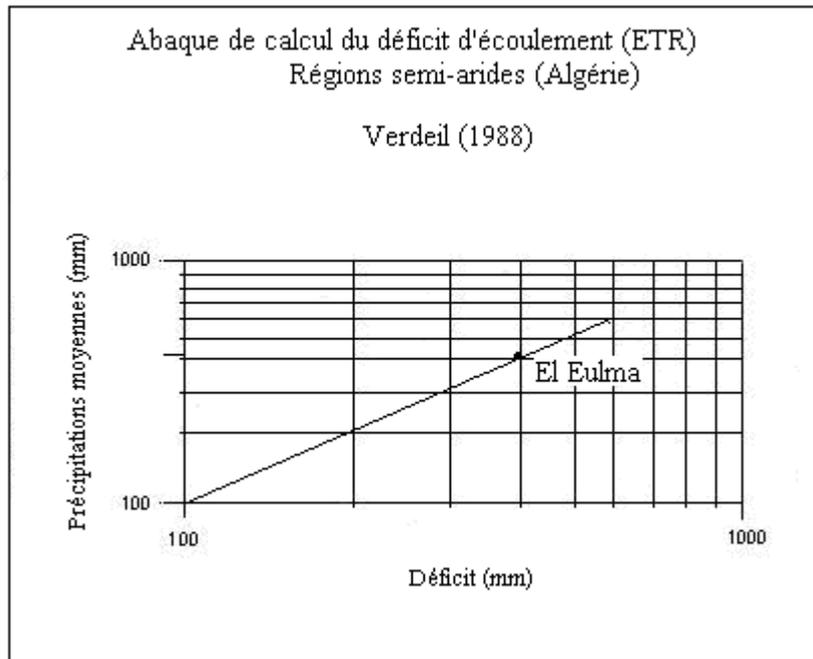


Figure 4-23 : Déficit d'écoulement par la méthode Verdeil.

Tableau 4-26 : Estimation de l'évapotranspiration réelle avec différentes méthodes

formule	P (mm)	T (°C)	ETR (mm)	ETR/P%
thornwaite	414,3	13,9	382	92
turc	414,3	13,9	381,25	92
coutagne	414,3	13,9	351,8	85
wundt	414,3	13,9	385	93
P, verdeil	414,3	13,9	390	94

#### 4-4- Etablissement d'un bilan hydrique : méthode de Thornthwaite :

Cette méthode met à la disposition des l'hydrogéologues un instrument pratique pour le calcul de l'évapotranspiration aussi bien potentielle que réelle eu se basant sur les températures, les précipitations et la variation du stock en eau du sot (Tableau n°27).

a) Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

Le calcul de l'ETP ne pose aucun problème ; il suffit d'utiliser les tableaux et abaqués établis par C.W. Thornthwaite et d'effectuer les corrections nécessaires en fonction de l'altitude et la durée du jour. Le calcul de L'ETP se fait pour chaque mois de l'année

b) Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

Thornthwaite considère deux cas pour le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

\*Si les précipitations du mois sont supérieures à l'ETP alors l'ETR est égale à l'ETP. Dans ce cas l'excédent des précipitations sur l'ETP est emmagasiné dans le sol dont il augmente

les réserves jusqu'à ce que ces dernières soient mai mailles.

Le surplus de la valeur de saturation des réserves en eau du sol constitue donc l'excédent (Water surplus ou ce qu'on appelle précipitation efficace) qui va être disponible pour l'alimentation de l'écoulement de surface et des nappes profondes.

\*Si les précipitations potentielles du mois considéré sont inférieures à l'ETP et ETR sera :

- Égale à l'ETP si la réserve en eau du sol du mois précédent est assez forte pour combler l'insuffisance des précipitations : les réserves d'eau utile seront donc réduites de la différence entre l'ETP et les précipitations du mois considéré.

- Égale à la somme des précipitations du mois et des réserves disponibles. Si ces réserves sont insuffisantes pour satisfaire l'ETP, l'ETR reste alors inférieure à l'ETP,

Dans ses calculs, G.W. Thornthwaite admettait d'utiliser une réserve en eau utile équivalente à 100 millimètres, dont on a constaté que cette dernière (c'est à dire la réserve en eau utile) pouvait être améliorée.

\*Évaluation de la réserve d'eau utile (réserve facilement utilisable, RFU) par des mesures directes (sondes à neutrons, tensiomètres ...), ou par l'application de la formule de M. Hallaire (1960) : qui est la suivante :

$$R = (C - F) \frac{hD}{100} + 30 \text{ mm}$$

R : Capacité de rétention d'eau ou réserve d'eau utile

C : Capacité au champ maximum d'eau, que le sol peut retenir lorsque son drainage est assuré librement.

#### **4-5- Conclusion**

Les précipitations les plus importantes qui touchent l'Algérie Septentrionale correspondent à une interférence entre le Front des Alizés ou le Front Atlantique-Méditerranéen et le Front Polaire dérivé, le Front Polaire, parfois même le Front arctique.

On a alors confrontation de masses d'air subtropicales très chaudes et très humides, d'air tropicale et d'air froid polaire ou arctique ce qui entraîne un régime de précipitations exceptionnelles.

## CHAPITRE V

### HYDROLOGIE ISOTOPIQUE

#### 5-Introduction

Les isotopes en hydrogéologie et hydrologie constituent des traceurs des espèces chimiques, auxquelles ils sont intrinsèquement liés, servant à l'identification des différents types d'eau et leurs conditions d'infiltration ; la définition des zones probables de recharges et de décharge ; les mélanges entre les masses d'eaux.

Les isotopes les plus utilisés en hydrologie et en hydrogéologie sont :

- les isotopes stables : Oxygène -18 ( $^{18}\text{O}$ ), le deutérium ( $^2\text{H}$ ) et le Carbone-13 ( $^{13}\text{C}$ ),
- les isotopes radioactifs : Carbone -14 ( $^{14}\text{C}$ ) et le tritium ( $^3\text{H}$ ).

Les isotopes stables suivent la loi de la conservation de la matière, ils ne décroissent pas dans le temps. Leurs concentrations varient en fonction de l'état physique de l'eau et de l'espèce chimique en solution (Carbone-13). Dans ce qui suit notre intérêt porte sur les isotopes lourds ou de la molécule d'eau.

#### 5-1- Notions sur les standards

Jusqu'à récemment, le standard adopté universellement comme référence pour les isotopes stables de l'hydrogène et de l'oxygène dans les eaux naturelles est le SMOW (Standard Mean Ocean Water, H.Craig, 1961). Ce standard correspond à une eau hypothétique ayant des rapports isotopiques en oxygène-18 et en deutérium identiques à ceux d'une eau océanique «moyenne».

Malheureusement, ce standard n'existe pas actuellement en tant qu'échantillon et ne peut donc pas être utilisé par les laboratoires pour calibrer leurs appareils de mesure. On utilise actuellement le standard VIENNA-SMOW (V-SMOW, Vienna Standard Mean Oceanic Water, Gonfiantini, 1978), qui, lui est disponible sous forme d'échantillons  $\text{R}^{18}\text{O}$ ,  $\text{V.SMOW}=1.9934.10^{-3}$  et  $\text{R}^2\text{H}$ ,  $\text{V.SMOW}=1.5578.10^{-4}$ .

Dans la pratique, on considérera que les standards SMOW et V-SMOW sont identiques.

Des mesures successives par différents auteurs à différentes dates ont donné les rapports isotopiques absolus du V-SMOW suivants (IAEA, 1981).

Les  $\delta^2\text{H}$  de l'eau doivent être exprimés en ‰, avec pour référence le standard V-SMOW (0‰), sur une échelle normalisée pour laquelle le standard SLAP [(Standard Light Antarctic Precipitation) est caractérisé par de très faibles teneurs en oxygène-18 et en deutérium :

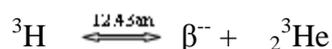
$[^2\text{H}] / [^1\text{H}] \approx 89.10^{-6}]$  et présente un  $\delta^2\text{H}$  de -42‰.

Les  $\delta^{18}\text{O}$  de l'eau doivent être exprimés en ‰, avec pour référence le standard V-SMOW (0‰), sur une échelle normalisée pour laquelle le standard SLAP présente un  $\delta^{18}\text{O}$  de -55,5‰.

Le tritium est le seul isotope radioactif constitutif de la molécule d'eau. De par son origine essentiellement anthropogène et sa radioactivité, son comportement est sensiblement différent de celui des isotopes stables. Le tritium est un des isotopes de l'hydrogène. Son symbole conventionnel est  $^3\text{H}$ , mais il est parfois noté T. Les atomes de tritium sont instables et se désintègrent (période ou «demi-vie» de 12,43 années) en formant des atomes stables d'hélium-3 et un rayonnement  $\beta^-$ . Dans la pratique, on ne mesure pas la concentration en tritium de l'eau, mais le nombre de particules émises par l'échantillon par unité de temps. On mesure donc la radioactivité en tritium de l'eau de laquelle on peut déduire une concentration massique.

L'activité est le nombre de désintégrations d'un élément radioactif par unité de masse et de temps. Dans l'eau, elle s'exprime en unités tritium (UT en français, et TU en anglais pour «tritium unit»).

Une unité tritium représente 1 atome de  $^3\text{H}$  pour  $10^{18}$  atomes de  $^2\text{H}$  et de  $^1\text{H}$ , selon l'équation:



C'est ce rayonnement qui permet de mesurer la quantité de tritium contenue dans un échantillon. Ce rayonnement de très faible énergie (0,018 MeV) est totalement absorbé par une couche de 5  $\mu\text{m}$  d'eau, ou de 3  $\mu\text{m}$  d'air, ce qui rend sa détection difficile. Cette faible énergie explique également que le tritium n'est jamais utilisé pour les traçages en forage. On admettra qu'une unité tritium est équivalente dans l'eau à une activité en tritium de  $0,119 \text{ Bq} \cdot 10^{-1}$ , où Bq (becquerel) est l'unité du système international pour la radioactivité. Un becquerel correspond à une activité d'une désintégration par seconde. Le becquerel remplace le curie qui n'a plus cours ( $1 \text{ Ci} = 37 \times 10^9 \text{ Bq}$ ).

Depuis 1963, date du traité limitant les essais nucléaires en atmosphère, les activités en tritium dans l'atmosphère diminuent. Cette diminution a aujourd'hui atteint un tel niveau que la mesure du tritium dans les eaux naturelles ne peut plus se faire sans mettre en œuvre des techniques spéciales de comptage.

## 5-2- Caractéristiques des isotopes lourds

La molécule d'eau, du point de vue atomique présente trois types d'isotopes stables dont

les abondances sont données par Panichi et Gonfiantini en 1977. Selon ces auteurs si l'on combine les isotopes stables de l'oxygène ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$ ) et de l'hydrogène ( $^1\text{H}$  et  $^2\text{H}$ ), sans tenir compte du tritium instable, on obtient neuf espèces différentes de molécules d'eau.

Les trois molécules les plus abondantes sont :



Les seules qui présentent un intérêt en hydrogéologie et hydrologie étant :



Toutes ces espèces sont présentes dans les eaux naturelles, mais leurs proportions relatives varient fortement en fonction du fractionnement subi par l'eau considérée. L'eau de mer par exemple contient plus de molécules lourdes (constituées principalement d'isotopes à nombre de masse élevé) que l'eau douce. On peut retenir à titre indicatif que pour 106 molécules du type  $^1\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ , on trouve entre 1880 et 2000 molécules d' $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$  et entre  $^{18}\text{O}$  et 340 molécules d' $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$  (Moser et Rauert, 1980).

### 5-2.1- Les isotopes de l'oxygène

L'oxygène a trois isotopes stables :  $^{16}\text{O}$  (99.63%),  $^{17}\text{O}$  (0.0375%) et  $^{18}\text{O}$  (0.1995%). On définit le rapport isotopique R comme celui de l'isotope rare sur l'isotope abondant, c'est à dire  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ou  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

Les variations sont exprimées en  $\delta^{18}\text{O}$  ou  $\delta^{17}\text{O}$ .

$$\delta^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}) - ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{Std}}] / ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{Std}} * 1000$$

$$\delta^{17}\text{O} = [({}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}) - ({}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{Std}}] / ({}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{Std}} * 1000$$

### 5-2.2- Les isotopes de l'hydrogène

L'hydrogène possède 2 isotopes stables,  $^1\text{H}$  (99.9852%) et  $^2\text{H}$  (appelé deutérium et noté D) (0.0148%). Il existe aussi un isotope cosmogénique et radioactif, le tritium  $^3\text{H}$  [ $10^{-12}$  à  $10^{-15}$ , (T=12.26ans).]

On définit le rapport isotopique R comme celui de l'isotope rare sur l'isotope abondant, c'est à dire D/H. Les variations sont exprimées en  $\delta\text{D}$ .

$$\delta\text{D} = [(D/H) - (D/H)_{\text{Std}}] / (D/H)_{\text{Std}} \cdot 10^3$$

Le standard est le SMOW, comme pour l'oxygène.

$$(D/H)_{\text{SMOW}} = 1.5578 \cdot 10^{-4}$$

L'hydrogène est essentiellement présent dans les roches sous forme d'eau (hydrosphère,

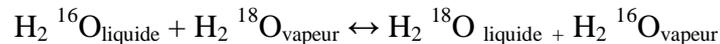
atmosphère, minéraux hydroxylés) et dans les matériaux d'origine biologique. C'est le système complémentaire de l'oxygène pour l'étude de l'eau.

On rappelle que les seules espèces moléculaires rares de l'eau, formées par la combinaison de ces isotopes, et qui représentent un intérêt pratique en hydrogéologie et en hydrologie sont :  $-^1\text{H } ^1\text{H } ^{18}\text{O}$ ,  $-^1\text{H } ^2\text{H } ^{16}\text{O}$ , et  $-^1\text{H } ^3\text{H } ^{16}\text{O}$ .

### 5-3- Les réactions d'échange dans la nature

Les échanges isotopiques entre deux composés comportant le même nombre d'éléments ou deux phases du même composé peuvent se produire, soit, lors d'une réaction chimique qui implique une modification du chimisme initial, soit, lors d'un simple transfert d'isotopes entre les deux phases sans que la chimie du système ne soit modifiée.

Exemple :



### 5-4- Notion de fractionnement

La différence de masse entre les isotopes, induit des différences d'énergie des liaisons moléculaires dans lesquelles les isotopes sont impliqués. Ces différences de masse et d'énergie des liaisons moléculaires entre les isotopes induisent des fractionnements isotopiques, c'est-à-dire des différences de composition isotopique entre les matériaux terrestres. La composition isotopique d'un élément donné dans un objet donné peut s'exprimer de plusieurs manières.

- Par les abondances isotopiques, c'est-à-dire les proportions atomiques entre les différents isotopes de l'élément. Par exemple, l'hydrogène qui possède deux isotopes stables, et un isotope cosmogénique et radioactif, le tritium, les abondances sont de 99.9852% pour  $^1\text{H}$ , 0.0148% pour  $^2\text{H}$ , et  $10^{-12}$  à  $10^{-15}$  ( $T=12.26$  ans) pour  $^3\text{H}$ .

Les abondances servent généralement à exprimer la composition isotopique moyenne d'un élément, mais pas les variations de composition isotopique.

- Par les rapports isotopiques R entre deux isotopes de l'élément, par convention en général, le moins abondant sur le plus abondant :

$$R = \text{nombre d'atomes de l'espèce rare} / \text{nombre d'atomes total de l'élément}$$

Par exemple, pour l'oxygène, on utilise les rapports  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  et  $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

- Par les "  $\delta$  ", c'est à dire les rapports isotopiques relatifs à un étalon (standard).

La notion "  $\delta$  " traduit les variations de concentrations de l'espèce isotopique rare par

rapport à celle d'un étalon de référence ou standard dont le rapport isotopique R est connu. Cette déviation par rapport à un étalon (standard), notée  $\delta$ , est très faible et s'exprime en %.

Par exemple, pour l'oxygène:  $\delta^{18}\text{O} = \left[ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Std}} \right] / \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Std}} \cdot 10^3$

$[^{18}\text{O}]$  et  $[^{16}\text{O}]$ , étant les concentrations en oxygène-18 et en oxygène-16, on aura pour l'oxygène-18:

$$\delta^{18\text{O}} = \frac{\left( \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}} - \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{étalon}} \right)}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{étalon}}} \cdot 1000$$

$[^2\text{H}]$  et  $[^1\text{H}]$ , étant les concentrations en deutérium et en hydrogène-1, on aura pour le deutérium :

$$\delta^{2\text{H}} = \frac{\left( \left( \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{échantillon}} - \left( \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{étalon}} \right)}{\left( \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}} \right)_{\text{étalon}}} \cdot 1000$$

(Les compositions isotopiques sont quantifiées par spectrométrie de masse). C'est le champ magnétique qui dissocie les isotopes en fonction de leur masse ; les plus légers ont un rayon de courbure plus fort.

Les différences de composition isotopique entre deux objets s'expriment de deux manières :

- Par le " $\Delta$ ", différence de composition isotopique exprimée en notation " $\delta$ " entre deux objets. Par exemple, pour exprimer la différence de composition isotopique de l'oxygène entre l'eau liquide et l'eau vapeur, on écrira :

$$\Delta_{(\text{liquide} - \text{vapeur})} = \delta^{18}\text{O}_{\text{liquide}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{vapeur}}$$

- Par le Facteur de fractionnement isotopique  $\alpha$ , dans le cas d'un équilibre chimique ou isotopique, et pour une température donnée, on appelle facteur de fractionnement isotopique ou de discrimination entre deux composés A et B ou deux phases du même composé, le quotient d'abondance isotopique de A et B :

$$\alpha_{A-B} = R_A / R_B \text{ (avec } R_A \text{ et } R_B \text{ comme rapports d'abondance isotopique.)}$$

Par exemple, pour exprimer la différence de composition isotopique de l'oxygène entre l'eau liquide et l'eau vapeur, on écrira :

$$\alpha_{\text{liquide} - \text{vapeur}} = \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{liquide}} / \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{vapeur}}$$

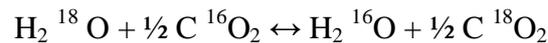
Noter qu'à condition que  $\alpha$  soit voisin de 1 (c'est le cas pour l'oxygène en particulier), il existe une relation fort utile entre les  $\alpha$  et les  $\Delta$ :  $\Delta_{a-b} = 1000 \ln \alpha_{a-b}$ .

On distingue deux types de fractionnements entre les isotopes stables : les fractionnements

à l'équilibre et les fractionnements cinétiques.

Les fractionnements à l'équilibre sont des fractionnements dus à la différence d'énergie entre les molécules impliquant des isotopes différents.

Prenons l'exemple de l'équilibre isotopique entre les dioxydes de carbone et l'eau exprimé pour l'oxygène. On peut écrire une réaction d'échange entre les  $^{18}\text{O}$  et les  $^{16}\text{O}$  de l'eau et du dioxyde de carbone, comme on le fait en thermodynamique pour les réactions chimiques.



L'énergie des produits de la réaction d'échange est différente de celle des réactifs, 0 cause des différences de masse. Ces différences sont de quelques centaines de J seulement, contre quelques centaines de kJ pour les réactions chimiques.

On introduit la constante  $\alpha$ , comme en thermodynamique

$$\alpha = \left( \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}}{\text{CO}_2} \right) / \left( \frac{^{18}\text{O}/^{16}\text{O}}{\text{H}_2\text{O}} \right)$$

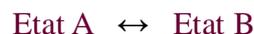
Ainsi, les teneurs isotopiques sont donc données sous forme de valeurs relatives notées  $\delta$ . En introduisant cette notation ;  $\alpha_{(A-B)}$  est appelé facteur de fractionnement isotopique. La valeur de  $\alpha$  est généralement très voisine de 1 :

$$\alpha_{(A-B)} = \frac{\delta_A + 1000}{\delta_B + 1000} \text{ avec } \alpha_{A-B} = 1$$

$$\ln \alpha_{(A-B)} = \frac{\delta_A - \delta_B}{\delta_B + 1000} \text{ avec } \delta_B \ll 1000$$

$$\text{Et donc } \alpha_{(A-B)} = \delta_A - \delta_B \cdot 10^{-3}$$

$\alpha$  est relié à la constante d'équilibre thermodynamique de la relation :



Elle est thermodynamiquement dépendante suivant la loi (Fritz et Fontes, 1980). Le fractionnement est lié à la température selon une relation de la forme :

$$1000 \ln \alpha_{(A-B)} = a + b \cdot T^{-1} + c \cdot T^{-2}$$

Avec a, b et c constantes ;

T : température en degrés Kelvin.

$$\alpha = k^{1/n}$$

Avec n = nombre d'atomes échangés

Les valeurs de  $\alpha$  pour l'oxygène-18 et pour le deutérium, pour un équilibre entre la phase liquide et la phase vapeur de l'eau :  $\text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{liq}} + \text{H}_2^{16}\text{O}_{\text{vap}} \leftrightarrow \text{H}_2^{16}\text{O}_{\text{liq}} + \text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{vap}}$ , sont données respectivement par les expressions (Mahdjoub, 1971) :

$$\ln \alpha(^{18}\text{O}) = -0.0020667 - 0.4156 \cdot 1000 T^{-1} + 1137 T^{-2}$$

$$\ln \alpha(^2\text{H}) = -0.052612 - 76.248 \cdot 1000 T^{-1} + 24844 T^{-2}$$

(T est la température thermodynamique)

### 5-5-Facteur d'enrichissement

Selon Friedman et O'Neil, 1977, pour une question de commodité  $\alpha_{(A-B)}$  est le plus souvent très proche de l'unité :

$$(\alpha_{(A-B)} \approx 1)$$

On note par simplification un facteur d'enrichissement,  $\varepsilon$ , en part pour mille (Fritz et Fontes, 1980).

$$\varepsilon_{(A-B)} = (\alpha_{(A-B)} - 1) \cdot 1000 = \delta_A - \delta_B / \delta_B \cdot 10^3 + 1$$

En considérant que  $\delta_B \cdot 10^3$  est négligeable devant 1, on peut écrire:

$$\varepsilon_{(A-B)} = \delta_A - \delta_B$$

D'après ces mêmes auteurs, cette approximation devient cependant, exagérée au-delà de  $\varepsilon_{(A-B)} \geq 10\text{‰}$ . Il conviendrait mieux d'utiliser la formule non simplifiée :

$$\delta_A - \delta_B / \delta_B \cdot 10^3 + 1.$$

Connaissant  $\hat{\alpha}_{(A-B)}$  et la composition isotopique de l'une des substances, il est facile de calculer celle de l'autre à l'équilibre isotopique. Le facteur de fractionnement est accessible grâce à des abaques (Friedman et O'Neil, 1977).

### 5-6-Les différents comportements isotopiques

La composition isotopique de l'eau peut varier au cours des changements d'état glace/liquide/vapeur ; au cours des réactions d'hydratation et de déshydratation ; au cours des processus de transport diffusif.

Au cours du cycle de l'eau, les processus de changement de phase les plus fréquents sont la condensation et l'évaporation.

#### 5-6.1- La condensation

La pluie provient principalement d'un phénomène de condensation au cours du refroidissement de masses d'air humides. C'est un phénomène à l'équilibre qui se produit lorsque la saturation en eau de l'air est atteinte (humidité relative = 100%). Au cours de la condensation des nuages, les molécules lourdes passent plus facilement dans la phase liquide. L'eau de pluie sera donc enrichie en isotopes lourds par rapport aux nuages qui lui ont donné naissance.

Au fur et à mesure que les eaux précipitent, la phase vapeur restante s'appauvrit en isotopes lourds :

$$\alpha_{\text{liquide-vapeur}} = R_{\text{liquide}} / R_{\text{vapeur}} > 1$$

La fraction vapeur qui condense et le facteur de fractionnement qui déterminent conjointement la composition isotopique du condensât, sont thermodépendants. Ceci a été clairement montré sur un diagramme de corrélation :  $\alpha$  vs  $T^\circ$  en degrés Celsius (Fig 5-1).

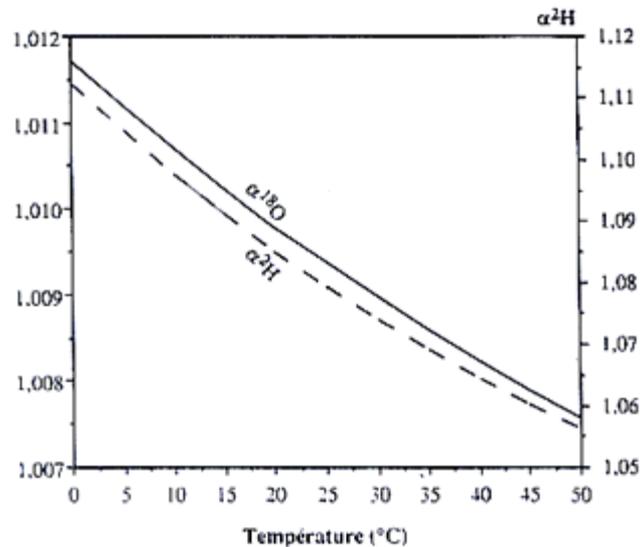


Figure 5-1 : Relations de thermodépendance des facteurs de fractionnement à l'équilibre liquide-vapeur de l'eau ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ )

Il a été établi que lors d'une succession d'épisodes de condensation issue de la même masse de vapeur, chaque phase liquide qui se forme est plus appauvrie en isotopes lourds que celle qui la précède. Ceci est dû à l'appauvrissement isotopique de la vapeur d'eau résiduelle, selon le phénomène de Rayleigh, qui peut être assimilé à une exponentielle de la forme (Fontes, 1976) :

$$\delta v - \delta v_0 = \varepsilon \ln f$$

Où :  $\delta v$  = composition isotopique de la vapeur d'eau à l'instant  $t$  donné,

$\delta v_0$  = composition isotopique de la vapeur d'eau à l'instant initial,

$\varepsilon$  = facteur d'enrichissement, et  $f$  = fraction restante de vapeur.

La température de condensation et la composition isotopique des eaux météoriques sont donc liées. Dansgaard (1964), a établi les relations suivantes pour les moyennes annuelles ou  $t$  désigne la température au sol en degrés Celsius (Fig. 5-2) :

$$\delta^{18}\text{O} = 0.68T - 13.6 \text{ et } \delta^2\text{H} = 5.6T - 100$$

L'eau des océans a un  $\delta^{18}\text{O}$  considéré comme nul, l'eau de mer constituant le standard pour l'oxygène.

Soit  $f$  la fraction résiduelle d'eau sous forme vapeur,  $f$ , varie donc de 0 avant les premières précipitations à 1, lorsque toute la vapeur s'est condensée  $R_0$  est le rapport initial dans la

vapeur.

L'évolution du rapport isotopique dans le nuage étant :

$$R/R_0 = f^{(\alpha-1)}$$

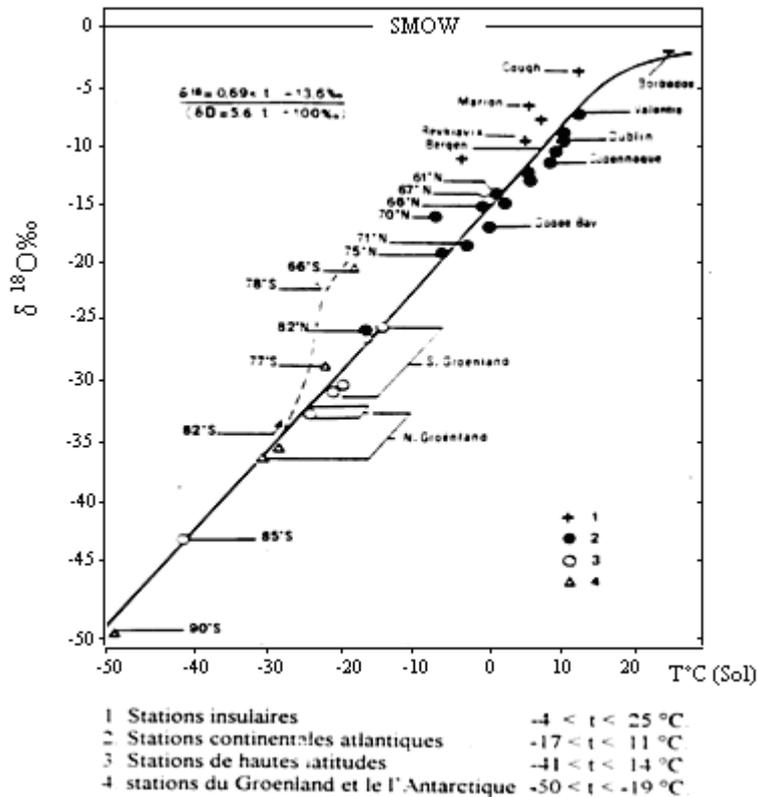


Figure 5-2 : Variation de la composition isotopique moyenne des précipitations (<sup>18</sup>O) en fonction de la température annuelle moyenne au sol : traçage en latitude d'après (Dansgaard, 1964, *In Fontes*, 1976)

Il est ainsi aisé de déduire celle du rapport isotopique dans les eaux de pluie en équilibre avec la vapeur à un moment donné en connaissant :

$$\alpha = R_{liq}/R_v.$$

Si  $\alpha$  est constant et vaut 1.009, pour  $f=0.5$ , on peut calculer que le  $\delta^{18}O$  de la phase vapeur est de -15‰, et donc l'eau de pluie en équilibre a un  $\delta^{18}O$  de -6‰.

Pour  $f=0.1$ ,  $\delta^{18}O$  de la phase vapeur est -29‰, et donc l'eau de pluie en équilibre a un  $\delta^{18}O$  de -20‰.

La composition isotopique des eaux météoriques à la surface du globe, est caractérisée par un  $\delta^{18}O$  négatif. Ce rapport varie de 0 à -40‰ environ.

Il a été défini que les valeurs les plus fortes sont observées dans les eaux météoriques équatoriales, les valeurs les plus faibles sont observées au pôle ; ceci est la conséquence :

- de la circulation atmosphérique globale caractérisée par une évaporation

essentiellement dans les zones chaudes, équatoriales, et des précipitations qui s'échelonnent ensuite depuis les régions équatoriales vers les régions tempérées, puis polaires ;

- de la dépendance du facteur de fractionnement  $\alpha_{\text{liq-v}}$  avec la température. Les fractionnements étant plus fort à faible température, donc dans les régions froides, qu'à haute température, donc dans les régions chaudes.

.La conséquence de ces paramètres est la variation des teneurs en isotopes stables (lourds) de la molécule d'eau (des précipitations) en fonction de la latitude étant une diminution des teneurs en isotopes lourds ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) des précipitations avec la latitude. Par ailleurs, les teneurs en isotopes lourds ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) des précipitations diminuent lorsque l'altitude augmente (Fig. 5-3).

En effet, quand un nuage s'élève aux abords d'un relief, la température diminue du fait de l'altitude, ce qui donne des précipitations de plus en plus pauvres en isotopes lourds. Les pluies s'appauvrissent également par épuisement de la masse nuageuse. D'autres processus physiques interviennent au cours de la formation des précipitations en région montagneuse ; comme l'évaporation des gouttes de pluie au cours de leur chute, pour donner finalement une relation linéaire entre l'altitude de prélèvement de la pluie et sa composition isotopique. Cet effet est un outil précieux de traçage de la recharge des eaux souterraines puisqu'il permet de déterminer l'altitude moyenne d'un bassin d'alimentation par simple mesure de la composition isotopique de l'eau d'une source.

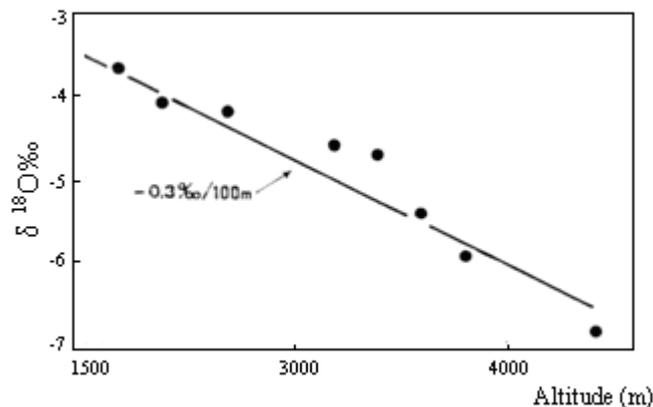


Fig. 5-3 : traçage des précipitations en isotopes stables..

Les variations de la teneur en  $^{18}\text{O}$  d'un même épisode de précipitation en fonction de l'altitude sont dues à la collecte de neige fraîche sur les pentes du Kilimandjaro (Tongiorgi inédit, *In* Gonfiantini, 1970). Par contre au cours des variations saisonnières, les

pluies d'été sont généralement plus riches en isotopes stables que les pluies d'hiver. (Fig. 5-4).

### 5-6.2- La période paléoclimatique

Suite au réchauffement actuel de l'atmosphère, équivalent à quelques degrés Celsius, les eaux anciennes sont marquées par des teneurs en isotopes lourds plus faibles que celles enregistrées dans les eaux récentes.

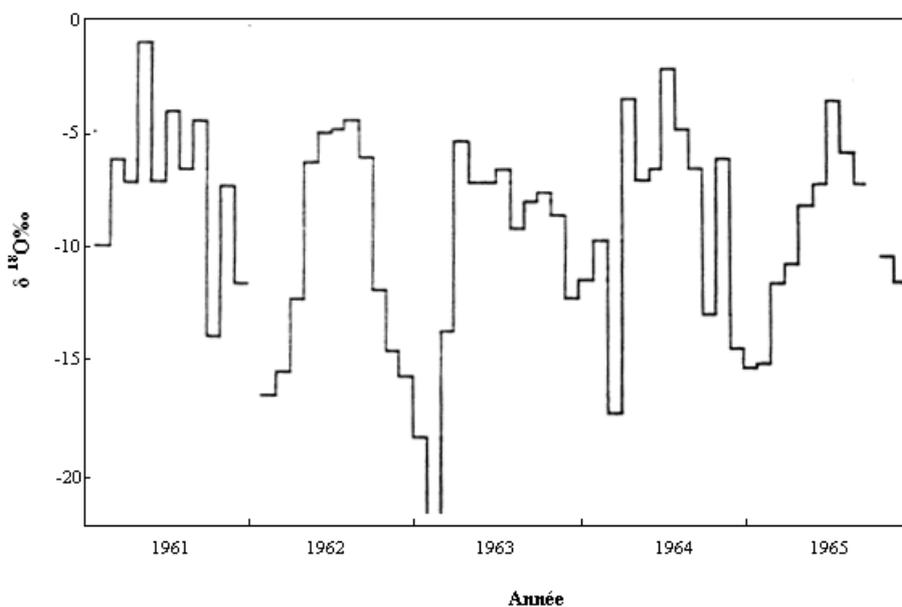


Figure 5- 4 : Traçage des précipitations en isotopes stables. Variations saisonnières des teneurs en  $^{18}\text{O}$  des précipitations à Vienne (IAEA, 1969-70-71-73. In Fontes, 1976)

#### a- L'effet de continentalité

De nombreuses études ont montré que la composition isotopique moyenne des précipitations tend vers des valeurs négatives quand on se déplace de la côte océanique vers l'intérieur des terres.

Quand la pluie se déplace vers l'intérieur des terres, elle précipite progressivement par condensation, pendant que les molécules légères ont tendance à rester dans la phase vapeur. L'humidité de l'air est donc de plus en plus pauvre en isotopes lourds par rapport à l'océan (qui est d'ailleurs le standard). Cet effet de continentalité est souvent masqué par les variations saisonnières ou l'effet d'altitude par exemple.

## **b- L'effet de quantité**

Plus un événement pluvieux est important, ou plus les précipitations mensuelles sont abondantes, plus l'eau est pauvre en isotopes lourds. C'est ce que l'on désigne par l'effet de quantité. On peut interpréter ce phénomène de deux façons différentes.

- Des températures basses sont responsables de la formation de nuages appauvris, et engendrent des pluies relativement abondantes.

- Plus la distance entre le nuage et le sol est grande, plus les eaux précipitées ont le temps de s'évaporer et de s'enrichir en isotopes lourds. Cet effet est moins intense quand la température ambiante est basse et quand la pluie est abondante, voire, quand l'air est fortement saturé en eau.

## **5-7-Corrélation des isotopes stables deutérium (<sup>2</sup>H) et Oxygène -18 (<sup>18</sup>O)**

A l'échelle du globe, les teneurs en oxygène-18 et en deutérium des précipitations mondiales qui n'ont pas subi d'évaporation sont corrélées entre elles par une droite d'équation :

$$\delta^2\text{H} = \delta^{18}\text{O} + d \quad (\text{Craig, 1961})$$

La pente de la droite météorique mondiale (8), caractérise le phénomène de condensation produit à l'équilibre ; et, d (10), l'ordonnée à l'origine ou excès en deutérium.

L'excès en deutérium est variable en fonction de l'humidité relative et de la température de l'interface océan-atmosphère, lors de la formation des masses de vapeur atmosphérique (Jouzel et Merlivat, 1979).

Ainsi, d, prend la valeur de +10 lorsque les précipitations sont d'origine océanique (Craig, 1961), mais peut avoir aussi des valeurs supérieures ou inférieures à 10, notamment :

- +22, pour les précipitations du bassin oriental de la méditerranée (Nir, 1967) ;
- +6, pour les précipitations des stations continentales d'Amérique du Nord (Yurtsever et Gat, 1981).

À l'échelle mondiale, les teneurs en isotopes stables des précipitations sont bien corrélées le long d'une droite (Fig. 5-5), d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

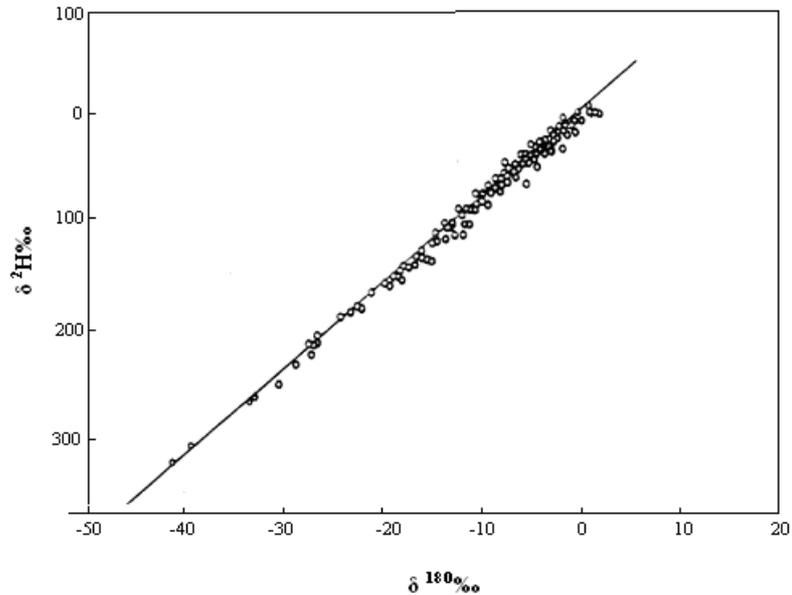


Figure 5-5 : Oxygène -18 et deutérium dans les précipitations

### 5-8- Evaporation

Dés que l'humidité relative décroît, il se produit un phénomène de non équilibre : l'évaporation. Lorsqu'une masse d'eau est soumise à l'évaporation, les fractions restantes sont enrichies progressivement en isotopes lourds avant d'atteindre un seuil stationnaire au delà duquel il n'y a plus d'enrichissement quel que soit le degré d'évaporation (Craig, 1963 ; Fontes, Gonfiantini, 1967 et Fontes, 1976.). Ce seuil est rapidement atteint lorsqu'il s'agit d'eaux chargées en sels.

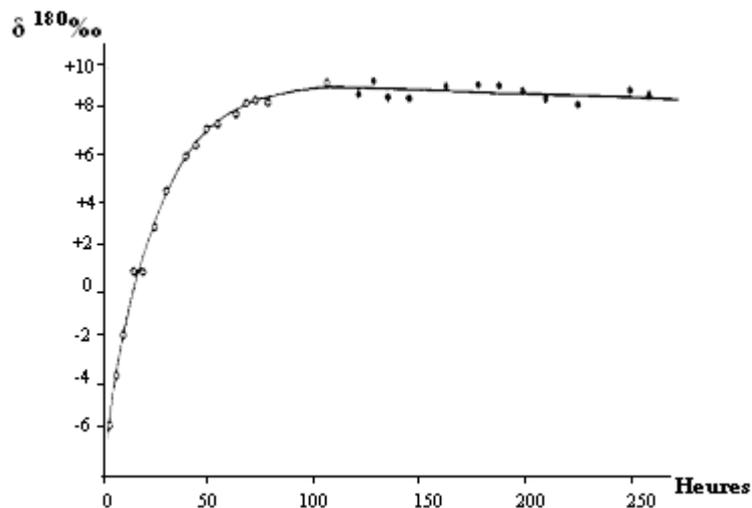


Figure 5-6 : Etat stationnaire au cours de l'évaporation d'un bassin à niveau maintenu. (D'après Gonfiantini et Fontes, 1963 In Fontes, 1976)

Quoiqu'il en soit les teneurs en oxygène  $-18$  et en deutérium de la phase liquide restent corrélées d'une façon linéaire (Fig. 5-6). Cependant, la pente de droite de corrélation est inférieurs à 8 (entre 6et 3), et une ordonnée à l'origine «excès en deutérium » inférieure à 10, en fonction de l'intensité de l'évaporation (Fontes ,1976).

Ainsi pour une eau évaporée, on a :  $\delta^2\text{H} = a \delta^{18}\text{O} + d$  Avec  $3 < a < 6$  et  $b \ll 10$

La figure 5-7 montre que l'excès en deutérium varie d'une région à une autre. L'évaporation conduit également à des corrélations linéaires pour les teneurs en isotopes stables des fractions liquides restantes.

Les eaux évaporées montrent des pentes variables qui traduisent le fait que chaque étendue d'eau en état d'évaporation obéit à sa cinétique propre qui dépend des paramètres climatiques locaux. Une eau évaporée se repère facilement en s'inscrivant sous la droite des précipitations mondiale ; on remarque que l'échange géothermique n'affecte que les teneurs en  $^{18}\text{O}$  qui se trouvent sur une horizontale.

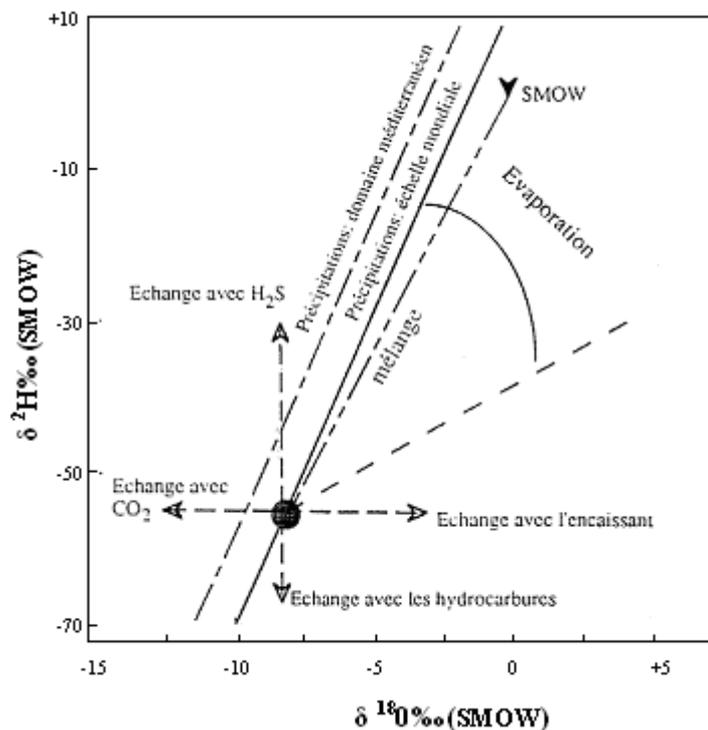


Figure 5-7-Résumé des modalités de traçage

### 5-8.1- Comportement isotopique à l'évaporation

Dans les bassins sahariens la pente de la droite d'évaporation (Fig. 5-8a et b) est légèrement plus faible pour les eaux courantes tributaires des bassins (Fontes et Al, 1970 ;

Conrad et Fontes ,1970 ; Fontes et Gonfiantini ,1967 ; In Fontes ,1976).

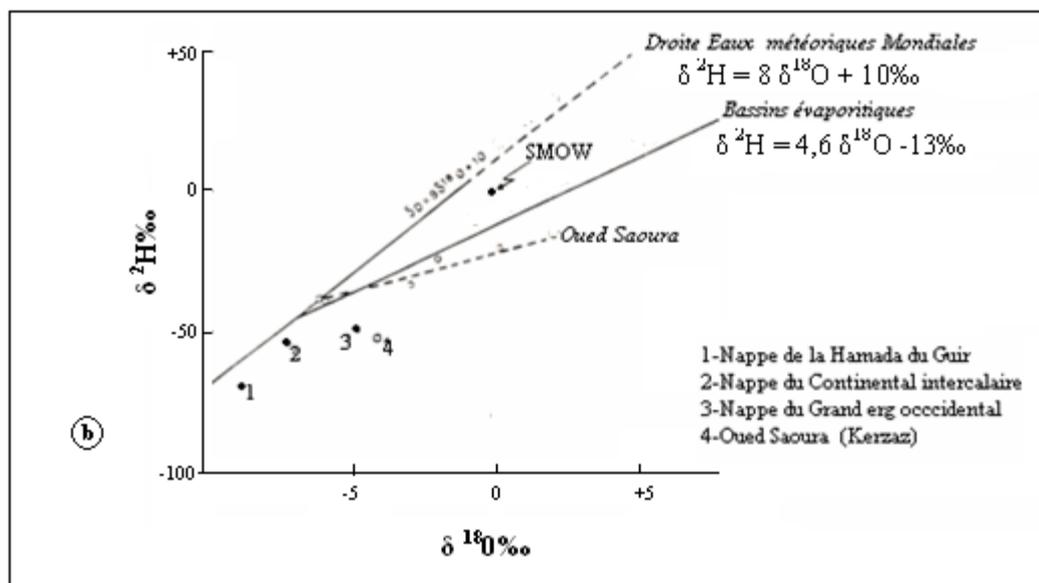


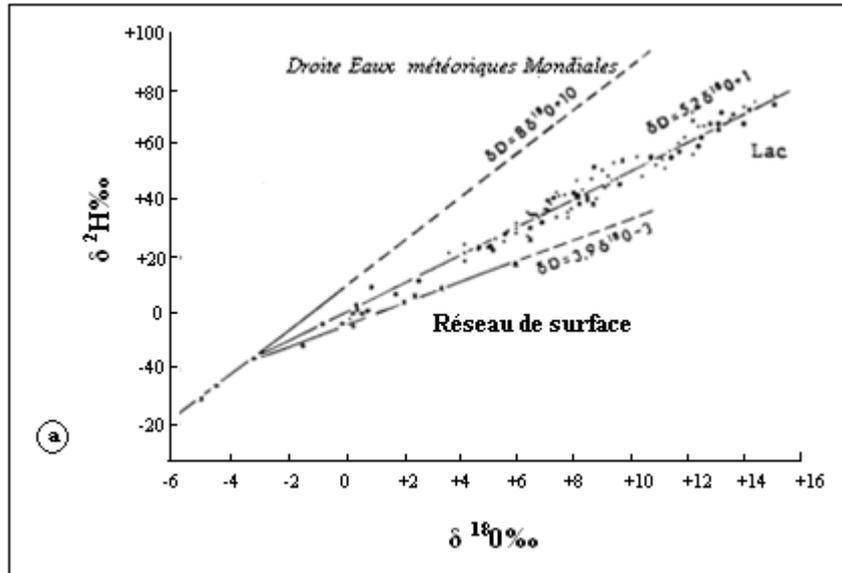
Figure5-8 : Différence de comportement isotopique à l'évaporation entre les eaux courantes et les étendues stagnantes

### 5-8.2-Conditions particulières

Il existe des facteurs particuliers qui entraînent des variations de la composition isotopique des eaux comme les mélanges de vapeurs lacustres continentales et marines, les réactions d'échanges entre l'eau et la roche (Craig, 1963 ;Gonfiantini et al ,1973). Cet échange se traduit par un enrichissement en oxygène-18 de l'eau tandis que la teneur en deutérium reste constante (Fig. 5-9).

Ce phénomène est matérialisé par une droite parallèle à l'axe des abscisses, tel que le montre le diagramme deutérium-oxygène18. Ces réactions d'échanges se produisent surtout dans les circuits géothermaux. L'ampleur des échanges isotopiques est fonction de la température, de la nature de la roche et de la durée d'interaction.

D'autres échanges entre l'eau et certains fluides se traduisent par un appauvrissement en oxygène-18 lors de l'échange isotopique entre l'eau et  $\text{CO}_2$  (Ferrara et Al; 1965 In Fontes ,1976), un enrichissement en deutérium de l'eau lors de contact de l'eau avec  $\text{H}_2\text{S}$  (Nief et Botter, 1960), et un appauvrissement en deutérium de l'eau lors de contact de l'eau avec les hydrocarbures (Schiegl et Vogel, 1970).



(Fig. 5-9) : Mélange de vapeurs lacustres continentales et marines

### 5-9- Caractéristiques isotopiques des précipitations en Algérie nord orientale

D'une manière générale, la région Nord-orientale de l'Algérie est relativement pauvre en données isotopiques sur les précipitations. En l'absence de stations de mesure des compositions isotopiques des précipitations dans notre région d'étude nous avons considéré les teneurs isotopiques à Annaba (Fig. 5-9), station située au nord -est de la région d'étude : 36°N 49', 07°49'E et altitude 5m, , et à Batna (Fig. 5-10), station située au sud-est de la région d'étude : 35°N 33', 06° 11'E et altitude 1052m.

Les données sont fournies par le CDTN –Alger pour l'année 1989 (Tableaux 5-1 et 5-2).

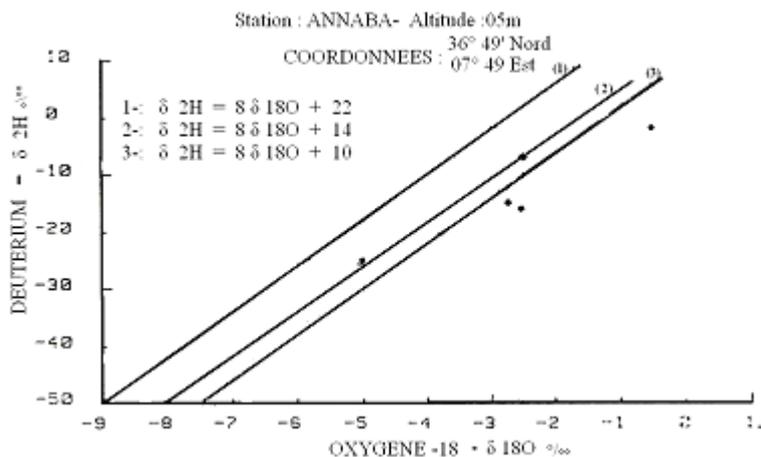


Figure 5-10 : Relation oxygène18-deutérium à Annaba

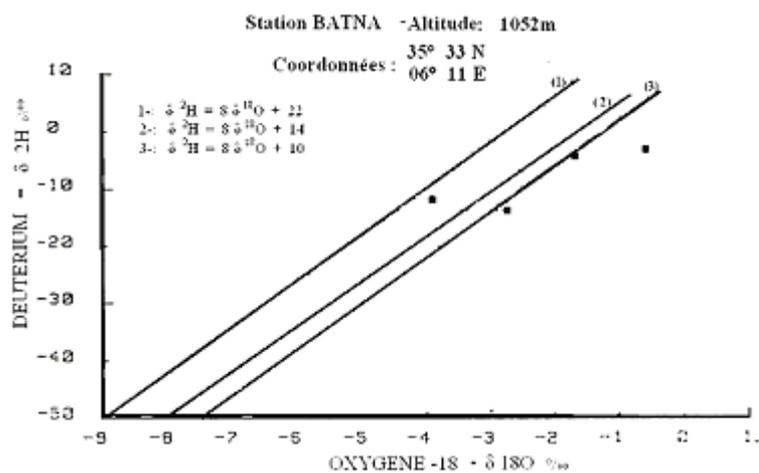


Figure 5-11 : Relation oxygène18-deutérium à Batna

Tableau 5-1 : Valeurs physico-chimiques, hydroclimatologiques et isotopiques Station d'Annaba (Période, Avril 1989-Mars 1990)

Mois	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout	sep	oct	Nov.	Dec	Jan.	fev	mar
Cond μS/cm	/	177	95	253	207	99	107	160	99	126	/	/
pH	/	7.6	7.4	7.15	7.20	7.35	8.5	8.6	6.8	8.4	/	/
δ18o‰	/	-1.74	-3.901	0.614	2.567	-2.859	-3.823	-3.105	-7.043	-.8.343	/	/
δ2H‰	/	-3.3	-11	2.6	14.4	-13.4	/	/	/	/	/	/
P(mm)	23	16.0	55	6	26	27	20	3	14	61	/	35
T°C	12.0	17.6	20.6	25.5	25.9	21.6	15.6	12.7	10.3	6.0	8.1	10.1

Tableau 5-2 : Valeurs physico-chimiques, hydroclimatologiques et isotopiques  
Station de Batna (Période, Avril 1989-Mars 1990)

Mois	Avrl	Mai	Juin	Juil	Aout	sep	oct	Nov.	Dec	Jan.	fev	mar
Cond μS/cm	157	418	132	/	/	110	128	124	30	43	208	210
pH	7.7	7.7	7.8	/	/	7.2	7.1	9.3	9.0	8.7	8.1	8.3
δ18o‰	-2.75	-2.57	-.688	/	/	-2.585	-5.028	-4.164	-7.950	-.7.283	-2.751	-3.060
δ2H‰	-13.8	-14.6	-1.3	/	/	-7.3	-25.7	/	/	/	/	/
P(mm)	100	19.0	14	3	6	16	79	56	106	130	6	44
T°C	15.1	18.0	21.3	25.2	26.3	23.7	19.1	15.6	14.7	11.7	13.5	13.6

### 5-10- Conclusion

Les isotopes lourds de l'eau de pluie des stations d'Annaba et de Batna (cette dernière station qui est la proche au point de vue climatique (semi-aride) et géographique (à peu près 80km au sud d'El Eulma), montrent un enrichissement en saison estivale (CDTN, 1989, Alger) :

Précipitations estivales enrichies :

Annaba :  $-0.688 \delta^{18}\text{O}‰ -1.3 \delta^2\text{H}‰$

Batna :  $.0.614 \delta^{18}\text{O}‰ -1.3 \delta^2\text{H}‰$

Précipitations hivernales :

Annaba :  $-5.028 \delta^{18}\text{O}\text{‰} -25.7 \delta^2\text{H}\text{‰}$

Batna :  $-8.34 \delta^{18}\text{O}\text{‰}$

Les précipitations enrichies en isotopes lourds ont vraisemblablement subi une évaporation lors de la chute des gouttelettes d'eau dans un profil de l'atmosphère non saturée en vapeur d'eau. Alors que les précipitations non évaporées traduisent un mélange entre les vapeurs condensables d'origine océaniques et méditerranéenne.

Dans les régions semi-arides, les précipitations sont souvent très irrégulières tant en intensité qu'en hauteur. Les mois pour lesquels la valeur mensuelle est supérieure à 50 mm se situent pour la plupart entre la droite des eaux météoriques en domaine océanique à l'échelle mondiale avec un excès en deutérium de 10‰. Alors que les mois pour lesquels la valeur mensuelle des précipitations est inférieure à 50 mm. La majeure partie de ces points se situe en dessous la droite météorique. Ceci indique nettement que ces eaux météoriques ont subi une évaporation. Leur composition isotopique a donc été modifiée après condensation et ne reflète plus celles des masses d'air humides dont elles sont issues.

## Chapitre VI

### HYDROGEOLOGIE

#### 6-1- Introduction

Dans la nature, il n'existe pas de formation parfaitement imperméable mais des formations dont la perméabilité est plus ou moins importante. Dans cette optique, on admet de considérer comme imperméables les niveaux à très faible porosité, tels que les roches cohérentes calcaires ou dolomies lorsqu'elles ne sont pas fissurées, les formations marneuses et argileuses qui se développent dans la série stratigraphique, et les formations conglomératiques lorsqu'elles sont cimentées et dépourvues de fissuration.

Dans la région de Sétif, les sédiments du Mio-Plio-Quaternaire, qui occupent les dépressions d'El Eulma, Ain Azel, Ain Lahdjar et Beida Bordj, sont caractérisés par des marnes avec intercalation de petits niveaux calcaires, sablo-graveleux ou conglomératiques. Dans la plaine d'El Eulma, le Quaternaire est cependant argileux, les marnes étant imperméables, les graviers, sables et galets, constituent, en revanche, la matrice de l'aquifère mio-plio-quaternaire. Par ailleurs, les formations calcaro-dolomitiques du Jurassique, du Crétacé et du Paléogène, constituent un système aquifère à porosité secondaire (par fissures et chenaux). Tandis que les calcaires lacustres, les conglomérats du Mio-Pliocène et les alluvions récentes du Quaternaire constituent un système aquifère à porosité inter granulaire.

#### 6-2- Systèmes aquifères

Les principales unités hydrogéologiques, sont les sédiments de couverture et les carbonates du Mésozoïque et Paléogène. Le caractère argilo-marneux, et la présence des formations salées du Trias jalonnant les formations tectonisées laissent supposer du potentiel en eau et du problème de contamination des eaux. Par ailleurs, la fracturation prête à présumer d'un échange hydraulique entre les aquifères.

##### 6-2.1- Caractéristiques hydrogéologiques de la roche carbonatée fracturée

Les réservoirs des carbonates fracturés sont représentés par les séries calcaro-dolomitiques des Djebels Brao, Tnoutit, Kalaoun, Tella et Tafourer, qui, avec 1001 km<sup>2</sup> de superficie constituent le véritable « château d'eau » de la région.

- Les dolomies du Jurassique supérieur ont une épaisseur d'environ 300 mètres. Bien fracturée, cette formation est susceptible de développer un aquifère.
- Les calcaires et les dolomies du Néocomien présentent une bonne perméabilité et une

karstification de la roche, du fait des diaclases qui recoupent les joints de stratification créant facilement des vides de dissolution. Les petites sources et les grottes qui se trouvent à la base de cette formation témoignent des circulations d'eau karstique.

- Les calcaires du Barrémien dont l'épaisseur avoisinent les 350 mètres.
- Les calcaires de l'Aptien présentent les mêmes caractères que les calcaires du Barrémien (failles et diaclases).
- Les calcaires Albo-Cénomaniens présentent les mêmes caractères cités précédemment. Malgré leur faible épaisseur et leur manque d'extension, ils pourraient avoir un rôle hydrogéologique important.

### **6-2.2- Caractéristiques hydrogéologiques des sédiments mio-plio-quaternaires**

Le Mio-plio-quaternaire est formé par un dépôt continental très hétérogène. Il est composé de galets, graviers, sables à remplissage argileux et limoneux dans lesquels s'intercalent plus ou moins de niveaux argilo-marneux et des calcaires lacustres de très faibles épaisseurs.

L'aquifère mio-plio-quaternaire s'étend vers le sud jusqu'aux piedmonts Nord des Djebels Boutaleb, Gouzi et Fourhal. Vers l'Ouest, il est limité par les flancs Est des Djebels Sekrine, Hadjar Labiod et du Kef El Djebbas. Son épaisseur est variable, des forages servant à l'alimentation en eau potable ont donné des épaisseurs allant de 8 à 125 mètres.

L'aquitainien est constitué par des grés fissurés gris et beiges qui alternent avec des grés graveleux et des calcaires graveleux fissurés. A la base de cette alternance, on a des conglomérats. Le Miocène gréseux conglomératique affleure en plusieurs endroits, ce qui permet donc une bonne alimentation (recharge) par infiltration des eaux météoriques. D'autre part, on peut affirmer que la nappe Miocène est alimentée par les eaux des formations carbonatées du Crétacé inférieur (vu la direction d'écoulement des eaux souterraines, la direction des pendages et les analyses hydrochimiques de cette nappe Miocène).

Les forages qui ont été effectués dans les années 1980 et ont pu traverser le Miocène. De ce fait l'épaisseur du Miocène a été estimée entre 40-50 mètres (d'après ces mêmes forages et les travaux géologiques de Glaçon, 1960). Les grés fissurés de l'Aquitainien contiennent une nappe en charge dont le toit est constitué par des marnes et argiles du Miocène moyen. Son mur serait constitué de marnes du Sénonien Cénomaniens.

Les mesures du niveau statique dans les forages captant le Miocène ont montré des côtes piézométriques plus élevées au Sud qu'au Nord. D'après cette constatation, on peut dire que l'écoulement se fait du Sud vers le Nord, c'est à dire des piémonts des Djebels vers la plaine.

Enfin, le caractère argilo-marneux de la matrice plio-quaternaire laisse présumer d'un

aquifère captif.

### **6-2.2.1- Description des ouvrages et inventaire des points d'eau**

Les puits traditionnels atteignent généralement le niveau supérieur de la nappe, ou profond d'un à deux mètres au dessous du niveau de l'eau. Le diamètre des puits varie entre 3 et 5 mètres ce qui permet d'avoir une réserve relativement grande. Les matériaux utilisés pour le revêtement sont généralement des briques des parpaings, ou des pierres consolidées par du ciment. On a trouvé quatre (04) puits reliés entre eux par des galeries de communication souterraines inclinées légèrement en direction du puits collecteur. Parmi les puits inventoriés, 35 % sont utilisés pour l'alimentation en eau potable, sont utilisés pour 65 % l'agriculture (irrigation des cultures et élevage du bétail)

Etant donné le grand nombre de points d'eau (Tableaux 3 à 9 en annexe), nous avons procédé à une sélection en tenant compte des facteurs tels que la profondeur de l'ouvrage, le débit d'extraction et l'importance du point d'eau considéré, (Figs. 10 et 11 en annexe).

Les points d'eau retenus dans ce travail ont permis l'établissement de la carte piézométrique en période d'étiage. Il est intéressant de remarquer que le grand pourcentage des points d'eau (puits) appartenant à l'aquifère mio-plio-quaternaire se trouve dans le sous bassin versant du Chott El Beida.

### **6-2.2.2- Piézométrie**

La campagne d'inventaire a permis d'élaborer une carte piézométrique (Fig. 6-1) de l'aquifère mio-plio-quaternaire durant la période d'étiage.

L'interprétation de cette carte permet d'avancer les conclusions suivantes :

- La direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines présentent une grande analogie avec celles des eaux superficielles, (c'est à dire en direction des chotts et sebkhas).
- Les lignes de partage des eaux souterraines coïncident avec celles des eaux superficielles.

#### **a- Sens d'écoulement**

L'écoulement des eaux souterraines se fait en direction des chotts et sebkhas. L'analyse de l'écoulement à l'échelle des différents sous bassins versants nous montre que toutes les eaux convergent vers ces dépressions fermées (Sebkha de Bazer, Chott El Beida).

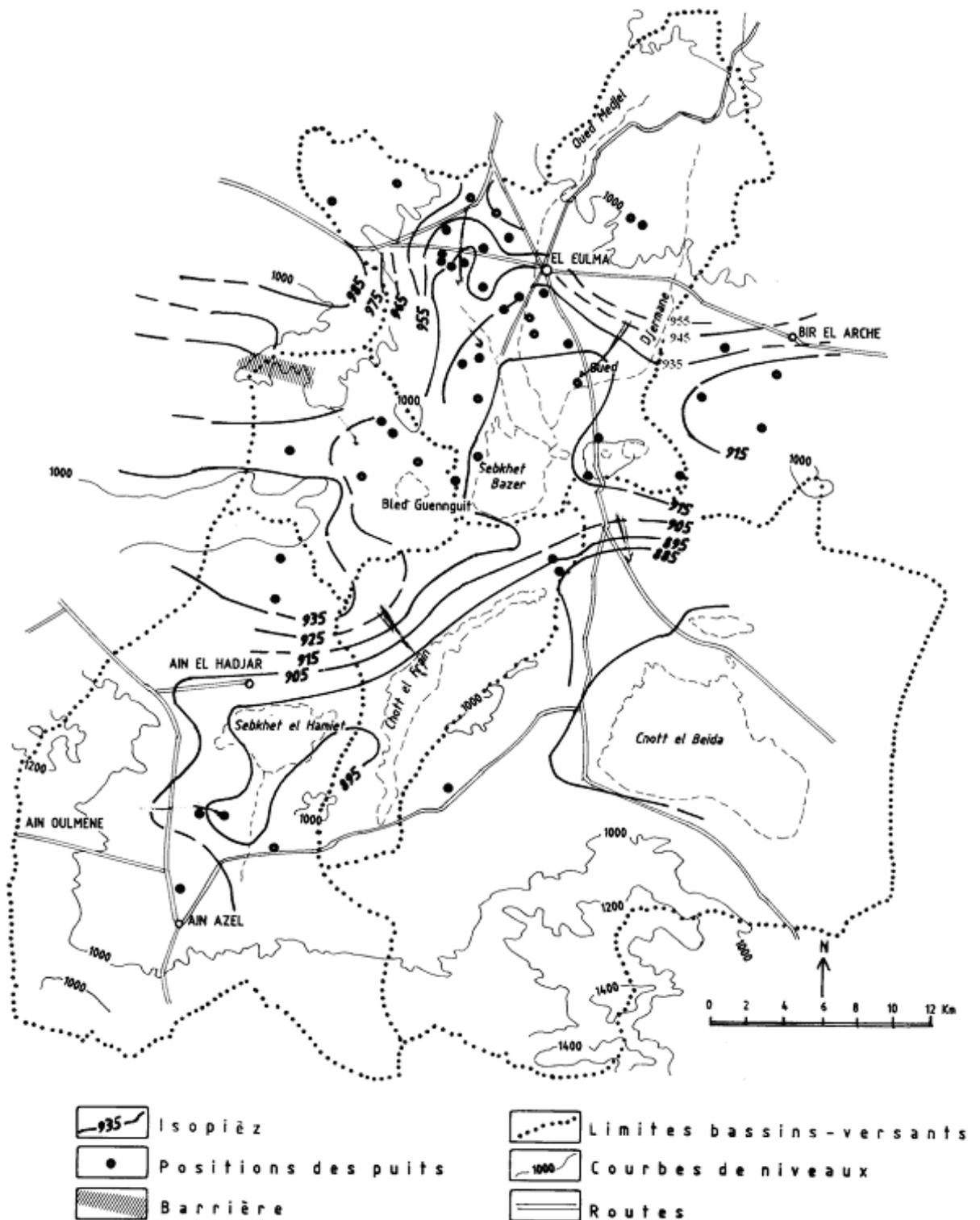


Figure 6-1 : Carte piézométrique du secteur d'étude année 2006

### b- Axes de drainage

L'écoulement des eaux souterraines bien qu'il soit de type convergent présente plusieurs axes de drainage. Les plus importants étant :

- Dans le sous bassin de Bazer, plusieurs axes de drainage de directions N-S, NW-SE et NE-SW, à filets convergents vers la dépression fermée (Sebkhha de Bazer).

- Dans les autres sous bassins versants, l'interprétation de la carte piézométrique montre également plusieurs axes de drainage en direction des lacs.

- La direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines présentent des analogies nettes avec celle des eaux de surface.

- La ligne de partage des eaux de surface coïncide sensiblement avec celle des eaux souterraines.

- L'alimentation s'effectue à partir des djebels (Jurassique, Crétacé, Eocène).

- Les zones de drainage (ou dépressions de la surface piézométrique) sont de deux types :

+ Evaporation (courbes piézométrique fermées) pour les chotts, sebkhas, etc.

+ Les Oueds ont un effet de drainage lors de la période d'étiage.

### **c- Gradient hydraulique**

Le gradient hydraulique  $i=AH/AL$  qui représente les pertes de charge par unité de longueur est en général faible.

Au voisinage des lacs fermés (Sebkha et Chotts) et dans les zones de plaines, les isopièzes sont très espacées, le gradient hydraulique est très faible et il est de l'ordre de 0,001 à 0,004. Aux piémonts des Djebels, on constate que le gradient hydraulique est relativement plus fort et a pour valeurs 0,02 à 0,015.

### **d- Zone d'alimentation**

En dehors des infiltrations directes des eaux de précipitations, la nappe superficielle reçoit toutes les eaux qui devaient les flancs internes des Djebels de Brao, Tnoutit, Sekrine, Youssef, Kef El Djebbas, Hadjar Labiod, Gourzi. Boutaleb et Djebel Fourhal (Figs. 12 et 13 en annexe). Une alimentation de l'aquifère du Mio-plio-quaternaire par les eaux des calcaires Karstifiés du Jurassique, Crétacé inférieur, et de l'Eocène est très probable.

### **6-2.2.3- Paramètres hydrodynamiques**

Plusieurs essais de pompage ont été exécutés afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère mio-plio-quaternaire (Figs. 6-2 et 6-3).

La majorité des puits équipés se trouvent dans les formations quaternaires qui présentent une grande hétérogénéité au point de vue lithologique, et explique de ce fait les grandes variations des valeurs de la transmissivité et des débits dans des puits voisins ou distants de quelques mètres.

Les essais de pompages par palier (temps court) ont été effectués dans un certain nombre de puits (Tableau 6-1), ont fourni une transmissivité faible entre  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

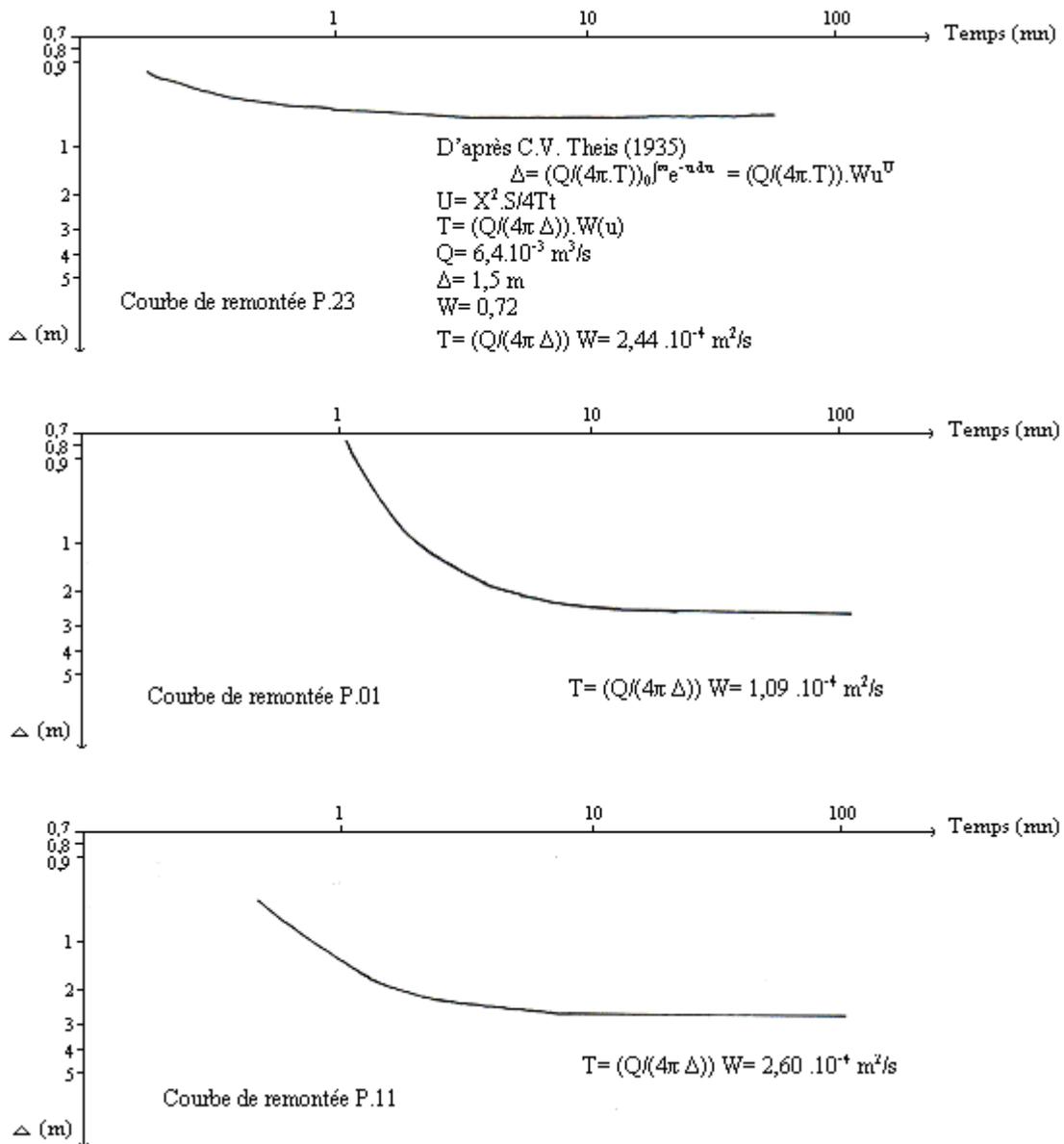


Figure 6-2 : Courbes de remontée P23, P1 et P11

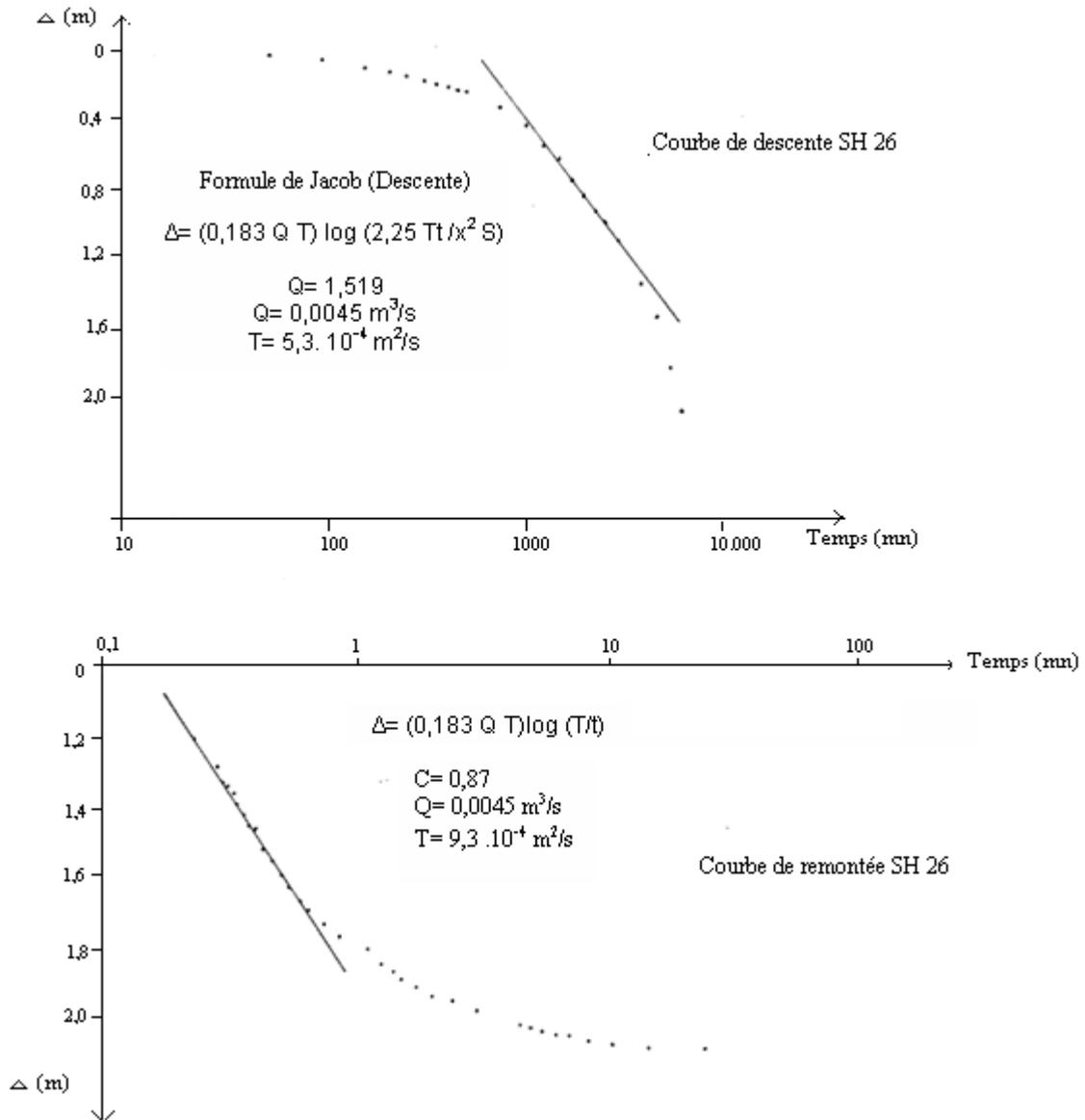


Figure 6-3 : Courbes de remontée et de descente du puits SH 26

Tableau 6-1 : Transmissivité

Puits	S B 38	S B 23	SB1	S B 11	S H 26
T ( $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ )	0,23	2,4	1,09	2.6	73

#### 6-2.2.4- Discussion

La direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines présentent des analogies nettes avec celle des eaux de surface. La ligne de partage des eaux de surface coïncide

sensiblement avec celle des eaux souterraines. L'alimentation s'effectue à partir des Djebels (Jurassique, Crétacé, Eocène).

Les zones de drainage (ou dépressions de la surface piézométrique) sont de deux types :

- Evaporation (courbes piézométrique fermées) pour les chotts, sebkhas ... etc.
- Les Oueds ont un effet de drainage lors de la période d'étiage.

## **6-2.2- Aquifère à porosité secondaire**

### **6-2.2.1- Aquifère du Miocène (Aquitaniens)**

#### **a- Caractère lithologique :**

L'aquitaniens est constitué par des grés fissurés gris et beiges qui alternent avec des grés graveleux et des calcaires graveleux fissurés. A la base de cette alternance, on a des conglomérats.

#### **b- Limites et épaisseurs**

Les forages qui ont été effectués dans les années 1980 et ont pu traverser le Miocène. De ce fait l'épaisseur du Miocène a été estimée entre 40-50 mètres (d'après ces mêmes forages et les travaux géologiques Glaçon, 1960).

Les grés fissurés de l'Aquitaniens contiennent une nappe en charge dont le toit est constitué par des marnes et argiles du Miocène moyen. Son mur serait constitué de marnes du Sénonien Cénomaniens.

#### **c- Sens d'écoulement**

Les mesures du niveau statique dans les forages captant le Miocène ont montré des côtes piézométriques plus élevées au Sud qu'au Nord. D'après cette constatation, on peut dire que l'écoulement se fait du Sud vers le Nord, c'est à dire des piémonts des Djebels vers la plaine.

#### **d- Alimentation**

Le Miocène gréseux conglomératique affleure en plusieurs endroits, ce qui permet donc une bonne alimentation (recharge) par infiltration des eaux météoriques. D'autre part, on peut

Affirmer que la nappe Miocène est alimentée par les eaux des formations carbonatées du Crétacé inférieur (vu la direction d'écoulement des eaux souterraines, la direction des pentes et les analyses hydrochimiques de cette nappe Miocène).

### 6-2.2.2- Paramètres hydrodynamiques

Afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère Aquitanien, on a effectué un essai de pompage situé au piémont Nord du Djebel Boutaleb, à environ 5 km au Sud Ouest de la ville de Ain Azel.

Le forage F12 est situé au piémont Nord du Djebel Boutaleb à quelques cinq kilomètres au Sud-Ouest de Ain Azel (Fig. 6-4), aux coordonnées Lambert :  $x = 750,09$ ,  $y = 281,59$ .

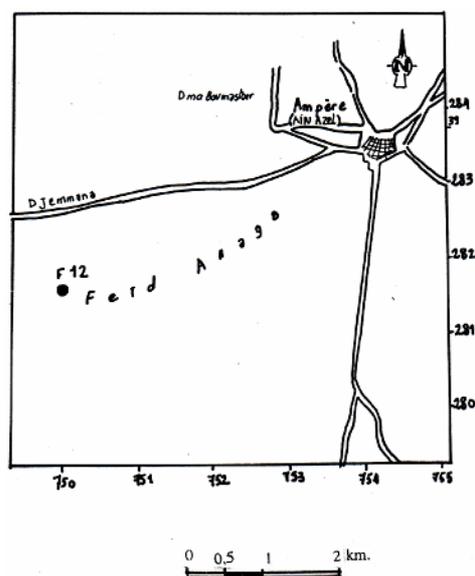


Figure 6-4 : Situation du forage F 12

On note qu'il existe 4 piézomètres F13, F14, F15 et F11 distants du point pompage d'essai respectivement de 80 mètres pour les trois premiers et 202 mètres pour le quatrième. Le niveau statique dans le forage F12 est 961,48 mètres, alors qu'il est respectivement 63,61 mètres pour le F13, 63,48 mètres pour le F14, 64,2 mètres pour le F15 et 64,43 mètres pour le F11. Trois paliers non enchaînés de longues durées ont été suivis (Tableau 6-2).

Tableau 6-2 : Durées et débits de pompage.

Paliers	Débits pompés Q (L/S)	Duré pompage (mn)	Date
1	10,00	7851	3 1 Mars 82
L	8,00	1032	06 Avril 82
3	6,00	2823	10 Avril 82

(Voir tableaux 12,13 et 14 en annexe)

### a- Transmissivité

Nous avons utilisé la méthode de Jacob en nappe captive pour l'évaluation de la transmissivité (Fig. 5-5, 5-6).

$$A=f(\log t) \text{ et } \Delta = f(\log t/t')$$

La transmissivité (T) étant donnée par la relation

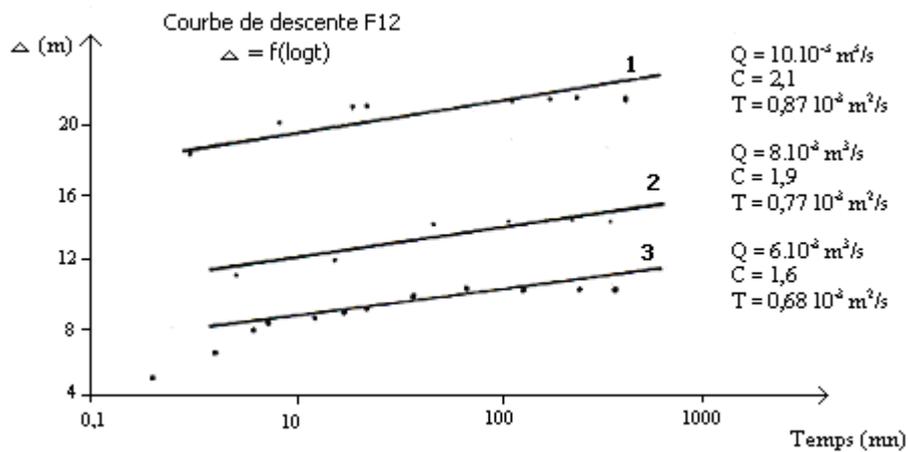
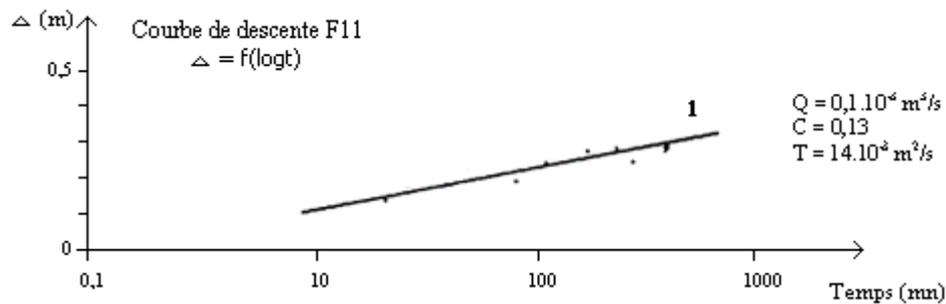
$$T=0,183Q/\Delta c$$

T : transmissivité en  $m^2/s$

Q : débit pompé en  $m^3/s$

$\Delta c$  : pentes des droites  $A = f(\log t)$  et  $\Delta = f(\log t/t')$ .

Ces paramètres ont été évalués pour un cycle logarithmique de temps où t est le temps de pompage et t' le temps depuis l'arrêt de pompage jusqu'à l'instant considéré.



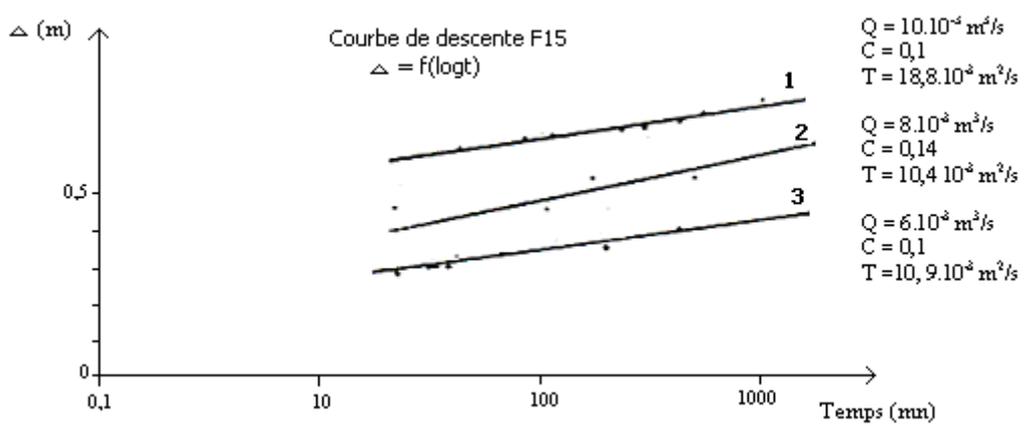
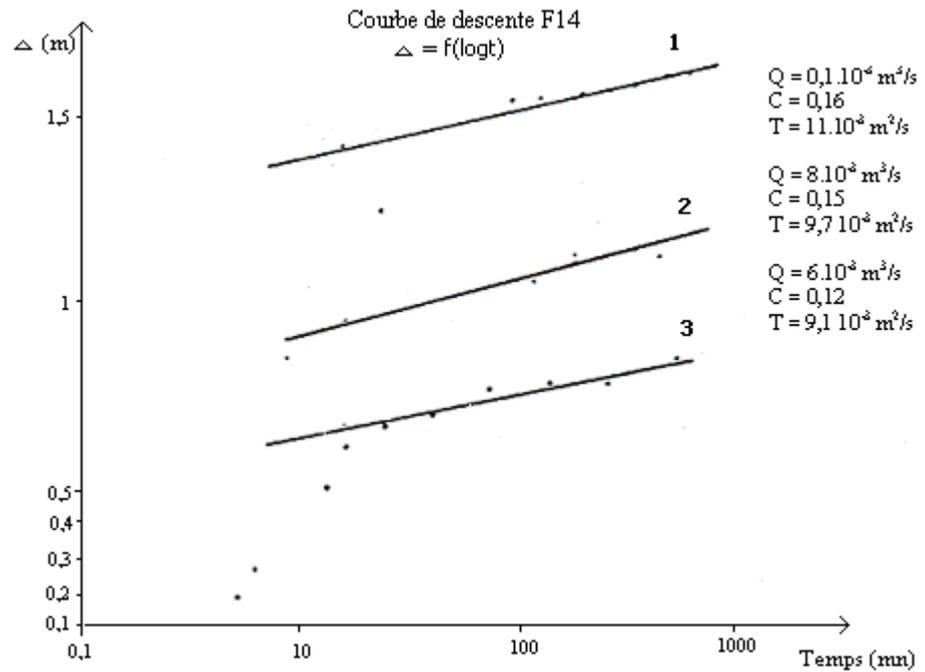
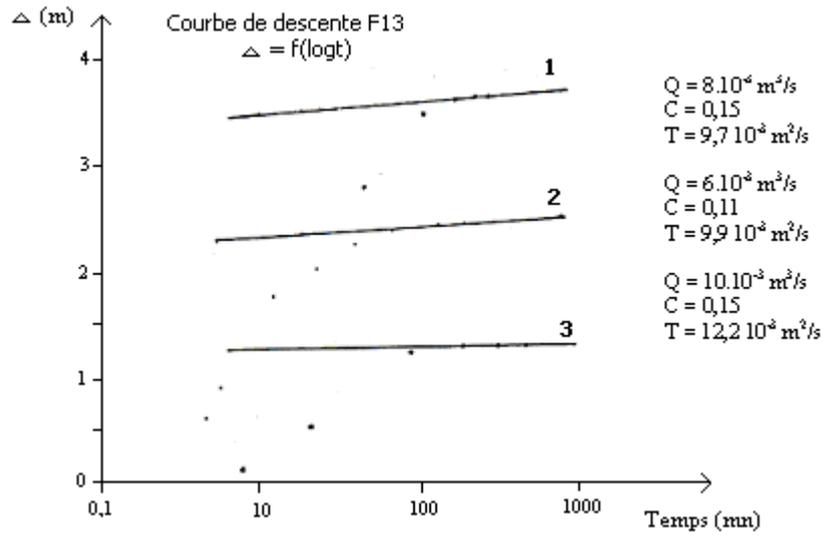


Figure 6-5 : Courbes de descente aux piézomètres F11, F12, F13, F14, F15  
 ( 1 : premier palier 2 : deuxième palier 3 : troisième palier )

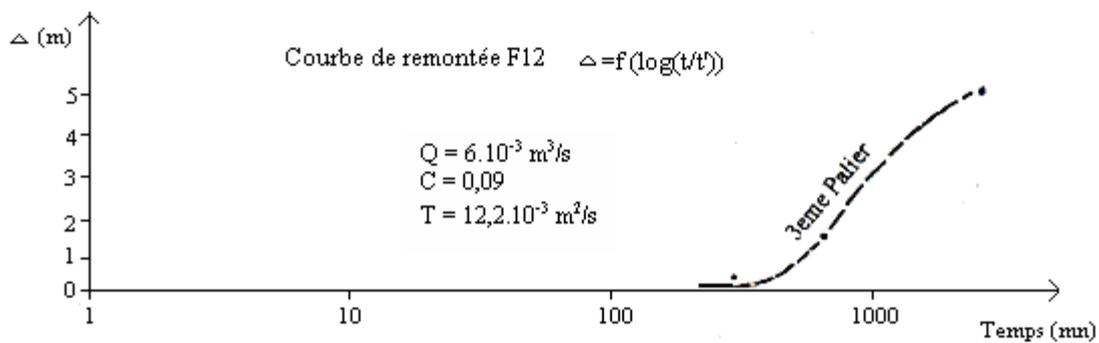
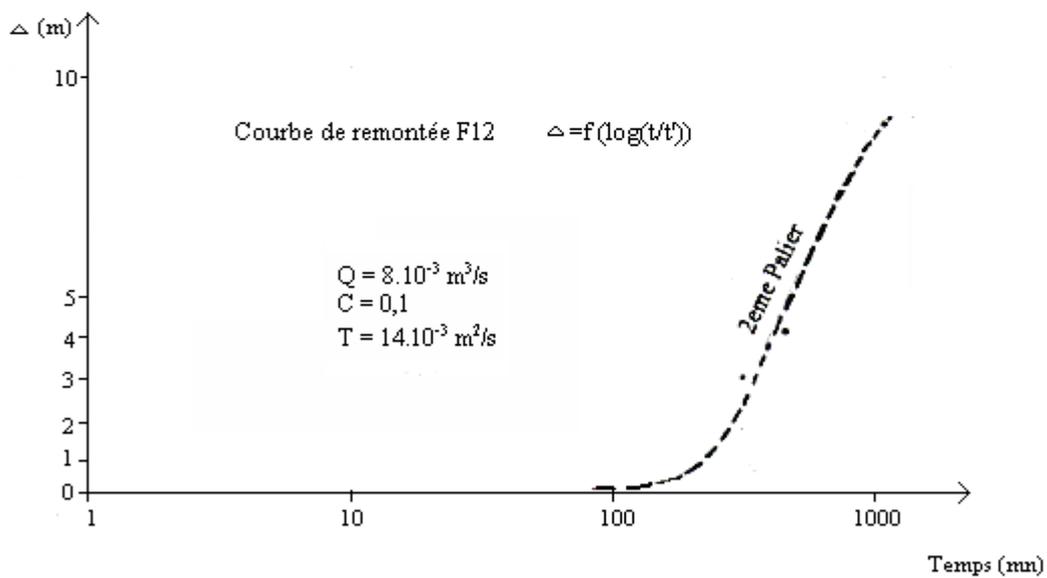
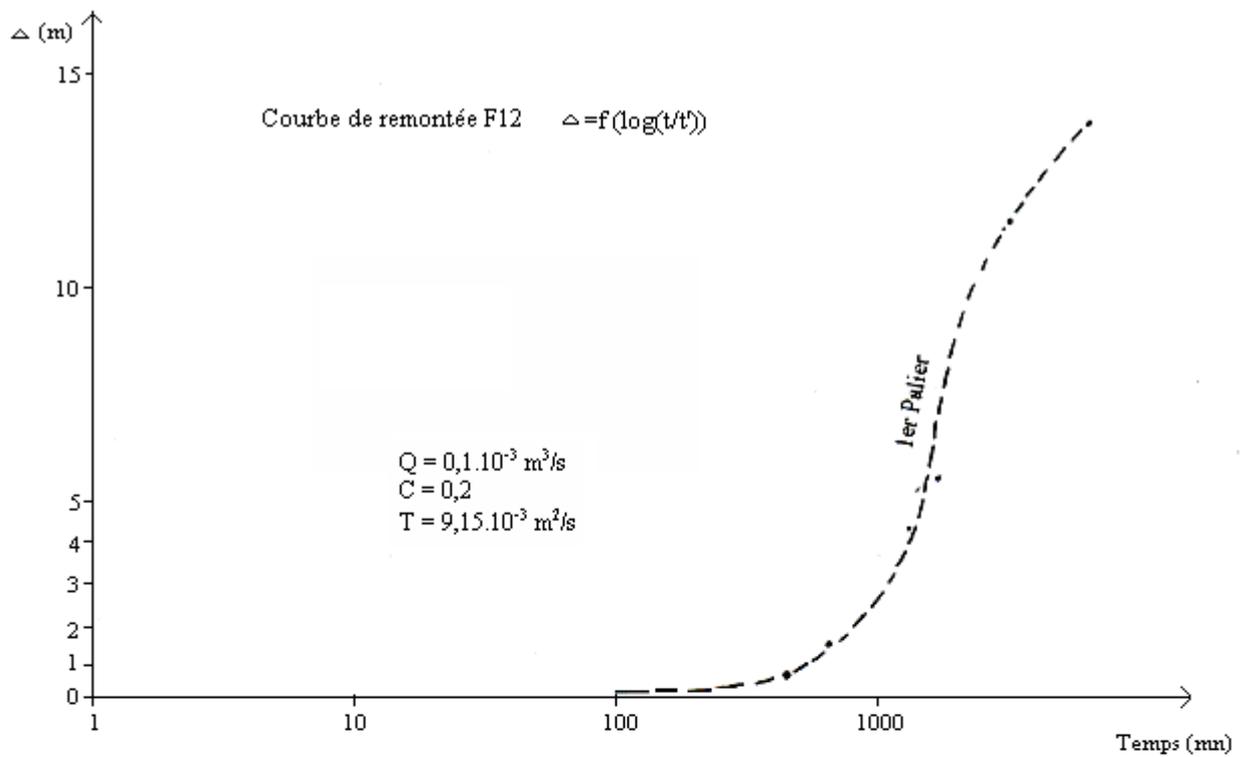


Figure 6-6 : Courbes de remontées au forage F12

Les valeurs de la transmissivité (Tableau 6-3) sont d'un même ordre de grandeur et varient de  $18,3 \cdot 10^{-3}$  à  $410^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$  à l'exception de celles enregistrées dans le forage de pompage F12 où les valeurs des transmissivités sont remarquablement faibles. La transmissivité moyenne  $T=9.55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

### **b- Coefficient d'emmagasinement**

Le coefficient d'emmagasinement, est évalué à partir de l'équation de Jacob:

$$A = 0,183 Q / T \cdot \text{Log } 2,25 Tt/r^2 \cdot S$$

r : rabattement en mètres

Q : débit pompé en  $\text{m}^3 / \text{s}$

T : Transmissivité en  $\text{m}^2/\text{s}$

t : temps de pompage en secondes

r : distance entre le forage de pompage et le lieu où est mesuré

Le rabattement en mètres. S : coefficient d'emmagasinement Si  $r = R$ . le rabattement sera nul et on pourra écrire ;

$$\Delta = 0 \quad \text{d'ou} \quad S = 2,25Tt/R^2$$

Le rayon d'action R est estimé à partir du graphe  $R = f(\log r)$ , ce graphe a été tracé à partir des rabattements observés pour le troisième palier dont les piézomètres 11 et 13 situés respectivement à 80 et 202 mètres du forage de pompage F12. Le rayon d'action ainsi défini est :  $R=210\text{m}$  (Fig5-7).

En appliquant la formule citée précédemment avec :

$$T = 9,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$R = 210\text{m}$$

$$t = 651 \text{ mn}$$

On obtient un coefficient d'emmagasinement

$$S = 1.9 \cdot 10^{-4}$$

### **6-2.2.3- Discussion**

D'après les résultats des différents forages exécutés dans la région de Ain Azel. On peut conclure que l'aquifère Aquitanien supporte une nappe en charge avec une circulation de fissures. Le mur correspond aux marnes du Sénonien et Cénomaniens et le toit aux marnes et argiles du Miocène moyen.

Tableau 6-3 : Transmissivité de l'aquifère Miocène

	Courbe de remontée															Courbe Descente		
N°	forage de pompage F12			F11			F15			F14			F13			F12		
Palier	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Q l/s	10	8	6		10		10	8	6	10	8	6	10	8	6	10	8	6
T10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s	0,87	0,77	0,68		0,1		18,3	10,4	10,9	11	9,7	9,1	12	9,7	9,9	9,15	14	12,2

L'alimentation de cet aquifère se fait par infiltration directe des eaux météoriques et par les eaux des massifs karstiques qui le bordent.

D'après les résultats des différents forages exécutés dans la région de Ain Azel, on peut conclure que l'aquifère Aquitaniens supporte une nappe en charge avec une circulation de fissures. Le mur correspond aux marnes du Sénonien et Cénomaniens et le toit aux marnes et argiles du Miocène moyen.

L'alimentation de cet aquifère se fait par infiltration directe des eaux météoriques et par les eaux des massifs karstiques qui le bordent.

### **6-2.3- Aquifère des calcaires et dolomies du Barrémo-Aptien-Cénomaniens**

L'épaisseur et les caractéristiques lithologiques de cet aquifère varient selon les endroits. Aux Djebels Brao et Youssef, le caractère lithologique dominant est le calcaire et l'épaisseur atteint 100 mètres.

Alors qu'aux Djebels Zdimm, Kalaoun et Sekrine. Cette épaisseur varie de 400 à 800 mètres, la recharge se fait par précipitation directe vu la grande extension de son aire.

### **6-2.4- Aquifère des dolomies et calcaires du Jurassique**

Le recouvrement Mio-Plio-Quaternaire met en charge cet aquifère dont l'épaisseur est de près de 400 mètres de dolomies noires. Il affleure aux Djebels Brao, Tnoutit, Youssef el Kalaoun.

Au sud de la zone d'étude c'est à dire dans la région d'Ain Azel, les affleurements dispersés du Jurassique comportent au point de vue lithologique une alternance de calcaires et dolomies.

La recharge de cet aquifère se fait par impluvium direct alors que la décharge se traduit par des pertes verticales vers les formations sous-jacentes et horizontales par des sources vers les formations aquifères du Mio-Plio-Quaternaire,

D'après l'étude géophysique de la C.G.G, la proximité des formations de faible résistivité attribuées au Trias constitue une barrière hydraulique.

#### **6-2.4.1- Essais de pompage**

Afin de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère profond plusieurs essais de pompage ont été exécutés (Tableaux 6-4 et 6-5 ; Figs. 6-8 à 6-11).

Tableau 6-4 : Paramètres hydrodynamiques

Forage			$Q10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$T10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	Rabattement
Fa	Courbe de descente				
	Courbe de remontée			12	1,08
Kalaoun	Palier(1)	Descente	36	29	0,22
		Remontée	36	52	0,175
	Palier(2)	Descente	50	45	0,2
		Remontée	50		
Tella(1)	Descente		11,1	13,4	
	remontée		11,1	14,3	
Tella(2)	1		6,45		6,8
	2		9,1		8,8
	3		12,2		13,9

Les données des essais de pompages sont exposées en annexe (Tableaux 15 et 21)

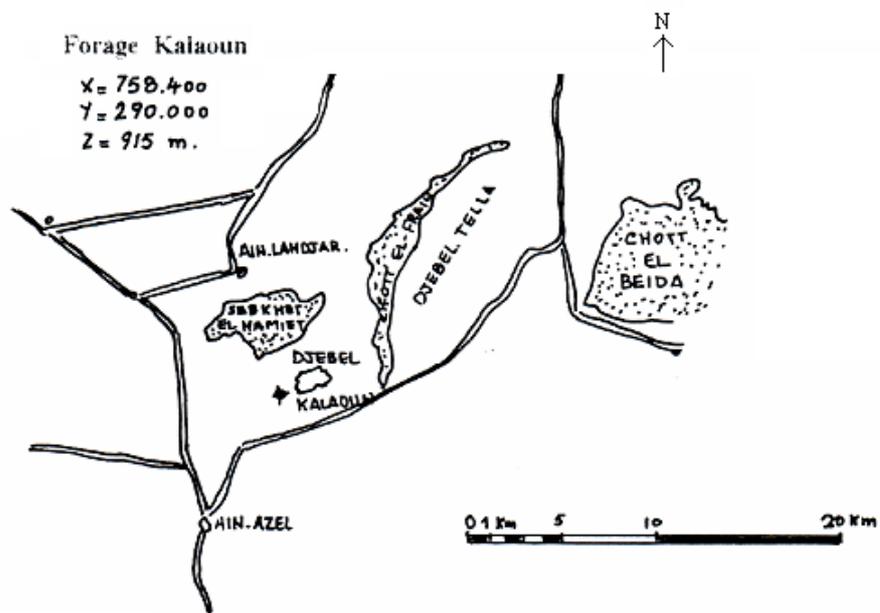
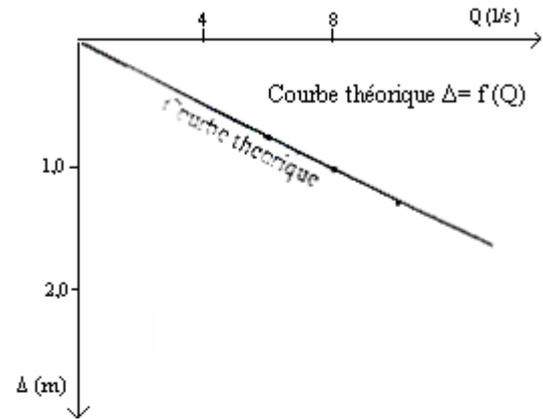
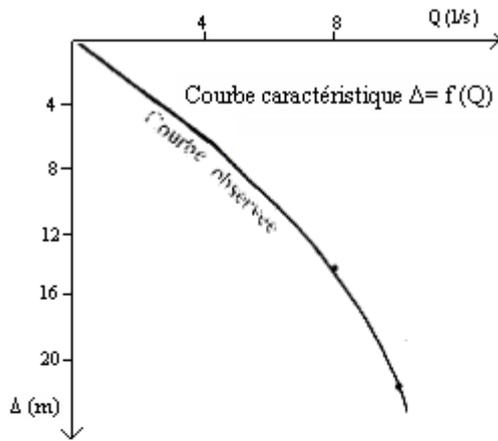


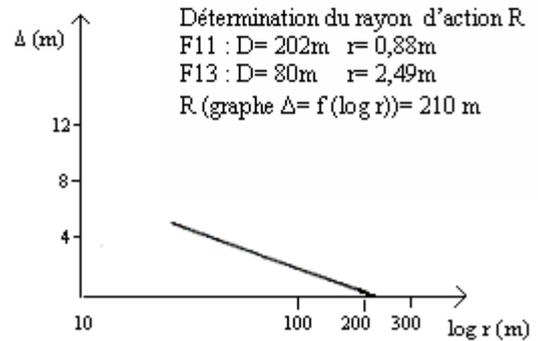
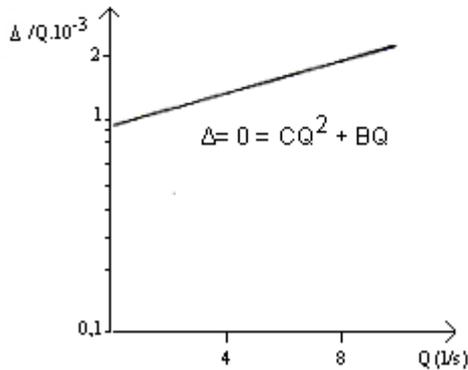
Figure 6-8 : Situation du forage Kalaoun

### Forage 12



$BQ$  : Perte de charge linéaire = Cte  
 $CQ^2$  : Perte de charge Quadratique = Cte  
 $B = 930$   
 $C = 119 \cdot 10^{-3}$   
 Estimation débit max théorique  
 $\Delta = 0 = CQ^2 + BQ$   
 $\Delta$  = Rabattement = Epaisseur aquifère  
 $\Delta = 45m$   $Q_{max \text{ th.}} = 16 \text{ l/s}$

$\Delta \text{ observée} = \Delta_{th} + \Delta_{Hp}$   
 $\Delta_{th} = (Q/52,73 \text{ t}) \log(R/r_p)$  (C.Jacob)  
 $T = \text{transmissivité} = 9,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $R = \text{rayon d'action (Cf au graphe)} = 210m$   
 $r_p = \text{rayon de l'ouvrage} = 9,3 \text{ cm}$   
 $Q = 6,8 \text{ et } 10 \text{ l/s}$  : on trouve respectivement  
 $\Delta = 0,77 ; 1,03 \text{ et } 1,28$



Détermination du rayon d'action R  
 F11 : D= 202m  $r = 0,88m$   
 F13 : D= 80m  $r = 2,49m$   
 $R$  (graphe  $\Delta = f(\log r)$ ) = 210 m

Indice de MOGG  $I = (Q/\Delta(\text{Dernier palier}) - Q/\Delta(\text{premier palier})) / (Q/\Delta(\text{moyen})) = 20\%$  ( $I > 10\%$ )  
 (D'après MOGG) Turbulence non négligeable dans L'ouvrage de captage

Figure 6-9 : Interprétation de l'essai de Puits F12

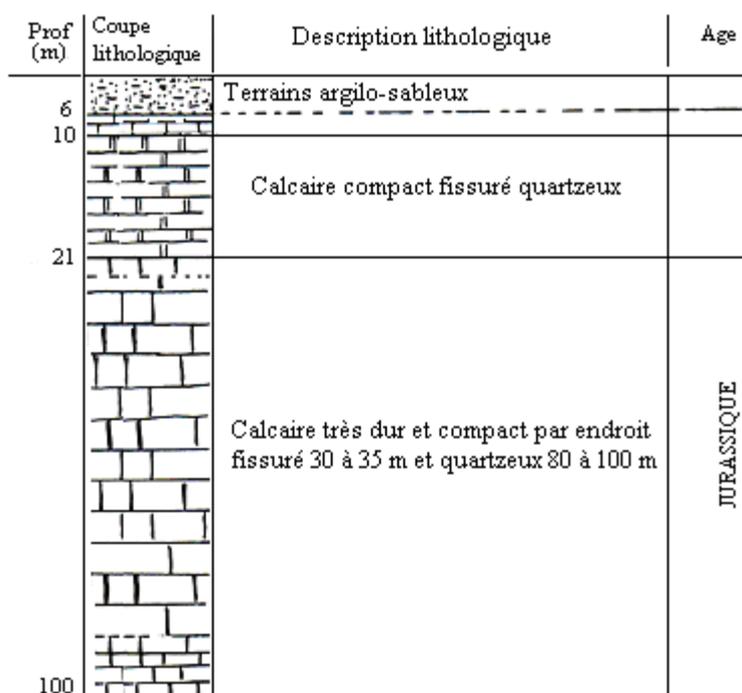


Figure 6-10 : Coupe lithostratigraphique du forage Kalaoun

Tableau 6-5 : Caractéristiques hydrodynamiques

Forage d'exploitation	Forage d'observation piézométrique	Distance au piézomètre		Q10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> /s	T10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s	Coefficient d'emmagasinement 10 <sup>-3</sup>
		Forage d'exploitation	Piézométrie			
Fr2	Fr1	103,5	2,34	60	38,71	28
EU 2B	EU 1	100	12,2	17	3,12	5,4
FR4	FR1	100	66,6	11	0,02	50

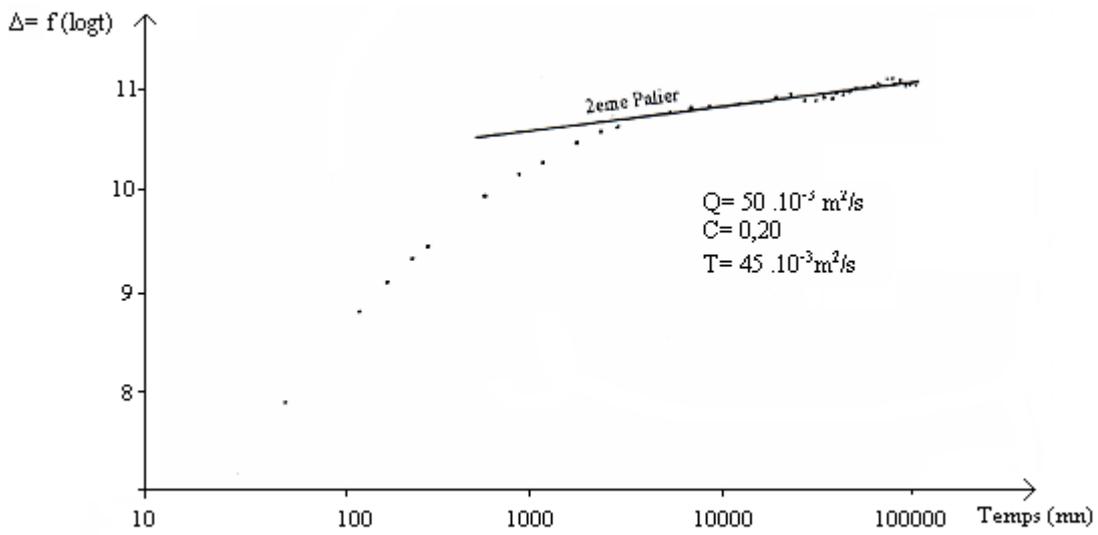
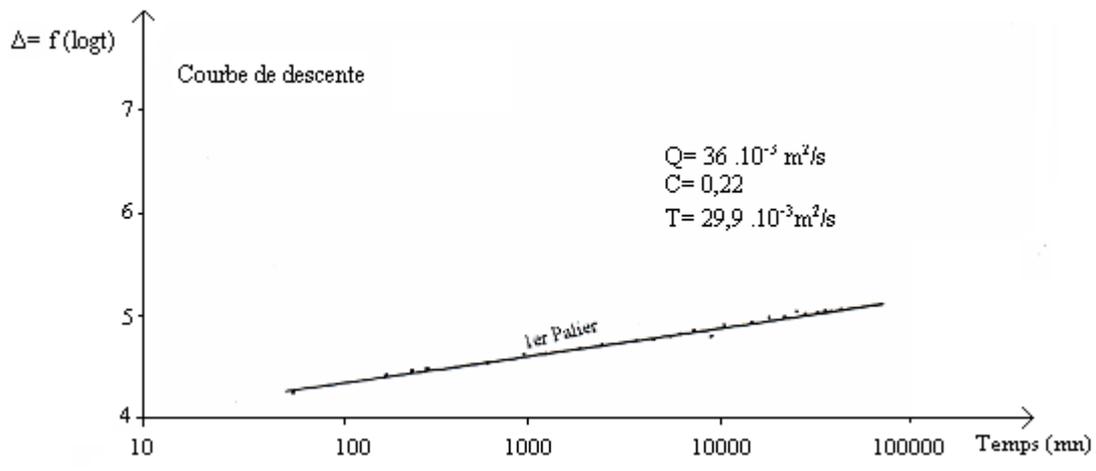


Figure 6-10 : Courbes de descente Forage Kalaoun, 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> palier

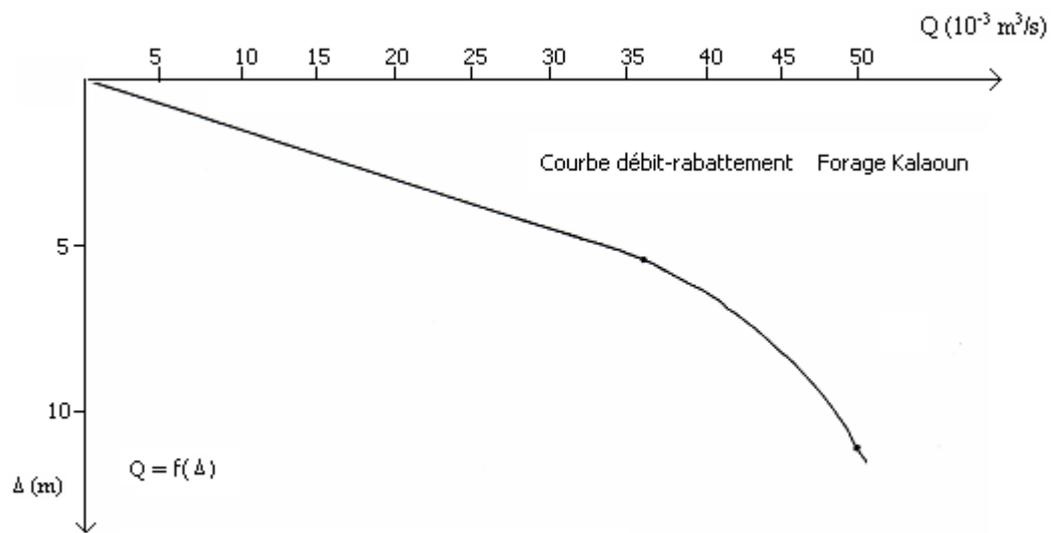
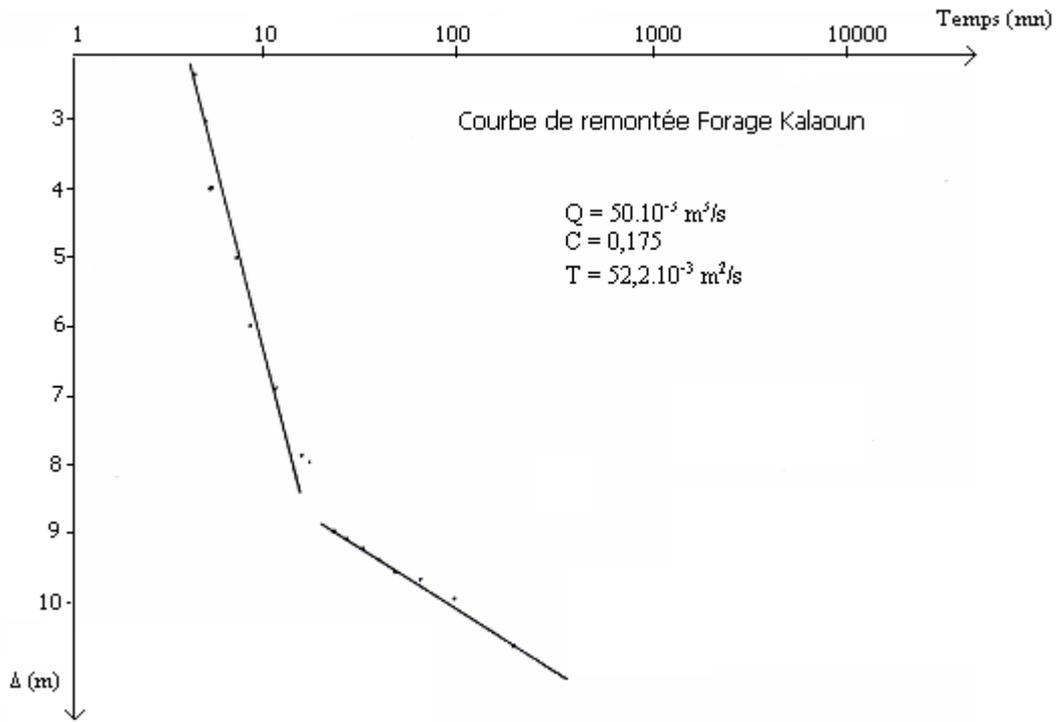


Figure 5-11 : Courbe de remontée et courbe de rabattement Forage Kalaoun

### **6-3- Conclusion**

Les sous bassins versants des lacs fermés d'El Eulma contiennent deux aquifères importants.

- Un aquifère superficiel intensément exploité pour les besoins de l'agriculture {aquifère mio-plio-quadernaire).
- Un aquifère profond dont les calcaires et les dolomies du Jurassique et du Crétacé. L'étude piézométrique et les essais de pompage ont permis de montrer que l'alimentation de l'aquifère superficiel s'effectuait par infiltration des précipitations d'une part et d'autre part par décharge des massifs entourant la plaine.

L'écoulement général se fait vers les dépressions fermées (chotts et sebkhas). La carte piézométrique traduit un écoulement général vers les dépressions fermées (chott, sebkha.), exutoires principaux de la nappe Mio-Plio-Quadernaire d'El Eulma.

Au N et au NE, l'inflexion des isopièzes suggère une alimentation de la nappe à partir des calcaires de la nappe de Djemila.

Le gradient hydraulique général est plus faible dans la partie aval (2 à 5 ‰) que dans la partie amont.

La comparaison de la piézométrie relativement récente avec celle de 1996 (Demdoum, 1996) montre une baisse importante du niveau de la surface piézométrique de près 5 mètres en moyenne. La région d'El Eulma connaît depuis 1975 un grand essor économique. Le grand développement des activités surtout commerciales et agricoles a induit une croissance continue des besoins en eau du fait de l'expansion démographique et par conséquent d'ouvrages (puits et forages).

Ainsi, la nappe superficielle du Mio-Plio-Quadernaire d'El Eulma est très sollicitée pour satisfaire ces besoins, d'où son intense exploitation, surtout à l'aval, et la dégradation concomitante de la qualité de son eau. La conséquence de cette surexploitation de l'aquifère s'est traduite par l'inversion des écoulements dans certaine région ou l'assèchement de certaines dépressions fermées (comme c'est le cas de la sebkha El Hamiet) suite une baisse généralisée du niveau piézométrique.

## Chapitre VIII

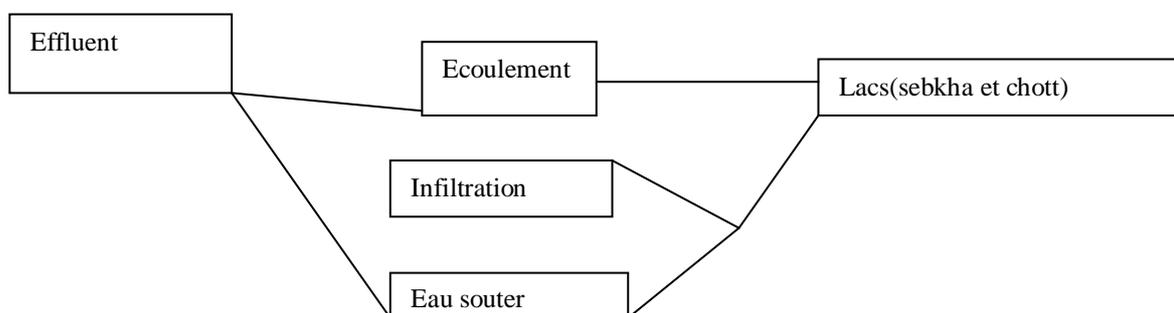
### SOURCES POTENTIELLES DE POLLUTION DES EAUX

#### 8-1- Introduction

En 1961 l'OMS a défini une eau douce : "Un cours d'eau est considéré comme étant pollué lorsque la composition ou l'état des eaux sont directement ou indirectement modifiés du fait de l'activité de l'homme."

Devant la situation précaire de la planète Terre, les préoccupations qu'entraîne la pollution dans l'environnement en général et des eaux superficielles et souterraines en particuliers, ont pris ces dernières années une ampleur considérable. La pollution des eaux compromet la santé, menace la vie et entrave l'activité industrielle.

De l'extension de jour en jour des villes afin d'absorber l'excès démographique résulte une augmentation et propagation de la pollution.



Le schéma montre le probable cheminement d'un effluent, dont la dépression fermée (Sebkha ou Chott) sera son but.

On sait que l'eau est la principale composante du protoplasme cellulaire : elle représente 66,6% du poids de l'homme et jusqu'à 90% du volume des végétaux.

On sait qu'il faut au moins 40 à 50 litres d'eau par jour et par personne sans oublier les besoins en eau pour l'agriculture, l'élevage et l'industrie.

La question de la qualité de l'eau au sein des programmes humanitaires se pose essentiellement en terme de consommation humaine et d'irrigation. La qualité d'une eau est définie par des paramètres physiques, chimiques et biologiques, mais également par son usage. Ainsi, une eau impropre à la consommation peut être adaptée à l'irrigation. La mauvaise qualité de l'eau peut être induite par des activités anthropiques ou par des

phénomènes naturels. Dans la plupart des cas, la pollution s'entend comme un dépassement aux normes, définies en fonction des usages de l'eau.

En Algérie, l'important développement industriel et l'urbanisation active qui l'a accompagné ont considérablement accrue la demande sur le besoin en eau. Ces derniers ont augmenté dans les mêmes proportions de volume. La diversité des effluents urbains et industriels très rarement traités et systématiquement rejetés dans les oueds et par là vers la mer ou vers les dépressions fermées (Sebkhas ou Chotts) comme c'est le cas dans les zones que nous avons étudiée

### **8-2- Normes et potabilité des eaux**

Les concentrations des éléments chimiques dans l'eau interviennent directement dans la qualité et la potabilité des eaux. L'O.M.S a établie des normes de potabilité en fonction de la teneur en ces éléments (Fig. 62).

### **8-3- Pollution par les eaux usées**

L'évacuation des eaux usées et des eaux de surface devient de plus en plus délicate au fur et à mesure du développement des principales villes qui rejettent leurs eaux usées dans les dépressions fermées (exemple le Sebkha de Bazer pour la ville d'El Eulma et la Sebkha d'El Hamiet pour la ville d'Ain Azel).

#### **8-3.1- Les rejets d'eaux usées domestiques :**

Une grande partie de ta population se répartie le long des oueds et sur ta plaine alluviale ; leurs eaux usées sont directement rejetées dans les oueds (sans aucun traitement) qui les véhiculent vers les dépressions fermées (Sebkha el Choit).

Pour avoir une idée sur les volumes d'eaux usées domestiques rejetées dans la sebkha de Bazer, nous avons dressé le tableau 8-1.

Il est admis admit que 80% des eaux potables consommées aboutissent dans les dépressions fermées (Sebkha et Chott).

Notez que les habitants en zones éparses utilisent des fosses septiques (non conformes aux normes) et les oueds comme exutoires à leurs eaux usées.

Alimentation en eau potable de lu ville d'El Eulma :

- Les champs comptant 17 !/s.
- Forage de Bazer 171/S
- Forage Gotali 5l/s

- Forage (Vial) 51/s

- Adduction Hammam Dehamcha 104 l/s remplace par l'adduction du barrage d'Ain Zada

(B.B.A)

- Adduction de Bir el Arch 42 l/s à 155 l/hab/h en 1990.

La dotation journalière par habitant est passée de 60 l/hab/j en 1980 à [55l/hab/j en 1990.

Tableau 8-1 : Volumes des rejets d'eaux usées.

Agglomérations	Année 1987			Horizon 2000		
	Population Mars 87	Dotation AEP m <sup>3</sup> /J	Volume rejeté M <sup>3</sup> /J	Population an 2000	Besoin 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /J	Volume rejeté 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /j
El Eulma	79350	10187	8149	1100652	33,19	26,5
Djermane	935	50	40	1360	0,2	0,16
S'mara	700	50	40	1018	0,15	0,12
Bazer Sakhra	18330	250	200	27393	4.10	3,28
ElMellah	1965	110	90	2859	0,49	0,34
Douakha	550	250	200	800	0.12	0,09
Cité Bazer	2500	250	200	3637	0,54	0,43
Lahraoula	604	50	40	879	0.13	0,10
Laouazsa	1600	50	40	2328	0.35	0,28

### 8-3.2- Rejets d'eaux usées industrielles d'El Eulma :

La zone industrielle d'El Eulma est située au sud de (a ville. Le tableau n° 64 nous donne une récapitulation des besoins en eau des grandes unités industrielles de la ville.

Tableau 8-2: Besoins en eau des unités industrielles d'El Eulma.

Unité	Désignation	Besoin en eau m <sup>3</sup> /j		
		Utile	Domestique	Total
ENAMC	Fabrication compteurs	170	70	240
ENTPL	Fabrication baguettes de soudure	—	—	800
ONAB	Fabrication aliments de bétail	—	—	—

### 8-4- Déchets solides

Les ordures ménagères constituent une autre forme de pollution. Leurs rejets

anarchiques (sans aucune étude de site) peut entraîner de nombreuses pollutions et dangers en partant atteinte à la qualité des eaux superficielles et souterraines par infiltration ; à la qualité de l'air et à l'esthétique du milieu.

Le tableau 8-3 nous donne un aperçu sur la quantité des déchets solides des villes d'El Eulma, d'Ain Azel et de l'agglomération de Bazer.

Tableau 8-3 : Les déchets solides (en tonnes).

Sous bassin	Agglomérations	Quantité (en tonnes)	
		Année 1987	Année 2000
Bazer	El Eulma Bazer	252	35 3
El Hamiet	Ain Azel	2	5

### 8-5 Qualité des eaux en vue de l'A.E.P

Les normes de potabilités les plus utilisées par les pays du Maghreb sont celles proposées par Schoëller (1937) et spécialement adaptées aux zones arides et semi--arides.

On signale que ces normes ont été adoptées par l'O.M.S en 1958 et comprennent six classes (Tableau 8-4).

Tableau 8-4 : Classification des eaux (Schoëller 1977).

N°	Classes de potabilité absolue	Na mg/l	Cl mg/l	SO4 mg/l	TH °F	R (Ca+Mg) meq/l
1	Potabilité permanente Eau bonne sans saveur particulière	115	177,5	144	25	5
2	Potabilité permanente Eau passable à saveur faiblement perceptible	230	355	188	50	10
3	Potabilité permanente Eau mauvaise à saveur peu prononcée	450	710	576	100	20
4	Potabilité permanente Eau mauvaise à saveur peu désagréable	920	1420	1 152	200	40
5	Potabilité momentanée Eau mauvaise à saveur désagréable	1840	2440	2304	400	80
6	non potable (plan d'eau salée)					

Le calcul du paramètre dureté de l'eau (déterminé par le titre hydrométrique (TH) exprimé en degré Français (°F)) a relevé que la majorité des eaux analysées ont une eau de dureté supérieure à 30°, significative d'une eau très dure dans l'ensemble de la zone étudiée.

A partir de la classification de Schoëller, on constate :

- Sur les bordures des massifs, une eau de potabilité variable entre la classe 3 et 2.
- Au centre et en allant dans le sens de l'écoulement, les eaux se présentent avec une potabilité de classe 3 jusqu'à la classe 6 non potable cas des lacs salés (Sebkha ou Chott).

### 8-6- Qualité des eaux en vue de leur utilisation agricole

Les normes de la qualité chimique de l'eau destinée à l'irrigation tiennent compte non seulement des caractères chimiques de l'eau (Salinité et nature des cations), mais également de la nature des cultures, du type de sols, du climat, des méthodes d'irrigation et des propriétés de drainage du sol.

Afin d'apprécier la valeur agricole d'une solution, en 1954 le laboratoire de salinité de Département de l'agriculture (U.S.A) a proposé un diagramme délimitant les cinq classes fondées sur la minéralisation totale et le Sodium absorbé par le sol (S.A.R).

Le S.A.R est donné par l'expression suivante :

$$S.A.R = \frac{Na^+}{\left(\sqrt{Ca^{++} + Mg^{++} / 2}\right)}$$

Où le Sodium, Calcium et Magnésium sont exprimés en meq /l.

Les résultats d'application (Fig.75) ont permis de montrer que les eaux du système aquifère se classent comme suit : SAL4-SOD2 et SAI-3-SOD1

- SAL4-SOD2 :

Eau médiocre fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessives.

- SAL3-SOD1:

Eau admissible pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés et où l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Cette classification nous a permis de constater que sous l'influence de l'augmentation de la minéralisation totale (conductivité électrique) une dégradation de la qualité de l'eau qui devient très importantes à l'aval du

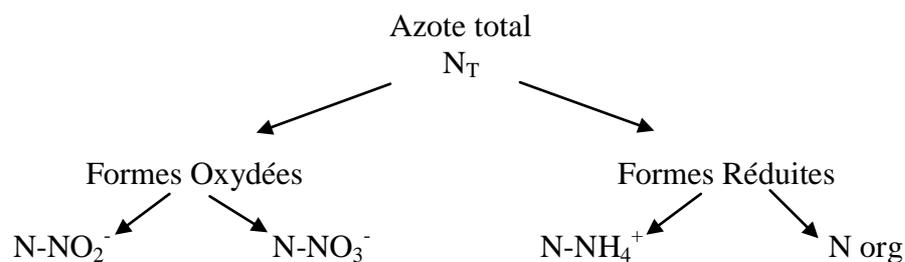
bassin où l'eau passe d'une qualité moyenne à médiocre à une eau de qualité mauvaise. Ceci s'explique par la forte teneur en sodium due au phénomène de l'évaporation.

### 8-7- Pollution par les nitrates

Dans les eaux naturelles, l'azote provient essentiellement des pluies ( $1 < c < 3$  mg/l) et du drainage des sols. La minéralisation de la matière organique présente dans le sol est réalisée par des micro-organismes. L'azote minéral ainsi produit est ensuite transformé par des bactéries aérobies en nitrates. Cette transformation, appelée nitrification, comporte deux étapes : la nitritation qui produit des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et la nitratisation qui transforme les nitrites en nitrates. Si les conditions de milieu le permettent, les nitrates seront utilisés par des bactéries anaérobies comme source d'énergie et transformés en azote gazeux. Notons que les nitrates peuvent également s'adsorber et se fixer sur les argiles et humus.

L'apport de nitrates dans le sol, puis dans les eaux, est donc fortement lié à la quantité de matières organiques présente et aux conditions de milieu. Les actions anthropiques sont donc importantes : utilisation d'engrais azotés et de lisier. De même, les rejets de stations d'épuration ou plus simplement de latrines et fosses septiques représentent un apport en matières organiques susceptibles de produire des nitrates.

Bien que peu soluble en solution aqueuse, cet élément entre dans un cycle où interviennent de nombreuses réactions d'oxydoréduction d'après le schéma suivant.



(N org : azote total présent dans les composés organiques)

### Composés de l'azote

L'azote possède en effet un domaine d'oxydation étendu (degré d'oxydation positif supérieur à +5 et degré d'oxydation négatif au maximum -3). Du fait de l'électronégativité relativement faible, les composés hydrogénés de cet élément ne possèdent pas de propriétés acides.

Comme l'azote se trouve naturellement dans les plantes, lors de la putréfaction des substances organiques une partie importante de cet élément se transforme en ammoniac qui, sous l'action des bactéries nitrifiantes présentes dans le sol, est oxydé en acide nitrique HNO<sub>3</sub>.

Ce dernier réagit avec le carbonate de calcium pour donner des nitrates :



Ces ions présentent la particularité de céder facilement leur oxygène, aussi sont-ils réduits par les bactéries dénitrifiantes, transformant les nitrates, forme d'azote assimilable par les plantes, en une forme inassimilable (gaz, N<sub>2</sub>O ou N<sub>2</sub>).

L'analyse des nitrates dans les eaux permet d'obtenir des informations sur la présence de matières organiques dans le sol. Si des analyses d'autres composés azotés sont réalisés (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub>, azote total...), il devient possible d'estimer la manière dont la matière organique est dégradée.

### 8-7.1- Teneurs tolérées

D'un point de vue sanitaire, les nitrates et nitrites ont été reconnus dangereux. En effet, les nitrates absorbés avec l'eau sont réduits en nitrites dans l'intestin et se fixent sur l'hémoglobine, diminuant ainsi le transfert d'oxygène : c'est la méthémoglobinémie qui touche plus particulièrement les nourrissons.

L'échelle de concentration en nitrate des eaux s'étend sur une large gamme. Une eau souterraine dont le milieu permet la dénitrification peut être exempte de nitrates, alors qu'une eau "polluée" par un apport important de matières organiques, d'engrais ou de rejets d'eau résiduaire peut présenter plusieurs centaines de mg/l de nitrates au-delà de la concentration maximale tolérée (Tableau 8-5).

Tableau 8-5 : Seuils de concentrations des composés de l'azote recommandés par l'OMS

Substance	[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	[NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ]	[NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]
Teneur recommandée	< 50 mg/l	< 0,10 mg/l	< 0,50 mg/l
Teneur idéale	25 mg/l	-	0,05 mg/l

### 8-7.2- Signification de la variation des nitrates dans le bassin d'El Eulma

L'analyse chimique de quelques échantillons d'eau (Tableau 7-7 chapitre 7, paragraphe 5.4), montre que presque 50% des points d'eau contiennent une concentration en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, autour de 200 mg l<sup>-1</sup>, largement supérieure à la norme.

La concentration, en ces ions, diminue en raison des teneurs considérables en sulfates, alors qu'elle augmente lorsque les teneurs en ces ions diminuent. Ces variations sont en étroite relation avec les micro-organismes du sol et de l'eau ; les coliformes totaux et les sulfato-réductrices. Ce phénomène est lié au processus d'oxydoréduction des coliformes et des bactéries sulfato-réductrices (*Desulfovibrio desulfuricans*), qui induisent une relation inverse entre la  $pO_2$  et la  $pCO_2$ . La consommation d'oxygène des nitrates par ces deux types de bactéries aboutit ainsi, non seulement à la dénitrification, mais aussi, à la réduction des sulfates en produisant du  $H_2S$ , qui pourrait être à son tour reoxydé en sulfates. Certaines espèces des bactéries sulfato-réductrices réalisent une totale dénitrification jusqu'à l'azote moléculaire, et contribuent ainsi efficacement à la destruction de la matière azotée.

La variabilité des nitrates observée dans les prélèvements d'eau est en rapport, avec les coliformes fécaux naturellement très présents, mais surtout avec les sulfato-réductrices. Ces micro-organismes des milieux salins prolifèrent à la température voisine de  $60^\circ C$ , mais certaines espèces d'entre eux s'adaptent à la température  $30^\circ C$ . Compte tenu de l'importante salinité du bassin d'El Eulma, la faible teneur ponctuelle des nitrates, porte à penser à l'activité de *Desulfovibrio desulfuricans*, (Bernoux, 2008).

### **8-8- Conclusion**

Du fait des fortes teneurs en sels minéraux de la nappe qui dépassent dans tous les cas la norme de potabilité, l'analyse bactériologique de quelques eaux de puits aurait certainement apporté des précisions sur les causes de variations des sulfates et des nitrates ; en particulier, les coliformes fécaux, notamment *Escherichia coli* (*E. Coli*). Comme la concentration en coliformes thermotolérants, est la plupart du temps, directement liée à celle d'*E. Coli*, leur utilisation comme indicateurs dans les analyses aurait fourni de précieuses indications sur les sulfato-réducteurs.

## CONCLUSION GENERALE

L'étude entreprise constitue une contribution à la connaissance des ressources en eaux (superficielles et souterraines) ainsi que des principales sources de pollution de la région du Pays des lacs.

Au point de vue morphométrique, la région étudiée se présente comme une surface plane parsemée de quelques reliefs.

- La surface planimétrée est de 1598 Km<sup>2</sup> et se compose de cinq sous bassins versants fermés : le sous bassin versant de Bazer avec une superficie de 357.13 Km<sup>2</sup>, le sous bassin de Guinguet avec 107 Km<sup>2</sup>, le sous bassin du Chott El Frain avec 126,3 Km<sup>2</sup>, le sous bassin de la Sebkha El Hamiet avec 400,2 Km<sup>2</sup> et enfin le sous bassin du Chott El Beida avec 584,76 Km<sup>2</sup>.

Tous ces sous bassins ont comme exutoire, une dépression fermée (Chott ou Sebkha) où toutes les eaux convergent.

- L'altitude moyenne des sous bassins du Pays des lacs est 980 mètres alors que l'altitude maximale correspond au sommet du Djebel Fourhal avec 1748 mètres au sud du Chott El Beida.

L'altitude la plus basse se trouve à la limite du Chott El Beida avec 871 mètres. En général la région se trouve perchée entre les altitudes 900 et 1000 mètres.

Dans l'ensemble les pentes sont faibles et dépassant rarement les 12%. Les valeurs de l'indice de compacité ont montré des formes assez ramassées favorisant la concentration des eaux de ruissellement.

La description lithostratigraphique et tectonique nous a permis de distinguer trois groupes d'unités hydrogéologiques :

- Les formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé constituant l'ossature des Djebels Brao, Tnoutit, Sekrine, Youssef, Kalaoun et Tella. (Ou ensemble allochtone sud sétifien formé d'écaillés répartis à travers toute la plaine)

Les multiples failles ont haché les massifs et ont permis un développement de la karstification en profondeur.

-La série Aquitanienne (Miocène) constitue une nappe captive avec une circulation de fissure possédant une bonne transmissivité se fait par infiltration directe de l'ordre de 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s et une épaisseur estimée à 45 mètres. La recharge de cet aquifère se fait par infiltration directe des eaux météoriques et par les eaux provenant des massifs qui les borde.

- La série Mio-Plio-Quaternaire constitue un aquifère à caractère lenticulaire occupant

les dépressions de Bazer, Ain Lahdjar, Ain Azel et de Beida Bordj.

On peut y reconnaître un ensemble marneux avec intercalation de niveaux calcaires, sablo-graveleux ou conglomératiques.

L'étude géophysique a montrée une couche superficielle (argileuse) d'une épaisseur moyenne de l'ordre 25 m et d'une résistivité de 10 à 20 Ohm-m se terminant le plus souvent en biseau.. Le mur de ces s alluvions est généralement formé d'argiles et de gypse.

Les Pays des lacs est caractérisé par un climat semi-aride et soumis essentiellement aux influences méditerranéennes se traduisant par l'alternance d'un hiver relativement froid et d'un été très chaud et sec ; avec des précipitations moyennes annuelles variant entre 325-450 mm ; La température moyenne annuelle est de 13°C le plus grande partie de la lame d'eau moyenne précipitée s'évapore soit près de 90%(.).

Les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère Mio-Plio-Quaternaire c'est à dire essentiellement la transmissivité et le coefficient d'emménagement ont pu être déterminé par des essais de pompages.

La transmissivité est faible de l'ordre de  $10^{-2}$  à  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , cela est du à un coefficient de perméabilité très faible (les niveaux étant beaucoup plus argileux que sableux).

L'étude piézométrique de la nappe Mio-Plio-Quaternaire a permis de préciser plusieurs axes de drainages convergents vers les lacs salés (Sebkha ou Chott).

La direction et le sens d'écoulement des eaux souterraines coïncident en général avec ceux des eaux superficielles. L'étude comparative de la piézométrie des deux périodes citées dans le texte a montre une baisse généralisé du niveau piézométrique de 5 à 10 m par endroit avec pour conséquences des affaissements de terrain qui ont été signalé à l'est de djebel Brao e t des inversions de l'écoulement des eaux souterraines.

- La nappe Miocène (secteur d'Ain Azel) présente des transmissivité de l'ordre de  $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ , avec une épaisseur de 45 mètres.

- La nappe profonde (calcaréo-dolomitique de Jurassique-Crétacé) possède une transmissivité variant de  $2.10^{-3}$  à  $4.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et un coefficient d'emménagement de l'ordre de 0,006 à 0,02.

A l'issue de l'étude hydrochimique nous avons pu constater que :

-Les eaux souterraines de la nappe alluviale (Mio-Plio-Quaternaire) se caractérisent par la présence de deux faciès hydrochimiques, bicarbonatés calciques magnésiens chlorurés et sulfatés calciques et magnésiens. A la bordure des lacs (Sebkha ou Chott), les eaux présentent des faciès chlorurés sodiques

- Deux facteurs essentiels lessivage et évaporation ont été mis en évidence comme mécanisme d'évolution des faciès hydrochimiques.

La corrélation graphique  $\delta^2\text{H}\text{‰}$  vs  $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ , a permis de distinguer deux familles d'eaux. La première famille appartenant au domaine des eaux de paléorecharge, indique un mélange d'eaux douces avec la sebkha par condensation en période d'étiage d'été et/ou par intrusion d'eaux saumâtres. Tandis que la deuxième famille, comprenant l'eau des forages et de la source thermale, et située près de la droite des eaux météoriques mondiales, indique une recharge d'origine météorique.

A ce jour les normes de potabilité que ce soit pour l'alimentation en eau potable (AEP) ou pour une utilisation agricole sont en général respectées.

La nappe Mio-Plio-Quaternaire (surtout au Sud d'EI Eulma et au Sud de la Sebkha d'El Hamiet) est exposée à deux sources de pollution : La pollution par les eaux usées (domestiques), les effluents industriels, et la pollution agricole (irrigation, engrais, pesticides ...etc.). La série du Miocène (Aquitanienne) présente des eaux de bonne qualité avec un faciès bicarbonaté calcique.

La nappe profonde présente en général des faciès bicarbonatés, calciques et magnésiens.

### **Stratégie de gestion des eaux souterraines dans le Pays des lacs.**

Les eaux souterraines constituent une des ressources en eau les plus importantes en Algérie, surtout dans les régions arides et sub-arides comme c'est le cas de notre zone d'étude. Elles ont fait l'objet d'une exploitation intense dans ces régions et dans de nombreux cas elles ont servi au développement économique et agricole.

L'exploitation intensive des eaux souterraines dans la région d'El Eulma a été amorcée en 1970 avec la création des grandes unités industrielles (Usine de production des Appareils de Mesures et de Contrôle AMC, Usine de production des Baguettes de Soudure de la SNS et Usine des Aliments de Bétail ONAB) et le forage illimité de puits d'extraction des eaux souterraines. Dans les sous bassins du Pays des lacs comme dans d'autres parties des régions arides et semi-arides, les deux composantes principales des eaux souterraines sont le volume renouvelable (réalimentation saisonnière des aquifères), et le volume non renouvelable (stockage de l'aquifère).

La gestion des eaux souterraines dans les sous bassins versants d'EI Eulma dépend donc de la connaissance de leur potentiel et de celle d'autres sources d'approvisionnement en eau. Elle a jusqu'à présent tenu compte non seulement des

diverses conditions physiques de l'environnement (climat, hydrologie et géologie ...) mais également des pressions socio-économiques suscitées par le développement. Par conséquent dans certaines régions (surtout les régions Sud d'El Eulma et d'Ain Azel) le volume d'eau extrait des aquifères a été supérieur à la réalimentation naturelle. On a donc assisté à des rabattements progressifs des niveaux piézométriques et à des effets auxiliaires comme l'accroissement du coût du pompage et à la migration d'eau salée (due à la présence de formations salées à faible profondeur ; voir étude géophysique). Pour pallier au problème de la mauvaise gestion des ressources hydriques nous avons cerné les recommandations suivantes :

1- Limiter l'augmentation de l'extraction.

2- Limiter le forage de nouveaux puits.

3- Importer de l'eau à partir des bassins versants (hydrographiques voisins) comme c'est le cas de la source Dehamcha (BV du Rhummel) ou le barrage d'Ain Zada (Bordj Bou Arréridj). Ces transferts permettent de combler les éventuels déficits de ressources.

4- Limiter les déversements superficiels et souterrains de déchets compte tenu des caractéristiques des systèmes d'écoulement des eaux souterraines de façon à préserver la qualité de l'eau.

- Choisir des sites (perméabilité  $10^{-6} > K \text{ (m/s)} > 10^{-9}$  d'implantation des décharges Publiques

- Installer des stations d'épuration aux sorties des différentes unités industrielles et urbaines.

5- Terminer l'inventaire des eaux souterraines et le tenir à jour. .

6- Installer de nouveaux postes pluviométriques et hydrométriques.

7- Prévoir des retenues collinaires en amont des oueds (Medjez et Djermane).

### **Gestion de la qualité des eaux dans les sous bassins versants du pays des lacs.**

Notre étude nous a permis de recenser un certain nombre de problèmes relatifs à la gestion de la qualité des eaux dans les sous bassins d'El Eulma. Nous citerons :

1- La salinisation du sol dans les régions irriguées du sous bassin versant de Bazer liée à une irrigation à long terme et à une nappe phréatique peu profonde.

2- L'élimination des effluents de la zone industrielle dans les Oueds et par là vers les Sebkhass (de Bazer pour El Eulma et d'El Hamiet pour Ain Azel) qui entraîne une modification majeure du système naturel des eaux souterraines (surtout en cas de crue) et de surface. La qualité des eaux souterraines se détériore davantage en contact des eaux de surface.

3- pour éviter la saturation de l'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) issu de l'irrigation plus particulièrement dans la zone de jardinage de Bazer (au Sud d'El Eulma) et la remontée capillaire par évaporation; il faut toujours réaliser un bon lessivage et drainage des sols.

4- A ce jour les normes de potabilité (Algériennes) ne sont pas appliquées et sont fixées par voies réglementaires. Jusqu'à présent les normes utilisées sont celles préconisées par l'OMS. Ces normes sont trop globales, or on ne peut appliquer les mêmes restrictions pour une région où l'eau est abondante et une région où cette denrée est rare.

## Résumé

Située dans le bassin versant des hauts plateaux constantinois, dans le nord-est algérien, la région d'El Eulma est caractérisée par un climat semi-aride soumis aux influences méditerranéennes avec deux saisons l'une froide et humide et l'autre chaude et sèche et une évapotranspiration réelle estimée à plus de 90% de la lame d'eau précipitée qui est de l'ordre de 300 mm par an et des formations hétérogènes essentiellement salées. Défavorisée par ces facteurs, la nappe quaternaire du bassin d'El Eulma est contaminée par les sels minéraux des évaporites des formations triasiques et plio-quaternaires, ainsi que par l'intrusion d'eaux salines de sebkhet Bazer. À ces contraintes, s'ajoute une intense sollicitation de la modeste ressource en eaux souterraines pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable. Les eaux de la nappe alors fortement minéralisées ont des faciès chimiques chloruré-sodique ou chloruré-calcique et sulfatée-magnésien. Les concentrations en ions majeurs dénotent des corrélations fortes entre les paires d'ions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) et ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). L'origine de cette minéralisation est non seulement en rapport avec l'altération des matériaux aquifères (dissolution des évaporites chlorurés du gypse et des carbonates), mais surtout, au plan d'eau salée notablement étendu (14,92 km<sup>2</sup>). Les isotopes lourds oxygène-18 et deutérium prouvent l'intrusion d'eaux salées de sebkhet Bazer dans l'aquifère. Le contenu isotopique de l'aquifère) en <sup>2</sup>H: -95,70 à -42,50 ‰ SMOW et en <sup>18</sup>O : -7 à -5,99 ‰ SMOW, confronté à la droite des eaux météoriques mondiales met en évidence deux familles d'eau.

- La première famille, regroupant la majorité des échantillons d'eau, est portée par une droite de pente 3, appartenant soit au domaine des eaux évaporées, soit à celui des eaux de paléorecharge.
- La deuxième famille composée de l'eau du forage 2 et de la source thermique 3, diffère des autres eaux par un appauvrissement en oxygène-18, en particulier l'eau du forage dont la teneur en oxygène-18 est assez proche de celle de l'eau météorique ( $\delta^{18}\text{O} = -10$ ) ‰ SMOW.

**Mots clés :** *Nappe alluviale, évaporites, salinité, intrusion d'eaux de sebkhet Bazer, El Eulma, sud-sétifien, semi-aride, intense sollicitation.*