

N° d'ordre

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Oran

Faculté des sciences de la Terre, de Géographie et d'Aménagement du territoire

Laboratoire : eau & environnement

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade de

Magister en Science de la terre

Option : Hydrogéologie

STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DE TROIS EMERGENCES KARSTIQUES DES MONTS DE TLEMCEN A PARTIR DES REPONSES HYDROLOGIQUES ET HYDROCHIMIQUES

(PERIODE DU 12/12/2005 AU 16/01/2007)

Par

Halima ABLAOU

Soutenu le

devant la commission d'examen

Mr HASSANI M.I

Maître de conférences

Université d'Oran

Président

Mr BENALI A.

Professeur

Université d'Oran

Rapporteur

Mr HAYANE S.M.

Maître de conférences

Université d'Oran

Co-Rapporteur

Mr STAMBOUL M.

Maître de conférences

Université de Laghouat

Examineur

Oran.....

*C'est avec un grand plaisir que je dédie
ce travail à mes très chers parents,
à qui je dois ma réussite,
à toute ma famille
À toutes les personnes que j'aime*

Halima

*Une quête commence toujours par la chance
Du débutant et s'achève toujours par
L'épreuve du conquérant.*

Paolo Coelho, l'Alchimiste

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, il m'est une obligation particulièrement agréable, celle de remercier tous ceux qui ont contribué à sa réalisation ou accepter de le juger.

Monsieur le **professeur BENALI Abdelmadjid** qui après avoir défini le sujet a pu au fil des jours guider mes travaux et me communiquer son expérience. Il n'a jamais épargné un effort à me faire profiter de sa grande connaissance de l'hydrogéologie. Je suis heureuse de pouvoir lui apporter ici l'expression de ma gratitude.

Monsieur **HAYANE Sidi Mohamed**, maître de conférences à l'université d'Oran pour la confiance dont il m'a gratifié en acceptant de co-diriger ce mémoire et en se préoccupant constamment de son avancement. Il a mis à ma disposition les documents nécessaires à la résolution des problèmes qui se posaient. Qu'il sache que je lui en garde une profonde reconnaissance.

Monsieur **LABAT David**, maître de conférences à l'université Paul Sabatier (Toulouse) qui m'a chaleureusement accueilli dans son laboratoire (LMTG) pour un bref séjour. Ses enseignements m'ont été très profitables pour la réalisation de mon étude. Je ne saurai lui exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à une juste valeur.

Monsieur **BAICHE Abdelkader**, chargé de cours à l'université d'Oran qui m'a toujours accompagné sur le terrain. Il m'a accordé beaucoup de son temps, ses conseils et ses critiques m'ont été fort utiles. Qu'il sache que je suis profondément sensible aux marques d'intérêt qu'il m'a apporté.

Monsieur **HASSANI Moulay Idris**, maître de conférences malgré ses nombreuses occupations a accepté de prendre connaissance de mon travail et de présider mon jury. Qu'il soit ici sincèrement remercié.

C'est avec une grande joie que je remercie Monsieur **STAMBOUL Madani**, maître de conférences à l'université de Laghouat d'avoir accepté de juger mon travail, qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Monsieur **Dif Amar** du CTS Arzew (centre des techniques spatiales) qui m'a accueilli dans son laboratoire et m'a appris à utiliser certains logiciels pour l'élaboration de mes schémas et mes cartes.

Mes sincères remerciements s'adressent plus particulièrement au personnel du secteur de l'A.N.R.H. de Tlemcen, (Messieurs zoubir, achachi, Saidi, Douzi.) et celui d'Oran (Messieurs Dakkiche, Mahi, Baghdadi, Kebdani, Sahraoui et Benabid). Ils m'ont

apporté aide et soutien et m'ont permis d'accéder à leur documentation et aidé à effectuer mes campagnes physico-chimiques et les relevés de débits.

Le personnel de l'ONM (ORAN) pour les données climatologiques.

Je profite de l'occasion pour remercier ma très chère amie Mme BOURI Djamila pour son aide précieuse dans le traitement des données physico-chimiques, je lui exprime toute mon estime.

Je n'oublie pas mes proches plus particulièrement mes sœurs (Nadia et Amina), mes frères (Abdellah et Khaled), mes tantes (surtout Zohra et Zoulikha) mes belles sœurs (Hassiba et Dalila), mon beau frère (Mohamed), mes nièces (Chérifa, Soraya, Fatima, Chahinez et Yousra), mes neveux (Mohamed Amine et Madjid) et surtout mon chère Della qui m'ont soutenu tout au long de mon travail

Il m'est agréable de remercier tous ceux que je côtoie tous les jours au travail : Osmani, Houaria, Kadda, Bakhretti, Fadéla, Houria, Samira, Hasni, Fadéla, Arbia, Lamis, Amel, Setti sans oublier mes amis : Arbia, Nezha, la famille Mehtari, Karima, sid Ahmed, Nafissa, Hadj Mohamed, Mustapha, Laïd, toute ma promo merci.....

Enfin tous ceux qui m'ont soutenu directement ou indirectement par leur amitié et leur sympathie, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Merci à tous.

SOMMAIRE

Résumé	11
Introduction	15

CHAPITRE I : LE KARST ET LA KARSTIFICATION

I- Introduction	21
II- La Karstification	21
III- Les approches du karst	22
Approche géomorphologique.....	22
Approche spéléologique.....	23
Approche hydrogéologique.....	23
a- Approche structurelle	23
b- Approche fonctionnelle	24
IV-Structure et fonctionnement des aquifères karstiques	24
Impluvium non – karstique	24
Zone d’infiltration	26
Zone noyée	26
V-Méthodes d’étude des aquifères karstiques	28

CHAPITRE II : CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL ET HYDROGEOLOGIQUE

I-Cadre géologique régional	31
1- De l’Oranie.....	31
2- Du secteur d’étude.....	31
II- Lithostratigraphie	31
• <i>Le Primaire</i>	31
• <i>Le Secondaire</i>	31
* Trias	33
* Le Lias et Le Dogger	33
* Les argiles de Saïda	33
* Les grés de Boumediene.....	33
* Les calcaires de Zarifet.....	33
* Les dolomies de Tlemcen	33
* Les calcaires de Stah.....	33
* Les marno calcaires de Raouraï.....	35
* Les calcaires du Lato	35
* Dolomies deTerny	35
* Les Marno-Calcaires d’Hariga	35
* Marno-calacires d’Ouled Mimoun	35
* <i>Le crétacé</i>	37
-Les argiles de Lamoricières.....	37
-Les grés de Berthelot.....	37
-Les calcaires de Zigyne	37

• <i>Le Tertiaire</i>	37
-L'écène.....	37
-Le miocène.....	37
* Inférieur.....	37
* Moyen (Serravallien).....	37
* Supérieur (Tortonien)	39
• <i>Le Plio-quaternaire</i>	39
III- Analyse structurale	39
Les principales phases tectoniques	39
1-phase éocène.....	39
2-Phase atlasique	41
3-Une importante phase de compression N-S avec un paroxysme miocène probable.....	41
4-Une phase à dominante distensive	41
5-Phase récente (Plio-Quaternaire)	41
Les unités structurales	41
* Zone synclinale de Terny	41
* Zone effondrée de Tlemcen.....	41
* Zone haute des Djebels Tefatisset et Aïn El Houtz.....	42
* Zone d'Er-Ramlya.....	42
IV-Propriétés hydrogéologiques des formations	42
1. Les formations à forte capacité de rétention souterraine	42
1- Les dolomies de Tlemcen	42
2- les dolomies de Terny	42
3- les grès Tortonien.....	42
4- les conglomérats du Miocène inférieur.....	42
5- les conglomérats de la pleine d'Hennaya.....	42
6- les travertins	42
2. Les formations à capacité de rétention souterraine faible à très faible	44
1- les grès de Boumediene	44
2- Marno-calcaires de Raouraï, d'Hariga et de Lamoricière.....	44
3- Grés de Merchiche	44
Conclusion	44
V- Cadre climatique	45
1. Les précipitations	46
a. Précipitations moyennes mensuelles	46
b. Précipitations saisonnières ou régime saisonnier	47
c. Précipitations moyennes annuelles	48
d. Précipitations nivales	48
2. Les températures	48
- Les minima.....	49
- Les maxima.....	49
- Température moyennes	49
Conclusion	49

CHAPITRE III : ETUDE HYDRODYNAMIQUE

I.Présentation des sources	53
1-Source de Aïn Fouara supérieure	53
2-Source de Aïn Bendou	54
3-Source de Aïn El Houtz	55
Campagnes de mesures	56
II.Traitement des données hydrométriques	57
1. Analyse des débits classés	57
Application de la méthode aux sources étudiées.....	57
2. Analyse des courbes de récessions	60
Application aux systèmes étudiés	63
• Source de Aïn fouara.....	63
• Source de Aïn Bendou	65
• Source Aïn El Houtz	66
3. Analyse corrélatoire et spectrale	69
Application aux systèmes étudiés	72
• Source Aïn Fouara.....	72
• Source Aïn Bendou	75
• Source Aïn el houtz.....	77
Conclusion	79

CHAPITRE IV : ETUDE HYDROCHIMIQUE

Introduction.....	83
Données hydrochimiques disponibles	83
a- Etude des paramètres physiques	85
a-1- La température	85
a-2- Le pH	87
a-3- Conductivité et Minéralisation	87
b- Classification des eaux des sources	89
b-1- Diagramme semi logarithmique de Schoeller-Berkaloff.....	89
b-2- Diagramme de Piper.....	89
c- Etude des éléments majeurs	93
d-Traitement statistique des données hydrochimiques	98
➤ Aïn Fouara	98
• Etude statistique	98
• Analyse en composantes principales	99
➤ Source Aïn Bendou.....	106
• Etude statistique.....	106
• Analyse en composantes principales	107
➤ Aïn El Houtz	111
• Etude statistique.....	111
• Analyse en composantes principales	111
Conclusion	115

e- Indices de saturation	115
f- Distribution des fréquences	116
g-Etude du comportement hydrochimique des sources	119
h-Contenu isotopique des sources	123
Conclusion générale	129
References bibliographiques	133
Liste des figures	135
Liste des tableaux	140
Annexes	141

Résumé

L'aquifère karstique, en raison de ces caractéristiques si particulières, est, sans conteste, l'aquifère qui présente les difficultés d'étude les plus grandes. La karstification apparaît comme un phénomène évolutif, qui conduit de l'aquifère carbonaté, uniquement fissuré, à l'aquifère karstique où existe une organisation complète des écoulements.

Les Monts de Tlemcen sont une des régions calcaires les plus arrosées de l'ouest algérien. Le contact eau – calcaire a donné naissance à un paysage ruiniforme d'un grand intérêt aquifère.

Pour comprendre le fonctionnement et la structure, de l'aquifère dolomitique, un suivi de trois émergences : Aïn Fouara, Aïn Bendou et Aïn El Houtz a été réalisé pour déterminer son comportement hydrodynamique et hydrogéochimique.

Mots Clés : *Aquifères karstiques – Karstification – Hydrodynamique – Hydrochimie - Monts de Tlemcen – Aïn Fouara - Aïn Bendou – Aïn El Houtz–*

Abstract

Karstic aquifer, owing to his particular characteristics, is without questions the aquifer which presents utmost difficulties of study. The karstification appears as evolutive phenomena, which conduct from the carbonate aquifer solely fissure to karstic aquifer where exists omplet organization of ecoulements.

The Mountains of Tlemcen are among the more watering limestone region of West Algeria.

The contact between water and limestone has given birth to ruiniform landscape and a karstic interest. For understanding the fonctionnement and the structure of the dolomitic aquifer, a following of three karstic springs: Aïn Fouara, Aïn Bendou and Aïn El Hout has been achieve in order to determinate its hydrodynamic comporment and hydrogeochemistry..

Keywords: *Karstic aquifer - Karstification - Tlemcen mountains - Hydrodynamic – hydrochemistry - Aïn Fouara - Aïn Bendou - Aïn El Houtz*

Introduction

C'est sans doute un truisme de rappeler que toute étude scientifique *début*e par l'observation des faits et soumet ses résultats à la *confrontation* à ces mêmes faits. C'est un autre truisme de dire que la théorie qui fonde la production de ces résultats est astreinte par le principe de *parcimonie* des hypothèses. L'étude hydrogéologique du karst en est une illustration : elle puise ces faits de l'observation directe des réseaux souterrains et d'observations locales effectuées à la faveur des points d'eaux dont elle rend compte dans le cadre d'un modèle conceptuel. L'ensemble de ces faits a ainsi permis de :

- fonder la connaissance du milieu karstique sur un modèle conceptuel avec deux pôles extrêmes de structure et de fonctionnement allant du pôle *aquifère carbonaté fissuré* au pôle *aquifère karstique pur* et du pôle *diffusive flow* au pôle *conduit flow*.
- développer deux approches pour en aborder l'étude et la validation:
 1. une *approche fonctionnelle* adossée à la notion de système (Mangin, 1975) et fondée sur une représentation globale de l'aquifère
 2. une *approche structurelle-déterministe* (Drogue, 1971, Kiraly, 1978) qui fait le pari de reproduire le comportement hydrodynamique de ces aquifères en résolvant les équations de l'écoulement dans un domaine dont la structure est l'objet d'hypothèses.

Dans le cadre de ce travail, c'est la première approche qui est privilégiée.

L'inférence de la structure et du fonctionnement de l'aquifère karstique est réalisée à partir de l'analyse de ce qu'il est convenu d'appeler les signaux hydrologiques et chimiques, au sens de *l'analyse des systèmes*.

On sait en effet, depuis les travaux de Mangin (1980), que les aquifères karstiques peuvent être perçus comme des systèmes physiques qui modulent un signal d'entrée, les *pluies*, pour produire *un signal de sortie*, en l'espèce *l'hydrogramme* des sources. La *réponse impulsionnelle* du système correspond à ce que les hydrologues appellent *hydrogramme unitaire*. Ce signal de sortie, vue comme produit de convolution du signal d'entrée renseigne sur la structure et le fonctionnement du système. Mais l'eau de ces aquifères est aussi « *un précieux informateur hydrogéologique* » (Bakalowicz, 1980) et sa caractérisation est un outil performant pour « *différencier une masse d'eau particulière en permettant d'identifier son origine ou de repérer son évolution* » (Molinari, 1969). C'est dire que l'entrée d'un tel signal est toute entière contenue dans l'expression de la composition chimique de l'eau de pluie de même que la sortie est résumée par le chimiogramme de l'eau de l'exutoire.

On dispose donc avec ces deux types de signaux de moyens d'investigation *complémentaires* pour appréhender la *structure* et le *fonctionnement* de ces aquifères. La méthodologie à mettre en œuvre est maintenant abondamment décrite et illustrée dans la littérature (Marsaud, 1996, Plagnes 1997, Labat, 2000)

Pour les signaux hydrologiques, elle porte sur :

- la décomposition d'une *partie* des hydrogrammes des sources par différents modèles pour représenter le tarissement ou la décrue
- l'analyse de l'*intégralité* des hydrogrammes à l'aide d'un éventail de méthodes de plus en plus large : analyses corrélatoires et spectrales, analyses en ondelettes, analyses fractales, analyses des attracteurs, ...
- l'évaluation de l'opérateur de transfert, en l'espèce l'hydrogramme unitaire.

Pour les signaux chimiques, la variabilité de la concentration des éléments chimiques en solution est fonction de facteurs endogènes et exogènes qui constituent autant de *données multidimensionnelles* dont l'analyse factorielle explore la structure des corrélations spatiales pour en donner une représentation en fonction des facteurs les plus pertinents.

La puissance de ces outils ne doit cependant pas masquer leur inanité en l'absence de données de qualité, disponibles en quantité, non plus à la faveur d'épisodiques campagnes de collectes, mais enregistrées quasiment en continu.

Dans le cadre de ce travail, nous avons expérimenté cette méthodologie pour explorer la structure et le fonctionnement de trois émergences qui drainent le système karstique des dolomies du kimméridgien moyen- kimméridgien supérieur de la région de Tlemcen dont on peut, par ailleurs, attester des variations de son niveau de base par les éléments géomorphologiques de sa partie *non fonctionnelle*. On ne manquera pas d'apprécier la consistance des résultats obtenus grâce à cette méthodologie avec ceux de l'analyse du contenu isotopique des eaux (Azzaz et al., 2008).

Les émergences dont il est question sont captées pour assurer l'alimentation en eau par une méthode traditionnelle d'exploitation gravitaire d'une partie ou de la totalité du débit naturel des sources faute de disposer d'informations sur les éventuelles réserves sous les niveaux d'exhaure du système.

Cette étude est une contribution dédiée à cette fin.

La première partie de ce travail présente des considérations générales sur le karst et la karstification puis décrit les grands traits de la géologie des Monts de Tlemcen du point de vue lithostratigraphique et structurale pour rendre compte de la manière dont le karst les *utilise* pour structurer le drainage des formations géologiques aquifères par les émergences de Ain Fouara, Ain El Hout et Ain Bendou.

L'étude climatologique qui s'en suit rend compte du contexte hydroclimatique et environnementale actuelle pour produire les éléments de la chronique du signal-pluie en le mettant en perspective par rapport aux caractéristiques de l'échantillon des chroniques des précipitations de la période 1990-2004.

La troisième partie porte sur l'application des différentes méthodes hydrodynamiques pour traiter l'hydrogramme des débits puis les chroniques des pluies et des débits prélevés durant la période du cycle d'échantillonnage.

L'analyse multidimensionnelle du tableau des données des variables chimiques fournit le complément d'information sur les modalités de transfert dans le système karstique des dolomies de Tlemcen.

Le travail se clôt par une conclusion générale qui dresse une synthèse des résultats obtenus sur la base des données du cycle hydrologique 2006-2007.

Le Karst et la karstification

I- Introduction

Plusieurs auteurs ont déjà essayé de définir le terme karst. Gèze (1973) en donne la définition suivante : « région constituée par des roches carbonatées, compactes et solubles, dans lesquelles apparaissent des formes superficielles et souterraines caractéristiques. »

Le mot « karst » correspond à la traduction allemande du terme slovène « kras » qui désignait la région comprise entre le golfe de Trieste, la vallée de Vipava, et de Rosa et le secteur de la Recka (G. Bignot, 1972).

A l'heure actuelle le mot karst sert à désigner, tout ensemble de roches carbonatées caractérisées par l'absence pratiquement totale de cours d'eau de surface et une grande circulation dans le sous sol.

II- La karstification

La karstification est un processus d'érosion physico-chimique que subissent les formations carbonatées pour élargir les vides originels et donner aux formations carbonatées une porosité pouvant atteindre 15% à l'échelle du massif.

La karstification est liée en grande partie à la capacité des roches calcaires, et plus précisément des minéraux qui les composent (calcite, aragonite, dolomite) à être soluble dans l'eau. (Marsaud, 1996)

La solubilité d'un minéral est exprimée par sa constante de dissociation. Plus cette constante est forte, plus la solubilité du minéral est grande. Dans les conditions normales de température et de pression (25° C, 1 atm.), la solubilité dans l'eau pure des principaux minéraux constitutifs des roches carbonatées est récapitulée au tableau 1.

Minéral	Composition	Constante de dissolution
Calcite	CaCO ₃ (Rhomboédrique)	3.8. 10 ⁻⁹
Aragonite	CaCO ₃ (Orthorhombique)	6.09. 10 ⁻⁹
Magnésite	MgCO ₃	5.75. 10 ⁻⁹
Dolomite	Ca, Mg (CO ₃) ₂	Environ 10 ⁻¹⁷

Tableau 1 : Constantes de dissociation des principaux minéraux des roches carbonatées (Bakalowicz, 1979).

Pour tous les minéraux cités dans ce tableau, on observe que leur solubilité dans l'eau pure est faible. Il faut invoquer l'action d'un paramètre supplémentaire pour expliquer l'action dissolvante des eaux en domaine karstique. Ce paramètre est l'anhydrite carbonique (CO₂). La teneur en CO₂ dissous dans l'eau accroît considérablement les possibilités de dissolution.

La conséquence directe de ce processus de karstification est l'établissement d'un paysage particulier associé à une morphologie souterraine spécifique. La durée nécessaire à la mise en place de ces éléments est de 10000 à 20000 ans (Bakalowicz, 1979). Parmi ces formes, on distingue :

- les formes de surface ou *exokarst* dont les principales sont les dolines, les lapiazs, les ouvalas et les poljés;

- les formes souterraines constituant l'*endokarst* sont les gouffres et les conduits karstiques.

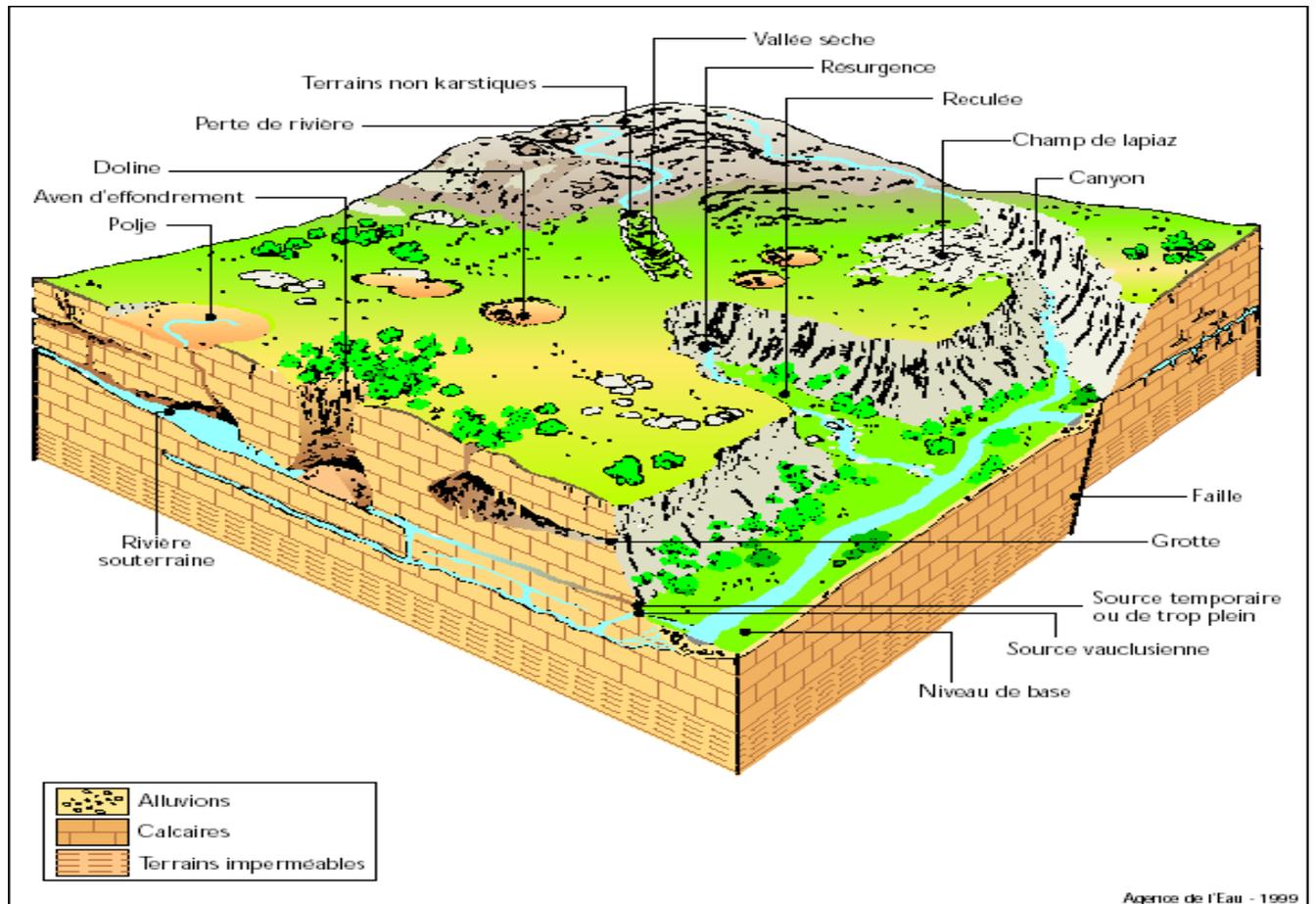


Figure 1: Formes karstiques de surface et de profondeur (Bakalowicz, 1999).

III- Les approches du karst

Approche géomorphologique

Cette approche considère que la formation et l'évolution du karst est liée aux paramètres géographiques (climat, latitude) et morphologiques.

Pour cela deux grandes théories ont été adaptées :

- Pour les Anglo-Saxons (Davis, 1931), la karstification est un processus d'érosion mécanique comme pour les réseaux de surface.

- Pour les Français (Corbel., 1957), ils donnent naissance à une théorie climatique de la karstification. La température est une variable contrôlant l'intensité et la vitesse du processus.

Ces deux visions sont fortement remises en cause, et restent très éloignées des objectifs de l'hydrogéologue.

Approche spéléologique :

Cette approche se base sur le fait, que l'homme peut accéder directement en certains points de l'aquifère. Il en résulte que les observateurs définirent le karst en fonction de ce qu'ils voyaient à l'intérieur des cavernes, situant ainsi uniquement l'eau sous forme de lacs et de rivières souterraines. Dès lors, les écoulements karstiques représentent le prolongement souterrain des écoulements de surface (Marsaud, 1996).

Cette vision n'est pas satisfaisante pour décrire le milieu karstique, car les observations ponctuelles faites au niveau des cavités souterraines, sont généralisées à l'ensemble de l'aquifère. Cependant, les observations spéléologiques peuvent fournir de bonnes informations sur la karstification, lorsqu'elles sont replacées dans un contexte hydrogéologique.

Approche hydrogéologique

a. Approche structurelle

L'aquifère karstique a tout d'abord été présenté comme le prolongement d'un aquifère fissuré dans le cadre d'une approche basée sur la structure de l'aquifère, d'où son nom d'approche structurelle. Elle a été développée par les écoles montpelliéraines (USTL) et neuchâteloise (CHYN). Un modèle schématique représentant l'aquifère karstique a été fourni par Drogue en 1969 et précisé en 1971 (Fig. 2).

Le karst est assimilé à un aquifère constitué de blocs fissurés séparés par des chenaux assurant le drainage de l'ensemble. Le fonctionnement de l'aquifère est expliqué par les différences de perméabilité existant entre les deux types de structure. En période de hautes eaux, le réseau de chenaux alimente les blocs capacitifs. En période de basses eaux, les blocs alimentent le réseau de drainage et il y a inversion du sens d'écoulement. Le développement de cette approche s'explique par la continuité qu'elle suppose entre les milieux fissurés et karstifiés, le passage de l'un à l'autre s'effectuant par des variations de paramètres (Marsaud, 1996).

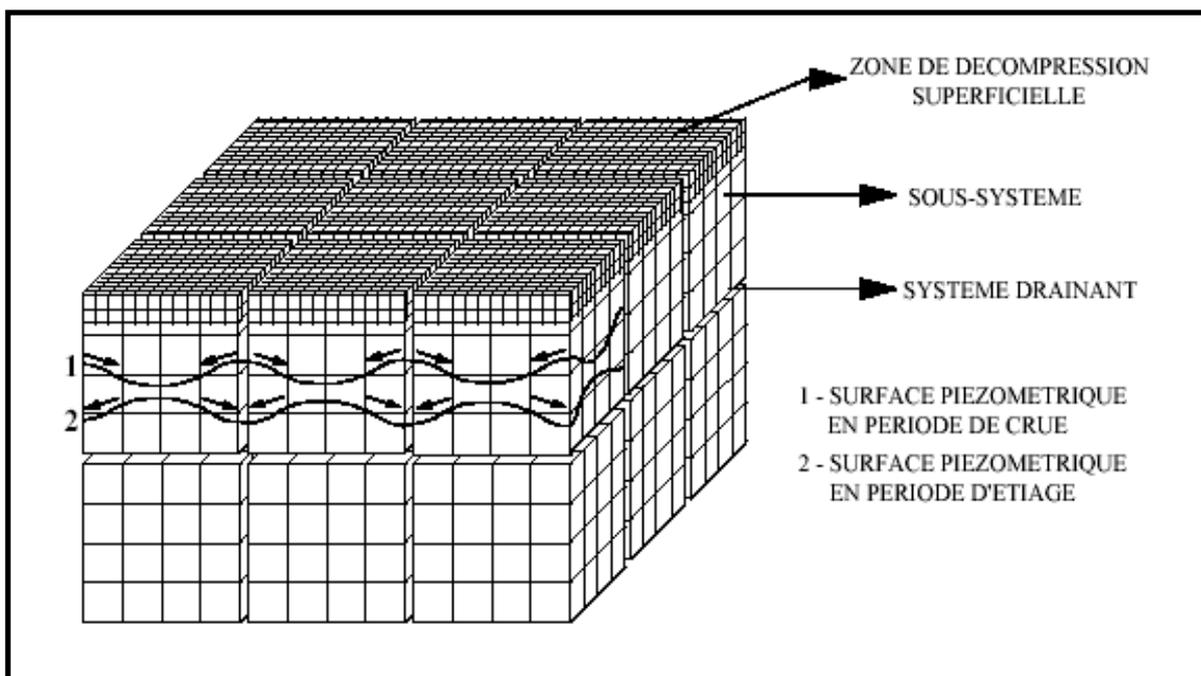


Figure 2 : Schématisation d'un système karstique (C.Drogue, 1971).

b- Approche fonctionnelle

Cette approche a été proposée par Mangin en 1975 et développée au Laboratoire Souterrain du CNRS (Moulis). Dans celle-ci la définition et la compréhension du karst découlent de l'analyse du fonctionnement de l'aquifère, d'où son nom d'approche fonctionnelle.

L'approche fonctionnelle de l'aquifère part du principe que la structure de l'aquifère ne peut être connue a priori, c'est pourquoi le système karstique est entièrement défini à partir de son fonctionnement. Ce n'est que dans une phase ultérieure que le fonctionnement est interprété en terme de structure, conduisant à une classification des systèmes karstiques (Plagnes, 1997).

IV-Structure et fonctionnement des aquifères karstiques

Mangin (1975) a proposé la notion de système karstique qui est défini "(...) comme l'ensemble au niveau duquel les écoulements de type karstique constituent une **unité** de drainage." et qui englobe les terrains non-karstiques. La figure 3, illustre la conception du système karstique selon Mangin.

➤ **Impluvium non – karstique**

Son rôle est de concentrer l'énergie disponible en un point, ce qui accélère et augmente le développement d'une structure de drainage. Deux types de karst peuvent se différencier suivant la nature de l'impluvium et de la position du drain principal :

Selon la nature de l'impluvium, on distingue :

- ✓ Karsts unaires dont tous les terrains de l'impluvium sont karstiques
- ✓ Karsts binaires qui possèdent des terrains non karstiques imperméables, dans leur bassin d'alimentation.

Une illustration en est donnée dans la figure 4.

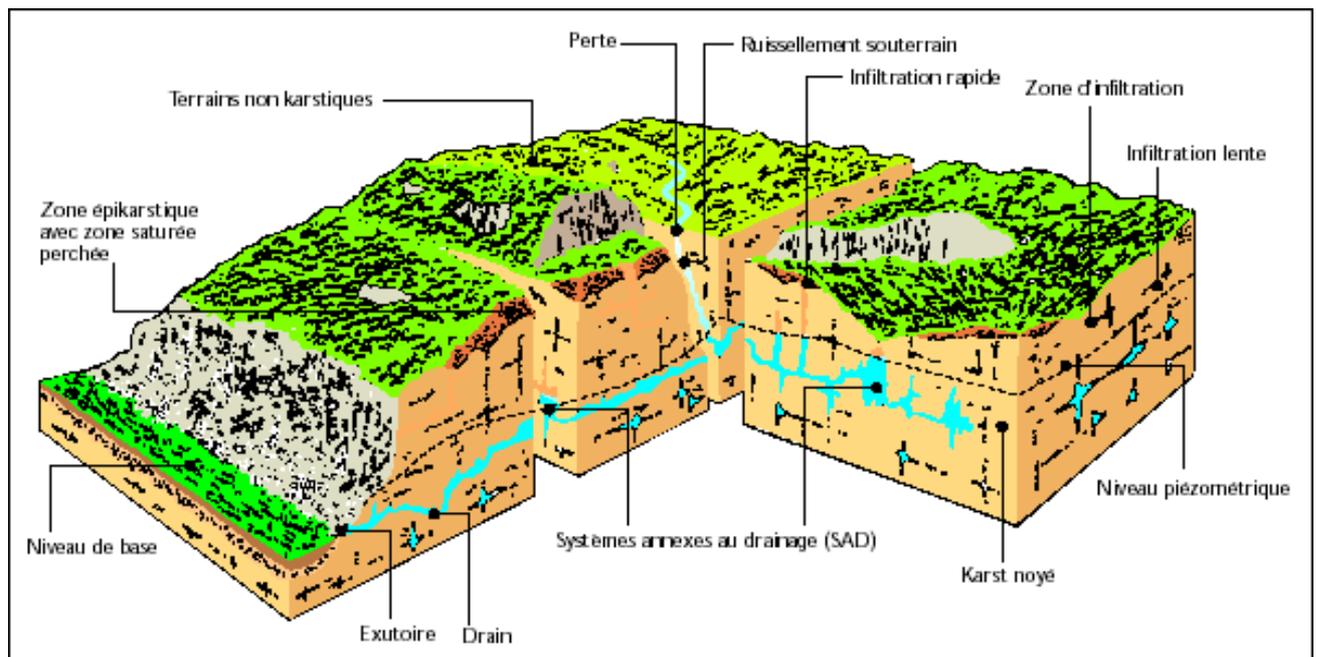


Figure 3: Représentation du système karstique par Mangin, 1975

Selon ce modèle proposé, le système karstique est structuré en plusieurs sous systèmes :

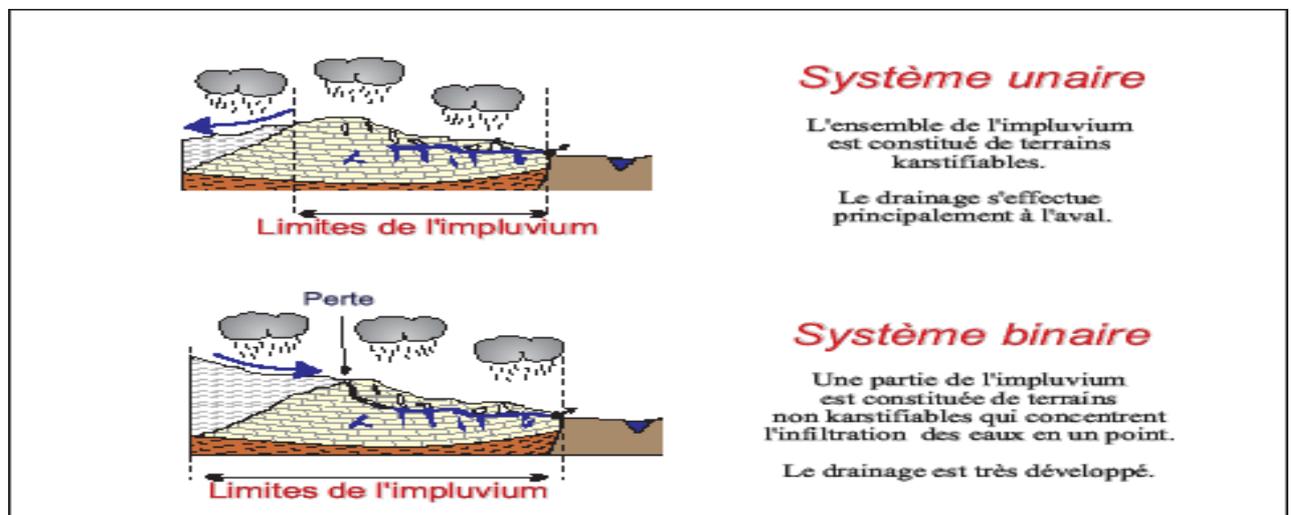


Figure 4: karst unaire et binaire (Marsaud 1996)

Selon la position du drain principal, on distingue les :

- ✓ Karsts vauclusiens où la karstification se développe en profondeur sous le niveau de l'exutoire.
- ✓ Karsts jurassiens où le réseau de drainage s'organise à proximité de l'exutoire.

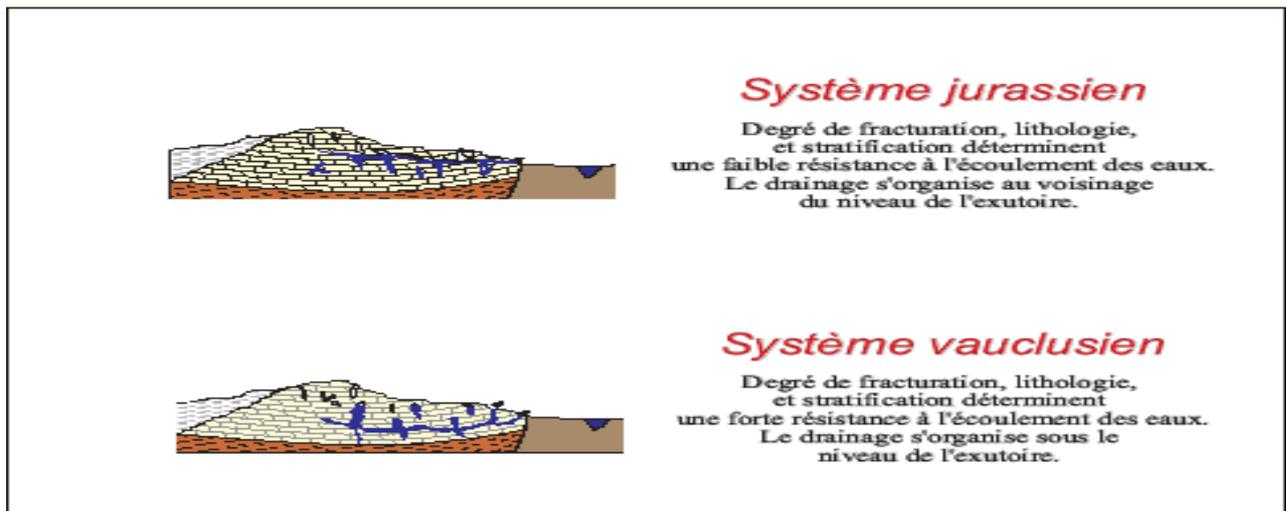


Figure 5: Karst vaclusien et jurassien (Marsaud 1996)

➤ **Zone d'infiltration**

Elle représente la partie non saturée de l'aquifère qui assure l'écoulement des eaux d'infiltration au travers du massif karstique (Fig. 6). Dans sa partie la plus proche de la surface, les eaux d'infiltration peuvent être retenues momentanément et il se crée à ce niveau des réserves importantes dans un aquifère temporaire : l'aquifère épikarstique dans lequel les eaux sont soumises à l'évapotranspiration.

Une des particularités de cette zone est de posséder plusieurs modalités d'infiltration :

- Une infiltration différée ou une infiltration directe selon l'existence ou l'absence d'un aquifère épikarstique.
- Une infiltration lente avec de fortes pertes de charges dans les vides de petites tailles ou une infiltration rapide à partir des discontinuités verticales et subverticales largement ouvertes.

➤ **Zone noyée**

C'est la zone saturée d'un aquifère karstique qui se développe à l'aval du système où l'organisation des vides apparaît plus nette. Elle n'est pas obligatoirement présente dans tout l'ensemble carbonaté. Elle est constituée de :

- ✓ Drains ou axes de drainage composés d'un ensemble de conduits qui se développent soit dans la partie supérieure soit en profondeur. Les drains assurent la fonction transmissive. Les écoulements y sont très rapides. Ils permettent l'organisation des écoulements dans la zone noyée (drain très transmissif et peu capacitif).
- ✓ Systèmes annexes au drainage (SAD) connectés à l'axe de drainage. Ces systèmes assurent la fonction capacitive (stockage) et sont constitués de vides de grandes tailles. Les écoulements y sont très lents, et les temps de séjours sont longs. Les relations avec le drain principal s'effectuent avec de faibles ou de fortes pertes de charges. Lors des crues, les SAD ont une fonction de stockage des eaux drainées, alors qu'en période d'étiage, ils alimentent les drains.

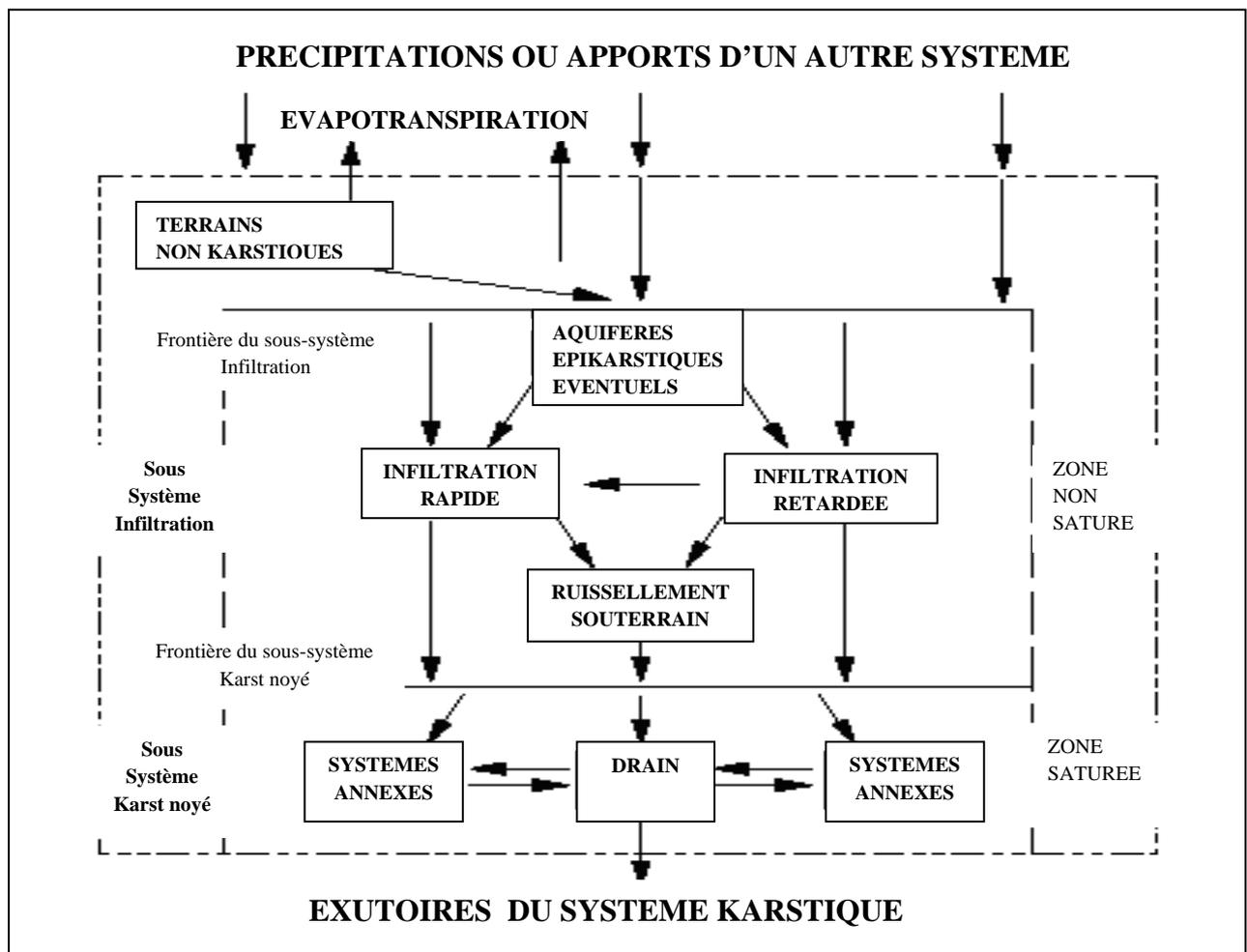


Figure 6: Schématisation du système karstique (Mangin 1975)

L'aquifère karstique est aussi le seul aquifère présent dans la nature dont les propriétés évoluent au cours du temps. Marsaud (1996) rend compte de cette évolution dans une classification réalisée en fonction :

- Du degré d'évolution de vides (type1)
- De l'organisation des vides (type2)
- Des écoulements à l'intérieur du système (type3)

Type 1 : Systèmes non fonctionnels à faible ou fort potentiel et structure peu karstique : les vides et les écoulements ne sont pas organisés.

Type 2 : Systèmes fonctionnels à fort potentiel et structure karstique : l'organisation de la structure de drainage est plus ou moins évoluée. Les vides et les écoulements sont organisés.

Type 3 : Systèmes non fonctionnels à faible potentiel et structure karstique : Les vides sont organisés mais les écoulements ne rendent pas compte de cette organisation.

V-METHODES D'ETUDE DES AQUIFERES KARSTIQUES

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'étude des aquifères karstique. Marsaud (1996) suggère d'identifier le système à partir de son type qui est fonction de l'existence ou non des vides et des écoulements.

Dans le cadre de ce travail, l'étude hydrodynamique du système karstique est réalisée à l'aide des méthodes proposées par Mangin :

- Analyse des débits classés
- Analyse des courbes de récession
- Analyse corrélatoire et spectrale.

Par contre, l'étude hydrochimique du système karstique est effectuée par les méthodes suivantes :

- Le traçage qui précise les conditions d'écoulement.
- L'hydrogéochimie qui renseigne sur les temps de séjours des eaux et l'organisation du karst noyé.

Cadre Géologique Régional et Hydrogéologique

I. Cadre géologique régional

1- Cadre géologique de l'Oranie (Fig.7).

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est liée aux mouvements hercyniens et alpins. En Oranie, ils ont permis l'individualisation de plusieurs domaines :

- Au Nord, le domaine tellien orienté grossièrement E-W et représenté par les Monts des Traras et des Sebâa Chioukh
- Le domaine tlemcenien avec d'Ouest en Est le Horst de Ghar Roubane, les Monts de Tlemcen, les Monts de Daïa et les Monts de Saïda
- Les Hautes plaines oranaises, limitées au Nord par le domaine tlemcenien et au Sud par une série de fractures correspondant à la flexure Nord Atlasique (Hayane 1983)
- Le domaine atlasique
- Et le domaine saharien.

Les Monts de Tlemcen, qui constituent le cadre géographique de notre étude, s'interposent entre deux domaines bien définis :

- ✓ Le domaine des nappes de tell au Nord
- ✓ Le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud

2- Cadre géologique du secteur d'étude (Fig.8)

Les Monts de Tlemcen sont limités :

- Au Nord, par les plaines de Maghnia, d'Hennaya, de Sidi Bel Abbés, et par les plateaux de Zenata, et de Sidi Abdelli.
- Au Sud, par les hautes plaines oranaises
- A l'Ouest, par le moyen atlas marocain
- A l'Est, par les Monts de Daïa

II-Lithostratigraphie

Les Monts de Tlemcen sont caractérisés par des terrains dont l'âge varie du Primaire au Plio-Quaternaire (Fig.9 et 10)

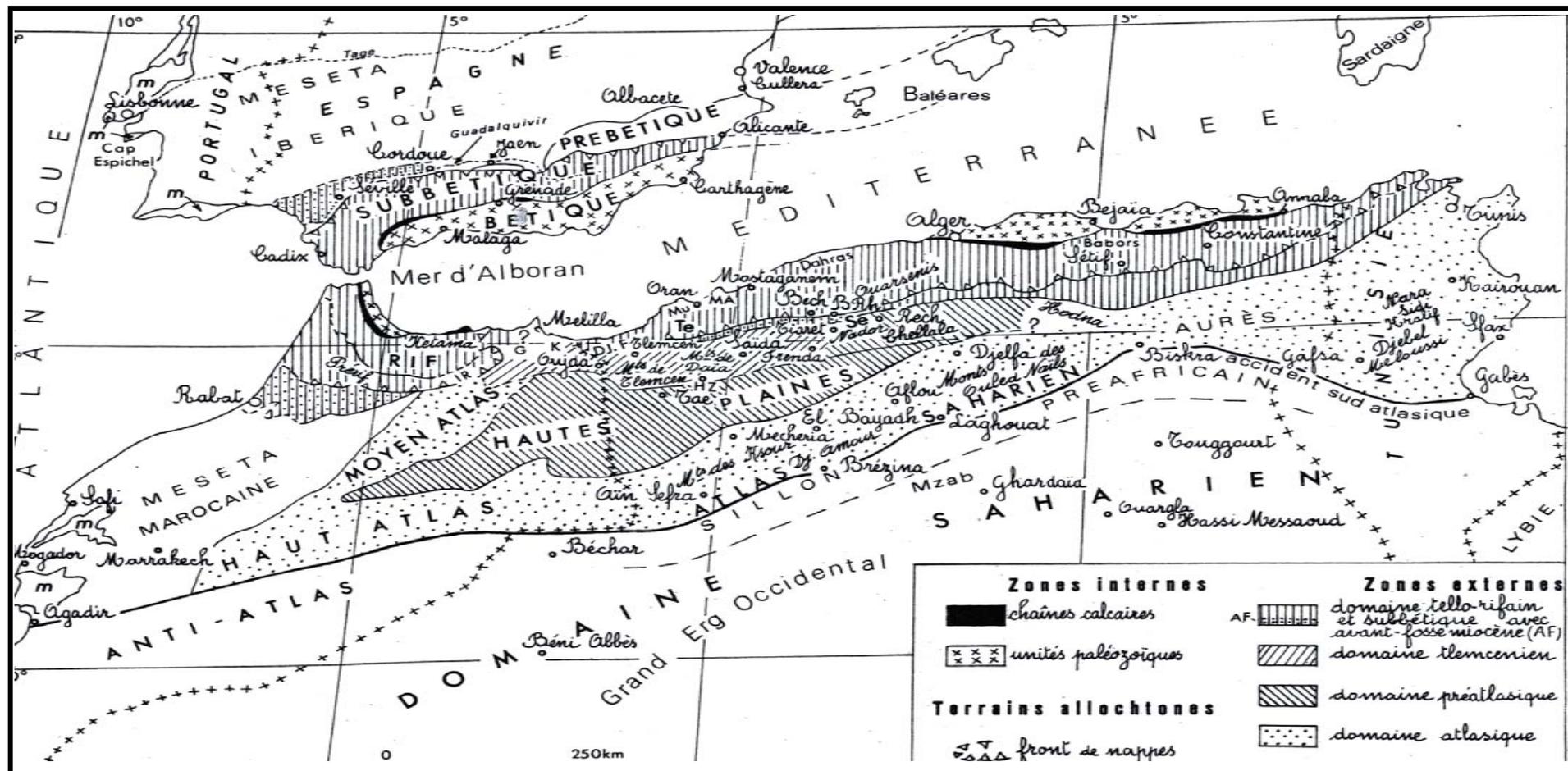
• *Le Primaire*

Les terrains d'âge primaire affleurent dans le horst de Ghar Roubane où la série débute par des schistes de couleur brune à rougeâtre alternant avec les quartzites très compactes de couleur grisâtre à rougeâtre en bancs décimétriques.

Cette formation constitue un substratum imperméable.

• *Le Secondaire*

Il forme l'ossature des Monts de Tlemcen. Nous distinguons de bas en haut :



Bech. Bechtout ; B Rh. Bou Rheddou ; Dj. F. Djebel Fillaoussène ; G. Chaîne du Gareb ; HZ. Hassi Zerga ; IR. Zone intrarifaine ; K. Kebdana ; MA. Monts d'Arzew ; MU. Djebel Murdjajo ; Rech. Djebel Recheiga ; Tae. Djebel Taerziza ; Te. Monts du Tessala ; m. Mésozoïque du Portugal et du Maroc atlantique comportant du Jurassique supérieur et du Crétacé basal.

Figure 7 : Schéma structural de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (M. BENEST, 1985)

➤ Trias :

Bien visible au niveau d'Aïn tellout et du Djebel Larbi, il est constitué par des argiles rouges violacées, emballant des niveaux de gypse fibreux. Il est souvent accompagné de basaltes, de tufs, de calcaires ou de dolomies. Les argiles à gypse seules affleurent au Djebel El Arbi (Auclair et Biehler, 1967).

➤ Le Lias et Le Dogger :

Les terrains carbonatés du Lias et du dogger n'apparaissent qu'à la faveur des horsts de Rhar-Roubane et du Djebel Tenouchfi.

➤ Les argiles de Saïda :

D'âge Callovo-Oxfordien, elles sont représentées par des dépôts argileux et marneux à passées gréseuses. Cette formation apparaît dans la région de Sabra ainsi que près de du barrage du Béni Bahdel. D'une puissance de 300 m à 500 m, elle assure parfois une transition assez progressive aux grés de Boumediene.

➤ Les grés de Boumediene :

D'âge Oxfordien supérieur- Kimméridgien inférieur, il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées le plus souvent par des éboulis ou de la végétation. Ces grés à ciment calcaire, se présentent en bancs assez durs. Dans le tiers supérieur, on note la présence d'argile « lie de vin », avec au sommet quelques passées marneuses et calcaires riches en débris de gastéropodes et de lamellibranches.

Les grés de Boumediene sont particulièrement développés dans la forêt de Zarifet où leur épaisseur peut atteindre 500 m ainsi qu'au sud ouest de Terny, au niveau des cascades d'El Orit, de la forêt d'Hafir et vers l'Est, dans la région d'Oum El Allou.

➤ Les calcaires de Zarifet :

D'âge Kimméridgien supérieur, ce sont des calcaires à grandes géodes de calcite disposés en bancs épais, séparés par de minces intercalations de calcaires marneux, écailléux parfois quelques peu fossilifères. Ils marquent presque partout la base du Kimméridgien et reposent directement en concordance sur les grés de Boumediene. L'épaisseur de la formation peut atteindre 25 m au col de Zarifet.

➤ Les dolomies de Tlemcen :

D'âge Kimméridgien moyen- Kimméridgien supérieur, les dolomies de Tlemcen marquent les Monts de Tlemcen d'un style morphologique bien particulier. L'érosion y a parfois donné naissance à des reliefs très pittoresques à aspect ruiniforme avec cheminées (sud de Terny).

Ce sont des dolomies cristallines grises à patine rousse et à cassure grise parfois rousse avec de nombreuses cavités remplies de calcite. L'épaisseur de ces dolomies peut atteindre 300 m dans la région de Tlemcen où elles affleurent autour de Aïn fezza, dans la forêt de Zarifet, le Djebel Tefatisset, la région d'Aïn el houtz, le plateau de Terny et au Nord de Tlemcen.

➤ Les calcaires de Stah :

Définis par M. Benest (1972) comme des micrites en bancs épais épargnés de la dolomitisation à patine gris clair, ces calcaires renferment des pellets, des coprolites et des dasycladacées (coupe type de Dj stah 65m).

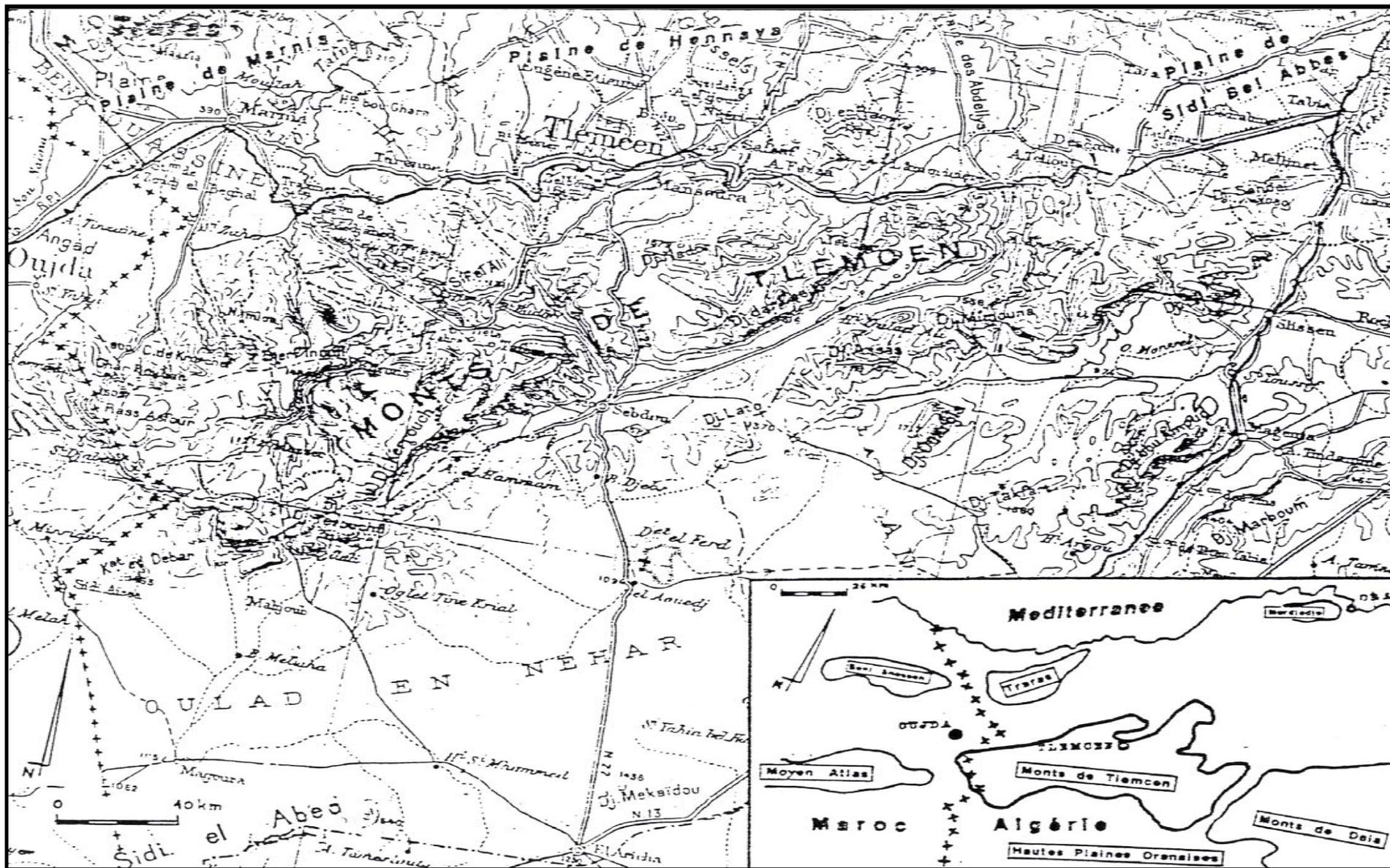


Figure 8: Situation géographique de Monts de Tlemcen (COLLIGNON, 1986)

➤ Les marno calcaires de Raouraï :

D'âge Tithonique inférieur, ce sont des marnes grises, blanchâtres en surface, rognonneuses, esquilleuses où s'intercalent de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs. Cette formation est limitée à sa base par les calcaires de Stah et à son sommet par les calcaires du Lato ou par les premières assises des dolomies de Terny. Leur puissance est de l'ordre de 100 m. Cette formation affleure particulièrement sur le plateau de Terny, dans le Djebel Lato et à l'Est de Aïn Fezza.

➤ Les calcaires du Lato :

Ce sont des calcaires massifs qui se présentent en bancs épais terminés par des laminites sombres calcaréo-argileuses qui peuvent contenir quelques rubanements de silex. Leur épaisseur est de 50 m au Djebel Lato.

➤ Dolomies de Terny :

Elles ont été définies par Doumergue (1910) dans les falaises rouges. Elles ont un aspect ruiniforme et forment les sommets des Djebels Nador et Terny. Ces dolomies sont parfois vacuolaires, parfois massives avec de nombreuses stratifications obliques qui permettent de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen. Elles sont surtout développées au niveau des plateaux des Azaïls, de Terny, des Djebels El Guern, Bouchiba et du Lato. Leur épaisseur est de 100 m au niveau du plateau de terny.

Doumergue (1910) les a rangées dans le Kimméridgien supérieur, alors que M. Benest (1982) leur donne un âge Tithonique inférieur

➤ Les Marno-Calcaires d'Hariga

D'âge Tithonique moyen, c'est une alternance de calcaires et de marnes, plus ou moins tendres, constituée de micrites bien litées à patine gris clair. Elles sont bien représentées au Djebel Hariga avec une épaisseur de 165 m.

➤ Marno-calcaires d'Ouled Mimoun

D'âge Tithonique supérieur à Berriasien basal, cette formation est composée essentiellement de grés et d'argiles à la base (grés de Merchich) puis d'une alternance de calcaires et de marnes. La limite inférieure de cette formation correspond à l'apparition des grés de Merchichs sur les rebords Sud du plateau de Terny. Elle marque la limite inférieure de cette formation, tandis que la limite supérieure est matérialisée par le toit d'une corniche de calcaires, souvent biodétritiques, avec des stratifications obliques. Ces bancs Marno-Calcaires peuvent atteindre 500 m à 700 m d'épaisseur (Ouled Mimoun).

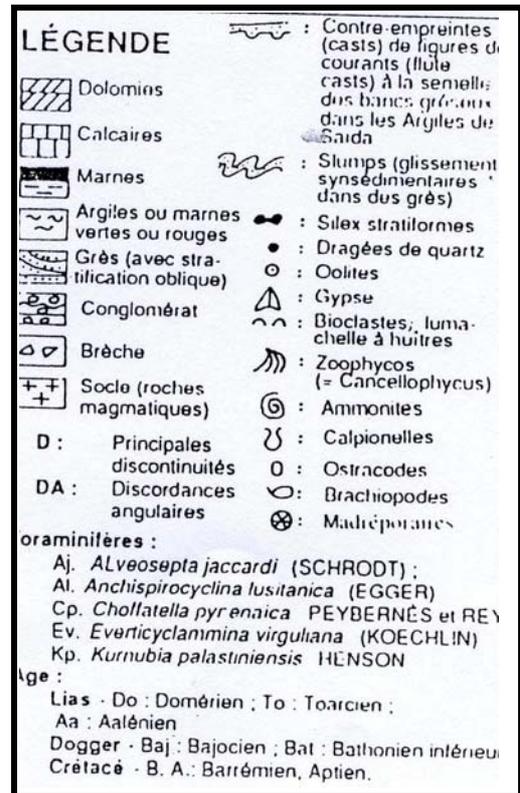
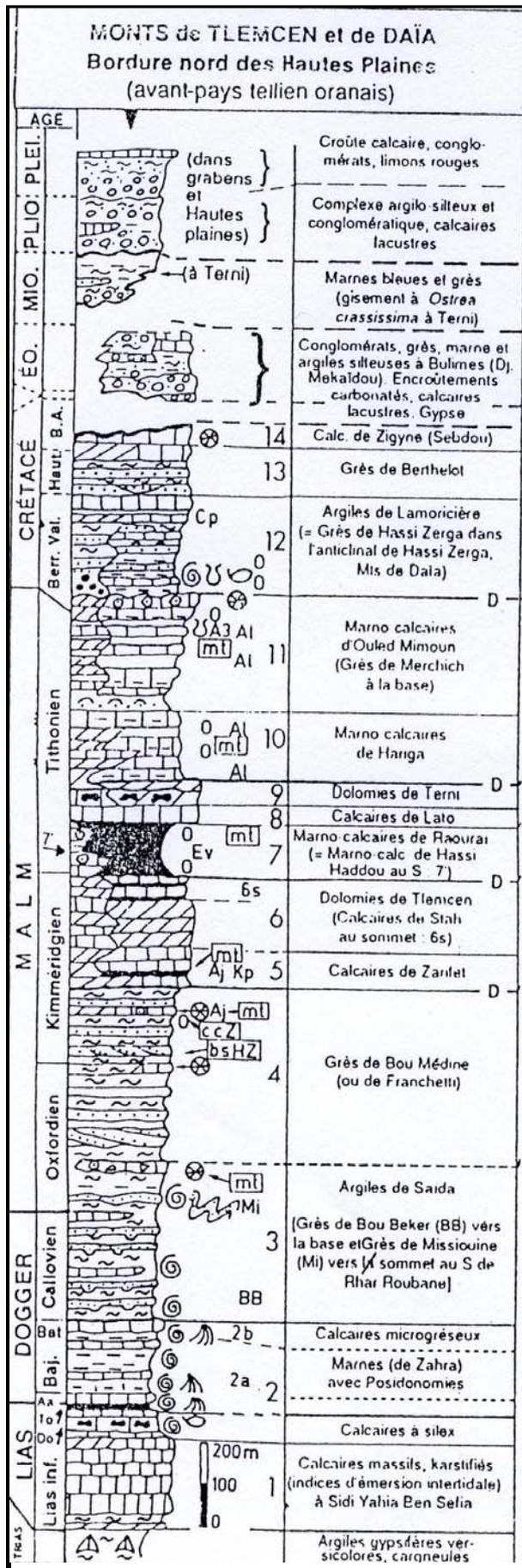


Figure 9: Colonne lithostratigraphique des Monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (BENEST, BENSALAH, 1999)

➤ Le crétacé :

Il est représenté par la série du crétacé inférieur. Nous distinguons de bas en haut :

✓ Les argiles de Lamoricière :

D'âge Berriasien moyen- Valanginien, c'est une formation argilo-gréseuse, nettement calcaire au sommet qui affleure au niveau de Hassi Zerga.

✓ Les grès de Berthelot :

D'âge Hauterivien, ces grès sont caractérisés par une récurrence de la smectite mais surtout par la présence de la chlorite (10 m à 15 m). La base, riche en stratifications obliques, est marquée par un banc de dolomie pulvérulente.

✓ Les calcaires de Zigyne :

D'âge Barrémien – Aptien, cette formation représente la transition entre le crétacé et l'Eocène (M.Benest & F.Bensaoula, 1994)

• **Le Tertiaire**

Il est représenté par des dépôts essentiellement marins. Nous distinguons de bas en haut les formations suivantes :

➤ L'éocène

C'est un ensemble gréseux avec passage de bancs en poudingues. A Aïn Berkouk, il affleure sur une très faible surface. A Sebâa chioukh, le massif est constitué de grès siliceux jaunes à rougeâtres, assez friables à ciment argileux alternant avec des marnes argileuses verdâtres. Ces alternances d'une puissance de 100 m à 150 m ont été attribuées à l'éocène supérieur.

➤ Le miocène

✓ Inférieur

Il débute par une assise de poudingues à éléments calcaires dolomitiques à ciment calcaréo-gréseux très durs, à blocs bien roulés hétérométriques et polygéniques pouvant atteindre 20 m de puissance. Ce faciès, très résistant et fissuré, montre un granoclassement normal avec des intercalations marneuses à la base. La partie supérieure est constituée par des argiles marneuses de teinte verdâtre, dans lesquelles s'intercalent des bancs décimétriques de grés ferrugineux friables formant un ensemble pouvant dépasser 100 m d'épaisseur.

✓ Moyen (Serravallien)

Reposant souvent en discordance sur le miocène inférieur, il est déformé et partiellement érodé. Il est constitué par une épaisse série de marnes grises ou bleutées, qui par altération deviennent ocres. Au sein de cette série, pouvant atteindre 300 m d'épaisseur dans la vallée de l'Oued Isser, s'intercalent de nombreux bancs décimétriques de grés jaunes, plus fréquents au sommet.

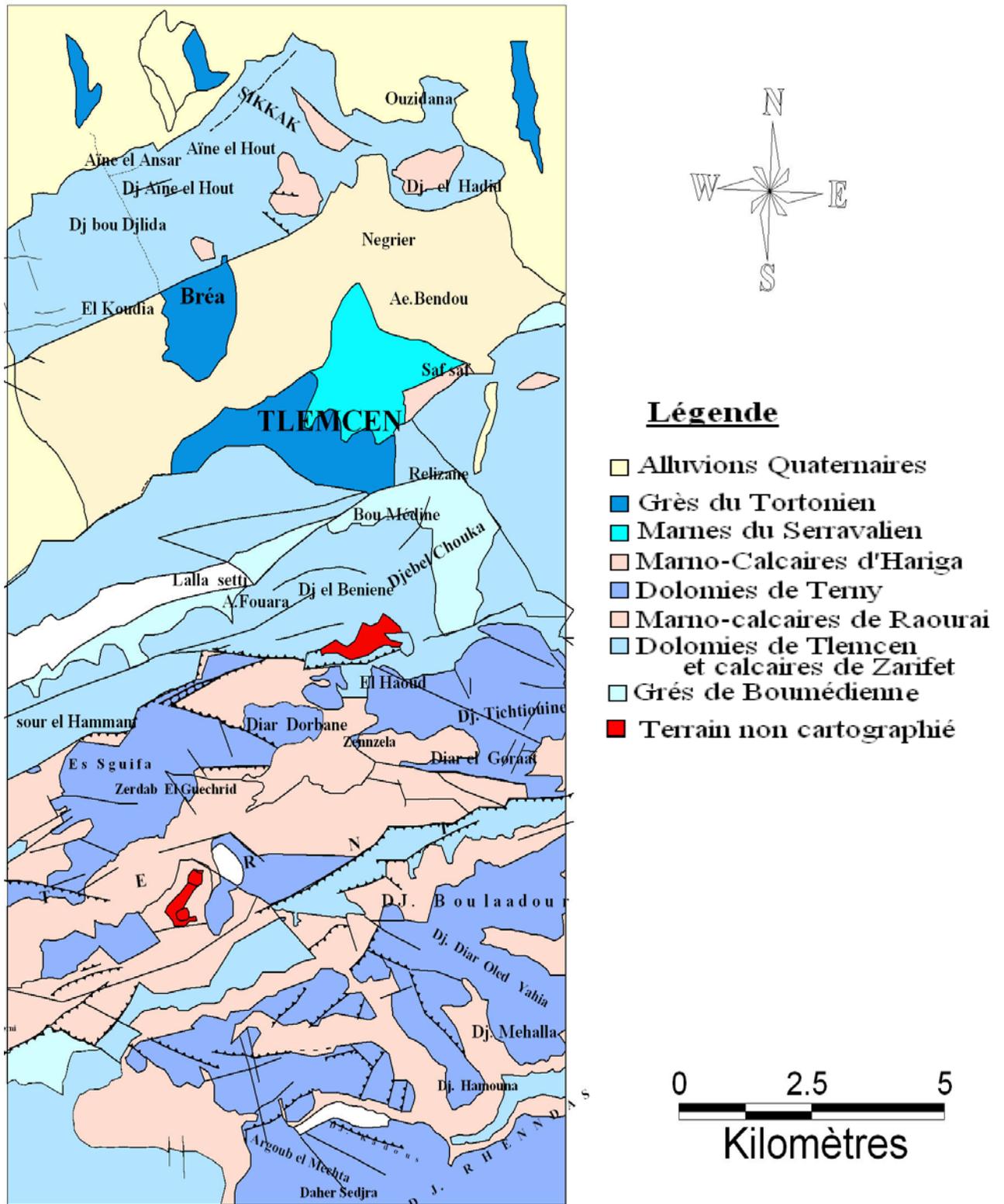


Figure 10: Carte géologique du secteur d'étude (Hayane, 1983).

✓ Supérieur (Tortonien)

Il est représenté par des grès durs de couleur jaune d'or ou citron avec, par endroit, de minces passées marneuses, peu consolidées atteignant 20 m à 30 m d'épaisseur. Ces grès ont été datés à l'Helvétien par Doumergue (1910) mais l'analyse micropaléontologique leur donne un âge Tortonien supérieur. (HAYANE, 1983).

• *Le plio-quaternaire*

Il n'est représenté que par des sédiments continentaux difficiles à dater avec précision. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus, formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. On y rencontre les faciès suivants :

- Des travertins villafranchiens fortement consolidés situés en bordure des Monts de Tlemcen et des calcaires lacustres.
- Un complexe de sédiments plio-villafranchiens dont la bordure constituée de massifs secondaires, est soulignée par des éboulis de piémonts plus ou moins encroûtés et remaniés, d'épaisseur très variable mais toujours assez faible.
- Des marnes avec peu ou pas de galets, parfois très épaisses.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.
- Des limons, sables et graviers récents qui s'étendent entre l'Oued Mehaguène et Chaâbat El Arneb au Nord Est de la frontière algéro-marocaine. Les limons sont jaunes en général avec des couches rougeâtres. A leur base se trouvent les galets en lits.
- Quelques lambeaux de basaltes interstratifiés, situés au Nord-Ouest de la plaine de Maghnia, témoigne d'une activité volcanique.

III-Analyse structurale

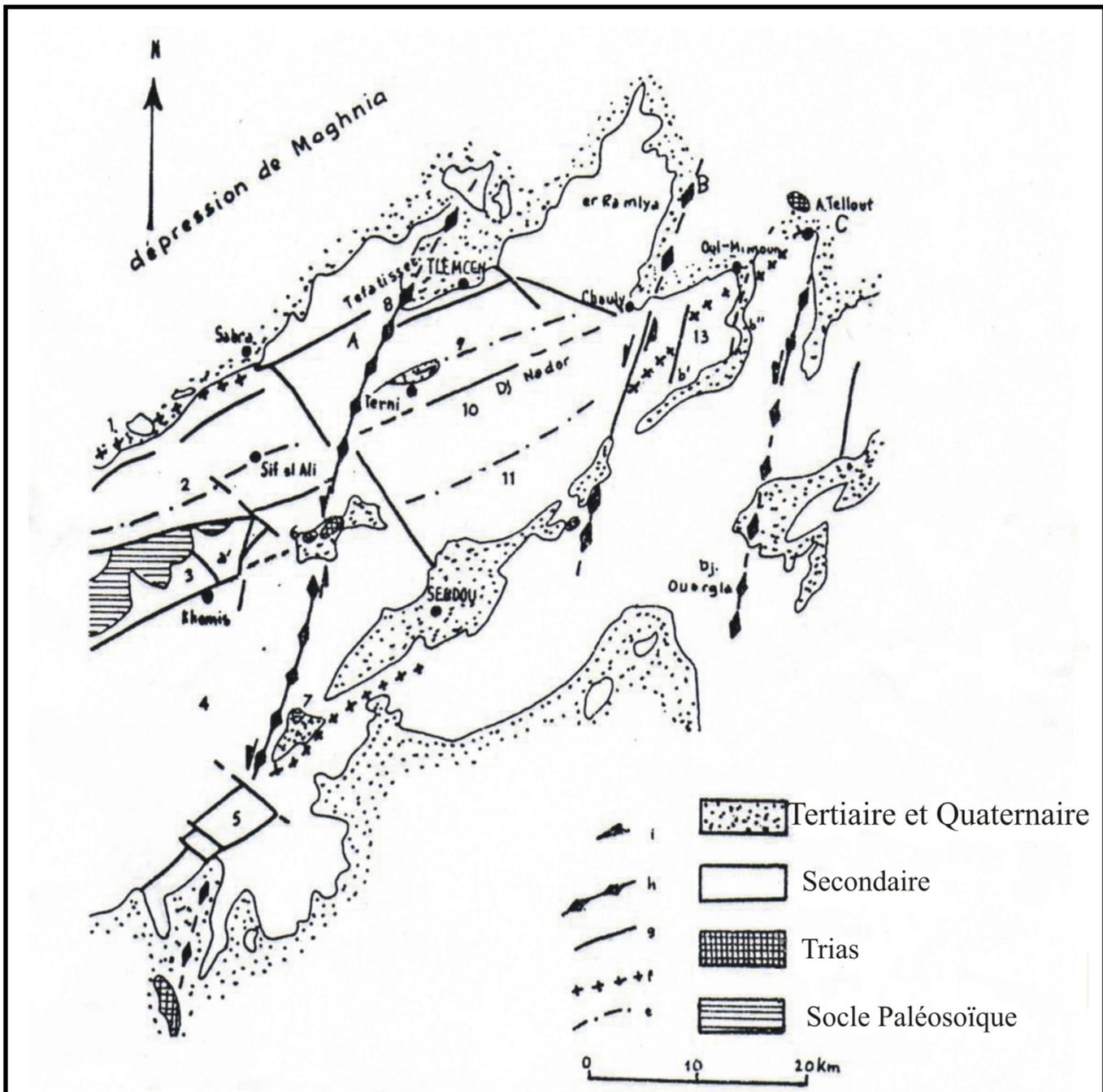
La direction générale des grandes fractures est orientée WSW-ENE (direction tellienne) (Auclair & Biehler, 1967). Le style tectonique général est de type cassant, avec quelques déformations souples qui marquent la présence de synclinaux et d'anticlinaux. Les failles sont subverticales et résultent de déformations du socle. Elles limitent des horsts et des grabens, orientés N50°E à N70°E.

Les principales phases tectoniques

Selon Benest (1982) cinq phases tectoniques sont mises en évidence depuis l'éocène à la période actuelle :

1- Phase éocène:

Dans les Monts de Tlemcen, aucune discordance ne sépare les dépôts de plateforme carbonatée du jurassique supérieur- berriasien inférieur, des faciès terrigènes transgressifs du berriasien moyen et supérieur. La subsidence durant le jurassique supérieur et l'éocène y est largement contrôlée par le jeu ou le rejeu des grands accidents ; SW- NE, NW et subméridiens, hérités de l'orogénèse hercynienne (Benest, 1981).



A : Transversale de la Tafna
 B : Transversale d'Oued Chouly
 C : Transversale d'Aïn Tellout

i : Sens de coulissage ; h : Transversale SSW-NNE
 g : Failles ; f : Anticlinaux ; e : Zones effondrées et
 cuvettes synclinales.

1=anticlinal de Dj. El Hamra ; 2=Zone synclinale du Kef ; 3=Horst de Rhar Roubane
 4= Zone synclinale de Ras Asfour ; 5=Dj. Tenouchfi ; 6=Beni Bahdel ; 7=Sidi Yahia ben Séfia
 8=Beni Mester ; 9=Synclinal de Terni ; 10=Compartiment surélevé du Dj. Nador de Terni
 11=Cuvette de Titmoghène ; 12=Dj. El Arbi ; 13=Anticlinal d'Ouled Mimoun

Figure 11: Schéma structurale simplifié des Monts de Tlemcen (ELMI, 1970)

2- Phase atlasique :

Elle doit correspondre aux mouvements qui, dans les Monts des Traras, (Guardia, 1975), se sont produits à partir du Sénonien et se sont terminés avant la mise en place des nappes telliennes. L'analyse tectonique, effectuée dans les Monts de Tlemcen et de Daïa, permet d'envisager des mouvements d'abord compressifs puis distensifs :

* Les mouvements compressifs se seraient développés dans un pays émergé, à la suite d'un important épisode régressif consécutif au soulèvement de certaines régions de l'avant pays alpin bordant au nord les hautes plaines oranaises.

Ces mouvements donnent des plis d'orientation moyenne E-W à grand rayon de courbure.

* Les mouvements distensifs sont contrôlés par le rejeu des grands accidents du socle. La fracturation s'est traduite par un système de failles conjuguées N55°-80 et N140° responsables de la mise en place des principales structures : horst de Ghar-Roubane (Elmi, 1973), massif de Tinouchfi (Dubel, 1971), fossé de Sebdou et de la Tafna. Ces failles ont eu pour conséquence d'accentuer le processus d'érosion en cours.

3- Une importante phase de compression N-S avec un paroxysme miocène probable :

Par comparaison avec la région des Traras, cette phase aurait débutée avec (ou avant ?) la mise en place des nappes et serait anté-messinienne, (Lucas 1942 ; Guardia 1975). Cette phase est à l'origine des grandes structures coulissantes et chevauchantes (Benest 1974).

4- Une phase à dominante distensive :

Elle a contribué à la surrection de la plupart des reliefs actuels et a entraîné la régression pliocène, notamment dans la zone de Terny, antérieurement atteinte par la transgression du Miocène Supérieur (Doumergue 1910) ou du Mio-Pliocène (?). Le rejeu des failles préexistantes a généralement accentué le découpage en horsts et grabens.

5- Phase récente (Plio-Quaternaire) :

Elle s'est traduite par des mouvements soit compressifs, soit distensifs. Ces déformations n'ont pas l'ampleur de celles des phases précédentes.

Les unités structurales

Les Monts de Tlemcen sont composés de plusieurs unités structurales (ELMI 1970) :

➤ Zone synclinale de Terny :

Limitée par deux accidents de direction moyenne N70°E, le plateau de Terny se présente comme un synclinal effondré dont le flanc Sud est plus redressé que le flanc Nord. Cette dépression formée au sein de la série jurassique, s'enfoncé légèrement vers l'Est. Dans cette zone, la plupart des contacts entre les formations se font par failles.

➤ Zone effondrée de Tlemcen

Elle fait partie du même ensemble effondré que la plaine de Maghnia dont elle est séparée par le Djebel Tefatisset. Elle est limitée au Sud et au Nord par les failles passant par Bréa et Chetouane qui relient les panneaux des Djebels Tefatisset et Aïn El Houtz.

➤ Zone haute des Djebels Tefatisset et Aïn El Houtz

Elle est limitée au sud par une faille et au Nord par une série de failles en relais de même direction.

➤ Zone d'Er-Ramlya

C'est un dôme affecté par une tectonique cassante et découpé en de nombreux panneaux soulignés par des accidents le plus souvent rectilignes.

IV- Propriétés hydrogéologiques des formations

On distingue: (fig. 12)

- ✓ Les formations à forte capacité de rétention souterraine
- ✓ Les formations à faible capacité de rétention souterraine

1. Les formations à forte capacité de rétention souterraine

Ce sont les formations perméables représentées par les séries calcaréo-dolomitiques du jurassique supérieur, les grès tortoniens, les conglomérats du Miocène inférieur et ceux de la plaine d'Hennaya et les travertins.

➤ Les dolomies de Tlemcen

Les dolomies de Tlemcen avec à leur base les calcaires de Zarifet, occupent une grande partie de ces massifs. Ces roches sont diaclasées et intensément karstifiées.

➤ Les dolomies de Terny

Moins karstifiées que les dolomies de Tlemcen, elles sont plus micritiques et présentent de nombreuses passées stromatolithiques qui doivent faciliter les phénomènes de dissolution. Les dolomies de Terny, ayant une structure granulaire avec pellesoïdes, sont plus homogènes

➤ Les grès Tortonien

Ils ont une perméabilité d'interstices

➤ Les conglomérats du Miocène inférieur

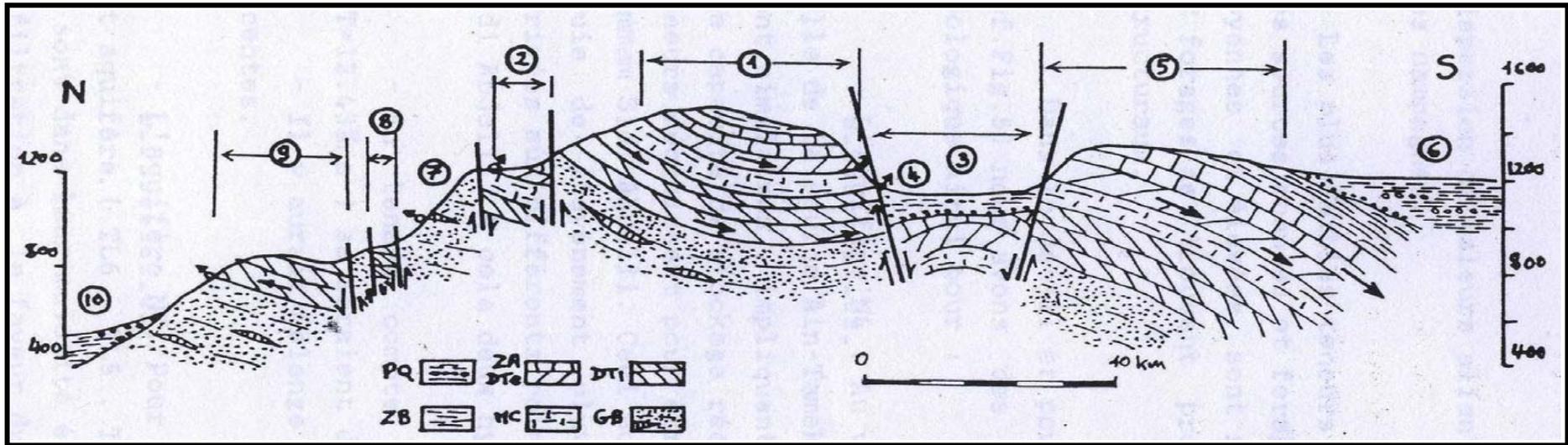
Très fissurés, sont caractérisés par l'absence de réserves à cause de leur faible surface d'affleurement.

➤ Les conglomérats de la plaine d'Hennaya

Ils présentent aux débouchés naturels des zones cavernueuses

➤ Les travertins

Anciens et récents, constituent de puissants dépôts disposés en masse et qui s'avancent en hautes falaises à pic, aux abords de grandes sources disparues ou actuelles (Kimméridgien). Ils sont caractérisés par une forte perméabilité et l'absence de réserves, vu leur faible extension.



- 1) Le karst perché du synclinal du Merchiche
- 2) Le karst perché du Meffrouch.
- 3) Le fossé de Sebdou dépourvu d'aquifère superficiel.
- 4) Source jaillissant au niveau des vallées qui suivent les grands fossés.
- 5) Le Djebel Lato, un exemple de karst à flux souterrain dirigé vers les Hautes plaines
- 6) Les hautes plaines dépourvues d'aquifères superficiel
- 7) La forêt de Zarifet s'étend sur les grès de Boumediene. Quelques petites sources jaillissent, souvent à la faveur des bancs calcaires.
- 8) Le petit fossé de Mansourah, avec un aquifère très transmissif mais une alimentation très réduite.
- 9) Le Djebel Teffasset : ce karst s'envoie progressivement sous les dépôts miocène quelques kilomètres plus à l'Est.
- 10) Plaines à recouvrement marneux miocène.

Figure 12: Coupe Transversale des Monts de Tlemcen, illustrant les principaux types d'aquifères de la région (in COLLIGNON, 1986)

2. Les formations à capacité de rétention souterraine faible à très faible

Dans la nature, il n'existe pas de formations parfaitement imperméables mais des formations dont la perméabilité est plus ou moins importante. Nous considérons comme imperméables les niveaux à très faible perméabilité.

➤ Les grès de Boumediene

Ces grès ne sont guère poreux, et leur perméabilité d'interstices est toujours faible à l'exception de deux situations bien particulières :

♣ L'existence de bancs calcaires dans la partie supérieure de la formation où ils jouent le rôle de drains, permettant aux grès de constituer localement un aquifère intéressant.

♣ La présence de diaclases et de fissures qui donnent à ces grès une certaine perméabilité.

Les bancs marneux intercalés dans les niveaux gréseux permettent à l'ensemble de jouer un rôle d'écran étanche qui sert de mur à l'aquifère des dolomies de jurassique.

➤ Marno-calcaires de Raouraï, d'Hariga et de Lamoricière

Ils sont relativement imperméables. Si les niveaux calcaires admettent une certaine perméabilité dans le sens horizontal, l'ensemble est imperméable dans le sens vertical.

➤ Grés de Merchiche

Ils couvrent de grandes étendues en bordure du fossé de Sebdou et de la Tafna. Ils présentent une perméabilité mixte qui ne leur permettant pas de constituer un aquifère important compte tenu de leur faible extension et de leur épaisseur réduite.

Conclusion

Les Monts de Tlemcen constituent un édifice régulier formé essentiellement de terrains cénozoïques et mésozoïques formant une ossature couronnée par des formations plio-quadernaires.

L'étude structurale de la région montre la présence de deux systèmes de décrochements avec cinq phases tectoniques contrôlées par le jeu et le rejeu d'accidents distensifs SW-NE à WS-WENE parfois compressifs.

La lithologie de ces formations est celle de formations imperméables (grés de Boumediene, et marno-calcaire de Raouraï et Hariga) et celles de formations à perméabilité en grand représentées par les dolomies de Tlemcen, de Terny et des Grés de Tortonien. La plupart des sources émergent à la faveur des failles qui jouent le rôle d'écran imperméable et constituent parfois des drains actifs.

Enfin l'impluvium de ces trois sources, formé de terrains karstiques et non karstiques, permet de classer le système karstique comme un système binaire

V- Cadre climatique

Deux groupes de facteurs déterminent le climat, aussi bien régional que local. Ce sont les facteurs géographiques (latitude, altitude,) et les facteurs météoriques liés au déplacement des masses d'air.

De part sa position, l'Algérie du nord se situe dans une zone de contact entre les masses d'air polaire et les masses tropicales. Le climat est contrasté et de type méditerranéen.

La région de Tlemcen se trouve entre deux domaines géographiques distincts :

- les Monts de Tlemcen au Sud
- la zone des plaines au Nord.

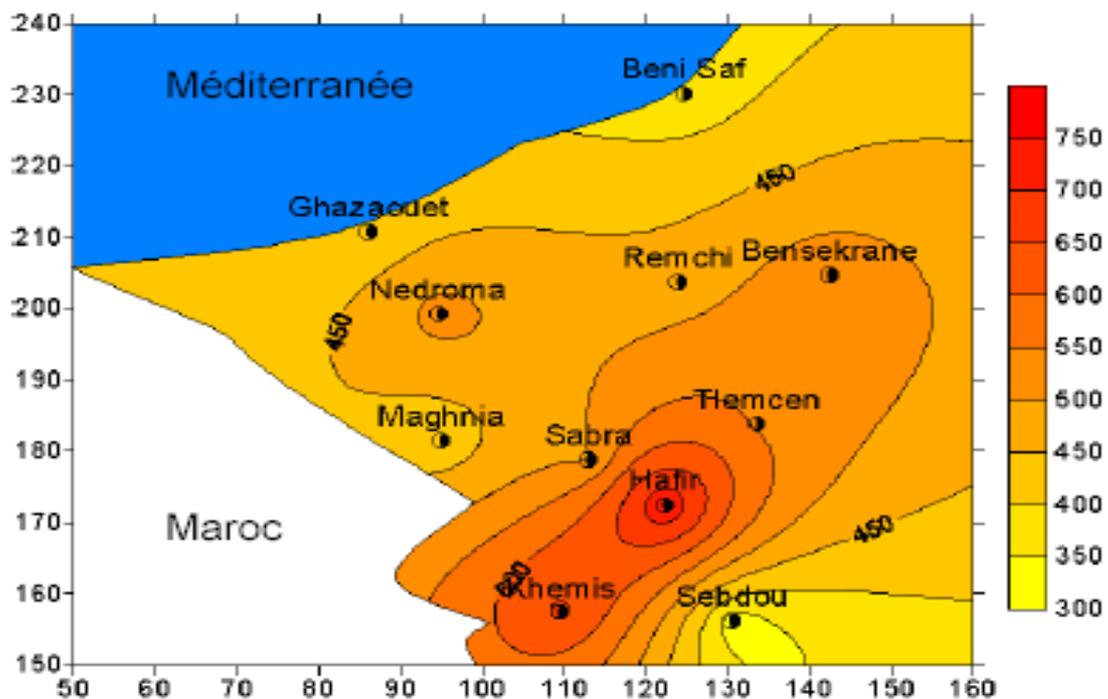


Figure 13: Carte en isohyètes du bassin de la Tafna (données Seltzer 1913/38)

La carte des isohyètes de Seltzer (1946), montre une diminution des pluies avec l'éloignement du littoral ainsi qu'une légère augmentation pluviométrique d'Ouest en Est (Fig. 17).

L'étude climatologique a été réalisée à partir des relevés des températures et des précipitations des stations de Tlemcen et Zenata (tableau 2)

STATION	X	Y	Z	PERIODE
Tlemcen	132.200	182.700	839	1990/2004
Zenata	120.15	144.60	720	1981/2006

Tableau 2 : Situation des stations climatiques

1. Les précipitations

La période de mesures au niveau de la station de Tlemcen va de 1990 à 2004

a) Précipitations moyennes mensuelles

La répartition mensuelle de ces précipitations est représentée dans le tableau 3 et sous forme d'histogramme (Fig.14).

Mois	Jan	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juit.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
P moy. (mm)	49.02	40.90	49.57	31.78	27.93	3.87	1.19	5.09	13.66	23.33	48.94	39.30	334.58

Tableau 3 : précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (période 1990-2004)

Les précipitations les plus importantes se produisent au cours des mois de janvier, février, mars (hiver). Le minimum se situe en juin et juillet (été).

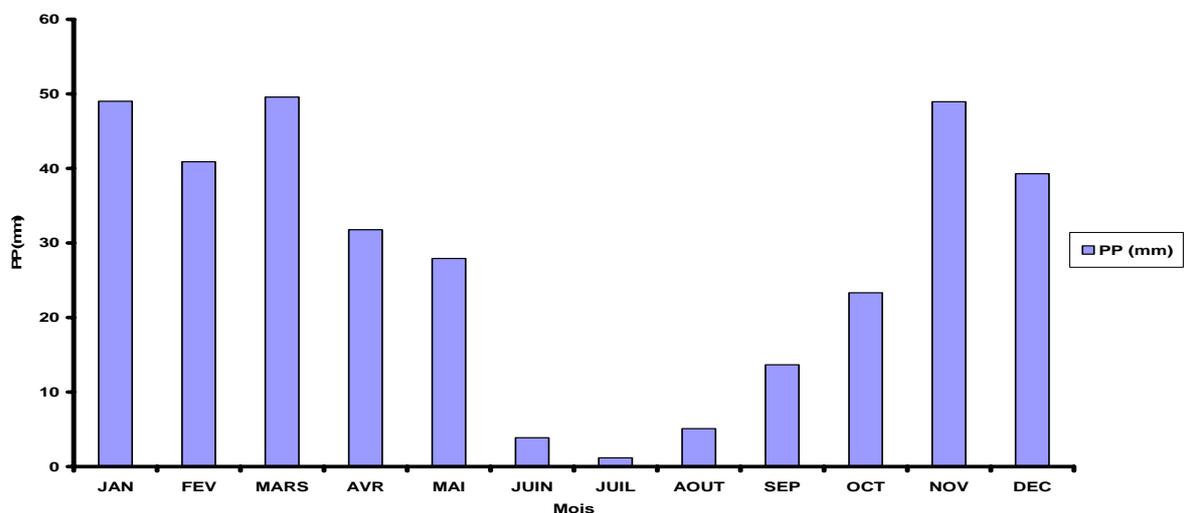


Figure 14: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (période 1990-2004)

b) Précipitations saisonnières ou régime saisonnier

La méthode consiste à grouper les mois trois par trois de sorte que le mois initial de chaque trimestre ou saison contienne soit un solstice, soit un équinoxe.

Les totaux pluviométriques saisonniers caractéristiques de la région sont les suivants :

- Hiver = 90 jours et 1/4.
- Printemps = 92 jours.
- Eté = 92 jours.
- Automne = 91 jours.

De sorte que les précipitations saisonnières calculées sont rapportées dans le tableau 4 et sous forme d'histogramme dans la figure 15.

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Indice saisonnier
Moyenne (mm)	85.93	129.22	109.28	10.15	HPAE
Moyenne (%)	25.68	38.62	32.66	3.04	HPAE

Tableau 4 : Précipitations saisonnières enregistrées à la station de Tlemcen (1990-2004).

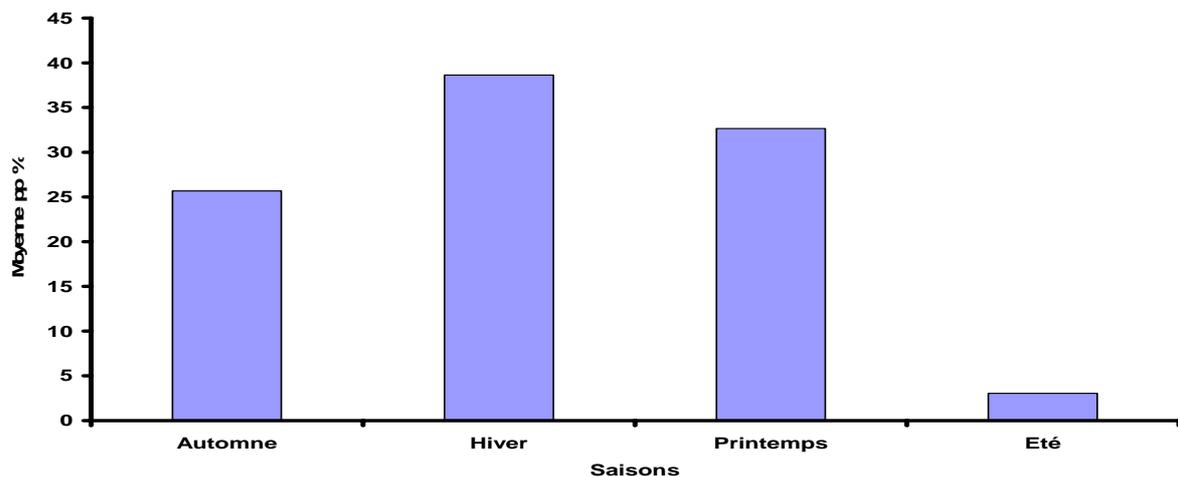


Figure 15 : Histogramme des précipitations saisonnières au niveau de la station de Tlemcen

Les résultats montrent que l'hiver, avec un pourcentage de 38.62%, est la saison la plus pluvieuse alors que l'été correspond à la saison la plus sèche (3.04%).

c) Précipitations moyennes annuelles

Le tableau 5 présente les totaux annuels des précipitations à la station de Tlemcen.

Années	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
PP (mm)	362,4	330,9	341,5	321,8	283,9	311,1	339,3	340,7	273,9	403	226,8	337,6	301,2	438,4	406,7

Tableau 5 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Tlemcen

La moyenne annuelle varie de 226.8mm (2000) à 438.4mm en 2003. Par contre le total annuel de l'année de prélèvement (2006) à la station de Tlemcen était de 494.5 mm. La figure 16 visualise l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période moyenne, les précipitations varient plus ou moins fortement comme le montre le caractère en dents de scie (grossièrement du profil pluviométrique annuel). Le coefficient de variation est de 0.17.

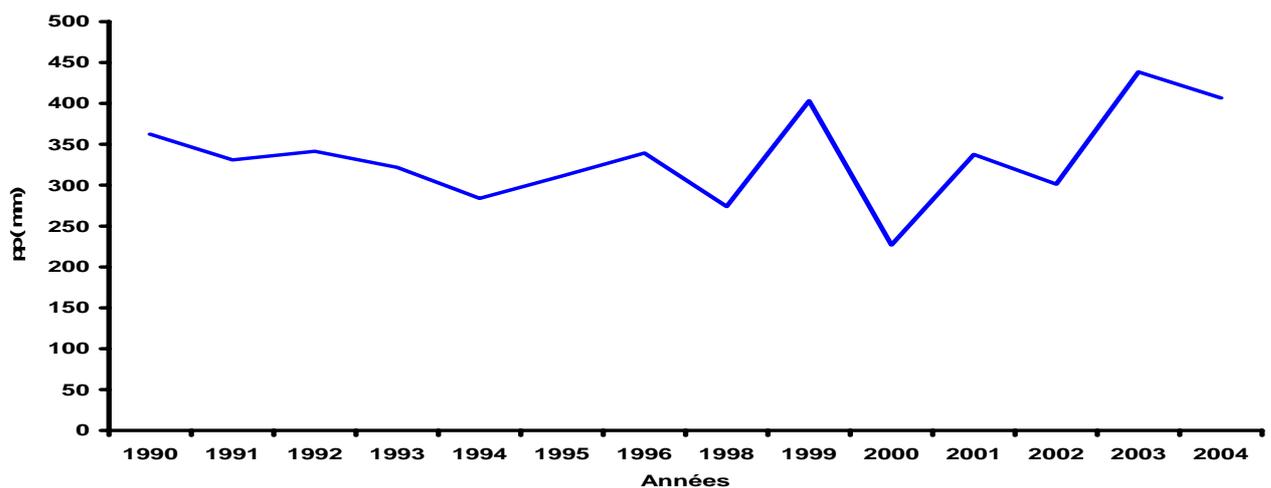


Figure 16 : Courbe des totaux annuels des précipitations (station de Tlemcen) (période 1990-2004)

d) Précipitations nivales

L'enneigement est très important sur les zones montagneuses (plateau de Terny). Sur les plaines, les chutes de neiges sont faibles à nul selon les années.

Faute de station de mesure, il est impossible de calculer l'équivalent en eau.

2. La température

C'est un élément déterminant pour la définition du climat d'une région. C'est aussi un paramètre essentiel pour estimer le déficit d'écoulement. Au niveau du secteur d'étude, seule la station de Zenata a fonctionné durant une période assez longue pour y être prise en compte

(1981-2006). Le tableau 06 résume les variations mensuelles des minima, des maxima et des moyennes qui y ont été relevées.

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUIL	AOU	SEPT	OCT	NOV	DEC
T min.	4.93	5.99	7.65	9.33	12.52	16.37	19.14	19.89	17.44	13.64	9.73	6.72
T max.	16.40	17.51	20.00	21.96	24.88	29.12	32.68	33.25	30.05	26.01	20.96	17.60
T moyenne	10.67	11.73	13.84	15.65	18.70	22.73	25.92	26.56	23.73	19.81	15.34	12.17

Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles à la station de Zenata (1981-2006)

On y observe que :

- **Les minima :** De novembre à avril, ils sont inférieurs à 10°C. La valeur la plus basse se présente en janvier (4.93°C) (Fig. 17).
- **les maxima :** Ils s'échelonnent de 16.40°C en janvier à 33.25°C en août.
- **Températures moyennes :** Si nous considérons les valeurs moyennes des températures, la région est caractérisée par une moyenne annuelle de 12.17°C, une moyenne du mois le plus froid (janvier) de: 10.67°C et une moyenne du mois le plus chaud (août) : 26.56°C

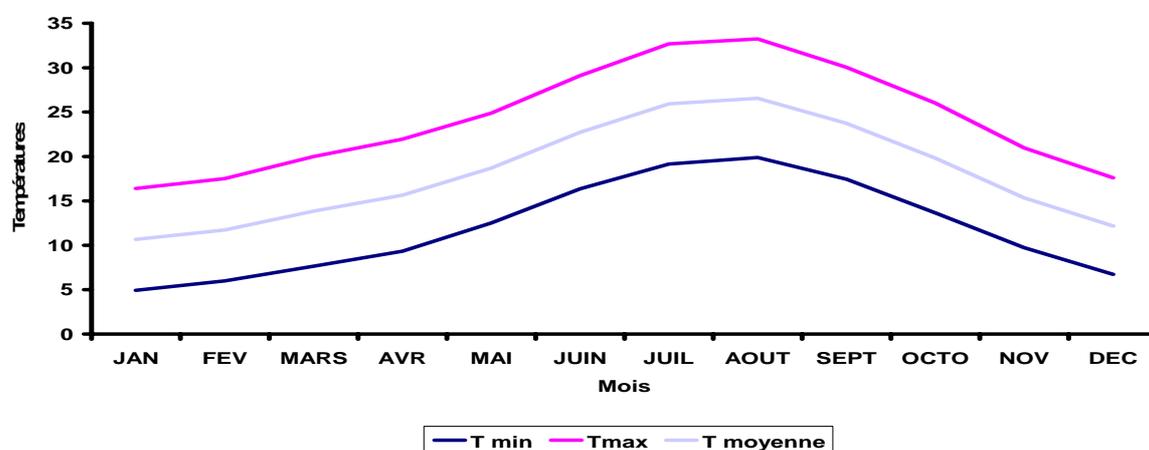


Figure 17: Températures minimales, maximales et moyennes à la station de Zenata (1981-06)

Conclusion

La région jouit d'un régime complexe commandé à la fois par le climat méditerranéen, caractérisé par une saison pluvieuse et un été sec et un climat de montagne avec des avancées sahariennes.

Etude hydrodynamique

Les émergences étudiées se situent dans les formations du Kimméridgien moyen Kimméridgien-supérieur représentées par les calcaires de Zarifet et les dolomies de Tlemcen. Ce sont les sources d'Aïn Fouara supérieure, Aïn Bendou et Aïn El Houtz (Fig. 18)



Figure 18: Localisation des trois sources étudiées

I. Présentation des sources

1- Source de Aïn Fouara supérieure (Fig. 19)

C'est la source captée la plus importante des dolomies de Tlemcen. Elle sert à l'alimentation de la ville de Tlemcen. Elle est située sur le plateau de Lala Setti au point de coordonnées :

$$\begin{cases} X = 133.550 \\ Y = 181.800 \\ Z = 1006 \end{cases}$$

La coupe schématique représentée dans la figure 19 montre que la source apparait à la faveur de la faille SW-NE qui met en contact, d'un côté, les dolomies de Tlemcen et les calcaires de Zarifet et, de l'autre côté les grès de Boumediene.

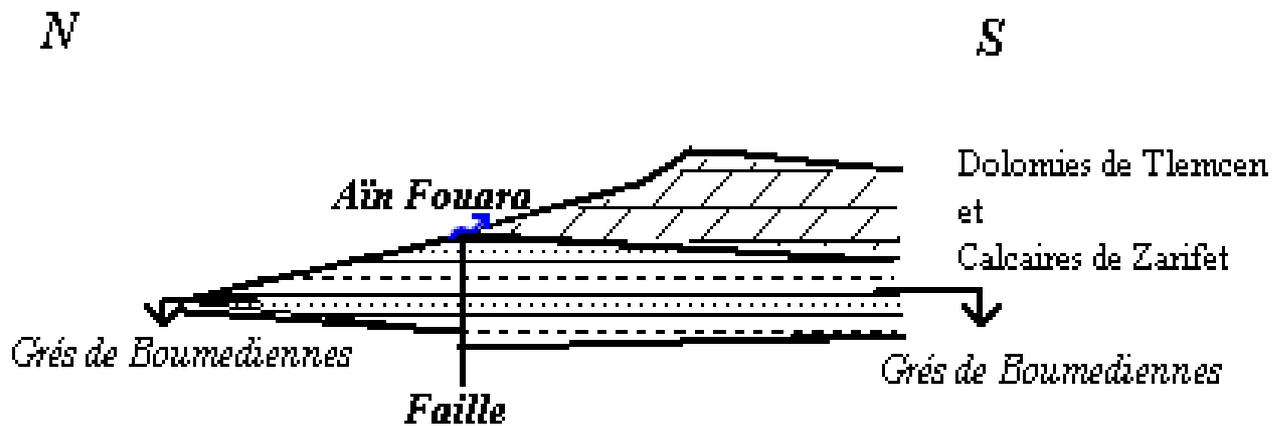


Figure 19 : Coupe schématique d' Aïn fouara supérieure (HAYANE, 1983)

2- Source de Aïn Bendou (Fig.20)

Cette source, située près de Saf Saf, contribue aussi à l'alimentation en eau de la ville de Tlemcen. Ses coordonnées Lambert sont :

$$\begin{cases} X = 136.650 \\ Y = 186.850 \\ Z = 540 \end{cases}$$

N

S

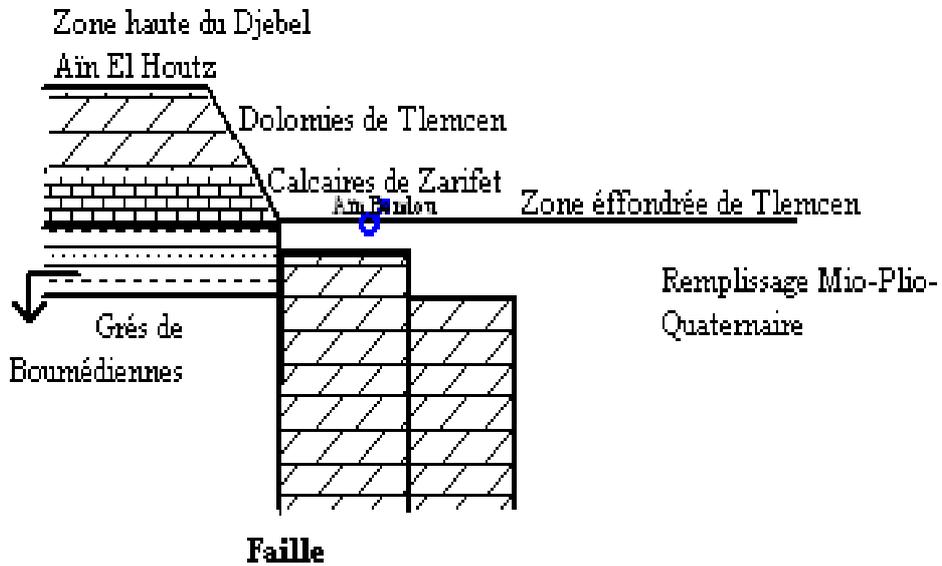


Figure 20: coupe schématique d'Aïn Bendou (HAYANE, 1983)

3- Source de Aïn El Houtz

Elle est située dans le village de Aïn El Houtz, au point de coordonnées. Elle sert à l'alimentation du village.

$$\begin{cases} X = 132.75 \\ Y = 189.075 \\ Z = 517 \end{cases}$$

Cette source apparait à la faveur du contact des dolomies de Tlemcen avec le Mio-Plio-Quaternaire (fig. 21).

N

S

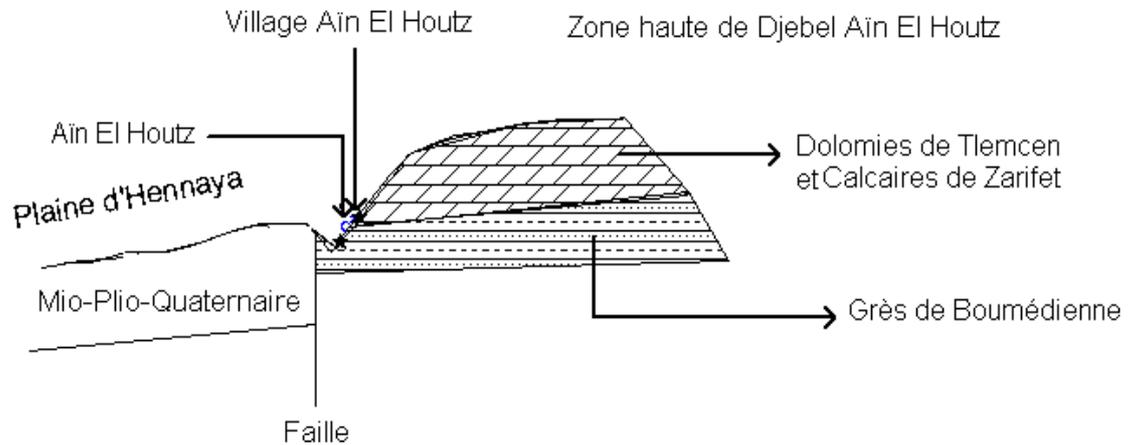


Figure 21: Coupe schématique d'Aïn El Houtz (HAYANE, 1983)

D'après les coupes schématiques, nous pouvons constater que le système aquifère drainé par les trois sources est effectivement de type binaire.

Campagnes de mesures

Le suivi des débits des sources est basé sur le prélèvement d'échantillons d'eau au niveau de leurs griffons respectifs et la mesure de la température et du débit à l'aide d'un micro moulinet. Seule Aïn Bendou dispose d'une station équipée et d'une courbe de tarage qui permet la lecture directe du débit. Pour les deux autres sources une fois la mesure de débit prise avec le micro moulinet, le dépouillement est réalisé à l'aide du logiciel NEWDEP3 qui permet la détermination du débit moyennant la donnée de valeurs collectées sur le terrain

Cette chronique des débits constitue l'information de base du signal hydrologique de sortie. C'est en fait une chronique de hauteur d'eau convertie ensuite en chronique de débit instantané. Ces relevés effectués à pas de temps constant sont réputés être souvent à l'origine de perte d'information importante si ce pas de temps est trop grand par rapport à la dynamique des écoulements. C'est une chronique de débit instantané assimilable à une chronique de débit moyen.

Pour des raisons pratiques, la chronique de débit que nous avons constitué, lors de cette étude, est une chronique de débit hebdomadaire relevée sur un cycle hydrologique.

Les réserves précédentes sur la pertinence d'un pas de temps constant et d'une mesure de débit instantané assimilé à un débit moyen sont à relever pour souligner leurs incidences sur l'analyse et le traitement des données de la chronique.

I. Traitement des données hydrométriques

1. Analyse des débits classés:

Elle permet de mettre en évidence des événements particuliers (fuite, trop plein) à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme. Ces modifications sont mises en évidence à partir de l'ajustement d'une loi statistique liant les classes de débit à leur fréquence d'apparition (Mangin, 1971). L'interprétation des courbes obtenues est basée sur l'identification des anomalies affectant la droite et exprimées par des segments de pente α dans la droite des débits classés définissant ces anomalies. Selon que les ruptures apparaissent dans la partie du graphique relative aux forts ou aux faibles pourcentages, Mangin (1975) distingue plusieurs cas de figures (Fig.22, et tableau 7).

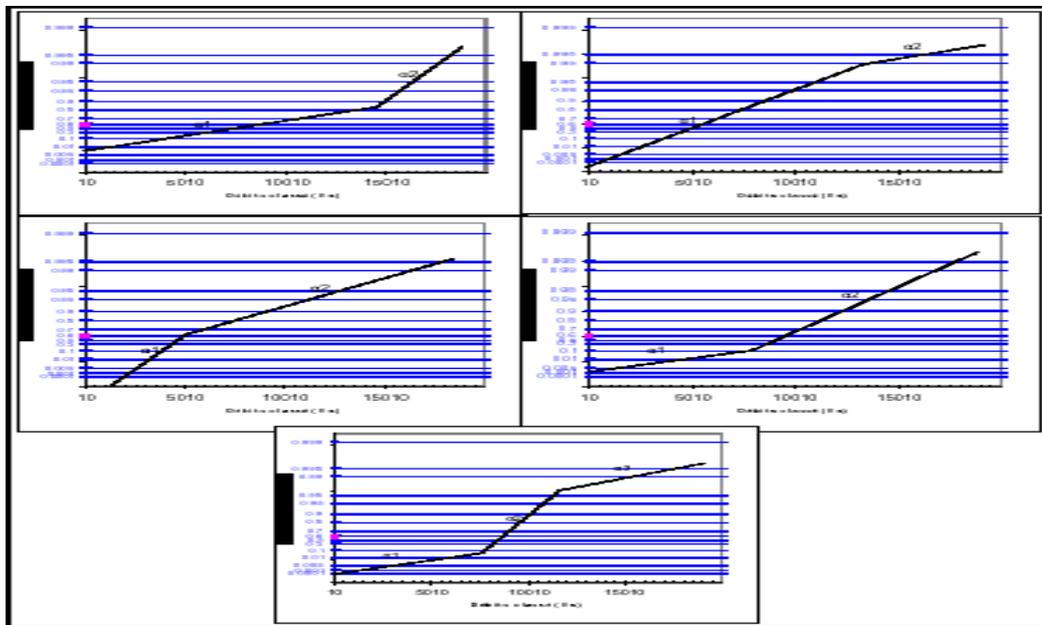


Figure 22: Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débits classés (Marsaud, 1997)

Application de la méthode aux sources étudiées

L'analyse des débits classés appliquée à la chronique des débits du cycle hydrologique (période 12/12/2005 au 16/01/2007) est réalisée avec un même intervalle de classes (5 l/s) pour les 3 sources étudiées.

- Les figures 23, 24 et 25 représentent les droites des débits classés des sources de Aïn Fouara, Aïn Bendou et Aïn El Houtz. Elles montrent une rupture de pente similaire aux faibles pourcentages à 26 l/s, 7 l/s et 14 l/s. Cette configuration est celle du cas C

repertorié par Marsaud (1997). Elle suggérerait des apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur pour soutenir l'écoulement d'étiage (vidange des réservoirs).

Dans les trois cas, il n'existe ni trop plein ni apport d'un autre système. Il y aurait là une illustration du schéma de fonctionnement du système décrit par Plagnes (1997) pour rendre compte de la manière dont les SAD contribuent à l'écoulement en période d'étiage et en cours de recharge.

Cas	Pentes de droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha 2 > \alpha 1$	Forts pourcentages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en fonctionnement de trop - plein - Fuites vers un autre système - Stockage momentané - Fuite ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux
B	$\alpha 2 < \alpha 1$		<ul style="list-style-type: none"> Apports en provenance d'un autre système - La station de jaugeage prend en compte lors des crues des écoulements n'appartenant pas au système
C	$\alpha 2 < \alpha 1$	Faibles Pourcentages	<ul style="list-style-type: none"> - Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha 2 > \alpha 1$		<ul style="list-style-type: none"> - Constitution d'une réserve
E	$\alpha 2 > \alpha 1$ $\alpha 3 < \alpha 2$	Double rupture	<ul style="list-style-type: none"> - Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Tableau 7: interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.

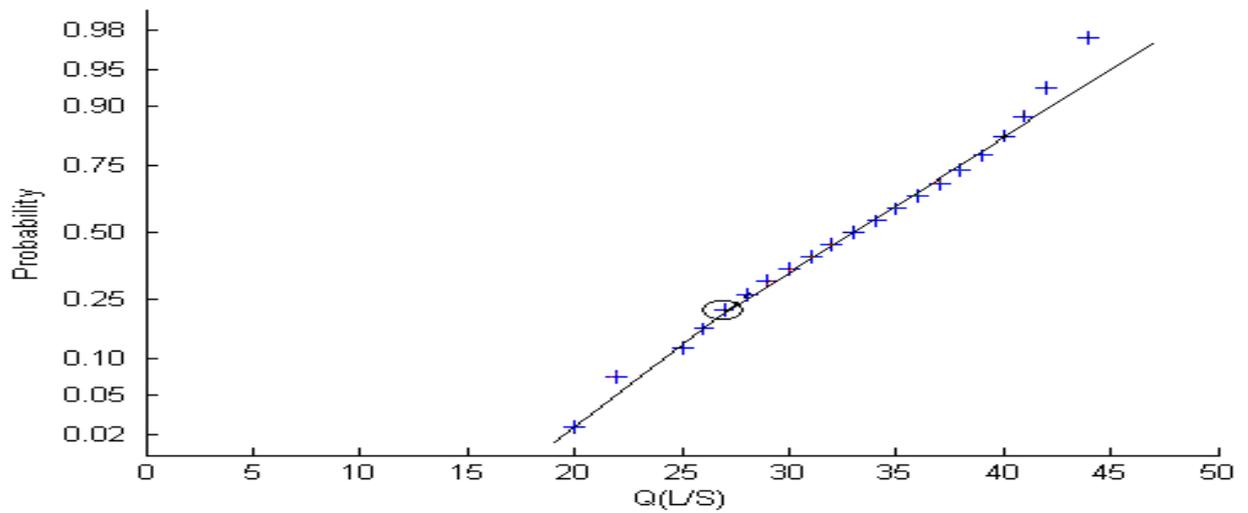


Figure 23: Courbe des débits classés de la source Aîn Fouara

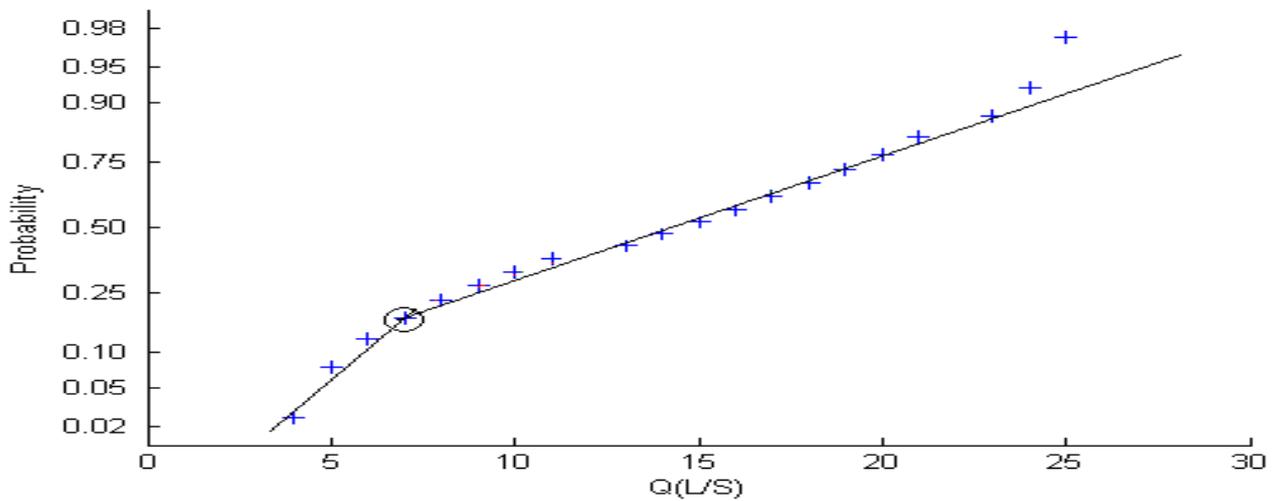


Figure 24: Courbe de débits classés de la source Aîn Bendou

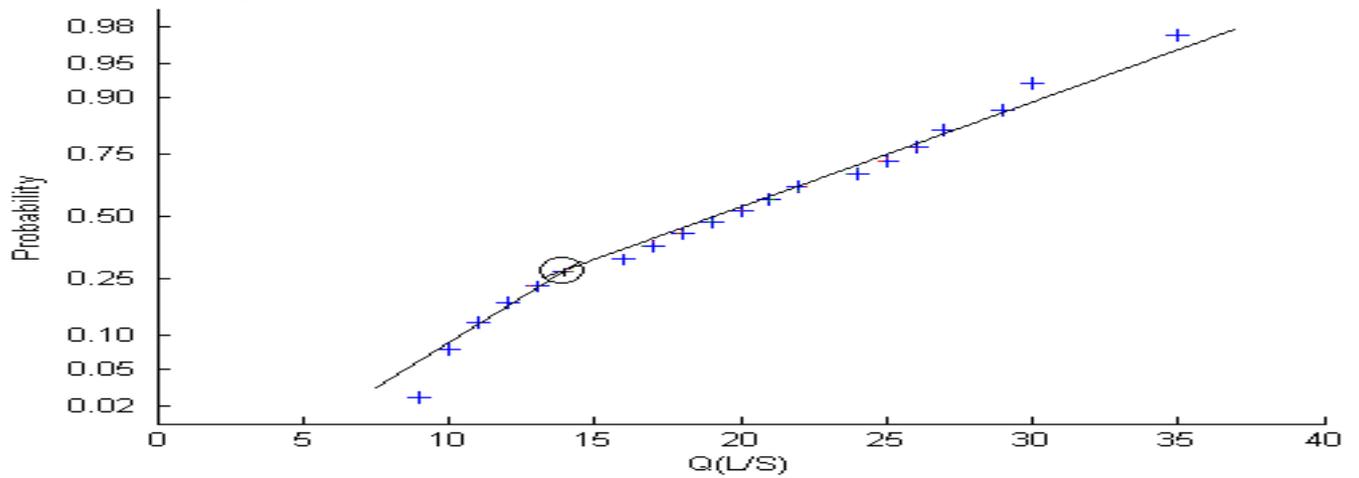


Figure 25: Courbe de débits classés de la source Aîn El Houtz

2. Analyse des courbes de récession:

Partant des travaux de Boussinesq et Maillet définissant la loi de vidange d'un réservoir, de nombreux auteurs ont envisagé son application aux aquifères karstiques sans pour autant qu'un consensus ne soit trouvé. Une revue critique de ces travaux a été réalisée par Mangin (1970a) qui constate que :

- la réalité de l'aquifère karstique ne peut être prise en compte par les schémas utilisés (réseau de fentes et fissures) ;
- la décomposition sous forme de somme d'exponentielles représentant différents réservoirs au sein de la zone noyée n'est valide que si les réservoirs sont indépendants, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

Mangin (1970a) propose alors un modèle constitué de deux réservoirs indépendants, représentant la zone noyée qui se vidange avec un débit Q et la zone d'infiltration qui se vidange avec un débit q (Fig.26) en prenant en compte les caractères particuliers de l'infiltration en milieu karstique. Cette méthode a depuis été employée lors de l'étude de nombreux systèmes karstiques (Marsaud, 1997).

La méthode consiste à distinguer deux phases différentes lors de la récession :

- La première correspond à la vidange de la zone noyée en régime influencé.
- La deuxième décrit la vidange lorsque la pluie a cessé (régime non influencé). La zone d'infiltration n'alimente alors plus la zone noyée.
- Pour la description analytique nous aurons :

$$Q_{(t)} = \Phi_{(t)} + \Psi_{(t)}$$

Avec $\Phi_{(t)}$: vidange de la zone noyée, $\Psi_{(t)}$: comportement de la zone d'infiltration.

La zone noyée est estimée à partir du modèle de Maillet :

$$\Phi_{(t)} = Q_{R0} \cdot e^{-\alpha t}$$

Avec α : coefficient de tarissement et Q_{R0} : point extrapolé de la courbe de tarissement à l'instant de la pointe de crue sans aucune réalité physique (Fig. 27)

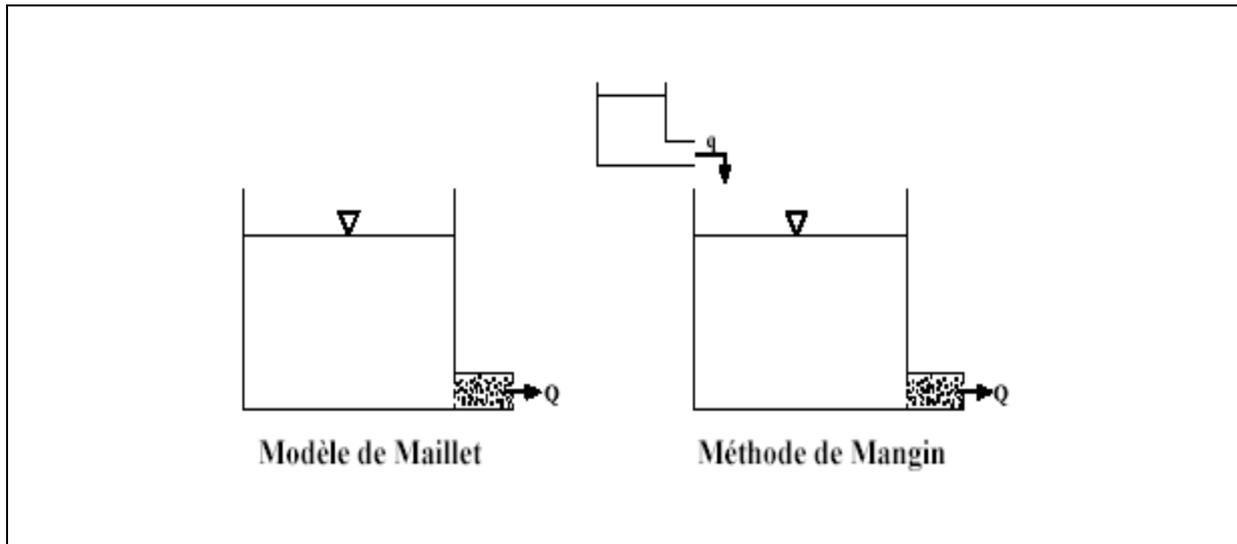


Figure 26: Comparaison entre le modèle de Maillet et le modèle proposé par A. Mangin (1970a) in Marsaud 1996.

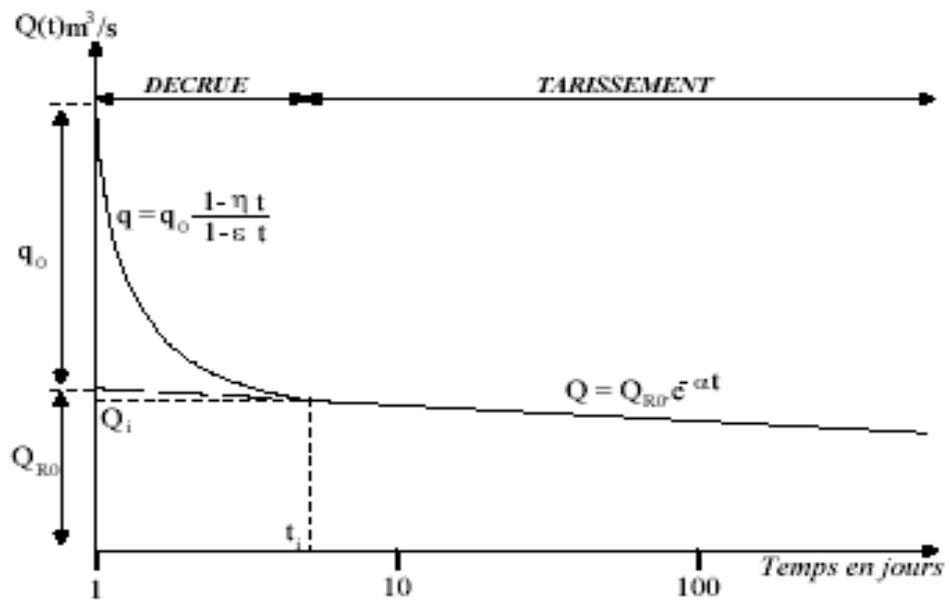


Figure 27: Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (in Marsaud, 1996)

La zone d'infiltration, est décrite par le modèle de Mangin (1970a) :

$$\Psi_{(t)} = q_0 \cdot (1 - \eta t / 1 + \varepsilon t)$$

avec q_0 : débit d'infiltration à l'instant t_0 marquant la pointe de crue, ε : coefficient d'hétérogénéité d'écoulement et $\eta : 1/t_i$ où t_i correspond à l'instant où l'infiltration est nulle ($0 < t_i < 1$).

- α est le coefficient de tarissement. Il rend compte de l'inertie du système. Ses valeurs vont de 10^{-3} j^{-1} pour un système très inertiel mal drainé et peu karstifié à 10^{-1} j^{-1} pour un système peu inertiel très karstifié.
- η , coefficient d'infiltration. Il rend compte de la vitesse d'infiltration. Il varie entre 0 et 1, l'infiltration est d'autant plus rapide que η tend vers 1.
- ε , coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement ; élevé, il caractérise un système où l'infiltration rapide prédomine, alors que lorsqu'il est faible, il caractérise un système où l'infiltration est lente et/ou l'influence d'un aquifère épikarstique.

Dans le but de comparer les systèmes karstiques, on reporte les caractéristiques de leur zone d'infiltration et de leur zone noyée dans la classification établie par Mangin (fig.28) puis modifiée par El Hakim et Bakalowicz (2004) (fig.29) pour prendre en considération les systèmes karstiques du pourtour méditerranéen dont le temps de séjour est, pour certains, supérieur à l'année donc sans commune mesure avec les systèmes de référence envisagés dans la classification de Mangin.

Dans cette dernière représentation,

- le paramètre k donne, maintenant, une mesure du temps de séjour moyen dans la zone noyée au lieu et place d'être l'expression du pouvoir régulateur de l'aquifère et de sa capacité système à stocker les précipitations et à les restituer progressivement au cours du temps. Ce paramètre est toujours défini comme le rapport entre le volume dynamique et le volume de transit inter – annuel. ($Vd = Qi / \alpha \cdot 86400$ avec Qi : débit de tarissement correspondant à t_i) mais la limite arbitrairement fixée à 0.5 pour les karsts fonctionnels à réserves modestes à moyennes est désormais fixée à 1. Bien entendu, la gamme élargie des valeurs de k nécessite, désormais de l'exprimer sur une échelle logarithmique. Elle met en évidence l'existence d'un *domaine 5* correspondant à « *des systèmes karstiques possédant une zone noyée profonde à karstification multiphasée très développée, partiellement ou totalement captive. Ce sont des systèmes karstiques non fonctionnels, dans lesquels les temps de séjour sont pluriannuels à séculaires. L'existence de réseaux de paléo-conduits fait qu'ils peuvent être localement fonctionnels* » (Bakalowicz, 2008).

- i : correspond aux retards à l'infiltration d'un aquifère et il est défini par $i = (1 - \eta t) / (1 + \epsilon t)$. Pour $t = 2$ jours, il se rapporte à la zone d'infiltration et donne une meilleure image de celle-ci.

Une fois i et k reportés sur le diagramme, on situe le point caractéristique de l'aquifère par rapport aux domaines de référence :

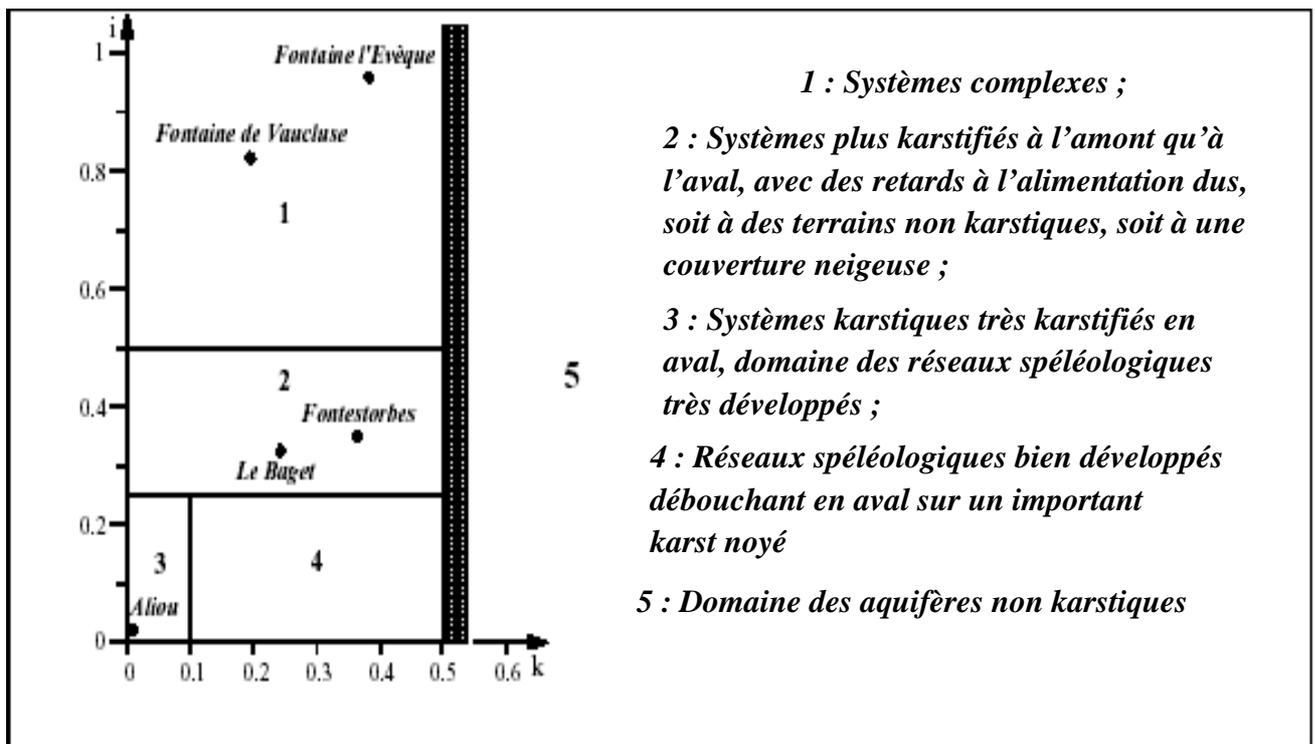


Figure 28: Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975)

Application aux systèmes étudiés

- **La source de Aïn fouara :**

Analyse de la courbe de récession

Pour le cycle hydrologique étudié la distribution des débits en fonction du temps a donné (Fig.29)

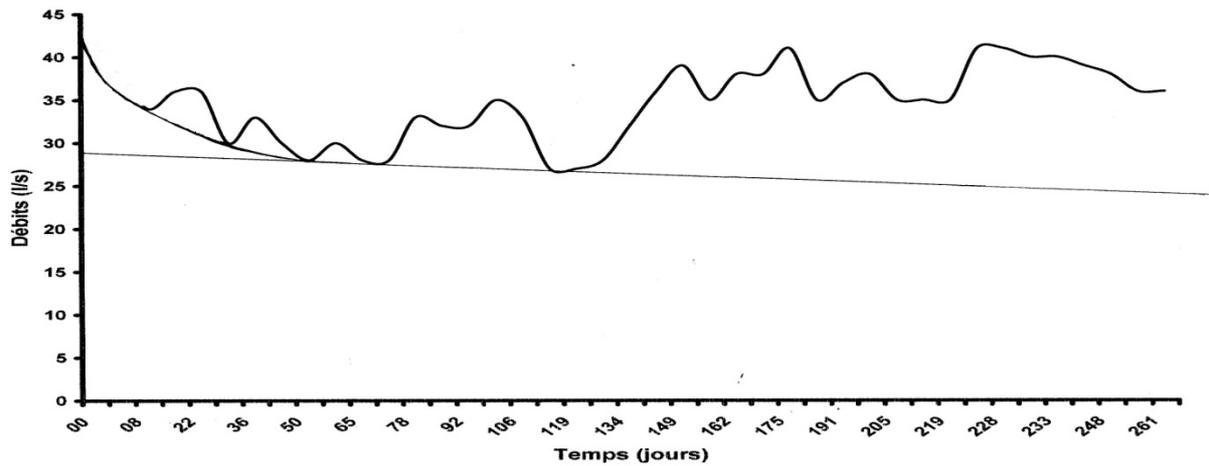


Figure 29: Courbe de récession d'Aïn Fouara pour le cycle hydrologique

Les paramètres obtenus de l'examen de la courbe de la figure 29 donnent :

$$t_i = 50 \text{ jours soit } \eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$$

$$\varepsilon = 0.066 \text{ j}^{-1}$$

$$q_0 = 13.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

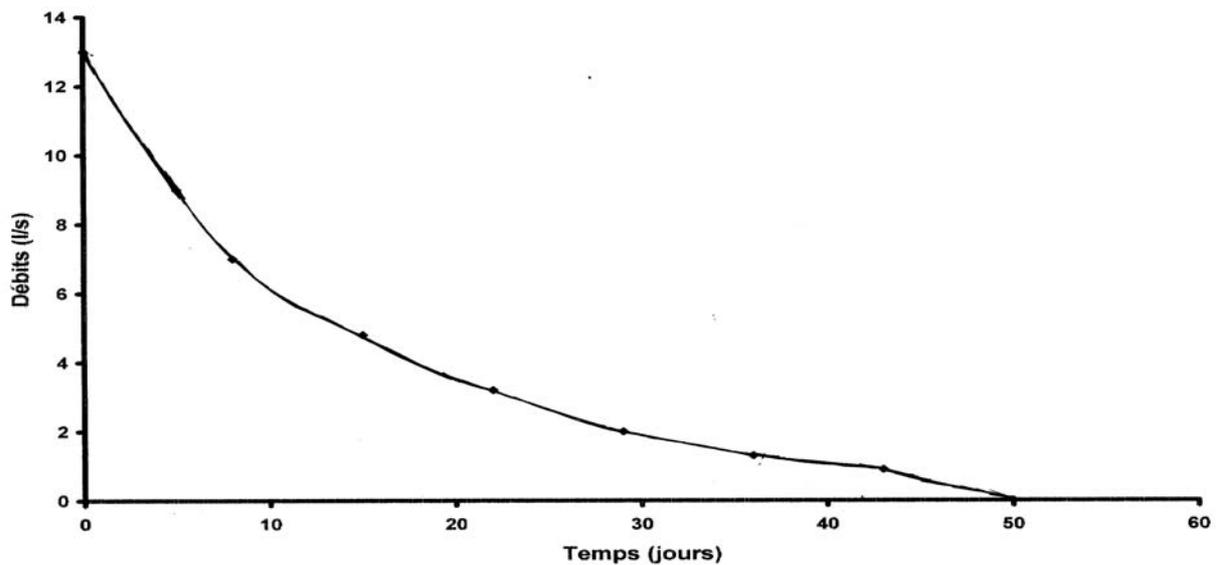


Figure 30: Courbe de décrue de la source Aïn Fouara

Analyse du tarissement par la fonction de Maillet

$$\alpha = 0.0032 \text{ j}^{-1}$$

$$Q_{R0} = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_d = 756.10^6 \text{ m}^3$$

$$i = 0.85$$

$$k = 0.71$$

Le report des valeurs de i et k sur le diagramme de Mangin est représenté sur la figure 35.

➤ **La source de Aïn Bendou**

La même analyse appliquée aux débits de Aïn Bendou donne :

$$t_i = 49 \text{ jours soit } \eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$$

$$\varepsilon = 0.06 \text{ j}^{-1}$$

$$q_0 = 7.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

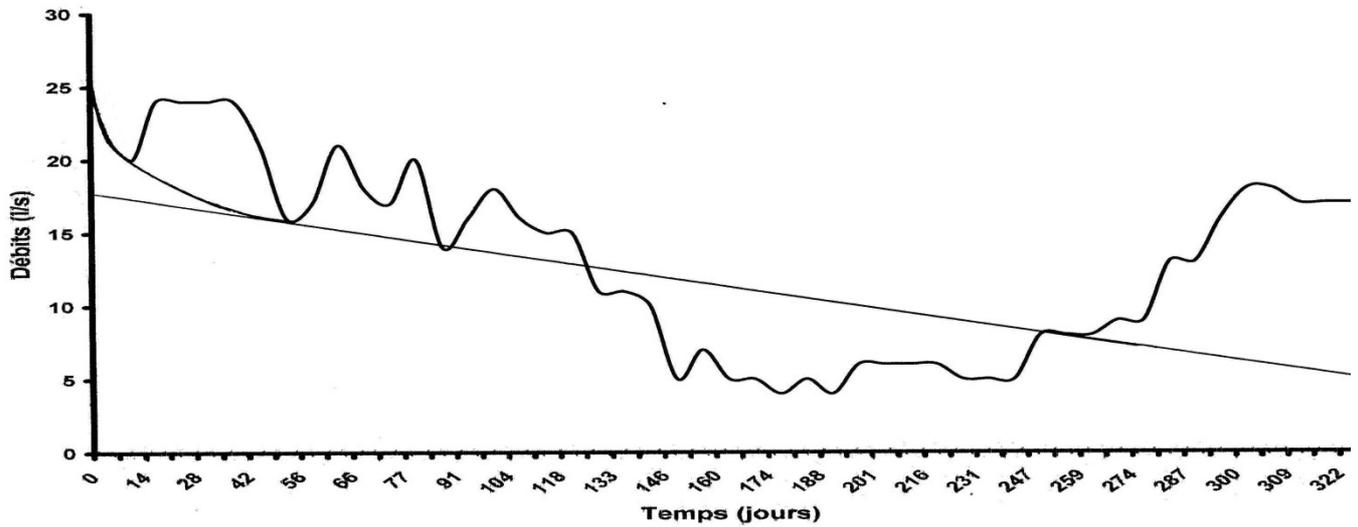


Figure 31: Courbe de récession de la source Aïn bendou.

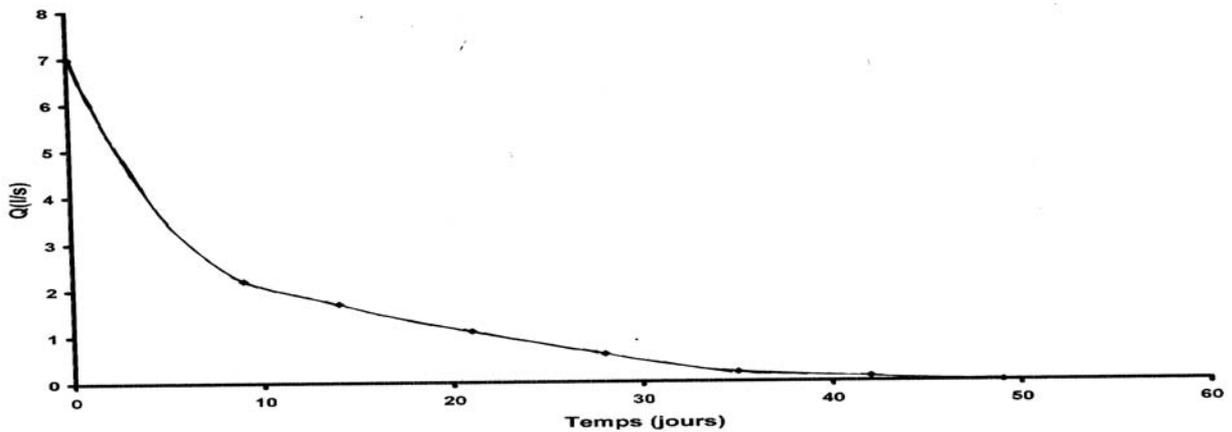


Figure 32: Courbe de décroissance de la source Aïn Bendou

Analyse du tarissement par la fonction de Maillet

$$\alpha = 0.0046 \text{ j}^{-1}$$

$$Q_{R0} = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_d = 337824 \text{ m}^3$$

$$i = 0.85$$

$$k = 0.73$$

Le report des valeurs de i et k sur le diagramme de Mangin est indiqué sur la figure 35.

➤ *Source Aïn El Houtz*

L'analyse sur Aïn El Houtz a donné :

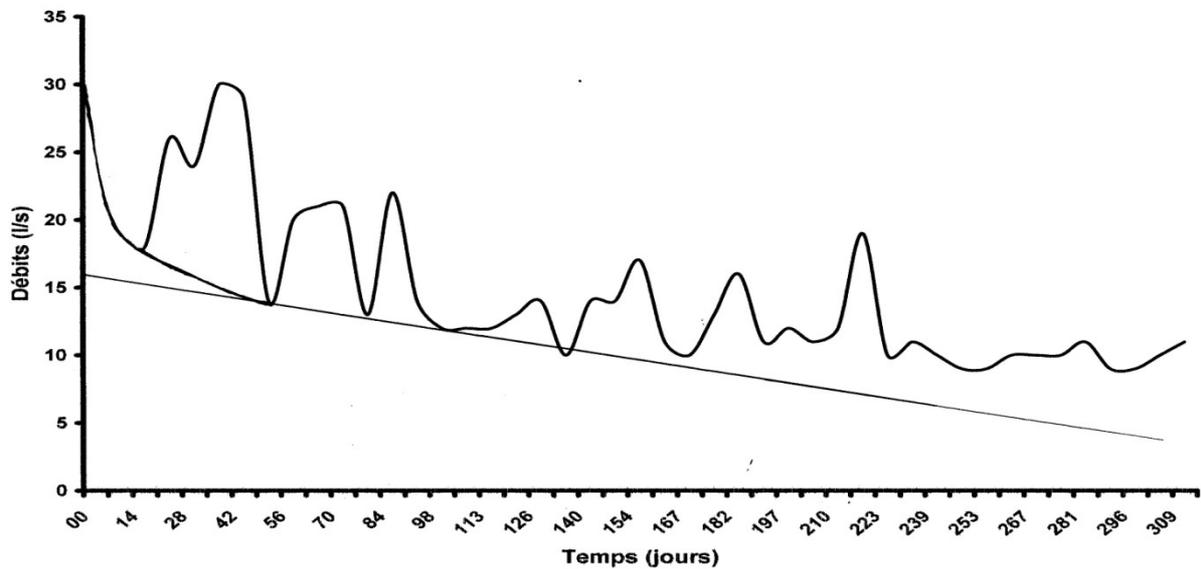


Figure 33: Courbe de récession de la source Aïn El Houtz.

Analyse de la courbe de récession

$$t_i = 48 \text{ jours soit } \eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$$

$$\varepsilon = 0.1043 \text{ j}^{-1}$$

$$q_0 = 14.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Analyse du tarissement par la fonction de Maillet

$$\alpha = 0.00308 \text{ j}^{-1}$$

$$Q_{R0} = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_d = 392727 \text{ m}^3$$

$$i = 0.80$$

$$k = 0.76$$

Le report des valeurs de i et k sur le diagramme de Mangin est indiqué sur la figure 35.

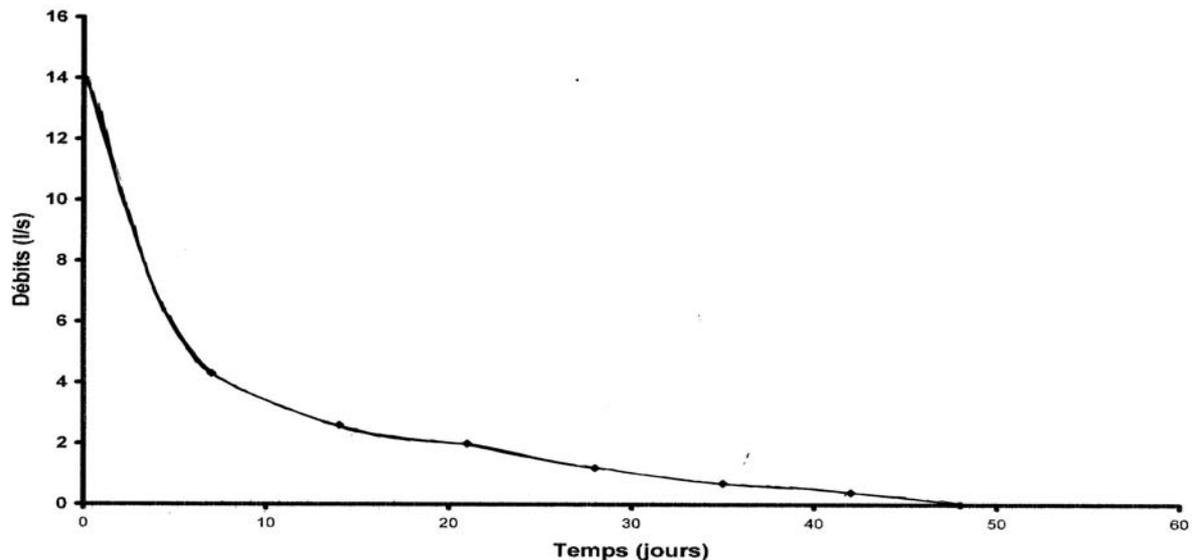


Figure 34: Courbe de décrue de la source Aïn El Houtz

Le tableau 8 récapitule tous les résultats obtenus. Son examen montre que les débits de pointe ne sont pas très élevés. C'est là une conséquence du niveau des précipitations particulièrement faible en moyenne mensuelle au cours de ce cycle hydrologique dans la continuité de ceux qui ont prévalu durant ces dernières décennies. Pour les trois sources les fortes valeurs du coefficient i sont caractéristiques d'une infiltration lente prédominante d'une durée de 50 jours. C'est là une observation compatible tant avec l'ordre de grandeur des valeurs du coefficient η caractérisant la vitesse d'infiltration qu'avec celui du coefficient ε . Elle suggérerait un drainage médiocre de l'aquifère.

Il en est de même des valeurs de k qui, elles aussi, sont très proches mais d'un ordre de grandeur supérieur à la valeur 0.5 communément attendue des systèmes karstiques à fort pouvoir régulateur. Le temps de renouvellement du système est de 259 j, 266 j et 277j. Quant aux faibles valeurs des coefficients de tarissements α , de l'ordre de 10^{-3} j^{-1} , elles sont caractéristiques des exutoires pérennes des régions méditerranéennes dont le tarissement peut durer plusieurs mois. Les volumes dynamiques calculés donnent une idée des réserves mobilisables de la zone noyée. Ces volumes sont modestes et, pour tout dire, sont à hauteur du niveau des précipitations d'une année déficitaire.

Ainsi, la similarité des caractéristiques de ces sources accréditent l'idée qu'elles drainent le même système. Et de fait, la situation des trois sources sur le diagramme de Mangin (fig. 35) serait celle d'un domaine aquifère non karstique. C'est là un résultat en contradiction avec les observations de terrains et les résultats des études antérieures qui témoignent du caractère karstique du système drainés par ces sources. En revanche, sur le diagramme modifié par El Hakim et Bakalowicz (2004), ces sources seraient affectées au domaine 1 qui des systèmes complexes, généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes. Cependant, malgré la distance entre ces 3 sources, les éventuels sous-systèmes attenants ont des comportements très similaires attestés par des caractéristiques quasi-identiques accréditant l'idée d'une homogénéité de la structure d'ensemble.

	Récession	Tarissement
Aïn Fouara	$t_i = 50$ jours soit $\eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$ $\varepsilon = 0.066 \text{ j}^{-1}$ $q_0 = 13.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\alpha = 0.0032 \text{ j}^{-1}$ $Q_{R0} = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_d = 756000 \text{ m}^3$ $i = 0.85$ $k = 0.71$
Aïn Bendou	$t_i = 49$ jours soit $\eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$ $\varepsilon = 0.06 \text{ j}^{-1}$ $q_0 = 7.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\alpha = 0.0046 \text{ j}^{-1}$ $Q_{R0} = 0.018 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_d = 338087 \text{ m}^3$ $i = 0.85$ $k = 0.73$
Aïn El Houtz	$t_i = 48$ jours soit $\eta = 1/t_i = 0.020 \text{ j}^{-1}$ $\varepsilon = 0.1043 \text{ j}^{-1}$ $q_0 = 14.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$\alpha = 0.00308 \text{ j}^{-1}$ $Q_{R0} = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ $V_d = 392727 \text{ m}^3$ $i = 0.80$ $k = 0.76$

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des résultats de l'analyse de l'hydrogramme des sources de Aïn Fouara, Aïn Bendou et Aïn El Houtz.

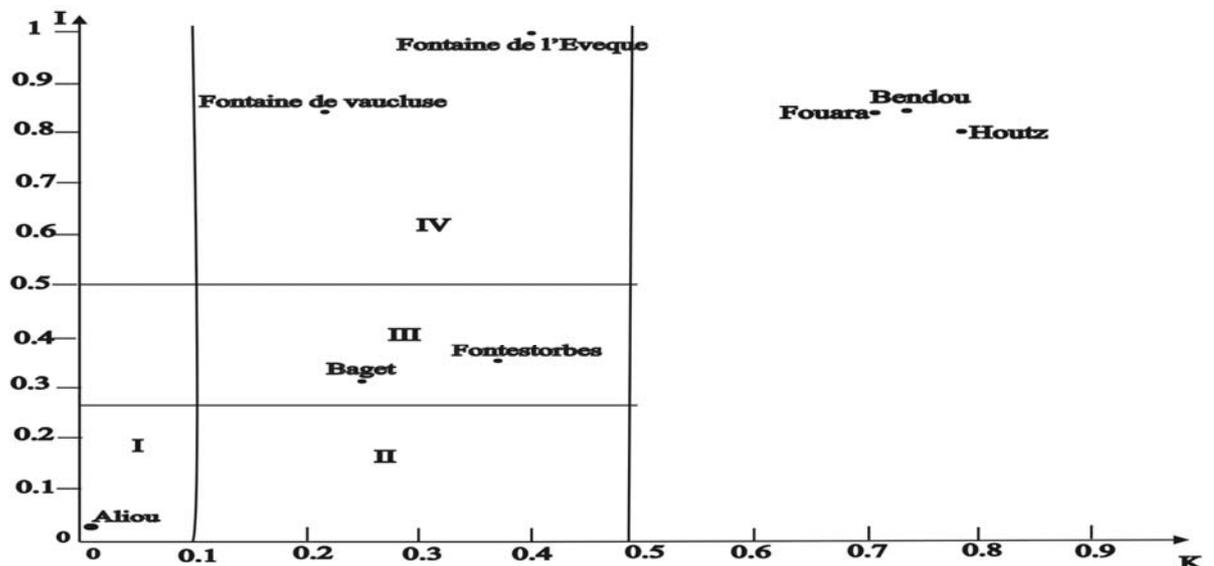


Figure 35 : Position des sources étudiées dans la classification de Mangin, (1975).

LEGENDE

- IV- Systèmes complexes**
- III- Systèmes plus karstifiés en amont qu'en aval avec Des retards dans l'alimentation dus, soit à des terrains Non karstiques, soit à une couverture neigeuse.**
- II- Systèmes très karstifiés en aval, domaine des réseaux Spéléologique très développés.**
- I- Réseaux spéléologiques bien développés débouchant Sur un important karst noyé.**

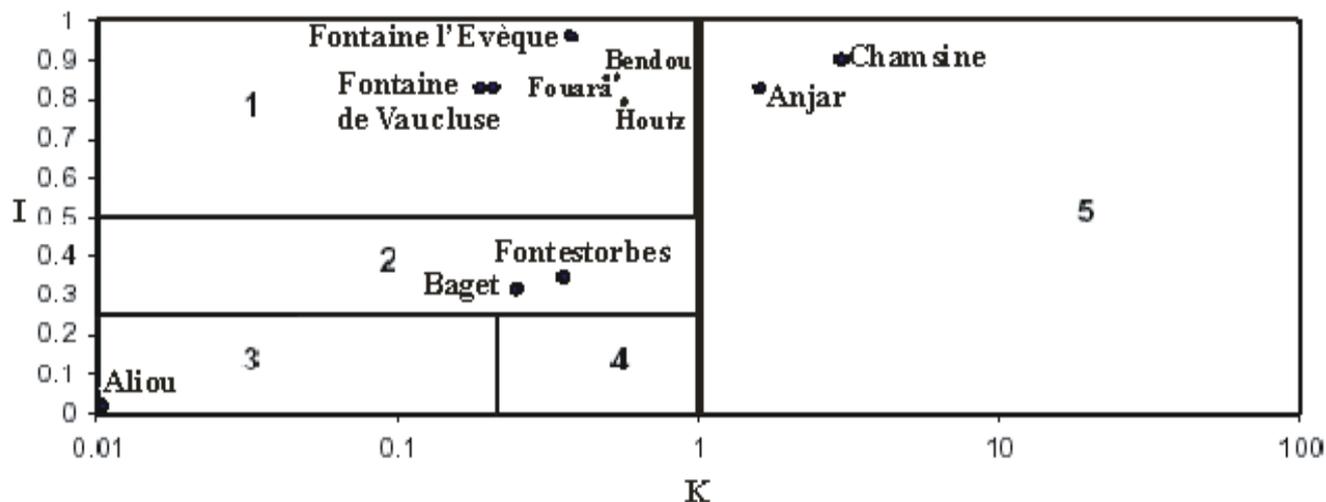


Figure 36 : Classification des aquifères karstiques de France et du proche orient (Bakalowicz, 2008)

3. analyse corrélatoire et spectrale

Ces méthodes illustrent l'approche fonctionnelle du karst pour évaluer et quantifier la structure de drainage du système karstique assimilé à une boîte noire dont la chronique des pluies est l'entrée et la chronique des débits la sortie.

Pour mettre en œuvre, ces méthodes on ne saurait faire l'économie des conséquences numériques de la phase *d'échantillonnage du signal-débit* dont la façon de saisir *régulièrement* ses valeurs équivaut à la capture d'un signal continu à intervalle de temps régulier. Cette étape, nécessaire pour enregistrer, analyser et traiter le signal numériquement, permet d'appréhender les réserves sur le pas de temps à l'aune du théorème de Shannon qui énonce que *seules les fréquences du signal inférieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage seront correctement restituées*. Si ce critère n'est pas respecté, on se trouve en situation de sous-échantillonnage.

Intuitivement, on comprend que, si la fréquence d'échantillonnage est très faible, les acquisitions seront très espacées et, de ce fait si le *signal-débit* original comporte des événements entre deux positions de capture, ils ne seront pas enregistrés. C'est pour cela que la fréquence d'échantillonnage doit être bien choisie, suffisamment grande pour restituer correctement l'ensemble des informations transportées par la chronique, au moins les informations utiles.

Pratiquement, les fréquences harmoniques de la fréquence d'échantillonnage sont privilégiées et il y a de nombreuses pertes. Quant aux fréquences supérieures à la moitié de la fréquence d'échantillonnage, elles induisent un phénomène de recouvrement spectral appelé *repliement*, en sorte que le spectre restitué n'est plus le spectre réel et les analyses faussées. On y remédie à l'aide d'un filtre passe-bas.

C'est dire que la collecte des données se doit d'être entreprise avec une fréquence d'échantillonnage compatible avec les phénomènes du régime hydrologique que l'on souhaite analyser.

Par ailleurs, comme ces signaux sont dépendants du temps, leur représentation sous la forme *temps – amplitude* n'est pas particulièrement adaptée pour le traitement du signal car souvent, l'information recherchée est cachée dans la composante en fréquence. Pour cette raison, on lui préfère le spectre de fréquence qui présente l'avantage de restituer les fréquences contenues dans un signal selon le régime de changement de la grandeur considérée en sorte que :

- une variation rapide se traduit par un changement à haute fréquence
- une variation plus lente s'exprime par une variation à plus basse fréquence
- une absence de variation se traduit par une fréquence nulle.

Ce contenu en fréquence d'un signal s'obtient à l'aide de sa *transformée de Fourier* qui en donne une représentation *fréquence – amplitude* :

$$Q(f) \xrightarrow{TF} q(t)$$

Mais, compte tenu du fait que l'information fournie par cette transformation porte sur tout l'horizon temporel, le temps d'apparition de cette composante de fréquence f importe peu et son effet sera le même sur l'information obtenue. Pour cette raison, la transformée de Fourier n'est pas appropriée pour l'analyse des signaux *non-stationnaires*. Elle peut cependant être utilisée pour ce type de signaux si on ne s'intéresse qu'aux *composantes spectrales qui existent dans le signal et non aux instants où elles apparaissent*.

Tel est le cas à ce stade de notre analyse des chroniques des signaux pluies-débits.

Ces méthodes permettent d'obtenir des informations sur le fonctionnement d'un système karstique assimilé à un filtre selon l'organigramme de la figure 37. L'interprétation des résultats est réalisée sur la base de la classification des systèmes karstiques de Mangin (1984a). Elle est basée sur les données des paramètres suivants :

- l'effet mémoire : obtenu du corrélogramme simple ; et correspond à la valeur de k lorsque $r_k = 0.2$. L'effet mémoire est important lorsque le filtrage introduit par le système est important
- fréquence de coupure : c'est la fréquence pour laquelle la densité de variance devient nulle ou négligeable.
- Le temps de régulation (t_i) : définit la durée d'influence du signal d'entrée, il est égal à l'ordonnée maximale du spectre divisée par 2 ; plus le volume des réserves est grand et moins le système est karstifié.
- M : Troncature, durée maximum pour le calcul des coefficients d'autocorrélation, elle doit être égale au tiers du nombre d'éléments de la période d'étude.

- K : pas de temps pris en considération pour l'étude, il peut être soit journalier, hebdomadaire, mensuelle,.....

Selon ces paramètres, la classification du tableau 9 distingue :

- Les aquifères à degré de karstification très élevée (type Aliou), définis par un effet mémoire faible, une bande spectrale très large supérieure à 0.30 et un hydrogramme unitaire pointue et peu étalé.
- Les aquifères à degré de karstification faible (type Torcal) où les réserves sont importantes avec un temps de régulation très long, un hydrogramme unitaire arrondi et très étalé et une bande spectrale très étroite (0.05).

Entre ces deux importants pôles, s'intègrent :

- Le type Baget, caractérisé par un effet mémoire petit, un temps de régulation plus grand que celui d'Aliou et un hydrogramme unitaire moins pointue
- Le système de Fontestorbes avec un effet mémoire important, un temps de régulation grand et un hydrogramme unitaire arrondi et très étalé.

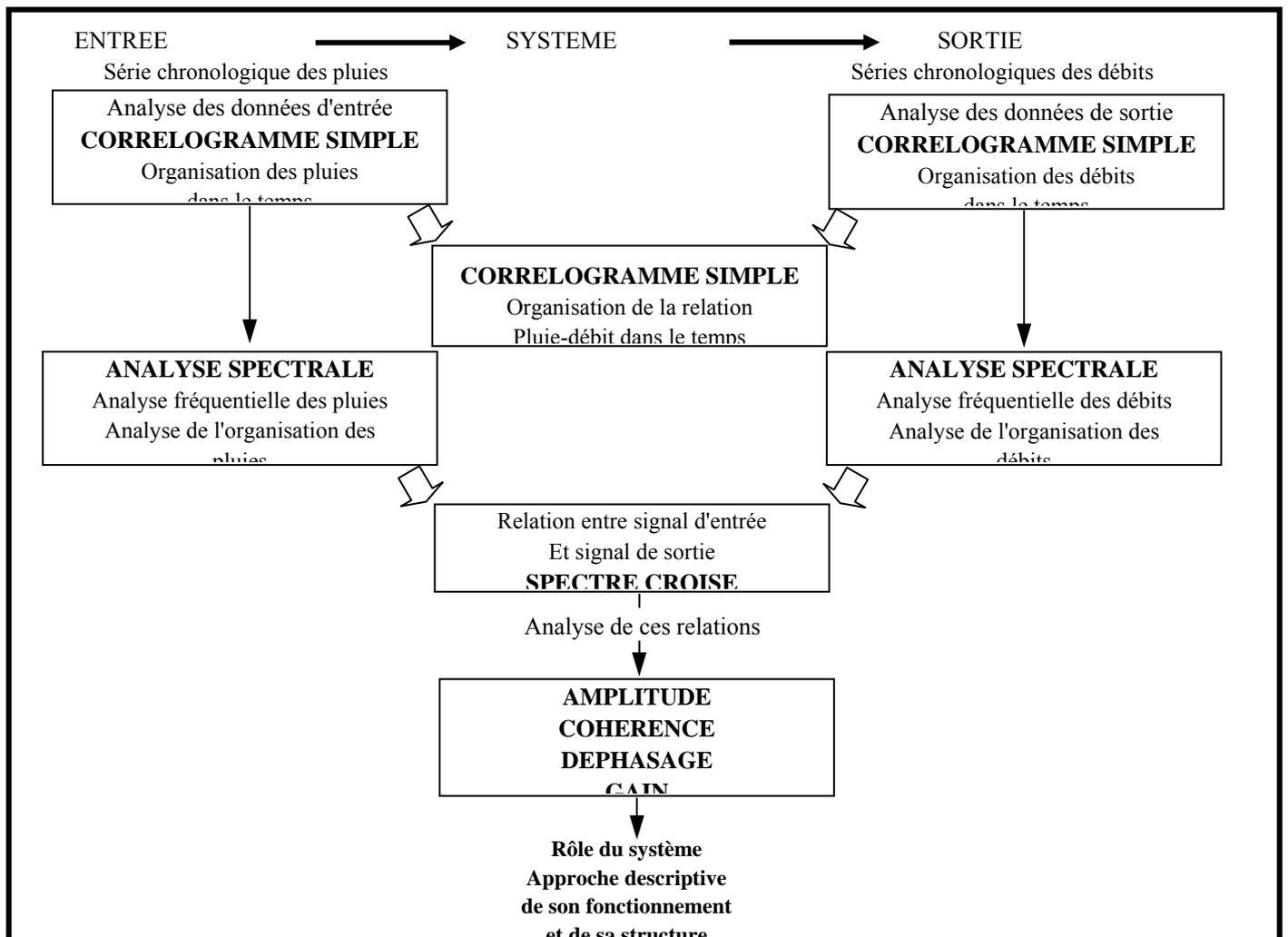


Figure 37: Organisation des analyses corrélatoire et spectrale (d'après A. MANGIN).

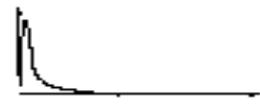
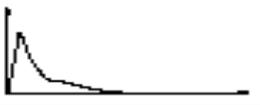
TYPES	EFFET MEMOIRE ($R_k = 0.2$)	FREQUENCE DE COUPURE	TEMPS DE REGULATION	REPOSE IMPULSIONNELLE
<i>ALIOU</i>	Réduit (5 jours)	Très haute (0,30)	10 à 15 jours	
<i>BAGET</i>	Petit (10 à 15 jours)	Haute (0.20)	20 à 30 jours	
<i>FONTESTORBES</i>	Grand (50 à 60 jours)	Basse (0.10)	50 jours	
<i>TORCAL</i>	Considérable (70 jours)	Très basse (0.05)	70 jours	

Tableau 9: Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse corrélatoire et spectrale.

Quatre autres fonctions complètent l'analyse :

- Fonction d'amplitude croisée qui affine le choix de la fréquence de coupure de sorte que la covariance soit négligeable à partir de la fréquence de coupure déterminée sur le spectre.
- Fonction de déphasage pour calculer la fréquence de coupure c'est-à-dire pour les plus petits événements influençant le système.
- Fonction de cohérence pour caractériser la linéarité et la stationnarité du système.
- Fonction du gain pour quantifier fréquence par fréquence le filtrage induit par le système.

Enfin, nous pouvons dire que l'analyse simple des chroniques de pluies et débits conduit à la description et à l'identification des composantes des chroniques. Quant à l'analyse croisée, elle étudie la relation pluie - débit.

Application aux systèmes étudiés

Pour la caractérisation du fonctionnement des trois sources, l'analyse est basée sur les données des pluies et débits enregistrées durant la période d'échantillonnage. Le traitement des chroniques a été fait sur MATLAB7 avec la macro du logiciel STOCHASTOS.

L'analyse corrélatoire et spectrale a été appliquée sur la chronique du cycle d'échantillonnage (analyse à court terme). ($k = 7$; $m = 20$).

➤ *La source de Aïn fouara :*

Analyse du signal d'entrée : la pluie

L'analyse a porté sur la pluie hebdomadaire enregistrée à Lala Setti durant le cycle de prélèvement (du 12/12/2005 au 16/01/2007) : court terme.

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

Le corrélogramme a une allure aléatoire à partir de la deuxième semaine, et le spectre de la pluie est ininterprétable en deçà de 15 jours suivant les paramètres choisis (m et k)

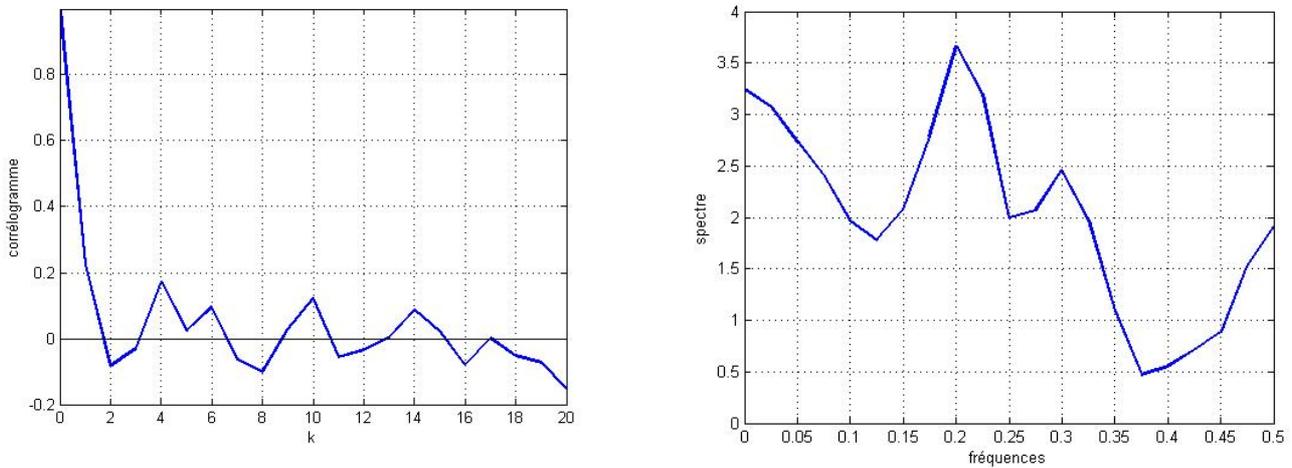


Figure 38: Corrélogramme simple et spectre de densité de variance des pluies à la station Lala Setti relatif au cycle d'échantillonnage

Analyse du signal de sortie : les débits

L'analyse a portée sur les débits enregistrés durant le cycle hydrologique

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

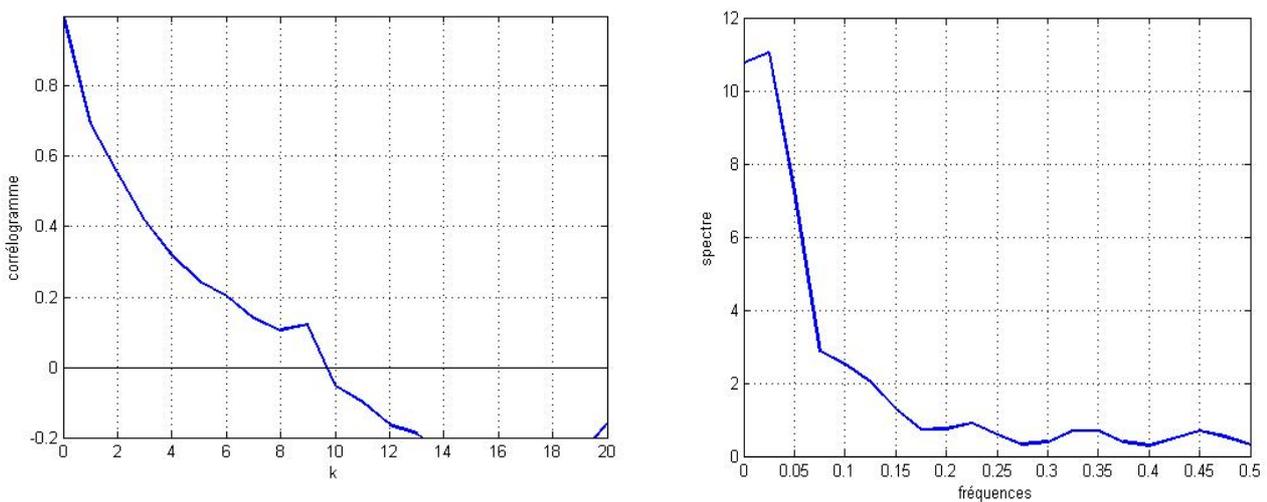


Figure 39: Corrélogramme simple et spectre de densité de variance des débits de la source Aïn Fouara supérieure relatif au cycle hydrologique.

Avec un pas d'échantillonnage hebdomadaire, aucune information, en deçà de 15 jours ne peut être déduite de l'analyse corrélatrice des pluies ou des débits. Pour $r_k = 0.2$, la valeur de l'effet mémoire serait donc de 6 semaines = 42 jours !!!

Le spectre est forcément étalé avec un pas d'échantillonnage hebdomadaire.

*** corrélogramme croisé : (Fig. 40)**

Le corrélogramme croisé est un moyen de tester l'hypothèse " la fonction d'entrée est responsable de celle de la sortie". Le pic de la réponse impulsionnelle est d'autant plus accusé que le système est bien drainé ; pour les systèmes mal drainés la réponse est plus étalé.

Selon Marsaud (1996) la réponse du système à une impulsion pluie se fait selon deux modalités :

- une fonction transmissive correspondant au pic, signe d'un drainage bien développé
- une décroissance plus lente signe d'un effet capacitif.

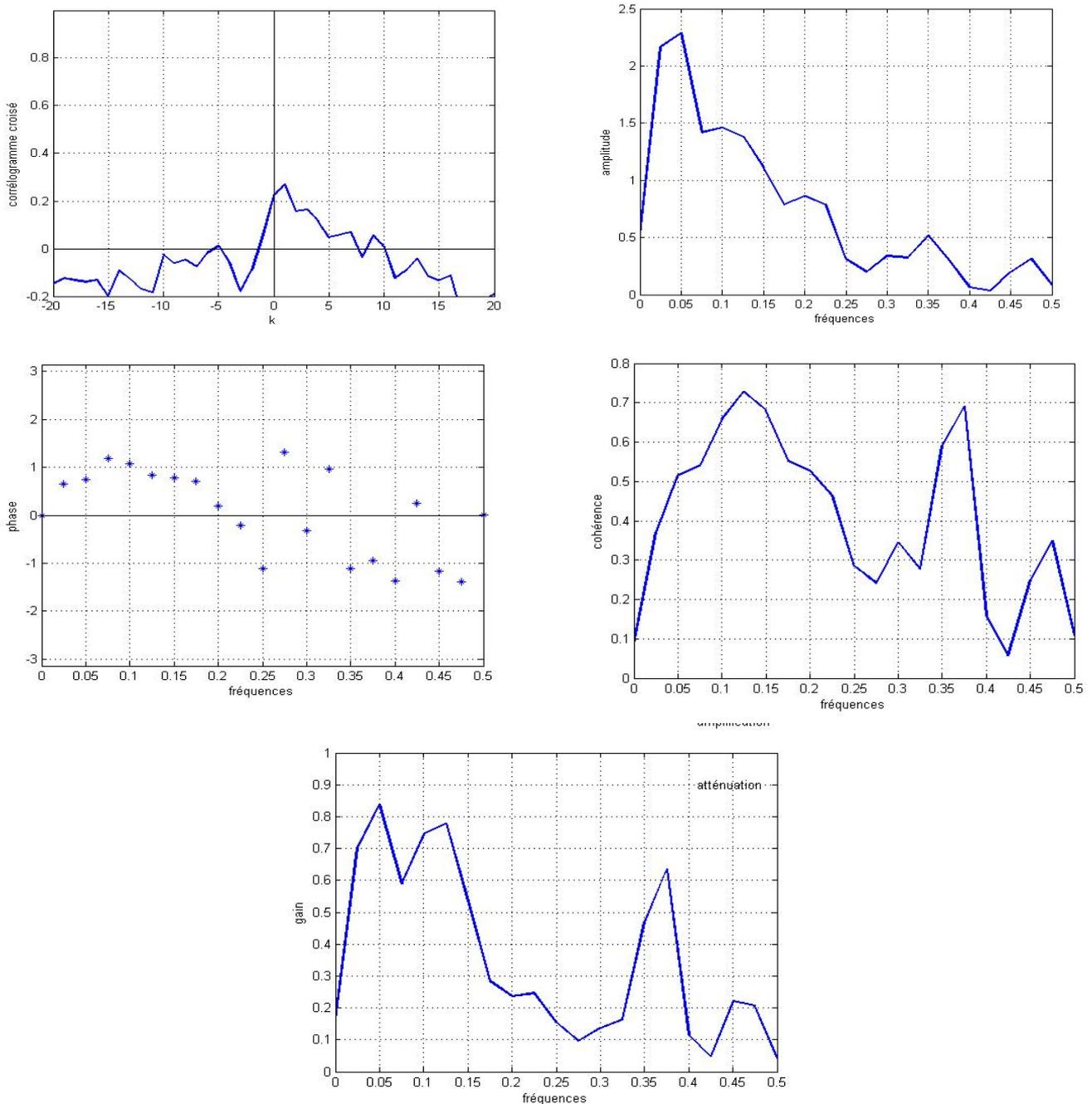


Figure 40: Analyse de la corrélation croisée de la source Aîn Fouara supérieure

L'ordre de grandeur de ce pas, 7 jours, biaise le corrélogramme croisé qui est alors forcément étalé puisque la réponse impulsionnelle, i.e. l'hydrogramme unitaire, sensée être représentée fait référence à une durée incompatible avec sa définition qui est une réponse par une pluie instantanée

➤ **Source Aïn Bendou :**

Analyse du signal d'entrée : la pluie

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

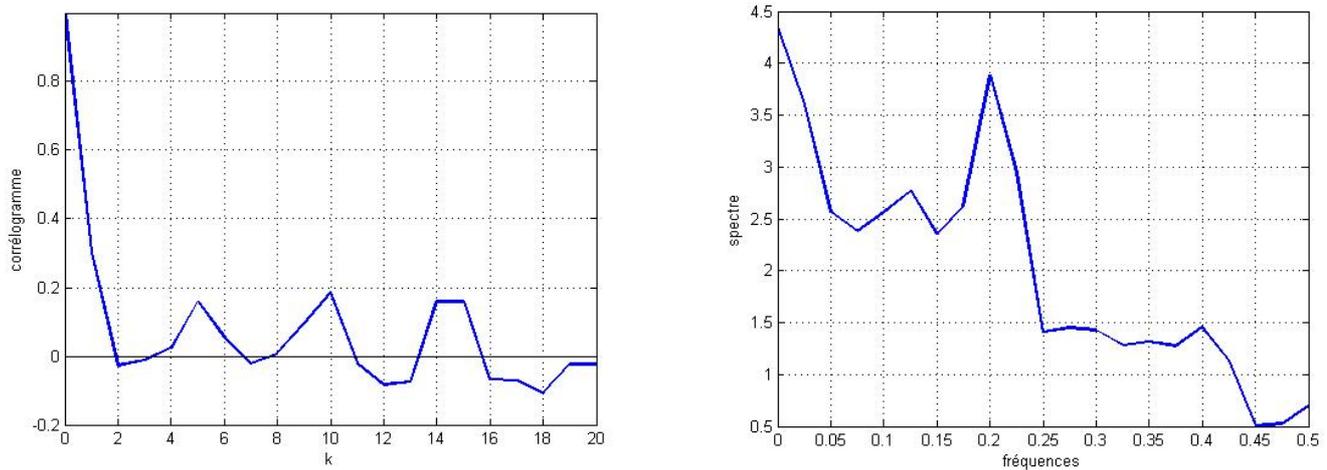


Figure 41: Corrélogramme simple des pluies à la station de Tlemcen relatif au cycle d'échantillonnage.

Pour Aïn Bendou, le corrélogramme simple des pluies à la station de Tlemcen montre un caractère quasi aléatoire après la deuxième semaine. tandis que le spectre de densité de variance, il est non significatif pour $f > 0.07$.

Analyse du signal de sortie : Les débits

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

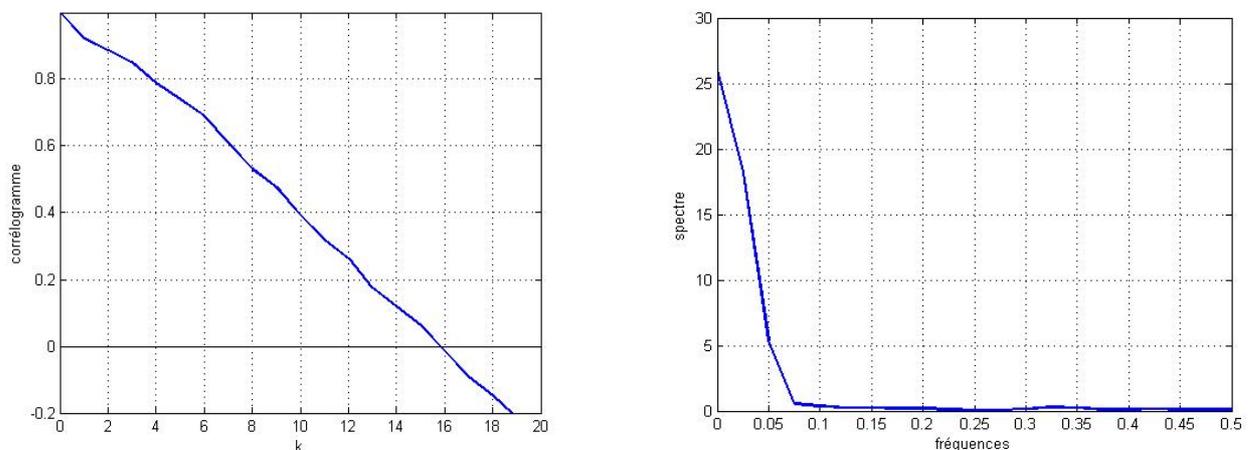


Figure 42: Corrélogramme simple des débits d'Aïn Bendou relatif au cycle d'échantillonnage

Comme pour Aïn Fouara, le pas hebdomadaire n'a rien révélé, dans le corrélogramme pour $rk = 0.2$ l'effet mémoire est de 13 semaines (91 jours).

*** corrélogramme croisé (Fig. 43)**

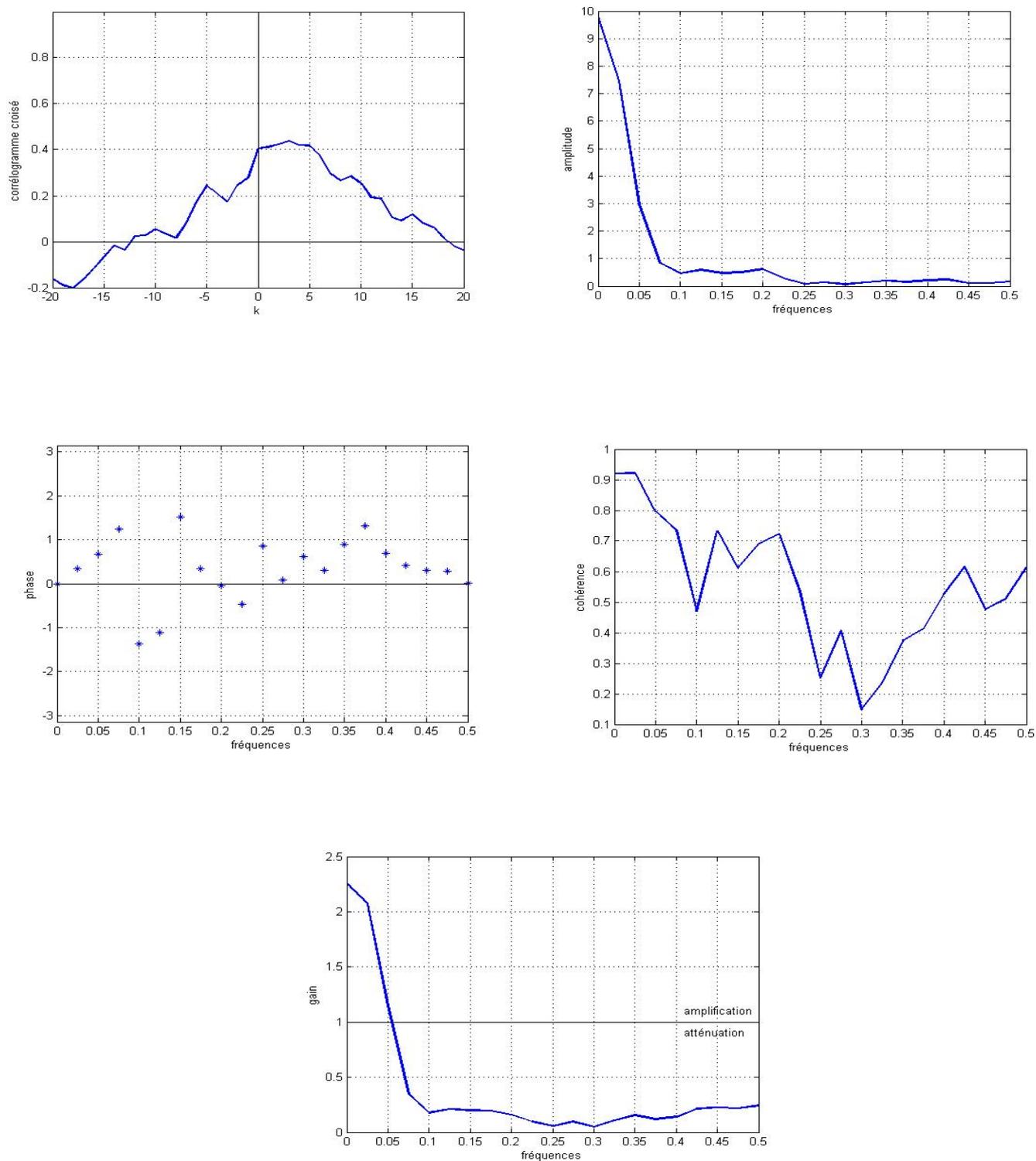


Figure 43: Analyse de la corrélation croisée d'Aïn Bendou à court terme

Le corrélogramme croisé est étalé Le pas hebdomadaire choisi pour l'analyse croisée ne nous permet pas d'interpréter pour $f > 0.07$.

➤ *Source Aïn el houtz*

Analyse du signal d'entrée : la pluie

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

Le corrélogramme et le spectre de densité de variance des précipitations offrent une allure quasi aléatoire au-delà de la deuxième semaine

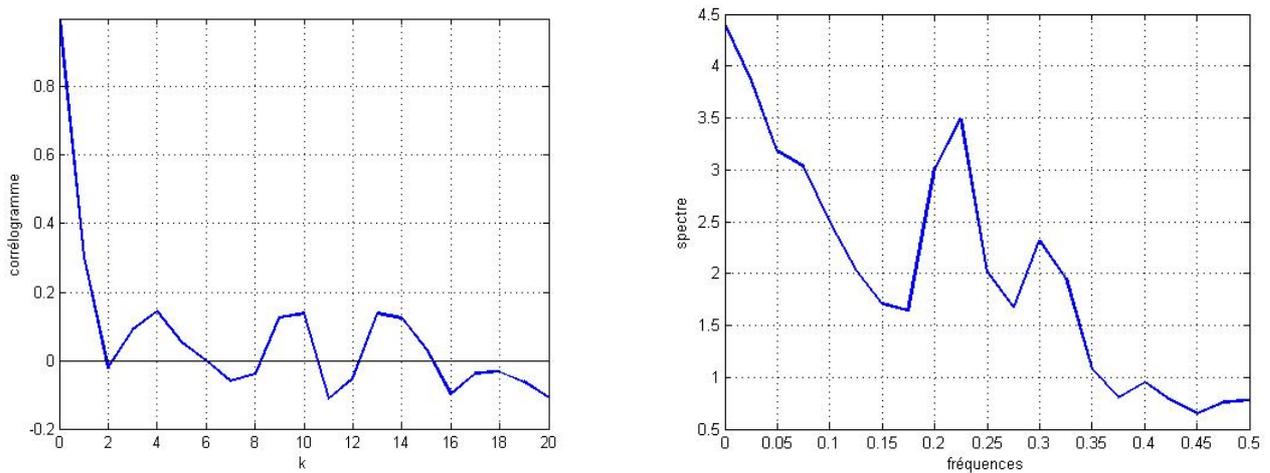


Figure 44: Corrélogramme simple de la pluie à la station de Tlemcen relatif au cycle d'échantillonnage

Analyse du signal de sortie : les débits

Le corrélogramme simple et spectre de densité de variance

Pour Aïn El Houtz l'effet mémoire est de 11 semaines (77 jours) comme pour celui d'Aïn Bendou et le spectre est étalé.

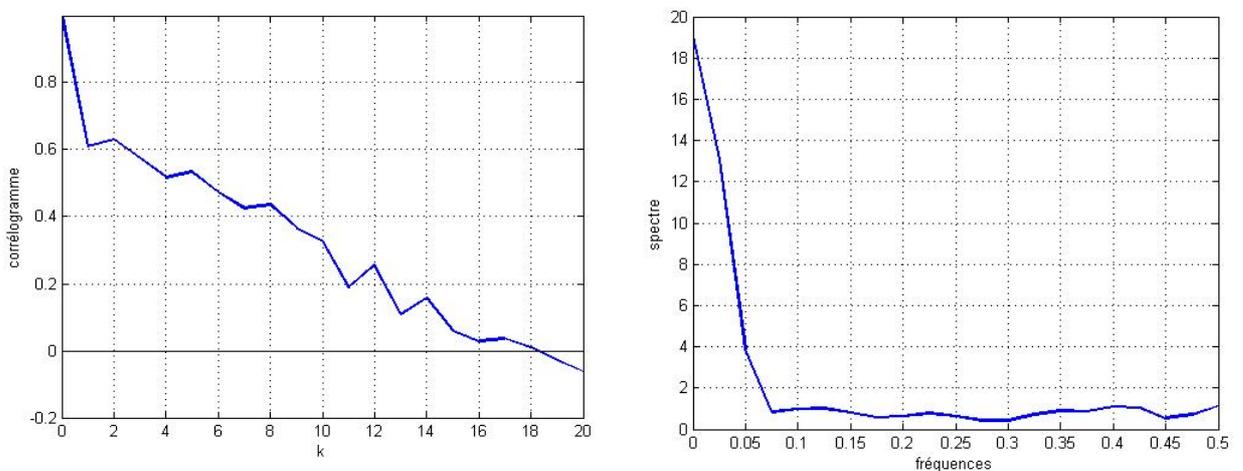


Figure 45: Corrélogramme simple et spectre des débits à court terme

*** Corrélogramme croisé (Fig. 46)**

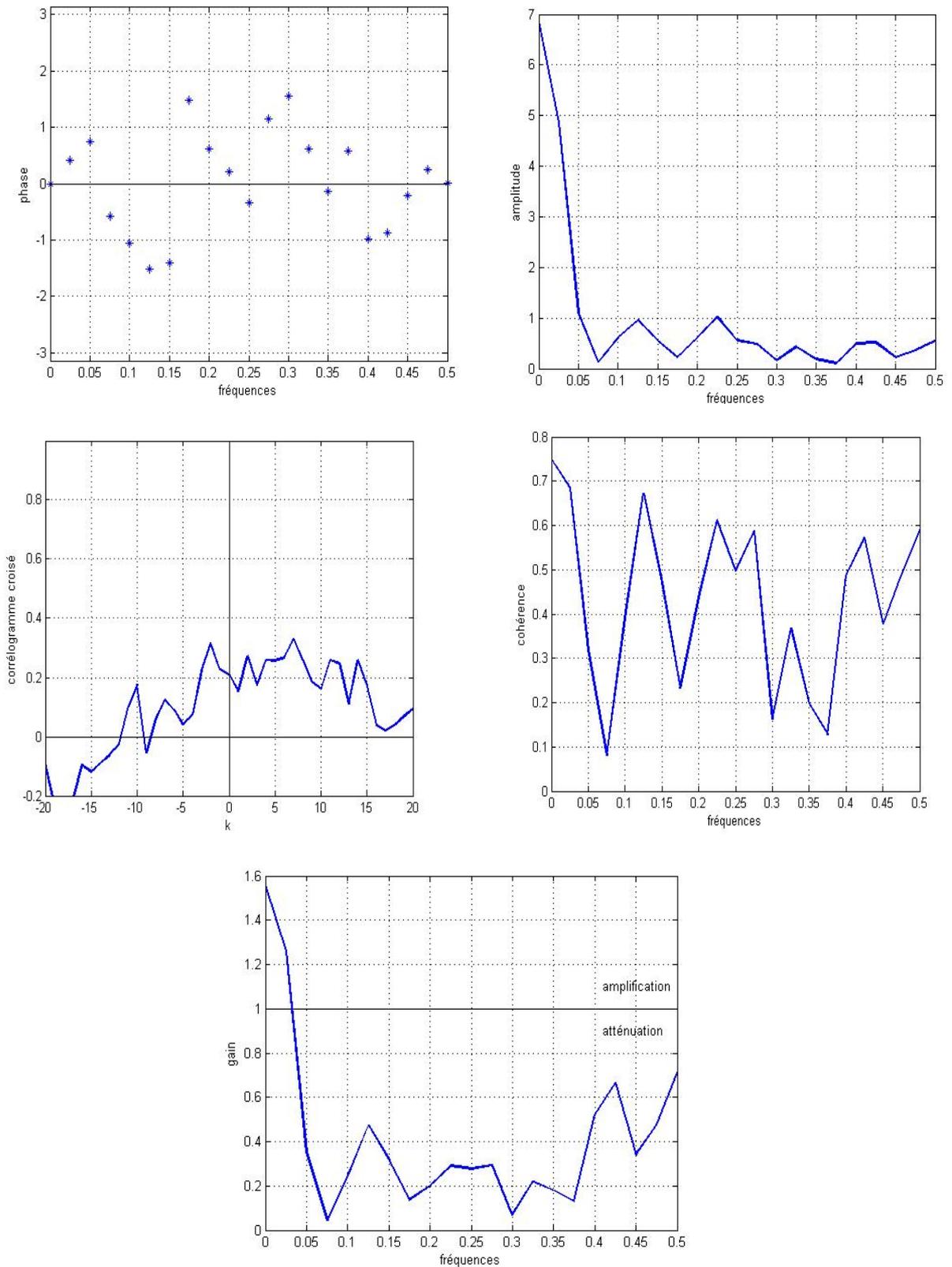


Figure 46: Analyse croisée de la source Aïn El Houtz à court terme.

L'analyse croisée d'Aïn El houtz est ininterprétable car les données hebdomadaires ne donnent pas de bons résultats et pour notre cas d'étude pour les trois sources l'analyse corrélatrice est insignifiante au delà de 15 jours, et l'analyse spectrale est incompatible avec sa définition.

Conclusion

L'étude hydrodynamique a permis de confirmer que les sources étudiées n'offraient ni trop plein, ni fuite vers un autre système. Etant donné les faibles précipitations enregistrées durant le cycle hydrologique, aucune crue n'a été observée au pas hebdomadaire. L'estimation des paramètres des récessions à ce pas est néanmoins grossière. Il n'est pas exclu qu'au pas de temps journalier des différences relevées dans l'estimation de ces paramètres modifient l'appartenance du système étudié au domaine des systèmes complexes (domaine 1) où prédominerait une infiltration lente, un drainage médiocre et des réserves mobilisables modestes, compatibles avec un temps de séjour dans la zone noyée de l'ordre de 250 jours. Le système semble, toutefois, présenter une homogénéité qui peut être rapprochée avec la structure compartimentée qui prévaut dans la région. Un échantillonnage journalier aurait permis d'apprécier la robustesse de cette caractérisation pour voir si la sensibilité des paramètres η et ε au pas d'échantillonnage est telle qu'elle puisse modifier les paramètres liés à l'infiltration et donc à la famille d'affiliation du système.

Une autre question mérite de trouver réponse, c'est celle de savoir si la classification des sources étudiées comme appartenant au domaine 1 n'est pas à imputer à l'incertitude sur la décomposition de la courbe de récession en 2 phases, parfaitement distinctes, identifiant la décrue et le tarissement. Et de fait, l'allure de l'hydrogramme laisse planer un doute là-dessus puisqu'il semble difficile d'y préciser l'instant où le débit d'infiltration devient nul.

Quant à l'analyse corrélatrice et spectrale au pas hebdomadaire, elle n'a pas permis de saisir les phénomènes du régime hydrologique dont les rythmes, de quelques heures à quelques jours pour les crues, auraient permis de caractériser le drainage du système.

A ce pas, les résultats obtenus, ne permettent d'appréhender que les crues lentes de quelques mois induites par des précipitations sur des systèmes aquifères particulièrement inertiels.

Faute de pouvoir répondre aux questions posées avec l'analyse corrélatrice et spectrale des données hydrométriques hebdomadaires, il nous reste à examiner les enseignements apportés par les autres méthodes.

Etude hydrochimique

INTRODUCTION

La réponse chimique d'un aquifère karstique à une impulsion pluviométrique constitue un moyen d'identification et de reconnaissance de l'organisation et du fonctionnement de cet aquifère. Durant le transit la composition chimique de l'eau varie en fonction de la durée du contact de l'eau avec l'encaissant qui lui confère une charge minérale caractéristique des roches traversées. L'éventail des éléments chimiques alors mis en solution l'eau est très large : éléments majeurs, mineurs, en traces, isotopes stables de la molécule d'eau, isotopes stables du soluté, isotopes radioactifs, gaz dissous...

Les données sur ces éléments peuvent être obtenues lors de l'analyse des échantillons d'eau prélevés en quelque point du système karstique, bien que l'information acquise à l'exutoire principal soit préférable. Toutes ces variables apportent des informations sur les différents modes d'infiltration et permettent une analyse globale du système à partir de son fonctionnement.

C'est à l'analyse factorielle de la structure du tableau de ces données que l'on recourt pour réaliser une interprétation fondée non sur les variables individuelles du tableau mais sur des variables plus globales (facteurs) qui résument le maximum d'informations contenues dans le tableau en en perdant le moins possible. Cette aptitude des facteurs est assujettie à la *présence d'intercorrélation* entre les variables initiales.

Aussi, l'ACP sera d'autant plus probante que les variables :

- sont *bien intercorrélées* pour pouvoir en extraire les composantes principales
- ne sont pas dans des situations de *dépendance linéaire* où une variable peut être expliquée par une combinaison d'autres variables. Ce cas d'espèce extrême est propice à la réalisation de la *condition de singularité* de la matrice de corrélation.
- aient un niveau de *corrélation significatif* pour légitimer le recours à l'ACP.

Nous utiliserons des critères synthétiques pour apprécier la pertinence de l'ACP i.e. pour répondre à la question de savoir si les données sont factorisables ou pas.

Données hydrochimiques disponibles

Les échantillons d'eau furent prélevés au cours de la période du 12.12. 2005 au 16.01. 2007 avec un pas de temps hebdomadaire voire journalier en période de crue. Ces échantillons ont été analysés au laboratoire de chimie de l'A.N.R.H. (*Agence Nationale des Ressources Hydrauliques*). Les analyses chimiques ont porté sur :

- les éléments majeurs :
 - Cations : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ ;
 - Anions : Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , NO_3^- ;
- Les éléments mineurs:

NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{--} , matières en suspension (MES), matières organiques acides (MOA), SiO_2 , la conductivité, la minéralisation, le résidu sec, pH, TAC, et TH.

Nous avons calculé la balance ionique de ces échantillons pour déterminer le pourcentage d'erreur e en utilisant la formule suivante :

$$e = (\sum r_{\text{cati}} - \sum r_{\text{ani}} / \sum r_{\text{cati}} + \sum r_{\text{ani}}) * 100$$

(r : quantité en réaction en meq/l).

Si la balance ionique n'appartient pas à l'intervalle (-5%, +5%) l'analyse présente une forte erreur et l'échantillon n'est pas gardé. (H.Schoeller 1962).

Les résultats obtenus sont pour :

- Aïn Fouara : pourcentage d'erreur inférieur à 5 %, sauf pour l'analyse n° 8 (voir tableau en annexe).
- Aïn Bendou : pourcentage d'erreur inférieur à 5 %, sauf pour l'analyse n°9 (tableau en annexe).
- Aïn El Houtz toutes les analyses sont bonnes (tableau en annexe).

Lorsque le défaut de balance est compris entre 3 et 10 %, il est néanmoins conseillé de tester les résultats des analyses avec d'autres critères de cohérence dont :

- celui basé sur la cohérence entre la composition chimique en éléments majeurs et la conductivité électrique. Vallès note que « *lorsque la conductivité électrique est élevée, traduisant ainsi une forte minéralisation de l'eau, la composition indiquée par l'analyse doit faire apparaître de fortes concentrations en éléments ioniques. Dans le cas contraire, il y a incohérence.* ». La composition chimique des différents échantillons prélevés au niveau des sources étudiées reflète cette forte concentration en composés ioniques.
- Celui relatif à la vérification de la cohérence entre pH et alcalinité des eaux qui, lui aussi, est effectif puisque, aux valeurs de pH relevées, l'alcalinité totale correspond à la concentration en HCO_3^- .

Quant au test de stabilité au cours du temps des teneurs en éléments chimiques des eaux recueillies au cours de la campagne de prélèvement, il peut être évalué à partir de la formule :

$$S = 2 \frac{C_v}{I_p}$$

où S = coefficient de stabilité, C_v : coefficient de variation et I_p : incertitude sur la mesure au laboratoire (entre 0,1 et 6%).

Pour chaque élément caractéristique essentiel si :

- Si $S > 2$ il y a sans doute une instabilité marquée ou une dérive au cours du temps de l'élément chimique.
- $S < 2$ il y a stabilité au cours du temps du paramètre chimique

	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	Cond.	Min.	R.S	TAC	T.H	PH
Fouara	11,8	15,3	43,3	70,1	19,8	31,0	5,7	18,8	4,6	5,0	6,6	5,0	9,4	3,2
Bendou	16,1	15,2	12,8	37,7	10,2	23,6	4,6	15,9	2,4	3,0	5,7	4,7	7,7	3,3
Hout	13,1	22,1	8,6	41,9	6,1	20,9	3,9	15,8	2,1	2,5	5,0	3,9	8,2	3,0

Tableau 10 : Coefficient de stabilité de quelques éléments chimiques des trois sources

Dans le tableau 10, nous remarquons pour les trois sources que les valeurs du coefficient de stabilité S calculées pour les différents éléments chimiques indiquent une forte instabilité au cours du temps, liée soit au débit soit à la température, tout cela en liaison avec les précipitations. La minéralisation, et bien sûr la conductivité, montrent qu'il y a là un phénomène de dissolution de la matrice aquifère variable au cours du cycle hydrologique. Compte tenu de la qualité des mesures, cette instabilité ne peut être que l'expression de la variabilité temporelle des éléments des chimiogrammes en relation avec les événements hydrologiques. C'est ce que nous examinerons dans la paragraphie qui suit.

a- Etude des paramètres physiques :

a-1- La température :

La température de l'eau souterraine est influencée de manière naturelle par différents facteurs : le climat, l'altitude du bassin d'alimentation et la durée de transit dans le sous sol qui est en relation avec la profondeur de circulation de l'eau souterraine.

La température de l'eau a été mesurée manuellement avec un pas hebdomadaire à l'exutoire de chaque source avec un thermomètre à mercure gradué au 1/10°C. Les moyennes des températures mesurées et leurs écarts type sont portées dans le tableau suivant :

Sources	Moyenne	Ecart type	Cv
Aïn Fouara	17,08	0.25	1,46%
Aïn Bendou*	18.17	1.08	5,94%
Aïn El houtz	19.68	0.65	3,30%

Tableau 11: Moyenne et écart type des températures des trois sources

Au début des prélèvements, la température de la source Aïn Bendou a été mesurée à la station ensuite, à compter du 17.07.2006 elle a été relevée à la source. Par conséquent, sa mesure à Aïn Bendou comporte deux périodes d'observation consécutives à ce changement d'emplacement du lieu de prélèvement que l'on peut caractériser par leurs moyennes et leurs écarts - types respectifs m_1, σ_1 et m_2, σ_2 . Si n_1 est le nombre de mesures hebdomadaires *avant* et n_2 le nombre de mesures *après* le changement d'emplacement. Peut-on attribuer la différence de moyenne au changement d'emplacement ?

Du point de vue statistique, et sous réserve concernant la nature de la distribution, on peut répondre à cette question en faisant, par exemple, un test de Student ou de Fisher – Snedecor sur la différence des moyennes des températures :

$$d = |m_1 - m_2|$$

Si les moyennes sont égales, cette différence suit une loi de Student à $n_1 + n_2 - 2$ degrés de liberté, de moyenne 0 et d'écart-type σ_d :

$$\sigma_d = \sigma \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$$

où :

$$\sigma = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

est calculée sur les $n = 61$ observations.
Dans le cas de la source de Aïn Bendou :

$$\begin{cases} n_1 = 33 & m_1 = 19 & \sigma_1 = 0.79 \\ n_2 = 28 & m_2 = 17.2 & \sigma_2 = 0.16 \\ d = 1.8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma = 0.6010 \\ \sigma_d = 0.1544 \end{cases}$$

Pour $\nu = 59$ degrés de liberté et au seuil de 95 %, la table de Student donne $t = 2.0010$.
On en déduit :

$$t \sigma_d = 0.3090 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La différence $d = 1.8$ est supérieure à 0.3090, les moyennes sont donc significativement différentes au seuil de 95 %



Figure 47: Station et source Aïn Bendou.

a-2- Le pH :

Le pH d'une eau représente son acidité ou son alcalinité, ainsi que l'état de l'équilibre carbonique. Les mesures ont été effectuées au laboratoire de l'A.N.R.H. après chaque prélèvement hebdomadaire. Les résultats obtenus sont :

Sources	Moyenne	Ecart type	Cv
Aïn Fouara	7.29	0.25	3.42%
Aïn Bendou	7.22	0.25	3.46%
Aïn El Houtz	7.19	0.22	3.05%

Tableau 12 : Moyenne et écarts type du pH des sources étudiées

a-3- Conductivité et Minéralisation :

Pour Bakalowicz (1979), la conductivité est un moyen d'information privilégié, qui sert de référence lors de toute étude hydrogéochimique. Elle présente une relation linéaire avec la minéralisation. Nous avons étudié cette relation conductivité - minéralisation pour les trois sources (tableau 13). Nous remarquons une bonne corrélation entre ces deux éléments. La source d'Aïn El Houtz est la plus minéralisée avec un maximum de 782 mg/l.

Sources	Relation	R ²	Minimum	maximum	Nombre de mesures
Aïn Fouara	$y=1.21x+61.77$	0.88	435/311	827/592	62
Aïn Bendou	$y=0.85x+304.64$	0.61	485/347	850/645	61
Aïn El Houtz	$y=1.12x+147.35$	0.96	794/569	1030/782	59

Tableau 13 : Corrélations conductivité/minéralisation des trois sources.

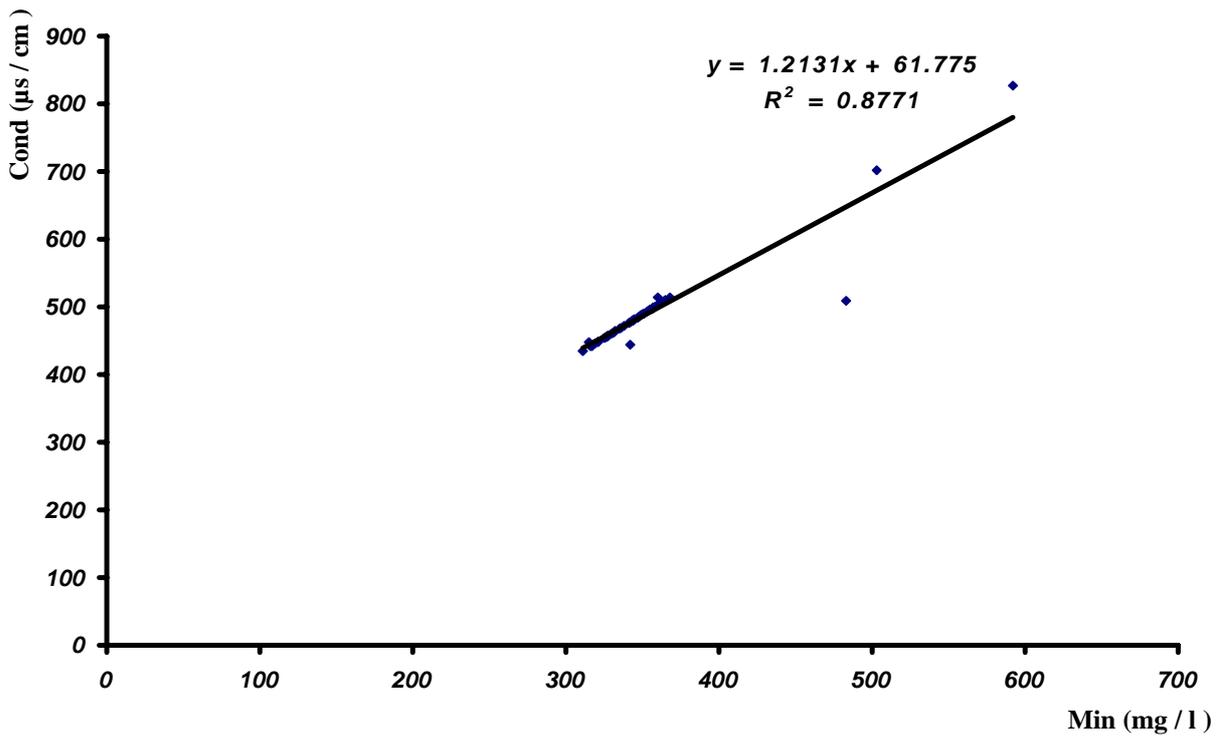


Figure 48: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source Aïn Fouara

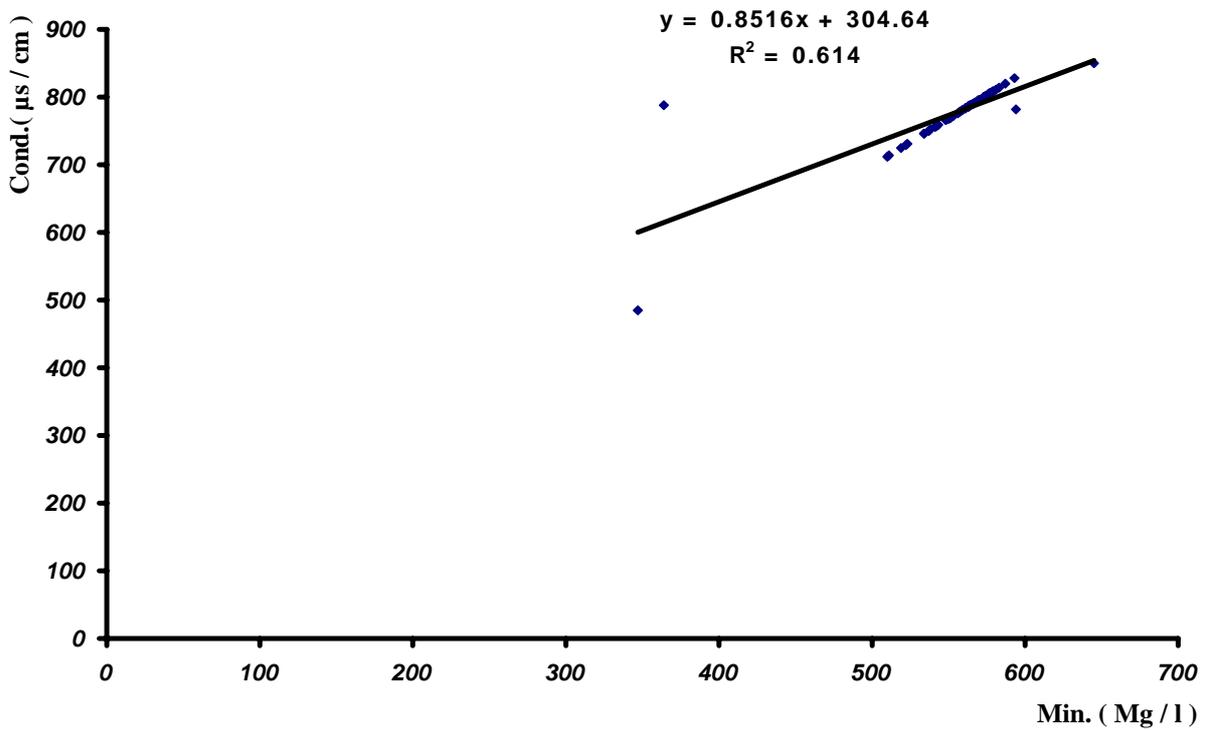


Figure 49: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source Aïn Bendou

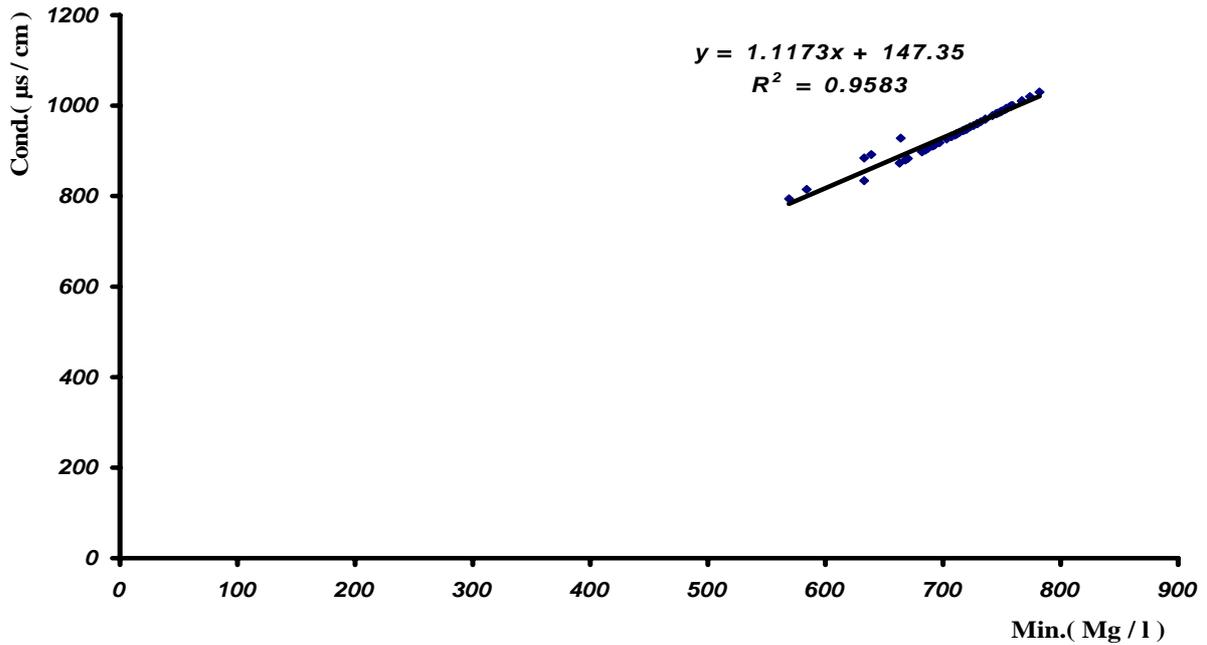


Figure 50: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source de Aïn El Houtz

b- Classification des eaux des sources :

b-1- Diagramme semi logarithmique de Schoeller-Berkaloff

Composé d’axes à intervalles réguliers, ce diagramme permet de préciser :

- La qualité de l’eau karstique
- La sursaturation en CaSO₄
- La saturation en carbonates.
- Le faciès chimique et l’importance de la minéralisation.

Le report de ces résultats sur le diagramme de Schoeller –Berkaloff permet de caractériser le faciès des eaux des 3 sources par les pôles bicarbonaté calcique à bicarbonaté magnésien et une potabilité bonne à très bonne (fig. 51, 52 et 53).

b-2-Diagramme de Piper

Les valeurs en pourcentages des éléments sont portées sur le diagramme de PIPER qui donne une représentation de l’ensemble de points d’eau sur un même plan. Ce diagramme décrit la géochimie des eaux. Le report des résultats des analyses chimiques des trois sources sur le diagramme de Piper confirme les résultats déjà obtenus et distingue deux faciès chimiques (voir tableau en annexe) :

- un faciès bicarbonaté calcique suivant les formules caractéristiques :

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4 > r\text{Cl} > r\text{NO}_3 \\ r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

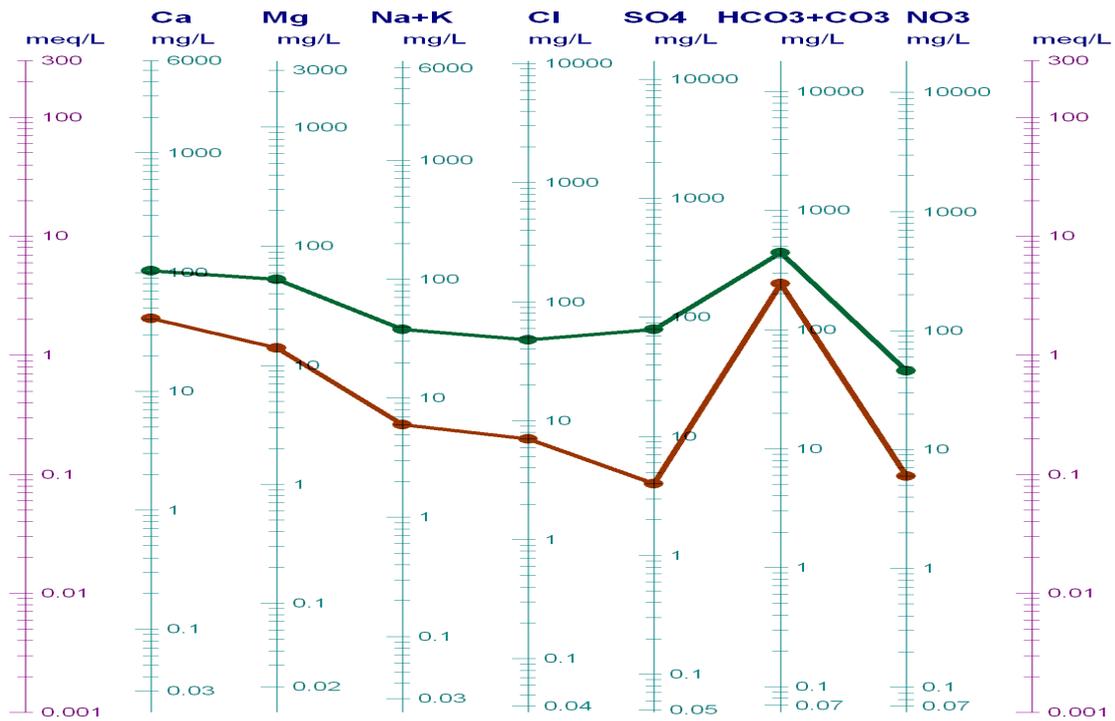


Figure 51. Classification des eaux de la source Aîn Fouara Supérieure selon le diagramme de Schoeller – Berkaloff

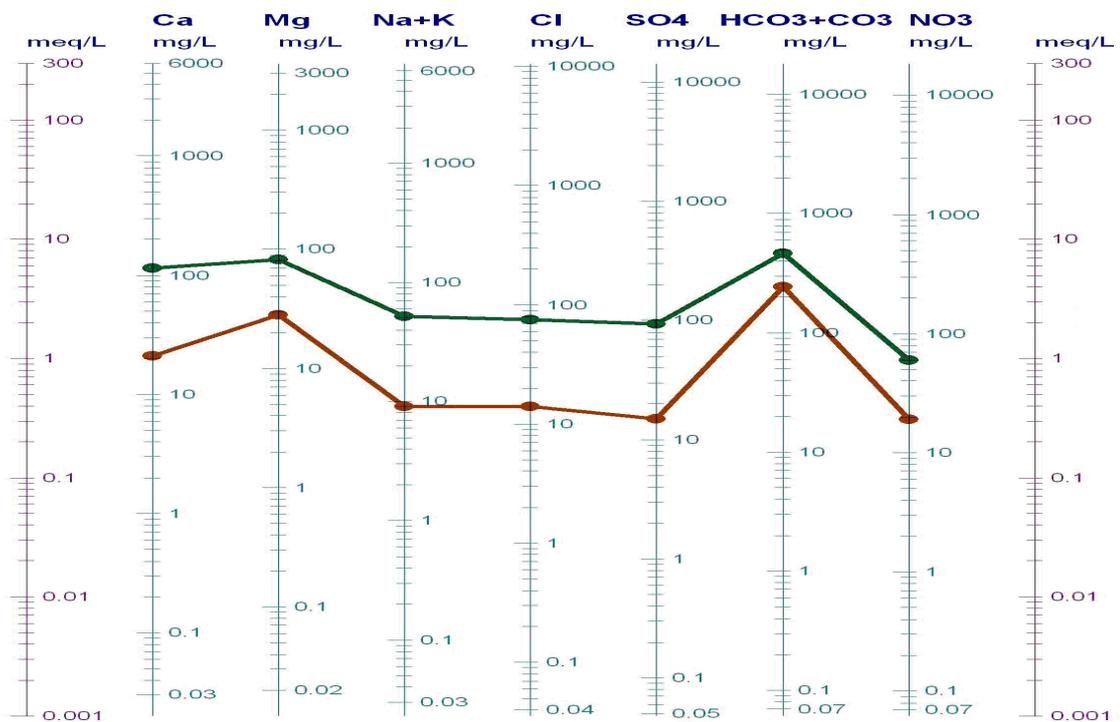


Figure 52. Classification des eaux de la source Aîn Bendou (diagramme de Schoeller – Berkaloff)

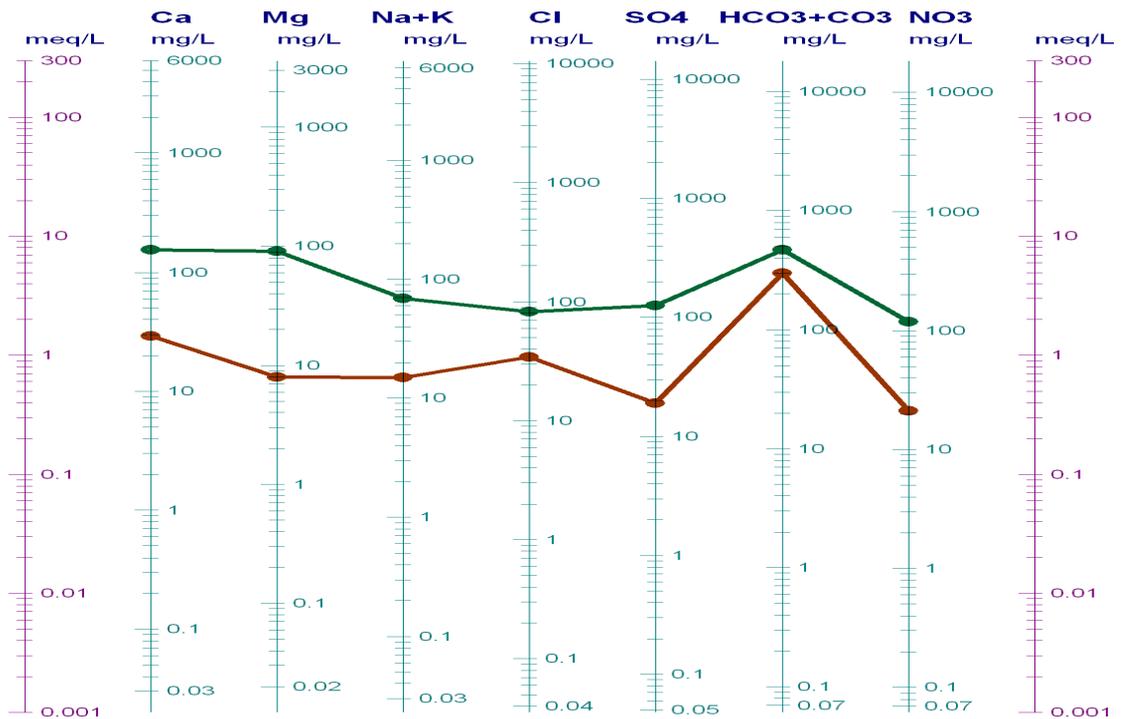


Figure 53. Classification des eaux de Ain El Houtz (diagramme de Schoeller – Berkaloff)

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{NO}_3 \\ r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{NO}_3 > r\text{SO}_4 \\ r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{NO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4 \\ r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

- un faciès bicarbonaté magnésien d'après les formules :

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4 > r\text{Cl} > r\text{NO}_3 \\ r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{NO}_3 > r\text{SO}_4 \\ r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{NO}_3 \\ r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

$$\begin{cases} r\text{HCO}_3 > r\text{SO}_4 > r\text{NO}_3 > r\text{Cl} \\ r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K} \end{cases}$$

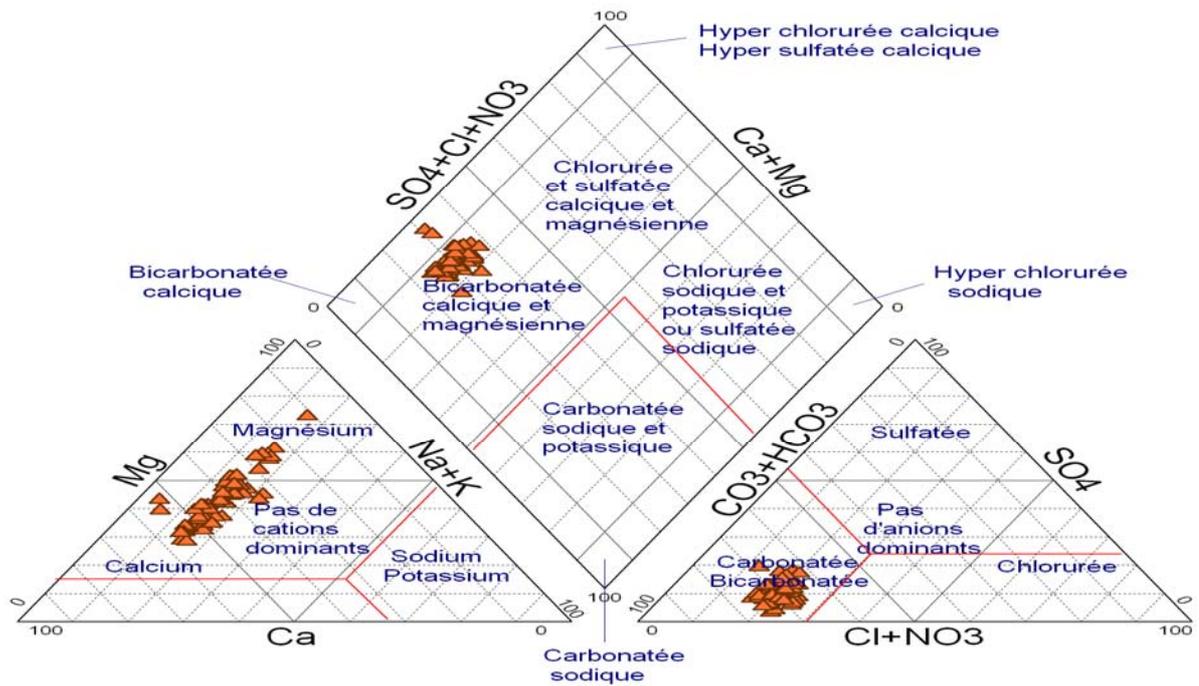


Figure 54. Classification des eaux de la source Aîn Fouara (Diagramme de Piper)

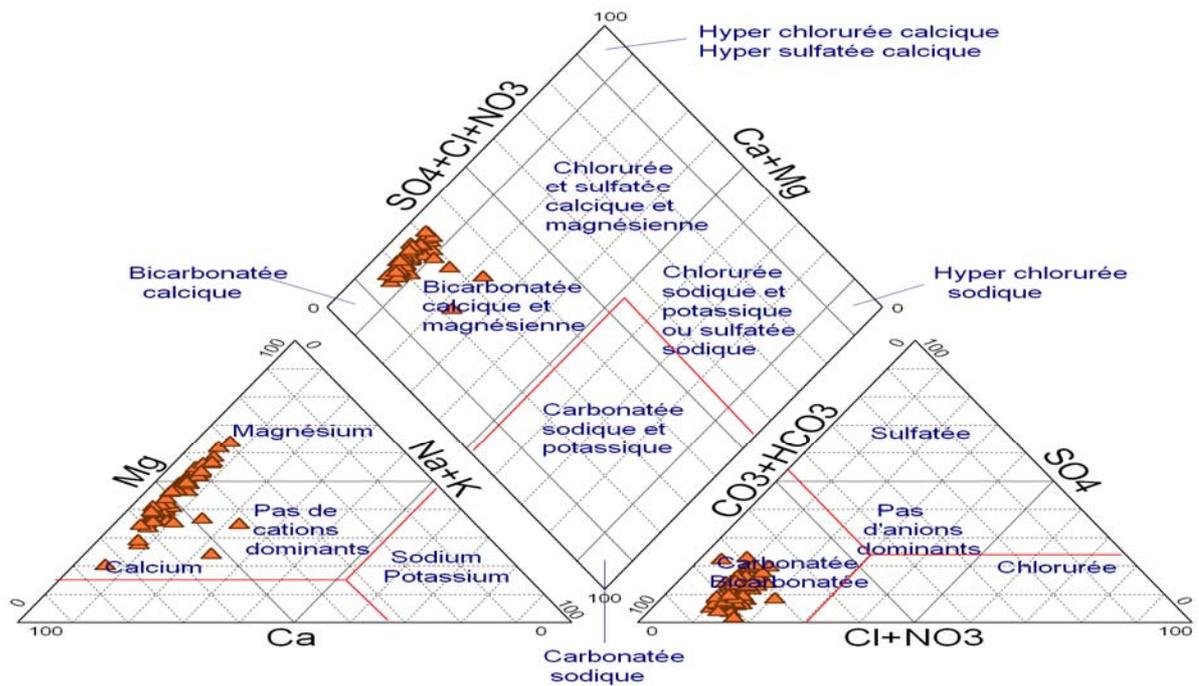


Figure 55. Classification des eaux de la source Aîn Bendou (Diagramme de Piper)

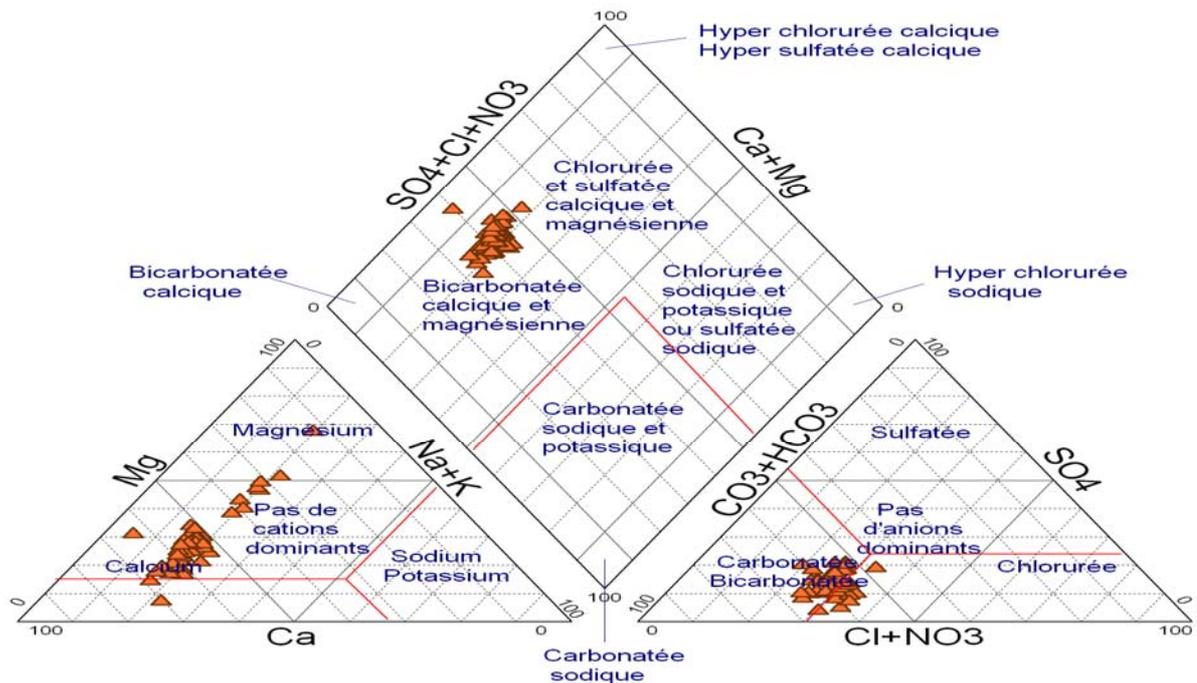


Figure 56: Classification des eaux de la source Aïn El Houtz (Diagramme de Piper)

c- Etude des éléments majeurs

Distribution des éléments:

La minéralisation des eaux contient la totalité des informations relatives aux substances dissoutes (Bakalowicz 1979). Cependant deux éléments constituent en général à eux seuls souvent près de 90% de la minéralisation des eaux karstiques (Plagnes 1997). Il s'agit des ions bicarbonates (HCO_3^-), et calcium (Ca^{2+}) dont la mise en solution résulte des processus de di dissolution de la roche carbonatée.

Les figures 57, 58 et 59 représentent la distribution des éléments majeurs sur papier gauss-logarithmique des trois sources. Le report des résultats sur papier Gausso-logarithmique permet de connaître l'origine de la minéralisation des eaux. Une distribution homogène (droite unique) considère l'élément étudié comme appartenant à une seule famille. Une droite comportant plusieurs segments définit plusieurs origines.

■ **Ca^{2+} et HCO_3^-**

Ces deux éléments ont toujours une origine interne au système. Ils indiquent :

- le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère
- l'agressivité de l'eau entrant dans le système
- l'état du système calco-carbonique.

L'apport atmosphérique en Ca^{2+} et HCO_3^- est négligeable.

La représentation graphique de la distribution des éléments Ca et HCO_3^- appelle les remarques suivantes :

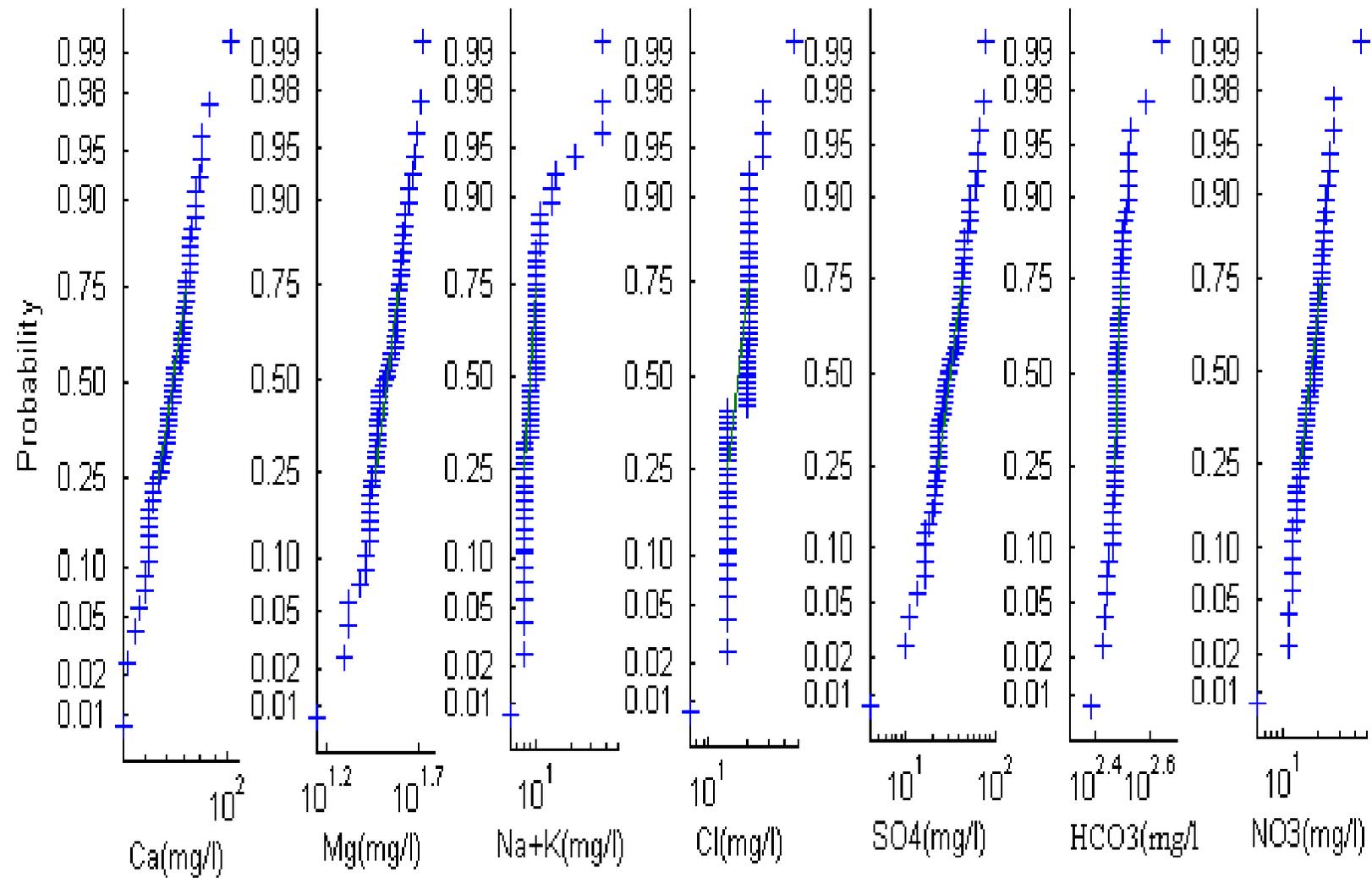


Figure 57: Représentation des ions des eaux d'Aïn Fouara supérieure sur un papier Gausso- logarithmique.

- *En ce qui concerne les éléments HCO_3^{2-} et Ca^{++} , leurs points représentatifs respectifs se regroupent suivant une seule droite. Ce qui, pour les sources de Aïn Fouara et Aïn Bendou, permet de situer l'origine de leur acquisition dans les calcaires de Zarifet.*
- *Pour Aïn El houtz la droite représentative est composée de deux segments. L'origine de HCO_3^{2-} et Ca^{++} se situe dans les niveaux lithologiques des calcaires de Zarifet et les dolomies de Tlemcen.*

■ Mg²⁺

Cet élément, qui témoigne de la dissolution des dolomies, des calcaires ou des marnes dolomitiques, possède une cinétique de dissolution lente. Il a toujours une origine interne au système. C'est un indicateur d'eaux à temps de séjour prolongé.

L'origine de Mg^{2+} , dans le cas des trois sources étudiés, provient exclusivement de la dissolution des dolomies de Tlemcen comme en témoigne la droite représentative correspondante.

■ Na⁺et K⁺

Présents à faibles teneurs dans les eaux karstiques, ces deux éléments non conservatifs ont une origine externe (apports atmosphériques) quoiqu'ils peuvent provenir de l'altération des minéraux silicatés dans l'aquifère ou des processus d'échanges de cations avec les minéraux argileux ou des substances organiques.

Na^+ et K^+ sont réputés être des marqueurs des horizons de surfaces où ils sont reconcentrés par évapotranspiration. Par contre, le comportement de K^+ est difficile à interpréter car il participe au cycle de la matière vivante au niveau du sol.

Les teneurs de ces éléments dans les trois sources sont très faibles et indiquent :

- pour la source Aïn Fouara :
 1. une origine météorique (1^{er} segment 1),
 2. l'altération des minéraux silicatés (segment 2)
 3. origine située dans les niveaux argileux ou les substances organiques.
- pour Aïn Bendou et Aïn El houtz, une seule droite, prouve que cet élément provient des eaux des précipitations.

■ Cl⁻

Les eaux carbonatées ne sont pas riches en chlorures. Leur origine est strictement météorique en général. C'est le cas des trois sources dont les courbes ne présentent qu'un seul segment.

■ SO²⁻4

L'ion sulfate est généralement l'anion le plus abondant après les bicarbonates dans les eaux d'origine karstique. Son origine est diverse :

- apports météoriques
- origine interne au système : par oxydation des minéraux sulfurés présents dans les calcaires ou par dissolution de gypse ou d'anhydrite dans les terrains traversés

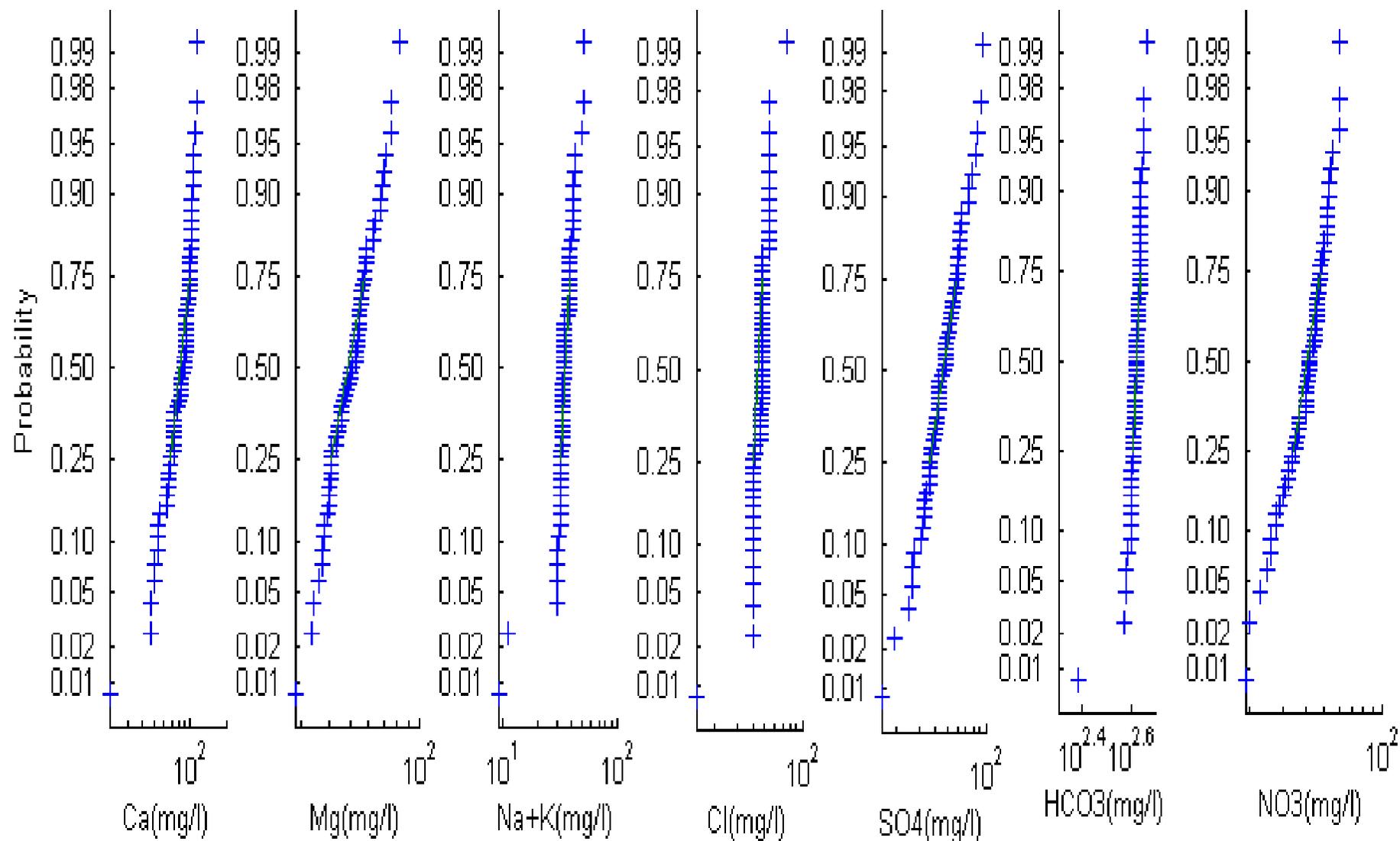


Figure 58: Représentation des ions des eaux d'Aïn Bendou sur un papier Gausso- logarithmique.

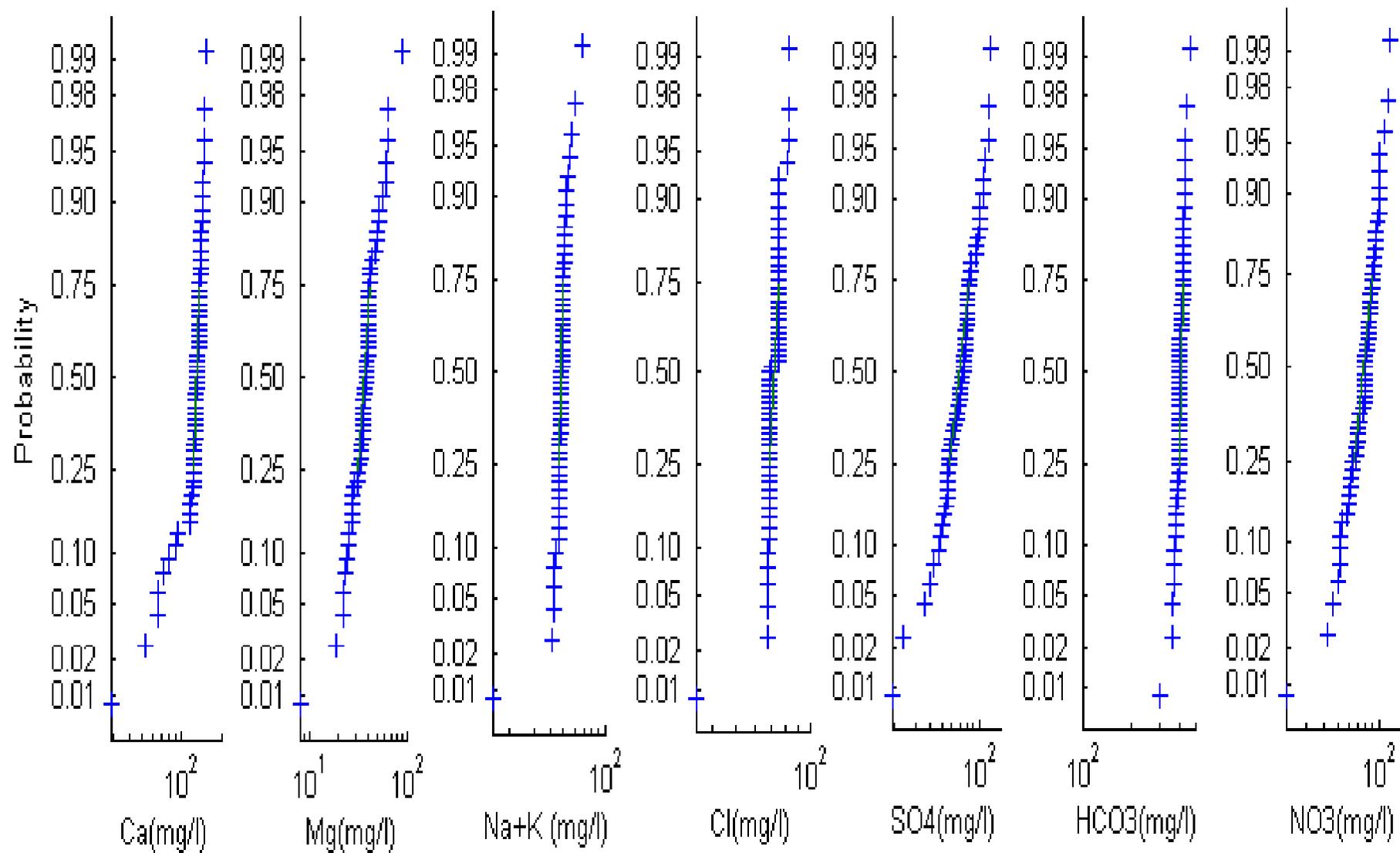


Figure 59: Représentation des ions des eaux d'Aïn El Houtz sur un papier Gausso- logarithmique

- origine biologique ;
- apports anthropiques (origine agricole, engrais).

L'absence de roches évaporitiques dans le secteur étudié et la représentation de l'ion SO_4 par une droite unique permet de conclure que son origine est bien externe au système. Il provient probablement des eaux de précipitations.

■ NO_3^{2-}

Les eaux naturelles présentent de faibles teneurs en NO_3 qui dépend du type de sol, de la végétation ... Cet ion est utilisé comme indice de pollution. Son apport par les eaux de précipitations est faible. Son origine est externe.

La droite représentative des nitrates des trois sources montre :

- Pour Aïn Fouara, la représentation graphique donne un seul segment donc une seule origine due au couvert végétal qui se trouve à proximité de la source.
- Pour Aïn Bendou et Aïn El Houtz, les deux segments de la courbe représentative correspondent à deux origines différentes :
 1. le couvert végétal
 2. les eaux usées

d- Traitement statistique des données hydrochimiques :

Il est effectué à l'aide de l'analyse en composantes principales (ACP).

C'est une méthode statistique qui transforme le tableau de données des n variables (colonnes) et des p échantillons (lignes) en un nuage de points dans un espace à n dimensions. L'ACP permet de transformer les p variables initialement inter – corrélées en p nouvelles variables non corrélées appelées composantes principales (facteurs).

➤ **Aïn Fouara**

- Etude statistique

Les caractéristiques statistiques qui décrivent la distribution des teneurs des éléments sont données dans le tableau 14. Nous remarquons que les écarts-types sont faibles ce qui ne manquera pas d'influer sur les résultats des ACP.

Les eaux de la source de Aïn Fouara émergent à une température moyenne de 17°C et un pH qui varie entre 6.74 et 7.93. Les valeurs de la conductivité comprises entre 435 et 827 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont plutôt élevées comparativement à celles usuellement rencontrées dans les eaux des aquifères karstiques. La minéralisation est constituée à 75 % de Ca et HCO_3 et 82 % en incorporant Mg. Les teneurs en Mg sont compatibles avec la présence de dolomie dans la formation carbonatée dans laquelle le réservoir s'est développé. Les teneurs anormalement élevées en NO_3 se conjuguent à celles tout aussi anormales relevées pour Na, K et Cl pour dire l'impact des activités agricoles et domestiques sur les eaux de l'aquifère.

variables	moyenne	Ecart type	minimum	maximum	CV
Ca ²⁺	63.97	11.38	41	103	0.18
Mg ²⁺	34.05	7.85	14	53	0.23
Na ⁺	9.42	6.13	5	37	0.65
K ⁺	1.55	1.63	1	13	1.05
Cl ⁻	18.61	5.53	7	48	0.30
SO ₄ ²⁻	34.74	16.20	4	80	0.47
HCO ₃ ⁻	306.19	26.08	242	443	0.085
NO ₃ ⁻	18.10	5.62	6	46	0.31
SiO ₂ ⁻	5.89	1.40	0.8	10.5	0.24
Conductivité	489.23	56.90	435	827	0.12
Minéralisation	352.35	43.93	311	592	0.12
PH	7.29	0.25	6.74	7.93	0.034
T°C	17.08	0.25	16.8	18.5	0.01
Q	33.56	5.22	20	44	0.15

Tableau 14: Statistiques descriptives des variables d'Ain Fouara

Analyse en composantes principales

Les données sont-elle factorisables ?

Pour répondre à cette question, il ya lieu d'examiner la matrice des corrélations du tableau 15

	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3	NO3	Cond.	Min	T°C	Q
Ca	1										
Mg	-0.5636	1									
Na+K	0.3009	0.0524	1								
Cl	0.2823	0.0883	0.5089	1							
SO4	0.1783	0.2461	0.2063	-0.1205	1						
HCO3	0.2114	0.3714	0.3617	0.3462	-0.0546	1					
NO3	0.1952	0.2482	0.4749	0.4901	-0.1102	0.4381	1				
Cond.	0.3365	0.0797	0.4829	0.6212	-0.0907	0.5403	0.4527	1			
Min	0.2808	0.0493	0.4430	0.5871	-0.0782	0.3806	0.4413	0.9360	1		
T°C	-0.1212	0.0725	-0.0383	0.2356	-0.0858	-0.0392	-0.0912	0.0247	0.0069	1	
Q	0.1945	-0.0726	0.0847	0.3053	-0.0866	-0.0512	0.1486	0.0020	-0.0178	0.1035	1

Tableau 15: Matrice de corrélation de la source Ain Fouara

L'analyse a été faite avec le logiciel XLSTAT en éliminant au préalable les échantillons dont la balance ionique est supérieure à 5% (analyse n° 8).

Le tableau 14 indique qu'une grande partie des variables ne sont que médiocrement intercorrélées. Le calcul de l'indice K-M-O donne, par ailleurs, une valeur égale à 0.403. Quant à l'indice de sphéricité de Bartlett, dont la valeur tend vers 0, il est très significatif.

Les valeurs de ces 3 indices concourent à la conclusion que cette matrice de corrélation est symptomatique de données non factorisables. Le pourcentage de variance totale expliquée par 5 valeurs propres est d'ailleurs de 70.6% ! Il faudrait recourir à 9 axes pour rendre compte de 90 % de la variance totale !

A priori, la conduite de l'ACP en l'état du tableau de données 14 ne peut aboutir.

Sous toutes réserves, nous avons, cependant, entrepris de conduire l'ACP de ce tableau pour étayer ces appréciations.

Traitement multidimensionnel des données

Trois axes factoriels définissent 49 % de la variance globale :

Facteur I : extrait 34% de la variance. Il est proportionnel à Mg, HCO₃, NO₃, SO₄, T, Cond. et inversement proportionnel au Na+K, Cl, Min., Q et Ca.

Ce facteur ne peut être interprété.

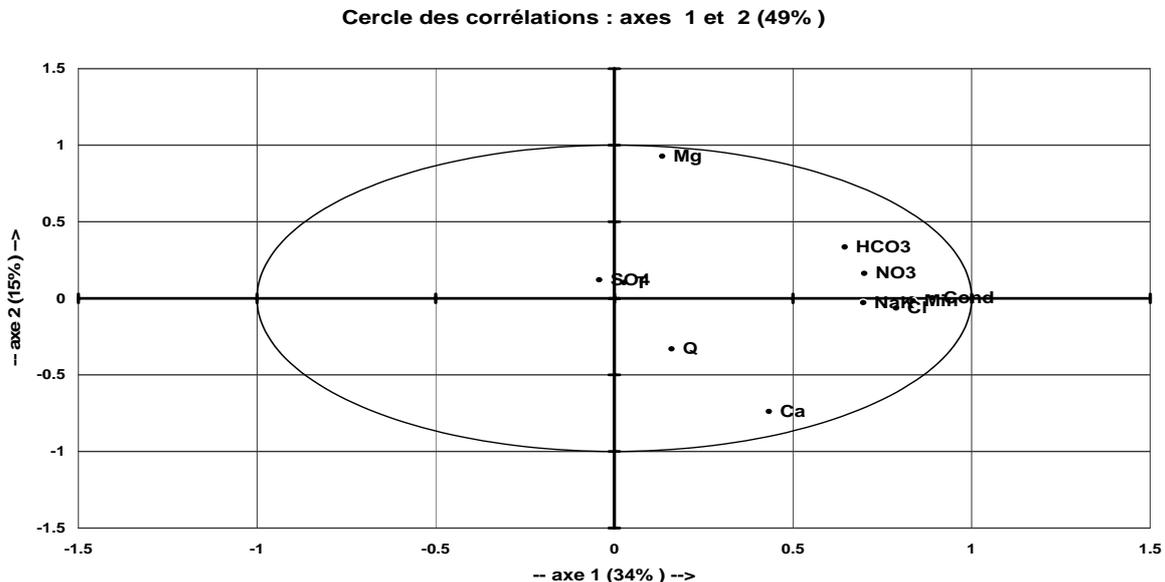


Figure 60 : Cercle de corrélation représentant les variables d'Aîn Fouara selon le plan 1-2

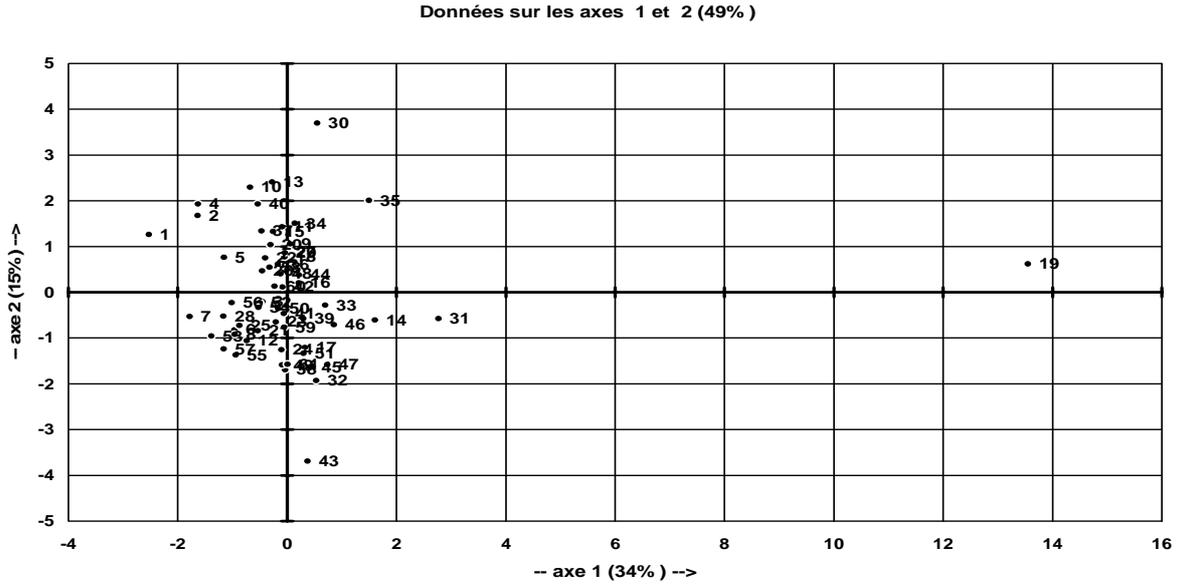


Figure 61 : Espace des individus d'Aïn Fouara selon le plan 1-2

Facteur II : Il extrait 16% de la variance et oppose Ca, Na+K, HCO₃ et SO₄ au reste des variables étudiées. Ce facteur présente une opposition entre les éléments à durée d'acquisition rapide (Ca⁺) à ceux à durée plus lente (Mg⁺, SO₄²⁻). Ce facteur rend compte de la vitesse d'acquisition du chimisme.

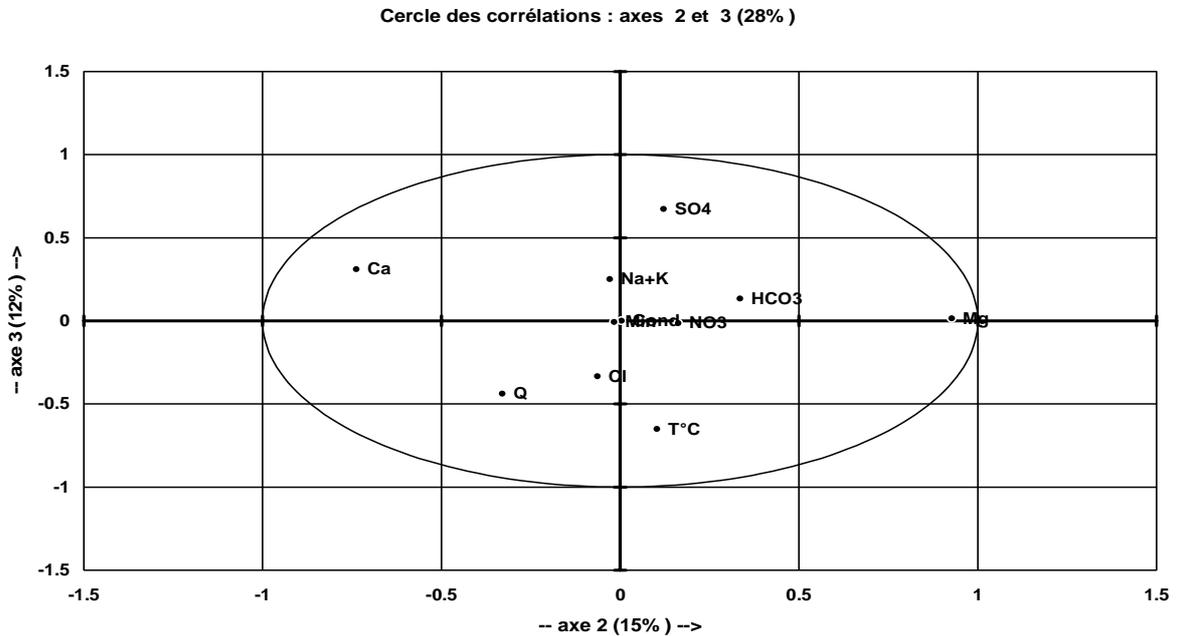


Figure 62 : Cercle de corrélation représentant les variables d'Aïn Fouara selon le plan 2-3

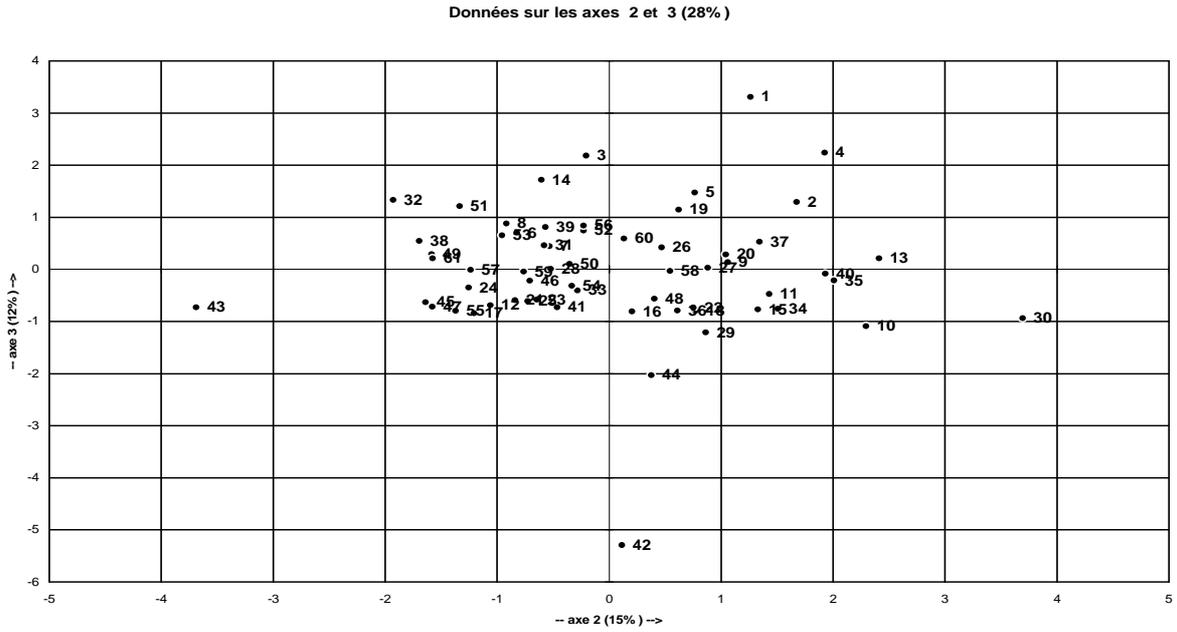


Fig. 63 : Espace des individus d'Aïn Fouara selon le plan 2-3

Facteur III : Il extrait 12% de la variance et est proportionnel à presque tous les éléments sauf à SO_4 à qui il est inversement proportionnel. Ce facteur indique la durée d'acquisition du chimisme

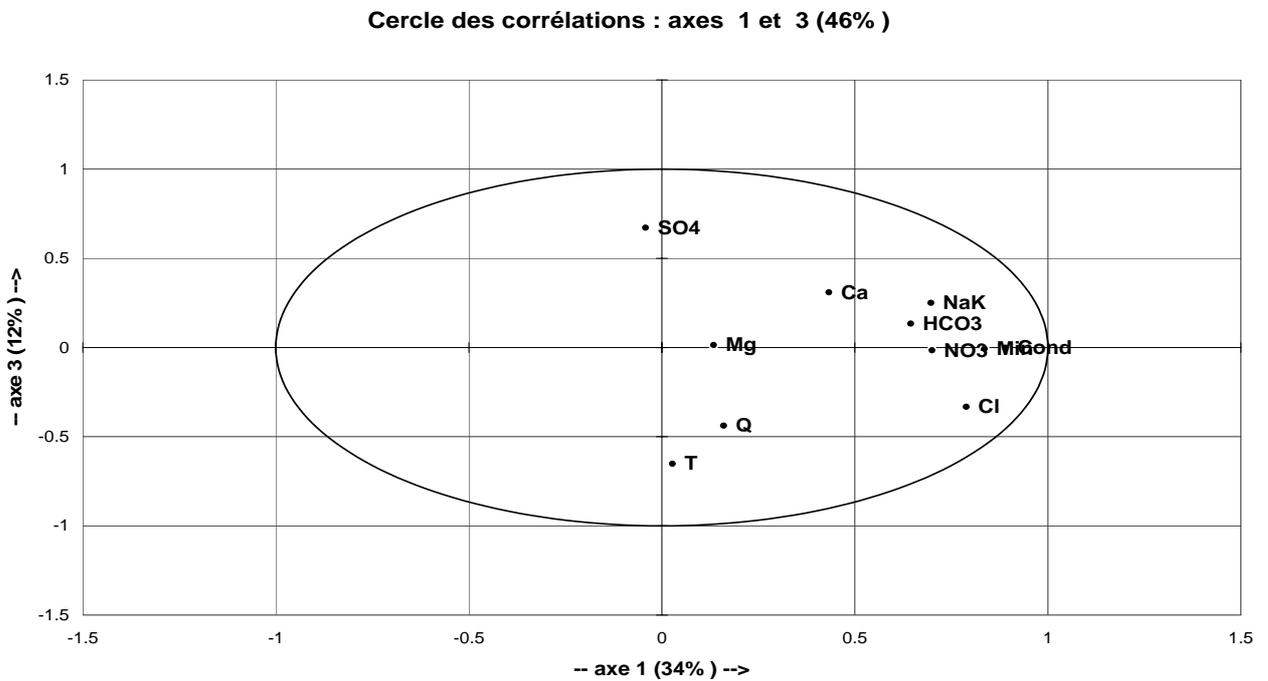


Figure 64 : Cercle de corrélation des variables d'Aïn Fouara selon le plan 1-3

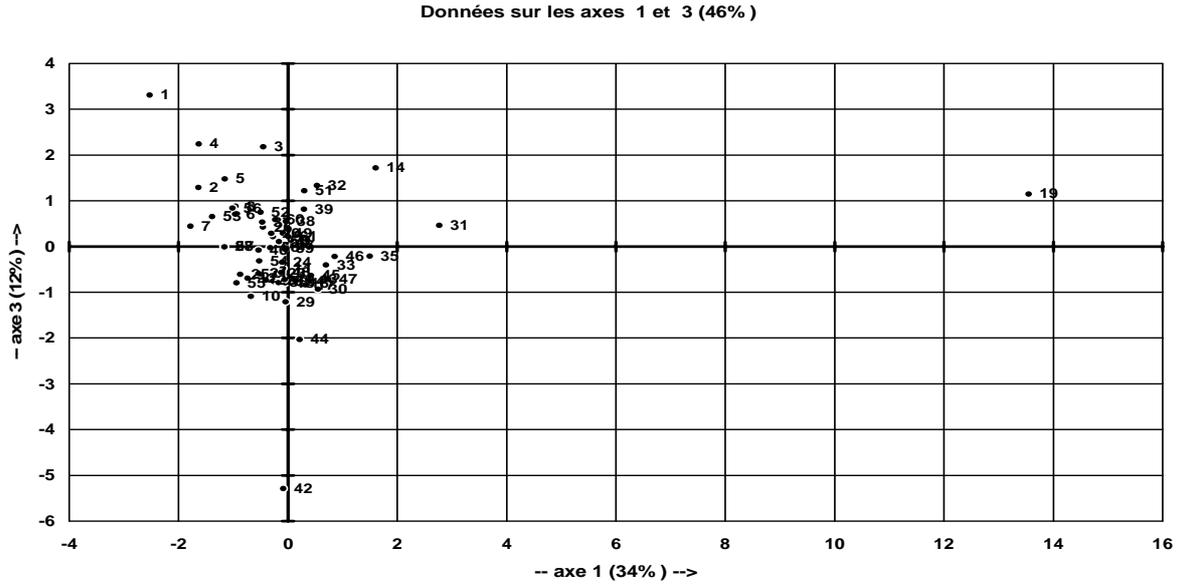


Figure 65 : Espace d'individus d'Aïn Fouara selon le plan 1-3

La représentation dans l'espace des individus montre une homogénéisation dans la répartition des échantillons qui se présente sous forme d'un nuage de points regroupé autour du centre des axes suivant les plans 1-3 et 1-2. L'examen des données montre que les échantillons 20 et 32 se distinguent de l'ensemble du lot. L'examen des résultats de la première ACP montre que l'échantillon 32 n'intervient pas particulièrement dans la détermination des 3 premiers facteurs. En revanche, l'échantillon 20 semble poser problème dans la mesure où c'est lui qui, pour l'essentiel, détermine le facteur I. Pour y répondre, une ACP restreinte i.e. sans les échantillons 20 et 32 a été réalisée.

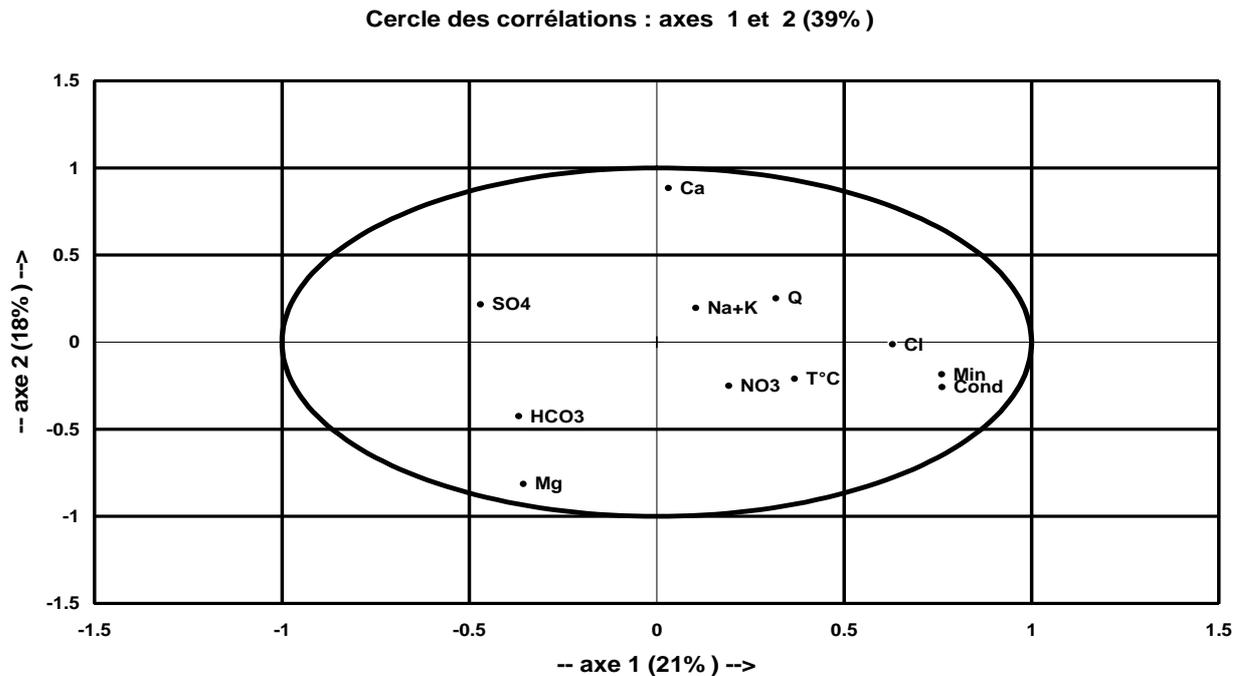


Figure 66 : Cercle de corrélation d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-2

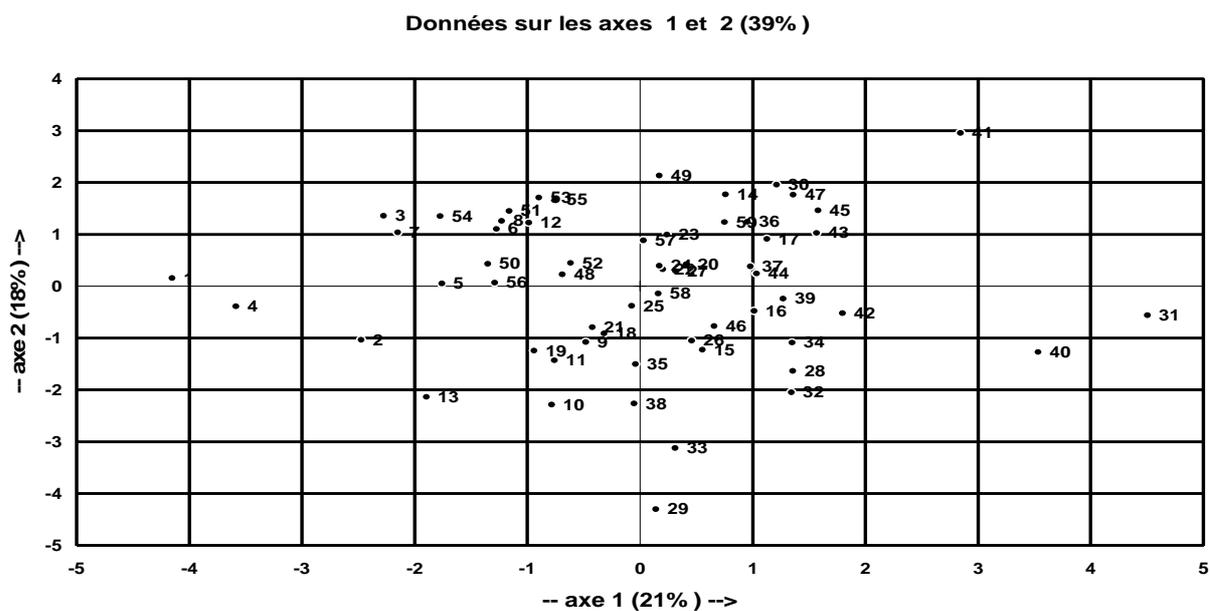


Figure 67 : Espace des individus d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-2

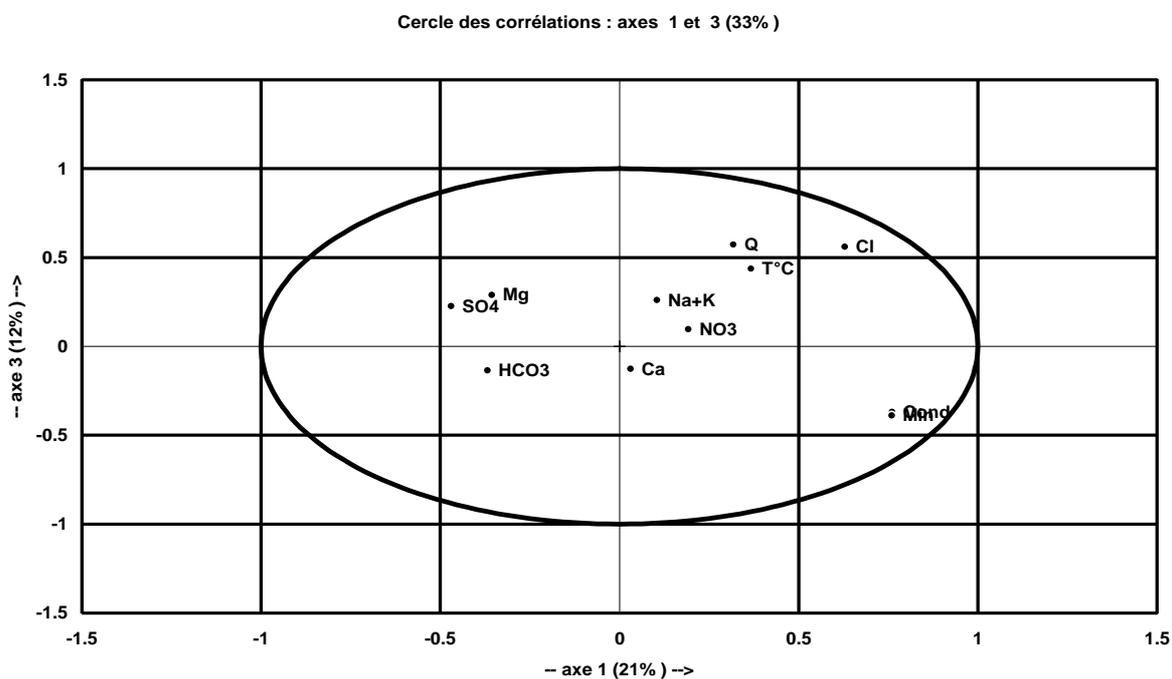


Figure 68 : Cercle de corrélation d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-3

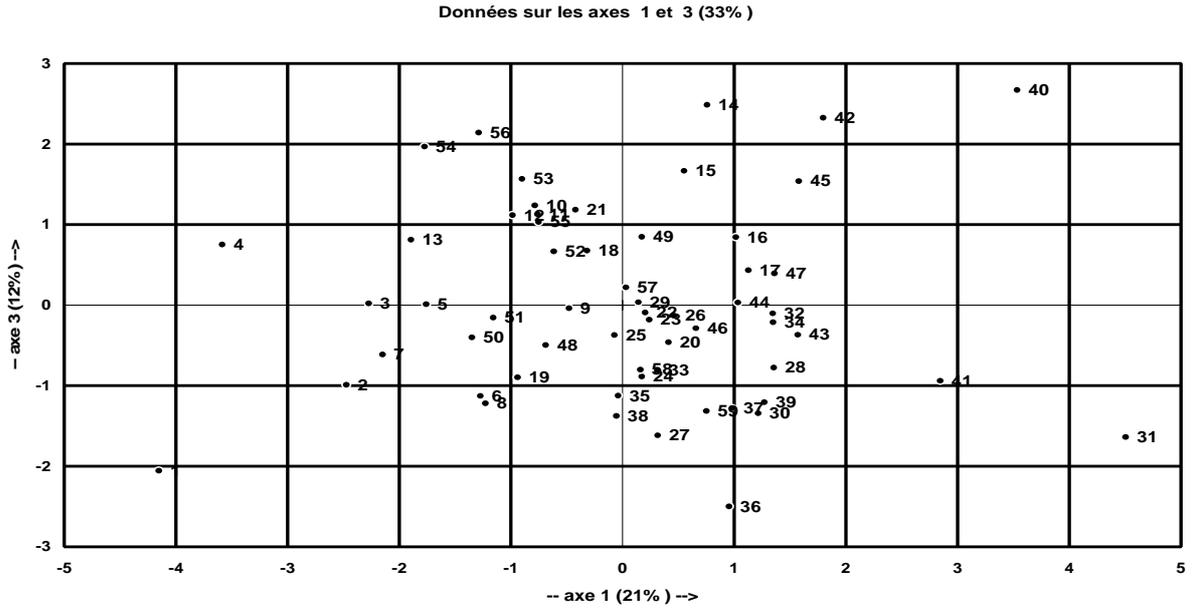


Figure 69 : Espace des individus d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-3

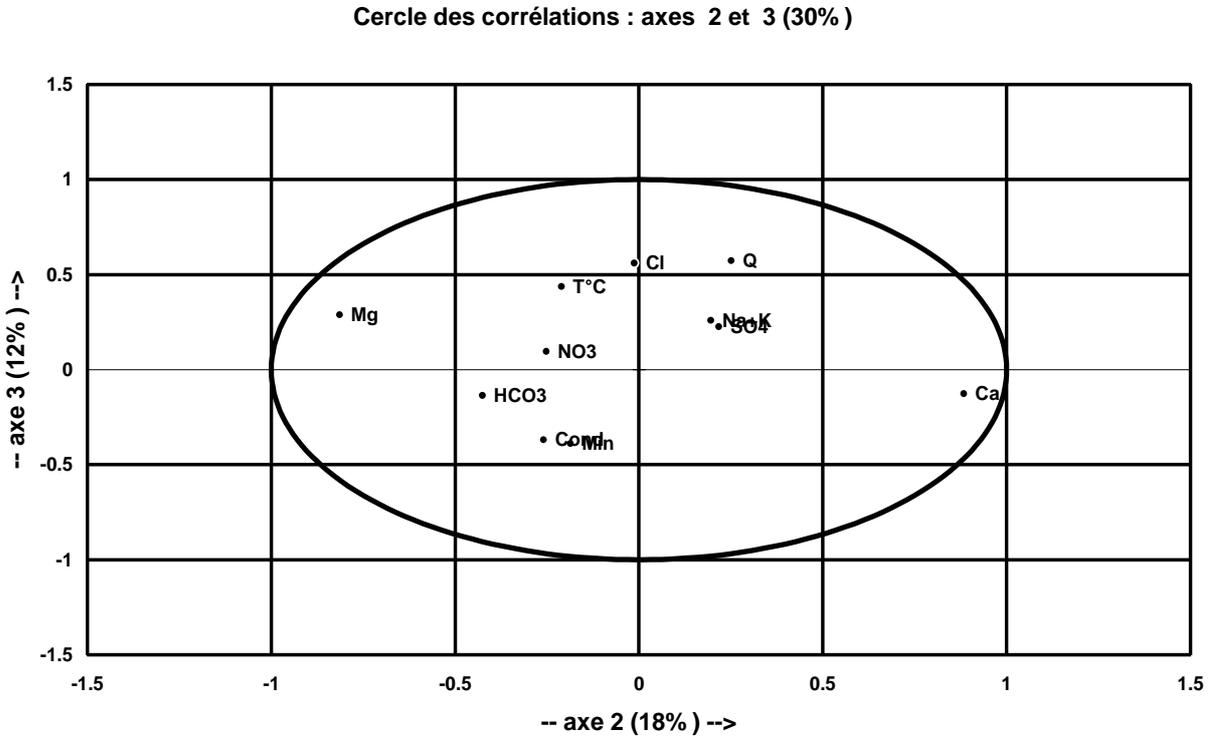


Figure 70 : Cercle de corrélation d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 2-3

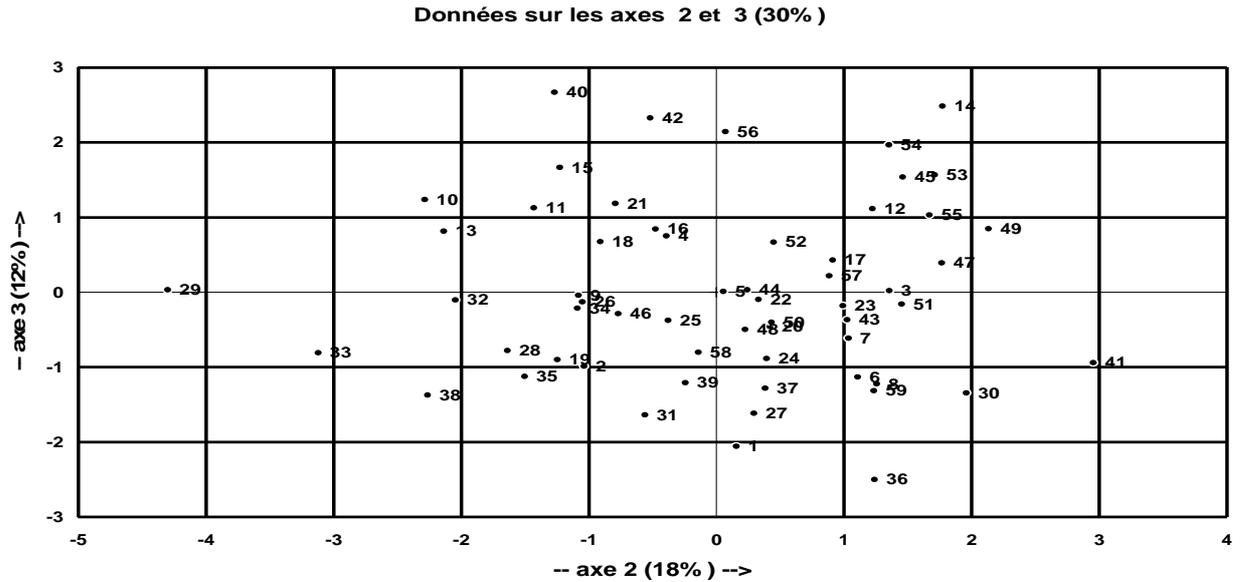


Figure71 : Espace des individus d'Aïn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 2-3

- **Source de Ain Bendou**
- Etude statistique

Variables	moyenne	Ecart type	minimum	maximum	CV
Ca²⁺	83.07	20.11	21	115	0.24
Mg²⁺	50.89	11.63	28	82	0.23
Na⁺	32.21	06.21	7	48	0.19
K⁺	03.07	01.73	2	15	0.56
Cl⁻	47.02	07.24	14	75	0.15
SO₄²⁻	48.70	17.23	15	94	0.35
HCO₃⁻	416.13	28.75	242	461	0.070
NO₃⁻	41.39	09.93	19	60	0.24
SIO₂⁻	08.85	01.90	1.2	13.4	0.21
Conductivité	775.89	46.44	485	850	0.06
Minéralisation	553.38	42.73	347	645	0.077
PH	07.22	0.25	6.53	7.79	0.035
T°C	18.17	01.08	17	21	0.06
Q	14.57	06.77	4	25	0.46

Tableau 16 : Statistique descriptives des variables de Ain Bendou

Analyse en composantes principales

Matrice de corrélation

Les données sont-elles factorisables ?

En passant en revue les éléments de la matrice de corrélation de cette source, nous remarquons que Ca est corrélé négativement avec presque la totalité des variables. Sa corrélation avec Mg est particulièrement bonne (-0.76). La conductivité et la minéralisation sont bien corrélées (0.78) ainsi que le débit et la température (0.58), HCO₃ et Cond. (0.60).

Les mêmes observations, relevées à propos de la matrice de corrélation de Aïn Fouara, se retrouvent dans celles de Aïn Bendou :

- A l'exception des intercorrélations triviales Ca – Mg et conductivité – minéralisation, toutes les autres variables sont médiocrement intercorrélées.
- Le K-M-O est quasiment le même et
- l'indice de sphéricité de Bartlett est toujours aussi peu significatif.

	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3	NO3	Cond.	Min	T°C	Q
Ca	1										
Mg	-0.7612	1									
Na+K	-0.1010	0.1648	1								
Cl	-0.0002	0.3515	0.3430	1							
SO4	0.2548	0.0152	0.2367	0.0155	1						
HCO3	0.2082	0.2491	0.3937	0.4549	-0.0470	1					
NO3	0.2064	-0.0736	0.3088	0.1988	-0.0479	0.2573	1				
Cond.	-0.0544	0.3697	0.4109	0.4286	-0.0510	0.6039	0.2049	1			
Min	0.0106	0.1851	0.3537	0.2494	0.0154	0.4415	0.1139	0.7836	1		
T°C	-0.2828	0.1556	0.2013	0.1823	0.0746	-0.2535	0.0549	-0.0456	-0.0289	1	
Q	0.0258	0.0570	0.2535	0.2541	0.3293	-0.0375	0.2586	-0.2576	-0.2076	0.5806	1

Tableau 17: Matrice de corrélation d'Aïn Bendou

Les données de cette matrice de corrélation ne seraient donc pas factorisables : 5 facteurs sont nécessaires pour expliquer 70% de la variance totale ! L'ACP entreprise sur cette base est de peu d'intérêt ainsi que cela est illustré.

Traitement multidimensionnel des données

Elle a été réalisée avec les 3 premiers facteurs qui cumulent un pourcentage de variance expliquée égal à 64%. Les résultats obtenus montrent la vanité de cette analyse.

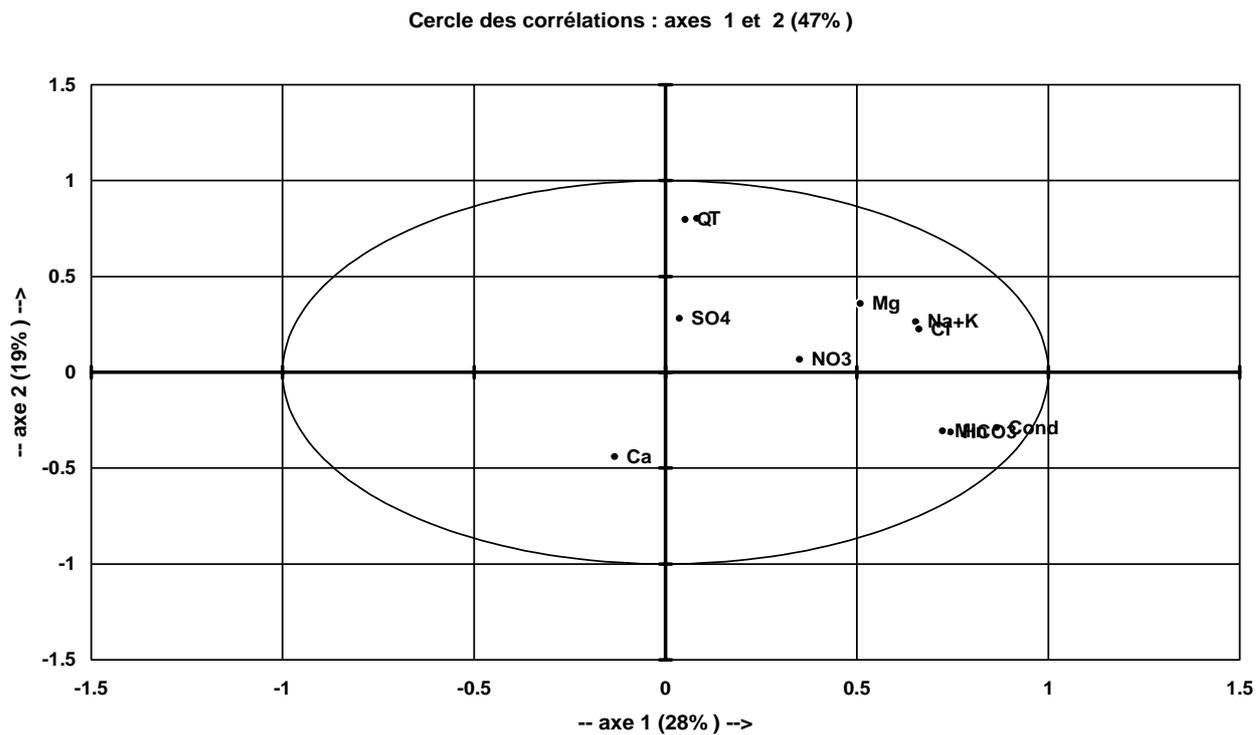


Figure 72: Cercle de corrélation représentant les variables de Aïn Bendou selon le plan 1-2

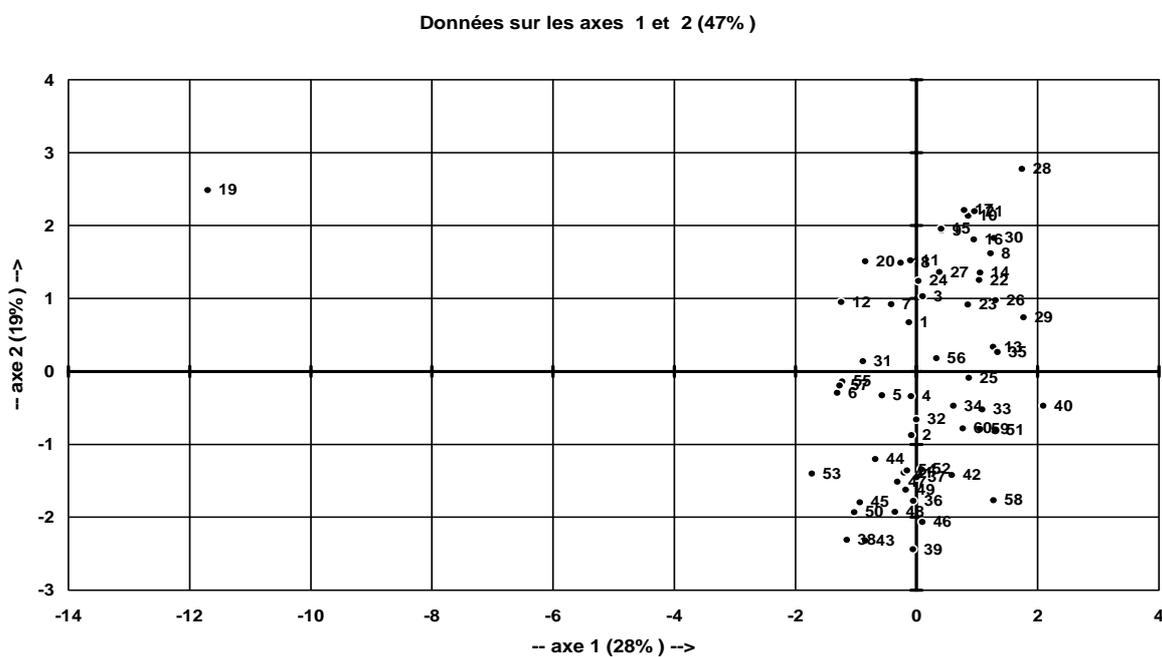


Figure 73: Espace des individus d'Aïn Bendou selon le plan 1-2

Facteur I : Il extrait 28% de la variance. Ce facteur I est non interprétable comme pour la source d'Aïn Fouara.

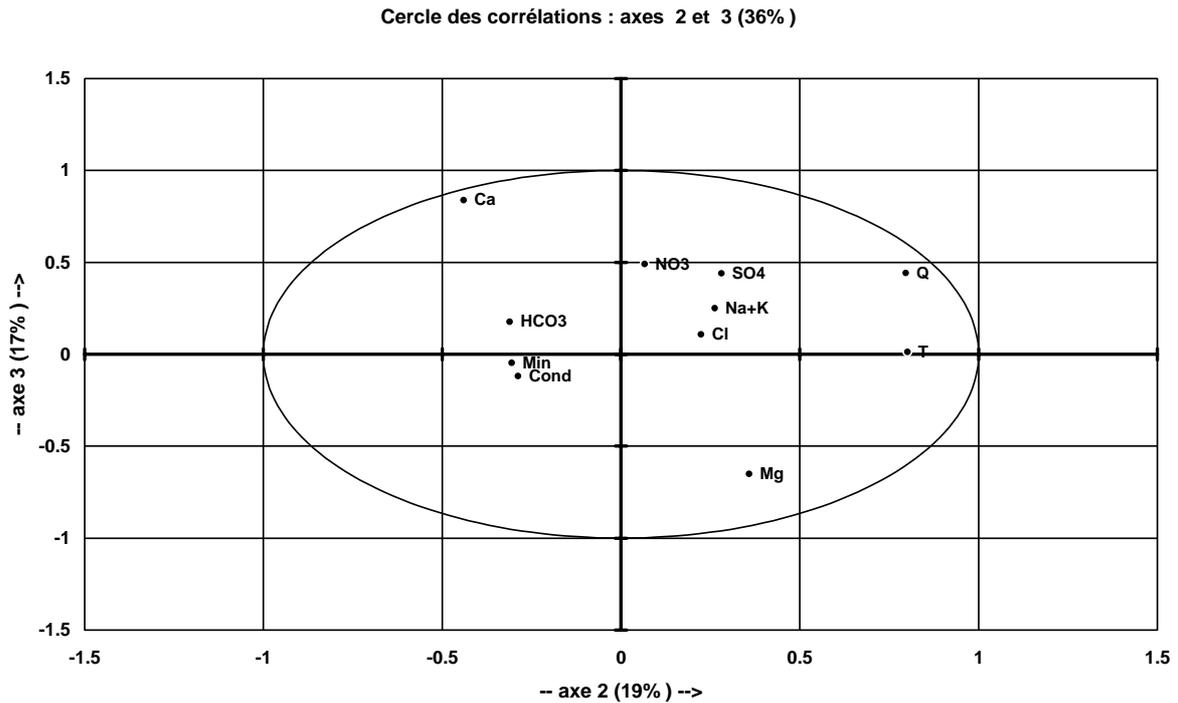


Figure 74: Cercle de corrélation représentant les variables de Aïn Bendou selon le plan 2-3

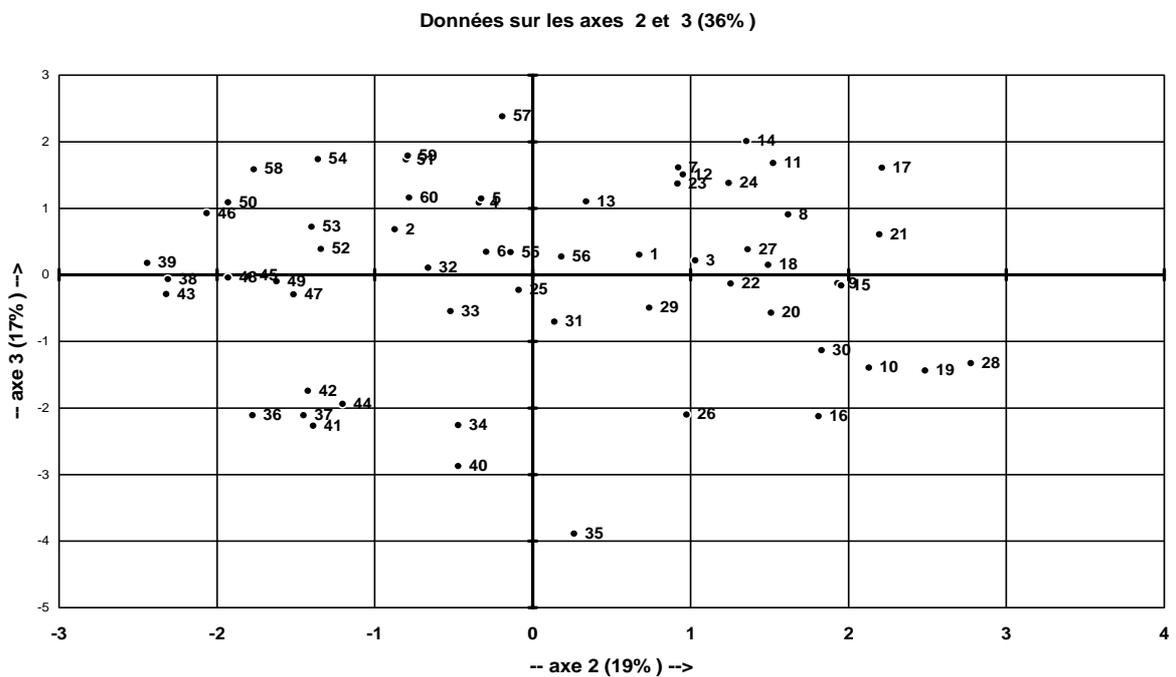


Figure 75: Espace des individus d'Aïn Bendou selon le plan 2-3

Facteur II : Il extrait 19% de la variance, oppose Ca à Mg. Ce facteur est responsable de la durée d'acquisition de chimisme du fait que les éléments à acquisition rapide (Ca) sont opposés aux éléments à acquisition lente (Mg).

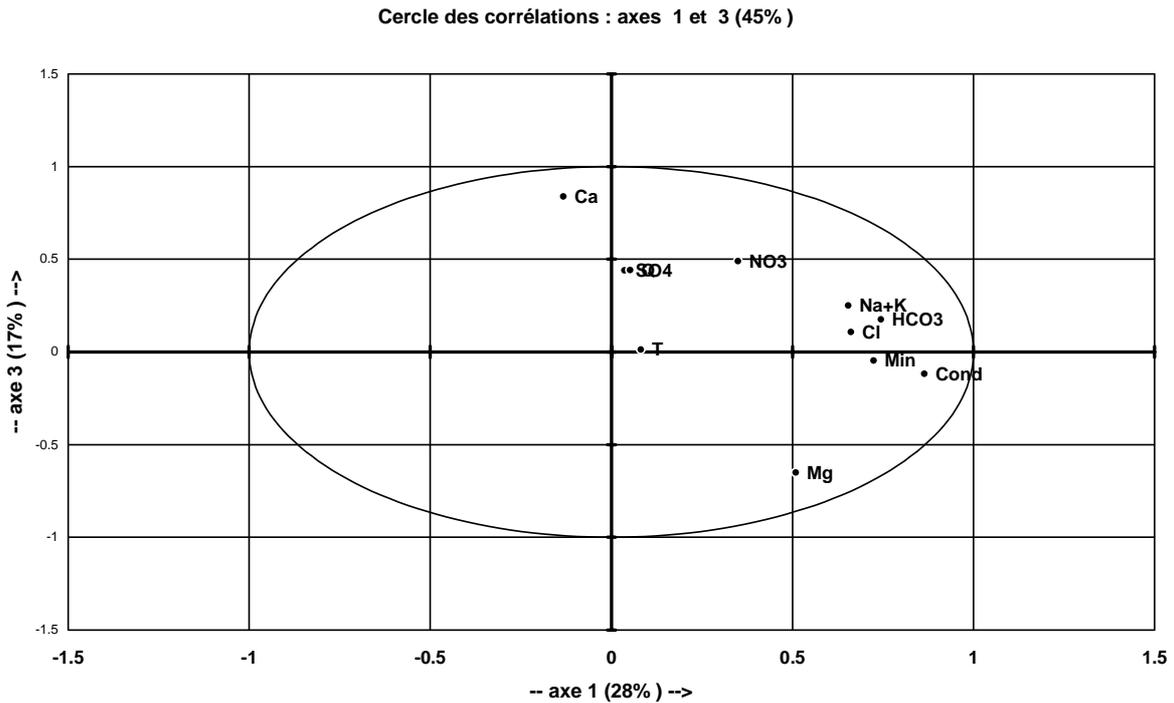


Figure 76: Cercle de corrélation représentant les variables de Aïn Bendou selon le plan 1-3

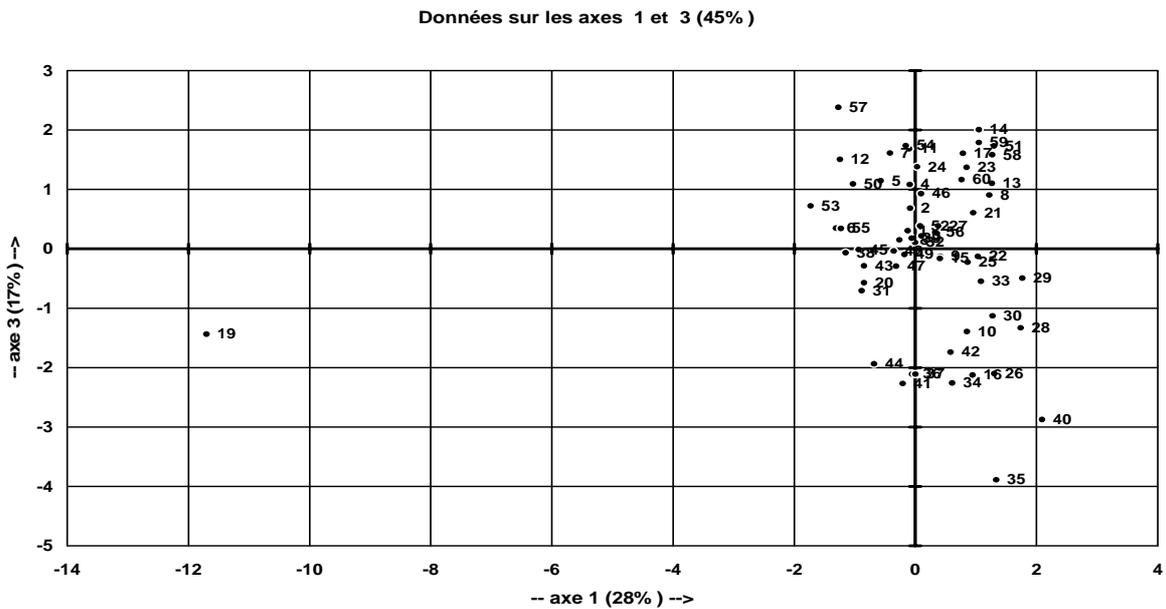


Figure 77: Espace des individus d'Aïn Bendou selon le plan 1-3

Facteur III : Il extrait 17% de la variance, difficile à interpréter du fait de l'opposition des éléments chimiques superficiels à acquisition rapide (Cl) au Ca.

Pour l'espace des individus, nous remarquons une homogénéité de la distribution des échantillons surtout pour le plan 1-2 et 1-3.

➤ **Aîn El Houtz**

- Etude statistique :

variables	moyenne	Ecart type	minimum	maximum	CV
Ca ²⁺	124.34	24.60	29	154	0.20
Mg ²⁺	38.75	12.89	8	91	0.33
Na ⁺	45.76	5.91	12	67	0.13
K ⁺	2.78	1.74	2	15	0.62
Cl	71.02	6.51	34	82	0.092
SO ₄ ²⁻	73.19	23.00	19	125	0.31
HCO ₃ ⁻	404.36	24.20	300	470	0.060
NO ₃ ⁻	77.93	18.58	21	119	0.24
SIO ₂ ⁻	11.27	1.95	6	19	0.17
Conductivité	946.41	50.87	794	1030	0.054
Minéralisation	715.19	44.57	569	782	0.062
PH	7.19	0.22	6.58	7.80	0.030
T°C	19.68	0.65	18	20.5	0.033
Q	16.22	6.38	9	35	0.39

Tableau 18: Statistiques descriptives des variables de Ain El Houtz

Analyse en composantes principales

Matrice de corrélation

Les données sont-elles factorisables ?

	Ca	Mg	Na+K	Cl	SO4	HCO3	NO3	Cond.	Min	T°C	Q
Ca	1										
Mg	-0.7823	1									
Na+K	-0.1437	0.0473	1								
Cl	0.0845	0.1135	0.1297	1							
SO4	0.4498	-0.0890	0.0070	0.1164	1						
HCO3	0.2552	0.0136	0.0407	-0.1069	0.0785	1					
NO3	-0.0159	0.1173	-0.0367	-0.1197	-0.1558	-0.2737	1				
Cond.	-0.4003	0.3050	0.2046	-0.0916	-0.3826	0.1240	0.1580	1			
Min	-0.3355	0.2688	0.1803	-0.0911	-0.3516	0.1459	0.1818	0.9789	1		
T°C	-0.3152	0.2243	0.1762	-0.0270	-0.2205	0.1092	0.0023	0.4432	0.4136	1	
Q	0.1695	-0.1481	-0.1040	0.1037	0.1140	0.0638	-0.1348	-0.3492	-0.3149	0.0937	1

Tableau 19: Matrice de corrélation d'Aîn El houtz

La matrice de corrélation d'Aïn El Houtz ne présente pas de corrélation significative entre ses éléments mis à part Ca avec Mg et la conductivité avec la minéralisation. L'indice K-M-O (0.494) et de Bartlett (0.00) n'inclinent pas à penser que les données soient avantageusement factorisables : 8 facteurs seraient nécessaires pour expliquer 70 % de la variance totale !

Traitement multidimensionnel des données

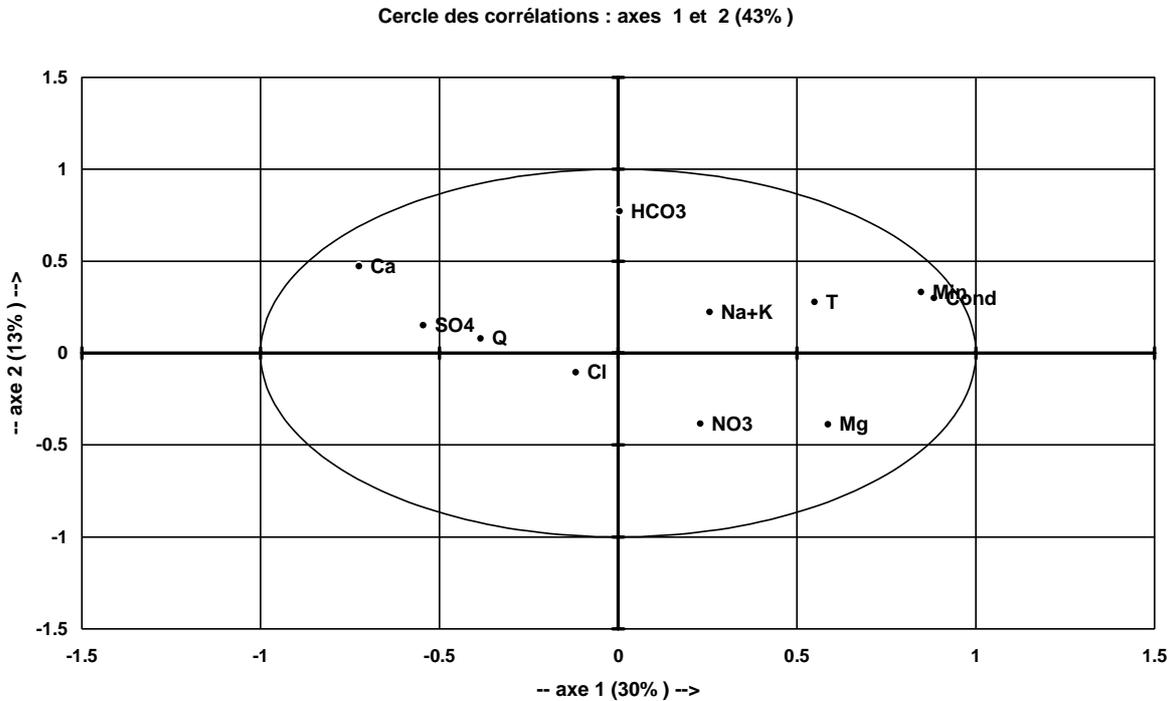


Figure 78: Cercle de corrélation représentant les variables d'Aïn El Houtz selon le plan 1-2

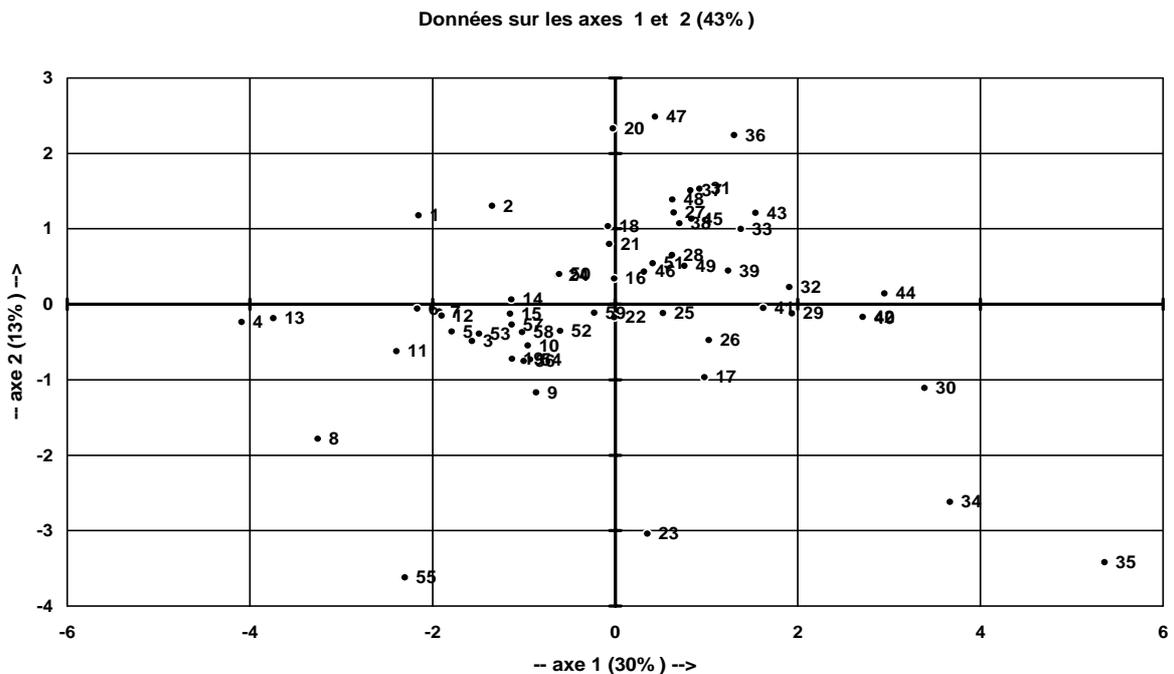


Figure 79: Espace des individus d'Aïn El Houtz selon le plan 1-2

Facteur I : Il extrait 30% de la variance, oppose les éléments calco- carboniques (Ca, HCO₃), SO₄, Q, Na+K, Cond. et Min. au Cl, NO₃ et Mg. De ce fait, ce facteur est responsable du temps de séjour des eaux dans l'aquifère, même si Mg et Cl se trouvent dans le même côté (Ca est un élément à temps de séjour bref contrairement à Mg).

Cercle des corrélations : axes 2 et 3 (26%)

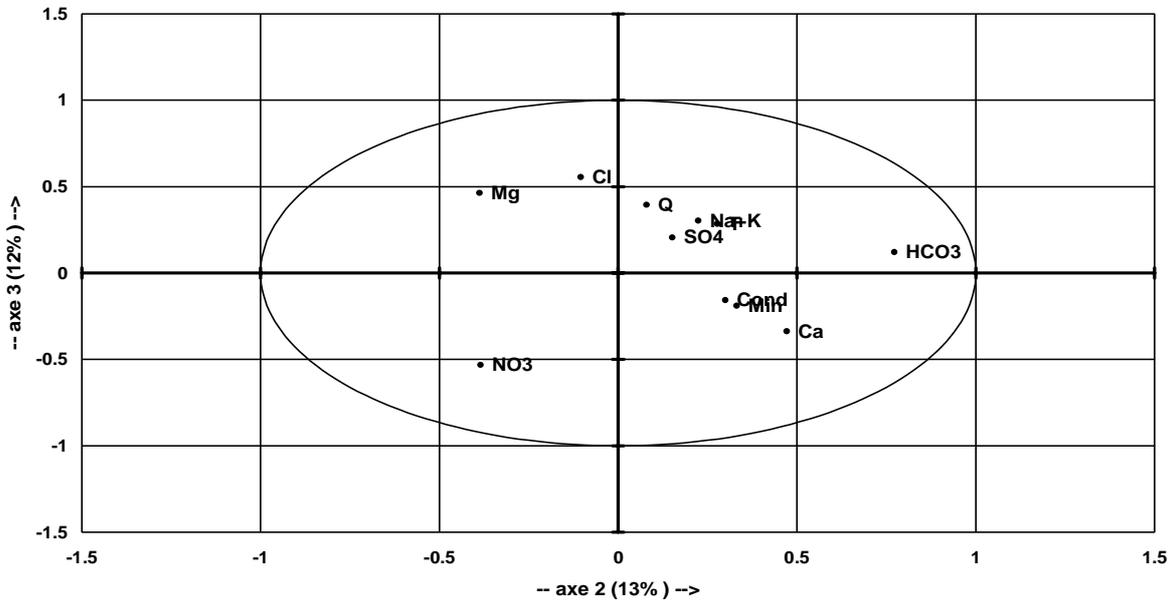


Figure 80: Cercle de corrélation représentant les variables de Aïn El Houtz selon le plan 2-3

Données sur les axes 2 et 3 (26%)

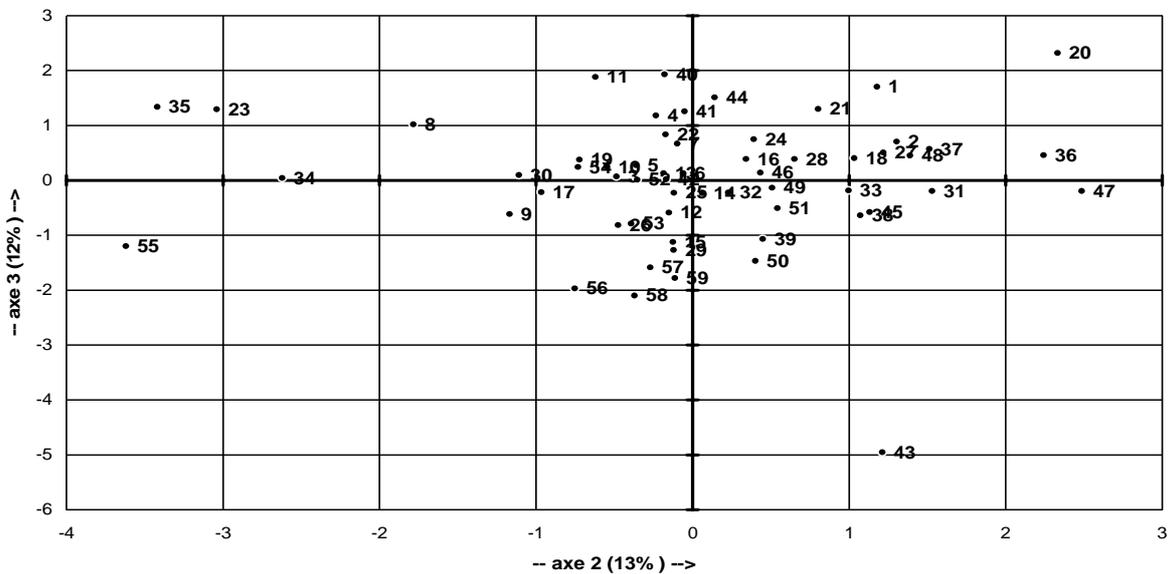


Figure 81: Espace d'individus d'Aïn El Houtz selon le plan 2-3

Facteur II : Il extrait seulement 13% de la variance, oppose Mg, Cl, Q, Na+K, SO₄, HCO₃, au Cond., Min., NO₃, et Ca

Ce facteur rend compte de la vitesse d'acquisition du chimisme et pose un problème d'interprétation du fait du rapprochement entre Cl et Mg.

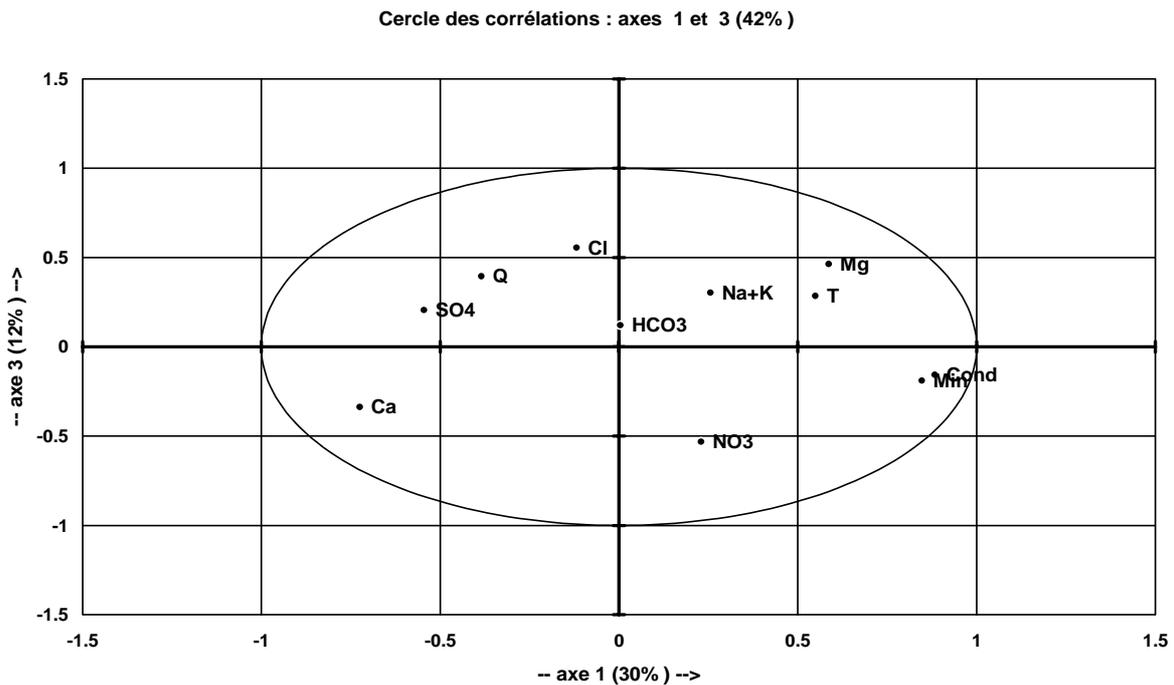


Figure 82: Cercle de corrélation représentant les variables de Aîn El Houtz selon le plan 1-3

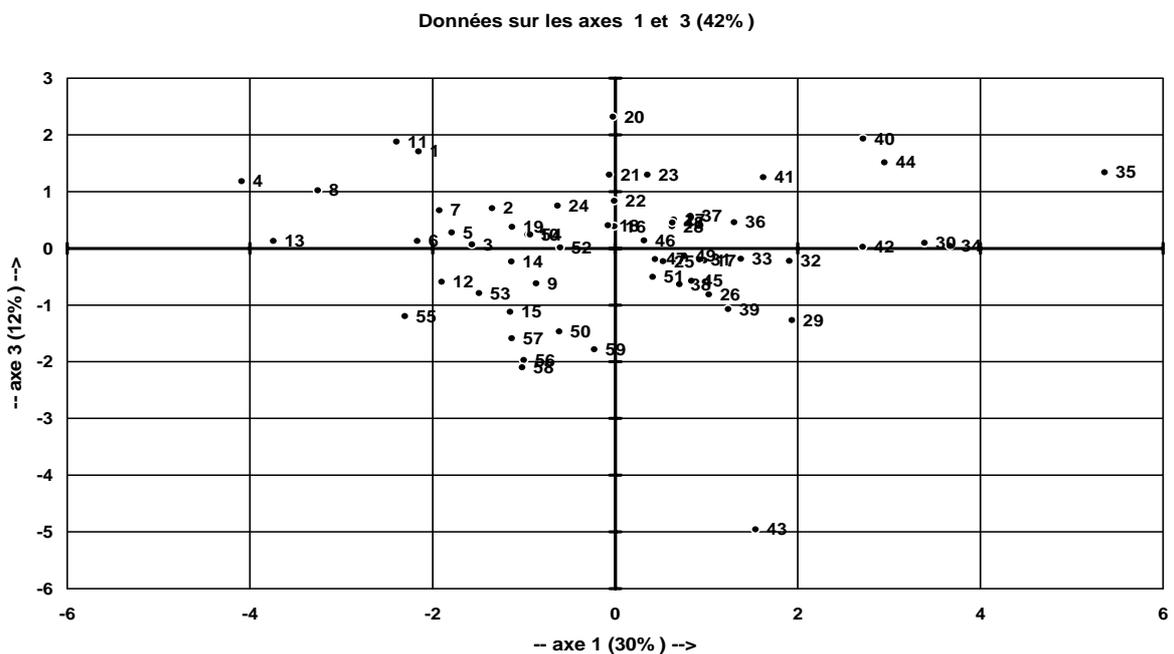


Figure 83: Espace des individus d'Aîn El Houtz selon le plan 1-3

Facteur III : Il explique 12% de la variance et oppose Mg à Cl. Il paraît posséder une signification hydrogéologique pour définir l'acquisition superficielle du Cl ou profonde de Mg.

La représentation dans l'espace des individus de cette source localise la plupart des échantillons autour du centre. Ceci a posé des difficultés pour l'interprétation des ACP.

CONCLUSION

Dans ces ACP, la variabilité est faible et mal structurée. Pour les 3 sources, le pourcentage de variance expliquée par 3 facteurs est dérisoire. Il serait même vain de prendre en compte d'autres composantes factorielles puisque leur contribution expliquerait moins de variance qu'une variable initiale et qu'il serait paradoxal de vouloir réduire la complexité de 14 variables en extrayant presque autant de composantes (9)! Où serait alors la réduction du nombre de facteurs, objectif premier de la méthode.

Quoiqu'il en soit, avec la commodité usuelle reconnue aux axes F1, F2 et F3, on constate qu'il est malaisé de les définir et que les variables qui les caractérisent n'ont pas un poids suffisant pour justifier un traitement statistique. D'autre part, l'utilisation de variables redondantes accroît le poids de certains paramètres qui sont donc moins structurants qu'il n'y paraît. C'est le cas de la conductivité et la minéralisation, de la dureté avec Ca et Mg et du pH. avec les indices de saturation SI_c et SI_a qui sont plus pertinents. Les tableaux de données de chacune des 3 sources devraient plutôt disposer des paramètres du système calco-carbonique qui, eux, ont une véritable signification hydrogéologique et non pas le pH ou les concentrations en Ca ou en HCO_3 .

Malgré ces corrections, l'ACP n'a pu aboutir et disposer de données factorisables. Il faut donc incriminer le contexte hydroclimatologique du cycle hydrologique qui n'aurait pas permis aux variables chimiques d'exprimer leurs intercorrélations. C'est du moins ce que laisse suggérer les matrices des anti-images.

e- Indices de saturations :

Le calcul de ces indices permet d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis de certains minéraux (calcite, aragonite, dolomite, ,). Son calcul ainsi que celui des rapports caractéristiques (en mol/mol) des trois sources ont été déterminés avec le logiciel "DIAGRAMME" (SIMLER, 2002).

- Si $Is < 0$ l'eau est sous-saturée, elle dissoudra la calcite jusqu'à l'équilibre.
- Si $-0.05 < Is < 0.05$, l'eau est en équilibre avec la roche pourvu que le temps de séjour soit suffisamment long.
- Si $Is > 0$, l'eau est sursaturée, la calcite précipite.

Les résultats obtenus sont portés en annexes (tableau 27, 28, 29).

1. Au niveau de la source de Aïn Fouara, les indices Is - calcite, Is - aragonite et Is - dolomite sont tous négatifs i.e. sous saturées en ces minéraux avec un temps de séjour de l'eau en contact avec la roche très court.
2. A Aïn Bendou et Aïn El Houtz, l'eau est tantôt saturée tantôt sous saturée suivant la durée du contact eau/roche et le temps de séjour de ces eaux dans l'aquifère.

Les rapports caractéristiques du tableau 20 montrent :

1. Pour Fouara et Bendou, le rapport Ca/Mg est faible : prédominance des dolomies par rapport aux calcaires.
2. Pour Aïn El houtz, le rapport est très élevé car les eaux circulent dans les calcaires de Zarifet. La calcite est dissoute par l'eau.

Sources		Na/K	Ca / Mg	Cl / Na	I.E.C
Fouara	Min.	1.2	0.5	0.4	0.153
	Max.	62.9	3.7	2.7	
	Moy.	32.05	2.1	1.55	
Bendou	Min.	3	0.2	0.6	-0.116
	Max.	31.5	1.9	5.1	
	Moy.	17.25	1.05	2.85	
Houtz	Min.	5.2	0.2	0.5	-0.029
	Max.	57	9.8	3.7	
	Moy.	31.1	5	2.1	

Tableau 20: Les rapports caractéristiques des trois sources.

- Pour les 3 sources, le rapport Cl/Na est compris entre 1.5 et 3. L'apport de ces deux éléments se fait par la pluie, cela peut être confirmé par le calcul de I.E.C (indice d'échange cationique) par la formule :

$$IEC = \frac{[rCl - (rNa + rK)]}{rCl}$$

La valeur de IEC des trois sources est faible voir même négative (source Aïn Bendou et Aïn El Hout). Cela montre que les échanges entre les alcalins de l'eau et les alcalins des dolomies n'y sont pas poussés.

f- Distribution des fréquences :

La minéralisation de l'eau est un paramètre géochimique qui condense la totalité des informations relatives aux substances dissoutes facile à obtenir par la mesure de la conductivité (Bakalowicz, 1979)

La distribution des fréquences de la minéralisation est une des méthodes globales que l'on utilise pour décrire les variations du chimisme à l'exutoire des aquifères karstique.

L'allure des courbes du catalogue de Bakalowicz (1979) donne une image du degré d'organisation des écoulements souterrains. Cette méthode est fondée sur une approche descriptive, basée sur la comparaison des courbes obtenues à celle du catalogue de courbes de distributions de fréquences (Fig.84). Ainsi, un milieu poreux ou fissuré présentera une courbe

unimodale peu dispersée qui exprime l'homogénéisation des caractéristiques chimiques dans la zone phréatique sans structure karstique fonctionnelle. En revanche, un système karstique développé présentera une courbe de fréquence plurimodale et étalée pour traduire la non-homogénéisation des caractéristiques chimiques.

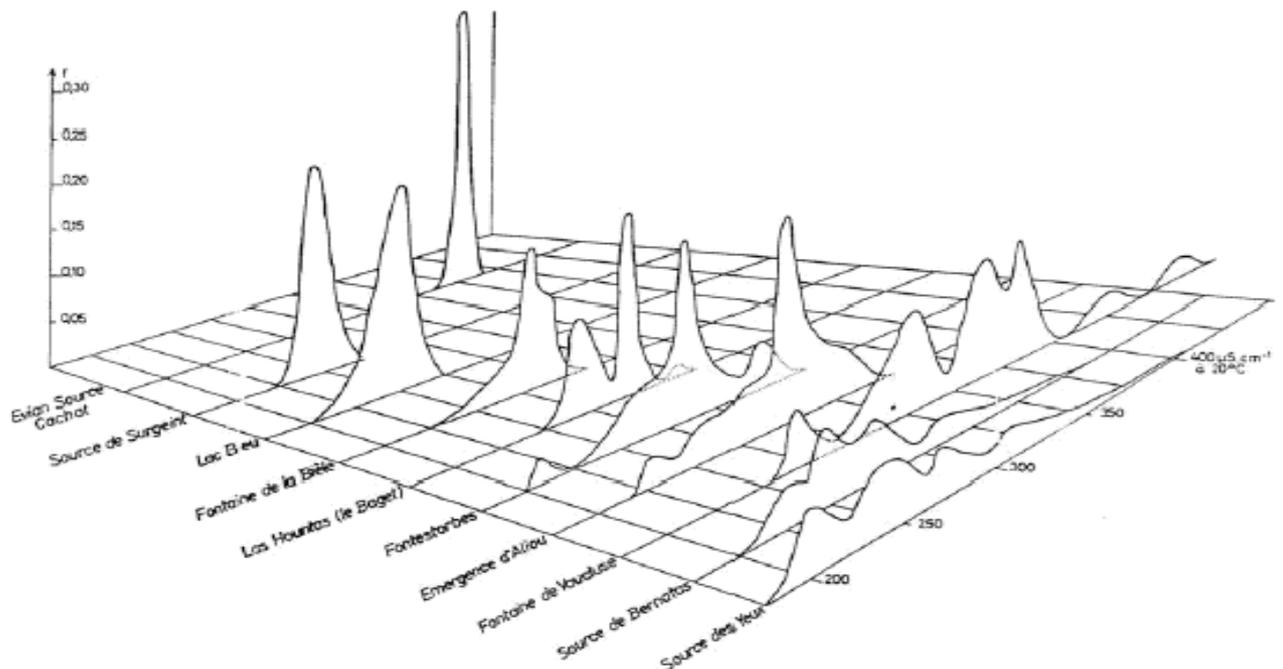


Figure 84: Distribution des fréquences de conductivité (Bakalowicz, 1979)

La courbe de distribution des fréquences de la conductivité d'Aïn Fouara (fig.85), présente une allure étalée et la répartition des fréquences semble se répartir selon trois modes. Les classes de conductivités 350-450 à 550-600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ qui encadrent le premier mode constituent la quasi-totalité des eaux qui s'écoulent. Un écoulement marginal se manifeste avec un mode de 700-750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un autre de 800-850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ montrant ainsi que le système étudié est karstifié.

Aïn Bendou a une distribution similaire à Aïn Fouara où les modes sont intervertis.

Aïn El Houtz, par contre a une distribution unimodale et étalée qui se rapproche de celle des aquifères carbonatés peu ou non karstifiés.

L'étude de ces courbes n'a pu montrer une organisation du réseau de drainage.

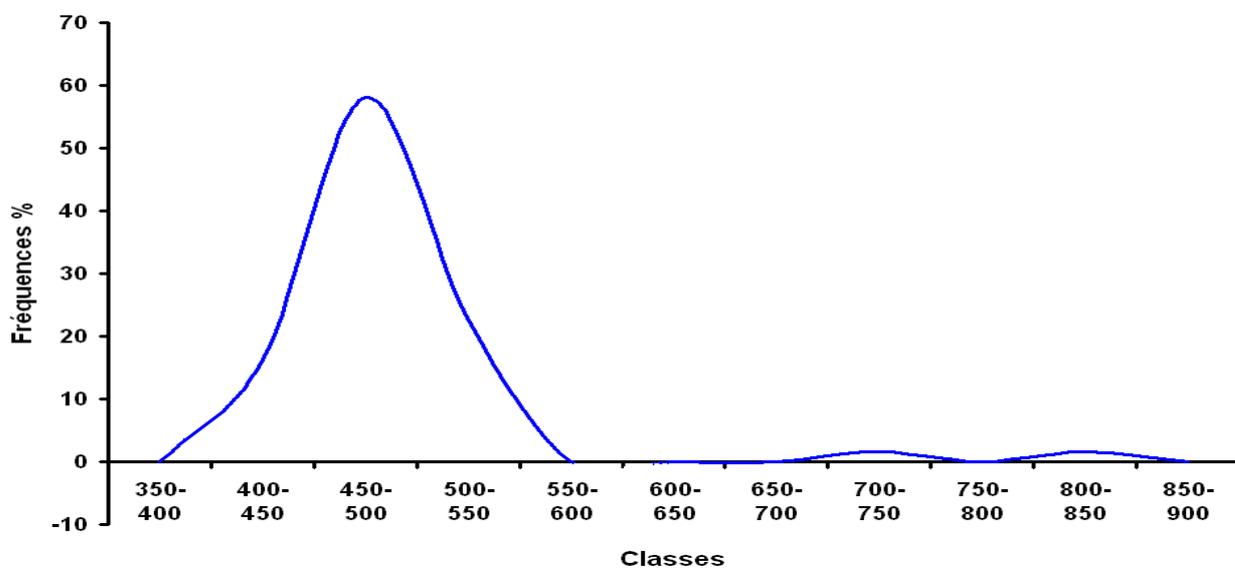


Figure 85: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de Ain Fouara

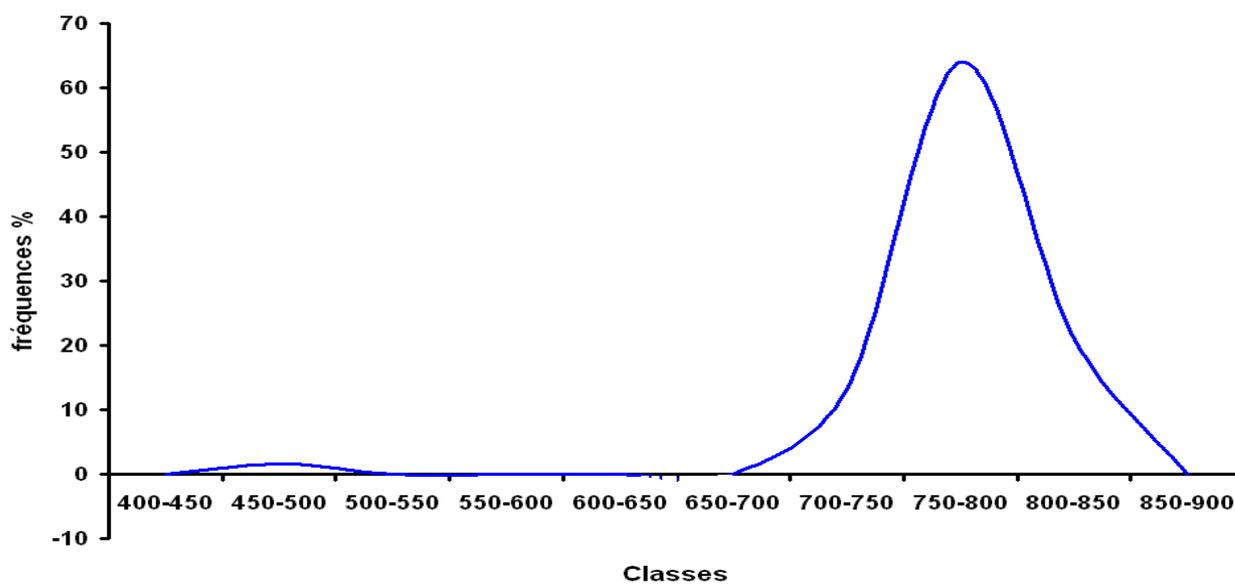


Figure 86: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de Ain Bendou

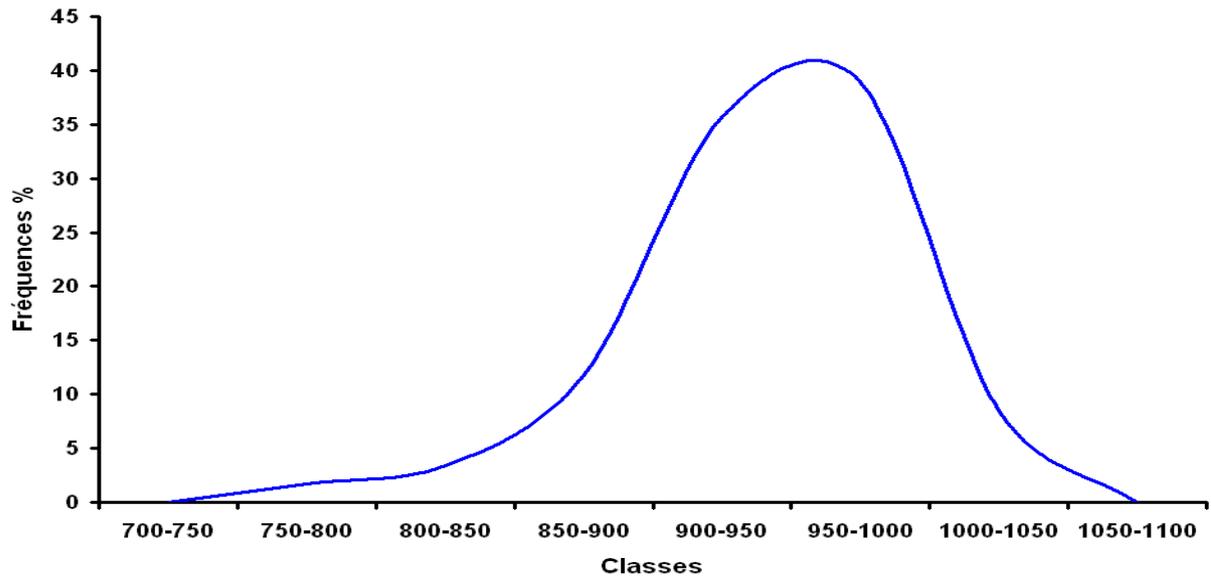


Figure 87: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de Aïn el houtz.

g- Etude du comportement hydrochimique des sources

De nombreux travaux ont montré que l'évolution de la concentration des éléments chimiques des eaux karstiques est directement liée à la structure et au fonctionnement de l'aquifère karstique. Plagnes (1997) dans son étude met en évidence que la composition chimique des eaux dans les aquifères karstiques est fortement influencée par l'enchaînement des événements hydrologiques et en particulier par les crues et leur succession.

La composition chimique de l'eau subit une évolution selon son temps de séjour dans l'aquifère, ses conditions d'écoulement, ses modalités d'infiltration et la lithologie des roches encaissantes. La figure 88 montre l'évolution du chimisme des eaux de Aïn Fouara durant la période du 12/12/2005 au 16/01/2007.

- L'élément Ca et Mg présentent des variations ne dépassant pas 100 Mg/l contrairement à la conductivité, la minéralisation et le résidu sec qui, eux, présentent des variations de fortes amplitudes traduisant une circulation rapide des eaux dans l'aquifère. L'ion Cl augmente en période pluvieuse, puis diminue montrant que le réservoir ne fournit pas cet élément mais sa seule origine est l'eau des précipitations.
- Na et K ne varient pas trop au cours du cycle hydrologique contrairement à SO₄ qui tend à diminuer en période pluvieuse avant d'augmenter traduisant le caractère des eaux de la zone noyée (acquisition lente).
- La température et le pH ne varient pas trop pendant le cycle hydrologique. Quant au débit il ne varie pas trop et marque des pics après les épisodes pluvieux.

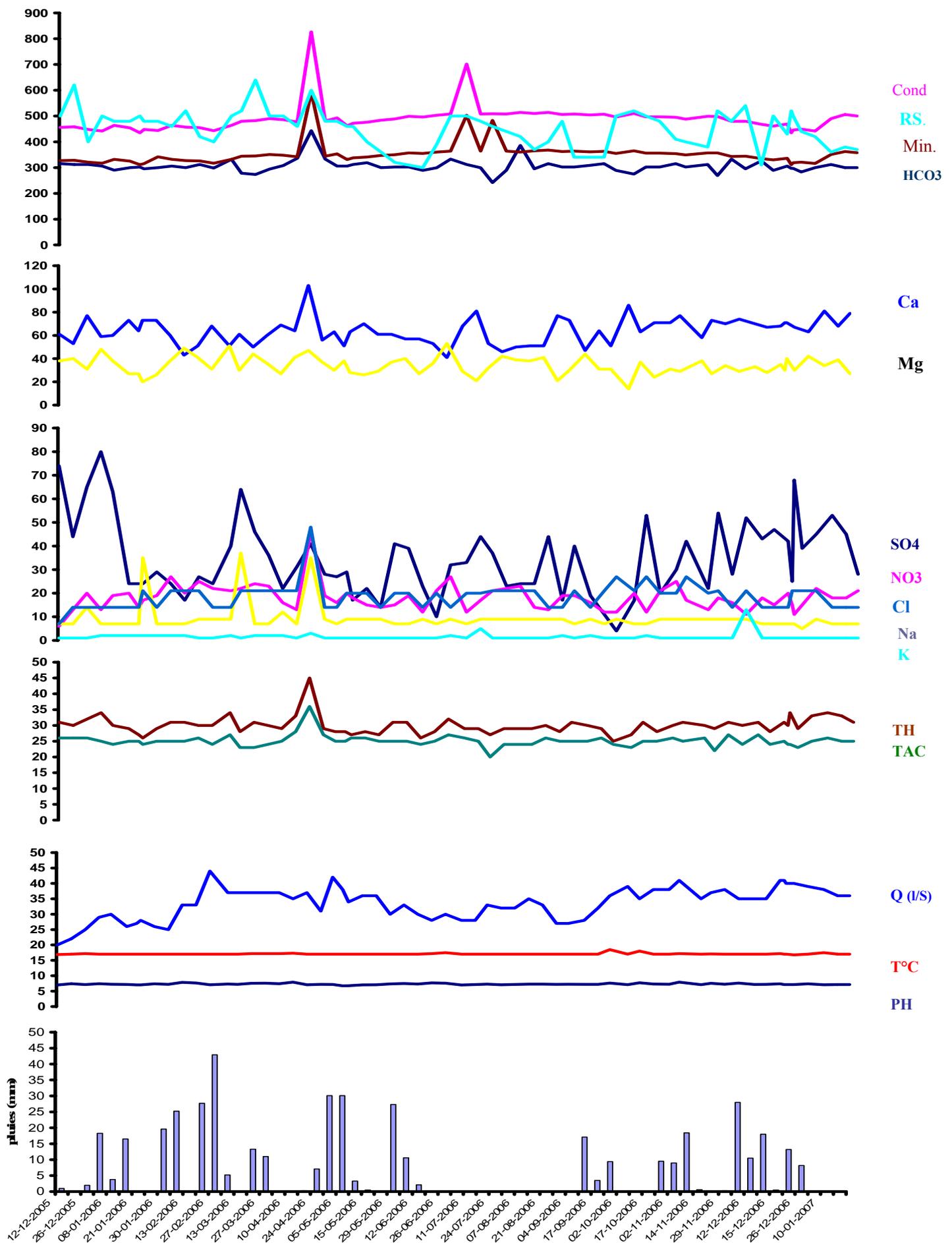


Figure 88: Variation du chimisme d'Aïn Fouara pendant un cycle hydrologique

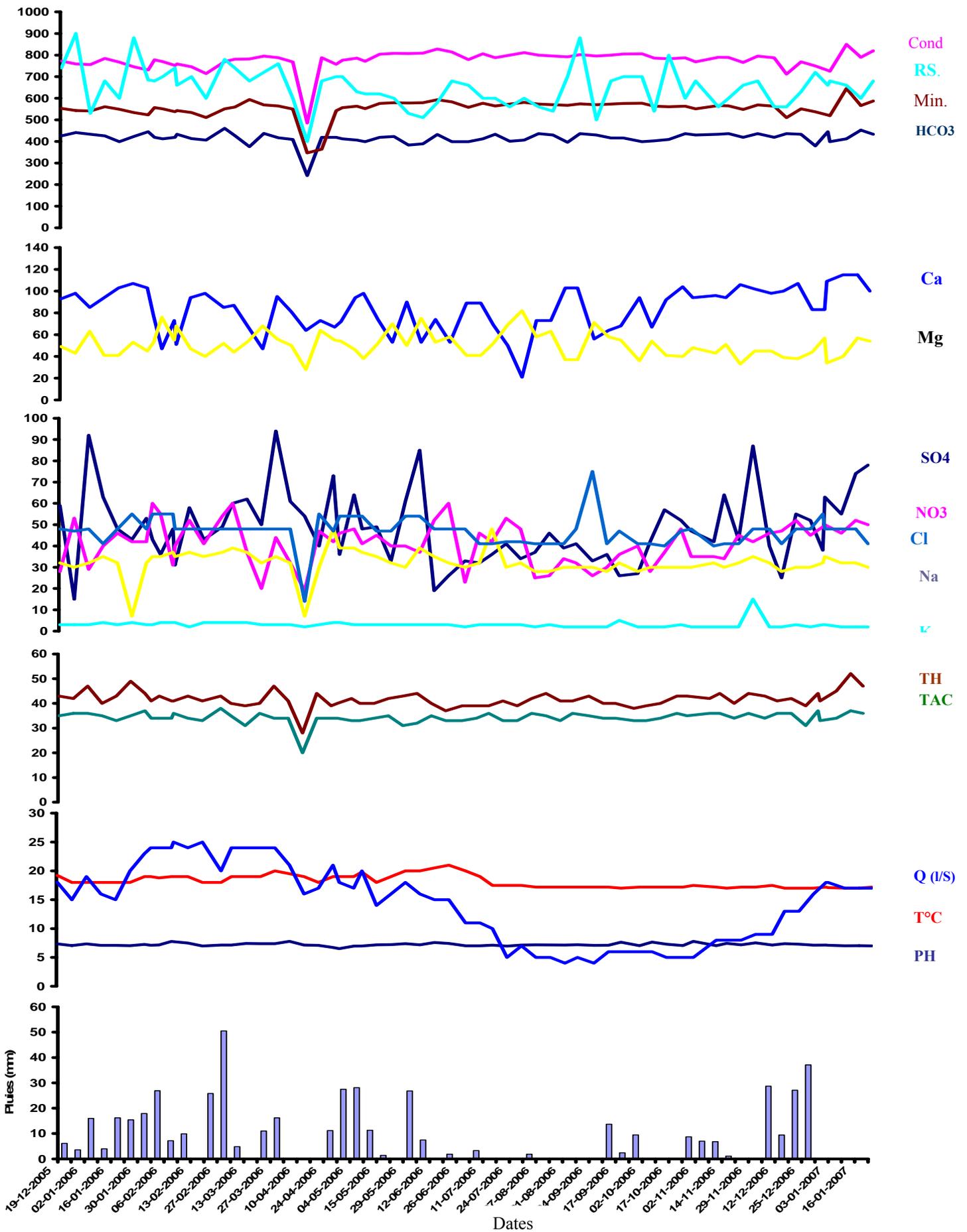


Figure 89: Variations du chimisme d'Aïn Bendou pendant un cycle hydrologique.

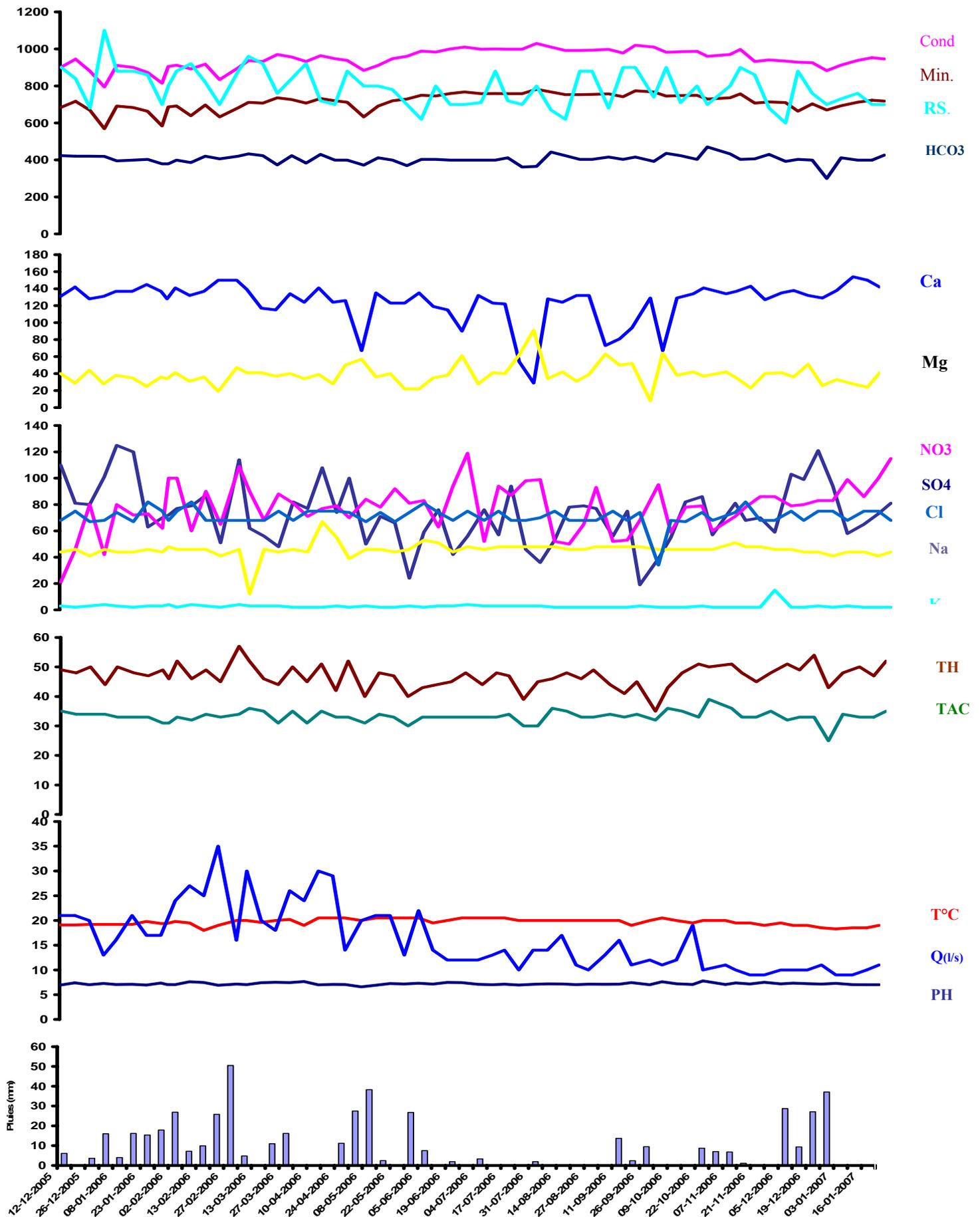


Figure 90: Variations du chimisme d'Aïn El Houtz pendant un cycle hydrologique.

Ces résultats appellent de nous, les observations suivantes :

- un pic systématique dans l'évolution de tous les éléments chimiques correspond à la date du 17/04/2006
- Pour Aïn bendou, le comportement hydrochimique est presque identique à celui d'Aïn Fouara.
- La conductivité, le résidu sec présentent des variations à fortes amplitudes suites à un phénomène pluvieux.
- Le Cl et SO₄ présentent des variations moyennes, et diminuent suite à un signal pluvieux.
- Le pH et la température ne varient presque pas pendant le cycle hydrologique, tandis que le débit, en période d'étiage, diminue jusqu'à atteindre la valeur de 4l/s.
- Une chute brutale des éléments chimiques correspond à la date 17/04/2006.
- Pour Aïn El Houtz (Fig.90), les variations du chimisme, au cours du cycle hydrologique, sont de faibles amplitudes.
- Le PH et la température sont presque stables pendant le cycle d'échantillonnage contrairement au débit qui augmente après un épisode pluvieux et diminue en période d'étiage.
- SO₄, et Cl présente le même comportement que dans les deux autres sources, montrant ainsi leur origine et leur dépendance avec la pluie.
- Les précipitations étaient rares et la neige absente pendant le cycle.

A cette caractérisation hydrochimique des éléments dissous dans l'eau, il faut ajouter celle fournie de l'étude des isotopes de l'environnement telle qu'elle est restituée par Cherchali (1993) et Azzaz (2007).

h- Contenu isotopique des eaux des sources

Les analyses ont portées sur des échantillons de campagnes effectuées en 1991.

Ce sont, en fait, les variations des teneurs du contenu isotopique qui ont été déterminées lors de ces analyses puisque ce sont elles qui sont la source d'information sur les eaux souterraines. Cette variation est évaluée par rapport à un standard de teneurs.

En effet, la composition isotopique moyenne des standards SMOW et VSMOW représente la composition moyenne de celle de l'eau de la masse océanique. Les variations des teneurs en isotopes stables par rapport à ce standard international sont données par la fonction δ (‰) qui exprime les résultats en valeur relative.

Dans le cas du deutérium et de l'oxygène 18, ces variations, i.e. $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$, évoluent en fait de la même façon puisque dans les eaux météoriques, non modifiées par évaporation, ces deux isotopes existent en proportions fixes. C'est dire qu'il existe une relation linéaire entre les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$ dans les eaux météoriques (Craig, 1961).

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \quad (1)$$

Localement les coefficients de cette corrélation, peuvent différer légèrement. En méditerranée occidentale, leurs valeurs sont telles que leur droite de régression a pour équation :

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 13.7 \quad (2)$$

De sorte que les eaux se plaçant sur la droite des eaux météoriques (1) sont supposées avoir pour origine les précipitations et n'avoir subi aucun autre processus isotopique. Par contre, celles situées au-dessus ou en dessous de cette ligne reflètent respectivement la perte ou l'enrichissement en l'un ou l'autre des isotopes sous l'effet de différents processus.

Le contenu isotopique en isotopes de l'environnement relevé lors de ces campagnes par le CDTN est donné dans le tableau 21. Les teneurs en $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ de Ain Bendou et de Ain el Houtz (Cherchali, 1993) situe ces sources légèrement en marge extérieure de ces 2 droites (fig. 70).

Comme la proximité géographique de ces sources implique un même contenu isotopique des eaux de pluies qui s'infiltrent et vont les alimenter, la différence observée dans les variations de $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ signifie soit que ces eaux infiltrées subissent, localement dans la zone non saturée, une modification de la composition isotopique avant de gagner la zone noyée soit qu'il y a des occurrences d'eaux plus anciennes à la faveur des accidents tectoniques.

Cette hypothèse est confortée par les données sur les isotopes du carbone ($\delta^{13}\text{C}_{\text{Dic}} = -10.54 \text{ ‰}$) et de l'indice de saturation de la calcite (0.67) de Ain El Hout et par la teneur en tritium de Ain Bendou (16 UT), proche de celle des eaux de pluies et qui, de ce fait, donne à penser que ce sont là des eaux de nappe libre, contemporaines enrichies par évaporation (Azzaz et al, 2007).

	Alt (m)	$^{18}\text{O} \text{ ‰}$	$^2\text{H} \text{ ‰}$	^3H TU	^{14}C pmc	$^{13}\text{C} \text{ ‰}$	$^{13}\text{C}_{\text{calc}} \text{ ‰ OS}$	$^{13}\text{C}_{\text{calc}} \text{ ‰ CS}$	A_0 pmc
Bendou	540	- 6.6	- 43.2	15.9	87	- 13.12	-12.95	- 8.30	62.48
Ain el Houtz	517	- 6.9	- 41.2	ND	72	- 10.54	-11.85	- 6.16	59.19
Fouara	1006	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

Tableau 21. Contenu isotopique des eaux des sources de Ain Bendou et de Ain El Houtz (source, CDTN, 1993).

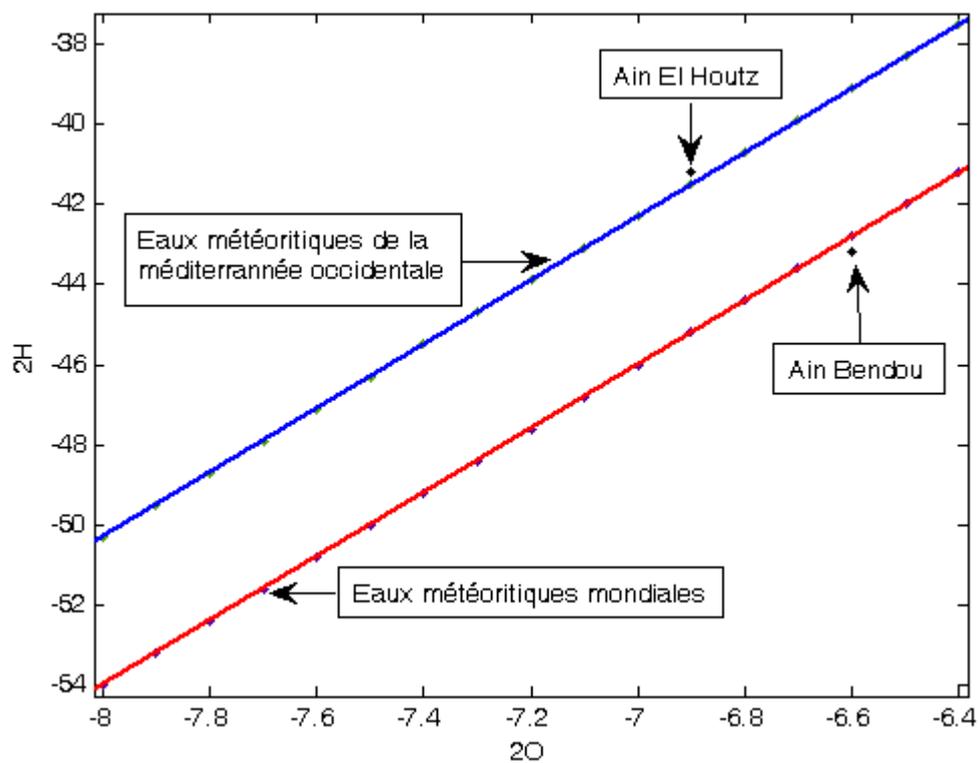


Figure 91. Situation des eaux des sources de Ain Bendou et de Ain el Houtz par rapport aux droites des eaux météoritiques mondiales et de la méditerranée occidentale.

Conclusion générale

De cette étude, nous pouvons retenir :

1. Que les formations dolomitiques des monts de Tlemcen constituent un système aquifère dont les seuls réseaux fonctionnels sont ceux connectés aux exutoires actuels i.e. Ain Bendou, Ain Fouara et Ain el Hout. L'impluvium du système est de type binaire. Quant aux conditions internes au système, représentatives du processus dynamique de la karstification, elles semblent avoir jouées de façon à déterminer une configuration de type jurassien. Cette position du réseau de drainage par rapport à l'exutoire est compatible avec l'ordre de grandeur des vitesses d'écoulement observés $\sim m s^{-1}$.

L'analyse des débits classés a permis de confirmer que les sources étudiées n'offraient ni trop plein, ni fuite vers un autre système. Etant donné les faibles précipitations enregistrées durant le cycle hydrologique, aucune crue n'a été observée au pas hebdomadaire. L'estimation des paramètres de récession à ce pas est néanmoins grossière. Elle affilie le système au domaine des systèmes complexes (domaine 1), généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes où prédominerait une infiltration lente, un drainage médiocre et des réserves mobilisables modestes, compatibles avec des temps de séjour dans la zone noyée de l'ordre de 250 jours. Ce système semble, toutefois, présenter une homogénéité qui peut être rapprochée de la structure compartimentée qui prévaut dans la région. Un échantillonnage journalier aurait permis d'apprécier la robustesse de cette caractérisation pour voir si la sensibilité des paramètres η et ε au pas d'échantillonnage est telle qu'elle puisse modifier les paramètres liés à l'infiltration et donc à la famille d'affiliation du système.

Quant aux phénomènes hydrologique dont rend compte l'analyse corrélatrice et spectrale des données de débit hebdomadaire, leurs rythmes ne permet pas de renseigner sur les caractéristiques de drainage du système. A ce pas, les résultats obtenus, ne permettent d'appréhender que les crues lentes de quelques mois induites par des précipitations sur des systèmes aquifères particulièrement inertiels.

L'étude hydrochimique confirme la règle générale, observée dans les eaux des émergences karstiques, selon laquelle les concentrations en éléments dissous, augmentent entre les hautes et les basses eaux. Cet accroissement, bien illustré pour les 3 sources, par la conductivité et la minéralisation, montrent qu'il y a là un phénomène de dissolution de la matrice aquifère variable au cours du cycle hydrologique. La température des eaux (18.2 à 19.2 °C), reflètent les conditions thermiques locales puisque la température moyenne annuelle de l'air à Tlemcen est de 12.2°C, celle du mois le plus froid 10.7°C et celle du mois le plus chaud 26.6°C. Quant à leur faciès chimique, il est naturellement carbonaté calcique et souvent magnésien.

La source de Ain el Hout semblent marquée par une participation d'eaux profondes que ne confirme pas la courbe de distribution des fréquences de la conductivité. Cette réserve doit être, cependant être nuancée, compte tenu du fait que la conductivité ne permet pas d'exprimer les différenciations hydrochimiques.

Les indices de saturation de la calcite pour Ain Bendou et Ain El Hout indiquent tantôt des valeurs positives consécutives à une phase de dégazage de CO₂ tantôt des valeurs négatives qui expriment un temps de contact de l'eau souterraine avec la roche carbonatée très court.

Cette évolution générale traduit une tendance, après les épisodes de recharge, au dégazage du CO₂ des eaux souterraines, favorisant la précipitation de calcite. Cette tendance est confirmée par l'évolution des indices de saturation de la dolomite de la sous-saturation à la saturation.

Les quelques valeurs de SI ~ 0 donnent à penser qu'il y a aussi des conjonctures hydrologiques où, pendant quelques semaines au moins, l'eau reste confinée dans la zone noyée sans écoulement à surface libre.

Pour Ain Fouara, les indices Sic et Sid identiquement négatifs révèlent que le pouvoir de dissolution de l'eau sur la roche réservoir dolomitique persiste durant tout le cycle hydrologique.

2. Que les méthodes utilisées, pour réaliser l'inférence de la structure et du fonctionnement du système karstique des dolomies de Tlemcen, sont réputées décrire l'hydrogramme unitaire. Que les appliquer sur l'hydrogramme réel sur un système *non stationnaire* et *non-linéaire* et avec des *effets de seuils* implique de réaliser que les paramètres déterminés sont *dépendants de la période d'étude* et des *conditions hydrologiques* (intensités et durée des précipitations, réserves).

3. Que le cycle hydrologique étudié dans le cadre de ce mémoire est caractérisé par des conditions hydroclimatologiques dont les caractéristiques sont en deçà de celles d'une année hydrologique moyenne et en deçà d'une expression viable des liaisons corrélatoires.

4. Que l'inférence du fonctionnement du système aquifère réalisée sur la base de l'évolution des paramètres du système calco-carbonique mesurés aux exutoires reflète les variations chimiques au niveau de la zone noyée.

Les résultats obtenus sont donc un moment dans l'étude de ce système qui, par ailleurs, se doit d'être étudié sous influence de conditions hydrologiques plus favorables et, si possible, des caractéristiques extrêmes, pour apprécier la variabilité des paramètres en fonction du temps et des conditions hydrologiques.

Références bibliographiques

- ABDESSELAM M. (1995)** : Structure et fonctionnement d'un karst de montagne sous climat méditerranéen : exemple du Djurdjura occidental (Grande Kabylie - Algérie). *Thèse Doct. sc. de la terre univ. de Franche Comté.*
- AUCLAIR D. & BIEHLER J. (1967)** : Etudes géologiques des hautes plaines oranaises entre Tlemcen et Saïda. *Publ. Serv. Géol. Algérie Bull. N°34*
- AZZAZ H. CHERCHALI M. MEDDI M. HOUHA B. PUG J. ACHACHI A. (2007)** : The use of environmental isotopic and hydrochemical tracers to characterize the functioning of karst systems in the Tlemcen mountains, northwest Algeria. *Hydrogeologie journal (2008) Vol 16*
- BAKALOWICZ M. (1979)** : Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse Doct. Es. Sc. Nat. Univ. Pierre et Marie Curie. Paris 6.*
- BAKALOWICZ M. (1993)** : Guide technique n°3 : connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques.
- BENEST M. (1971)** : Importance des mouvements de coulissage et de rotation dans la mise en place de la partie occidentale de la dépression de Sebdou (Monts de Tlemcen, Algérie). *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, Alger, t. 62, fasc. 1-2*
- BENEST M. (1972)** : Les formations carbonatées et les grands rythmes du jurassique supérieur des Monts de Tlemcen (Algérie). *C.R. Acad. Sc., Paris, sér. D., t.275.*
- BENEST M. (1974)** : Evolution tectogénétique de la partie orientale de la dépression de Sebdou (monts de Tlemcen, Algérie) : les mouvements paroxysmaux générateurs de chevauchements. *C.R. Acad. Sc. Paris, sér. D. t. 278.*
- BENEST M. (1985)** : Evolution de la plate forme de l'ouest algérien et du nord – est marocain au cours du jurassique Supérieure et au début du Crétacé : stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. *Docum. Lab. Géol. LYON N°95. fasc 1-2.*
- BENEST, M. BENSALH, M. (1999)** : La couverture mésozoïque et cénozoïque du domaine tlemcenien (Avant pays d'Algérie occidentale) : Stratigraphie, paléo environnement,
- BENEST, M. et ELMI, S. (1969)** : Précisions stratigraphiques sur le Jurassique inférieur et moyen de la partie méridionale des monts de Tlemcen (Algérie). *C.R. som. Soc. Géol. France, Paris, fasc.8,*
- BOUANANI A. (2004)** : Hydrologie, transport solide et modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). *Thèse Doct. Univ. TLEMCEEN.*
- C.D.T.N. (1993)** : Contribution de la géochimie isotopique à l'étude des eaux souterraines des Monts de Tlemcen. *Rapport scientifique établi par M.E.H. Cherchali.*
- CASTANY G. & MARGAT J., (1977)** : Dictionnaire français d'hydrogéologie. BRGM, , 249 p.
- CHAUMONTM.&t PAQUINC., (1971)**. Carte pluviométrique de l'Algérie, éch. 1/50 000. *Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger. 4 feuilles. 1 notice.*
- COLLIGNON B. (1986)** : Hydrogéologie appliquée des aquifères karstiques des Monts de Tlemcen. *Thèse Doct. Nouveau régime, Univ. Avignon Tome1 – Tome2*
- COUMES F. (1966)** : Contribution à l'étude sédimentologique et stratigraphique des Monts de Tlemcen. *Rapport n° :4740*
- CRAIG I.H. (1961)** : Isotopic variations in meteoric water, *Science, 133.*

- EL HAKIM M. (2005)** : Les aquifères karstiques de l'Anti – Liban et du Nord de la plaine de la Bekaa : caractéristiques, fonctionnement, évolution et modélisation, d'après l'exemple du système karstique ANJAR CHAMSINE (LIBAN). *Thèse Doct. Univ. Montpellier 2 et Univ. Saint Josef*
- ELMI S. (1972)** : L'instabilité des Monts de Tlemcen et de Rhar Roubane (ouest algérien), pendant le jurassique : interprétation paléogéographique. CR. Somm. Sc. Geol. France, PARIS, fasc. 5. p220-222.
- GEZE, B. 1973.** *Lexique des termes français de spéléologie physique et de karstologie.* Ann. Spéléol., 28, 1, pp 1-20.
- HAYANE S.M. (1983)** : Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Sikkak (Tlemcen). *Thèse 3^{ème} cycle. Univ. ORAN*
- HAYANE S.M. (1996)** : Les aquifères karstiques. *Cours Magistère. Univ. ORAN*
- KIRALY, L. 1975.** *Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques.* Int. Union Geol. Sci., Hydrogeology of karstic terrains, B, 3, pp 53-67.
- LABAT D. 2000** : Non-linéarité et non stationnarité en hydrologie karstique. Thèse INP Toulouse
- MANGIN, A. (1971)** : Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. Ann. Spéolo. 26, 2.
- MANGIN, A. (1974)** : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Ann. Spéolo.
- MANGIN, A. (1981)** : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie. Contribution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann. Spéolo., 30, 1, p. 21 – 124.
- MANGIN, A. (1981a)** : Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sc. Paris, T.293, Série II, n°5, pp. 401-404.
- MANGIN, A. (1981b)** : Apport des analyses corrélatoire et spectrale croisées dans la connaissance des systèmes hydrologiques. C.R. Acad. Sc. Paris, T.293, Série II, n°14,
- MANGIN, A. (1984)** : Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. Journal of Hydrology, 67, pp. 25-43.
- MARSAUD B. (1997)** : Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. *Thèse Doct. Univ. PARIS 11 ORSAY*
- PLAGNES V. (1997)** : Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux. *Thèse Doct. Univ. Montpellier II*
- SCHOELLER H. (1962)** : Les eaux souterraines. *Masson & Cie éd. Paris.*

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Formes karstiques de surface et de profondeur (Bakalowicz, 1999).....	22
Figure 2 : Schématisation d'un système karstique (C.Drogue, 1971)	24
Figure 3: Représentation du système karstique par Mangin, 1975	25
Figure 4: karst unaire et binaire (Marsaud 1996).....	25
Figure 5: Karst vaclusien et jurassien (Marsaud 1996).....	26
Figure 6: Schématisation du système karstique (Mangin 1975)	27
Figure 7 : Schéma structural de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (M. BENEST, 1985).....	32
Figure 8: Situation géographique de Monts de Tlemcen (COLLIGNON, 1986)	34
Figure 9: Colonne lithostratigraphique des Monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (M.BENEST & M.BENSALAH, 1999).....	36
Figure 10: Carte géologique du secteur d'étude (S.M.Hayane, 1983).....	38
Figure 11: Schéma structurale simplifié des Monts de Tlemcen (ELMI, 1970).....	40
Figure 12: Coupe Transversale des Monts de Tlemcen, illustrant les principaux types d'aquifères de la région (in COLLIGNON, 1986).....	43
Figure 13: Carte en isohyète du bassin de la Tafna (données Seltzer 1913/38).....	45
Figure 14 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (période 1990-2004).....	46
Figure 15: Histogramme des précipitations saisonnières au niveau de la station de Tlemcen durant la période 1990 – 2004	47
Figure 16: Courbe des totaux annuels des précipitations (station de Tlemcen) (période 1990-2004).....	48
Figure 17: Températures minimales, maximales et moyennes à la station de Zenata (période 1981-2006).....	49
Figure 18: Localisation des trois sources étudiées.....	53
Figure 19 : Coupe schématique d' Aïn fouara supérieure (HAYANE, 1983)	54
Figure 20 : coupe schématique d'Aïn Bendou (HAYANE, 1983)	55
Figure 21: Coupe schématique d'Aïn El Houtz (HAYANE, 1983).....	56
Figure 22: Différents cas de rupture de pente de la droite représentative des débit classés (Marsaud, 1997)	57
Figure 23: Courbe des débits classés de la source Aïn Fouara (Du 12/12/2005 au 16/01/2007)	59
Figure 24: Courbe de débits classés de la source Aïn Bendou (Du 19/12/2005 au 16/01/2007)	59
Figure 25: Courbe de débits classés de la source Aïn El Houtz (Du 12/12/2005 au 16/01/2007)	59
Figure 26: Comparaison entre le modèle de Maillet et le modèle proposé par A. Mangin (1970a) in Marsaud 1996	61
Figure 27: Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin (in Marsaud, 1996)	61

Figure 28: Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975).....	63
Figure 29: Courbe de récession d'Aïn Fouara pour le cycle hydrologique.....	64
Figure 30: Courbe de décrue de la source Aïn Fouara.....	64
Figure 31: Courbe de récession de la source Aïn bendou.....	65
Figure 32: Courbe de décrue de la source Aïn Bendou.....	65
Figure 33: Courbe de récession de la source Aïn El Houtz.....	66
Figure 34: Courbe de décrue de la source Aïn El Houtz.....	67
Figure 35 : Position des sources étudiées dans la classification de Mangin (1975).....	68
Figure 36 : Classification des aquifères karstiques de France et du proche orient (Bakalowicz, 2008).....	69
Figure 37: Organisation des analyses corrélatoire et spectrale (d'après A. MANGIN)....	71
Figure 38: Corrélogramme simple et spectre de densité de variance des pluies à la station Lala Setti relatif au cycle d'échantillonnage.....	73
Figure 39: Corrélogramme simple et spectre de densité de variance des débits de la source Aïn Fouara supérieure relatif au cycle hydrologique.....	73
Figure 40: Analyse de la corrélation croisée de la source Aïn Fouara supérieure.....	74
Figure 41: Corrélogramme simple des pluies à la station de Tlemcen relatif au cycle d'échantillonnage.....	75
Figure 42: Corrélogramme simple des débits d'Aïn Bendou relatif au cycle d'échantillonnage.....	75
Figure 43: Analyse de la corrélation croisée d'Aïn Bendou à court terme.....	76
Figure 44: Corrélogramme simple de la pluie à la station de Tlemcen relatif au cycle d'échantillonnage.....	77
Figure 45: Corrélogramme simple et spectre des débits à court terme.....	77
Figure 46: Analyse croisée de la source Aïn El Houtz à court terme.....	78
Figure 47: Station et source Aïn Bendou.....	86
Figure 48: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source Aïn Fouara supérieure.....	88
Figure 49: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source Aïn Bendou.....	88
Figure 50: Relation entre la minéralisation et la conductivité de la source Aïn El Houtz.....	89
Figure 51: Classification des eaux de la source Aïn Fouara Supérieure selon le diagramme de Schoeller – Berkloff.....	90
Figure 52: Classification des eaux de la source Aïn Bendou selon le diagramme de Schoeller – Berkloff.....	90
Figure 53: Classification des eaux de la source Aïn El Houtz selon le diagramme de Schoeller – Berkloff.....	91
Figure 54: Classification des eaux de la source Aïn Fouara supérieure d'après le diagramme PIPER.....	92
Figure 55: Classification des eaux de la source Aïn Bendou d'après le diagramme PIPER.....	92

Figure 56: Classification des eaux de la source Aîn El Houtz d'après le diagramme PIPER	93
Figure 57 : Représentation des ions des eaux d'Aîn Fouara supérieure sur un papier Gausso- logarithmique	94
Figure 58: Représentation des ions des eaux d'Aîn Bendou sur un papier Gausso- logarithmique	96
Figure 59 : Représentation des ions des eaux d'Aîn El Houtz sur un papier Gausso- logarithmique	97
Figure 60 : Cercle de corrélation représentant les variables d'Aîn Fouara selon le plan 1-2.....	100
Figure 61 : Espace des individus d'Aîn Fouara selon le plan 1-2.....	101
Figure 62 : Cercle de corrélation représentant les variables d'Aîn Fouara selon le plan 2-3.....	101
Fig. 63 : Espace des individus d'Aîn Fouara selon le plan 2-3	102
Figure 64 : Cercle de corrélation des variables d'Aîn Fouara selon le plan 1-3	102
Figure 65 : Espace d'individus d'Aîn Fouara selon le plan 1-3	103
Figure 66 : Cercle de corrélation d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-2	103
Figure 67 : Espace des individus d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-2	104
Figure 68 : Cercle de corrélation d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-3	104
Figure 69 : Espace des individus d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 1-3	105
Figure 70 : Cercle de corrélation d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 2-3	105
Figure71 : Espace des individus d'Aîn Fouara sans les échantillons 20 et 32 suivant le facteur 2-3	106
Figure 72: Cercle de corrélation représentant les variables de Aîn Bendou selon le plan 1-2.....	108
Figure 73: Espace des individus d'Aîn Bendou selon le plan 1-2	108
Figure 74 : Cercle de corrélation représentant les variables de Aîn Bendou selon le plan 2-3	109
Figure 75: Espace des individus d'Aîn Bendou selon le plan 2-3	109
Figure 76: Cercle de corrélation représentant les variables de Aîn Bendou selon le plan 1-3.....	110
Figure 77 : Espace des individus d'Aîn Bendou selon le plan 1-3	110
Figure 78: Cercle de corrélation représentant les variables d'Aîn El Houtz selon le plan 1-2.....	112
Figure 79: Espace des individus d'Aîn El Houtz selon le plan 1-2.....	112
Figure 80 : Cercle de corrélation représentant les variables de Aîn El Houtz selon le plan 2-3.....	113
Figure 81: Espace d'individus d'Aîn El Houtz selon le plan 2-3	113

Figure 82: Cercle de corrélation représentant les variables de Aïn El Houtz selon le plan 1-3	114
Figure 83: Espace des individus d'Aïn El Houtz selon le plan 1-3	114
Figure 84: Distribution des fréquences de conductivité (Bakalowicz, 1979)	117
Figure 85: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de la source Aïn Fouara supérieure	118
Figure 86: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de la source Aïn Bendou	118
Figure 87: Distribution des fréquences des classes de la conductivité de la source Aïn el houtz.....	119
Figure 88: Variation du chimisme d'Aïn Fouara pendant un cycle hydrologique.....	120
Figure 89: Variation du chimisme d'Aïn Bendou pendant un cycle hydrologique.....	121
Figure 90: Variations du chimisme d'Aïn El Houtz pendant un cycle hydrologique	122
Figure 91 : Situation des eaux des sources de Aïn Bendou et de Aïn El Houtz par rapport aux droites météoriques mondiales et de la méditerranée occidentale	125

Liste des tableaux

Tableau 1 : Constantes de dissociation des principaux minéraux des roches carbonatées (Bakalowicz, 1979).....	21
Tableau 2 : Situation des stations climatiques étudiées	46
Tableau 3 : précipitations moyennes mensuelles à la station de Tlemcen (période 1990-2004).....	46
Tableau 4 : Précipitations saisonnières enregistrées à la station de Tlemcen (période 1990-2004).....	47
Tableau 5 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Tlemcen	48
Tableau 6 : Températures moyennes mensuelles à la station de Zenata (période 1981-2006).....	49
Tableau 7 : interprétation des ruptures de pente de la droite représentative des débits classés.....	58
Tableau 8 : tableau récapitulatif des résultats de l'analyse de l'hydrogramme des sources.....	68
Tableau 9 : Classification des systèmes karstiques à partir de l'analyse corrélatoire et spectrale.....	72
Tableau 10 : Coefficient de stabilité de quelques éléments chimiques des trois sources	85
Tableau 11 : Moyenne et écart type des températures des trois sources.....	85
Tableau 12 : moyenne et écarts type du PH des sources étudiées	87
Tableau 13 : Tableau des corrélations conductivité/minéralisation des sources	87
Tableau 14 : statistiques descriptives des variables d'Aïn Fouara.....	99
Tableau 15 : Matrice de corrélation de la source Aïn Fouara	99
Tableau 16 : statistique descriptives des variables de Aïn Bendou	106
Tableau 17 : Matrice de corrélation d'Aïn Bendou	107
Tableau 18 : statistique descriptives des variables de Aïn El Houtz.....	111
Tableau 19 : Matrice de corrélation d'Aïn El houtz	111
Tableau 20 : les rapports caractéristiques des trois sources.....	116
Tableau21 : Pourcentages d'erreur des analyses chimiques d'Aïn Fouara Supérieure	143
Tableau22 : Pourcentages d'erreur des analyses chimiques d'Aïn Bendou	145
Tableau23 : Pourcentages d'erreur des analyses chimiques d'Aïn El Houtz	147
Tableau24 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciés pour la source Aïn Fouara supérieure.....	149
Tableau25 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciés pour la source Aïn Bendou.....	154
Tableau26 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciés pour la source Aïn El Houtz.....	159

Annexes

N°	$\Sigma r \text{ cat.}$	$\Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} - \Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} + \Sigma r \text{ an.}$	% d'erreur	Résultats
1	6.49	6.98	0.49	13.47	3.63	Analyse acceptable
2	6.25	6.61	0.36	12.86	2.79	Analyse acceptable
3	7.01	7.17	0.16	14.18	1.12	Très bonne analyse
4	7.24	7.26	0.02	14.50	0.13	Très bonne analyse
5	6.47	6.75	0.28	13.22	2.11	Analyse acceptable
6	6.22	6.12	0.10	12.34	0.81	Très bonne analyse
7	5.77	6.06	0.29	11.83	2.45	Analyse acceptable
8	6.86	6.19	0.67	13.05	5.13	Mauvaise analyse
9	6.13	6.20	0.07	12.33	0.56	Très bonne analyse
10	6.47	6.53	0.06	13.00	0.46	Très bonne analyse
11	6.52	6.17	0.35	12.69	2.75	Analyse acceptable
12	6.33	6.66	0.33	12.99	2.54	Analyse acceptable
13	6.35	6.12	0.23	12.47	1.84	Très bonne analyse
14	7.18	6.99	0.19	14.17	1.34	Très bonne analyse
15	7.13	6.82	0.31	13.95	2.22	Analyse acceptable
16	6.46	6.39	0.07	12.85	0.54	Très bonne analyse
17	6.31	6.52	0.21	12.83	1.63	Très bonne analyse
18	6.24	6.33	0.09	12.57	0.71	Très bonne analyse
19	6.89	6.93	0.04	13.82	0.28	Très bonne analyse
20	10.60	10.20	0.40	20.80	1.92	Très bonne analyse
21	6.25	6.72	0.47	12.97	3.62	Analyse acceptable
22	5.93	6.21	0.28	12.14	2.30	Analyse acceptable
23	6.08	6.49	0.41	12.57	3.26	Analyse acceptable
24	5.86	6.31	0.45	12.17	3.69	Analyse acceptable
25	6.04	6.47	0.43	12.51	3.43	Analyse acceptable
26	5.84	5.81	0.03	11.65	0.25	Très bonne analyse
27	6.41	6.60	0.19	13.01	1.46	Très bonne analyse
28	6.45	6.62	0.17	13.07	1.30	Très bonne analyse
29	5.48	5.78	0.30	11.26	2.66	Analyse acceptable
30	5.93	5.99	0.06	11.92	0.50	Très bonne analyse
31	6.84	6.93	0.09	13.77	0.65	Très bonne analyse
32	6.10	6.54	0.44	12.64	3.48	Analyse acceptable
33	6.28	6.64	0.36	12.92	2.78	Analyse acceptable
34	5.69	5.65	0.04	11.34	0.35	Très bonne analyse
35	6.16	6.16	0.00	12.32	0	Très bonne analyse
36	6.11	6.14	0.03	12.25	0.24	Très bonne analyse
37	6.08	6.14	0.06	12.22	0.49	Très bonne analyse
38	6.33	6.66	0.33	12.99	2.54	Analyse acceptable
39	6.01	5.99	0.02	12.00	0.16	Très bonne analyse
40	6.43	6.67	0.24	13.10	1.83	Très bonne analyse
41	6.40	6.09	0.31	12.49	2.48	Analyse acceptable
42	6.06	6.16	0.10	12.22	0.81	Très bonne analyse
43	5.50	5.76	0.26	11.26	2.30	Analyse acceptable
44	5.77	5.76	0.01	11.53	0.08	Très bonne analyse
45	6.54	7	0.46	13.54	3.39	Analyse acceptable

46	5.93	6.25	0.32	12.18	2.62	Analyse acceptable
47	6.50	6.74	0.24	13.24	1.81	Très bonne analyse
48	6.46	6.85	0.21	13.49	1.55	Très bonne analyse
49	6.43	6.32	0.11	12.75	0.86	Très bonne analyse
50	6.28	6.40	0.12	12.68	0.94	Très bonne analyse
51	6.70	6.67	0.03	13.37	0.22	Très bonne analyse
52	6.80	6.67	0.13	13.47	0.96	Très bonne analyse
53	6.53	6.91	0.38	13.44	2.82	Analyse acceptable
54	5.97	6.33	0.36	12.30	2.92	Analyse acceptable
55	6.59	6.59	0	13.18	0	Très bonne analyse
56	6.33	6.21	0.12	12.5	0.95	Très bonne analyse
57	7.15	7.03	0.12	14.18	0.84	Très bonne analyse
58	6.04	6.27	0.23	12.31	1.86	Très bonne analyse
59	7.01	6.78	0.23	13.79	1.66	Très bonne analyse
60	7.16	6.89	0.27	14.05	1.92	Très bonne analyse
61	6.92	6.52	0.40	13.44	2.97	Analyse acceptable
62	6.49	6.21	0.28	12.70	2.20	Analyse acceptable

Tableau 21 : Pourcentage d'erreur des analyses chimiques Aïn Fouara supérieure.

N°	$\Sigma r \text{ cat.}$	$\Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} - \Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} + \Sigma r \text{ an.}$	% d'erreur	Résultats
1	10.13	10	0.13	20.13	0.60	Très bonne analyse
2	9.80	9.70	0.10	19.50	0.50	Très bonne analyse
3	10.89	10.81	0.08	21.70	0.36	Très bonne analyse
4	9.69	10.08	0.39	19.77	1.97	Très bonne analyse
5	9.98	9.63	0.35	19.61	1.78	Très bonne analyse
6	10.10	10.03	0.07	20.13	0.34	Très bonne analyse
7	10.31	10.41	0.10	20.72	0.48	Très bonne analyse
8	9.79	10.25	0.46	20.04	2.29	Analyse acceptable
9	10.22	9.92	1.03	20.14	5.11	Mauvaise analyse
10	9.87	9.90	0.03	19.77	0.15	Très bonne analyse
11	9.76	9.72	0.04	19.48	0.20	Très bonne analyse
12	10.21	10.15	0.06	20.36	0.29	Très bonne analyse
13	9.80	9.55	0.25	19.35	1.29	Très bonne analyse
14	10.22	10.79	0.57	21.01	2.71	Analyse acceptable
15	9.75	10.56	0.81	20.31	3.98	Analyse acceptable
16	9.49	9.39	0.10	18.88	0.52	Très bonne analyse
17	9.40	9.87	0.47	19.27	2.43	Analyse acceptable
18	10.94	10.83	0.11	21.77	0.50	Très bonne analyse
19	9.62	9.83	0.21	19.45	1.07	Très bonne analyse
20	5.85	5.77	0.08	11.62	0.68	Très bonne analyse
21	10.28	9.98	0.30	20.26	1.48	Très bonne analyse
22	10.05	10.37	0.32	20.42	1.56	Très bonne analyse
23	9.83	9.76	0.07	19.59	0.35	Très bonne analyse
24	10.24	10.27	0.03	20.51	0.14	Très bonne analyse
25	9.69	9.72	0.03	19.41	0.15	Très bonne analyse
26	9.56	9.92	0.36	19.48	1.84	Très bonne analyse
27	9.86	9.57	0.29	19.43	1.49	Très bonne analyse
28	9.98	9.70	0.28	19.68	1.42	Très bonne analyse
29	10.57	10.25	0.32	20.82	1.53	Très bonne analyse
30	9.64	9.65	0.01	19.29	0.05	Très bonne analyse
31	8.87	9.39	0.52	18.26	2.84	Analyse acceptable
32	9.17	8.94	0.23	18.11	1.27	Très bonne analyse
33	9.28	9.30	0.02	18.58	0.10	Très bonne analyse
34	9.87	9.66	0.21	19.53	1.07	Très bonne analyse
35	9.54	9.45	0.09	18.99	0.47	Très bonne analyse
36	9.25	9.30	0.05	18.55	0.26	Très bonne analyse
37	9.67	9.46	0.21	19.13	1.09	Très bonne analyse
38	10.11	9.55	0.56	19.66	2.84	Analyse acceptable
39	9.54	8.99	0.55	18.53	2.96	Analyse acceptable
40	9.54	9.85	0.31	19.39	1.59	Très bonne analyse
41	9.98	10.24	0.26	20.22	1.28	Très bonne analyse
42	9.22	9.19	0.03	18.41	0.16	Très bonne analyse
43	9.43	9.25	0.18	18.68	0.96	Très bonne analyse
44	8.92	8.89	0.03	17.81	0.16	Très bonne analyse
45	9.11	9.07	0.07	18.21	0.38	Très bonne analyse

46	9.32	9.59	0.27	18.91	1.42	Très bonne analyse
47	9.85	10.31	0.46	20.16	2.28	Analyse acceptable
48	9.99	9.92	0.07	19.91	0.35	Très bonne analyse
49	9.77	9.64	0.13	19.41	0.66	Très bonne analyse
50	10.24	10.16	0.08	20.40	0.39	Très bonne analyse
51	9.45	9.62	0.17	19.07	0.89	Très bonne analyse
52	10.70	10.97	0.27	21.67	1.24	Très bonne analyse
53	10.04	9.78	0.26	19.82	1.31	Très bonne analyse
54	9.45	9.56	0.10	19.02	0.52	Très bonne analyse
55	9.84	10.41	0.57	20.25	2.81	Analyse acceptable
56	9.11	9.36	0.25	18.47	1.35	Très bonne analyse
57	10.29	10.41	0.12	20.70	0.57	Très bonne analyse
58	9.83	10	0.17	19.83	0.85	Très bonne analyse
59	10.47	9.98	0.49	20.45	2.39	Analyse acceptable
60	11.87	11.12	0.75	22.99	3.26	Analyse acceptable
61	10.79	10.66	0.13	21.45	0.60	Très bonne analyse

Tableau 22 : Pourcentage d'erreur des analyses chimiques Aïn Bendou.

N°	$\Sigma r \text{ cat.}$	$\Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} - \Sigma r \text{ an.}$	$\Sigma r \text{ cat.} + \Sigma r \text{ an.}$	% d'erreur	Résultats
1	11.81	11.46	0.35	23.27	1.50	Très bonne analyse
2	11.53	11.41	0.12	22.94	0.52	Très bonne analyse
3	11.86	11.71	0.15	23.57	0.63	Très bonne analyse
4	10.95	11.54	0.59	22.49	2.62	Analyse acceptable
5	11.95	12.47	0.52	24.42	4.09	Analyse acceptable
6	11.68	12.08	0.40	23.76	1.68	Très bonne analyse
7	11.37	11.38	0.01	22.75	0.04	Très bonne analyse
8	11.79	10.77	1.02	22.56	4.52	Analyse acceptable
9	11.37	11.23	0.14	22.60	0.61	Très bonne analyse
10	12.47	11.86	0.61	24.33	2.50	Analyse acceptable
11	11.24	11.22	0.02	22.46	0.08	Très bonne analyse
12	11.88	12.05	0.17	23.93	0.71	Très bonne analyse
13	10.89	10.66	0.23	21.55	1.06	Très bonne analyse
14	13.46	12.91	0.55	26.37	2.08	Analyse acceptable
15	10.91	11.74	0.83	22.65	3.66	Analyse acceptable
16	11.29	11.09	0.20	22.38	0.89	Très bonne analyse
17	10.77	10.63	0.14	21.40	0.65	Très bonne analyse
18	12.03	11.84	0.19	23.87	0.79	Très bonne analyse
19	10.95	11.12	0.17	22.07	0.77	Très bonne analyse
20	13.21	12.64	0.57	25.85	2.20	Analyse acceptable
21	10.96	11.46	0.50	22.42	2.23	Analyse acceptable
22	12.15	11.82	0.33	23.97	1.37	Très bonne analyse
23	10.10	10.36	0.26	20.46	1.27	Très bonne analyse
24	11.76	11.55	0.21	23.31	0.90	Très bonne analyse
25	11.39	11.27	0.12	22.66	0.52	Très bonne analyse
26	10.02	9.92	0.10	19.94	0.50	Très bonne analyse
27	10.90	11.43	0.53	22.33	2.37	Analyse acceptable
28	11.10	11.27	0.17	22.37	0.75	Très bonne analyse
29	10.85	10.83	0.02	21.68	0.09	Très bonne analyse
30	11.69	11.72	0.03	23.41	0.12	Très bonne analyse
31	10.97	10.86	0.11	21.83	0.50	Très bonne analyse
32	11.67	11.34	0.33	23.01	1.43	Très bonne analyse
33	11.53	12.01	0.48	23.54	2.03	Analyse acceptable
34	9.94	10.37	0.43	20.31	2.11	Analyse acceptable
35	11.08	10.29	0.79	21.37	3.69	Analyse acceptable
36	11.32	11.30	0.02	22.62	0.08	Très bonne analyse
37	11.70	11.26	0.44	22.96	1.91	Très bonne analyse
38	11.19	11.21	0.02	22.40	0.08	Très bonne analyse
39	11.93	11.61	0.32	23.54	1.35	Très bonne analyse
40	10.96	10.91	0.05	21.87	0.22	Très bonne analyse
41	10.29	10.92	0.63	21.21	2.57	Analyse acceptable
42	11.12	10.37	0.75	21.49	3.48	Analyse acceptable
43	9.15	9.71	0.56	18.86	2.96	Analyse acceptable
44	10.66	11.14	0.48	21.80	2.20	Analyse acceptable

45	11.62	11.76	0.14	23.38	0.59	Très bonne analyse
46	12.22	11.74	0.48	23.96	2.00	Analyse acceptable
47	12.14	11.75	0.39	23.89	1.63	Très bonne analyse
48	12.41	11.99	0.42	24.40	1.72	Très bonne analyse
49	11.85	11.56	0.29	23.41	1.23	Très bonne analyse
50	11.18	11.39	0.21	22.57	0.93	Très bonne analyse
51	12.01	11.55	0.46	23.56	1.95	Très bonne analyse
52	12.17	11.94	0.23	24.11	0.95	Très bonne analyse
53	11.82	11.86	0.04	23.68	0.16	Très bonne analyse
54	12.77	12.50	0.27	25.27	1.06	Très bonne analyse
55	10.41	10.30	0.11	20.71	0.53	Très bonne analyse
56	11.59	11.45	0.14	23.04	0.60	Très bonne analyse
57	11.96	11.38	0.58	23.34	2.48	Analyse acceptable
58	11.30	11.78	0.48	23.08	2.07	Analyse acceptable
59	12.43	12.42	0.01	24.85	0.04	Très bonne analyse

Tableau 23 : Pourcentage d'erreur des analyses chimiques Aïn el houtz

N°	% rCa	% rMg	% rNa	% rK	% rCl	% rSO ₄	% rHCO ₃	% rNO ₃	Formule caractéristique	Faciès
1	46.99	48.07	4.62	0.30	2.72	22.06	73.92	1.28	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
2	42.40	52.48	4.80	0.32	5.90	13.76	77.30	3.02	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
3	54.92	36.23	8.55	0.28	5.43	18.82	71.26	4.46	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
4	40.74	54.41	4.14	0.69	5.37	22.86	69.00	2.75	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
5	46.36	48.22	4.63	0.77	5.77	19.40	70.37	4.44	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
6	58.68	35.69	4.82	0.80	6.37	8.16	80.22	5.22	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
7	55.45	38.47	5.19	0.86	6.43	8.25	81.68	3.63	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
8	53.20	23.90	22.15	0.72	9.53	8.07	78.02	4.36	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
9	59.54	34.74	4.89	0.81	6.29	9.67	79.19	4.83	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
10	46.36	48.22	4.63	0.77	9.03	7.65	76.72	6.58	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
11	32.97	61.65	4.60	0.76	9.56	5.67	79.57	5.18	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
12	40.28	53.23	6.16	0.31	8.85	8.40	76.72	6.00	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
13	53.54	40.00	6.14	0.31	6.37	8.16	79.73	5.71	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

14	35.51	58.35	5.43	0.69	5.57	11.87	77.82	4.72	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
15	42.77	34.50	22.44	0.28	8.65	19.50	66.71	5.13	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
16	38.69	55.88	4.64	0.77	9.23	14.86	69.95	5.94	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
17	47.57	46.90	4.75	0.79	9.04	11.50	73.77	5.67	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
18	55.28	35.57	8.33	0.80	9.32	7.10	79.62	3.94	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
19	46.44	48.99	4.35	0.29	8.51	9.23	79.36	2.88	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
20	48.58	36.41	14.33	0.66	13.23	8.33	71.17	7.25	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
21	44.80	48.64	6.24	0.32	5.80	8.63	81.10	4.46	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
22	53.11	41.48	5.05	0.33	6.28	9.01	80.67	4.02	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
23	41.94	51.31	6.41	0.32	8.62	9.24	77.19	4.93	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
24	53.75	39.24	6.65	0.34	8.87	5.54	80.98	4.59	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
25	57.94	35.26	6.45	0.33	8.65	6.95	80.68	3.70	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
26	52.22	40.75	6.67	0.34	6.71	4.99	84.50	3.78	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
27	47.58	47.42	4.68	0.31	8.48	12.87	75.00	3.63	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq

28	44.18	50.85	4.65	0.31	8.45	12.23	74.77	4.53	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
29	52.00	40.51	7.11	0.36	6.75	8.13	81.83	3.29	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
30	44.69	49.91	5.06	0.34	9.35	3.34	81.80	5.51	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
31	29.97	63.60	5.70	0.73	5.63	9.52	78.64	6.20	rHCO ₃ > rSO ₄ > rNO ₃ > rCl rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
32	55.74	39.02	4.92	0.32	8.56	10.40	78.13	2.90	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
33	64.49	27.39	6.21	1.91	8.43	13.70	73.80	4.07	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
34	46.57	46.22	6.85	0.35	10.44	13.63	70.09	5.84	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
35	37.34	56.00	6.34	0.32	9.58	7.63	77.11	5.68	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
36	40.92	52.37	6.38	0.33	9.61	8.14	76.22	6.03	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
37	41.95	51.31	6.41	0.33	9.61	8.15	78.66	3.58	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
38	40.28	53.25	6.16	0.31	5.85	13.66	77.48	3.00	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
39	64.06	28.62	6.49	0.83	6.51	5.85	82.64	5.00	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
40	56.76	38.26	4.66	0.32	8.85	12.44	74.21	4.50	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
41	36.72	56.41	6.09	0.78	6.40	6.40	83.10	4.10	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne

42	52.80	41.92	4.95	0.33	9.58	3.57	83.77	3.08	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
43	46.36	46.18	7.10	0.36	13.20	1.38	82.12	3.30	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
44	74.52	19.93	5.20	0.35	10.25	6.08	78.12	5.55	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
45	48.16	46.48	4.60	0.76	10.86	15.71	70.71	2.71	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
46	59.86	33.22	6.85	0.34	8.96	6.56	79.20	5.28	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
47	54.61	39.08	6.00	0.31	8.31	9.20	76.56	5.93	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
48	57.98	35.85	5.87	0.30	11.10	12.70	72.26	3.94	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
49	45.10	48.52	6.06	0.32	8.86	7.13	80.85	3.16	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
50	58.12	35.35	6.21	0.32	9.22	17.50	68.75	4.53	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
51	52.24	41.64	5.82	0.30	5.85	8.70	81.70	3.75	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
52	54.41	35.00	5.74	4.85	8.84	16.20	72.41	2.55	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
53	53.60	41.50	4.59	0.31	5.64	12.88	77.28	4.20	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
54	56.11	38.53	5.02	0.34	6.16	15.32	74.72	3.80	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
55	51.60	43.55	4.55	0.30	5.92	13.20	76.02	4.86	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

56	56.08	38.86	4.74	0.32	9.50	8.38	78.26	3.86	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
57	49.65	45.87	4.20	0.28	8.39	20.06	69.13	2.42	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
58	55.46	40.73	3.48	0.33	9.41	12.92	73.84	3.83	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
59	44.94	49.21	5.56	0.29	8.70	13.72	72.42	5.16	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
60	56.56	38.97	4.19	0.28	5.66	15.97	74.16	4.21	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
61	49.13	46.25	4.33	0.29	5.98	14.26	75.31	4.45	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
62	60.86	34.21	4.62	0.31	6.28	9.34	79.07	5.31	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

Tableau 24 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciès pour la source d'Aïn fouara.

N°	% rCa	% rMg	% rNa	% rK	% rCl	% rSO ₄	% rHCO ₃	% rNO ₃	Formule caractéristique	Faciès
1	45.90	39.68	13.72	0.70	13.50	12.20	69.80	04.50	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
2	50.00	36.02	13.26	0.72	13.61	03.20	74.43	08.76	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > SO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
3	39.03	47.57	12.76	0.64	12.49	17.67	65.59	04.25	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
4	48.50	34.78	15.69	1.03	11.40	13.00	69.25	06.35	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
5	51.60	33.77	13.93	0.70	14.02	10.39	67.91	07.68	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
6	52.97	43.07	02.97	0.99	15.35	08.87	69.10	06.68	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
7	49.95	35.89	13.48	0.68	12.96	10.57	70.03	06.44	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
8	39.32	44.43	15.54	0.71	15.02	08.68	66.93	09.37	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
9	23.00	61.15	14.87	0.98	15.52	07.56	68.05	08.87	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
10	36.98	45.80	16.21	1.01	15.55	10.10	69.30	05.05	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
11	26.13	57.27	15.58	1.02	13.90	06.58	72.94	06.58	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
12	6.03	37.81	15.67	0.49	13.30	11.82	66.70	08.18	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
13	50.00	33.47	15.51	1.02	14.14	09.32	69.63	06.91	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

14	41.58	41.78	15.65	0.98	12.52	09.45	69.97	08.06	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
15	44.62	37.02	17.33	1.03	12.78	11.84	66.29	09.09	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
16	35.30	46.79	16.86	1.05	14.38	13.74	65.60	06.28	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
17	25.00	59.47	14.79	0.74	13.68	10.54	72.54	03.24	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
18	43.42	42.05	13.89	0.64	12.47	18.00	63.06	06.47	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
19	42.10	42.72	14.45	0.73	13.73	12.92	68.16	05.19	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
20	54.70	39.32	05.13	0.85	06.76	19.41	68.63	05.20	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
21	35.50	51.17	12.65	0.68	15.43	08.32	68.74	07.51	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
22	33.33	44.97	20.70	1.00	12.73	14.66	66.15	06.46	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
23	36.62	45.17	17.19	1.01	15.57	07.68	69.17	07.58	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
24	45.90	36.92	16.50	0.68	14.80	12.95	64.75	07.50	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
25	50.57	32.20	16.51	0.72	15.64	10.29	67.28	06.79	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
26	38.70	44.66	15.90	0.74	13.30	10.29	69.15	07.26	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
27	26.88	58.32	14.10	0.70	13.80	07.10	72.41	06.69	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne

28	45.09	41.18	13.03	0.70	15.67	13.09	64.64	06.60	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
29	25.07	58.28	15.99	0.66	14.83	17.27	62.15	05.75	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
30	38.38	45.12	15.77	0.73	13.99	04.04	73.37	08.60	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
31	29.88	53.66	15.67	0.79	14.38	05.75	69.65	10.22	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
32	48.53	36.75	14.18	0.54	15.10	07.61	73.15	04.14	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
33	47.95	36.32	14.98	0.75	12.36	07.10	72.58	07.96	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
34	34.95	43.26	21.07	0.72	11.90	07.76	73.40	06.94	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
35	26.20	59.44	13.63	0.73	12.50	08.99	69.52	08.99	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
36	11.35	72.86	15.03	0.76	12.69	07.53	71.50	08.28	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
37	37.75	49.22	12.51	0.52	12.16	08.14	75.47	04.23	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
38	36.10	51.24	11.97	0.69	12.04	09.95	73.72	04.29	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
39	53.98	31.87	13.63	0.52	12.79	09.01	72.20	06.00	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
40	53.98	31.87	13.63	0.52	13.70	08.63	72.49	05.18	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
41	28.05	58.42	13.03	0.50	20.60	06.65	68.75	04.00	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne

42	34.71	51.63	13.12	0.54	12.52	08.16	74.10	05.22	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
43	36.05	47.93	14.75	1.27	14.27	05.84	73.62	06.27	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
44	52.70	33.18	13.56	0.56	12.94	06.30	73.56	07.20	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
45	36.65	48.58	14.22	0.55	12.68	09.59	72.77	04.96	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
46	49.35	36.16	13.95	0.54	11.68	12.30	69.86	06.16	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
47	52.79	33.30	13.20	0.71	12.80	10.47	69.25	07.48	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
48	47.05	39.44	13.01	0.50	13.61	09.78	70.97	05.64	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
49	49.13	36.13	14.23	0.51	11.62	09.02	73.55	05.81	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
50	45.90	40.92	12.69	0.49	11.32	13.10	70.27	05.31	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
51	56.08	28.68	14.71	0.53	11.95	09.25	71.31	07.49	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
52	47.66	34.58	14.21	3.55	12.30	16.50	65.09	06.11	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
53	48.80	36.85	13.85	0.50	13.80	08.49	70.14	07.57	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
54	52.85	33.83	12.79	0.53	12.03	05.44	74.69	07.84	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
55	54.37	31.71	13.21	0.71	12.97	10.95	68.11	07.97	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

56	45.55	39.63	14.27	0.55	14.42	11.54	66.35	07.69	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
57	40.33	45.48	13.51	0.68	14.79	07.59	70.03	07.59	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
58	55.45	28.38	15.46	0.71	13.50	13.10	65.40	08.00	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
59	54.92	31.32	13.28	0.48	13.53	11.42	67.63	07.42	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
60	48.44	39.43	11.71	0.42	12.14	13.85	66.55	07.46	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
61	46.34	41.15	12.05	0.46	10.79	15.20	66.51	07.50	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

Tableau 25 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciès pour la source d'Aïn bendou.

N°	% rCa	% rMg	% rNa	% rK	% rCl	% rSO ₄	% rHCO ₃	% rNO ₃	Formule caractéristique	Faciès
1	55.46	27.77	16.17	0.60	16.67	19.98	60.47	02.88	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
2	61.58	20.64	17.35	0.43	18.50	14.72	60.30	06.48	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
3	53.96	30.44	15.00	0.60	16.05	14.18	58.75	11.02	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
4	59.82	21.00	18.26	0.92	16.55	18.20	59.45	05.80	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
5	57.32	26.11	15.98	0.59	16.92	20.85	51.88	10.35	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
6	58.65	24.57	16.35	0.43	15.56	20.70	54.14	09.60	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
7	63.76	18.03	17.59	0.62	20.21	11.51	58.00	10.28	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
8	58.10	25.11	16.20	0.59	19.60	13.46	57.66	09.28	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
9	56.29	24.54	18.29	0.88	17.00	13.36	55.30	14.34	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
10	56.54	27.02	16.04	0.40	17.80	13.49	55.14	13.57	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
11	58.72	22.60	17.79	0.89	20.50	14.62	56.33	08.55	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
12	57.67	24.91	16.83	0.59	15.85	15.02	57.10	12.03	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
13	68.87	14.32	16.35	0.46	17.92	09.94	62.38	09.76	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

14	55.72	28.68	14.86	0.74	14.79	18.36	53.30	13.55	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
15	63.70	30.89	04.77	0.64	16.27	10.99	60.39	12.35	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > r SO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
16	51.82	29.85	17.71	0.62	17.22	10.46	62.49	09.83	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
17	53.39	28.23	17.73	0.65	19.85	09.41	57.48	13.26	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > r SO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
18	55.70	27.26	16.62	0.42	16.13	14.36	58.53	10.98	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
19	56.62	25.48	17.44	0.46	18.97	14.40	56.38	10.25	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
20	53.37	24.22	22.03	0.38	16.69	17.80	55.70	09.81	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
21	56.57	20.98	21.81	0.64	18.41	13.44	57.07	11.08	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
22	51.85	33.83	13.91	0.41	17.60	17.60	55.33	09.47	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
23	33.17	46.34	19.80	0.69	18.15	10.04	58.78	13.03	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
24	57.40	25.17	17.01	0.42	18.01	12.73	58.44	10.82	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
25	53.99	28.80	16.77	0.44	16.68	12.16	58.03	13.13	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
27	61.93	16.51	21.10	0.46	19.95	10.67	57.74	11.64	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
28	53.60	25.86	19.91	0.63	18.46	14.02	58.56	08.96	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
29	53.00	28.76	17.60	0.64	17.64	08.03	60.39	13.94	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

30	38.49	42.86	17.80	0.85	18.00	09.90	55.80	16.30	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
31	60.16	20.97	18.23	0.64	17.59	14.55	60.22	07.64	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
32	52.70	28.88	17.82	0.60	18.61	10.41	57.67	13.31	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
33	52.90	28.45	18.04	0.61	15.90	16.24	56.20	11.66	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
34	27.16	51.21	20.93	0.70	18.42	09.16	57.18	15.24	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
35	13.09	67.51	18.77	0.63	19.14	07.30	58.11	15.45	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
36	56.54	24.65	18.37	0.44	18.67	09.73	64.25	07.35	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
37	52.99	29.49	17.09	0.43	16.96	14.39	61.55	07.10	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
38	58.98	22.70	17.87	0.45	17.04	14.63	58.88	09.45	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
39	55.32	26.82	17.44	0.42	16.45	13.78	56.85	12.92	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
40	33.30	47.26	18.98	0.46	19.34	10.63	62.42	07.61	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
41	39.36	39.94	20.21	0.49	17.49	14.29	60.44	07.78	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
42	42.27	38.40	18.70	0.63	20.06	03.76	65.67	10.51	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq
43	70.49	07.10	21.86	0.55	09.78	08.34	66.12	15.76	rHCO ₃ > rNO ₃ > rCl > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calciq

44	31.42	49.35	18.76	0.47	17.15	10.23	64.09	08.53	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rMg > rCa > rNa > rK	Bicarbonatée magnésienne
45	55.51	26.85	17.21	0.43	15.99	14.45	58.93	10.63	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
46	54.83	28.23	16.37	057	17.72	15.25	56.22	10.81	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
47	58.07	25.05	16.47	0.41	16.25	10.05	65.53	08.17	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
48	53.99	27.80	17.81	0.40	17.35	14.01	59.13	09.51	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
49	57.80	24.22	17.55	0.43	19.90	12.20	57.09	10.81	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
50	63.95	16.90	18.70	0.45	16.77	12.73	58.38	12.12	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
51	52.87	27.32	16.65	03.16	16.54	10.56	60.95	11.95	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
52	55.46	27.70	16.43	0.41	17.67	17.92	53.77	10.64	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
53	58.37	25.05	16.16	0.42	16.10	17.37	55.65	10.88	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
54	51.68	32.81	14.96	0.55	16.88	20.16	52.32	10.64	rHCO ₃ > rSO ₄ > rCl > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
55	61.96	20.46	17.10	0.48	20.48	18.93	47.68	12.91	rHCO ₃ > rCl > rSO ₄ > rNO ₃ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
56	59.54	23.38	16.48	0.60	16.68	10.48	58.95	13.89	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
57	64.38	19.23	15.97	0.42	18.54	11.86	57.47	12.13	rHCO ₃ > rCl > rNO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

58	66.37	17.43	15.75	0.45	17.91	12.90	55.52	13.67	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique
59	57.12	27.11	15.37	0.40	15.38	13.53	56.20	14.89	rHCO ₃ > rCl > r NO ₃ > rSO ₄ rCa > rMg > rNa > rK	Bicarbonatée calcique

Tableau26 : Pourcentages des éléments chimiques en meq/l, leurs formules caractéristiques et leurs faciès pour la source d'Aïn el houtz.

N°	Nom	Ca/Mg	Na/K	Cl/Na	IsCalcite	IsAragonite	IsDolomite
1	AF1	1.0	11.9	0.6	-0.30	-0.45	-1.15
2	AF2	0.8	11.9	1.3	-0.36	-0.51	-1.18
3	AF3	1.5	23.8	0.6	-0.20	-0.35	-1.13
4	AF4	0.7	6.0	1.3	-0.33	-0.48	-1.10
5	AF5	1.0	6.0	1.3	-0.34	-0.49	-1.22
6	AF6	1.6	6.0	1.3	-0.23	-0.38	-1.23
7	AF7	1.4	6.0	1.3	-0.28	-0.43	-1.27
8	AF8	2.2	29.8	0.4	-0.24	-0.39	-1.38
9	AF9	1.7	6.0	1.3	-0.23	-0.38	-1.25
10	AF10	1.0	6.0	1.9	-0.31	-0.46	-1.16
11	AF11	0.5	6.0	1.9	-0.46	-0.61	-1.21
12	AF12	0.8	15.3	1.5	-0.37	-0.52	-1.18
13	AF13	1.3	15.3	1.0	-0.26	-0.41	-1.21
14	AF14	0.6	7.7	1.0	-0.36	-0.50	-1.05
15	AF15	1.2	62.9	0.4	-0.35	-0.50	-1.35
16	AF16	0.7	6.0	1.9	-0.44	-0.59	-1.27
17	AF17	1.0	6.0	1.9	-0.32	-0.47	-1.21
18	AF18	1.5	10.2	1.1	-0.24	-0.39	-1.22
19	AF19	0.9	11.9	1.9	-0.24	-0.39	-1.01
20	AF20	1.3	19.8	0.9	0.04	-0.11	-0.60
21	AF21	0.9	15.3	1.0	-0.30	-0.45	-1.13
22	AF22	1.3	11.9	1.3	-0.28	-0.43	-1.23
23	AF23	0.8	15.3	1.4	-0.38	-0.53	-1.22
24	AF24	1.4	15.3	1.4	-0.27	-0.42	-1.24
25	AF25	1.6	15.3	1.4	-0.22	-0.37	-1.21
26	AF26	1.3	15.3	1.0	-0.30	-0.45	-1.27
27	AF27	1.0	11.9	1.9	-0.31	-0.46	-1.18
28	AF28	0.9	11.9	1.9	-0.34	-0.49	-1.17
29	AF29	1.3	15.3	1.0	-0.34	-0.49	-1.35
30	AF30	0.9	11.9	1.9	-0.36	-0.51	-1.23
31	AF31	0.5	7.7	1.0	-0.44	-0.59	-1.09
32	AF32	1.4	11.9	1.9	-0.25	-0.39	-1.20
33	AF33	2.3	3.1	1.4	-0.19	-0.34	-1.31
34	AF34	1.0	15.3	1.5	-0.46	-0.61	-1.47

35	AF35	0.7	15.3	1.5	-0.44	-0.59	-1.27
36	AF36	0.8	15.3	1.5	-0.29	-0.44	-1.03
37	AF37	0.8	15.3	1.5	-0.39	-0.54	-1.25
38	AF38	0.8	15.3	1.0	-0.37	-0.52	-1.17
39	AF39	2.2	7.7	1.0	-0.20	-0.35	-1.30
40	AF40	1.5	11.9	1.9	-0.23	-0.38	-1.19
41	AF41	0.6	7.7	1.0	-0.41	-0.56	-1.19
42	AF42	1.3	11.9	1.9	-0.26	-0.41	-1.18
43	AF43	1.0	15.3	1.9	-0.37	-0.51	-1.26
44	AF44	3.7	11.9	1.9	-0.19	-0.34	-1.51
45	AF45	1.0	6.0	2.5	-0.28	-0.43	-1.12
46	AF46	1.8	15.3	1.4	-0.24	-0.39	-1.28
47	AF47	1.4	15.3	1.4	-0.23	-0.38	-1.15
48	AF48	1.6	15.3	1.9	-0.21	-0.36	-1.18
49	AF49	0.9	15.3	1.4	-0.31	-0.46	-1.15
50	AF50	1.6	15.3	1.5	-0.28	-0.43	-1.33
51	AF51	1.2	15.3	1.0	-0.21	-0.36	-1.07
52	AF52	1.5	1.2	1.5	-0.24	-0.39	-1.23
53	AF53	1.3	11.9	1.3	-0.22	-0.37	-1.11
54	AF54	1.5	11.9	1.3	-0.28	-0.43	-1.29
55	AF55	1.2	11.9	1.3	-0.26	-0.41	-1.14
56	AF56	1.4	11.9	1.9	-0.25	-0.40	-1.21
57	AF57	1.1	11.9	1.9	-0.26	-0.41	-1.12
58	AF58	1.4	8.5	2.7	-0.30	-0.45	-1.29
59	AF59	0.9	15.3	1.5	-0.31	-0.46	-1.13
60	AF60	1.4	11.9	1.3	-0.17	-0.32	-1.06
61	AF61	1.1	11.9	1.3	-0.27	-0.42	-1.12
62	AF62	1.8	11.9	1.3	-0.20	-0.35	-1.20

Tableau 27 : Les indices de saturations de l'eau da la source Aîn Fouara

N°	Nom	Ca/Mg	Na/K	Cl/Na	IsCalcite	IsAragonite	IsDolomite
1	AB1	1.2	18.1	1.0	0.37	0.22	0.16
2	AB2	1.4	17.0	1.0	0.09	-0.06	-0.49
3	AB3	0.8	18.1	1.0	0.31	0.16	0.16
4	AB4	1.4	14.9	0.8	0.11	-0.04	-0.47
5	AB5	1.5	18.1	1.0	0.11	-0.04	-0.51
6	AB6	1.2	3.0	5.1	0.08	-0.07	-0.46
7	AB7	1.4	18.1	1.0	0.34	0.19	0.01
8	AB8	0.9	19.8	1.0	0.04	-0.11	-0.39
9	AB9	0.4	14.9	1.0	-0.13	-0.28	-0.35
10	AB10	0.8	15.7	1.0	0.68	0.53	0.93
11	AB11	0.5	14.9	0.9	0.51	0.36	0.84
12	AB12	1.2	31.5	0.8	0.51	0.36	0.41
13	AB13	1.5	14.9	0.9	-0.01	-0.16	-0.74
14	AB14	1.0	15.7	0.8	0.14	-0.01	-0.25
15	AB15	1.2	16.6	0.8	0.14	-0.01	-0.32
16	AB16	0.8	15.7	0.8	0.26	0.11	0.12
17	AB17	0.4	18.1	1.0	0.12	-0.03	0.09
18	AB18	1.0	19.8	0.9	0.41	0.26	0.31
19	AB19	1.0	18.1	1.0	0.73	0.58	0.96
20	AB20	1.4	6.0	1.3	-0.20	-0.34	-1.05
21	AB21	0.7	17.0	1.2	-0.01	-0.16	-0.41
22	AB22	0.7	20.4	0.6	-0.41	-0.56	-1.22
23	AB23	0.8	16.6	0.9	-0.58	-0.72	-1.58
24	AB24	1.2	22.1	0.9	-0.03	-0.18	-0.68
25	AB25	1.6	21.0	0.9	0.02	-0.13	-0.66
26	AB26	0.9	19.8	0.9	0.09	-0.06	-0.30
27	AB27	0.5	18.1	1.0	-0.02	-0.17	-0.22
28	AB28	1.1	17.0	1.2	0.35	0.20	0.17
29	AB29	0.4	22.1	0.9	-0.07	-0.22	-0.27
30	AB30	0.8	19.8	0.9	0.54	0.40	0.67
31	AB31	0.6	18.1	1.0	0.21	0.06	0.19
32	AB32	1.3	25.5	1.0	0.02	-0.13	-0.59
33	AB33	1.3	18.1	0.8	0.01	-0.14	-0.61
34	AB34	0.8	27.2	0.6	0.00	-0.14	-0.44

35	AB35	0.4	17.0	0.9	-0.33	-0.48	-0.85
36	AB36	0.2	18.1	0.9	-0.52	-0.67	-0.77
37	AB37	0.8	23.8	0.9	0.09	-0.06	-0.26
38	AB38	0.7	15.9	0.9	0.05	-0.10	-0.31
39	AB39	1.7	25.5	0.9	0.16	0.01	-0.47
40	AB40	1.7	25.5	1.0	0.25	0.10	-0.29
41	AB41	0.5	25.5	1.6	-0.14	-0.29	-0.51
42	AB42	0.7	23.8	0.9	-0.06	-0.21	-0.49
43	AB43	0.7	10.9	1.0	0.49	0.34	0.54
44	AB44	1.6	23.8	0.9	0.01	-0.14	-0.74
45	AB45	0.8	25.5	0.9	0.50	0.35	0.60
46	AB46	1.4	25.5	0.9	0.26	0.11	-0.17
47	AB47	1.6	17.0	1.0	0.10	-0.04	-0.54
48	AB48	1.2	25.5	1.0	0.79	0.64	0.96
49	AB49	1.4	27.2	0.8	0.05	-0.10	-0.58
50	AB50	1.1	25.5	0.9	0.44	0.29	0.28
51	AB51	1.9	27.2	0.8	0.22	0.07	-0.40
52	AB52	1.4	4.0	0.9	0.56	0.41	0.42
53	AB53	1.3	27.2	1.0	0.16	0.01	-0.35
54	AB54	1.6	23.8	0.9	0.40	0.25	0.05
55	AB55	1.7	17.0	1.0	0.34	0.19	-0.11
56	AB56	1.1	25.5	1.0	0.02	-0.13	-0.57
57	AB57	0.9	18.1	1.1	0.10	-0.05	-0.29
58	AB58	1.9	19.8	0.9	0.15	0.00	-0.55
59	AB59	1.7	27.2	1.0	0.08	-0.07	-0.64
60	AB60	1.2	27.2	1.0	0.12	-0.03	-0.40
61	AB61	1.1	25.5	0.9	0.02	-0.13	-0.57

Tableau 28 : Les indices de saturations de l'eau de la source Aïn Bendou.

N°	Nom	Ca/Mg	Na/K	Cl/Na	IsCalcite	IsAragonite	IsDolomite
1	AH1	2.0	24.9	1.0	0.09	-0.05	-0.63
2	AH2	3.0	39.1	1.1	0.58	0.43	0.17
3	AH3	1.8	23.2	1.1	0.14	0.00	-0.47
4	AH4	2.8	19.6	1.0	0.41	0.26	-0.15
5	AH5	2.2	24.9	1.1	0.18	0.03	-0.49
6	AH6	2.4	37.4	1.0	0.23	0.08	-0.43
7	AH7	3.5	26.1	1.2	0.14	-0.01	-0.78
8	AH8	2.3	24.9	1.1	0.49	0.34	0.10
9	AH9	2.3	20.4	0.9	0.15	0.00	-0.57
10	AH10	2.1	39.1	1.1	0.19	0.04	-0.44
11	AH11	2.6	19.6	1.2	0.73	0.58	0.54
12	AH12	2.3	26.1	1.0	0.61	0.46	0.32
13	AH13	4.8	34.9	1.1	0.10	-0.05	-1.01
14	AH14	1.9	19.6	1.0	0.34	0.19	-0.10
15	AH15	2.1	6.8	3.7	0.24	0.09	-0.34
16	AH16	1.7	26.1	1.0	0.53	0.38	0.32
17	AH17	1.9	24.9	1.1	0.56	0.41	0.35
18	AH18	2.0	39.1	1.0	0.60	0.45	0.40
19	AH19	2.2	37.4	1.1	0.75	0.61	0.65
20	AH20	2.2	57.0	0.7	0.20	0.05	-0.44
21	AH21	2.7	31.2	0.9	0.20	0.05	-0.53
22	AH22	1.5	33.2	1.2	0.17	0.02	-0.33
23	AH23	0.7	26.1	0.9	-0.59	-0.74	-1.53
24	AH24	2.3	39.1	1.0	0.06	-0.09	-0.72
25	AH25	1.9	37.4	1.0	0.36	0.21	-0.04
26	AH26	3.4	26.1	1.0	0.26	0.12	-0.49
27	AH27	3.7	45.1	1.0	0.49	0.34	-0.08
28	AH28	2.1	28.9	0.9	0.25	0.10	-0.33
29	AH29	1.8	24.9	1.0	0.57	0.42	0.38
30	AH30	0.9	20.4	1.0	0.44	0.30	0.44
31	AH31	2.9	26.1	1.0	0.23	0.09	-0.48
32	AH32	1.8	27.2	1.0	0.13	-0.02	-0.49
33	AH33	1.8	27.2	0.9	0.25	0.10	-0.26
34	AH34	0.5	27.2	0.9	-0.32	-0.47	-0.87

35	AH35	0.2	27.2	0.9	-0.47	-0.61	-0.72
36	AH36	2.3	40.8	1.0	0.37	0.22	-0.12
37	AH37	1.8	39.1	1.0	0.30	0.15	-0.15
38	AH38	2.6	39.1	1.0	0.18	0.03	-0.55
39	AH39	2.1	40.8	0.9	0.26	0.12	-0.29
40	AH40	0.7	40.8	1.0	0.00	-0.15	-0.35
41	AH41	1.0	40.8	0.9	0.07	-0.07	-0.34
42	AH42	1.1	27.2	1.0	0.48	0.33	0.43
43	AH43	9.8	39.1	0.5	0.16	0.01	-1.17
44	AH44	0.6	39.1	1.0	0.53	0.38	0.77
45	AH45	2.1	39.1	0.9	0.35	0.21	-0.10
46	AH46	1.9	26.1	1.0	0.20	0.05	-0.40
47	AH47	2.3	39.1	1.0	1.04	0.89	1.21
48	AH48	1.9	43.4	0.9	0.23	0.08	-0.33
49	AH49	2.4	40.8	1.1	0.53	0.38	0.18
50	AH50	3.8	40.8	0.9	0.34	0.19	-0.41
51	AH51	1.9	5.2	1.0	0.64	0.49	0.48
52	AH52	2.0	39.1	1.1	0.31	0.16	-0.19
53	AH53	2.3	37.4	1.0	0.47	0.33	0.06
54	AH54	1.6	24.9	1.1	0.33	0.18	-0.05
55	AH55	3.0	34.9	1.2	0.14	-0.01	-0.72
56	AH56	2.5	24.9	1.0	0.44	0.29	-0.06
57	AH57	3.3	37.4	1.1	0.21	0.06	-0.63
58	AH58	3.8	34.9	1.2	0.19	0.04	-0.72
59	AH59	2.1	37.4	1.0	0.19	0.04	-0.47

Tableau29 : Les indices de saturation de l'eau de la source Aîn El Houtz.