

ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITE HASSAN II AIN CHOCK
Faculté des Sciences. Casablanca.

THESE DE DOCTORAT D'ETAT

Présentée pour obtenir le titre de

DOCTEUR ES SCIENCES EN GEOLOGIE APPLIQUEE

Option : Hydrogéologie

Par

Fouad AMRAOUI

Docteur de l'Université des Sciences et
Techniques du Languedoc (USTL-Montpellier-France)

**CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE
DES AQUIFERES KARSTIQUES :
CAS DU LIAS DE LA PLAINE DU SAIS ET DU
CAUSSE MOYEN ATLASIQUE TABULAIRE (MAROC)**

Soutenue le 11 juillet 2005

devant la commission d'examen composée de :

Abdelhafid DEBBAGH, Dir. formation des cadres. Ministère de l'Enseig. Sup. **Président**

Lhoussaine BOUCHAOU, Prof. Fac. des Sciences Ibn Zohr d'Agadir. **Directeur de thèse**

Moumtaz RAZACK, Prof. Fac. des Sciences de Poitiers (France). **Rapporteur**

Abdessadek CHTAINI, Prof. Fac. des Sciences Ben Msik de Casablanca. **Rapporteur**

Mohamed SINAN, Prof. Ecole Hassania des Travaux Publics de Casablanca. **Examineur**

Fouad El KAMEL, Prof. Fac. des Sciences Aïn Chock de Casablanca. **Examineur**

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de recherche qui a duré plusieurs années, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur Abdelhafid Debbagh, Directeur de la formation des cadres au Ministère de l'Enseignement Supérieur, d'avoir accepté de présider le jury et de mettre à contribution son expérience et son savoir faire pour juger ce travail.

Ma première pensée va au professeur Moumtaz Razack que je connais depuis plusieurs années. Il a siégé dans mon jury de Doctorat de 3^{ème} cycle soutenue à Montpellier en 1988, et il a assuré la co-direction rapprochée de la présente thèse. Je témoigne ici de la reconnaissance que je lui dois et de l'estime que je lui porte. Sa présence dans ce jury de thèse est un grand honneur pour moi. Je le remercie pour son implication dans ce travail, pour sa générosité scientifique, pour sa disponibilité, pour son accueil à plusieurs reprises dans son laboratoire à Poitiers et pour les moyens informatiques et bibliographiques qu'il a mis à ma disposition. Je tiens à remercier également sa petite famille pour sa gentillesse et son hospitalité.

J'ai été chanceux et heureux d'avoir comme directeur de thèse le professeur Lhoussaine Bouchaou. Sa compétence, son sérieux, sa générosité scientifique, sa gentillesse et son implication dans ce travail m'ont beaucoup apporté, et je tiens à lui exprimer ma grande reconnaissance. Sa longue expérience dans le domaine de l'hydrogéologie karstique m'a été profitable et notre collaboration se concrétise aujourd'hui par l'aboutissement de cette thèse et par la publication d'articles scientifiques de valeur. Je salue également ici son dynamisme dans la recherche scientifique autour du thème des ressources en eau souterraines.

Je suis heureux et honoré d'avoir dans mon jury de thèse le professeur Abdessadek Chtaini. Je le remercie pour ses encouragements et son soutien durant la préparation de cette thèse, et pour avoir accepté de mettre à contribution son expérience et son savoir faire pour juger ce travail.

Je suis honoré d'avoir dans le jury de cette thèse le professeur Mohamed Sinan. Son expérience dans le domaine de la recherche, mais également dans la pratique des sciences de l'eau m'a été profitable, notamment en ce qui concerne les systèmes d'informations géographiques, auxquels il a bien voulu m'initier. Je le remercie pour son soutien, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et pour son accord de siéger dans mon jury de thèse.

Je remercie vivement le professeur Fouad El Kamel d'avoir accepté de faire partie des membres de mon jury de thèse. Je tiens à lui témoigner ma grande reconnaissance pour avoir mis à ma disposition une bibliographie riche et diversifiée sur les aspects structuraux et sédimentologiques de la région étudiée, et pour m'avoir fait profiter de ses connaissances sur la géologie structurale.

Je tiens à remercier le personnel de la Direction de l'Hydraulique pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Je remercie également les chefs des services hydrologie et hydrogéologie de l'Agence du Bassin du Sebou pour leur soutien et leur contribution.

Un grand merci également pour les responsables de la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de Méknès, et particulièrement Mr Affitou, pour leur collaboration. Qu'ils trouvent ici ma grande reconnaissance.

Je remercie les responsables des deux directions régionales de l'ONEP de Fès et de Méknès pour leur soutien et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je remercie tous les collègues du département de Géologie pour leurs encouragements. Je salue particulièrement Mme N. Yacoubi qui a bien voulu corriger les imperfections de style ou d'orthographe du présent manuscrit.

Je dédie ce travail de thèse à :

A mes parents pour leur amour et leur dévouement

A mon épouse Ilhame, à mes enfants Mehdi, Ghali et Younes pour leur affection et leur patience

A mes frères, sœurs, leurs enfants et leurs conjoints pour leur encouragement

A ma belle famille pour son soutien

A mes oncles, ma tante, leurs conjoints et leurs enfants pour leur soutien

A mes amis pour leur solidarité

AVANT PROPOS

Le présent travail de thèse qui s'intègre dans l'étude des grands aquifères karstiques du Maroc, a bénéficié de la collaboration locale de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE) à Rabat, de l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou à Fès et de la Régie Autonome de Distribution de l'Eau et de l'Electricité à Méknès (RADEEM). La Faculté des Sciences de Poitiers (France) a contribué également à ce travail en tant que partenaire étranger.

La direction et l'encadrement de cette thèse ont été assurés par le professeur Lhoussaine Bouchaou de la Faculté des Sciences Ibn Zohr d'Agadir, et par le professeur Moumtaz Razack, directeur du laboratoire d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de Poitiers.

Ce travail a bénéficié du soutien financier (2 séjours à Poitiers) de l'Action Intégrée France-Maroc AI 221/STU/00.

Une partie des résultats obtenus dans ce travail de recherche a été valorisée par la production de deux publications internationales dans des revues de rang A (Annexes 1 et 2), par deux publications dans les annales et par une publication nationale. Les intitulés de ces articles sont les suivants :

Amraoui F., 2001. L'aquifère karstique du moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit. *7^e Colloque d'hydrologie en pays calcaire et milieu fissuré. Besançon (France). Sci.Tech.Env., Mém. H.S.,113 : 45-48.*

Amraoui F., 2003. L'aquifère karstique du moyen atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc). *Les Cahiers de la Recherche, Edition du rectorat de Casablanca, Maroc, Série A : Sciences et techniques, Volume 5, pp.81-92.*

Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2003. Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco). *Hydrological Sciences Journal (HSJ), Vol. 48, number 6, pp. 971-984.*

Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2004. Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée. Exemple de la source Bittit (Maroc). *Comptes rendus Geoscience. Volume 336, Issue 12, pp. 1099-1109.*

Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2005. Impact of a long drought period on a large carbonate aquifer. The liasic aquifer of the Saïs plain and Middle Atlas plateau (Morocco). *7^e Assemblée scientifique de l'AIHS (Brésil). Symposium S6. Publication dans la série Redbook 296, pp. 184-193.*

Auteur : AMRAOUI Fouad

Etablissement : Université Hassan II Ain Chok. Faculté des Sciences. Casablanca

Titre de la thèse : Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc)

RESUME

Ce travail de recherche en hydrogéologie rentre dans le thème fédérateur « fonctionnement des aquifères atlasiques et leur relation avec ceux des plaines adjacentes », traité par différents auteurs dans des contextes géographiques variés.

L'aquifère profond liasique du Moyen Atlas tabulaire et de la plaine du Saïs recèle des ressources en eau importantes, très sollicitées notamment pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. La sécheresse qui perdure depuis plus de deux décennies a eu des répercussions négatives sur cette ressource, d'où l'intérêt d'une bonne connaissance du fonctionnement de ces aquifères régionaux et le recours à une gestion appropriée. La méthodologie appliquée à l'étude de cet aquifère s'articule sur celle employée aux systèmes karstiques à travers le monde.

Le travail de recherche décrit le site d'étude sur les plans topographique, géomorphologique, climatique et hydrologique. Les différentes formations géologiques constituant la région sont analysées et l'aquifère étudié est situé dans son contexte lithologique et structural régional. Les données géophysiques sont dépouillées pour approcher la structure du réservoir.

L'essentiel des données acquises durant plusieurs décennies concernant l'aquifère liasique, a été regroupé dans un système d'information géographique, qui est un véritable outil d'aide à la prise de décision. L'exploitation du SIG du Saïs en mode vecteur par le logiciel MapInfo, a permis d'élaborer un certain nombre de cartes, soit structurales, soit hydrodynamiques. Ces documents cartographiques ont permis de préciser la géométrie de l'aquifère et les modalités de l'écoulement. L'essai de bilan tenté pour l'année 2002 a montré un fort déficit de l'ordre de 87 Mm³/an, dû à l'effet conjugué de la surexploitation et de la sécheresse.

L'étude des principales sources par les différentes méthodes du traitement du signal (débits classés, récession et analyses corrélatoires et spectrales), a permis une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique du Lias. Les résultats de l'étude a montré que ce système hydrogéologique est très capacitif : stockage important, débit régulé et soutenu durant toute l'année, écoulement relativement lent et karstification peu développée. Malgré la grande capacité de réserve de cet aquifère, le débit à l'exutoire marque une tendance régulière et significative à la baisse due à une réduction de l'alimentation.

Le phénomène d'apparition des troubles au niveau des sources lors des grandes averses a été étudié. Cette turbidité serait liée aux conditions hydrodynamiques dans le karst. Une origine interne proviendrait des écoulements rapides ayant lieu dans les conduits karstiques transmissifs, et une origine externe proviendrait de l'infiltration d'eaux chargées d'argiles rouges lessivées à la surface des bassins.

La caractérisation hydrochimique et isotopique des eaux de l'aquifère liasique conforte les résultats précédents, et témoigne de la complexité structurale du magasin karstique.

Mots clés : Maroc, Moyen Atlas tabulaire, Causse, Plaine du Saïs, Karst, Lias, Sources, Système d'Information Géographique, Turbidité, Géométrie du réservoir, Hydrochimie, Géophysique, Hydrologie, Hydrodynamique.

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

Author : Amraoui Fouad

Establishment : University Hassan II Ain Chock. Faculty of Science. Casablanca

Titrate thesis : Contribution to the knowledge of the karstic aquifers : case of the Lias of the plain of Saïs and the Causse Average tabular Atlasique (Morocco)

SUMMARY

This research work concerning hydrogeology belongs to the federator topic "The atlasic aquifers operation and their relation with those of the adjacent plains", treated by various authors in varied geographical contexts.

The deep liasic aquifer of the Average tabular Atlas and the Saïs plain contains significant water resources, which are highly solicited in particular for the supply of drinking water and for irrigation. The dryness which endures for more than two decades has had a negative impact on this resource. This demands a deep knowledge of the functioning of these regional aquifers, in order to adopt an appropriate management. The methodology applied to the study of this aquifer is based on those employed with the karstic systems throughout the world.

The work describes the study site concerning topographic, geomorphologic, climatic and hydrological. The various geological formations constituting the area are analyzed and the studied aquifer is located in its lithological and structural regional context. The geophysics data is stripped to approach the tank structure.

The main part of the gathered data during several decades concerning the liasic aquifer was entered in a geographical information system. This latter is a helpful tool for decision-making. The Saïs SIG exploitation, in a vector mode by the MapInfo software, allowed to work out an important number of maps that are either structural or hydrodynamic. These cartographic documents were of a great interest to specify the aquifer geometry and the flow methods. The assessment test conducted for 2002 showed a strong deficit of about 87 Mm³/year, due to the combined effects of overexploitation and dryness.

The study of the principal sources by different methods of signal treatment (classified flows, recession, spectral and correlation analysis), allowed a better comprehension of the hydrodynamic operation of the karstic aquifer of Lias. The results of the study revealed that this hydrogeologic system is very capacitive: significant storage, flow controlled and supported throughout the year, relatively slow flow and little developed karstification. In spite of the huge capacity of reserve of this aquifer, the flow with the discharge system marks a regular and significant tendency to a fall due to food reduction.

The phenomenon of troubled appearance at the level of the springs during heavy rainfalls was studied. This turbidity would be related to the hydrodynamic conditions in the karst. An internal origin would come from the fast flows taking place in the transmitting karstic conduits. In addition, an external origin would come from the infiltration of water charged with red clays washed out from the basin surfaces.

The hydrochemical and isotopic characterization of liasic aquifer water consolidates the preceding results, and testifies to the structural complexity of the karstic store.

Key words : Morocco, Average tabular Atlas, Causse, Plain of Saïs, Karst, Lias, spring, Geographical Information System, Turbidity, Geometry of the tank, Hydrochimie, Geophysical, Hydrology, Hydrodynamic.

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	1
LISTE DES TABLEAUX	4
LISTE DES ANNEXES	5
INTRODUCTION GENERALE	7
<i>PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL</i>	11
CHAPITRE 1 – CONTEXTE GEOGRAPHIQUE	12
CHAPITRE 2 – CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE	15
2.1 - Les Causses	15
2.2 - Le bassin du Saïs	18
a) Le plateau de Méknès	18
b) La plaine de Fès	19
CHAPITRE 3 – CONTEXTE CLIMATIQUE	20
3.1 – Le réseau des stations d’observation	20
3.2 - Les variations de la pluviométrie dans le temps	20
a) Variations Saisonnières	20
b) Variations inter-annuelles	21
3.3 – Variations de la température dans le temps	23
3.4 – Diagrammes ombrothermiques	24
3.5 – L’évapotranspiration	25
a) Evapotranspiration potentielle (ETP)	25
b) Evapotranspiration réelle (ETR)	25
3.6 – L’infiltration efficace	25
3.7 – Vents	26
CHAPITRE 4 – HYDROLOGIE DE SURFACE	27
4.1 – Données générales	27
4.2 – Pertes de l’oued Tizguit	28
CHAPITRE 5 – LES ACTIVITES HUMAINES	31
SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE	32

CHAPITRE 1 - CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL	34
1.1 – Présentation	34
1.1.1 - Le bassin de Saïa	34
1.1.2 - La bordure nord du domaine méséto-atlasique	35
1.1.3 - La bordure sud du domaine rifain	35
1.2 – Cadre géologique	35
1.2.1 - Le bassin de Méknès-Fès	35
1.2.2 - Le domaine méséto-atlasique	38
1.2.3 - Le domaine rifain	39
CHAPITRE 2 – LITHOSTRATIGRAPHIE	40
2.1 – Les terrains paléozoïques	40
2.2 - Les formations triasiques	40
2.3 - Les calcaires et dolomies liasiques	42
2.4 - Les formations néogènes	43
2.4.1 - Le Néogène du plateau de Méknès	43
2.4.2 - Le Néogène de la plaine de Fès	44
2.5 - Le Quaternaire	45
2.5.1 - Les travertins	45
2.5.2 - Les basaltes	45
2.6 – Evolution paléo-géographique	46
2.7 – Conclusion	47
CHAPITRE 3 – ETUDE STRUCTURALE	48
3.1 - Histoire tectono-sédimentaire du bassin de Saïa	48
3.2 – Les principales directions de fracturation affectant les massifs encadrants du Saïa	
3.2.1 - La fracturation dans le moyen Atlas	48
3.2.2 - La fracturation dans le Pré-rif	49
3.3 – La tectonique quaternaire dans le bassin de Saïa	51
3.3.1 - La tectonique quaternaire en bordures du Saïa	51
3.3.2 - La structuration quaternaire du Saïa	52
3.4 – Conclusion	54
CHAPITRE 4 – SYNTHÈSE DES RECONNAISSANCES GEOPHYSIQUES DU BASSIN	55
4.1 – Présentation	55
4.2 – Résultats des prospections électriques	56
4.3 – Résultats des prospections sismiques	57
4.4 – Synthèse géophysique	58

4.4.1 - Carte de l'épaisseur du Plio-Quaternaire	58
4.4.2 - Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique	59
4.4.3 - Carte de l'épaisseur des marnes miocènes	59
4.4.4 - Carte du toit du substratum résistant	59
4.4.5 - Coupes géologiques interprétatives	61
4.5 – Conclusion	65
SYNTHESE DE LA DEUXIEME PARTIE	67
<i>TROISIEME PARTIE : HYDROGEOLOGIE DE L'AQUIFERE LIASIQUE</i>	
CHAPITRE 1 – PRESENTATION DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	70
1.1 – Nappe phréatique du bassin du Saïs	70
1.2 – Nappe profonde du Lias	71
1.3 – Approche de la géométrie du bassin à partir des données des forages	72
1.3.1 - Coupes Longitudinales	73
1.3.2 - Coupes Transversales	73
CHAPITRE 2 - ELABORATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE	76
2.1 – Introduction	76
2.2 – Généralités sur les SIG	76
2.2.1 - Définition et fonctions d'un SIG	76
2.2.2 - Composantes d'un SIG	77
2.2.3 - Mode de représentation des données géographiques dans un SIG	78
2.2.4 - Organisation des données géographiques	78
2.2.5 - Présentation du logiciel SIG "MapInfo" utilisé	78
2.3 – Présentation du SIG de la nappe du Lias	79
2.3.1 - Base de données spatiales	79
2.3.2 - Base de données thématiques	79
CHAPITRE 3 – EXPLOITATION DU SIG POUR L'ELABORATION DES CARTES STRUCTURALES DES DIFFERENTES FORMATIONS DU SAÏS	81
3.1 – Présentation	81
3.2 - Etablissement des cartes du Substratum	81
3.2.1 - Carte de la profondeur du Trias	82
3.2.2 - Carte du toit du Trias	83
3.3 – Etablissement des cartes de l'aquifère liasique	83
3.3.1 - Carte de la profondeur du Lias	83
3.3.2 - Carte du toit du Lias	85
3.3.3 - Carte de l'épaisseur du Lias	87

3.4 – Etablissement des cartes du couvercle imperméable du Miocène	88
3.4.1 - Carte de la profondeur des marnes miocènes ou épaisseur du Plio-Quat.	
3.4.2 - Carte du toit des marnes miocènes	89
3.4.3 - Carte de l'épaisseur des marnes miocènes	89
CHAPITRE 4 – EXPLOITATION DU SIG POUR	
L'ELABORATION DES CARTES HYDRODYNAMIQUES	91
4.1 – Cartographie de la piézométrie	91
4.2 – Suivis piézométriques	91
4.3 – Carte des transmissivités	93
4.4 – Carte des perméabilités	94
4.5 – Débits des ouvrages d'exploitation de l'aquifère liasique	95
4.6 – L'artésianisme	96
CHAPITRE 5 – ESSAI DE BILAN DE LA NAPPE PROFONDE	99
5.1 – Entrées	99
5.2 – Sorties	100
5.3 – Le bilan hydraulique	101
SYNTHESE DE LA TROISIEME PARTIE	102
QUATRIEME PARTIE : HYDRODYNAMIQUE DES EMERGENCES	105
CHAPITRE 1 – DESCRIPTION DES SOURCES DU PIEMONT DU CAUSSE	106
1.1 – Présentation	106
1.2 – Historique des études et des mesures de débits	106
1.3 – Sources du secteur Ribaa-Bittit	107
1.3.1 - Présentation	107
1.3.2 - Caractéristiques hydrologiques des sources	108
1.4 – Sources du piémont du causse d'Agourai	115
1.4.1 - Présentation	115
1.4.2 - Caractéristiques hydrologiques des sources	115
CHAPITRE 2 – CONDITIONS D'EMERGENCE DES PRINCIPALES SOURCES	119
2.1 – Présentation	119
2.2 – Conditions d'émergence	120
2.2.1 - Sources Bittit	120
2.2.2 - Source Aguemguem	121
2.2.3 - Le système Ribaa-Attrous	122
2.2.4 - Conclusion à propos des systèmes Ribaa-Bittit	123
2.2.5 - Sources Si Lmir et Sebaa	123

2.2.6 - Sources Akkous	123
2.3 – Conclusion	124
CHAPITRE 3 - ETUDE DES DEBITS CLASSES	125
3.1 - La méthode	125
3.2 - Résultats et discussions	125
3.2.1 - Cycles hydrologiques 1975-1977	125
3.2.2 - Cycles hydrologiques 1995-1997	127
3.2.3 - Comparaison des cycles hydrologiques 75/77 et 95/97	128
3.2.4 - Conclusion	129
CHAPITRE 4 - ETUDE DES COURBES DE RECESSION	130
4.1 – La méthode	130
4.2 – Résultats et discussions	130
4.2.1 - Etude des tarissements	131
4.2.2 - Etude des décrues	134
4.2.3 - Classification des sources étudiées	134
4.2.4 – Conclusion	135
CHAPITRE 5 - ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES	136
5.1 – La méthode	136
5.2 – Organigramme adopté pour les analyses corrélatoires et spectrales	136
5.3 – Résultats et interprétations	136
5.3.1 - Analyse de la série chronologique des précipitations	136
5.3.2 - Analyse de la série chronologique des débits	138
5.3.3 - Analyse croisée pluie-débit	139
CHAPITRE 6 - ETUDE DU PHENOMENE DE TURBIDITE	142
6.1 – Présentation	142
6.2 - Données disponibles	142
6.3 - Interprétation des données	142
6.3.1 - Echelle journalière	142
6.3.2 - Echelle horaire	144
6.4 - Application de l'analyse corrélatoire et spectrale à une chronique de turbidité	145
6.4.1 - Analyse de la série chronologique de la turbidité	145
6.4.2 - Analyse croisée pluie-turbidité	147
6.5 - Discussion et conclusion concernant l'origine de la turbidité	149
6.5.1 - Modèle conceptuel du magasin karstique	149
6.5.2 - Conditions spécifiques du site de l'étude	149
6.5.3 - Essai d'interprétation de l'origine de la turbidité	150
SYNTHESE DE LA QUATRIEME PARTIE	151

<i>CINQUIEME PARTIE : ETUDE HYDROCHIMIQUE</i>	153
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION ET PRESENTATION DES DONNEES D’ANALYSES	154
CHAPITRE 2 – CARACTERISTIQUES GENERALES DES EAUX DU LIAS	154
2.1 - Température de l’eau du Lias	154
2.2 - Conductivité électrique de l’eau du Lias	156
2.3 - Teneurs en éléments chimiques des eaux du Lias	157
CHAPITRE 3 – ETUDE HYDROCHIMIQUES DES EMERGENCES RIBAA-BITTIT	159
3.1 – Caractéristiques générales moyennes des eaux des émergences	159
3.2 – Etat de saturation des eaux des sources	160
3.2.1 - Présentation	160
3.2.2 - Résultats et interprétation	161
3.3 – Variations Saisonnières des paramètres physico-chimiques	163
3.3.1 - Variations au pas mensuel	163
3.3.2 - Variations liées aux épisodes de turbidité	165
CHAPITRE 4 – APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES	167
4.1 – Généralités	167
4.2 – Analyses isotopiques réalisées au niveau de la plaine du Saïs	167
4.3 – Méthodologie	167
4.4 – Principaux résultats déduits des analyses isotopiques	168
SYNTHESE DE LA CINQUIEME PARTIE	169
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	171
ANNEXES	178
BIBLIOGRAPHIE GENERALE	227

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Figure 0 : Les principaux massifs karstiques atlasiques du Maroc	8
---	---

PREMIERE PARTIE

Figure 1 : Situation géographique du secteur étudié	12
Figure 2 : Modelé topographique de la région étudiée	13
Figure 3 : Carte topographique en courbes de niveaux du secteur étudié	14
Figure 4 : Carte géomorphologique des Causses d'Agourai et d'El Hajeb-Ifrane	16
Figure 5 : Traits majeurs de la structure du Saïs	18
Figure 6 : Esquisse des isohyètes de la région Méknès-Fès-Ifrane	20
Figure 7 : Pluies mensuelles moyennes	21
Figure 8 : Pluies interannuelles des cinq stations d'étude	22
Figure 9 : Ecartis pluviométriques par rapport à la moyenne à El Hajeb	22
Figure 10 : Distribution de fréquence des pluies annuelles	23
Figure 11 : Températures minimales, moyennes et maximales	23
Figure 12 : Diagrammes ombrothermiques des stations d'étude	24
Figure 13 : Variation de l'infiltration efficace avec l'altitude	26
Figure 14 : Carte du réseau hydrographique du bassin du Saïs	27
Figure 15 : Relation entre l'oued Tizguit et l'oued Aguemguem	28
Figure 16 : Jaugeages différentiels sur l'oued Tizguit	29
Figure 17 : Pertes entre les stations le long de l'oued Tizguit	29
Figure 18 : Débits et pertes mensuelles de l'oued Tizguit	30

DEUXIEME PARTIE

Figure 19 : Carte de la situation du Sillon sud Rifain	34
Figure 20 : Carte géologique simplifiée du bassin du Saïs et du Causse d'El Hajeb-Ifrane	36
Figure 21 : Coupe schématique du sillon sud Rifain au niveau du Saïs	37
Figure 22 : Le Causse moyen Atlasique et ses principales subdivisions	38
Figure 23 : Log lithostratigraphique synthétique du bassin du Saïs	41
Figure 24 : Dépôt du Lias inf. et moy. dans le Causse d'Imouzzer et dans les rides S.Rifaines	
Figure 25 : Coupe lithologique descriptive du Néogène de l'Oued Kell - Moulay Idriss	44
Figure 26 : Carte de la fracturation du Causse d'El Hajeb-Ifrane	50
Figure 27 : La tectonique du Quaternaire ancien relevée sur Jbel Kannoufa	51
Figure 28 : Structure fossilisée de Kaf Enaâma à l'Ouest d'El Hajeb	52
Figure 29 : Contexte structural de Tiniza Ait Zaouit	53
Figure 30 : Accident d'Aïn Taoujdate : talus de flexure retouché par l'érosion	53
Figure 31 : Carte de la situation des principales campagnes géophysiques du bassin du Saïs	55
Figure 32 : Exemple d'un sondage électrique dans le Saïs	56
Figure 33 : Profils sismiques interprétés du bassin de Saïs	57
Figure 34 : Carte de l'épaisseur du Plio-Quaternaire	58

Figure 35 : Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire	59
Figure 36 : Carte de l'épaisseur des marnes miocènes	60
Figure 37 : Carte du toit du Lias	60
Figure 38 : Situation des différentes coupes géologiques interprétatives	61
Figure 39 : Coupes longitudinales E-W le long du bassin du Saïs	63
Figure 40 : Coupes transversales N-S le long du bassin du Saïs	64
Figure 41 : Coupe géologique schématique entre Méknès et El Hajeb	65

TROISIEME PARTIE

Figure 42 : Carte de la situation des coupes lithologiques du bassin du Saïs	72
Figure 43 : Coupes lithologiques longitudinales traversant le bassin du Saïs	74
Figure 44 : Coupes lithologiques transversales traversant le bassin du Saïs	75
Figure 45 : Carte de la profondeur du Trias	82
Figure 46 : Carte du toit du substratum triasique	84
Figure 47 : Carte de la profondeur de l'aquifère liasique de la plaine du Saïs	85
Figure 48 : Carte du toit de l'aquifère liasique	86
Figure 49 : Epaisseurs de l'aquifère liasique	87
Figure 50 : Profondeurs des marnes miocènes ou épaisseurs du Plio-Quaternaire	88
Figure 51 : Carte du toit des marnes miocènes de la plaine du Saïs	89
Figure 52 : Carte de l'épaisseur des marnes miocènes de la plaine du Saïs	90
Figure 53 : Interprétation cartographique de la piézométrie de l'aquifère liasique	92
Figure 54 : Suivis piézométriques de la nappe profonde du Saïs et pluie à Ifrane	93
Figure 55 : Report des valeurs des transmissivités de l'aquifère liasique	93
Figure 56 : Répartition statistique des transmissivités de l'aquifère liasique	94
Figure 57 : Report des valeurs des perméabilités de l'aquifère liasique	94
Figure 58 : Répartition statistique des perméabilités de l'aquifère liasique	95
Figure 59 : Débits des ouvrages d'exploitation d'eau de l'aquifère liasique	95
Figure 60 : Carte de l'artésianisme de la nappe du Lias du Saïs	96
Figure 61 : Evolution de la pression des forages artésiens de la plaine de Fès	97
Figure 62 : Corrélations linéaires entre la pression et l'épaisseur des marnes miocènes	97
Figure 63 : Carte de la situation de la plaine du Saïs et des bassins versants des Causses	99

QUATRIEME PARTIE

Figure 64 : Carte de la situation des sources de la bordure nord du Causse	106
Figure 65 : Evolution du débit moyen annuel de l'ensemble des émergences Ribaa-Bittit	109
Figure 66 : Débits moyens annuels des sources et pluies à El Hajeb	110
Figure 67 : Ecarts pluviométriques par rapport à la moyenne à El Hajeb	110
Figure 68 : Evolution du débit mensuel moyen de l'ensemble des émergences Ribaa-Bittit	111
Figure 69 : Débits mensuels moyens des sources et pluies à El Hajeb	112
Figure 70 : Fluctuations saisonnières moyennes des débits de l'ensemble des sources	114
Figure 71 : Evolution du débit annuel des trois émergences du piémont du Causse d'Agourai	
Figure 72 : Débits annuels moyens des sources et pluies à El Hajeb	117

Figure 73 : Evolution du débit mensuel moyen des trois sources d'Agouraï	117
Figure 74 : Débits mensuels des sources et pluies à El Hajeb	118
Figure 75 : Variations saisonnières des débits des sources du Causse d'Agouraï	119
Figure 76 : Schéma général d'alimentation entre le Causse et la plaine	120
Figure 77 : Coupe hydrogéologique schématique du système Bittit-Lmir	121
Figure 78 : Coupe hydrogéologique schématique du système Aguemguem et Ribaa-Attrous	121
Figure 79 : Débits classés des principales émergences (1975/77)	126
Figure 80 : Débits classés des deux sources captées (1995/97)	128
Figure 81 : Débits classés des deux sources captées (1975/77 et 1995/97)	129
Figure 82 : Hydrogrammes des principales sources (1975/84)	131
Figure 83 : Hydrogrammes des sources captées et pluies à Bittit (1995/98)	131
Figure 84 : Courbes de récession de la source Ribaa Aval (1977)	133
Figure 85 : Courbes de récession de la source Ribaa Aval (1997)	133
Figure 86 : Courbes de récession de la source Ribaa Amont (1977)	133
Figure 87 : Courbes de récession de la source Attrous (1979)	133
Figure 88 : Courbes de récession de la source Bittit (1977)	134
Figure 89 : Courbes de récession de la source Bittit (1996)	134
Figure 90 : Organigramme pour les analyses corrélatoires et spectrales	137
Figure 91 : Analyse corrélatoire et spectrale simple de la chronique des pluies	137
Figure 92 : Analyse corrélatoire et spectrale simple des débits	138
Figure 93 : Corrélogrammes croisées pluie-débit des sources captées	140
Figure 94 : Analyse spectrale croisée : pluie - débit des sources captées	141
Figure 95 : Turbidités journalières aux sources et pluies à Bittit	143
Figure 96 : Corrélation entre les turbidités à Ribaa et à Bittit	143
Figure 97 : Suivi horaire de la turbidité des sources et pluie journalière à Bittit	144
Figure 98 : Suivi horaire de la turbidité au niveau des sources captées	145
Figure 99 : Analyse corrélatoire et spectrale simple des turbidités des sources captées	146
Figure 100 : Analyse croisée pluie-turbidité des sources captées	147
Figure 101 : Analyse spectrale croisée : pluie - turbidité des sources captées	148

CINQUIEME PARTIE

Figure 102 : Carte de la température de l'eau du Lias	155
Figure 103 : Relation entre la température de l'eau et la profondeur du Lias	155
Figure 104 : Report de la conductivité électrique de l'eau du Lias	156
Figure 105 : Carte de la situation des points d'eau disposant d'analyses physico-chimiques	157
Figure 106 : Diagramme d'analyse de l'eau du Lias de la région du Saïs	158
Figure 107 : Diagramme de la composition chimique des eaux des émergences karstiques	159
Figure 108 : Etat de saturation des eaux des émergences Ribaa-Bittit	161
Figure 109 : Diagramme d'équilibre des eaux des émergences Ribaa-Bittit	163
Figure 110 : Evolution des ions majeurs et des paramètres de l'eau de la source Ribaa am	164
Figure 111 : Report des points d'eau ayant fait l'objet d'analyses isotopiques	167
Figure 112 : Relation entre les teneurs en ^{18}O et les teneurs en ^2H dans les eaux du Saïs	168

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Inventaire spéléologique du Causse d'El Hajeb – Ifrane	17
Tableau 2 : Coordonnées et données moyennes des stations météorologiques	20
Tableau 3 : Pluies mensuelles moyennes	21
Tableau 4 : Variations pluviométriques annuelles	21
Tableau 5 : Calculs de l'évapotranspiration potentielle	25
Tableau 6 : Résultats des calculs des ETR, des lames d'eau infiltrées et de l' I_e	25
Tableau 7 : Coordonnées des stations de jaugeage de l'oued Tizguit	28
Tableau 8 : Recensement général de la population de 2004	31
Tableau 9 : Lithologique du Trias d'après les forages pétroliers du bassin de Boufekrane	83
Tableau 10 : Données concernant la recharge de l'aquifère liasique	100
Tableau 11 : Coordonnées et débits moyens des sources	107
Tableau 12 : Caractéristiques hydrologiques annuelles des sources	108
Tableau 13 : Caractéristiques hydrologiques mensuelles des sources	111
Tableau 14 : Corrélations statistiques entre les débits des principales sources	113
Tableau 15 : Tariessements constatés sur quelques sources depuis 1975	113
Tableau 16 : Débits moyens mensuels des sources du complexe Ribaa-Bittit	113
Tableau 17 : Données disponibles sur les débits journaliers des sources depuis 1975	115
Tableau 18 : Caractéristiques des sources des sources du Causse d'Agouraï	115
Tableau 19 : Caractéristiques hydrologiques annuelles des sources du Causse d'Agouraï	116
Tableau 20 : Caractéristiques hydrologiques mensuelles des trois sources	117
Tableau 21 : Débits moyens mensuels des sources du Causse d'Agouraï	118
Tableau 22 : Données des forages réalisés à proximité de la source Bittit	122
Tableau 23 : Données du forage réalisé à proximité de la source Aguemguem	122
Tableau 24 : Données des forages réalisés à proximité des sources Ribaa et Attrous	122
Tableau 25 : Résultats de l'analyse des débits classés des quatre principales sources	126
Tableau 26 : Intervalles des classes de débits des 4 sources durant les cycles 1975-77	126
Tableau 27 : Intervalles des classes de débits des deux sources captées	127
Tableau 28 : Coefficients et paramètres déduits des courbes de récession	132
Tableau 29 : Classification de quelques systèmes karstiques d'après l'ACS	139
Tableau 30 : Données statistiques sur la Turbidité (en NTU) des sources captées	142
Tableau 31 : Comparaison des paramètres obtenus par rapport à ceux d'Aïn Asserdoune	147
Tableau 32 : Données physico-chimiques moyennes par groupe d'ouvrages	158
Tableau 33 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux des sources	159
Tableau 34 : Données physico-chimiques et pluviométriques des sources Ribaa-Bittit	162
Tableau 35 : Paramètres physico-chimiques de la source Ribaa amont	163
Tableau 36 : Variation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des sources	166

LISTE DES ANNEXES

178

Annexe 1 : ARTICLE HSJ 2003

179

Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco). *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48, number 6, pp. 971-984.

Annexe 2 : ARTICLE CRAS 2004

193

Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée. Exemple de la source Bittit (Maroc). *Comptes Rendus Geoscience*, Vol. 336, Issue 12, pp. 1099-1109.

Annexe 3 : CLIMATOLOGIE

204

- Calculs de doubles cumuls
- Présentation de la base de données de la pluviométrie
- Reconstitution des données manquantes
- Détermination du gradient altimétrique des pluies
- Détermination du gradient altimétrique des températures
- Données thermométriques
- Evapotranspiration potentielle
- Evapotranspiration réelle
- Relation entre l'infiltration efficace et l'altitude

Annexe 4 : INVENTAIRE DES FORAGES PROFONDS DU SAÏS PAR INDICE

210

- Indice 14
- Indice 15
- Indice 21
- Indice 22

Annexe 5 : ALIMENTATION EN EAU POTABLE DES AGGLOMERATIONS DU SAÏS ET DU CAUSSE

214

- Alimentation en eau potable de la Wilaya de Fès
- Alimentation en eau potable de la ville de Méknès
- Alimentation en eau potable des centres du plateau de Méknès
- Alimentation en eau potable des villes du Causse
- Récapitulatif des besoins et des prélèvements pour l'AEP

ANNEXE 6 : METHODES DU TRAITEMENT DU SIGNAL

220

- Etude des courbes de récession
 - Etude du tarissement
 - Etude de la décrue
 - Classification des systèmes karstiques
- Analyses corrélatoires et spectrales
 - L'analyse corrélatoire
 - L'analyse spectrale
 - La fonction de cohérence et la fonction de gain

ANNEXE 7 : APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES

225

- Méthodologie adoptée pour les analyses isotopiques réalisées au niveau du Saïs
- Résultats des analyses isotopiques et des Bilans en ^{18}O et en ^3H

INTRODUCTION GENERALE

La problématique

L'eau est un des problèmes majeurs propres aux pays de la rive sud de la méditerranée car elle représente un facteur limitatif clé du développement durable, de l'amélioration de la qualité de la vie et de la paix. La gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux souterraines et superficielles est actuellement une nécessité, compte tenu d'une part de l'accroissement continu des besoins, et d'autre part de la dégradation constatée durant ces dernières décades de la qualité de l'eau dans ces pays en voie de développement. De surcroît, lorsque les ressources sont limitées et que la sécheresse qui touche l'ensemble du pays devient conjoncturelle, cette nécessité devient urgence.

Au Maroc, une bonne connaissance du fonctionnement des aquifères régionaux et le recours à une gestion appropriée sont ainsi reconnus par l'ensemble des usagers (agriculture, régies, industries) et par le législateur (promulgation de la loi sur l'eau en 1995). Cette connaissance nécessite au préalable, une identification géologique et hydrogéologique poussée (réalisation de forages, reconnaissances géophysiques, essais par pompage, jaugeage des sources et des cours d'eau, analyses physico-chimiques et bactériologiques...).

L'information ainsi recueillie durant plusieurs années doit être triée, organisée et stockée dans des bases de données facilement exploitables et actualisables, afin que les acteurs de l'eau (scientifiques, gestionnaires, industriels, particuliers..) puissent la consulter et y extraire leurs requêtes le plus rapidement possible.

Au Maroc, les études hydrogéologiques entamées depuis plusieurs décennies par la Direction de l'Hydraulique et par les universitaires, ont permis d'avoir une connaissance préliminaire sur les potentialités en eau, et sur le mode de fonctionnement des principaux aquifères superficiels, notamment des plaines, qui en général se développent en milieu poreux (nappes de : Tadla, Haouz, Sous...). En raison des caractéristiques topographiques et géologiques non complexes, les travaux de prospection et d'exploitation des eaux souterraines sur ces réservoirs aquifères ont été menés en premier. En revanche, quand il s'agit des nappes profondes, les caractéristiques hydrogéologiques sont restées parfois très générales et souvent imprécises.

Plusieurs facteurs ont concouru à un regain d'intérêt aux nappes profondes, et aux aquifères de montagne pour satisfaire les différents besoins croissants des populations. Les principaux facteurs sont : La sécheresse qui sévit à travers tout le pays depuis plus de deux décennies, le développement des techniques de forage et la baisse de leurs coûts, et le lancement des programmes d'alimentation en eau potable du monde rural (PAGER).

L'accumulation d'une information hydrogéologique, justifie actuellement des études régionales, qui regroupent à la fois les zones montagneuses, et les plaines adjacentes avec lesquelles elles sont le plus souvent en liaison hydraulique. Les aquifères de montagne reçoivent plus d'apports météoriques que les plaines, et quand leur nature lithologique et la fracturation le permettent, ils peuvent emmagasiner une bonne partie des apports. Ils constituent le plus souvent des parts importantes de l'alimentation des nappes des plaines, soit par ré-infiltration, soit par circulation souterraine. Ce cas est très fréquent dans les nappes bordières des chaînes atlasiques (Tadla, Souss, Saïs, Errachidia...).

Les principaux aquifères de l'Atlas se développent dans des roches carbonatées, plus ou moins fissurées, fracturées et karstifiées (Fig. 0). L'étude de ces types de réservoirs karstiques sous climat semi aride à aride commence à se développer au Maroc. On assiste actuellement au passage d'une phase où, on se limitait au fonçage de quelques forages de reconnaissance, aux mesures de débit et la réalisation de quelques analyses physico-chimiques, à une phase où on s'intéresse à la compréhension des modalités d'écoulement et à la quantification des réserves. C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail.

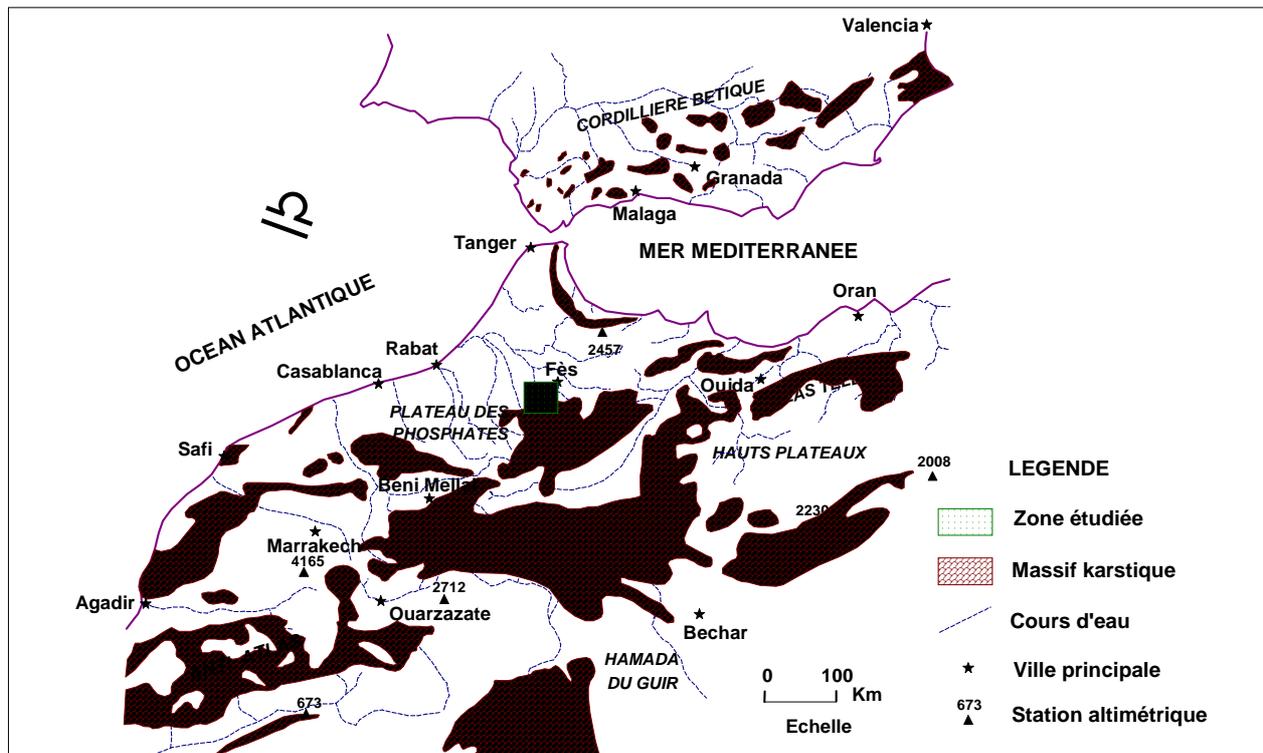


Figure 0 : Les principaux massifs karstiques atlasiques du Maroc

La plaine du Saïs est l'une des grandes régions agricoles du Maroc. Ses ressources en eau sont fournies en grande partie par l'aquifère karstique du Lias du plateau carbonaté du Moyen Atlas. Les ressources en eau de cet aquifère sont utilisées pour la satisfaction des besoins domestiques, agricoles et industriels, et constituent donc un facteur déterminant pour le développement économique et social de cette région. Le Causse se vidange en bordure de la plaine par un groupe de sources. Après les grandes averses, la turbidité de l'eau des sources devient excessive, rendant l'eau impropre à la consommation. La sécheresse a eu des conséquences sensibles sur les ressources en eau. Mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique et l'évolution de ces grands systèmes karstiques, compte tenu de la variation de leurs réserves, revêt une importance particulière au moment où l'on parle de plus en plus de changements climatiques, allant dans la région étudiée, vers l'aridification (Amraoui et al, 2004).

Ce travail de recherche hydrogéologique propose une méthodologie d'étude pour ce genre d'aquifère karstique. Il vise à étudier avec précision les points suivants :

- Caractérisation de la région sur les plans géographique, géomorphologique, climatique, hydrologique et géologique ;

- Synthèse actualisée de l'information hydrogéologique basée essentiellement sur les forages profonds ;
- Etablissement et exploitation d'un système d'information géographique (SIG) de l'aquifère liasique ;
- Identification de la géométrie de l'aquifère ;
- Etude des modalités de l'écoulement de l'aquifère liasique ;
- Etude hydrodynamique des émergences karstiques ;
- Etude du phénomène de turbidité qui affecte les sources ;
- Etude des relations entre l'aquifère liasique libre du Causse et captif de la plaine du Saïs ;
- Evaluation de l'impact de la sécheresse sur les ressources en eau ;
- Caractérisation des eaux du Lias sur le plan qualitatif.

La méthodologie d'étude

La méthodologie appliquée à l'aquifère liasique de cette région d'étude, s'articule essentiellement sur celle employée aux systèmes karstiques à travers le monde. Le présent travail de recherche a été subdivisé en cinq parties :

* **La première partie** (comprenant 5 chapitres) est consacrée à l'élaboration d'une synthèse actualisée des aspects géographiques, géomorphologiques, climatiques, hydrologiques et des activités humaines aussi bien au niveau du bassin du Saïs que dans le Causse moyen atlasique tabulaire. Elle est basée sur un ensemble de travaux cartographiques (cartes topographiques au 1/50000, cartes géomorphologiques au 1/100000), et sur une bibliographie riche et diversifiée accumulée, notamment par la Direction de l'Hydraulique.

* **La deuxième partie** (comprenant 4 chapitres) traite deux volets importants : d'une part l'aspect géologique (contexte géologique régional, lithostratigraphie et étude structurale), et d'autre part la synthèse des différentes reconnaissances géophysiques effectuées sur le bassin du Saïs. Cette partie se base dans son volet géologique sur les différents travaux de recherche académiques effectués dans la région, notamment en structurale et en sédimentologie. Le volet géophysique quant à lui se base sur une documentation riche fournie par la Direction de l'Hydraulique et par l'ONAREP (Office National de Recherche et d'Exploitation Pétrolière).

* **La troisième partie** (comprenant 5 chapitres) est consacrée à l'hydrogéologie de l'aquifère profond du Lias. Elle comprend la mise en place et l'exploitation d'un Système d'Information Géographique (SIG) de l'aquifère avec le logiciel MapInfo. Ce SIG englobe aussi bien une base de données spatiales (différents types de cartes), qu'une base de données thématiques qui repose sur un inventaire de plus de 400 forages profonds. Dans cette partie, un certain nombre de cartes structurales et hydrodynamiques ont été élaborées à partir de la base de données SIG. Ces cartes précisent la géométrie de l'aquifère et les modalités de l'écoulement de l'aquifère profond du Lias. Un essai de bilan de la nappe du Lias a été tenté également. L'information traitée dans cette partie a été récoltée au niveau de : la Direction de l'Hydraulique à Rabat et les directions régionales de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) de Méknès et de Fès.

* **La quatrième partie** (comprenant 6 chapitres) est consacrée à l'hydrodynamique des émergences, particulièrement les sources du complexe Ribaa-Bittit dont deux sont captées pour alimenter la ville de Méknès en eau potable. Après une description des sources et de leurs conditions d'émergence, les chroniques de débits sont analysées par les méthodes classiques des débits classés, des courbes de récession et de l'analyse corrélatoire et spectrale. Les méthodes de traitement du signal ont été appliquées afin de mettre en évidence d'éventuels apports ou fuites vers ou à partir du système, décrire le tarissement et quantifier les réserves et préciser la structure interne et le compartimentage du système. L'effet de la sécheresse sur le comportement hydrodynamique des émergences a été traité, ainsi que le phénomène de turbidité qui les affecte lors des grandes averses et qui rend l'eau impropre à la consommation domestique. Les données qui ont servi au traitement de cette partie ont été collectées auprès : de l'Agence du bassin du Sebou à Fès et de la Régie Autonome de Distribution de l'Eau et de l'Electricité de Méknès (RADEEM).

* **La cinquième partie** (comprenant 3 chapitres) traite de la qualité physico-chimique de l'eau de l'aquifère liasique. Dans un premier temps, les eaux du Lias sont caractérisées à l'échelle du secteur d'étude en terme de : température, conductivité électrique et teneurs en éléments chimiques. Ensuite, les eaux des émergences Ribaa-Bittit sont étudiées sur le plan hydrochimique en dégageant : leurs caractéristiques générales, leurs états de saturation et la variation de leurs paramètres physico-chimiques en fonction des saisons et lors des épisodes de turbidité. Les données sur le chimie de l'eau ont été collectées auprès de la Direction de l'Hydraulique, la RADEEM et l'ONEP.

PREMIERE PARTIE :

CONTEXTE GENERAL DU BASSIN DU SAÏS ET DE LA BORDURE NORD DU CAUSSE MOYEN ATLASIQUE TABULAIRE

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

CHAPITRE 2 : CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

CHAPITRE 3 : CONTEXTE CLIMATIQUE

CHAPITRE 4 : HYDROLOGIE DE SURFACE

CHAPITRE 5 : LES ACTIVITES HUMAINES

SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE

CHAPITRE 1 – CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Située au nord du Maroc (Fig. 1), la zone étudiée couvre une superficie totale de l'ordre de 6000 km² (coordonnées Lambert : 467 < X < 552 km et 320 < Y < 390 km). Elle comprend deux domaines différents mais de tailles comparables :

- Un premier domaine situé au nord, correspondant à la plaine de Saïis où s'insèrent les deux grandes villes de Méknès et de Fès. La plaine domine l'oued Beht à l'ouest et le Sebou à l'est, et est encadrée par les rides pré-rifaines au nord, et le rebord du Causse moyen Atlasique au sud.
- Un second domaine montagneux au sud appartenant au Moyen Atlas tabulaire. Il comprend les Causses d'Agourai et d'El Hajeb-Ifrane. La limite nord du Causse s'interrompt à sa retombée sur la plaine du Saïis. La limite ouest est marquée par l'interruption brutale du Causse qui domine des terrains primaires de la Méséta. Ceci est également le cas à l'Est où les falaises du Causse surplombent la boutonnière paléozoïque du massif central.

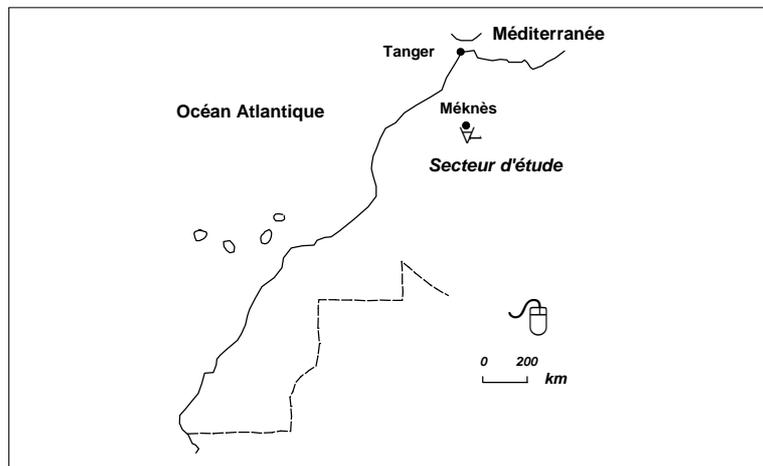


Figure 1 : Situation géographique du secteur étudié

Le modelé topographique de la zone étudiée (Fig. 2) illustre les variations d'altitude à travers la région d'étude. Il a été construit sur la base de 7700 valeurs (1.3 points par km² en moyenne). Ces valeurs comprennent tous les points cotés figurant sur les cartes topographiques au 1/50000, plus des valeurs déduites des cartes topographiques suivant un maillage régulier. Cette représentation en trois dimensions distingue bien le Causse Moyen Atlasique au sud, la plaine du Saïis plus au nord et les premières rides pré-rifaines au Nord de Méknès et de Fès. La flexure d'Aïn Taoujdate apparaît clairement, elle scinde la plaine en deux parties structurales : le plateau de Méknès à l'Ouest et la plaine de Fès à l'Est. L'emplacement au piémont du Causse de l'important groupe d'émergences Ribaa-Bittit est indiqué. Il semble être en position topographique favorable.

La carte topographique du secteur étudié (Fig. 3) montre qu'au niveau du Causse, les altitudes varient de 1900 m NGM au SE de la ville d'Ifrane à 1000 m à El Hajeb. Une diminution plus modérée d'altitude du sud vers le nord est observée sur la plaine du Saïis. L'altitude passe de 750 m NGM en bordure du Causse à 550 m à Méknès et à 400 m à Fès. Au nord de la plaine, la topographie se redresse au contact des rides pré-rifaines.

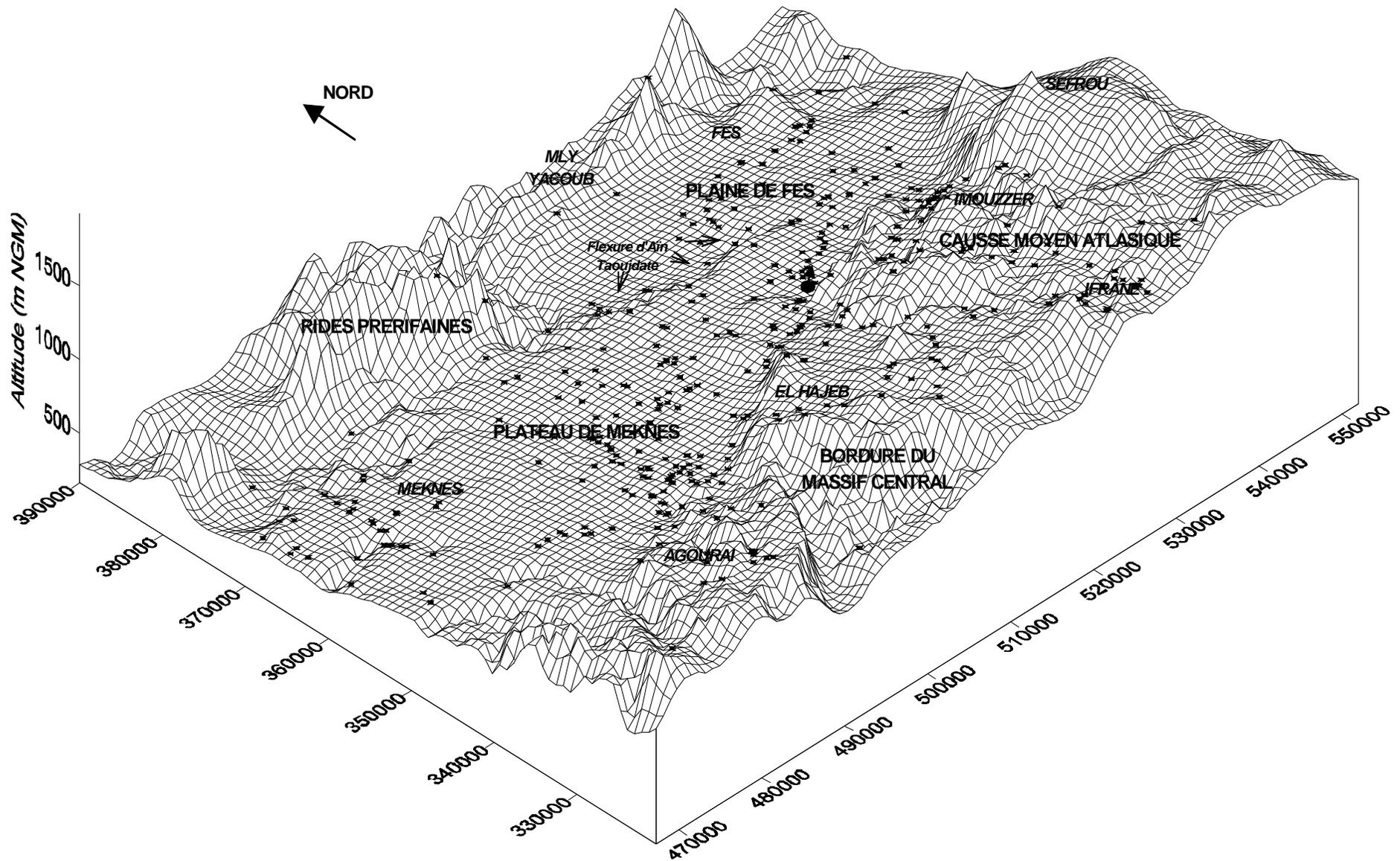


Figure 2 : Modelé topographique de la région étudiée

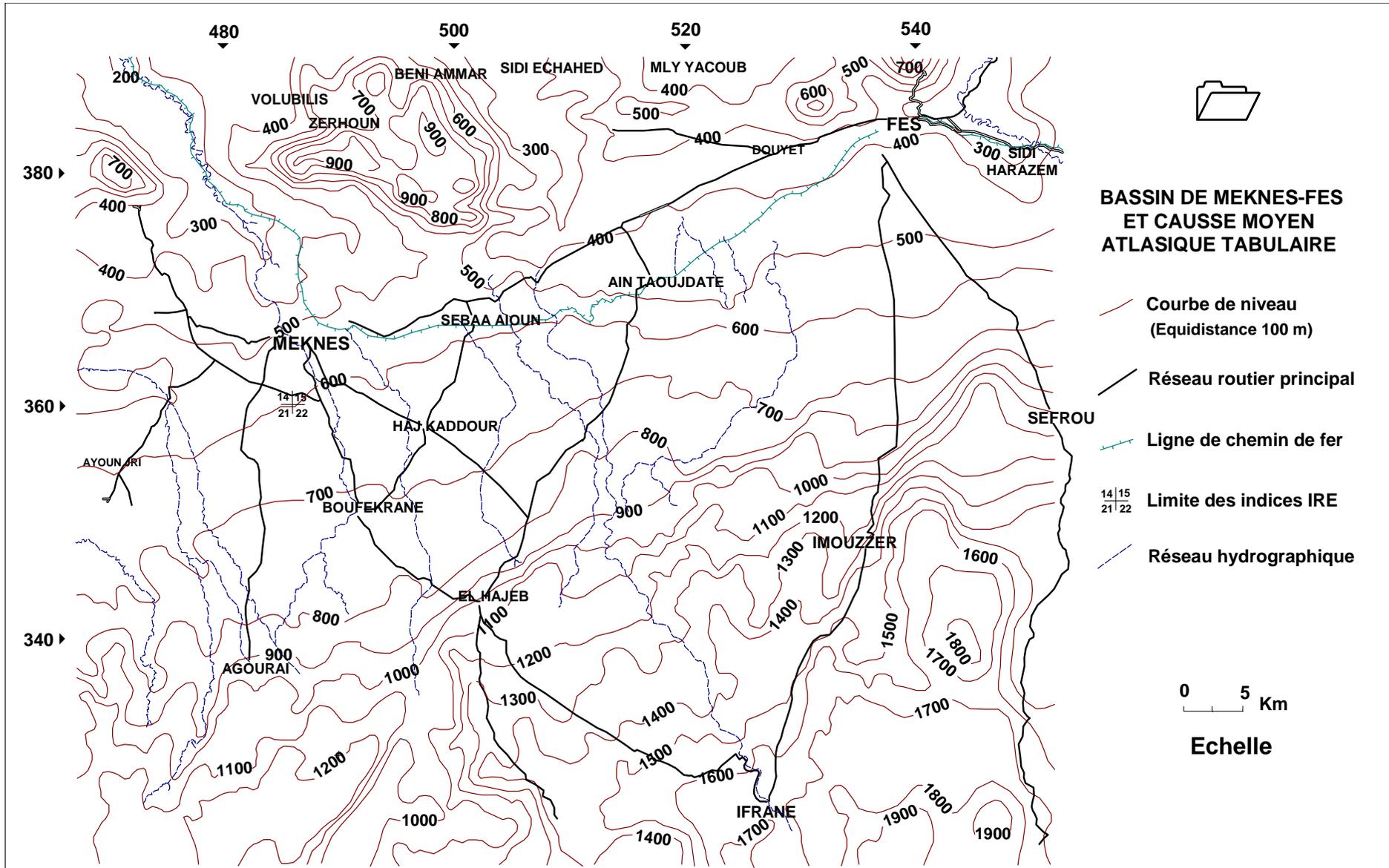


Figure 3 : Carte topographique en courbes de niveaux du secteur étudié

CHAPITRE 2 – CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE

2.1 - Les Causses

La carte géomorphologique des Causses d'Agourai, d'El Hajeb et d'Ifrane (Fig. 4) a été extraite des travaux de J. Martin (1981) qui a largement décrit la géomorphologie du moyen Atlas central. La carte reprend les principaux traits figurant sur la feuille d'El Hajeb.

Le Causse Moyen Atlasique est constitué de roches dolomitiques et calcaires du Lias voilées, par endroits, par des épanchements volcaniques récents. Il se caractérise par une structure tabulaire, plus faillée que plissée et par un relief monotone. Il s'agit de vastes plateaux karstiques diversement étagés, qui surplombent la plaine environnante du Saïs à des altitudes dépassant 1000 m. Des ondulations à très grands rayons de courbure, et des systèmes de failles créent de larges grabens et des horsts. Les cuvettes sont nombreuses, créant des bassins versants fermés au centre desquels existent parfois des lacs permanents ou Dayet (exemple Dayet Aoua). Un karst de surface à lapiés ruiniformes et ouvalas s'est développé, ainsi qu'une dizaine d'avens de faible importance. Les phénomènes karstiques sont mal développés. On note une faible présence de grottes ou de galeries souterraines accessibles. La karstification en profondeur est probablement plus développée au droit des sources, comme en atteste le débit total des émergences du complexe Ribaa-Bittit, situé en bordure du Causse et qui atteint $3\text{m}^3/\text{s}$.

Les formes karstiques présentes sont constituées de petites cavités sommitales et par de grandes et profondes cuvettes d'effondrement ou des vasques de grande taille. Le fond des dépressions karstiques accueille des minéraux argileux rougeâtres (terra rossa), produit de l'altération des roches carbonatées, qui forment un résidu (argile de décalcification, argile à silex...). Ce résidu est facilement mobilisable lors des épisodes de pluie et peut atteindre aisément la nappe souterraine. Le tableau 1 regroupe un inventaire des différentes formes karstiques des Causses étudiés (DRPE, 1981). Ces manifestations karstiques sont réparties en fonction du relief et de la tectonique.

Le petit Causse d'Agourai est ceinturé par des corniches qui dominent le socle paléozoïque (Fig.4). Schématiquement, il s'agit d'un synclinorium de terrains de nature essentiellement dolomitique du Lias, basculé en direction du Saïs de Méknès, suivant une pente de 2 à 3 %. La bordure SE est définie par la grande faille d'Adarouch articulée en touche de piano.

Le Causse d'El Hajeb est limité au nord par un imposant talus et au SW par une corniche continue et indentée. Le plateau se raccorde de manière insensible au Causse d'Ifrane au SE. La vallée de l'oued Tizguit constitue sa frontière orientale. L'épaisseur des couches liasiques est extrêmement variable : ainsi, près des rentrants de la corniche occidentale, les dolomies du Lias ne sont qu'un voile pelliculaire au dessus des basaltes du Trias. C'est le cas également au sud d'El Hajeb, où un réseau de petites émergences pérennes du Lias est la conséquence directe de la proximité du Trias sous-jacent. En revanche, au centre et surtout à l'est, les séries s'épaississent et les calcaires liasiques s'étendent sur les plateaux qui dominent les deux rives de l'oued Tizguit.

Le Causse d'Ifrane fait suite à celui d'El Hajeb en direction du SE. Il se décompose en éléments structuraux, affectés par une fracturation dense. L'épaisseur du Lias y est importante et peut atteindre 300.

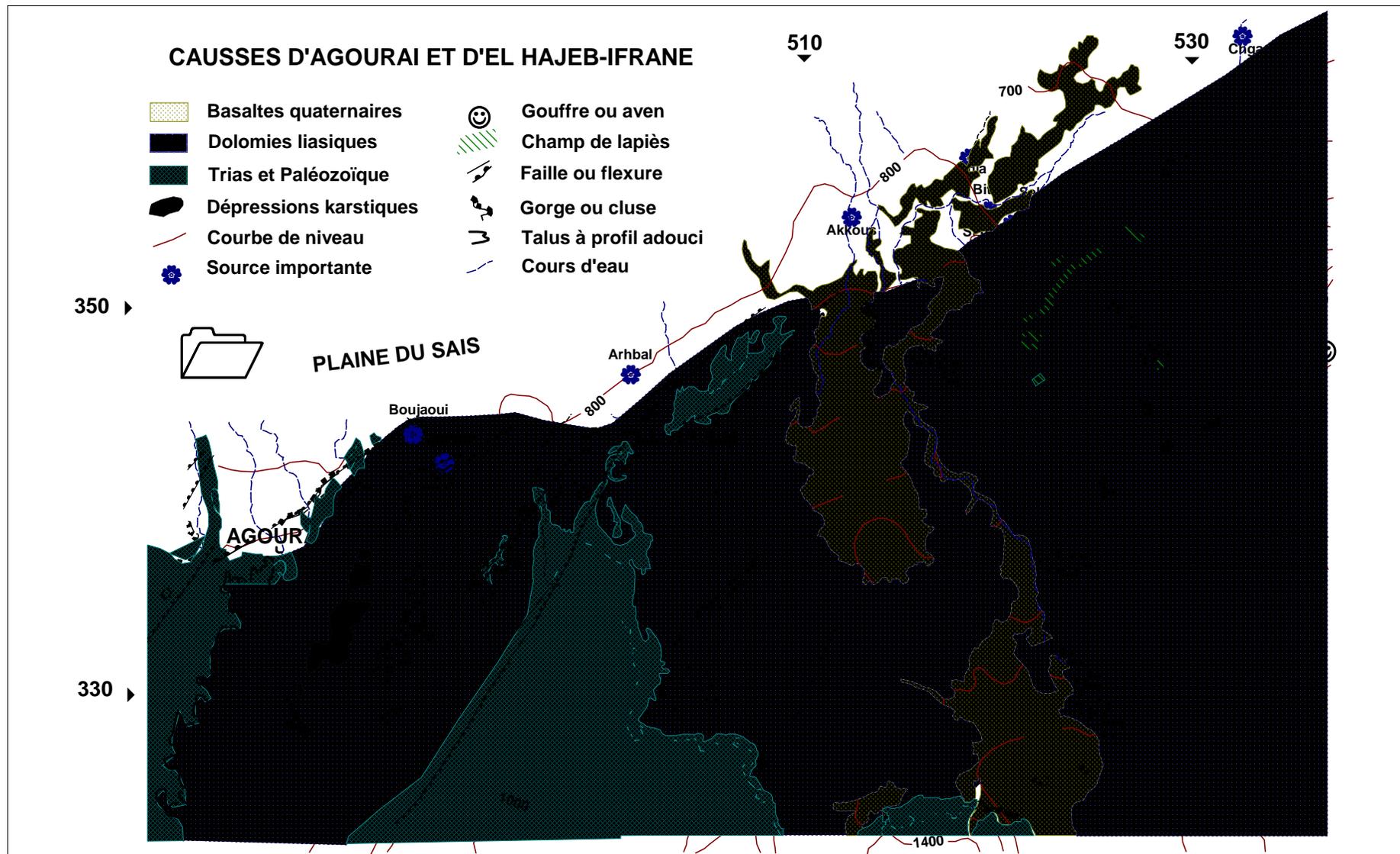


Figure 4 : Carte géomorphologique des Causses d'Agourai et d'El Hajeb-Ifrane
(extraite de la Feuille d'El Hajeb, J.Martin 1981)

Dénomination	X	Y	Z	Description
Grotte de Tifratine	501.75	344.00	930	Grotte s'ouvrant dans une falaise calcaire. Mène à 2 salles successives de 6x6 m
Ghar Karmouss	515.15	340.50	1208	Gouffre s'ouvrant dans les basaltes, colmaté, large de 30 m et profond de 6 m
Ghar Tahleb	515.70	340.50	1210	Trou ovale dans les basaltes de 20x12 m, profond de 6 à 8 m et bouché au fond
Ghar Rameq	515.10	339.50	1255	Trou circulaire d'un diamètre de 25 m. Végétation au fond et colmatage complet
Ghar Dell	515.55	339.65	1235	Gouffre d'un diamètre de 15 à 20 m, profond de 6 à 8 m et entièrement colmaté
Grotte de Sidi Maanar	534.80	348.00	1250	Deux petits gouffres obstrués à 6 m de profondeur
Gouffre aux pigeons	537.00	348.00	1400	Ouverture imposante de 8x10 m et profonde de 35 m, puis pente d'éboulis
Kef Jenane – Lahlou	536.65	350.65	1220	Diaclase travaillée par l'eau. Puits de 10 m donnant sur une salle de 12x5 m
Aven	536.50	350.00	1230	Beau puits régulier profond de 25 m et large 6 m, avec un cône d'éboulis au fond
Gouffre de Jbel Aoua	532.55	338.90	1730	Gouffre donnant sur une plateforme à -19 m. Puis diaclase menant jusqu'à -57 m
Grotte de Daïet Aoua	533.50	339.90	1510	Vaste poche à mi-hauteur de la colline dominant le lac
Grande diaclase d'aïn Régada	532.00	340.00	1480	Etroite fissure s'ouvrant dans le talus rocheux. Colmatée par un éboulis
Kef Aïssa	524.30	345.25	1360	Superbe cavité au sommet de la montagne. Entonnoir de -30 m et 4x6 m de large
Faille Dehar El Aïch I	524.60	346.50	1360	Couloir très étroit donnant sur une diaclase qui s'élargit et permet d'atteindre -80 m
Faille Dehar El Aïch II	524.50	346.60	1340	Diaclase profonde de 20 m, se développant sur 40 m
Dehar El Aïch III	524.50	346.20	1340	Belle diaclase E-W atteignant -45 m, mais à blocs instables
Dehar El Aïch IV	524.45	346.45	1340	Etroite fissure profonde de 15 m
Jorf El Roumi I	526.70	354.10	1050	Vaste gouffre de 20 m de long sur 2 à 4 m orienté SE-NW. Descente à -50 m
Jorf El Roumi II	526.72	354.12	1050	Gouffre + étroit et - régulier que le F.c.6. Les 2 communiquent par une diaclase
Jorf El Roumi III	526.68	354.08	1050	Etroite ouverture à 30 m du F.c.6, profonde de 30 m
Aven	524.20	352.30	1106	Ouverture de 1,5x4 m, irrégulière, reconnue jusqu'à -40 m
Grande diaclase	524.00	352.50	1075	Diaclase sur laquelle s'échelonnent 17 puits dont la profondeur varie de 7 à 70 m
Trou perdu	523.70	352.30	1020	Orifice en forme de fente de 1,5x 4 m. Reconnu jusqu'à 40 m

Tableau 1 : Inventaire spéléologique du Causse d'El Hajeb - Ifrane

Seul l'oued Tizguit coule en permanence et il faut souligner les pertes importantes de ce dernier qui, à son débouché dans la plaine du Saïs, est souvent sec en été. Les affluents secondaires des cours d'eau n'existent pratiquement qu'à l'état d'oueds temporaires qui ne connaissent d'écoulement qu'en période de pluie. Dans ce réseau hydrographique mal organisé, l'importance des bassins endoréiques est grande, car ils jouent un grand rôle dans l'infiltration des précipitations vers la nappe d'eau souterraine du Causse.

Il pleut et il neige abondamment sur le Causse moyen Atlasique que couvrent de belles forêts. A mesure que l'on descend en altitude, la couverture forestière s'éclaircit, les arbres cèdent la place aux broussailles et à la roche nue. La forêt est constituée essentiellement de chênes verts (parties basses) et de cèdres (surtout au delà de 1600 m où les précipitations sont abondantes).

2.2 - Le bassin du Saïs

Le bassin de Saïs, appelé aussi le bassin de Méknès-Fès, est sillonné par un réseau hydrographique prenant naissance dans les reliefs bordiers. Wernli (1988) a découpé cette zone en deux parties au droit de la grande coulée basaltique quaternaire qui jalonne l'oued Jdida. Il a distingué le Saïs de Fès à l'Est et celui de Méknès à l'Ouest. Cirac (1985) a fait intervenir une structure tectonique : la flexure E-W d'Ain Taoujdate qui dénivelle nettement, dans le bassin de Saïs, deux paliers : à l'Ouest, le plateau de Méknès dominant à l'Est la plaine de Fès (Fig. 5) :

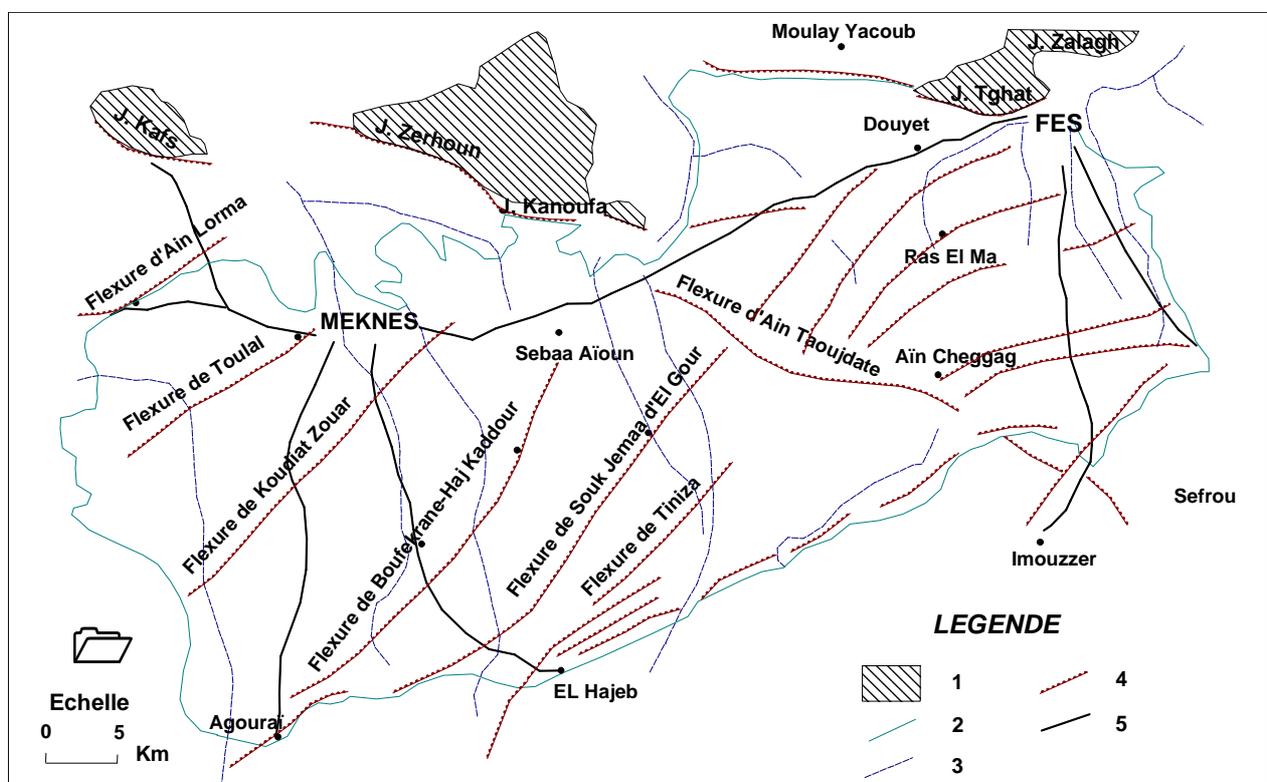


Figure 5 : Traits majeurs de la structure du Saïs (Fassi, 1999 redessinée)

1 : Affleurements des rides pré-rifaines. 2 : Limite approximative de la plaine du Saïs.
3 : Cours d'eau principaux. 4 : Failles ou flexures. 5 : Route principale.

a) Le plateau de Méknès

Sur le plateau de Méknès, une diminution d'altitude s'opère du Sud vers le Nord, suivant une pente avoisinant 1.5 %. Au Nord du plateau, la topographie se redresse brutalement au niveau du Jbel Zerhoun et du Jbel Kefs. La différence de pente entre le Nord et le Sud influence la morphologie des cours d'eau et la vitesse de circulation des eaux. Ainsi, au Sud et à partir des Causse d'Agourai et d'El Hajeb, les vallées sont peu profondes et l'écoulement est superficiel et lent. Au Nord, les cours d'eau érodent et entaillent profondément les terrains du plateau.

Morphologiquement, le plateau de Méknès est accidenté par 6 flexures de direction moyenne NE-SW à NNE-SSW engendrant une structuration topographique en paliers basculés avec un regard des flexures vers le N-W (Fig. 5) :

- Flexure d'Aïn Lorma
- Flexure de Toulal
- Flexure de Koudiat Zouar
- Flexure de Boufekrane-Haj Kaddour
- Flexure de Souk Jemaa
- Flexure de Tiniza

Ces flexures du plateau de Méknès représentent une continuité septentrionale des grands linéaments structuraux qui caractérisent le massif paléozoïque central. C'est une continuité qui s'opère à différentes échelles : sur les cartes topographiques et géologiques ainsi que sur les photographies aériennes et satellitaires.

b) La plaine de Fès

L'altitude de la plaine décroît également du Sud au Nord. Comme le plateau de Méknès, la plaine de Saïs se redresse brutalement au contact des rides pré-rifaines (Jbel Zalagh). Dans la plaine de Fès, la pente des cours d'eau est nettement plus faible que sur le plateau de Méknès. De ce fait, ils sont peu encaissés et par endroit stagnants, engendrant des zones mal drainées marécageuses : c'est le cas de l'étang de Douyet situé à l'Ouest de la ville de Fès. Un certain nombre de Flexures et d'accidents topographiques apparaissent au niveau de la plaine. Ils sont d'orientation moyenne NE-SW à ENE-WSW (Fig. 5). L'accident de Ras El Ma étant le plus important.

CHAPITRE 3 – CONTEXTE CLIMATIQUE

3.1 – Le réseau des stations d'observation

Cinq stations météorologiques couvrant l'aire d'étude ont été retenues pour caractériser le climat de la région d'étude. Le choix de ces stations s'est imposé de lui-même, puisque ce sont des stations principales qui disposent d'une longue et d'une complète série d'observations. Trois stations sont situées au sud au niveau du Causse, alors que les deux autres sont localisées plus au nord au niveau de la plaine (Fig. 6). Les coordonnées et les paramètres moyens annuels de ces stations sont résumés ci-dessous (tabl. 2).

Stations	Altitude	Latitude Nord	Longitude Ouest	Pluie moyenne 1934-2001	Température moy. 1933/63
Ifrane	1635	33°31'	5°07'	984	10.9
Imouzzer	1348	33°44'	5°01'	634	12.8
El Hajeb	1050	33°41'	5°22'	612	15.2
Bittit	760	33°47'	5°11'	488	-
Méknès	550	33°53'	5°32'	559	17.3

Tableau 2 : Coordonnées et données moyennes des stations météorologiques

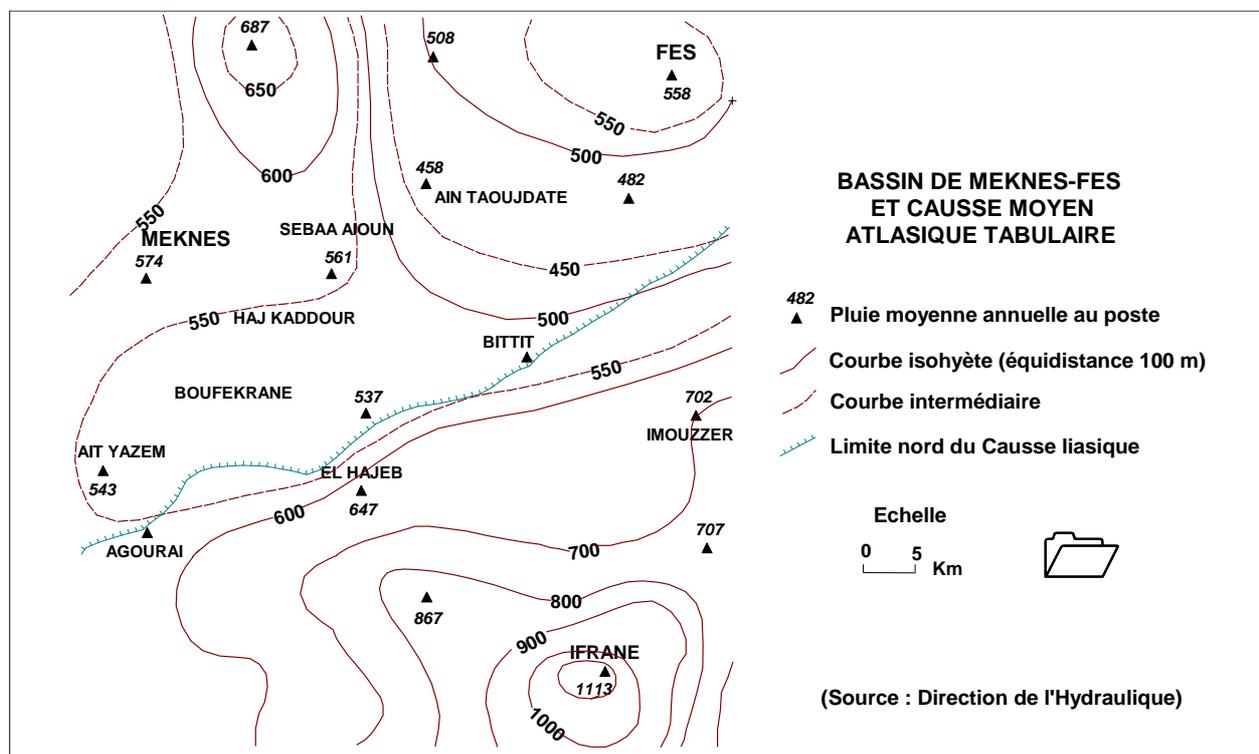


Figure 6 : Esquisse des isohyètes de la région Méknès-Fès-Ifrane (1932/89)

3.2 - Les variations de la pluviométrie dans le temps

a) Variations Saisonnières

Pour les cinq stations le régime des précipitations est du type méditerranéen. L'évolution des pluies mensuelles moyennes entre les stations est comparable. La période humide dure du mois d'octobre au mois de mai, alors que la période sèche s'étale du mois de juin au mois de septembre (Fig. 7).

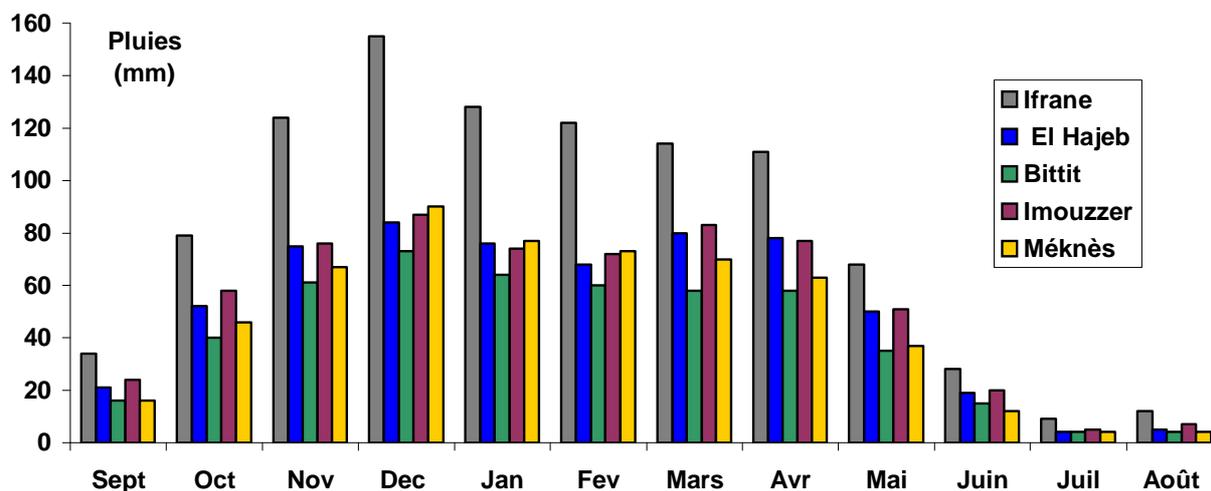


Figure 7 : Pluies mensuelles moyennes (1934/2001)

Le mois de décembre est en général le plus arrosé, alors que les mois de juillet et août sont les plus secs, mais avec des averses orageuses très concentrées et brutales pouvant déclencher un écoulement même dans les vallées sèches. Le mois de mars constitue souvent un maximum secondaire. Le tableau 3 regroupe les données moyennes de pluies au niveau des cinq postes pour la période 1934 - 2001 :

Station	Jan	Fev	Mar	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
Ifrane	128	122	114	111	68	28	9	12	34	79	124	155	984
Imouzzer	74	72	83	77	51	20	5	7	24	58	76	87	634
El Hajeb	76	68	80	78	50	19	4	5	21	52	75	84	612
Bittit	64	60	58	58	35	15	4	4	16	40	61	73	488
Méknès	77	73	70	63	37	12	4	4	16	46	67	90	559

Tableau 3 : Pluies mensuelles moyennes (1934-2001)

Sur les Causses, les précipitations neigeuses peuvent apparaître dès le mois d'octobre au dessus de 2000 m d'altitude. Au niveau de la ville d'Ifrane la neige apparaît à partir du début décembre et la ville connaît un enneigement moyen de 45 jours avec des extrêmes allant de 20 jours à plus de 2 mois. Le Causse d'Imouzzer par contre peut être considéré comme une zone à enneigement modéré et la ville d'El Hajeb enregistre 4 jours de neige en moyenne.

b) Variations inter-annuelles

Les 68 années de suivi de la pluviométrie au niveau des cinq stations montrent que le régime pluriannuel est très irrégulier, avec un coefficient de variation variant de 23 à 29 %. La figure 8 montre la bonne corrélation des pluies entre les cinq stations, ainsi que l'extrême variabilité des hauteurs des précipitations d'une année à l'autre. Le tableau 4 récapitule ces données :

Station	Ifrane	El Hajeb	Bittit	Imouzzer	Méknès
Pluie moyenne	984	612	488	634	559
Ecart type	271	173	142	148	145
Coefficient de variation %	27.5	28.3	29.1	23.3	25.9

Tableau 4 : Variations pluviométriques annuelles (1934-2001)

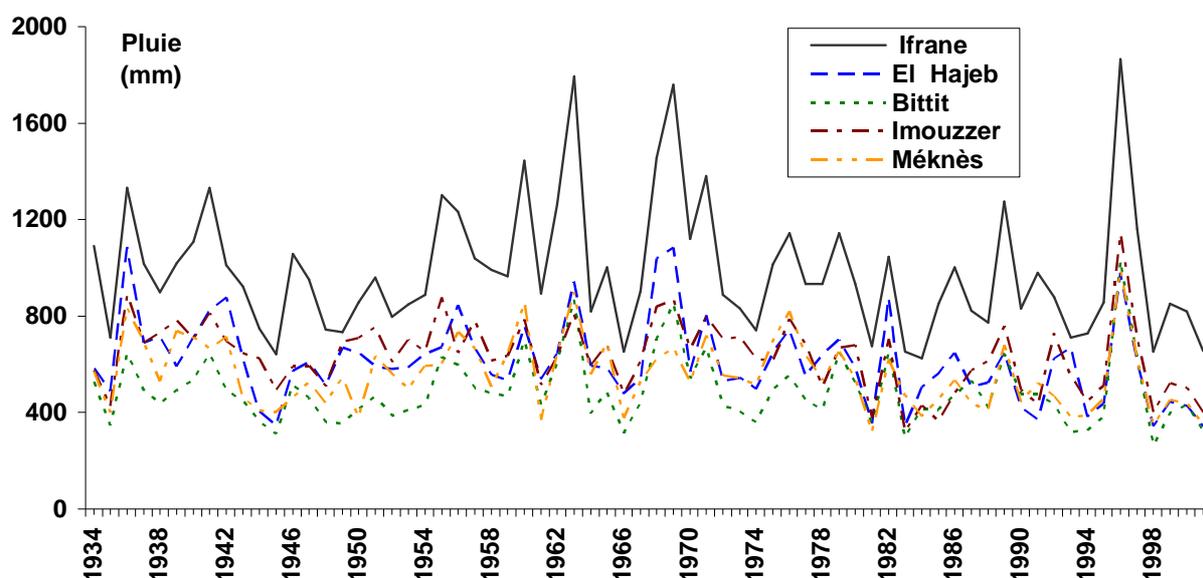


Figure 8 : Pluies interannuelles des cinq stations d'étude (1934 – 2001)

La figure 9 représente les écarts pluviométriques par rapport à la pluie moyenne annuelle à El Hajeb. Elle confirme l'irrégularité des pluies et met en évidence une diminution importante des apports depuis 1981. En effet, ce graphique montre qu'avant les années 80, les années déficitaires étaient peu marquées (sauf les années 1944 et 1945), par contre les années excédentaires étaient très fréquentes. Durant les deux dernières décennies, les années de sécheresse sont devenues récurrentes et seules les années 1982 et 1996 se démarquent par des pluies exceptionnelles. Le déficit cumulé des pluies depuis 1981 est équivalent à : trois années moyennes pour les stations d'El Hajeb, d'Imouzzer et de Méknès, à deux années pour Ifrane et à une année pour Bittit.

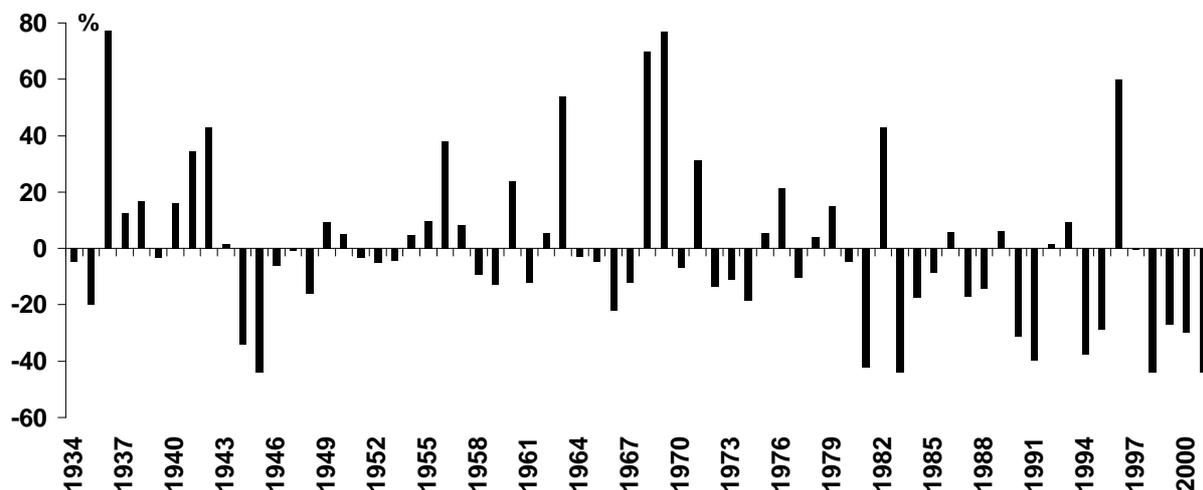


Figure 9 : Ecarts pluviométriques par rapport à la moyenne à El Hajeb (1934/01)

Depuis 1934, sept années marquent un excédent supérieur à 40 % par rapport à la moyenne, il s'agit par ordre croissant d'importance des années : 1942 et 1982 (43 %), 1963 (54 %), 1996 (60 %), 1968 (70 %) et 1969 (77 %). Par contre, six années ont été remarquablement sèches, enregistrant un déficit de plus de 40 % par rapport à la moyenne, il s'agit des années : 1945, 1981, 1983, 1991, 1998 et 2001.

La figure 10 illustrant les courbes des pluies classées des stations depuis le piémont du Causse (Bittit) jusqu'au sommet (Ifrane), montre que plus la station est située en altitude plus la dispersion des valeurs des précipitations annuelles est grande et donc que le régime des pluies est irrégulier.

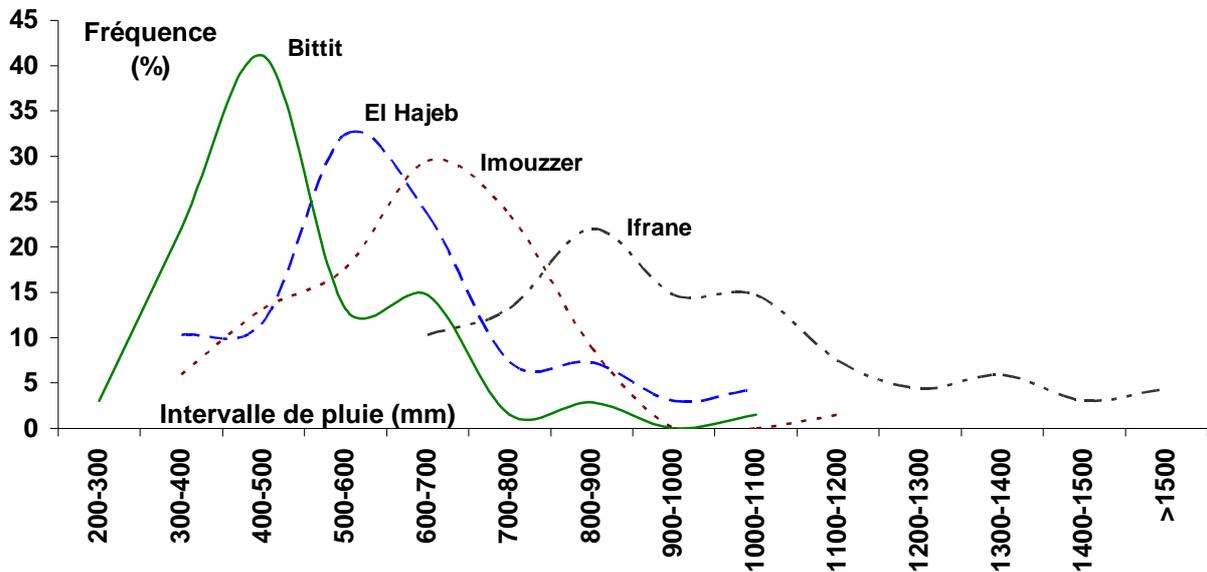


Figure 10 : Distribution de fréquence des pluies annuelles (1934 - 2001)

3.3 – Variations de la température dans le temps

La figure 11 représente les données de températures minimales, moyennes et maximales des quatre stations d'étude (tableau en annexe). Il en ressort que le mois de janvier est le plus froid, alors que les mois de juillet et août sont les plus chauds.

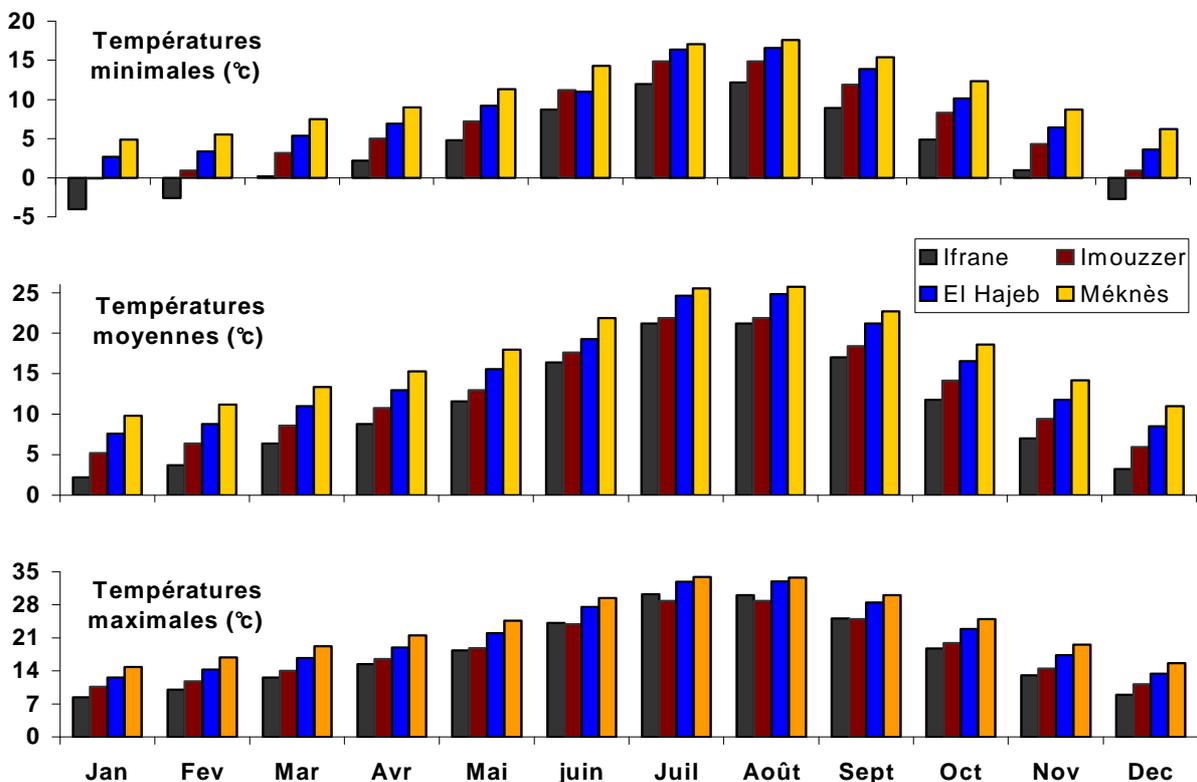


Figure 11 : Températures minimales, moyennes et maximales (1933 - 1963)

A Ifrane, la température annuelle moyenne est de 10.9 °c. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 17.9 °c et minimale moyenne de 3.8 °c. Les températures extrêmes peuvent atteindre 30.3 °c et -2.7 °c. Le gel est assez fréquent durant la période allant du mois de décembre au mois de février.

A Imouzzer, la température annuelle moyenne est de 12.8 °c. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 18.7 °c et minimale moyenne de 6.9 °c. Les températures extrêmes peuvent atteindre 28.9 °c et - 0,1 °c. Le gel est peu fréquent et peut avoir lieu au cours du mois de janvier.

A El Hajeb, la température annuelle moyenne est de 15.2 °c. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 21.7 °c et minimale moyenne de 8.8 °c. Les températures extrêmes peuvent atteindre 33 °c et 2.7 °c. Le gel reste un phénomène exceptionnel.

A Méknès, la température annuelle moyenne est de 17.3 °c. Elle se situe entre une valeur maximale moyenne de 23.7 °c et minimale moyenne de 10.8 °c. Les températures extrêmes peuvent atteindre 33.9 °c et 4.9 °c.

3.4 – Diagrammes ombrothermiques

La figure 12 montre les diagrammes ombrothermiques de quatre stations couvrant la zone d'étude. Il en ressort que la période sèche est de plus en plus importante en descendant vers la plaine. Elle couvre la période de juin à septembre à Ifrane, pour se rallonger d'avril à octobre à Méknès.

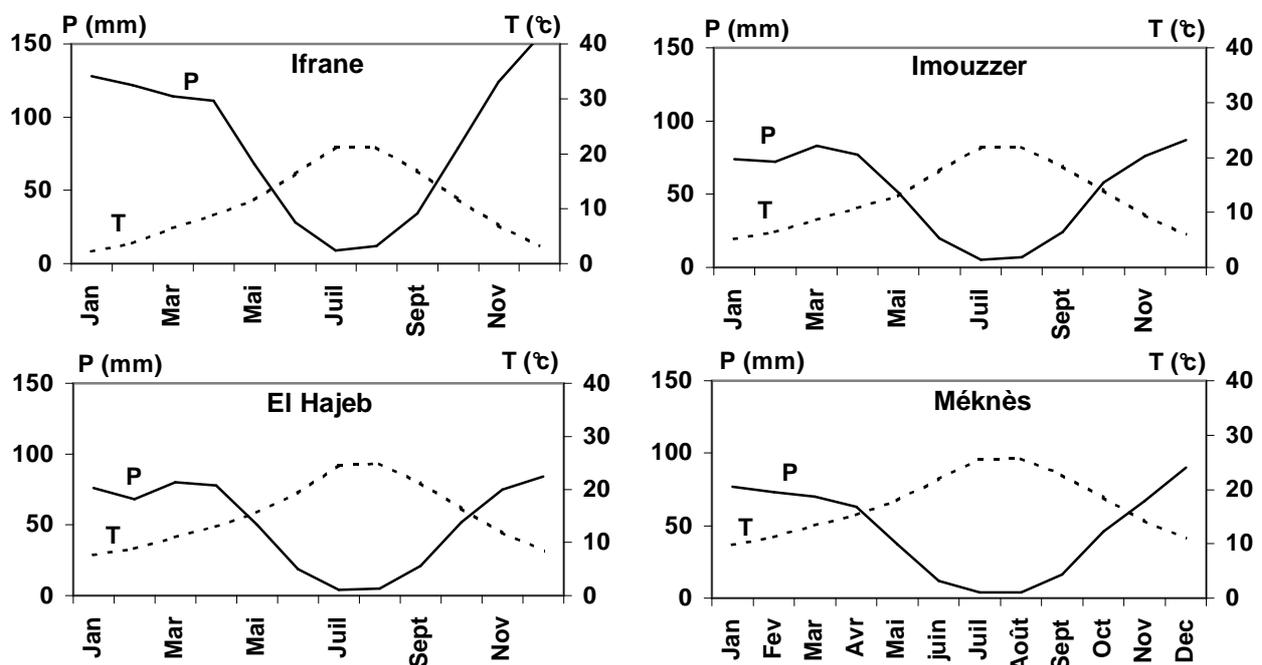


Figure 12 : Diagrammes ombrothermiques des stations d'étude (1934/2001)

Les systèmes karstiques étudiés sont soumis à un climat de montagne et leur alimentation se fait de façon prépondérante par les précipitations. La température joue un rôle capital dans la capacité que peuvent avoir ces précipitations à fournir l'eau au karst. La participation d'une précipitation donnée peut en effet être :

* soit retardée lorsque, en saison de basses températures, elle se produit sous forme de neige. Ce retard d'alimentation du karst sera d'autant plus lent que les températures basses persisteront, ce qui est fréquent durant la saison froide ;

* soit réduite, voire même annulée, lorsqu'en saison chaude les températures élevées favorisent l'évapotranspiration.

3.5 – L'évapotranspiration

Tous les calculs de l'évapotranspiration qui suivront sont basés sur les données de température relatives à la période 1933-63.

a) Evapotranspiration potentielle (ETP)

Son estimation mensuelle a été faite par la formule empirique de Thornthwaite (détails en annexe 1). Le tableau 5 regroupe les résultats obtenus :

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Ifrane	6	11	26	40	60	92	126	119	82	50	24	9	646
Imouzzer	14	17	31	44	62	93	127	120	85	56	30	16	695
El Hajeb	17	20	35	48	69	98	145	139	97	62	33	19	782
Méknès	20	24	40	54	79	114	152	146	104	69	38	24	865

Tableau 5 : Calculs de l'évapotranspiration potentielle

b) Evapotranspiration réelle (ETR)

Son évaluation a été faite à l'échelle annuelle par les formules de Turc et de Coutagne, et à l'échelle mensuelle par le bilan hydrique de Thornthwaite (détails en annexe). Les résultats des calculs Figurent dans le tableau 6.

3.6 – L'infiltration efficace

Sur le Causse, le ruissellement peut être considéré comme négligeable en raison de l'affleurement des terrains carbonatés fracturés qui favorisent l'infiltration, et du faible développement du réseau hydrographique, dont l'écoulement est le plus souvent temporaire. Dans ce cas, l'infiltration des eaux est obtenue par la formule : $I = P - ETR$. Le tableau 6 récapitule les résultats de l'ETR obtenus par les différentes méthodes ainsi que les lames d'eau infiltrées et les infiltrations efficaces correspondantes pour les quatre stations d'étude :

Station	Turc			Coutagne			Thornthwaite		
	ETR (mm)	Lame _{inf} (mm)	I _{efficace} (%)	ETR (mm)	Lame _{inf} (mm)	I _{efficace} (%)	ETR (mm)	Lame _{inf} (mm)	I _{efficace} (%)
Ifrane	543	441	44.8	568	416	42.3	409	575	58.4
Imouzzer	491	143	22.5	479	155	24.5	415	219	34.5
El Hajeb	515	97	15.8	484	128	20.9	423	189	30.9
Méknès	508	51	9.1	462	97	17.4	419	140	25

Tableau 6 : Résultats des calculs des ETR, des lames d'eau infiltrées et de l'infiltration efficace

On remarque une certaine dispersion des valeurs calculées suivant la méthode utilisée. Pour une même pluie annuelle, l'infiltration efficace est plus importante si elle est déduite des calculs par le bilan hydrique de Thornthwaite que par les formules de Turc ou de Coutagne qui fournissent elles des résultats comparables. On note également que l'infiltration efficace est forte à Ifrane atteignant 58 % de la pluie, ce qui est excessif par rapport aux coefficients habituels dans de tels contextes qui varient généralement entre 30 et 40 % de la pluie (Bouchaou, 1995 ; Benjbara et al., 1989).

La méthode du bilan hydrique est certainement plus fiable que celles de Turc ou de Coutagne puisqu'on travaille à une échelle mensuelle, permettant de tenir compte de la répartition des pluies et des températures au cours de l'année.

La figure 13 montre la relation qui semble exister entre l'infiltration efficace et l'altitude. Si on admet que l'altitude moyenne sur le Causse est de 1350 m, on en déduit une infiltration moyenne de l'ordre de 40 %. Cette valeur estimée est assez proche de celle adoptée lors de l'établissement du modèle global à réservoirs portant sur le Causse moyen atlasique (Benjbara et al., 1989), l'infiltration efficace adoptée était de 32 %.

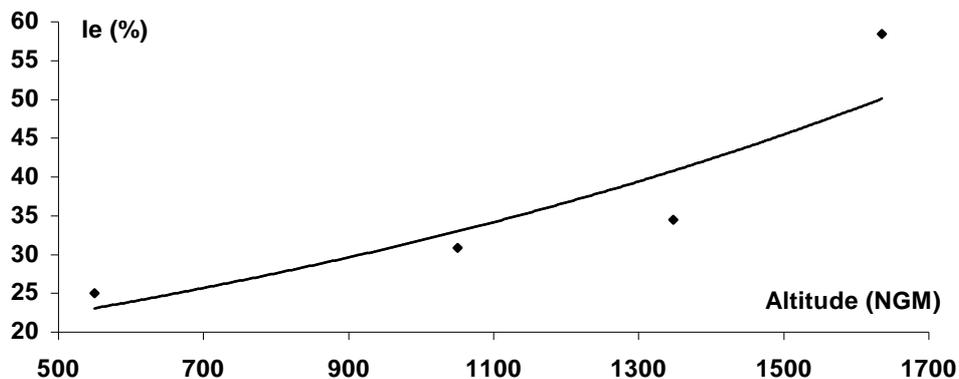


Figure 13 : Variation de l'infiltration efficace avec l'altitude

3.7 - Vents

Pour l'ensemble du bassin du Sebou, les vents dominants en hiver sont de secteur ouest. Généralement humides, ils apportent les précipitations. La fréquence de ces vents, maximale en hiver, de novembre à avril, est faible ou nulle en été. Par contre les vents du secteur est (Sirocco, Chergui) ont leur fréquence maximale en été (juillet). Ces vents sont chauds et secs. Ils contribuent à la sécheresse relative qui sévit de mai à septembre. En hiver, ces régimes d'est sont froids et secs mais beaucoup moins fréquents qu'en été.

CHAPITRE 4 – HYDROLOGIE DE SURFACE

4.1 – Données générales

Du fait de la nature karstique du Moyen Atlas tabulaire, le réseau hydrographique est peu développé. La figure 14 regroupe les principaux cours d'eau de la région d'étude qui sont le plus souvent à régime temporaire. Ces oueds prennent naissance soit au niveau du Causse (l'oued Tizguit en particulier), soit à partir d'émergences situées en bordure du Causse. La direction principale d'écoulement de l'eau dans ces cours d'eau est de SSE vers le NNW et la pente moyenne est de 2 à 3 % en général.

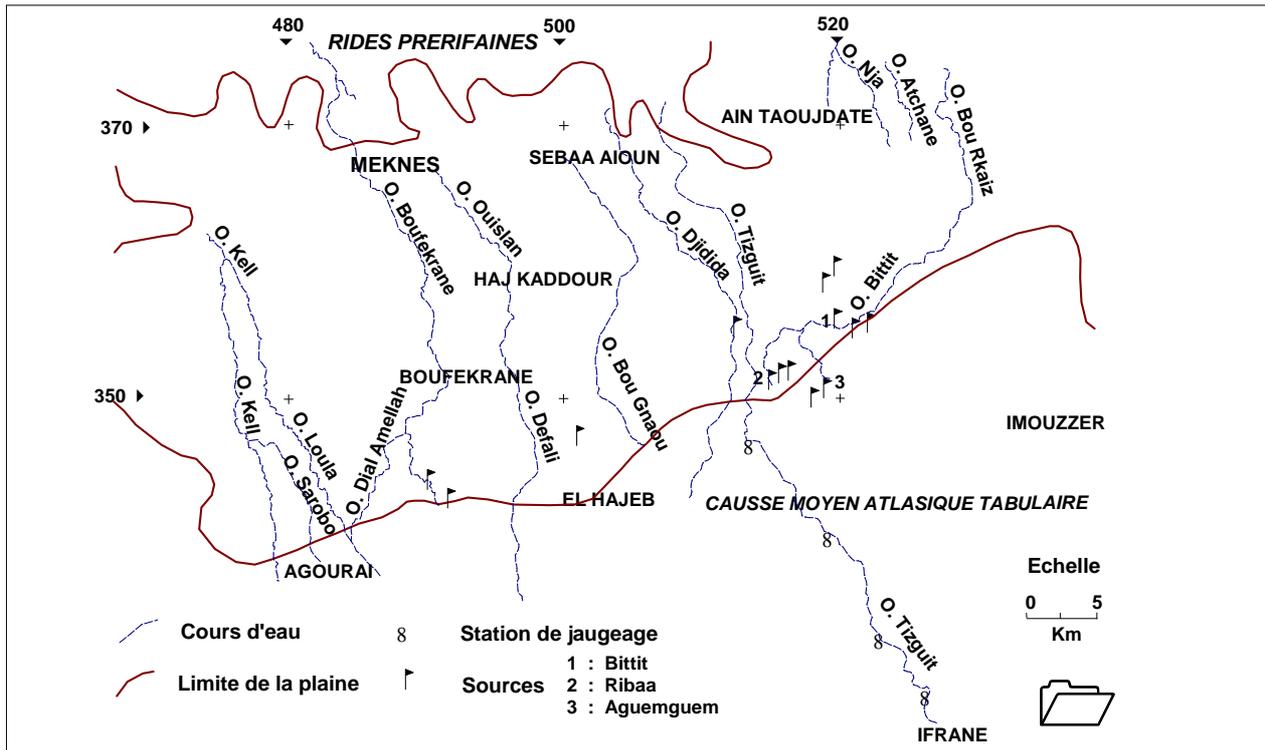


Figure 14 : Carte du réseau hydrographique du bassin du Saïs

Les cours d'eau sont très encaissés sur le plateau de Méknès (40 à 100 m au dessous de la surface structurale) ce qui explique l'apparition de nombreuses petites sources en bordure des vallées. L'importance et la période de l'écoulement sont tributaires des précipitations et des débits des sources. Les débits moyens de ces cours d'eau en dehors des crues exceptionnelles sont de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de l/s. On peut distinguer pour ces oueds :

- Un cours amont situé dans le Moyen Atlas et le plateau de Méknès où l'infiltration dans les calcaires karstiques du Lias ou du Pliocène prédomine très largement sur le ruissellement superficiel. Le tracé du réseau hydrologique dans ces secteurs est d'ailleurs rudimentaire et il existe de nombreuses zones endoréiques ;
- Un cours en aval de la plaine de Méknès dans les formations marneuses du tertiaire où le ruissellement superficiel prédomine très largement sur l'infiltration.

4.2 – Pertes de l’oued Tizguit

L’hydrologie de l’oued Tizguit qui prend naissance en amont de la ville d’Ifrane est importante à étudier, car le long de son trajet dans le Causse carbonaté, ce cours d’eau perd une grande partie de son débit et constitue certainement une des formes d’alimentation des émergences karstiques du complexe Ribaa-Bittit situé à moins de 18 km au Nord.

De part leurs situations, la source Aguemguem (altitude 908 m) et ses exutoires de trop plein (Ain Aari) seraient les premiers concernés par cette alimentation. La comparaison des hydrogrammes de l’oued Tizguit et des sources de l’oued Aguemguem est très significative à ce sujet (Fig. 15).

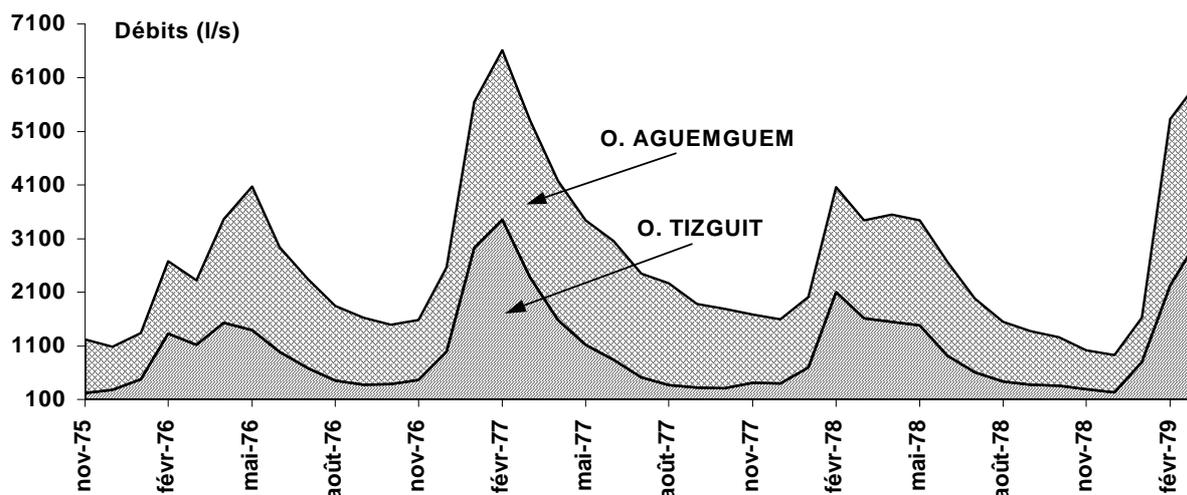


Figure 15 : Relation entre l'oued Tizguit et l'oued Aguemguem (11/1975 au 03/1979)

Des jaugeages différentiels sur l’oued Tizguit dans le Causse et à son débouché dans la plaine de Méknès ont eu lieu au niveau de 4 sections de mesure entre août 1977 et septembre 1978 (Normand, 1984). Les coordonnées des points de mesures disposés d’amont en aval sont reportées dans le tableau suivant (Tabl. 7 et Fig. 14) :

Section de mesure	N° Section	X	Y	Z
Entre Ain Vittel et l’O. Zerrouka	1	526.5	327.8	1540
Sidi Brahim	2	523	332.5	1426
Sidi Mokhfi	3	519.25	340.2	1225
Ahmarer	4	514.25	351	879

Tableau 7 : Coordonnées des stations de jaugeage de l’oued Tizguit

La figure 16 montre l’importance des débits mesurés sur l’oued Tizguit durant un cycle hydrologique (08/77 à 09/78) au niveau des quatre points de jaugeage. On peut relever les caractéristiques suivantes :

- L’oued est pérenne à l’amont au niveau des sections 1 et 2, et il est temporaire à l’aval au niveau des sections 3 et 4 ;
- Le débit à l’amont varie entre un minimum de 281 l/s au mois d’octobre à un maximum de 1736 l/s au mois de mai. La période des hautes eaux s’étale de la fin du mois de janvier à la fin du mois de juin ;

- Au niveau de la section 3, l'écoulement n'est significatif qu'entre les mois de janvier à mai. Alors qu'au débouché de l'oued dans la plaine, la période d'écoulement se réduit aux mois de mars à mai.

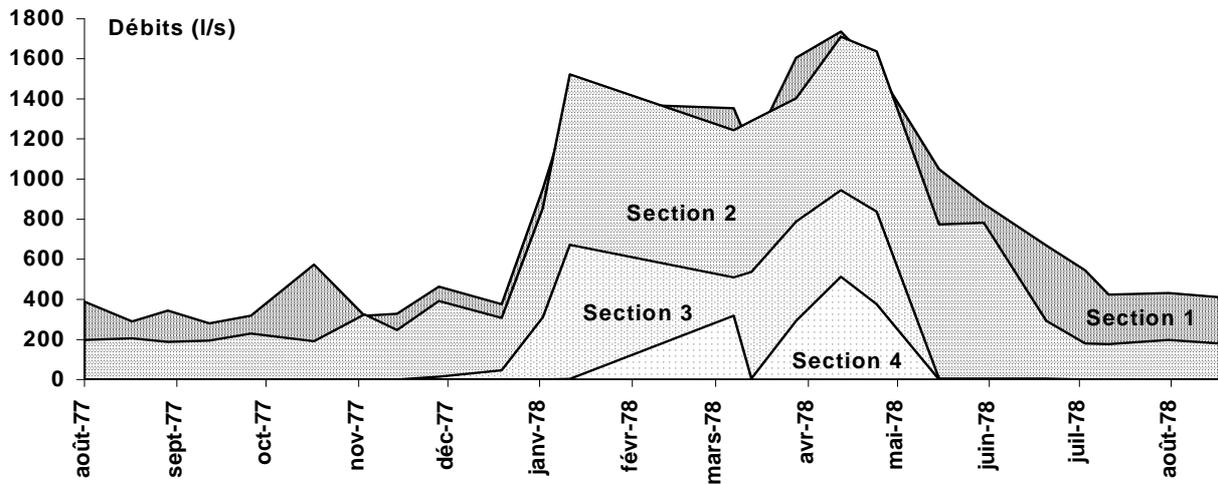


Figure 16 : Jaugeages différentiels sur l'oued Tizguit (08/1977 au 09/1978)

La figure 17 montre les pertes en % que subit l'oued Tizguit le long de son trajet dans le Causse entre les stations de jaugeages successives. Ceci nous permet d'avancer les remarques suivantes :

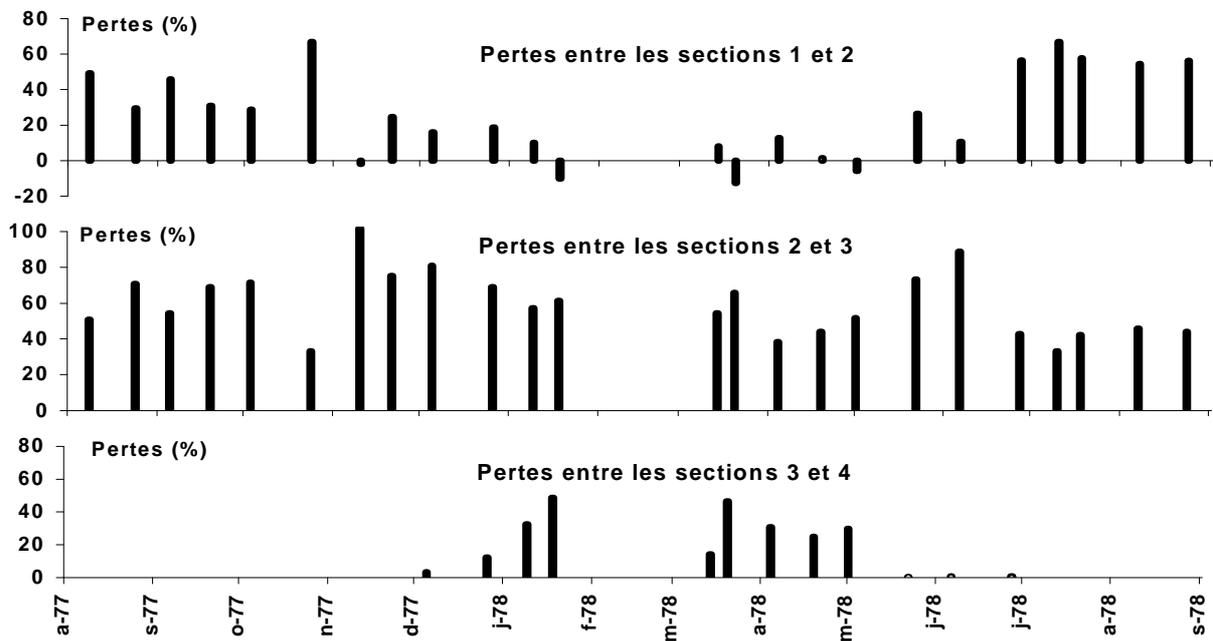


Figure 17 : Pertes entre les stations le long de l'oued Tizguit (08/1977 au 09/1978)

- Du mois de novembre au mois de juin, les pertes sont minimales entre les sections 1 et 2, et atteignent au maximum 26 % du débit à l'amont. On peut même avoir parfois un surplus de débit à l'aval, dû probablement à l'apport des petits affluents de l'oued en période d'averses. Durant la même période, le tronçon entre les stations 2 et 3 fait l'objet d'infiltrations importantes variant généralement de 40 à 100 % du débit initial à l'amont ;

- Le tronçon entre les stations 3 et 4 peut enregistrer également des pertes durant la période allant du mois de janvier au mois de mai, avec un taux qui peut atteindre 49 % du débit initial à l'amont ;
- Durant la période des basses eaux (juillet jusqu'à novembre), les pertes se limitent aux deux tronçons S1-S2 et S2-S3. Plus le débit est faible, plus les pertes intéressent des secteurs situés plus en altitude ;
- Les pertes entre deux sections de mesures consécutives sont dues, pour une faible part aux dérivations alimentant des seguias d'irrigation et pour l'essentiel aux pertes dans les calcaires karstiques caractérisés par une forte porosité de fractures.

Nous disposons d'un suivi des débits moyens mensuels de l'oued Tizguit entre novembre 1975 et mars 1979 (DRPE, 1989) et ceci au niveau de deux sections majeures : la première à l'amont au niveau de la confluence oued Tizguit – oued Zerrouka (section 1) et la seconde à l'aval au niveau de la station d'Ahmarer (section 4). La différence entre le débit à l'amont et à l'aval correspond à la perte de l'oued dans les formations karstiques le long du parcours.

La figure 18 illustre les variations des débits mensuels moyens de l'oued durant plus de trois cycles hydrologiques, ainsi que les pertes enregistrées entre les deux points de mesure. Il en ressort que les débits ainsi que les pertes marquent une évolution cyclique d'une année à l'autre, avec un maximum d'écoulement du mois de février au mois de mars et un minimum du mois d'août au mois de novembre.

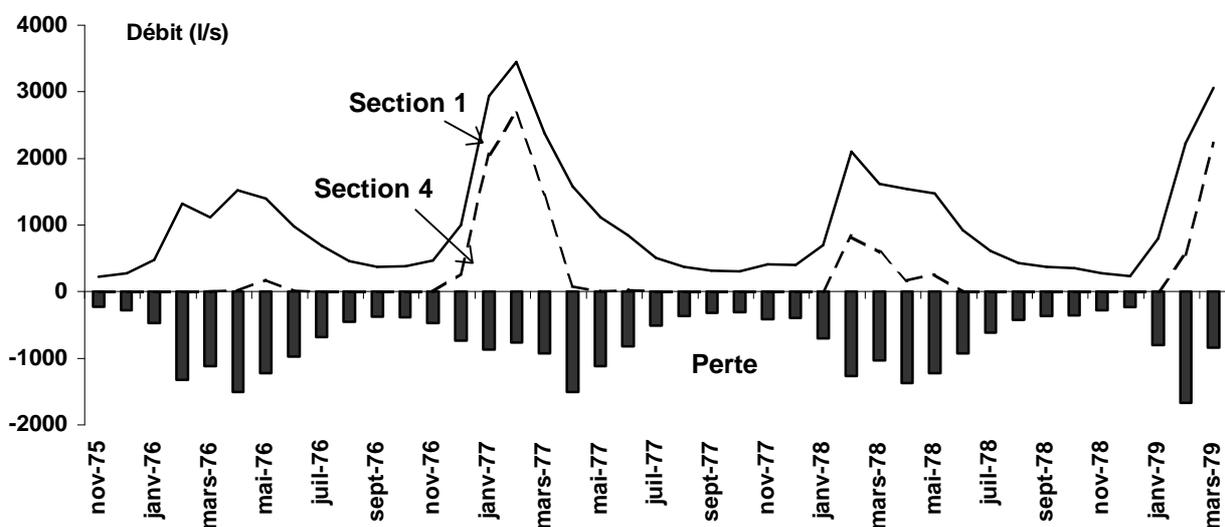


Figure 18 : Débits et pertes mensuels de l'oued Tizguit (11/1975 au 03/1979)

CHAPITRE 5 – LES ACTIVITES HUMAINES

Les deux villes de Méknès et de Fès constituent les deux principales villes du bassin du Saïs. Elles jouent un rôle déterminant dans le développement du pays. Leurs situations au carrefour des principaux flux migratoires entre le nord et le sud et entre l'est et l'ouest du pays, leur confèrent une véritable plaque tournante au centre de l'activité économique et industrielle du Maroc. Ces deux villes sont considérées au premier rang des grandes agglomérations du pays par les potentialités économiques (agriculture, artisanat, tourisme et commerce) dont elles disposent. L'agriculture constitue la plus grande richesse de la région. Les principales cultures pratiquées sont : la viticulture, l'arboriculture, la céréaliculture et les légumineuses, tandis que l'élevage occupe une place modeste. L'artisanat garde une activité importante dans les principaux centres. Des industries de textiles, matériaux de construction et les industries agro-alimentaires se sont développées dans ces villes.

Sur le Causse, l'agriculture est très peu développée. On y relève quelques cultures de céréales qui couvrent certaines dépressions où se sont accumulés des limons. La population rurale du moyen Atlas pratique l'élevage de bétail. A l'origine, elle était composée en grande partie de tribus nomades. L'équipement progressif de cette région en eau potable, en électricité et en routes a favorisé l'installation de cette population qui contribue à l'activité économique dont le tourisme de montagne constitue un fort potentiel. La population des centres urbains du Causse quant à elle pratique principalement, le commerce, l'artisanat et les activités administratives. La ville d'Ifrane est de loin le centre le plus important du Causse. Elle a connu un fort développement grâce à l'ouverture de l'Université anglophone d'Al Akhawayn.

La population générale de la région d'étude avoisinait les 2 millions d'habitants en 2004 (Tab. 8). Les deux grandes villes de la plaine dominent par le nombre important de leur population (980 000 habitants pour Fès et 714 000 habitants pour Méknès), dont 90 % de population urbaine. En revanche, sur le Causse la population est moins abondante et elle est à 54 % rurale. Le taux d'accroissement moyen de la population enregistré entre 1994 et 2004 est de 2 % par an. En appliquant ce taux, la population de la région devrait atteindre 2 millions et demi d'habitants en 2014.

Province ou préfecture	Total	Population urbaine	%	Population rurale	%	Taux 1994-2004
Fès	977 946	955 188	97.7	22 758	2.3	2.1 %
Méknès	713 609	570 991	80	142 618	20	1.6 %
El Hajeb	216 388	92 344	42.7	124 044	57.3	1.8 %
Ifrane	143 380	73 782	51.5	69 598	48.5	1.2 %
Total	2 051 323	1 692 305	82.5	359 018	17.5	2 %

Tableau 8 : Recensement général de la population de 2004

SYNTHESE DE LA PREMIERE PARTIE

Sur le **plan topographique** le secteur d'étude d'une superficie de l'ordre de 6000 km² distingue deux domaines différents :

- Un premier domaine situé au nord, correspondant à la plaine du Saïs. On y observe une diminution modérée d'altitude du sud vers le nord (750 à 400 m NGM), puis un redressement au contact des rides pré-rifaines. La flexure d'Aïn Taoujdate scinde la plaine en deux parties structurales : le plateau de Méknès et la plaine de Fès ;
- Un second domaine montagneux au sud appartenant au Moyen Atlas tabulaire. Au niveau de ce Causse, les altitudes varient de 1800 à 1000 m NGM entre les villes d'Ifrane et d'El Hajeb.

Sur le **plan géomorphologique**, le Causse est constitué de roches dolomitiques et calcaires du Lias voilées, par endroits, par des épanchements volcaniques récents. Il se caractérise par une structure tabulaire, plus faillée que plissée et par un relief monotone. Il s'agit de vastes plateaux karstiques diversement étagés, qui surplombent la plaine environnante du Saïs. Les systèmes de failles créent des cuvettes et des horsts. Les phénomènes karstiques sont mal développés. La morphologie de la plaine du Saïs quant à elle est affectée par un certain nombre de flexures qui engendrent une structuration topographique en paliers basculés avec un regard le plus souvent N-W.

L'analyse des paramètres **climatiques et hydrologiques** a permis de caractériser le climat de la région d'étude avec ses variations spatiales et temporelles. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- Le régime des précipitations est de type méditerranéen. Il pleut abondamment sur le Causse (600 à 1000 mm selon l'altitude), et modérément sur la plaine (490 à 560 mm). Les pluies sont très irrégulières d'une année à l'autre et une diminution importante des apports a été mise en évidence depuis 1981.
- Les températures moyennes annuelles varient en fonction de l'altitude. Elles marquent 10.9 °c à Ifrane et 17.3 °c à Méknès. Les températures extrêmes varient de - 2.7 °c à Ifrane à 34 °c à Méknès. L'amplitude de variation entre les températures maximales et minimales moyennes varie de 9.5 °c à Méknès à 18 °c à Ifrane.
- L'ETR calculée par le bilan hydrique de Thornthwaite représente entre 42 et 75 % de la pluie respectivement à Ifrane et à Méknès. La pluie efficace moyenne sur le Causse a été estimée à un taux de 40 %.
- Le réseau hydrographique est peu développé sur le Causse. Les principaux cours d'eau sont à régime temporaire. Le long de son trajet dans le Causse carbonaté, l'oued Tizguit perd une grande partie de son débit et constitue certainement une des formes d'alimentation des émergences karstiques du complexe Ribaa-Bittit.

La **population** de la région d'étude atteint les 2 millions d'habitants. La présence des deux grandes villes de Méknès et de Fès fait que 82 % de la population totale est urbaine. Les potentialités économiques de la région sont importantes : l'agriculture constitue la plus grande richesse de la plaine, alors que l'élevage de bétail et le tourisme constituent les activités économiques du Causse.

DEUXIEME PARTIE :

GEOLOGIE ET GEOPHYSIQUE

CHAPITRE 1 - CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

CHAPITRE 2 – LITHOSTRATIGRAPHIE

CHAPITRE 3 – ETUDE STRUCTURALE

CHAPITRE 4 – SYNTHÈSE DES RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES DU BASSIN DU SAÏS

SYNTHÈSE DE LA DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE 1 : CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL

1.1 – Présentation

Le bassin de Méknès-Fès, appelé aussi bassin de Saïs, fait partie du Sillon sud-rifain (Fig. 19). Celui-ci, considéré comme un couloir ou encore détroit, correspond à une dépression allongée dans une direction sensiblement E-W. Elle s'étend à l'Ouest, jusqu'à l'Atlantique et à l'Est, jusqu'à la plaine d'Oujda. A l'Ouest, elle a une forme triangulaire s'ouvrant sur l'Atlantique et commençant à se rétrécir progressivement à partir de l'Oued Beht pour s'étrangler complètement au Col de Touaher. Elle s'épanouit à nouveau en débouchant sur le bassin de Guercif. Trois domaines montagneux différents limitent le sillon sud-rifain : le domaine rifain et pré-rifain au Nord et les domaines du Moyen Atlas et du Maroc central mésétien au Sud. Ce sont les bordures de ces domaines en contact avec le sillon sud-rifain et le bassin de Saïs, qui intéressent cette présente étude.

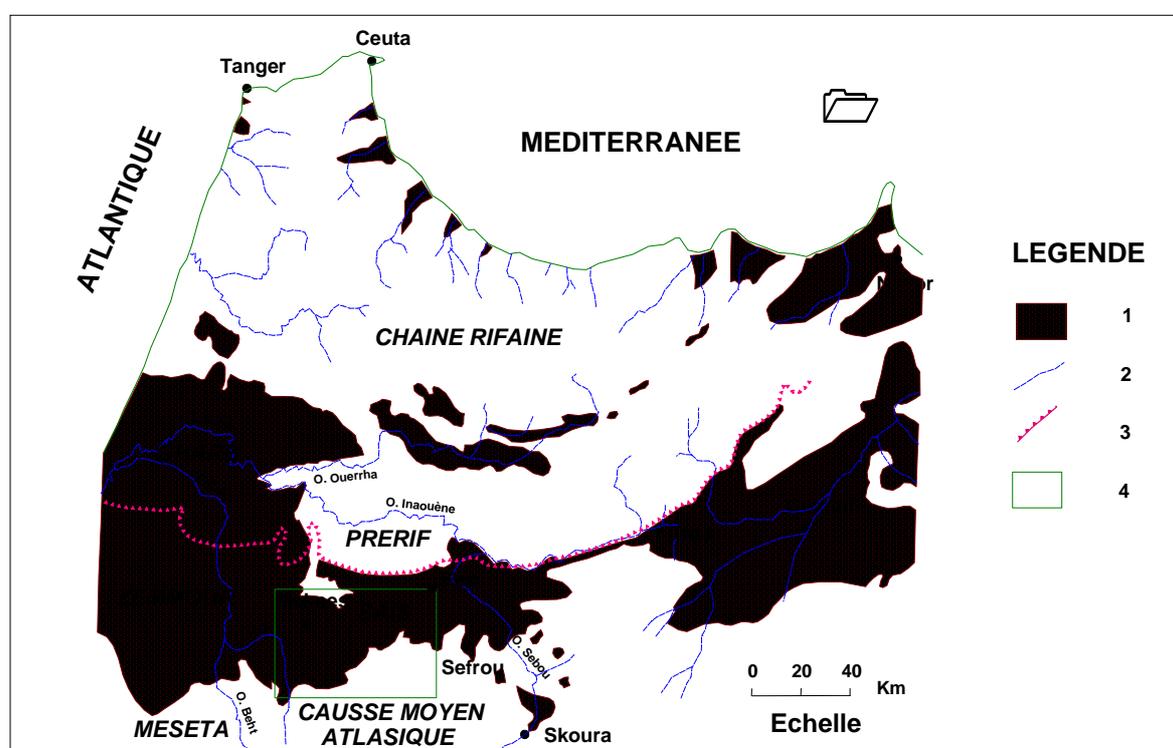


Figure 19 : Carte de la situation du Sillon sud Rifain

1 : Affleurements Mio-plio-quaternaires 2 : Cours d'eau 3 : Limite du sillon 4 : Secteur d'étude

1.1.1 - Le bassin de Saïs

Le bassin de Saïs s'étend à l'Est du seuil d'El Kansra sur 100 Km de long dans une direction E-W et 30 Km de large dans une direction N-S. Sa superficie totale est de 2100 Km². Il est considéré, dans son ensemble comme un vaste synclinal dissymétrique de direction E-W qui s'enfoncé progressivement du sud vers le nord, et se redresse brusquement au contact des rides pré-rifaines. Le remplissage est constitué, au dessus des marnes du Tortonien, par des formations détritiques et lacustres. Dans le plateau de Méknès, les calcaires du Plio-Villafranchien déterminent une surface structurale que les oueds érodent et entaillent profondément. Par contre, la plaine de Fès est en grande partie une plaine d'érosion encroûtée.

1.1.2 - La bordure nord du domaine méséto-atlasique

Cette bordure comporte à l'Ouest, une partie appartenant à la Méséta marocaine occidentale (Maroc central) et à l'Est, une partie appartenant Au Moyen Atlas :

- **La Méséta marocaine** : Elle borde le sillon sud-rifain au Sud, bordure soulignée par un "plateau central" dénommé aussi "Maroc central" hercynien dont les faciès paléozoïques sont dominés par un matériel silico-clastique : grès, pélites, flyschs, schistes et quartzites. Le matériel carbonaté, peu abondant, ne se développe qu'au Dévonien. Les grands linéaments tectoniques affectant la Méséta marocaine occidentale, accidents qui ont rejoué au Méso-cénozoïque, s'accompagnent de la mise en place de massifs granitiques intrusifs, à auréoles métamorphiques bien développées.

- **Le Moyen Atlas** : Il est formé de deux parties : la partie peu tectonisée, ou Causse moyen atlasique tabulaire, bordant le bassin de Saïs au Sud ; et le Moyen Atlas plissé à reliefs accentués qui domine les bassins orientaux du sillon sud-rifain au Sud-Est : Guercif et Oujda. Le faciès, d'âge mésozoïque, est essentiellement carbonaté : calcaires, dolomies, marnes,... Le socle paléozoïque perce localement cette couverture méso-cénozoïque comme le massif de Tazzeka. Les coulées basaltiques issues d'un volcanisme plio-quadernaire du Moyen Atlas s'épanchent jusqu'au sillon sud-rifain, comme cela est bien visible à Oued Jdida dans le bassin de Saïs.

1.1.3 - La bordure sud du domaine rifain

Elle est représentée par la zone pré-rifaine ou "Pré-rif". Cette zone, à relief peu accentué, correspond à un ensemble de collines argileuses fréquemment ravinées. La structure géologique est, dans le détail, fort complexe, structure liée à la nature charriée de son matériel d'âge et d'origine divers, d'où le nom attribué parfois à cette partie du rif de "complexe" ou de "mélange" (Vidal, 1977). Au front sud de ce domaine émergent des reliefs modelés dans des terrains d'âge jurassique. Ce sont les rides sud-rifaines. Celles-ci dominent les dépôts néogènes du bassin de Saïs, objet de notre travail, et aussi du Gharb et du complexe pré-rifain. Ces rides se sont soulevées de façon plus au moins continue depuis la fin du Miocène moyen (ou début du Miocène supérieur), jusqu'au Pliocène inférieur (Faugers, 1978). Elles ont dû jouer, au cours du Néogène, un rôle pourvoyeur de sédiments pour les bassins adjacents dont celui du Saïs.

1.2 – Cadre géologique

La figure 20 représente une carte géologique simplifiée des secteurs couvrant le bassin de Méknès-Fès et les bordures du Moyen Atlas et du Maroc central objet de notre étude. Elle a été établie d'après la carte géologique d'El Hajeb au 1/100 000 publiée en 1975 (Notes et mémoires N° 160 des éditions du service géologique du Maroc).

1.2.1 - Le bassin de Méknès-Fès

Le bassin de Méknès-Fès est un bassin néogène qui fait partie du sillon sud-rifain. Sur le plan géologique, ce sillon représente l'avant pays de la cordillère du Rif. C'est un sillon qui est aussi considéré comme type de bassin "intra-montagneux" ou "intra-chaîne" puisqu'il est également encadré au Sud par les montagnes du domaine méséto-atlasique.

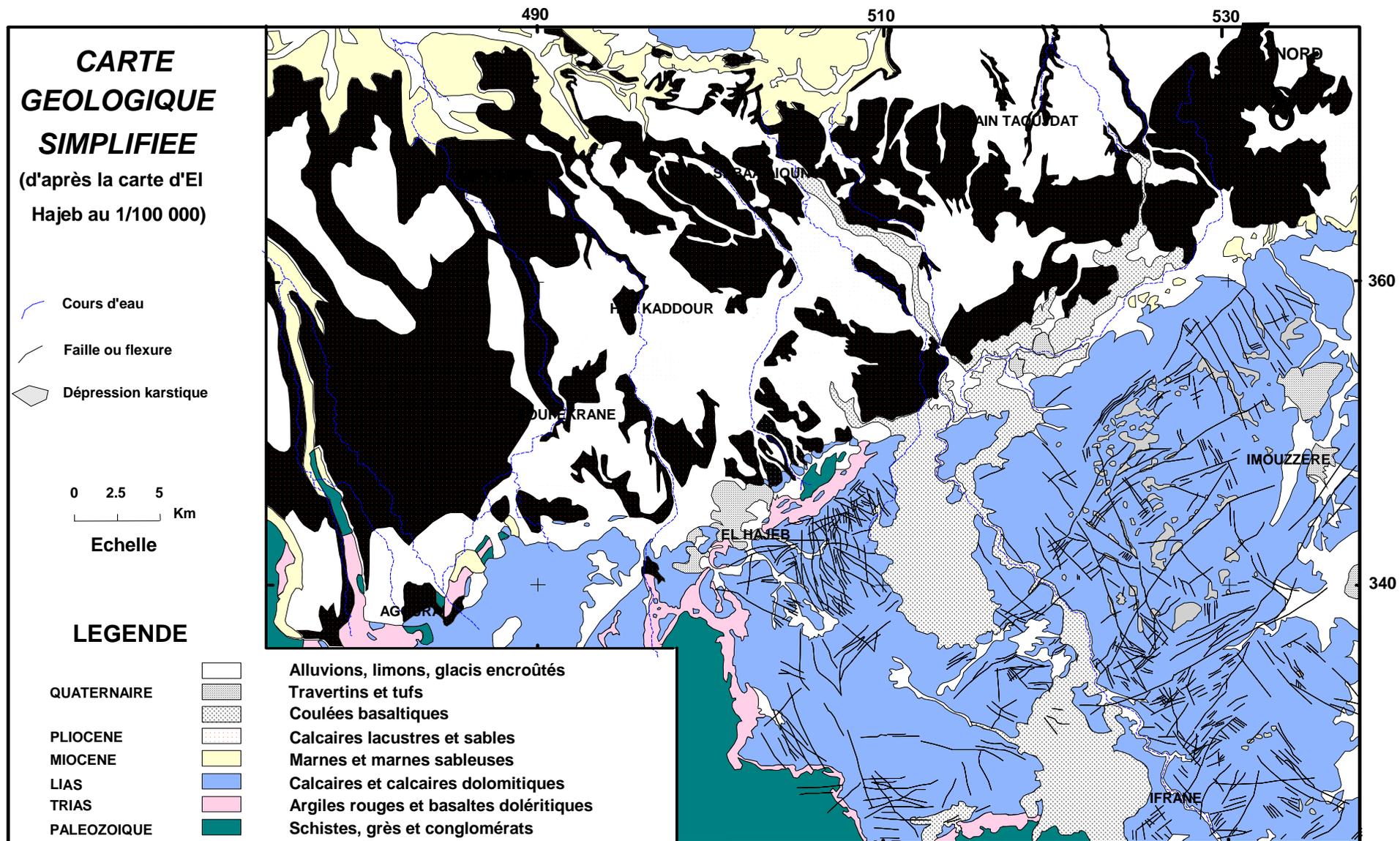


Figure 20 : Carte géologique simplifiée du bassin du Saïs et du Causse d'El Hajeb-Ifrane

D'après Cirac (1985), le sillon sud-rifain s'est individualisé au Tortonien inférieur suite à l'importante phase de distension qui a affecté l'ensemble de l'arc de Gibraltar. La distension générale des contraintes N-S serait à l'origine de l'allongement E-W de ce sillon. Le rejeu de failles bordières a entraîné par la suite l'enfoncement des bordures septentrionales de la Méséta à l'Ouest et le Moyen Atlas à l'Est.

A ces jeux de failles, s'ajoute la surcharge sédimentaire due à l'érosion de l'arrière pays en remontée isostatique, pour concourir au développement du sillon et de sa subsidence. Celle-ci diminue d'importance à partir du Messinien supérieur – début Pliocène pour permettre au sillon de passer à sa phase de comblement, phase correspondant au résultat de la dégradation des nappes de remblayage et de l'accrétion verticale des dépôts, conduisant dans les deux cas au colmatage du bassin et au retrait de la mer.

Au cours de son évolution géologique, le sillon sud-rifain a eu la particularité de constituer, au Néogène supérieur, un couloir de communication entre deux grands domaines océaniques : la Mésogée (paléo-méditerranée) et l'Atlantique. Une autre particularité de ce sillon réside dans sa position charnière entre deux domaines structuraux du Maroc, très différents tant par la nature et l'âge des formations que par le style tectonique : Le domaine méséto-atlasique au Sud et le domaine rifain au Nord. Cette différence des deux domaines bordiers du sillon sud-rifain induit une dissymétrie très nette dans la forme du sillon, conduisant à une dissemblance dans la nature et la répartition des dépôts (Fig. 21). Ceci permet d'évaluer la part qui revient au contrôle structural et celle qui revient à l'eustatisme.

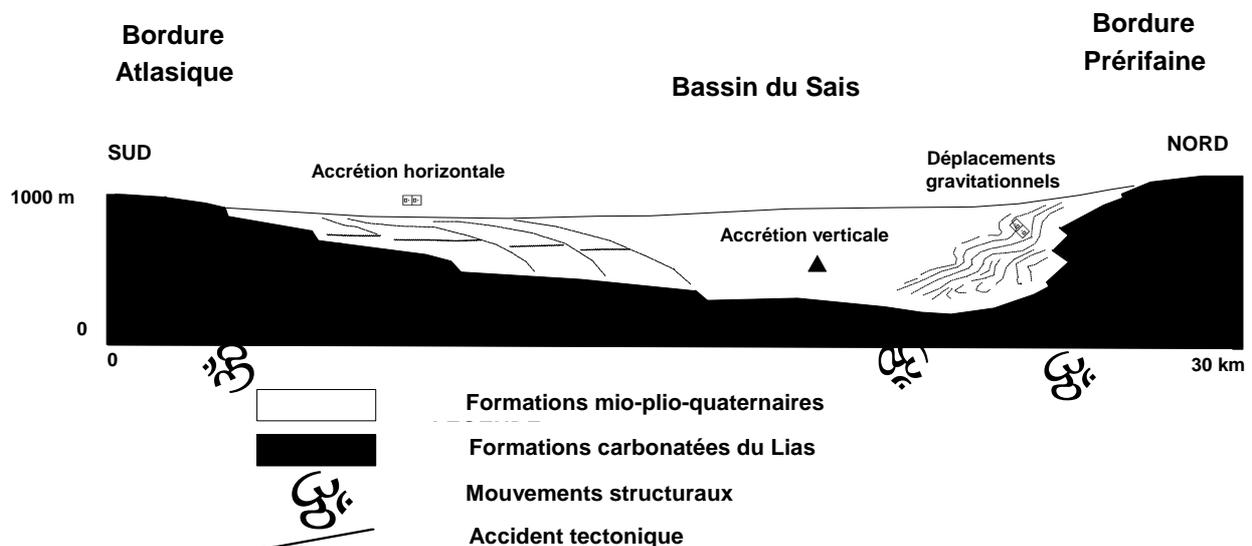


Figure 21 : Coupe schématique du sillon sud-rifain au niveau du Saïs (Cirac, 1985)

1.2.2 - Le domaine méséto-atlasique

La présente étude s'intéresse à l'Ouest, au Massif paléozoïque du Maroc central comme représentant de la Méséta, et à l'Est, au Moyen Atlas comme représentant des chaînes atlasiques.

* **Le massif paléozoïque du Maroc central** : Il s'agit de l'une des grandes Boutonniers de la Méséta occidentale où affleure la chaîne hercynienne marocaine. Les terrains y sont échelonnés du Cambrien au Permien. Ils sont structurés en anticlinoriums et synclinoriums orientés NE-SW et découpés par de grands accidents ayant en général cette même orientation. Certains de ces accidents sont le siège d'évolution métamorphique des roches et, par endroits, le lieu d'intrusion de massifs granitiques. Il s'agit de zones de faiblesse héritées du soubassement précambrien. Leur activité permanente influera la structuration de la couverture mésozoïque dans le domaine atlasique et de la couverture cénozoïque dans le sillon sud-rifain.

* **Le Moyen Atlas** : Le Moyen Atlas est une chaîne de montagne allongée selon une direction générale NE-SW sur 400 Km. Il fait partie avec le Haut Atlas du grand domaine structural atlasique. Il se subdivise selon Termier (1936), en deux portions (Fig. 22) :

- Au SW, le Moyen Atlas méridional ou Atlas de Béni Mellal (Choubert et Marcais, 1952) qui est accolé au Haut Atlas central avec lequel il est structuralement inséparable (Dubar, 1952) ;

- Au NE, le Moyen Atlas septentrional ou chaînon moyen-atlasique principal (Choubert et Marcais, 1952) qui englobe le Causse moyen atlasique et le Moyen Atlas plissé, séparés par un réseau d'accidents N 45° à N 60° (accident nord moyen atlasique). Le Causse moyen atlasique, à l'Ouest est essentiellement calcaire-dolomitique du Lias inférieur et moyen. Il est caractérisé par son allure tabulaire ou sub-tabulaire.

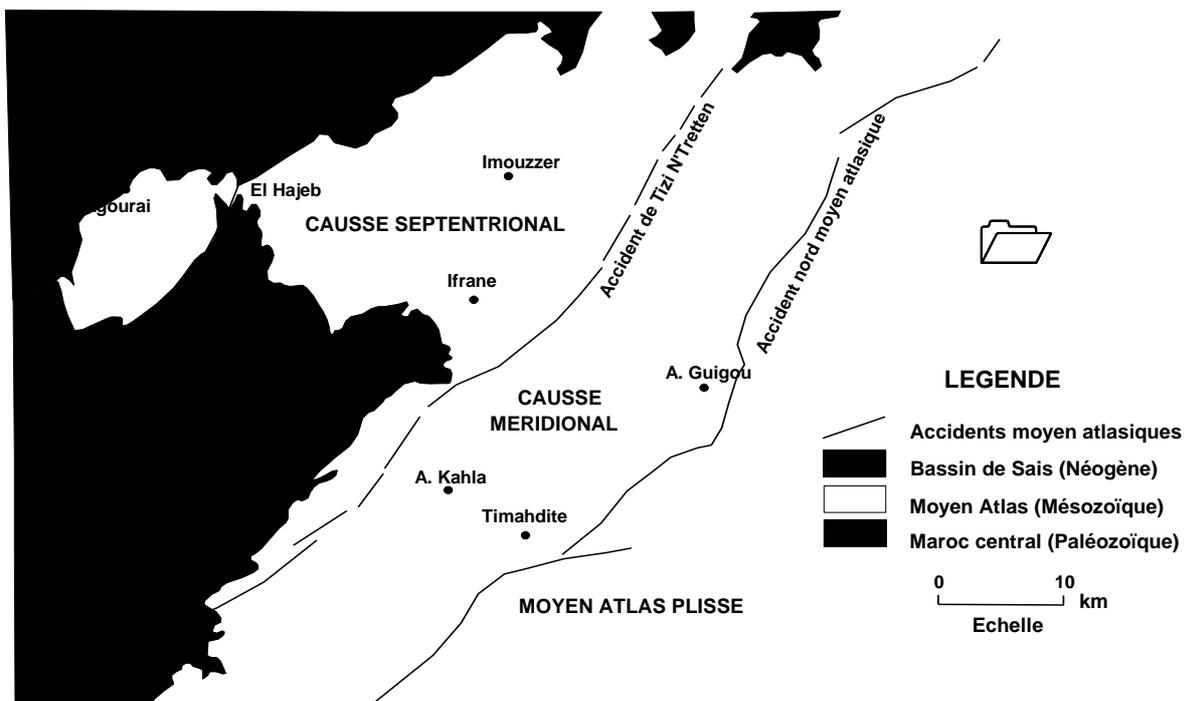


Figure 22 : Le Causse Moyen Atlasique et ses principales subdivisions

1.2.3 - Le domaine rifain : il comporte la chaîne rifaine, le Pré-rif et les rides pré-rifaines.

La chaîne rifaine est constituée dans sa partie interne de flyschs et de quartzites d'âge paléozoïque, et dans sa partie externe d'une dorsale calcaire et de terrains cristallophylliens.

Le Pré-rif forme la partie la plus externe bordant le sillon sud-rifain. Il se présente sous forme de collines argileuses ou marneuses très ravinées à relief mou. Il correspond au décollement d'une partie du matériel tertiaire des zones externes venant charrier un important olistostrome pré-rifain. Ce dernier mis en place par un glissement gravitationnel est formé d'un mélange d'olistolithes d'âge, de taille et de nature variables.

Les rides sud-rifaines sont des reliefs dominant le Pré-rif, le bassin de Saïs et le bassin du Gharb. Ces rides sont constituées de terrains jurassiques soulevés pendant les phases tectoniques mio-plio-quaternaires (Cirac, 1985 et Wernli, 1988).

CHAPITRE 2 – LITHOSTRATIGRAPHIE

Le bassin de Saïs est une vaste structure sédimentaire tertiaire, siège des dépôts du Miocène (Fig. 23). Cet ensemble a constitué, au Pliocène, le fond du bassin lacustre qui est plus ou moins masqué par les formations quaternaires (limons, alluvions et argiles de décalcification). Le substratum du bassin est varié. Il est le plus souvent constitué par des calcaires et dolomies du Jurassique inférieur surmontant des formations argileuses rouges et des basaltes du Trias ainsi que des schistes et des flyschs du Paléozoïque.

2.1 - Les terrains Paléozoïques

Les terrains paléozoïques, souvent touchés par les sondages effectués dans le bassin de Saïs, affleurent essentiellement dans la bordure sud-ouest du bassin mais aussi dans les bordures sud et sud-est. Ils constituent une source d'alimentation du bassin en matériaux de démantèlement. A l'Ouest d'Agourai (Fig. 22 et 23), le Saïs est en contact direct, sur un large espace, avec le massif paléozoïque du Maroc central. Plus à l'Est, les terrains du Paléozoïque affleurent dans le talus des Causses au NE d'El Hajeb.

Les faciès les plus fréquents dans les terrains paléozoïques sont ici les formations connues sous le nom de schistes. Dans ces derniers, on peut distinguer deux types de faciès : soit les pélites et les argilites, soit les flyschs qui comportent des bancs gréseux d'épaisseur décimétriques, séparés par des intervalles schisteux métriques. Les pélites et les argilites affleurent essentiellement dans le secteur ouest d'Agourai, en amont de l'Oued Kell. C'est un faciès vert, par endroit lustré et présentant un débitage schisteux sub-vertical. Il s'agit de terrains datés du Viséen supérieur à Namurien, appartenant au large bassin de Fourhal – Telt.

Parmi les flyschs, nous distinguons ceux affleurant dans les talus des Causses au NE d'El Hajeb. Il s'agit de l'unique affleurement du Paléozoïque intégré au Saïs et placé en situation dominante. Ce sont des flyschs bruns et grisâtres datés du Viséen supérieur et présentant à l'affleurement une épaisseur de 120 m.

2.2 - Les formations triasiques

Les sondages effectués dans le bassin de Saïs montrent que les terrains triasiques sont complexes et d'épaisseurs très variables. Ces caractères sont dus aux faits suivants : une sédimentation sur une surface irrégulière résultant de l'érosion de la chaîne hercynienne ; la présence de coulées basaltiques épanchées avec des épaisseurs variables ; la présence des évaporites, souvent à l'origine de diapirisme amplifiant les épaisseurs.

En affleurement, en particulier sur les marges du bassin, les formations triasiques sont partiellement représentées. Elles sont rencontrées dans la région d'Agourai, au SW d'El Hajeb et au Nord de Sefrou près des Bhalil. Le complexe triasique le plus complet est celui affleurant en amont de l'Oued Kell à l'Ouest d'Agourai. Nous y distinguons, sur une épaisseur de 100 à 200 m, la trilogie de la série de Keuper :

- Un niveau inférieur constitué d'argilites rouges briques homogènes à passées salifères. Sa base est caractérisée, au contact de la surface d'érosion, par un conglomérat de base à éléments décimétriques ;

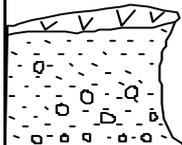
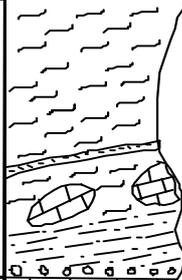
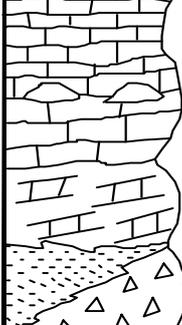
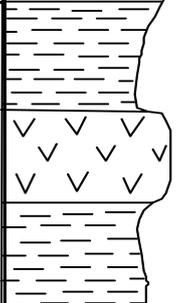
Age	Log	Epaisseur (m)	Description des faciès
Quaternaire		0 à 50	Coulées basaltiques, travertins et tufs, limons anciens et cailloutis
Pliocène		10 à 50	Calcaires lacustres et sables fauves
Miocène		0 à 1000	Marnes bleues avec intercalation de quelques niveaux gréseux (Tortonien)
		20 à 50	Calcaires gréseux et mollasses à la base (Burdigalien)
Lias		20 à 80	Dolomies litées, recouvertes de calcaires à silex et calcaires dolomitiques, le tout surmonté de calcaires gris (Lias moyen)
		50 à 150	Dolomies sableuses friables, recouvertes par des dolomies massives et surmontées par des dolomies litées (Lias inférieur)
Trias		Dizaines à centaines	Alternance d'argiles rouges gypsifères et salifères avec des basaltes doléritiques
Paléozoïque		Quelques centaines	Schistes bruns, parfois violacés, des grès, des quartzites et des calcaires gréseux (Viséen).

Figure 23 : LOG LITHOSTRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DU BASSIN DU SAÏS

- Un niveau intermédiaire composé essentiellement de basaltes sous forme de coulées superposées, parfois séparées de strates argileuses ;
- Un niveau d'argile rouge brique homogène, d'épaisseur variable latéralement, qui tend à disparaître.

A El Hajeb, les terrains triasiques sont essentiellement basaltiques mais très altérés. Les analyses chimiques réalisées sur ces roches dans un matériau altéré, révèlent un caractère de basaltes tholéitiques (Yoder et al., 1962 et Carron, 1977).

Les différents terrains du Trias ainsi que les schistes et les flyschs carbonifères ont fourni le Saïs en une gamme assez large de matériaux essentiellement détritiques.

2.3 - Les calcaires et dolomies liasiques

Les formations du Lias constituent l'encaissant systématique du Saïs. Dans sa forme dolomitique, il en est le matériel essentiel des reliefs dominant le bassin de Saïs au Sud (Moyen Atlas) et au Nord (Rif) et le matériel principal du substratum que surmontent directement les marnes du Miocène. C'est ce matériel qui constitue la roche réservoir principale en eau souterraine du bassin.

Du fait que les formations liasiques du bassin du Saïs ont été soulevées solidairement avec les Causses, du Jurassique moyen au Miocène, le Lias a été profondément altéré. Il l'a été d'ailleurs plus dans le Saïs que dans les Causses, et d'avantage sous le Saïs de Méknès où il est par endroits aminci ou fait défaut dans certains secteurs, que dans le Saïs de Fès où il apparaît généralisé (Fassi, 1999).

Le Lias du Saïs n'est connu qu'à travers les sondages réalisés dans le bassin, à l'exception de sa bordure SE où il arrive à l'affleurement à Bou Oughioul et montre des faciès proches de ceux des Causses. Les faciès rencontrés dans les formations du Lias sont essentiellement les dolomies massives. Le faciès dolomitique est connu sous sa forme massive dans les Causses et semble l'être aussi sous le Saïs puisqu'il affleure aussi à Bou Oughioul, juste au bord de la route Fès-Sefrou. Un caractère bréchique peut apparaître dans ces dolomies. Il s'agit d'une illusion entretenue par l'altération qui s'insinue dans les lignes de maillage, émousse un peu le contour des éléments et installe un semblant de "ciment rose".

Pour avoir une idée sur la lithologie du Lias du bassin de Saïs, bien qu'il soit en partie érodé, nous proposons de présenter ceux affleurant dans les Causses d'Imouzzer et d'Agouraï (Fig. 24A). D'une manière synthétique, l'essentiel de la sédimentation dans les Causses d'Imouzzer et d'Agouraï est daté du Lias inférieur et moyen. La série carbonatée est décomposée, selon Laadila (1996), en une suite d'unités lithostratigraphiques (Formations), au nombre de sept, limitées entre elles par des discontinuités régionales.

Les trois formations du Lias inférieur sont essentiellement dolomitiques. Les deux formations intermédiaires sont à faciès diversifiés avec intercalations de marnes. Les formations sommitales voient se développer des bio-constructions récifales à substratum marno-calcaire.

La comparaison du Lias du Causse avec celui des rides sud-rifaines montre qu'en général, dans ses grands traits, l'évolution des faciès dans les rides sud-rifaines (les rides méridionales en particulier) est comparable à celle des Causses moyen-atlasiques (Colo, 1961 ; Faugers, 1978 et Kaoukaya, 1987). L'évolution verticale de la série liasique du Jbel Kefs par exemple présente des affinités avec le Causse d'Imouzzer. Les formations sont facilement reconnaissables (Fig. 24B). Les variations d'épaisseur, notées dans la formation L₂₋₁, soulignent une subsidence très active, probablement contemporaine de la première fragmentation tectonique des rides sud-rifaines.

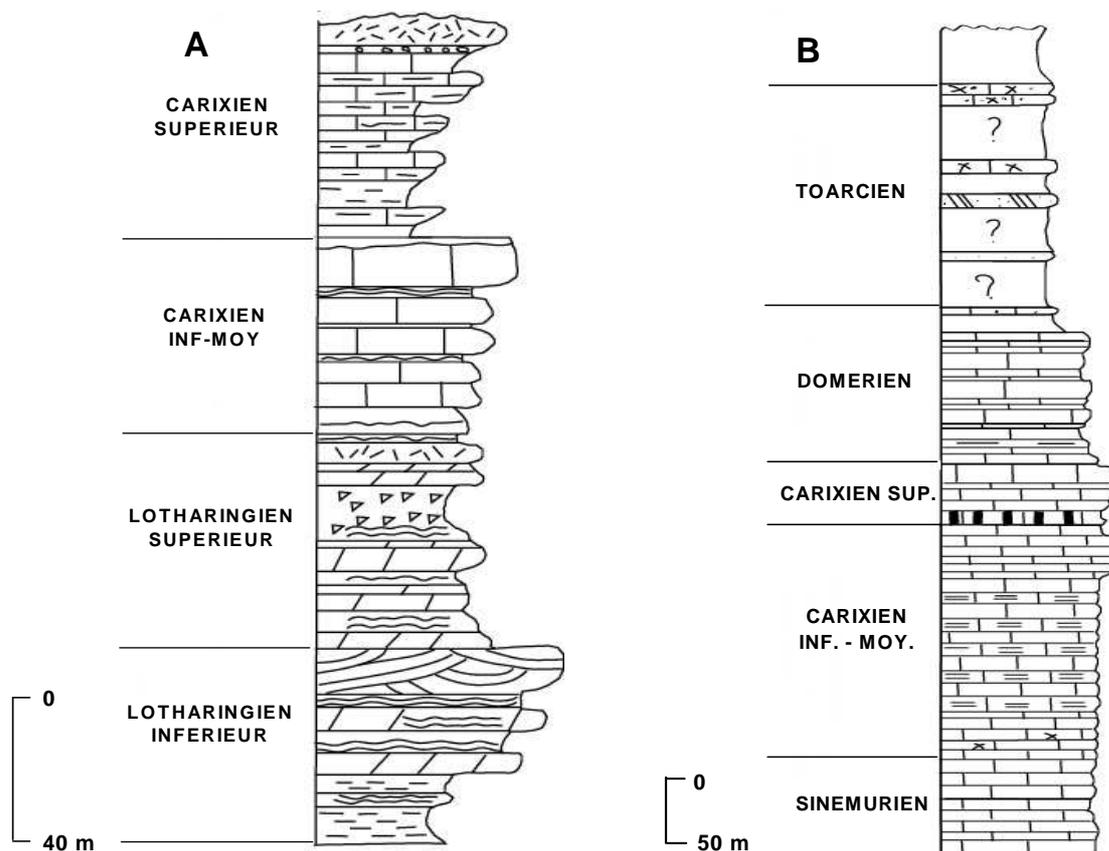


Figure 24 : Dépôt du Lias inférieur- moyen.
A : Causse d'Imouzzer (Laadila, 1996)
B : Jbel Kafs dans les rides sud-rifaines (Boutakiout, 1990)

2.4 - Les formations néogènes

Si dans leur globalité, les terrains néogènes paraissent être caractérisés par des faciès homogènes, essentiellement marneux, leur détail montre par contre d'importantes variations verticales et horizontales. Néanmoins une partie d'épaisseur non négligeable (plusieurs centaines de mètres) constitue un trait commun du remplissage néogène du sillon sud-rifain : des marnes grises et bleues.

Si les différents terrains du Néogène, avec leur sédimentologie et leurs âges, sont identifiés, les épaisseurs restent très variables d'un affleurement à un autre et d'un sondage à un autre. Dans le forage SCP1 ($x = 492.8$, $y = 365$, $z = 573$ m), l'épaisseur des terrains néogènes dépasse le millier de mètres. Nous proposons de présenter dans ce paragraphe, les différents terrains du Néogène rencontrés dans les coupes affleurant dans le plateau de Méknès et dans la plaine de Saïs.

4.2.1 - Le Néogène du Plateau de Méknès

Pour présenter le Néogène affleurant dans le plateau de Méknès, plusieurs auteurs (Wernli, 1988 ; Cirac, 1985 ; Saint-Martin, 1987 et Rachid, 1997) s'accordent sur deux coupes qui se complètent : la coupe de l'Oued Dkor – Oued Beht, située au seuil d'El Kansra et la coupe de l'Oued Kell – Moulay Idriss.

- **Coupe de l'Oued Dkor – Oued Beht** (35 km à l'ouest de Méknès) : Cette coupe est située sur la rive gauche de l'Oued Beht, au niveau de sa confluence avec l'Oued Dkor. Elle montre un faciès très monotone constitué entièrement, sur 155 m, d'argiles grises calcaires et ne présente pas de repère lithologique évident. Vers le sommet, elle se charge progressivement en sables très fins et elle est chapeauté par un banc de croûte calcaire pouvant atteindre 5 m d'épaisseur, bien repérable sur le terrain. Les foraminifères de cette formation lui confèrent un âge à la limite Tortonien-Messinien (Rachid, 1997).

- **Coupe de l'Oued Kell – Moulay Idriss** (19 km à l'ouest de Méknès) : Elle est localisée dans la partie occidentale du plateau de Méknès, au SW d'Aïn Lorma. Au niveau de cette coupe, on peut suivre les différents faciès du Néogène qui comblent le bassin de Saïs : Les argiles grises calcaires, les sables à matrice carbonatée, les "sables fauves" et les calcaires lacustres. Epaisse d'environ 80 m, la coupe, dont la base n'est pas visible à l'affleurement, présente, selon Rachid (1997), la configuration suivante (Fig. 25) :

Log	Description lithologique	Datation
	Argiles sableuses verdâtres (2.5 m) surmontées d'un calcaire blanc pulvérulent à rognons consolidés	Pliocène sup. P3 (Martin, 1977 et Ahmamou, 1987)
	14 m de sable rubéfiés à stratifications obliques tabulaires (sables fauves) constitués de grains de quartz à patine ferrugineuse. Ils correspondent à la partie sommitale des sables jaunes à matrice carbonatée (Rachid, 1997)	Pliocène moyen (Wernli, 1988)
	32 m de sables jaunes délimités par deux barres gréseuses et à passées consolidées en lentilles, en bancs discontinus ou en nodules. Cirac (1985) les décrit comme "sable à matrice carbonatée"	Pliocène inférieur P1
	28 m d'argiles calcaires grises (au lieu de marnes) devenant plus sableuses vers le haut et renfermant une microfaune à tests fins.	Miocène terminal (Messinien m6b) (Wernli, 1988)

Figure 25 : Coupe lithologique descriptive du Néogène de l'Oued Kell - Moulay Idriss

2.4.2 - Le Néogène de la plaine de Fès (le Saïs de Fès)

La plaine de Fès est couverte presque entièrement de terrains plio-quadernaires masquant les dépôts néogènes et leur substratum. Ces derniers n'apparaissent que dans sa bordure nord (Moulay Yacoub, Jbel Trat, Jbel Zalagh,..) et dans un secteur situé au Sud-Est, au pied du Causse moyen-atlassique. Plusieurs coupes sont connues dans cette partie du bassin de Saïs. Nous présentons celle de Moulay Yacoub (17 km au NW de Fès) en raison de l'importance de son épaisseur, la continuité de son faciès et sa situation bien représentative des faciès néogènes du bassin. La coupe est levée le long de l'Oued Moulay Yacoub, dans un paysage formé de collines très ravinées, où affleure une série marneuse très monotone, en assez bonne continuité, épaisse de près de 800 m. Dans sa moitié supérieure apparaît une série gréseuse repère, épaisse de près de 30 m, qui se dégage du paysage marneux de part la dureté de ses barres gréseuses et la couleur jaunâtre de ses faciès.

Les marnes de cette série s'enrichissent en sable à deux niveaux : à la base, dans la série gréseuse où le faciès passe à des grès et des sables francs, et au sommet, où le contact avec les faciès lacustres sus-jacents n'est pas visible à l'affleurement. La série néogène est couronnée sur 30 m par la série continentale qui débute par un conglomérat qui se continue par un faciès grumeleux, typique de la bordure du bassin lacustre (sables oncholites, rognons, manchons...). Cette série est chapeautée par un banc calcaire blanc à oncholites.

Les foraminifères de la série datent la première séquence, en dessous de la série gréseuse, du Tortonien. La limite Tortonien-Messinien se place dans la série gréseuse. La limite Miocène-Pliocène se place dans la seconde séquence, au sein des argiles grises. La formation lacustre est à rattacher au faciès lacustre de la plaine de Saïs daté, selon la bibliographie, du Pliocène supérieur – Quaternaire ancien.

2.5 - Le Plio-Quaternaire

Le pliocène est représenté par des terrains qui recouvrent de larges surfaces par des limons anciens et des cailloutis du Villafranchien ancien et récent. Les autres niveaux du Quaternaire sont tous représentés mais avec des extensions minimales et n'arrivent pas à constituer un véritable piémont en contre bas du talus septentrional puisque les apports détritiques sont maigres en provenance des Causses. En revanche les apports chimiques ont été extrêmement importants, ce qui nous amène à parler des accumulations travertineuses.

2.5.1 - Les Travertins

Les travertins et les tufs de sources forment d'énormes paquets au contact du Saïs. Ils sont particulièrement développés aux griffons des principales sources karstiques, ou jalonnent l'emplacement d'anciennes émergences aujourd'hui disparues ou déplacées. Ces dépôts biochimiques constituent des cascades travertineuses. Leurs lieux préférentiels de dépôt étaient là où les eaux subissaient leur première chute. Leur rôle hydrogéologique est non négligeable car ces formations perméables jouent le rôle d'intermédiaire dans l'abouchement des eaux des causses avec la nappe du plateau de Méknès.

2.5.2 - Les Basaltes

Les basaltes sont d'âge Quaternaire post Villafranchien. Ils sont issus du Jbel Outigui (1431 m), grand volcan éteint dominant le Causse d'El Hajeb. Les coulées de lave ont traversé en cascades le bord du Causse et se sont épanchées fort loin dans la plaine (une trentaine de km à partir du cratère). Les coulées se sont étalées sur 2 à 4 km de largeur en suivant le pied du Causse. D'une manière générale, elles constituent un toit relativement imperméable, en comparaison avec les calcaires et dolomies du Lias. Ceci a dû modifier profondément l'ancien mode d'écoulement des eaux du Lias, en mettant en charge les eaux des formations sous-jacentes ou en bouchant les anciennes émergences de sorte que les sources soient déplacées à l'amont ou à l'aval des coulées. Ce barrage naturel explique la situation des sources comme Ribaa, El Atrous, Aguemguem, Si Lmir, Sebaa et Bittit qui sourdent au contact ou à proximité immédiate entre les calcaires liasiques et ces basaltes. L'épaisseur des coulées basaltiques atteint quelques dizaines de mètres et varie beaucoup dans les vallées selon le paléorelief fossilisé. Celle-ci est réduite à quelques mètres sur les extrémités des coulées.

Les basaltes jouent aussi un rôle perméable grâce à l'importante porosité de fissures de certaines coulées : ils peuvent ainsi contenir des niveaux aquifères dont les caractères hydrogéologiques s'apparentent à ceux des karsts. Les eaux de ces niveaux proviennent en partie du Lias par abouchement latéral et par infiltration superficielle. On peut expliquer la présence de résurgences le long des oueds coulant dans la coulée de basalte (Aïoun Hanouch, Aïn Sened) et des résurgences qui sourdent sur le bord Nord de la coulée au contact des calcaires lacustres (Aïoun Hijja, Aïn Merzoug). Enfin, les coulées de basaltes supportent des zones marécageuses essentiellement le long des oueds qui coulent sur ces coulées. La partie superficielle altérée des basaltes a donné naissance à des argiles qui ont colmaté les fissures.

2.6 – Evolution paléo-géographique

Les formations carbonatées du Lias ont été fracturées et morcelées lors des phases d'érosion anté-miocène, donnant lieu à des secteurs où le Lias est absent ou aminci. La couverture néogène, dans ce cas, reposerait directement sur le Trias voire même sur le Paléozoïque.

- **Au Tortonien** : La couverture néogène débute par une transgression qui s'installe sur le substratum du bassin de Saïs (Cirak, 1985 in Aït Brahim, 1991 ; Wernli, 1988). Les formations grossières détritiques de base constituent le premier terme de cette transgression. Elles caractérisent un environnement littoral. La transgression se poursuit par le dépôt de la puissante série de marnes grises. La mer tortonienne se prolonge jusqu'au centre du Moyen Atlas (Charrière, 1984 ; Fedan 1988).

- **Au Messinien** : Le milieu est encore profond et bien oxygéné (Cirak, 1985 in Aït Brahim, 1991) indiquant la grande communication entre l'Atlantique et la Méditerranée à travers le couloir de Taza, le bassin de Guercif et de la basse Moulouya. A la fin du Messinien, on assiste aux effets conjugués de l'exhaussement isostatique de la région orientale (Taza) et l'arrivée de l'olistostrome pré-rifain (Aït Brahim, 1991). Ces effets ont induit, dans un premier temps, la réduction de l'épaisseur de la tranche d'eau et ensuite la fermeture du bassin sud-rifain. Ainsi, la régression fini-messinienne a eu pour conséquence une rupture des communications entre la Méditerranée et l'Atlantique par ce bassin.

- **Au Pliocène inférieur** : A cette époque, l'émersion de la zone pré-rifaine et des rides pré-rifaines (Boumir, 1987) puis de l'extrémité NE de la Méséta marocaine, ont permis l'alimentation du bassin par d'importants apports détritiques donnant lieu à la formation des sables à matrice carbonatée.

- **Au Pliocène moyen** : Les sables fauves se déposent pendant la transgression Moghrébienne. Cette dernière a été envisagée dès 1954 (Margat, J. et Taltasse, P.). En 1986, elle a été confirmée par la paléontologie (Wernli, R.). En 1987, une étude sédimentologique a été réalisée (Boumir, 1987) pour mieux situer cette transgression dont le rivage se situerait plus à l'Est d'Aïn Taoujdate.

A la fin du Pliocène moyen, ces sables vont être émergés suite à l'effet conjugué de la progradation des corps sableux et la remontée du seuil d'El Kansra. Par la suite, ces corps vont être attaqués par l'altération météorique suivie de la kaolinisation et de la décalcification (Boumir, 1987), ce qui doit le qualificatif de « fauve » attribué à ces sables.

L'analyse séquentielle des trois termes cités ci-dessus (marnes grises, sables à matrice carbonatée et les sables fauves) indiquent le passage progressif d'un bassin de décantation profond épibathyal (énergie faible) à un environnement de plateforme infratidale (peu agité), puis à une zone intertidale à supratidale (forte énergie) avec diminution progressive et régulière de l'épaisseur de la tranche d'eau (Cirak, 1985 in Aït Brahim, 1991).

- **Au Pliocène supérieur** : juste après, le bassin de Saïs va s'isoler suite à l'émersion du seuil d'El Kansra et aux phénomènes de réajustement isostatique connus à cette époque. Le bassin va connaître alors une sédimentation lacustre durant le Pliocène supérieur. Cette extraordinaire phase lacustre qui caractérise la période qui suit la régression de la mer Moghrébienne, s'est manifestée pratiquement dans tout le Maroc, à l'exception du domaine rifain (Choubert et al., 1962). La sédimentation de ces dépôts lacustres correspond à un milieu de dépôt calme. Elle résulte soit d'un phénomène de décantation de boue carbonatée terrigène, soit d'un phénomène de précipitation physico-chimique (Cirak, 1985 in Aït Brahim, 1991), sous une faible tranche d'eau.

- **Au Quaternaire** : l'ensemble des dépôts montre que le milieu devient franchement continental (fluviatile).

2.7 - Conclusion

Le bassin de Saïs est une structure sédimentaire à matériel Miocène. Ce matériel est recouvert par des formations plio-quaternaires et recouvre un substratum paléozoïque, triasique et jurassique (Fig. 23). Le Paléozoïque est essentiellement silico-clastique ; pélitique et grésopélitique, daté du Viséen supérieur à Namurien. Le Trias qui repose en discordance angulaire sur le paléozoïque est composé d'argiles et de grès rouges dans lesquels abondent les coulées basaltiques. Le Jurassique représenté par le Lias est à matériel calcaire et calcaire dolomitique, massif ou bréchique.

La mer néogène transgresse les terrains sous-jacents par l'intermédiaire d'une lacune sédimentaire des dépôts d'âge dogger à oligocène. La base du Néogène est représentée par des formations burdigaliennes épaisses d'une dizaine de mètres. Le matériel est grossier et détritique, produit de transgression (Conglomérats, grès et molasse), avec parfois des calcaires gréseux à passées marneuses. Il s'agit de dépôts qui caractérisent un environnement littoral. Cette base est surmontée d'une puissante formation marneuse à Foraminifères de couleur généralement grise, parfois blanche à bleue, déposée dans une mer profonde et oxygénée. Elle est datée du Tortonien et son épaisseur est de quelques mètres à 1000 m au sondage de Douyet, à l'Ouest de Fès (DRPE, 1989). Au dessus viennent des marnes messiniennes, également grises mais localement sableuses et gréseuses. Leur épaisseur peut atteindre 350 m dans l'axe du bassin.

Le Pliocène est composé de terrains évoluant d'abord dans des milieux qui tendent à l'émersion puis au pliocène supérieur dans un milieu continental. Il comprend de bas en haut : 50 m de marnes à matrice carbonatée d'âge pliocène inférieur ; 50 m de sables fauves d'âge pliocène moyen ; 70 m de calcaires lacustres, de sables et de travertins datés du Pliocène supérieur. Les terrains quaternaires sont hétérogènes et variables spatialement. Ils sont composés de limons, de sables, de calcaires, de travertins et de coulées basaltiques qui montrent que le milieu de sédimentation est franchement continental.

CHAPITRE 3 – ETUDE STRUCTURALE

3.1 - Histoire tectono-sédimentaire du bassin de Saïs

L'histoire tectono-sédimentaire du bassin de Saïs s'intègre dans l'évolution des domaines montagneux encadrants, en particulier celle du domaine rifain (Fig. 19). Cette histoire est contrôlée, depuis le Tortonien jusqu'à l'actuel, par l'effet de la convergence de l'Afrique et de l'Europe et par l'expulsion du bloc d'Alboran vers le Sud-Ouest (Morel, 1989 ; Aït Brahim et al., 1984, 1989 et 1990). Trois périodes tectono-sédimentaires ont été décrites pour expliquer l'évolution du Rif dans son ensemble, en y intégrant le bassin de Saïs qui correspond à un sillon d'avant pays.

* **La première phase tectono-sédimentaire d'âge Tortonien** : dans le Rif, cette phase correspond à un raccourcissement qui varie de l'Est à l'Ouest, respectivement N 40° (Aït Brahim et al., 1990) et N 70° (Morel, 1987). Dans l'avant-pays rifain le champ de contrainte est orienté N 90°. Cette phase est responsable des émergences locales des rides pré-rifaines et le début de l'ouverture du bassin de Saïs suivant une distension orientée NW-SE.

* **La deuxième phase tectono-sédimentaire d'âge Tortonien supérieur – Messinien** : la direction de la contrainte maximale responsable de cette phase est orientée N 40°. La contrainte compressive à composante maximale (σ_1) orientée N 00° à N 40° et à composante distensive (σ_3) orientée N 100° à N 130°, va accentuer l'individualisation du bassin de Saïs le long des accidents NE-SW, hérités du soubassement hercynien (Faugers, 1981). Les rides pré-rifaines sont totalement émergées et la mer se retire définitivement du pré-rif. L'érosion de ce dernier alimente le bassin en produits détritiques interstratifiés dans les marnes.

* **La troisième phase d'âge Plio-Quaternaire** : la caractéristique principale de cette phase est la compression de direction nord-sud, affectant les calcaires lacustres. Le bassin de Saïs, le pré-rif et les rides sud-rifaines sont en surrection, alors que la plaine est restée en subsidence.

3.2 – Les principales directions de fracturation affectant les massifs encadrants du Saïs

Les principales directions responsables de l'édification du bassin du Saïs sont à rechercher dans les domaines montagneux encadrant le bassin.

3.2.1 - La fracturation dans le Moyen Atlas

Dans le domaine moyen atlasique la structuration cassante est héritée du soubassement paléozoïque déformé lors de l'orogénèse hercynienne. En effet, le socle paléozoïque qui affleure à l'Ouest du moyen Atlas et sous forme de boutonnières au sein de la chaîne montre les mêmes directions de fracturation que celles affectant les terrains mésozoïques du Moyen Atlas.

La fracturation figurant sur la carte géologique d'El Hajeb au 1/100 000 a été relevée pour le Causse d'El Hajeb-Ifrane et traitée par le programme Linwin du Laboratoire d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de Poitiers (France). Ce programme procède au traitement de la fracturation en deux étapes :

- la première consiste au traitement de l'image numérisée : érosion, suppression des points triples et des points isolés, séparation des lignes brisées et enfin réajustement des linéaments ;
- La deuxième correspond à l'analyse géométrique : définition de la zone d'étude, filtrage des directions, distribution statistique des orientations, distribution des longueurs des linéaments et enfin calcul des densités de linéaments.

L'analyse de la fracturation dans le Causse d'El Hajeb-Ifrane fait ressortir un nombre de linéaments de 1206 avec une longueur cumulée de 851 km (Fig. 26). Les principales directions de fracturation obtenues sont :

*** D'après le nombre de linéaments** : trois principales directions se dégagent :

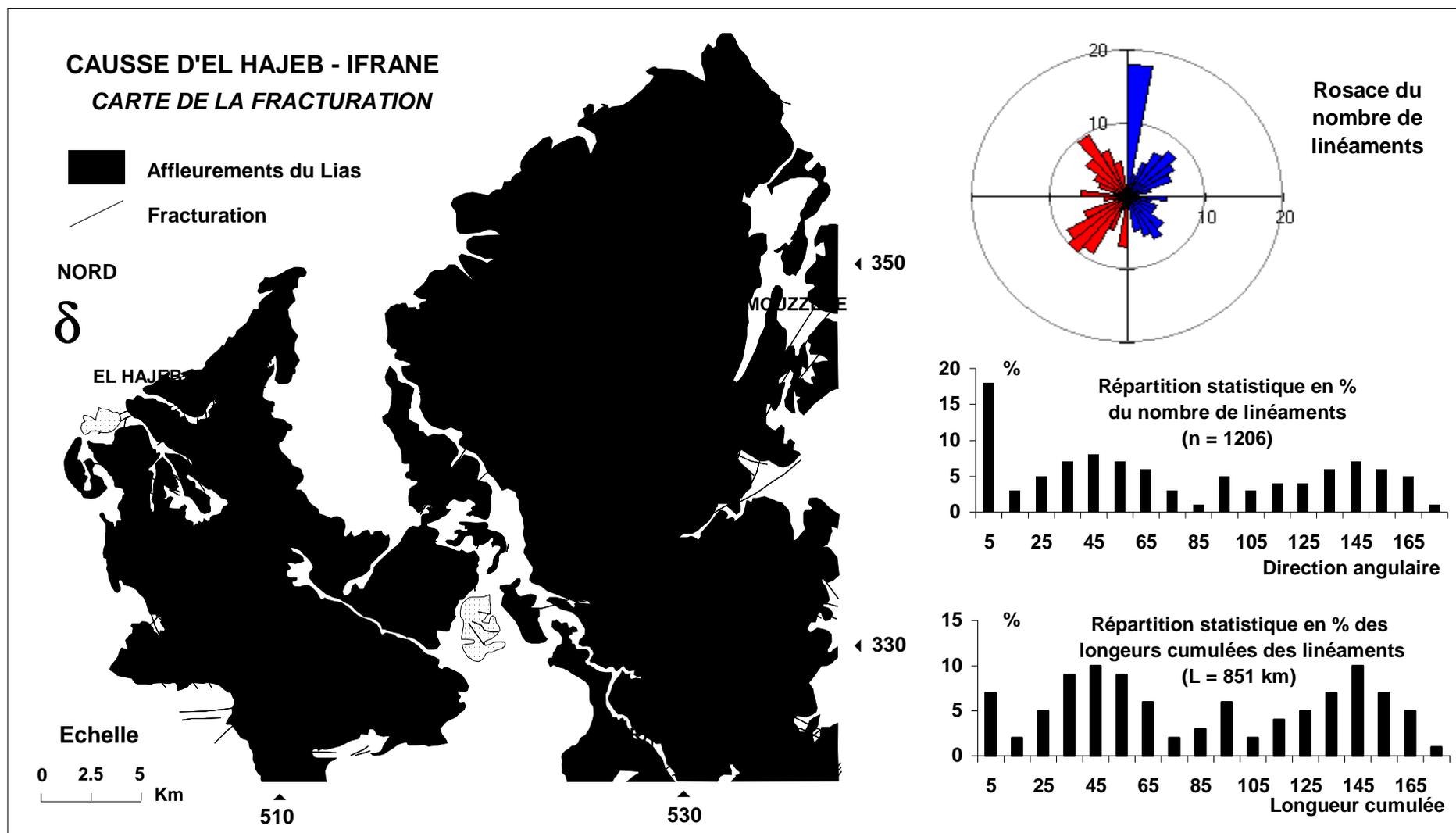
- La direction subméridienne : elle varie de $N00^\circ$ à $N05^\circ$ et représente 18 % de l'ensemble des directions.
- La direction NE-SW : elle varie en moyenne de $N25^\circ$ à $N65^\circ$, avec une dominance de la direction avoisinant le $N45^\circ$. Cette direction représente 33 % de l'ensemble des directions.
- La direction NW-SE à NNW-SSE : elle varie en moyenne de $N115^\circ$ à $N165^\circ$, avec une dominance de la direction avoisinant le $N145^\circ$, et représente 32 % de l'ensemble des directions.

*** D'après la longueur des linéaments** : les pourcentages du nombre de linéaments en fonction des orientations se traduit de la même manière dans le diagramme des longueurs cumulées en fonction des directions des failles (Fig. 26). Ainsi, les linéaments d'orientations avoisinant $N05^\circ$, $N45^\circ$ et $N145^\circ$ sont ceux qui ont les pourcentages de longueur cumulée les plus élevés. On note cependant, que la direction méridienne est beaucoup moins représentée en longueur qu'en nombre de linéaments. En conséquence, les deux directions presque orthogonales $N45^\circ$ et $N145^\circ$ peuvent être considérées comme les deux directions principales de fracturation de ce secteur.

3.2.2 - La fracturation dans le Pré-rif

Dans le Rif en général et le Pré-rif en particulier la fracturation est très intense. C'est une fracturation dont l'activité est permanente : elle s'étale de l'activité hercynienne à l'actuelle. La mobilité de cette fracturation est variable suivant l'orientation de la contrainte principale. Elle est en grande partie responsable de l'édification du bassin de Saïs et de sa structuration. Les principales directions de fracturation dans le Pré-rif sont, selon Aït Brahim et Chotin (1984) :

- La direction sub-méridienne : $N170^\circ$ à $N10^\circ$
- La direction NE – SW : $N20^\circ$ à $N60^\circ$
- La direction NW–SE à ESE–WNW : $N100^\circ$ à $N140^\circ$



**Figure 26 : Carte de la fracturation du Causse d'El Hajeb-Ifrane et les résultats de son traitement
(Levée de la fracturation à partir de la carte géologique d'El Hajeb au 1/100 000)**

En comparant les directions de la fracturation dans les domaines moyen-atlasique et rifain, nous constatons qu'il s'agit des mêmes orientations. D'ailleurs, ces mêmes directions ressortent dans les terrains du bassin de Saïs à différents niveaux stratigraphiques. Certaines de portées importantes ressortent à travers les différentes prospections géophysiques (sismique et électrique), d'autres de moindre importance sont essentiellement enregistrées dans les calcaires lacustres du Pliocène.

3.3 – La tectonique quaternaire dans le bassin de Saïs

La tectonique quaternaire est à l'origine de la morphologie actuelle du Saïs. En effet, pendant le Quaternaire, l'activité tectonique du bassin de Saïs se manifeste aussi bien dans ses bordures nord et sud, au contact des deux domaines montagneux encadrants, qu'à l'intérieur du bassin.

3.3.1 - La tectonique quaternaire en bordures du Saïs

* **Dans la bordure nord**, au contact des massifs des rides pré-rifaines (massif de Zerhoun), l'activité tectonique du Quaternaire ancien se manifeste par des failles normales à regard sud (Fig. 27). Le jeu de ces failles est, parfois, très important pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres. Il est évident qu'il s'agit ici de failles héritées, mobiles déjà lors des dépôts des marnes miocènes.

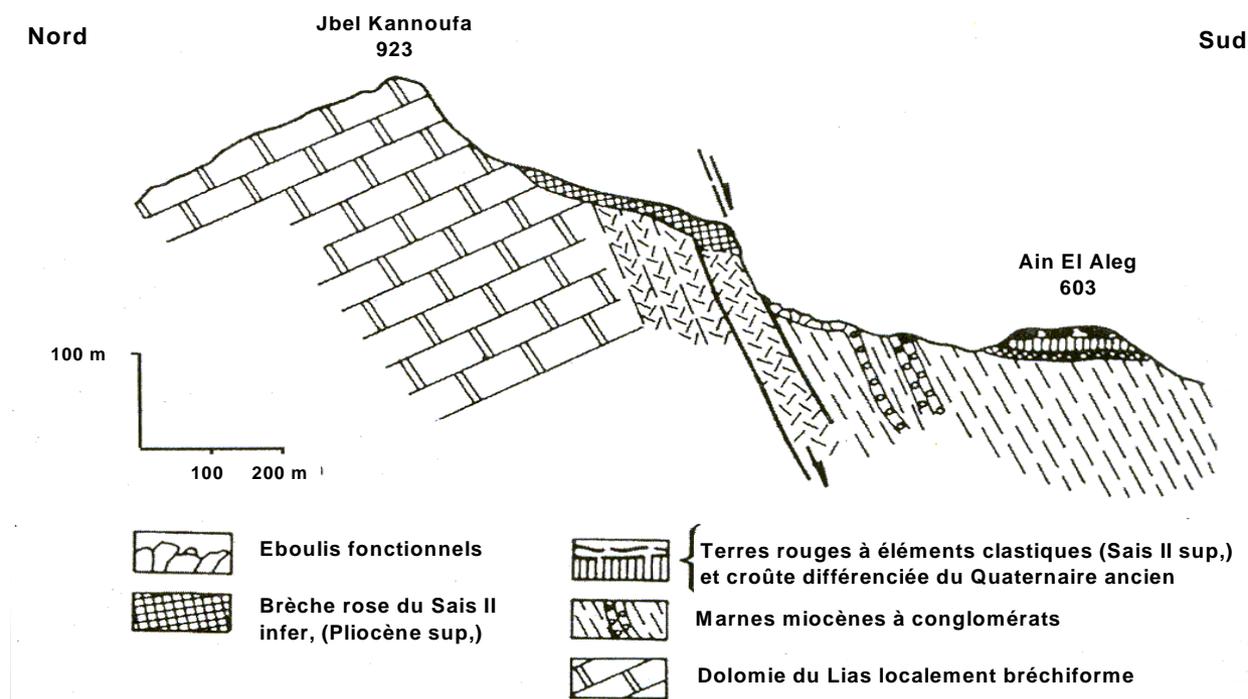


Figure 27 : La tectonique du Quaternaire ancien relevée sur Jbel Kannoufa (Fassi, 1999)

Il en est de même du côté de Moulay Yacoub et de la ville de Fès, bien qu'aucune crête culminante n'est évidente. Dans cette région, les effets de la tectonique du Quaternaire ancien se manifestent par le développement d'une ligne anticlinale d'orientation NE-SW à valeur d'un horst limité par des failles normales à rejet sud, côté Saïs, de près de 100 m. Il s'agit d'un rejet plus important que celui du côté de Zerhoun où il ne compte que 60 m.

* **Dans la bordure sud du Saïs**, une falaise des Causses moyen-atlasiques domine le bassin de Saïs. Elle est assez continue, souvent importante et évidemment plus ancienne puisqu'elle n'a pas été franchie par les transgressions miocènes. Cette dominance qui est actuellement de l'ordre de 200 à 600 m suivant les endroits comporte entre 80 et 200 m de dénivelés qui se sont réalisés au cours du Quaternaire et particulièrement durant le quaternaire ancien. Nous citons dans ce cas le rejet de 150 m environ de la Gada d'Imouzzer, au Nord-Ouest des Causses ; le rejet de 150 m à 200 m du Causse de Sefrou ; le rejet de 85 m pour le Causse d'El Hajeb, au droit du Jbel Amran ; le rejet de 85 m dans la coupe de Kef Enaam, située en bordure nord du plateau central (Fig. 28).

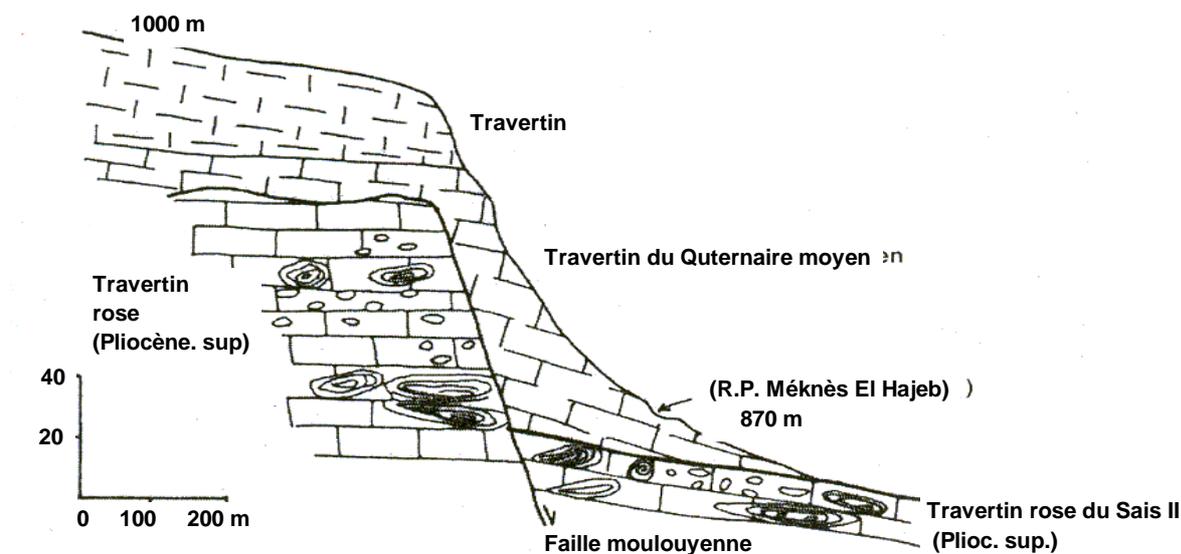


Figure 28 : Structure fossilisée de Kaf Enaâma à l'Ouest d'El Hajeb (Fassi, 1999)

Dans cette bordure sud, la partie orientale proche du Moyen-Atlas proprement dit est plus dynamique que le volet ouest, en couverture du socle ancien réputé stable. Et cela est vrai pour la tectonique quaternaire que pour celles qui l'ont précédée.

3.3.2 - La structuration quaternaire du Saïs

Globalement dans le Saïs, le réseau d'accidents est dense et complexe jouant un rôle essentiel dans l'organisation de l'espace (Fig. 5).

* Dans le **Saïs de Fès**, les linéaments tectoniques s'ordonnent en une sorte d'éventail se fermant d'Est en Ouest, passant d'une orientation WSW-ENE pour rattraper les orientations hercyniennes NE-SW qui vont dominer dans le Saïs de Méknès. Nous distinguons les failles d'Aïn Chgag, de Ras El Ma et de Bensouda.

* Dans le **Saïs de Méknès**, les linéaments tectoniques constituent le prolongement septentrional des accidents hercyniens affleurant dans le massif central. Les failles quaternaires du plateau de Méknès ont un jeu décelable dans les plis NW-SE pliocènes (Fig. 5).

Les seuls traits tectoniques qui se traduisent par des talus vigoureusement individualisés dans la topographie du Saïs sont en effet ceux de Tiniza-Aït Zaouit et d'Aïn Taoujdate. Les autres accidents, dans les deux Saïs, s'inscrivent dans leur mouvance, et perdent leur importance en s'éloignant.

- **Le plateau de Tiniza-Aït Zaouit** (Fig. 29) se présente comme un sabot à mi pente du talus juste en aval des Causses d'El Hajeb-Immouzer. Ce plateau à matériel travertineux et calcaire du Quaternaire ancien est un horst chaviré vers le Nord. Cette structure résulte de l'activité d'accidents perpendiculaires aux structures atlasiques suite à une tectonique à stress nord-est qui régnait à cette époque.

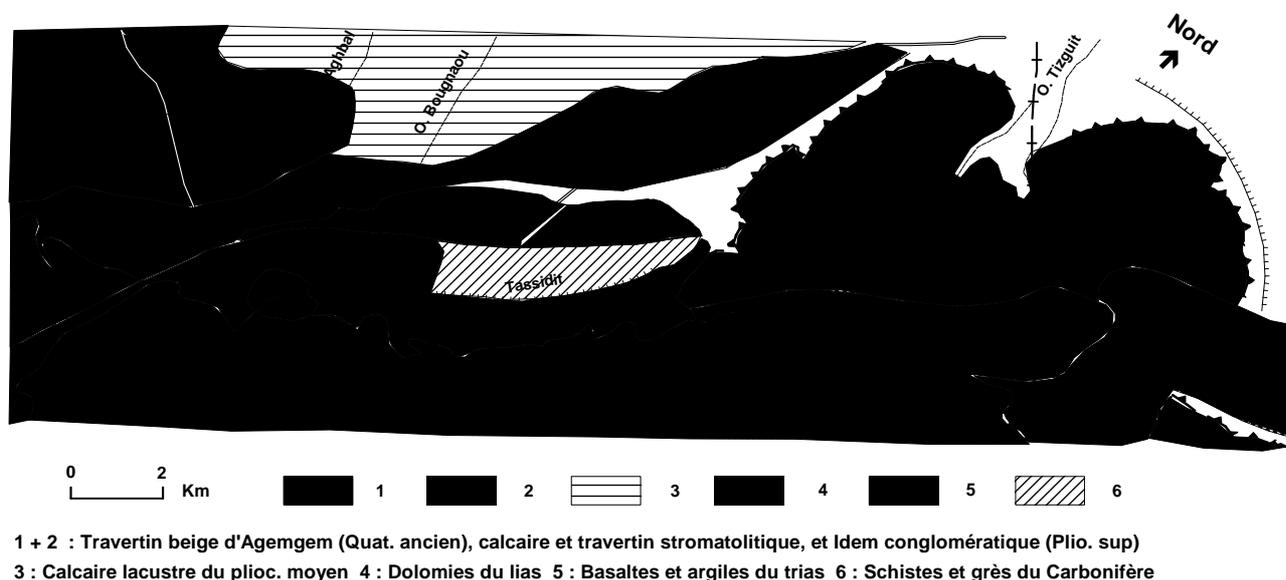


Figure 29 : Contexte structural de Tiniza Aït Zaouit (Fassi, 1999)

- **Le talus d'Aïn Taoujdate** est le trait topographique le plus net et le plus significatif de tout le Saïs puisqu'il en détermine la subdivision en deux régions étagées. Il est visible partout dans le Saïs de Fès déprimé. Son dénivelé est de 150 m et son tracé en diagonale WNW-ESE semble joindre le Jbel Kannoufa, près de Zerhoun à la limite orientale du Causse d'Immouzer. D'après les conclusions de FASSI (1999), il s'agit d'un talus d'érosion dérivé assez près d'une flexure fossilisée plus tard par une chape travertineuse quaternaire (Fig. 30).

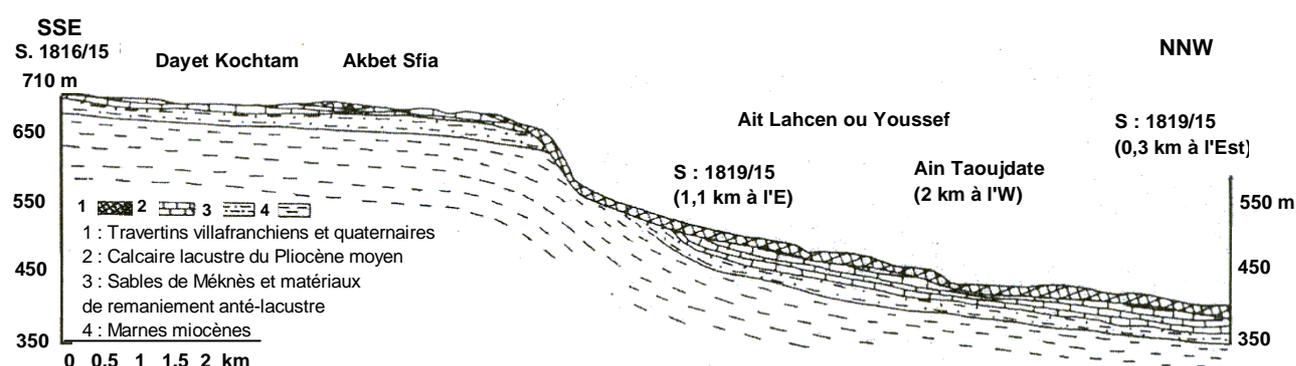


Figure 30 : Accident d'Aïn Taoujdate : talus de flexure retouché par l'érosion (Fassi, 1999)

3.4 - Conclusion

L'étude structurale a montré que l'histoire géologique du bassin de Saïs s'intègre dans l'évolution des domaines montagneux encadrants, en particulier celle du domaine rifain. Trois phases tectono-sédimentaires allant du Tortonien au Plio-Quaternaire ont été distinguées. L'analyse de la fracturation a montré que les directions orthogonales N45° et N145° peuvent être considérées comme les principales directions de fracturation de la région. Ces orientations relevées sur le Causse d'El Hajeb-Ifrane se retrouvent dans le domaine rifain et au niveau du bassin de Saïs. L'examen de la tectonique quaternaire a montré que cette dernière est à l'origine de la morphologie actuelle du bassin du Saïs, et que cette activité tectonique se manifeste aussi bien dans ses bordures nord et sud, qu'à l'intérieur du bassin.

La synthèse des travaux géophysiques qui va suivre permettra de mieux préciser la structure de la plaine et la géométrie du réservoir liasique.

CHAPITRE 4 – SYNTHÈSE DES RECONNAISSANCES GÉOPHYSIQUES DU BASSIN DU SAÏS

4.1 - Présentation

Les premières prospections électriques dans le Saïs datent de 1937, mais les principales campagnes d'envergure ont été réalisées entre 1979 et 1987 par la Compagnie Africaine de Géophysique (CAG), pour le compte de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE). Des études sectorielles ont été effectuées récemment (Essahlaoui, 2000). Les reconnaissances par les méthodes sismiques quant à elles, ont débuté en 1950 principalement au niveau des deux grandes agglomérations de Méknès et de Fès. La campagne la plus importante est celle réalisée en 1985 par la CAG pour le compte de l'Office National de Recherche et d'Exploitation Pétrolière (ONAREP). Les résultats de cette dernière campagne ont été exploités dans des travaux de recherche récents (Zizi, 2000). Un rapport de synthèse des différents résultats géophysiques comprenant plusieurs cartes interprétatives, ainsi que des coupes géologiques à l'échelle du bassin du Saïs a été élaboré par la CAG en 1989. La figure 31 extraite du rapport montre la situation à travers le bassin des principales campagnes géophysiques réalisées.

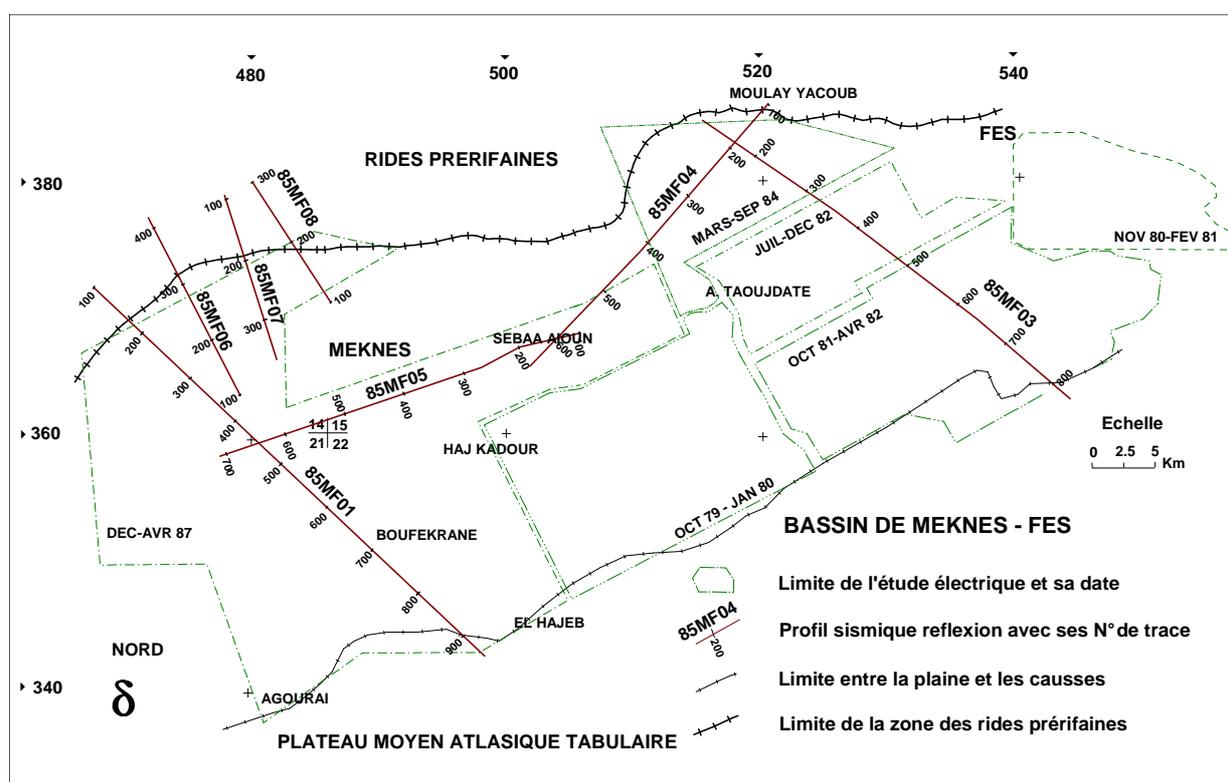


Figure 31 : Carte de la situation des principales campagnes géophysiques du bassin du Saïs (CAG, 1989 redessinée)

4.2 - Résultats des prospections électriques

Ce sont principalement les sondages électriques (S.E.) en grande longueur de ligne qui ont été réalisés. Ils correspondent à l'étude des variations de la résistivité du sous sol en fonction de la profondeur. Les courbes des S.E. ont été interprétées à l'aide d'abaques pré-calculés ou à l'ordinateur, en se référant aux coupes lithologiques et aux diagrapies de quelques dizaines de forages.

L'analyse de l'ensemble des S.E. du bassin a conduit à l'individualisation d'une succession d'unités électriques soit résistantes soit conductrices, d'épaisseur et de résistivité distinctes (Fig. 32) :

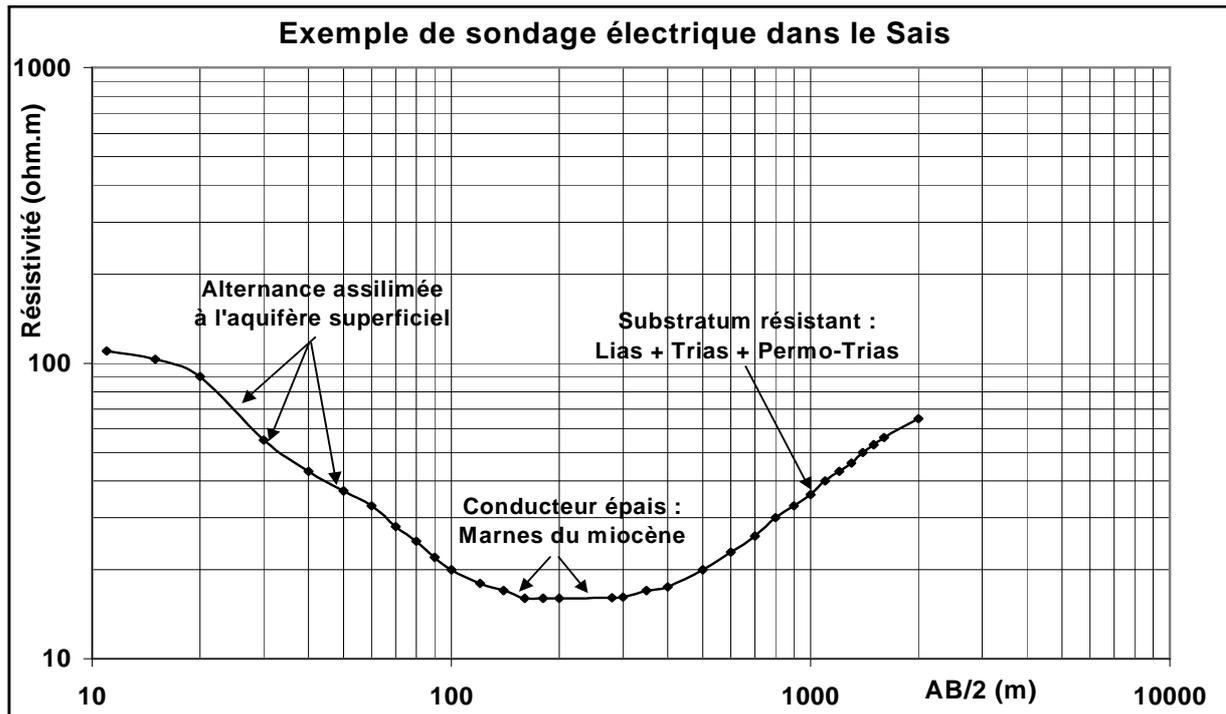


Figure 32 : Exemple d'un sondage électrique dans le Saïs (CAG, 1989 redessinée)

- En surface, plusieurs alternances de niveaux conducteurs et résistants sur un total d'environ 20 à 100 m de puissance. Les résistivités oscillent autour de deux pôles : 80 à 150 $\Omega.m$ (résistants) et 20 à 40 $\Omega.m$ (conducteurs). Cette unité représente en général des formations géologiques récentes du Plio-Quaternaire. Ces niveaux sont très variables et hétérogènes : argiles, sables, blocs de calcaires...
- En dessous, un ensemble conducteur bien développé correspondant aux marnes plastiques grises à intercalations sableuses du Miocène. Il peut correspondre en partie aux argiles du Trias lorsque le Lias s'amincit de façon significative ou quand il est absent. Cet ensemble présente une résistivité de l'ordre de 15 $\Omega.m$ et une épaisseur souvent supérieure à 100 m.
- En profondeur, un substratum résistant parfois composite dont la nature est difficile à définir en l'absence de forage d'étalonnage. Il correspond le plus souvent aux formations carbonatées liasiques à prédominance dolomitique et sa résistivité peut varier entre 100 et 400 $\Omega.m$. Il peut représenter parfois le Permo-Trias de nature gréseuse ou schisteuse lorsque le Lias est absent ou très réduit (la résistivité varie alors de 50 à plus de 100 $\Omega.m$).

Il peut donc subsister une ambiguïté quant à la nature du substratum électrique résistant. Il faut signaler également que dans le cas où la résistivité des grès et conglomérats burdigaliens est voisine de celle du Lias, il est impossible de les distinguer.

4.3 - Résultats des prospections sismiques

C'est la technique de réflexion qui a été utilisée en prospection sismique. Cette technique permet la restitution des horizons géologiques sur une grande profondeur d'investigation, mais ne donne pas de renseignements sur les niveaux superficiels. Sept profils sismiques (situation sur la figure 31) ont été réalisés (85 MF 01/03/04/05/06/07/08). Les quatre profils sélectionnés et interprétés pour illustrer la structure géologique du bassin de Saïs (Zizi, 2002) sont représentés sur la figure 33.

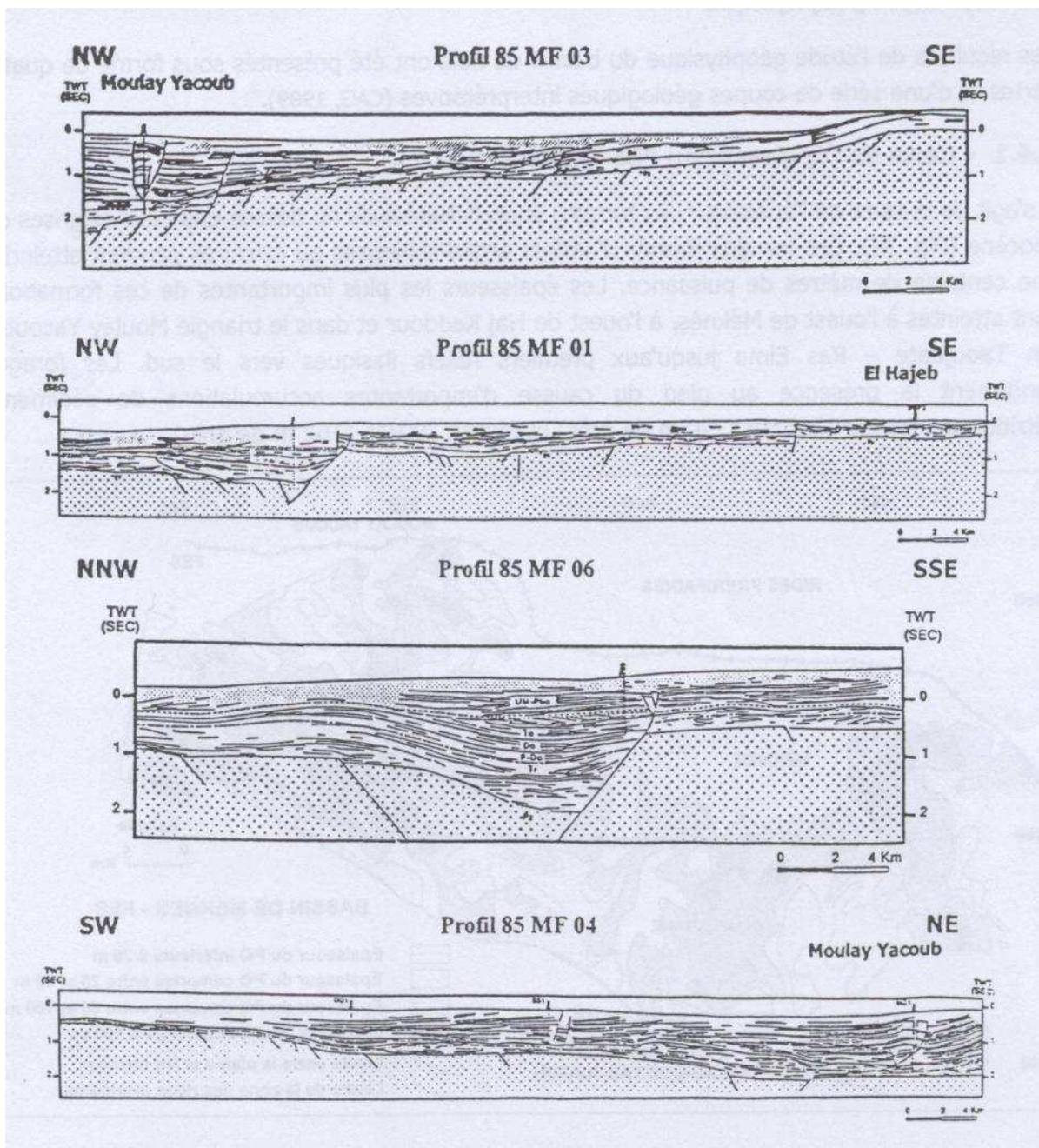


Figure 33 : Profils sismiques interprétés du bassin de Saïs (extrait de Zizi, 2002)

Sur les deux premiers profils de direction NW-SE (MF 03 et MF 01), le plongement vers le nord du socle paléozoïque est bien souligné. Au dessus, des réflecteurs forts sont mis en évidence. Ils correspondent aux différents terrains de recouvrement. Ces derniers semblent s'enfoncer vers le nord, en une série de gradins limités par des accidents qui ont leur origine dans le socle. Un graben spectaculaire d'Aïn Lorma (NNW de la plaine) est bien mis en évidence (profils MF 01 et MF 06). Il est le siège d'un développement remarquable de la sédimentation néogène.

Certains accidents sub-verticaux qui affectent le substratum se poursuivent très haut dans le Miocène (cas à Moulay Yacoub). Cela signifie que les mouvements tectoniques en particulier à proximité du Pré-rif se sont manifestés pendant l'ensemble du Miocène et se sont probablement poursuivis dans le Quaternaire.

4.4 - Synthèse géophysique

Les résultats de l'étude géophysique du bassin du Saïs ont été présentés sous forme de quatre cartes et d'une série de coupes géologiques interprétatives (CAG, 1989).

4.4.1 - Carte de l'épaisseur du Plio-Quaternaire

Il s'agit de la carte de l'épaisseur des terrains superficiels situés au dessus des marnes grises du Miocène (Fig. 34). Ces terrains formés d'assises argilo-sableuses ou calcaires peuvent atteindre une centaine de mètres de puissance. Les épaisseurs les plus importantes de ces formations sont atteintes à l'ouest de Méknès, à l'ouest de Haj Kaddour et dans le triangle Moulay Yacoub - Aïn Taoujdate - Ras Elma jusqu'aux premiers reliefs liasiques vers le sud. Les forages confirment la présence au pied du causse d'importantes accumulations de sédiments détritiques : forage 1225/15 (239 m de grès) et forage 290/15 (162 m de grès).

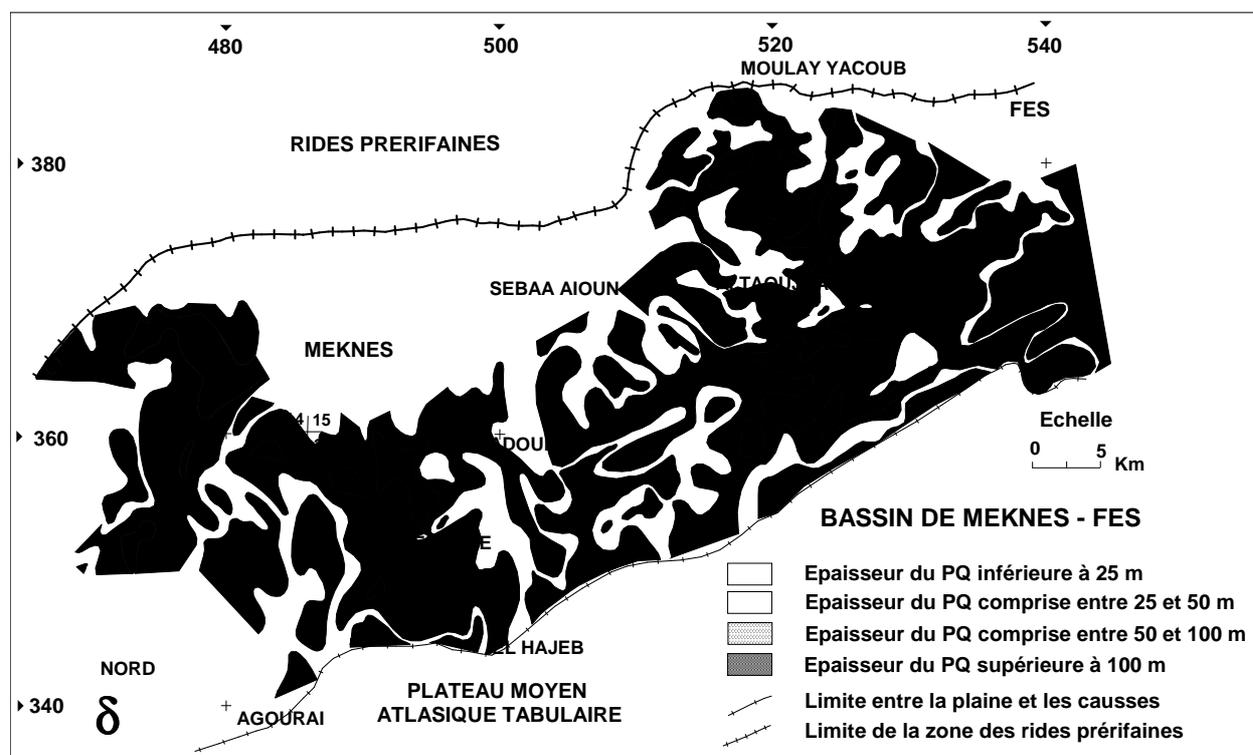


Figure 34 : Carte de l'épaisseur du Plio-Quaternaire (CAG, 1989 redessinée)

4.4.2 - Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire

Cette carte (Fig. 35) a été déduite de la précédente, en retranchant à l'épaisseur totale du Plio-Quaternaire la frange non saturée, déduite de la carte piézométrique de 1984. La partie Est du bassin comporte plus de secteurs où l'épaisseur de l'aquifère superficiel est supérieure à 50 m. Les épaisseurs saturées fournies par le document doivent être revues à la baisse, et ceci en raison de la sécheresse qui est responsable d'une baisse généralisée de la nappe depuis plus de deux décennies.

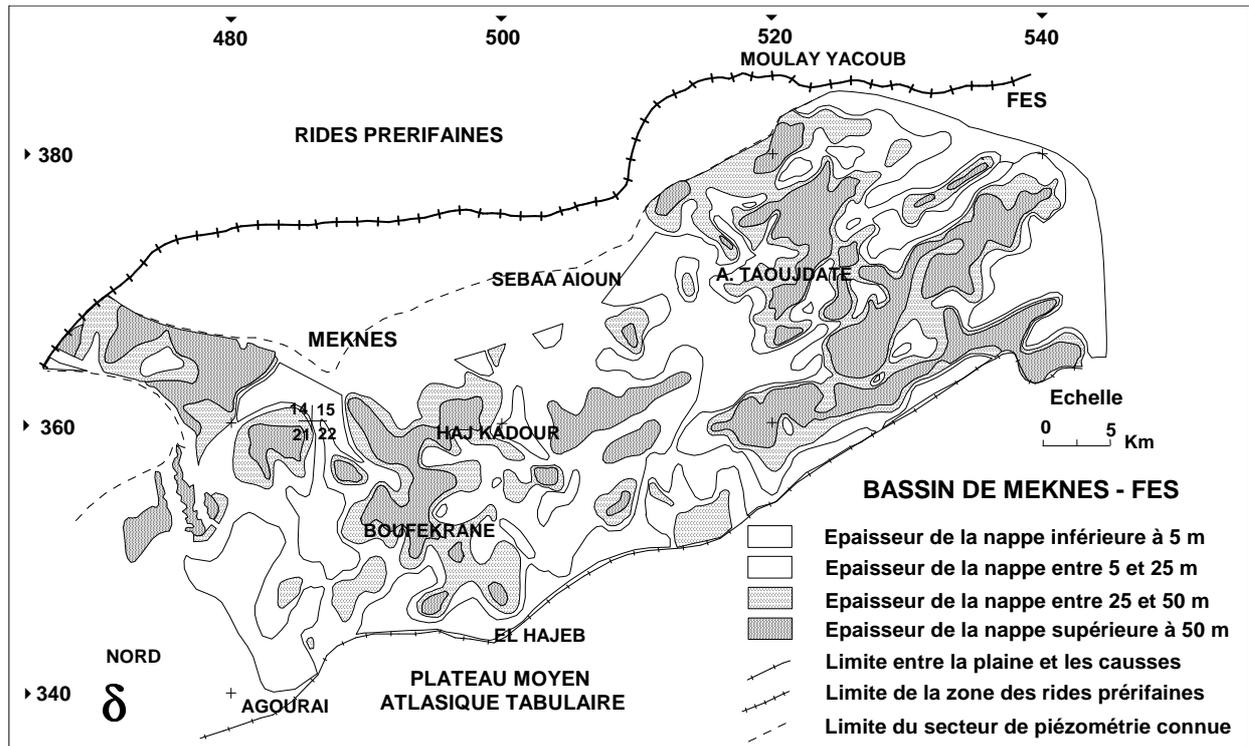


Figure 35 : Carte de l'épaisseur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire (CAG, 1989 redessinée)

4.4.3 - Carte de l'épaisseur des marnes miocènes

La figure 36 extraite du rapport CAG de 1989 fournit des courbes d'égales valeurs de l'épaisseur de l'ensemble conducteur attribué au Miocène. On note un épaissement graduel des marnes depuis le Causse au Sud, jusqu'au Nord où la série marneuse peut dépasser 1000 m d'épaisseur. C'est le cas au Nord de l'axe Aïn Taoujdate - Fès.

4.4.4 - Carte du toit du substratum résistant

La figure 37 correspond à la carte du toit du substratum résistant assimilable la plupart du temps aux calcaires dolomitiques du Lias et parfois aux grès et schistes du Permo-Trias. La carte fait ressortir la complexité structurale du bassin. De nombreuses discontinuités à valeur de failles le découpent en panneaux soit relevés soit effondrés. Les directions privilégiées de ces accidents sont soit ENE-WSW, soit sensiblement NS ou N-NW.

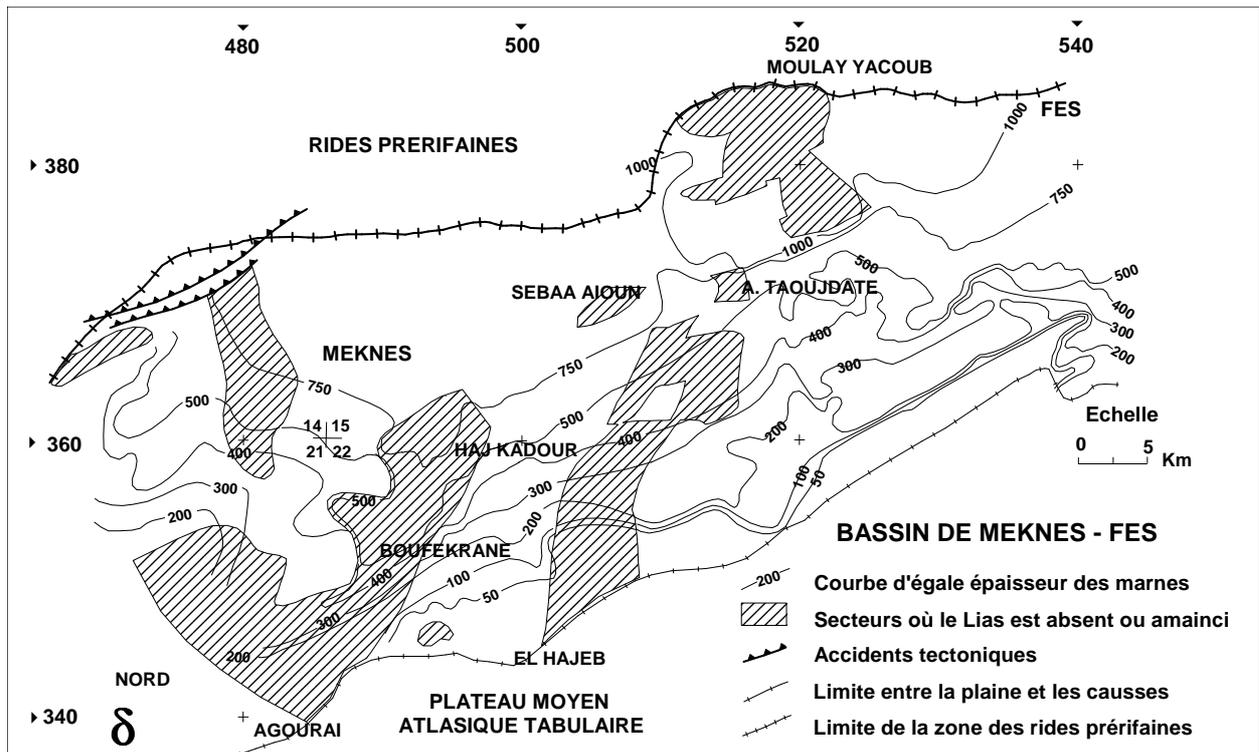


Figure 36 : Carte de l'épaisseur des marnes miocènes (CAG, 1989 redessinée)

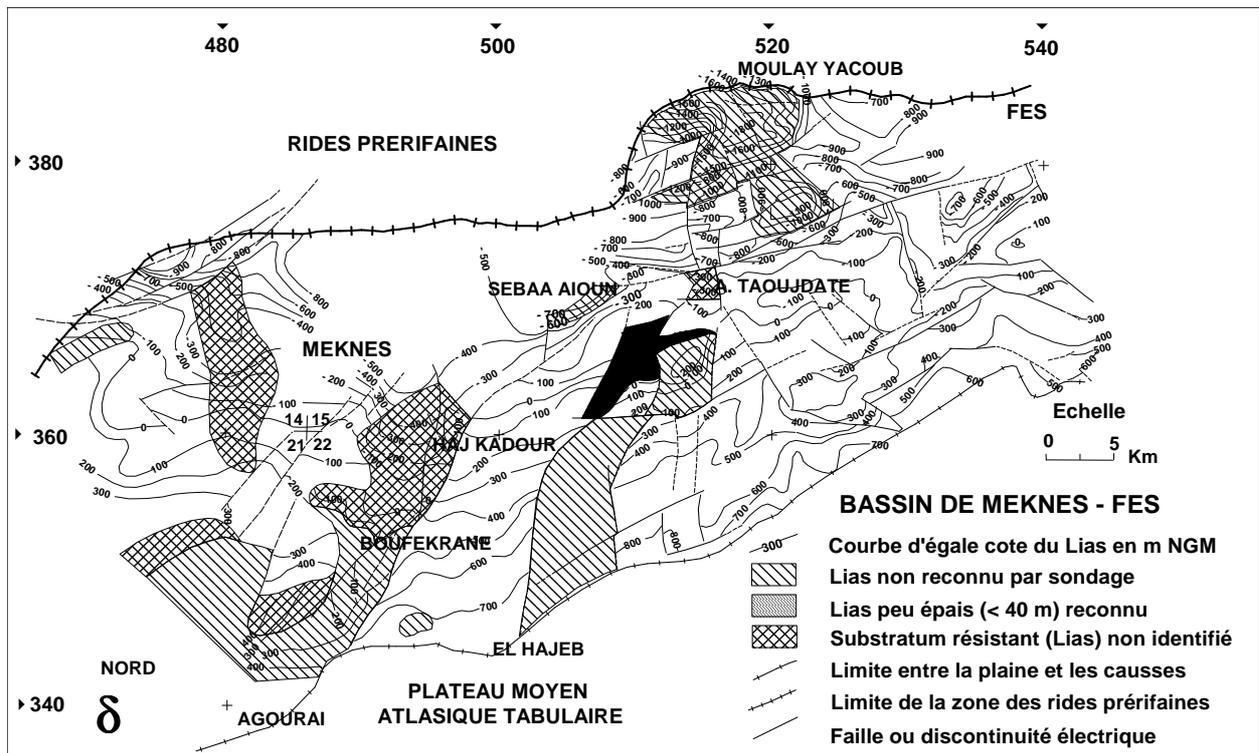


Figure 37 : Carte du toit du Lias (CAG, 1989 redessinée)

Le bassin du Saïs apparaît comme un large graben se développant depuis le Causse au Sud en direction du Nord et de l'Est. Une tectonique cassante et complexe vient perturber localement le plongement au Nord des assises calcaires ou schisto-gréseuses. C'est le cas en particulier entre Aïn Taoujdate et Moulay Yacoub.

Sur la carte des trames ont été utilisées pour identifier des secteurs, où le substratum résistant ne correspond pas nécessairement aux formations liasiques. Il s'agirait :

- * soit d'une aire d'effondrement du Lias, au dessus duquel se développeraient les faciès continentaux du Lias supérieur reconnus par forages (zone au NW de Méknès) ;
- * soit de secteurs bien individualisés où la présence des calcaires est incertaine. Ces aires correspondraient à des zones d'érosion des formations liasiques (absence ou amincissement) ;
- * soit des aires intermédiaires, où la nature du substratum résistant est indéterminée. Le substratum permo-triasique semble ici le plus probable.

L'ensemble de ces plages 'surchargées' correspond à des zones de fortes conductances longitudinales qui traduisent un surcreusement local du substratum résistant qui peut avoir deux origines :

- * l'érosion partielle ou totale des formations du Lias. Dans ce cas, le résistant permo-triasique se substitue au Lias et les formations argileuses du Miocène et du Trias sont indissociables ;
- * la présence de panneaux effondrés ayant favorisé des dépôts tertiaires très épais. C'est le cas du forage 1929/15 localisé près de l'intersection des profils sismiques MF 03 et 04.

4.4.5 - Coupes géologiques interprétatives

La figure 38 montre la situation des différentes coupes géologiques interprétatives qui permettent de visualiser d'une part les relations existant entre le Causse calcaire au Sud et les formations du bassin au Nord, et d'autre part de préciser la nature des contacts éventuels (failles) entre les formations aquifères profondes et les horizons superficiels.

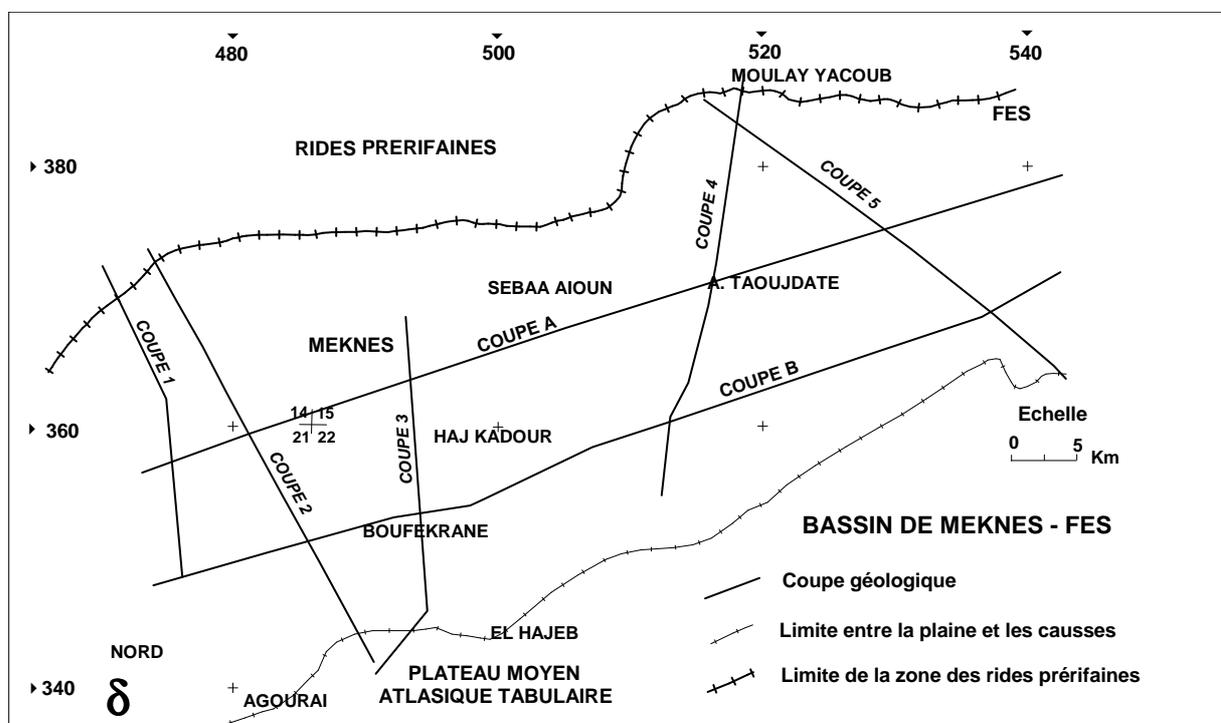


Figure 38 : Situation des différentes coupes géologiques interprétatives (CAG 1989, redessinée)

Coupes longitudinales (ENE-WSW)

La figure 39 montre les deux coupes longitudinales A et B qui ont été établies à partir des coupes lithologiques des forages, des données géologiques de surface et des résultats de l'interprétation des mesures géophysiques. On peut relever les points suivants :

- Cinq ensembles de terrains d'épaisseurs différentes se mettent en relief : le socle paléozoïque, l'ensemble permo-triasique, l'ensemble liasique, l'ensemble miocène et l'ensemble plio-quadernaire ;
- Un découpage des terrains par failles perpendiculaires ou obliques sur le profil qui sont, soit fossilisées par les terrains miocènes soit fossilisées par les terrains plio-quadernaires ;
- On distingue parfaitement les structures en horsts et grabens ou en héli-grabens, parfois basculés, affectant le substratum du bassin, avec les secteurs d'amincissement ou de disparition des formations liasiques ;
- Suivant les panneaux, les formations peuvent être plus ou moins représentées ;
- Certaines failles mises en évidence sur les profils sismiques coïncident avec l'emplacement des failles NE-SW ayant affecté le Quadernaire ancien. Il est évident qu'il s'agit d'anciennes failles qui ont rejoué au Quadernaire.
- Les formations aquifères superficielles s'amincissent en général d'Est en Ouest ;
- On note la relation par failles entre quelques sources du bassin et l'aquifère liasique profond. La coupe A le montre sans ambiguïté au niveau de la source thermique de Sidi Harazem à l'Est. Les accidents du socle peuvent se répercuter jusque dans le Miocène, voire le Quadernaire récent ;
- Les coupes A et B montrent clairement les relations structurales existant entre les panneaux de l'Haj Kaddour et de Méknès à l'Ouest de la faille de Boufekrane ;
- Du point de vue hydrogéologique, ces relations géométriques peuvent expliquer les différences de niveau hydrodynamique enregistrées entre ces panneaux. Au niveau de la coupe A, située au Nord du bassin, la relative continuité des formations liasiques dépend de l'épaisseur affectée au Lias de part et d'autre de l'accident situé à l'aplomb de l'oued Regraga. Cette épaisseur n'est pas connue par forage et peut être plus réduite que celle représentée sur la coupe, entraînant ainsi une discontinuité hydraulique par faille à ce niveau.

Coupes transversales (trois NW-SE à NNW-SSE, une N-S et une NNE-SSW)

La figure 40 illustrant les coupes sub-méridiennes montre l'approfondissement rapide du bassin vers le Nord et la complexité structurale au niveau des formations anté-miocènes. L'ensemble des terrains miocènes s'épaissit vers le Nord et l'ensemble des terrains liasiques subit des saccades par failles normales à regard nord.

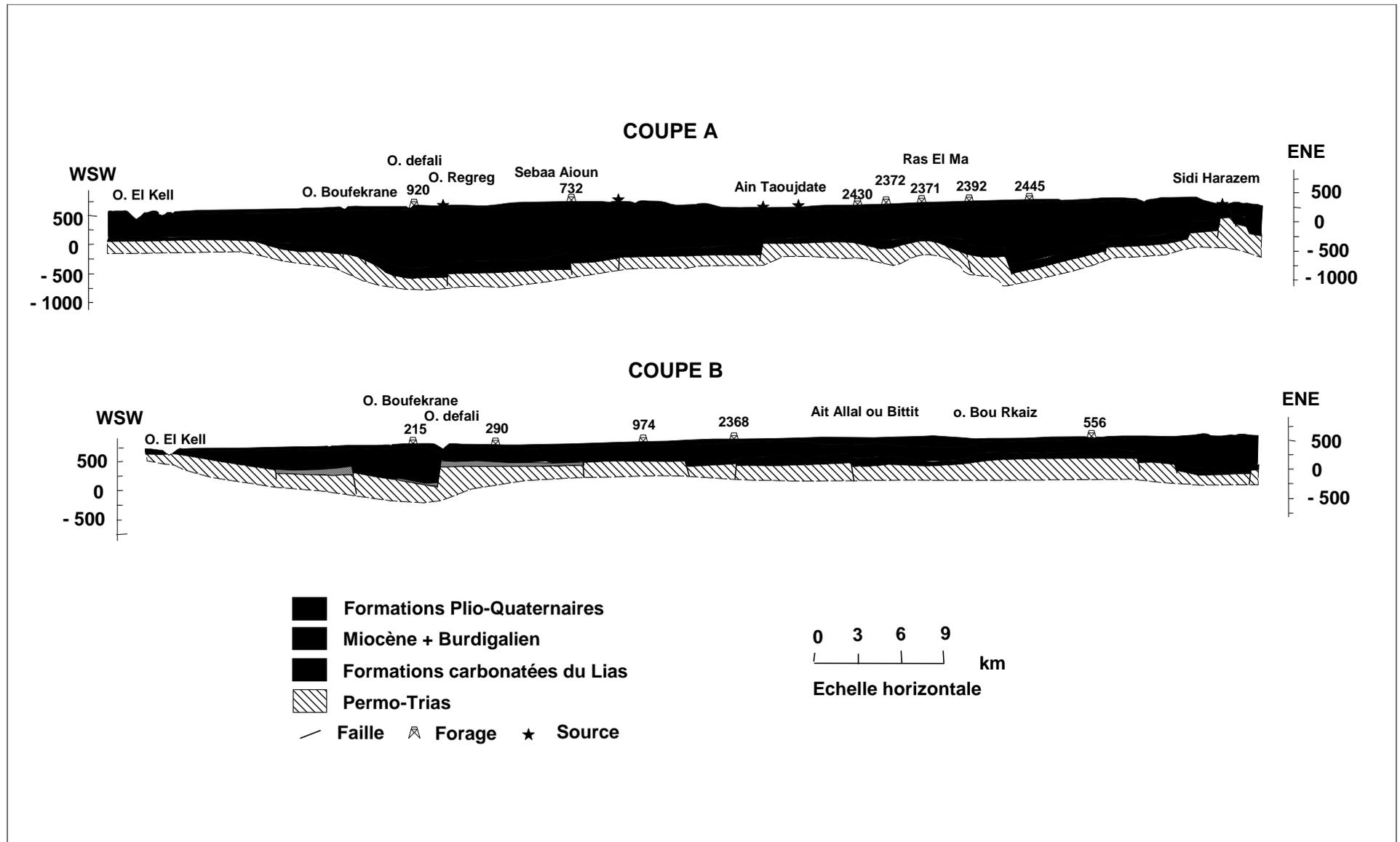


Figure 39 : Coupes longitudinales A et B le long du bassin du Saïs (CAG, 1989 redessinées)

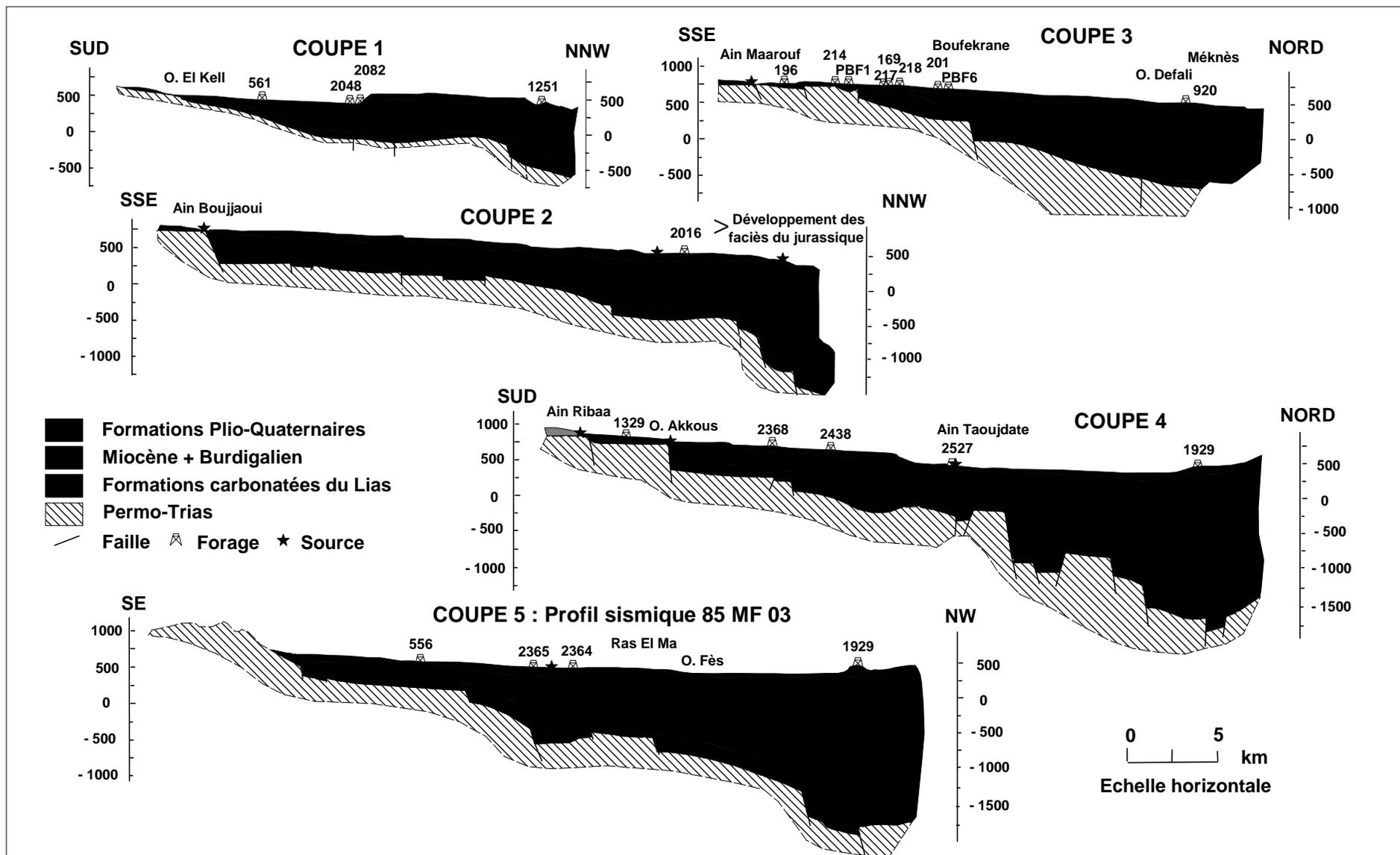


Figure 40 : Coupes transversales de 1 à 5 le long du bassin du Saïs (CAG, 1989 redessinée)

Les failles à l'origine de l'édification du bassin miocène (failles affectant le Lias) induisent dans le substratum paléozoïco-triasico-liasique des horsts, des grabens et des demi-grabens. Sur les horsts, l'ensemble des terrains liasiques se trouve, par endroits aminci ou absent (Fig. 41). Certaines failles affectant les terrains liasiques et miocènes coïncident avec celles mises en évidence en surface, affectant le Plio-Quaternaire.

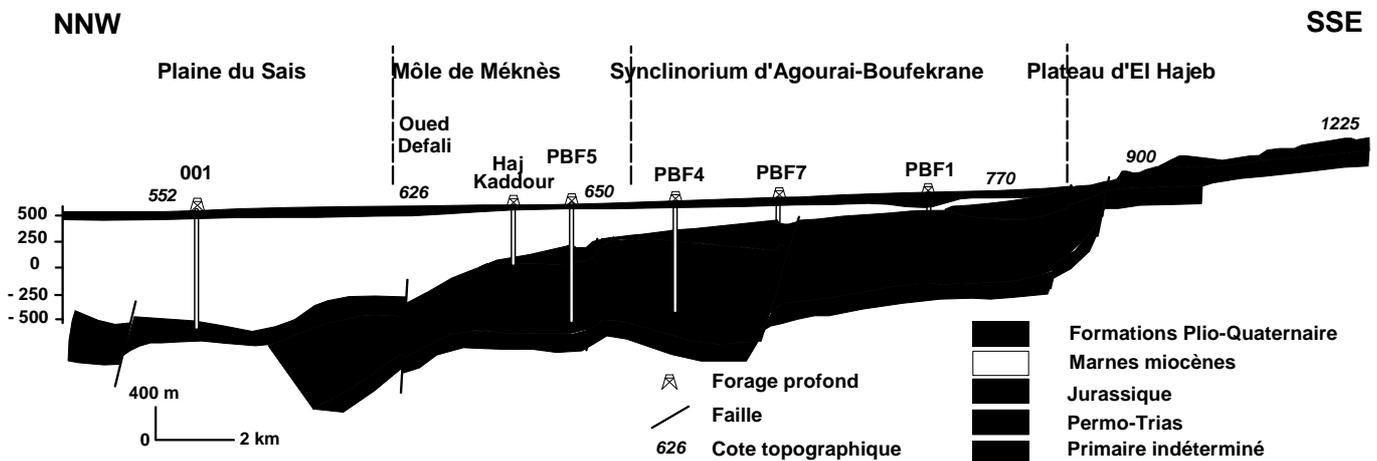


Figure 41 : Coupe géologique schématique entre Méknès et El Hajeb (BRPM, 1965)

Sur les coupes 2, 3 et 4 (Fig. 40) sont représentées les conditions d'exurgence des sources Boujaoui, Maarouf et Ribaa. Elles sont liées à une remontée du socle imperméable permotriasique avec décalage par faille de l'aquifère liasique.

Dans la partie Nord de la coupe 2 (Fig. 40), on observe bien le décrochement en marches d'escalier du graben de Zerhoun et le développement parallèle des faciès détritiques continentaux du Lias supérieur. Autre point remarquable : la probable prolongation de certains accidents majeurs jusque dans le tertiaire, vers le Nord de la plaine et à proximité des rides du Pré-rif (coupes 4 et 5).

4.5 - Conclusion

La confrontation des données de forage avec les différentes reconnaissances géophysiques réalisées sur le bassin du Saïs permet de tirer les conclusions suivantes :

- * Sous les formations superficielles plio-quaternaires dont l'épaisseur moyenne peut être estimée à 50 m, se développe une large assise marneuse dont la puissance peut dépasser 1000 mètres au Nord du bassin. Ces marnes peuvent contenir des passées sableuses ou gréseuses et leurs bases comprennent généralement une mollasse, témoin de la transgression miocène.

- * La transgression s'est avancée le plus souvent sur un substrat de nature carbonatée plus ou moins épais du Lias, mais également, par endroits sur les formations argileuses ou basaltiques du Trias ou schisto-gréseuses du Paléozoïque.

* Les formations à prédominance dolomitique qui affleurent sur le Causse, s'enfoncent vers le Nord, en une série de gradins limités par des accidents sub-verticaux de direction SW-NE. Au Nord d'une ligne reliant les centres de Ras El Ma, Aïn Taoujdate, Haj Kaddour, il y a eu formation d'un véritable graben avec remplissage miocène essentiellement marneux. A ce niveau, les accidents sub-verticaux traversent toute la série y compris le Miocène.

Les reconnaissances géophysiques ont apporté une bonne connaissance sur la géométrie de l'aquifère superficiel et de l'aquifère profond. Le degré de précision des différents documents produits dépend de la densité des données disponibles à l'époque et des limites propres aux différentes méthodes de prospection utilisées.

SYNTHESE DE LA DEUXIEME PARTIE

Sur le **plan géologique**, le secteur d'étude comprend au sud un domaine montagneux qui fait partie du Moyen Atlas tabulaire à faciès essentiellement carbonaté d'âge mésozoïque, et comprend au nord le bassin de Saïs qui appartient au sillon sud-rifain. Le bassin est considéré dans son ensemble comme un vaste synclinal dissymétrique de direction E-W à remplissage tertiaire qui s'enfoncé progressivement du sud vers le nord, et se redresse brusquement au contact des rides pré-rifaines.

Sur le **plan lithologique**, le bassin de Saïs est une structure sédimentaire dans laquelle on rencontre les terrains suivants de bas en haut :

- **le Paléozoïque** essentiellement silico-clastique, pélitique et grésopélitique ;
- **le Trias** reposant en discordance angulaire sur le Paléozoïque et est composé d'argiles et de grès rouges dans lesquels abondent les coulées basaltiques ;
- **le Jurassique** représenté par le Lias à matériel calcaire et calcaire dolomitique, massif ou bréché ;
- **le Burdigalien** représentant la base du Néogène composée d'un matériel grossier et détritique ;
- **le Miocène** composé d'une puissante formation marneuse à Foraminifères datée du Tortonien, surmontée par des marnes messiniennes, localement sableuses et gréseuses ;
- **le Pliocène** comprenant de bas en haut des marnes à matrices carbonatées d'âge pliocène inférieur, des sables fauves, des calcaires lacustres et des sables et travertins ;
- **le Quaternaire** à dépôts hétérogènes et variables spatialement, composés de limons, de sables, de calcaires, de travertins et de coulées basaltiques.

L'étude structurale a montré que l'histoire tectono-sédimentaire du bassin de Saïs s'intègre dans l'évolution des domaines montagneux encadrants, en particulier celle du domaine rifain. Trois phases tectono-sédimentaires sont distinguées :

- une première phase d'âge **Tortonien**, responsable des émergences locales des rides pré-rifaines et le début de l'ouverture du bassin de Saïs suivant une distension orientée NW-SE ;
- une seconde phase d'âge **Tortonien supérieur - Messinien** qui va accentuer l'individualisation du bassin de Saïs le long des accidents NE-SW. Les rides pré-rifaines sont totalement émergées et la mer se retire définitivement du Pré-rif ;
- une troisième phase d'âge **Plio-Quaternaire** dont la caractéristique principale est la compression de direction N-S affectant les calcaires lacustres. Le bassin de Saïs, le Pré-rif et les rides sud-rifaines sont en surrection, alors que la plaine est restée en subsidence.

L'analyse de la fracturation affectant le Causse d'El Hajeb-Ifrane a montré que les deux directions orthogonales N45° et N145° peuvent être considérées comme les deux principales directions de fracturation de ce secteur. La direction sub-méridienne est également présente, notamment d'après le nombre de linéaments. Ces mêmes orientations se retrouvent dans le domaine rifain et au niveau du bassin de Saïs.

La tectonique quaternaire est à l'origine de la morphologie actuelle du bassin de Saïs. En effet, pendant le Quaternaire, l'activité tectonique du bassin de Saïs se manifeste aussi bien dans ses bordures nord et sud, qu'à l'intérieur du bassin :

- au contact des massifs des rides pré-rifaines, l'activité tectonique du Quaternaire ancien se manifeste par des failles normales à regard sud et à rejets parfois importants ;
- au contact des Causses moyen atlasiques, une falaise continue, souvent importante domine la plaine. Les dénivelés réalisés au cours du Quaternaire ancien varient de 80 à 200 m ;
- dans le Saïs, le réseau d'accidents est dense et complexe jouant un rôle essentiel dans l'organisation de l'espace. Dans le Saïs de Fès, les linéaments tectoniques s'ordonnent en une sorte d'éventail. Dans le Saïs de Méknès, les linéaments tectoniques constituent le prolongement septentrional des accidents hercyniens affectant le Paléozoïque du massif central. Le plateau de Tiniza-Aït Zaouit et le talus d'Aïn Taoujdate sont les seuls traits tectoniques qui se traduisent par des talus vigoureusement individualisés dans la topographie de la plaine.

La synthèse des reconnaissances géophysiques du bassin du Saïs a permis de préciser la structure profonde de la plaine. En effet, les résultats des prospections surtout électriques, mais également sismiques, ont permis de dresser quatre cartes ainsi qu'une série de coupes géologiques interprétatives, apportant une bonne connaissance de la géométrie de l'aquifère superficiel et de l'aquifère profond. La nature lithologique et la variation spatiale des différentes formations ont été identifiées. Les reconnaissances ont montré que les terrains dolomitiques du Lias affleurant sur le Causse, s'enfoncent vers le Nord, en une série de gradins limités par des accidents sub-verticaux de direction NE-SW.

TROISIEME PARTIE :

HYDROGEOLOGIE DE L'AQUIFERE LIASIQUE

CHAPITRE 1 – PRESENTATION DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

CHAPITRE 2 - ELABORATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

CHAPITRE 3 – EXPLOITATION DU SIG POUR L'ELABORATION DES CARTES STRUCTURALES

CHAPITRE 4 – EXPLOITATION DU SIG POUR L'ELABORATION DES CARTES HYDRODYNAMIQUES

CHAPITRE 5 – ESSAI DE BILAN DE LA NAPPE PROFONDE

SYNTHESE DE LA TROISIEME PARTIE

CHAPITRE 1 – PRESENTATION DU CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Dans la région du Saïs, on distingue deux réservoirs aquifères :

- Une nappe phréatique libre qui se développe au niveau de la plaine dans des formations du Plio-Quaternaire ;
- Une nappe profonde qui circule principalement dans les formations carbonatées du Lias. Cette nappe est libre au niveau du Causse et s'enfonce ensuite sous les terrains imperméables du Tertiaire qui la mettent en charge sous la plaine.

Cette étude s'intéresse à l'aquifère liasique dont la structure, le mode de fonctionnement et les caractéristiques hydrogéologiques sont encore mal connus. La multiplication du nombre des forages profonds et leur assez bonne répartition à travers la zone d'étude, justifient actuellement un travail de synthèse permettant d'apporter une information plus précise sur : la géométrie du magasin, les modalités d'écoulement et l'importance des réserves.

Au préalable, nous allons présenter, d'une manière succincte, les principales caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle, qui communique par endroits (directement par des flexures et des failles ou indirectement par drainage) avec la nappe profonde du Lias.

1.1 – Nappe phréatique du bassin du Saïs

A cause de sa proximité et de la simplicité de sa structure, cette nappe est assez bien connue. Elle a été largement étudiée depuis plusieurs décennies déjà. La carte hydrogéologique du bassin de Méknès-Fès au 1/100 000 publiée par J. Margat en 1960 constitue un document de base pour la reconnaissance de cet aquifère superficiel. Par la suite, un bilan général des ressources en eau du bassin a été élaboré dans le cadre du projet d'aménagement du bassin du Sebou (G. Chapon, J. Chamayou, C. Leclerc, 1968). Ce bilan a été affiné et actualisé dans le cadre du plan directeur intégré d'aménagement des bassins de Sebou - Bou Regreg et d'Oum Erbia (DRPE, 1984). En 1990, un modèle de gestion des ressources en eau des nappes du bassin du Saïs a été élaboré par la DRPE (Mac Donald et Partners, 1990). Cette nappe phréatique du Plio-Quaternaire a été reconnue par plusieurs forages, puits et sources. Les principales caractéristiques de l'aquifère sont les suivantes :

- **Superficie** : 2100 km².
- **Lithologie** : sables, marnes sableuses, grès, conglomérats et calcaires lacustres.
- **Substratum** : marnes grises du Miocène.
- **Recharge** : infiltration des eaux pluviales, abouchement direct avec la partie libre de la nappe liasique, infiltration des eaux d'irrigation et drainage ascendante à partir de la nappe profonde (Lias) en charge.
- **Décharge** : pompages (agriculture et eau potable), écoulement des sources et drainage par les cours d'eau.
- **Puissance de la nappe** : 10 à 80 m selon les secteurs (épaisseur moyenne = 40 m).

- **Niveaux statiques** : 10 à 50 m selon les secteurs.
- **Débits de production** : 1 à 20 l/s selon les secteurs.
- **Transmissivités** : $2 \cdot 10^{-5}$ à $1 \cdot 10^{-1}$ m²/s. Cette forte variation de la transmissivité est due à l'importance de la variation de l'épaisseur et/ou celle des perméabilités de la nappe.
- **Perméabilités** : $1 \cdot 10^{-5}$ à $5 \cdot 10^{-2}$ m/s. Il s'agit donc d'un milieu très hétérogène.
- **Coefficient d'Emmagasinement** : 0.1 à 6.5 %.
- **Piézométrie** : écoulement du SSE vers le NNW avec un gradient moyen de 0.5 %.
- **Historiques piézométriques** : le niveau de la nappe réagit aux épisodes de pluie et l'amplitude de variation saisonnière varie de 1 à 3 m. A l'échelle pluriannuelle, on note une tendance à la baisse depuis le début des années 80 en relation avec la sécheresse et l'exploitation intensive.
- **Qualité et faciès chimique de l'eau** : le résidu sec est généralement inférieur à 0.5 g/l. L'eau est le plus souvent de faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Les eaux sont basiques et incrustantes et la dureté est assez forte (30 à 50 °F). Les températures extrêmes sont de 13 et 23 °c selon la situation et la profondeur de la nappe.
- **Réserve totale** : 650 à 1300 Millions de m³ (sur la base d'un coefficient d'emmagasinement moyen de 1,5 à 3 %)
- **Bilan Hydraulique** : (d'après J. Chamayou, M. Combe, B. Genetier et C. Leclerc, 1975)
 - **Apports annuels** : 296 à 346 Millions de m³/an (dont 62 % à partir de la plaine de Fès et 38 % à partir du plateau de Mèknès)
 - **Décharge** : 275 à 400 Millions de m³/an (dont 66 % au niveau de la plaine de Fès et 34 % au niveau du plateau de Mèknès)

A l'époque de l'établissement de ce bilan, ce dernier était équilibré (entrées = sorties). Actuellement, le bilan est déficitaire car la sécheresse, qui dure depuis 1980, a eu pour conséquence une réduction significative des apports et un recours accru aux prélèvements souterrains pour satisfaire une demande sans cesse croissante en eau. Ce déficit est attesté d'une part par les suivis piézométriques de la nappe (qui marquent une tendance à la baisse) et d'autre part par la forte baisse du débit, voire le tarissement de plusieurs sources.

1.2 – Nappe profonde du Lias

Alimentée par les infiltrations pluviales et navales sur les reliefs du Causse moyen Atlasique, la nappe captive se manifeste par les émergences et les sources de trop plein en bordure du Causse, par les sources des flexures et par les sources hydrothermales du Saïs. Elle est également reconnue et exploitée par des forages, qui dans le Nord sont artésiens et très productifs. La nappe captive s'écoule dans les formations carbonatées du Lias mais également parfois dans une molasse composée de grès, de sables et de conglomérats de la base du miocène transgressif qui surmonte le Lias.

L'existence de l'aquifère profond captif a été révélée pour la première fois en 1931 par le forage pétrolier 1566/15. Les forages de prospection hydrogéologique ont commencé en 1949 et au début de 1985, on comptait 83 forages ayant touché ou traversé le Lias. Ce nombre a été porté à 193 au début de l'année 2002 (sans compter les ouvrages des particuliers). Le Causse moyen Atlasique a été reconnu également par plusieurs dizaines de forages, notamment durant la dernière décennie où le programme d'alimentation en eau potable du monde rural (PAGER) a été lancé. L'ensemble de l'information collectée a permis de constituer une base de donnée et d'élaborer un SIG qui, permettra d'avoir une meilleure connaissance de la géométrie et du fonctionnement hydraulique de cet aquifère profond.

1.3 – Approche de la géométrie du bassin à partir des données des forages

Une base de données comprenant environ 409 forages profonds intéressant l'ensemble du secteur d'étude a été constituée au cours de ce travail de recherche (le détail des informations recueillies figure au paragraphe 2.3 de la présente partie).

Certains de ces forages ont permis de dresser des coupes lithologiques (Fig. 42) qui donnent une idée assez précise sur la géométrie du bassin du Saïs. Ces coupes sont complémentaires de celles obtenues au niveau de la synthèse des reconnaissances géophysiques.

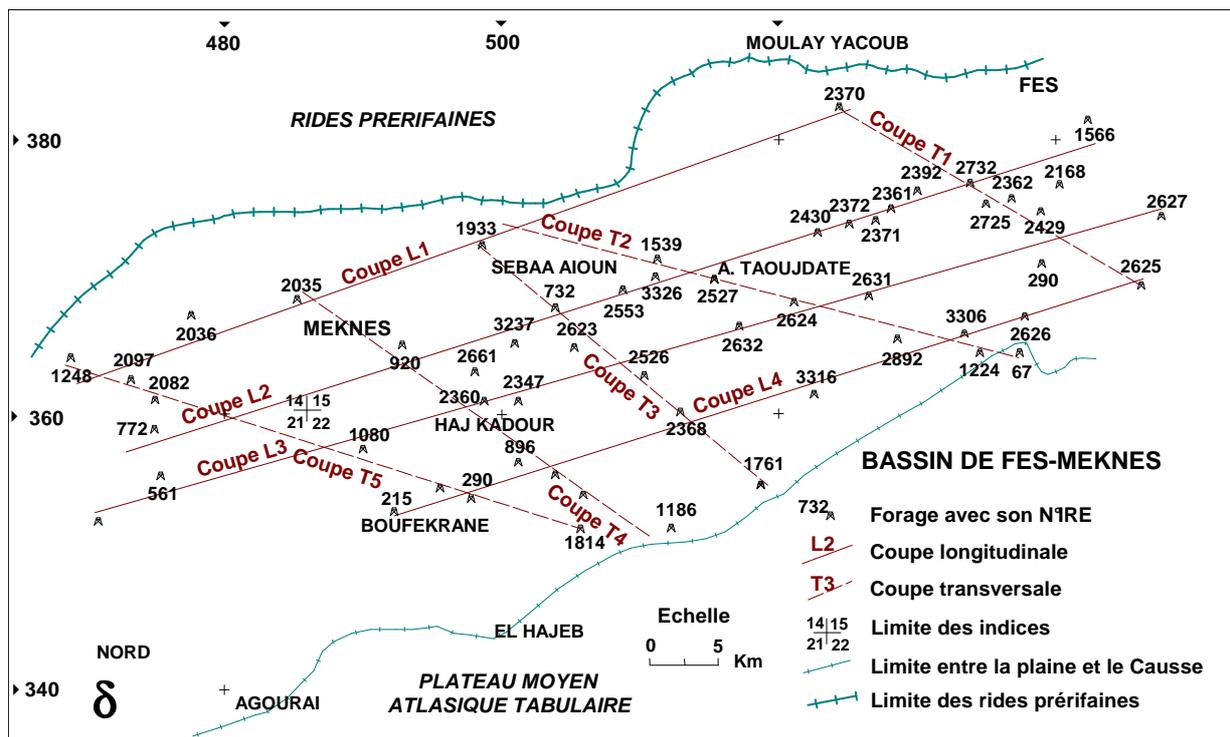


Figure 42 : Carte de la situation des coupes lithologiques du bassin du Saïs

1.3.1 - Coupes longitudinales

Quatre coupes de direction WSW-ENE ont été élaborées (Fig. 43). Elles permettent de préciser et de confirmer les connaissances acquises par la géophysique, à savoir : une individualisation des panneaux (en horsts, en grabens ou hémi-graben), une variation des épaisseurs des formations d'un panneau à l'autre, une forte remontée du socle paléozoïque entre El Hajeb et Aïn Taoujdate (môle primaire) responsable de l'amincissement du Lias voire sa disparition par endroits et le fort développement des faciès jurassiques à l'extrême Est (plaine de Fès).

1.3.2 - Coupes transversales

Cinq coupes de direction NW-SE à WNW-ESE ont été élaborées (Fig. 44). Elles apportent les informations suivantes : un approfondissement du bassin vers le Nord, un épaissement régulier et rapide des formations marneuses vers le Nord, un basculement des assises liasiques, probablement par failles normales à regard nord, et une variation de l'épaisseur de l'aquifère liasique suivant la position des panneaux.

Conclusion

Compte tenu de l'existence d'une information riche et diversifiée sur le sous sol du secteur d'étude, fournie par les forages, l'élaboration d'une base de données SIG a été adoptée, pour cartographier à l'échelle du bassin du Saïs, les principaux horizons rencontrés jouant un rôle pour l'aquifère liasique.

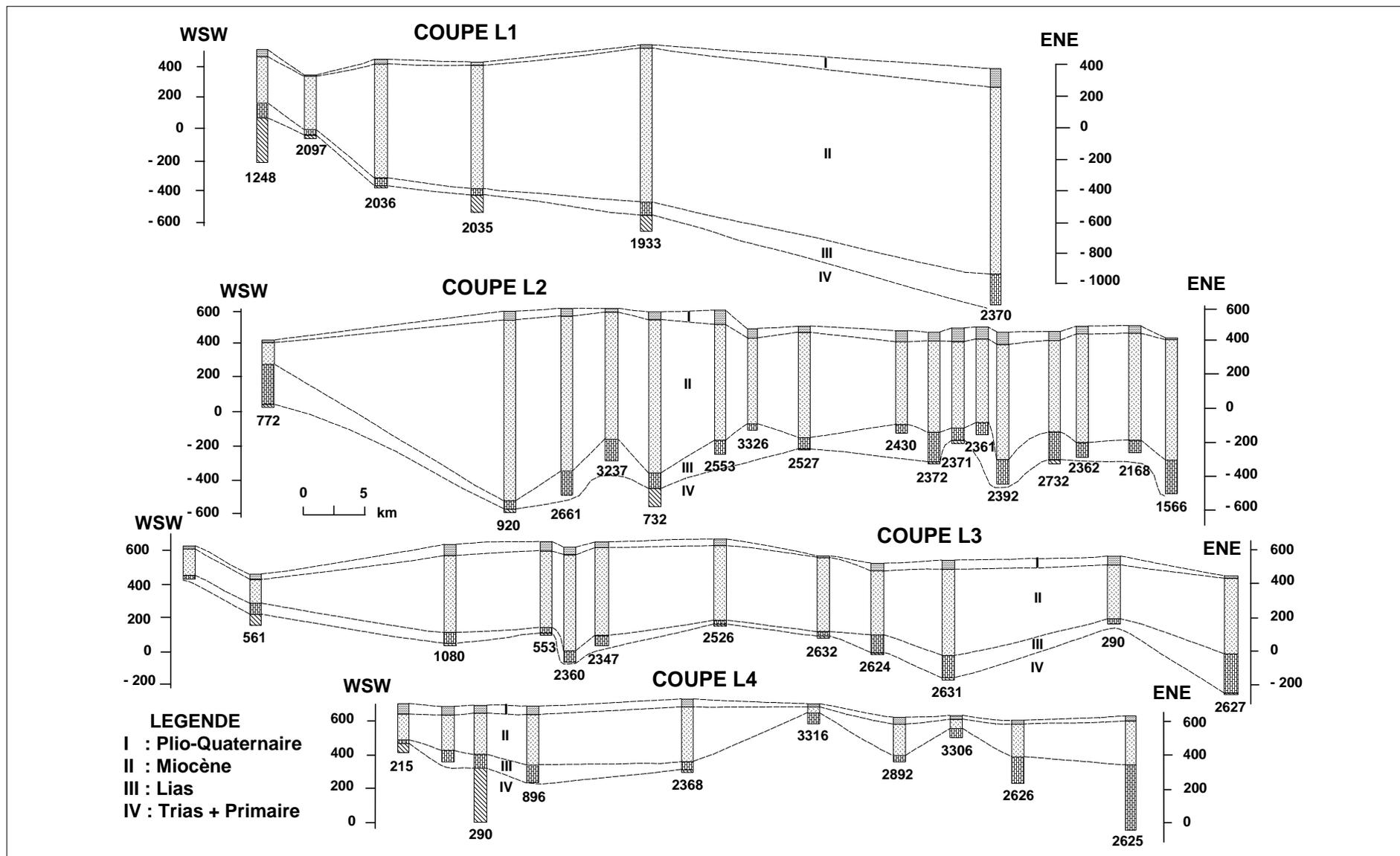


Figure 43 : Coupes lithologiques longitudinales traversant le bassin du Saïs

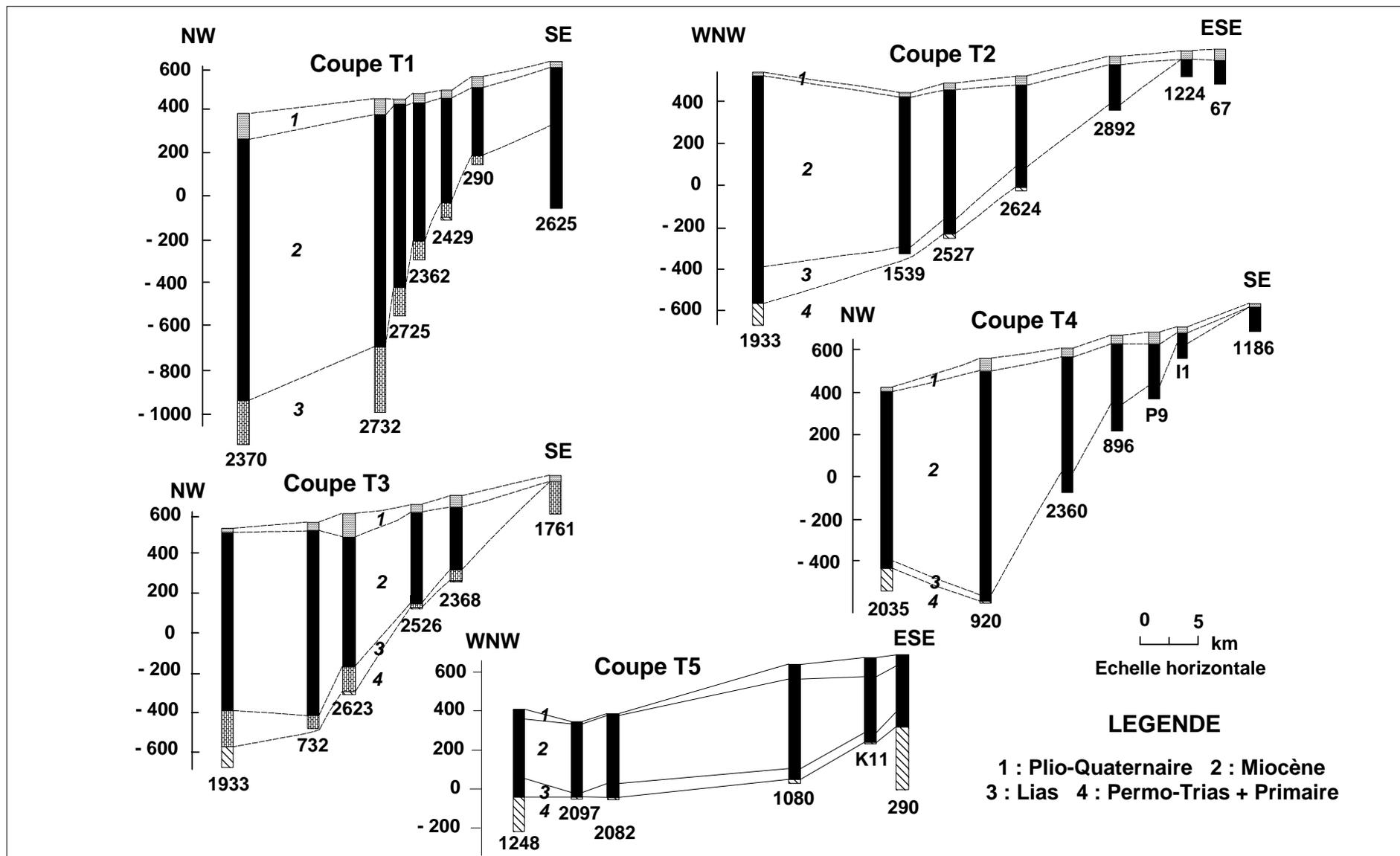


Figure 44 : Coupes lithologiques transversales traversant le bassin du Saïs

CHAPITRE 2 - ELABORATION D'UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

2.1 - Introduction

Dans le cadre de ce travail de recherche, un Système d'Information Géographique (SIG) a été élaboré pour l'important aquifère liasique de la plaine du Saïs et du causse d'El Hajeb-Ifrane. L'aquifère s'étend sur environ 4000 km² et dispose d'une banque de données extrêmement riche. Les informations spatiales et/ou temporelles stockées portent sur les aspects suivants : la géologie, l'hydrologie, le climat, la géophysique, la qualité des eaux, les données de forages, la piézométrie ... Une synthèse actualisée de l'ensemble des données portant sur la ressource en eau souterraine a permis de constituer une base de données géo-référencée, permettant une recherche rapide et précise de l'information sur ce réservoir d'eau relativement riche. Un certain nombre de documents cartographiques a été élaboré, en vue d'une meilleure identification de la géométrie du réservoir et des modalités d'écoulement. L'exploitation de ce SIG permettra également :

- L'optimisation des résultats des futurs travaux de reconnaissance de la nappe ;
- La réponse aux requêtes des différents utilisateurs de l'eau souterraine ;
- L'orientation du choix des sites des activités soit d'exploitation, soit de rejet (décharges, industries, eaux usées..) ;
- La rationalisation de la gestion des ressources en eau en général.

2.2 – Généralités sur les SIG

2.2.1 – Définition et fonctions d'un SIG

Un SIG peut se définir comme un système informatique d'acquisition, de stockage, de gestion, d'analyse, de représentation et de mise à jour des données géo-référencées. Au sens large, le SIG comprend aussi bien l'ensemble des données géographiques numérisées relatives à une région, que le logiciel qui les manipule. Au sens restreint du terme, le SIG désigne le seul outil informatique utilisé (Didon, 1990).

Le SIG est une technologie relativement nouvelle apparue au début des années 1980 et a connu un développement rapide du fait de ses performances. Il constitue en fait un outil puissant d'aide à la prise de décision par la qualité et la rapidité des réponses qu'il fournit aux requêtes formulées par l'utilisateur. L'utilité du SIG dans le cadre de la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau souterraine a été discutée par Vassilos et al. (1996), Sakho (1998), Sinan (2000).

Les logiciels de SIG sont relativement nombreux (Arc Info, Arc View, MapInfo, Idrisi, Synergis..). Le logiciel MapInfo a été choisi en raison de sa relative facilité d'utilisation et pour le fait qu'il soit opérationnel sur des ordinateurs du type PC.

2.2.2 – Composantes d'un SIG

Le cœur d'un Système d'Information Géographique est constitué par la base de données géographiques (BDG), composée de deux éléments (Collet, 1992) :

- Une base de données décrivant les objets spatiaux (cartes) ;
- Une base de données alphanumériques (attributs) définissant les caractéristiques thématiques (profondeur de l'eau, cote du substratum, productivité...) des objets spatiaux.

Autour de cette base de données gravite un ensemble de systèmes informatiques avec lesquels elle est en interaction. Chaque système a une fonction précise au sein du SIG (Didon, 1990) :

- **Le système de saisie numérique** : permet de saisir les documents à caractère spatial (telles que les cartes topographiques, géologiques..) et de convertir l'information analogique en une information numérique. Les bases de données alphanumériques (attributs) peuvent être directement saisies dans de nouvelles tables du SIG ou importées à partir d'autres logiciels (Excell, Access, Dbase...).
- **Le système de traitement d'images** : les images qui ne peuvent être digitalisées (photos aériennes, satellitaires, etc.) peuvent être scannées et calées : attribution de coordonnées (x, y) à chaque point de l'image dans le type de projection correspondant à la zone étudiée.
- **Le système de gestion de la base de données** : un SIG contient non seulement un SGBD traditionnel (gestion des données thématiques), mais aussi une variété d'outils capables de gérer à la fois les dimensions thématiques et spatiales de l'information. Par exemple, le SGBD permet de répondre à des requêtes formulées par les gestionnaires des ressources en eau souterraine (sélection des données relatives à un secteur donné, combinaisons mathématiques plus ou moins compliquées (profondeur de l'eau – profondeur du substratum...) et de mettre les résultats dans des tableaux, graphiques ou supports cartographiques directement exploitables par l'utilisateur.
- **Le système d'analyse spatiale** : l'analyse spatiale de l'information représente l'outil le plus puissant d'un SIG. Elle constitue une extension des capacités d'interrogation des bases de données traditionnelles, en tenant en compte de la localisation des observations. Ce système permet par exemple de fusionner plusieurs objets selon des critères et des conditions fixés par l'utilisateur, et de créer ainsi de nouvelles tables plus renseignées. Un deuxième exemple consiste à sélectionner les zones de meilleure productivité et les moins vulnérables à la pollution et à mettre les résultats de cette combinaison dans une nouvelle carte. Le système d'analyse spatiale a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographiques. Ainsi, il prélève à la fois de l'information de la BDG et la complète à l'aide des résultats des analyses effectuées.
- **Le système de représentation cartographique** : Ce système permet de sélectionner des éléments de la BDG et de les représenter cartographiquement à l'écran de l'ordinateur ou à l'imprimante.

2.2.3 - Mode de représentation des données géographiques dans un SIG

Il existe deux modes principaux de représentation des données spatiales dans un SIG : le mode raster et le mode vecteur (Collet, 1992). Le mode vecteur permet la représentation des objets dans un espace continu (non discrétisé) : les objets et leurs limites sont digitalisés et leur représentation se fait sous trois formes de base : les points (ex : forages, sources..), les polygones (ex : réseau hydrographique, réseau routier..) et les polygones (ex : limite d'une formation géologique, d'un périmètre irrigué..). Ce mode permet une représentation plus conforme au monde réel. La sortie des documents est d'une grande qualité. Il ne permet pas cependant de faire des calculs entre les différentes couches cartographiques du SIG.

Le mode raster correspond à une division régulière de l'espace étudié en cellules rectangulaires ou carrées (pixel). Il est fortement lié à la notion d'image. Les images satellitaires et les MNT (modèles numériques de terrain) en sont des exemples. Chaque pixel est référencé en ligne et en colonne et contient une valeur correspondant à une grandeur numérique (niveau de l'eau, perméabilité, teneur en nitrates..). Ce mode de représentation est par contre très adapté pour effectuer des calculs entre les différentes couches du SIG, constituées de pixels de même dimension. Les opérations sont effectuées entre chaque pixel de mêmes coordonnées.

Loin de s'opposer, les deux modes de représentation (vecteur et raster) se complètent dans leur utilité pour représenter et modéliser le monde réel.

2.2.4 - Organisation des données géographiques

Dans un SIG, le monde réel est modélisé sous forme de couches d'information séparées, relatives à différents thèmes (ex : réseau hydrographique, nature des sols, faciès géologiques, profondeur de la nappe..). Ces couches (ou couvertures) peuvent être re-combinées pour analyse, pour la création d'un nouveau dossier (contenant l'ensemble des couches combinées) ou simplement superposées pour visualisation ou pour impression. Toutes les couches d'information spatiale sont géo-référencées (définition du lien existant avec la position à la surface de la terre).

2.2.5 – Présentation du logiciel SIG "MapInfo" utilisé

C'est un logiciel de type vecteur développé par Mapping Information Systems Corporation, New York, Etats Unis. La version 4.5 utilisée (licence du Laboratoire d'Hydrogéologie de la Faculté des Sciences de Poitiers, France) est compatible avec Microsoft Windows 98 et fonctionne sur PC.

Ce SIG constitue un outil très performant de cartographie informatisée et offre toute la puissance de traitement des bases de données (y compris de puissantes requêtes SQL). Il constitue aussi un puissant outil d'analyse des données et de leur représentation. MapInfo permet de représenter les données sous forme de points, de lignes, de polygones, de graphiques à barres ou à secteurs. Il permet aussi de faire des opérations géographiques complexes comme la sectorisation, la fusion ou la division des objets et la création de tampons. Cette version permet aussi de faire de multitudes de requêtes et d'accéder à des bases de données distantes (Excell, dBase, FoxBase, Oracle, Access..) sans quitter MapInfo.

2.3 – Présentation du SIG de la nappe du Lias

2.3.1 - Base de données spatiales

Cette base est composée d'un ensemble de documents cartographiques digitalisés directement sur l'écran de l'ordinateur à partir de documents préalablement scannés (après réduction au besoin). Il s'agit des documents suivants :

- Fonds topographiques au 1/50 000, comprenant le réseau hydrographique, le réseau routier, les courbes de niveau, la toponymie et les limites naturelles entre la plaine et le Causse ;
- La carte géomorphologique au 1/100 000 (feuille d'El Hajeb), comprenant les différents modelés géomorphologiques (dépressions karstiques, gorges, cluses, gouffres..) ;
- Fond géologique, établi à partir de la carte géologique d'EL Hajeb au 1/100 000, comprenant les limites des formations géologiques, leur faciès géologique et la fracturation qui les affecte ;
- La carte de situation des différentes campagnes de prospection géophysique réalisées (électrique et sismique), ainsi que toutes les cartes et coupes géologiques interprétatives ;
- La carte de situation des sources

2.3.2 - Base de données thématiques

Cette base de données repose sur un inventaire de 409 forages, dont 328 ouvrages ont atteint ou dépassé le Lias (la liste de ces forages avec leurs coordonnées et leurs profondeurs est en annexe N°2). Les informations ont été organisées et stockées dans un premier temps sous le tableur Excel. Les données suivantes ont été classées par colonnes :

- N°IRE/Indice : numéro d'inventaire des ressources en eau correspondant à un certain indice ;
- Coordonnées : X, Y et Z ;
- Profondeur de l'ouvrage ;
- Date de réalisation de l'ouvrage ;
- Débit de production en l/s, ou débit de l'essai par pompage pratiqué ;
- Pression en bars des forages artésiens ;
- Rabattement en mètres correspondant au débit de production ou de l'essai par pompage ;
- Niveau statique en mètres à la date de réalisation ;

- Température de l'eau en °c ;
- Conductivité de l'eau en $\mu\text{s}/\text{cm}$;
- Profondeur du toit des marnes grises miocènes et également du mur quand il est disponible. Son absence est signalée le cas échéant ;
- Epaisseur des marnes grises en mètres ;
- Côte du toit des marnes grises en mètres NGM ;
- Profondeur du toit du Lias en mètres et également du mur quand il est accessible ;
- Epaisseur du Lias en mètres ;
- Côte du toit du Lias en mètres NGM ;
- Profondeur du toit du Trias en mètres ;
- Côte du toit du Trias en mètres NGM ;
- Nature lithologique de l'aquifère ;
- Transmissivité en m^2/s déduite de l'essai par pompage ;
- Entreprise de forage qui a réalisé l'ouvrage et son usage.

CHAPITRE 3 – EXPLOITATION DU SIG POUR L'ÉLABORATION DES CARTES STRUCTURALES

3.1 – Présentation

Un certain nombre de cartes élaborées à partir de la base de données SIG figure déjà dans les autres chapitres. Il s'agit principalement de la carte géologique, de la carte topographique, de la carte géomorphologique, des différentes cartes géophysiques interprétatives, de la carte de température, de la carte de la conductivité électrique, de la carte des émergences, de la carte du réseau hydrographique, de la carte de la qualité de l'eau, etc..

Dans ce chapitre, seules les cartes relatives à la géométrie du réservoir liasique et de ses caractéristiques hydrauliques seront traitées. Il s'agit des cartes du Trias (substratum), du Lias (réservoir aquifère), du Miocène (couvercle imperméable) et des transmissivités du Lias.

Pour élaborer une carte relative à un paramètre (exemple : débit, conductivité, profondeur, côte..), on procède comme suit : on crée un fichier Excel en sélectionnant tous les forages disposant d'une valeur de ce paramètre avec leurs coordonnées respectives. Ensuite on crée une table MapInfo qui contient tous ces forages sous forme de points disposés selon leurs coordonnées X et Y et selon la projection choisie (Lambert Maroc, Nord). A partir de ce moment deux procédures sont appliquées en fonction de la nature du paramètre et du nombre de données disponibles :

- Si les données sont abondantes et s'il y a un certain lien entre les valeurs (côte du Lias, profondeur du Trias, épaisseur du Miocène, côte piézométrique..), dans ce cas, les données sont traitées avec le logiciel Surfer, afin de tracer des courbes d'égales valeurs du paramètre recherché. Le tracé obtenu est ensuite importé et calé en tant que table avec le programme MapInfo. De cette manière, on peut superposer le tracé des courbes avec celui des valeurs obtenues au préalable. Ensuite, on redessine les courbes sous MapInfo en corrigeant au besoin le tracé obtenu avec Surfer, notamment dans les secteurs où la densité des forages est faible.
- Si le nombre de données est faible et que les valeurs ne sont pas nécessairement liées (épaisseur du Plio-Quaternaire, transmissivités, conductivités..), dans ce cas, une analyse thématique est appliquée sous MapInfo, afin de regrouper les données en classes et leur attribuer un Figuré. Les classes peuvent être choisies, soit en fixant leurs limites, soit en les regroupant par effectifs égaux.

3.2 - Etablissement des cartes du substratum

D'après les coupes lithologiques des forages, le substratum est identifié comme étant le plus souvent des argiles rouges du Trias, mais parfois, au niveau des bordures sud de la plaine, par des formations à prédominance schisteuse attribuées au Paléozoïque.

3.2.1 - Carte de la profondeur du Trias

On dispose à travers la zone d'étude de 79 forages qui ont atteint le substratum triasique. Ces ouvrages ont une profondeur totale qui varie de 45 m au sud à 2288 m au nord. Le Trias est atteint entre 5 m de profondeur au Sud d'El Hajeb (1038/22) et 1094 m au NE de Méknès (1933/15), voire 2115 m près de Moulay Yacoub (1929/15). La carte de la profondeur du Trias (Fig. 45) montre au niveau d'El Hajeb, une espèce de dôme allongé suivant une direction SW-NE où le Trias est porté vers la surface. De part et d'autre de ce dôme, le Trias s'enfonce progressivement mais avec une pente beaucoup plus modérée au sud qu'au nord.

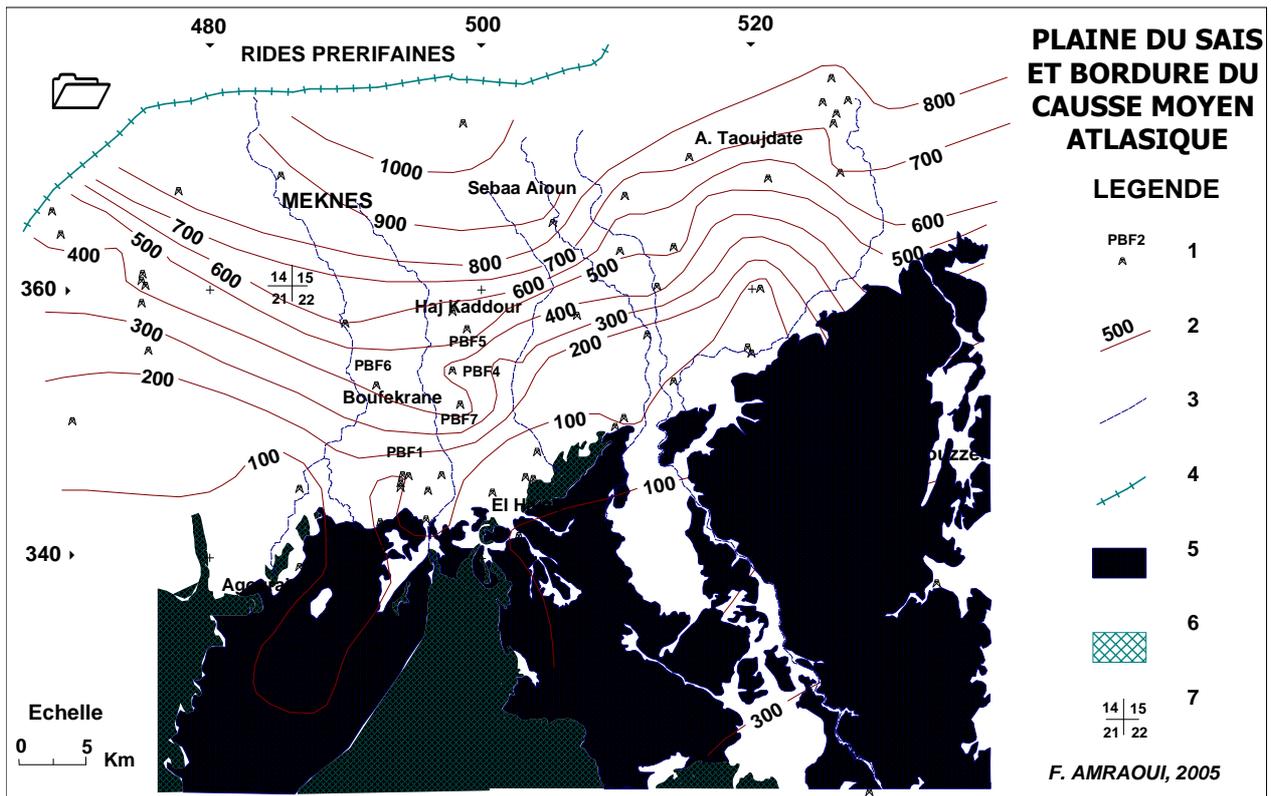


Figure 45 : Carte de la profondeur du Trias

1 : Forage profond 2 : Courbe d'égalité profondeur du Trias 3 : Cours d'eau 4 : Limite des rides pré-rifaines 5 : Lias à l'affleurement 6 : Affleurements du Trias et du Paléozoïque 7 : Limite des indices

Plusieurs forages pétroliers ont été foncés dans le bassin salifère de Boufekrane. Ces ouvrages ont permis de préciser la lithostratigraphie du Trias (Tabl. 9). Au centre du bassin, on rencontre le plus souvent la succession lithologique suivante de haut en bas :

- un niveau supérieur d'argiles rouges à gypse d'une trentaine de mètres d'épaisseur
- un niveau de sel gemme presque pur devenant argileux en profondeur, épais de 190 à 350m
- un niveau basaltique compact, épais de 50 à 180 m
- un niveau salifère inférieur contenant du sel gemme chargé en argile, épais de 20 à 160 m
- un niveau inférieur d'argiles rouges, dont l'épaisseur peut atteindre 90 m.

Forage	X	Y	Z	Prof (m)	Date	Lithologie du Trias
PBF1 ou 914/22	494.5	346.1	775	900	03/57	140 à 170 m : argiles rouges à gypse et anhydrite 170 à 360 m : sel gemme avec bancs d'argile 360 à 543 m : basaltes compacts 543 à 702 m : sel gemme chargé en argile 702 à 792 m : argiles rouges 792 à 875 m : grès fin et conglomérats paléozoïques 875 à 901 m : schistes paléozoïques
PBF2	491.6	339.14	870	603	-	171 à 188 m : zone argileuse et sel gemme 188 à 375 m : basaltes 375 à 538 m : zone salifère inférieure 538 à 603 m : zone argileuse inférieure
PBF4 ou 290/22	497.8	353.85	692	1072	01/58	376 à 407 m : argiles rouges à gypse 407 à 761 m : sel gemme chargé en argile en profondeur 761 à 922 m : basaltes avec bancs de sel gemme 922 à 1041 m : sel gemme 1041 à 1072 m : argiles brun rouge
PBF5 ou 554/22	498.92	356.95	670	1154	12/57	560 à 590 m : argiles rougeâtres gypseuses 590 à 933 m : sel gemme chargé en argile en prof 933 à 1042 m : niveau d'anhydrite avec basaltes 1042 à 1154 m : sel gemme avec peu d'argile
PBF6 ou 916/22	493.7	352.2	710	824	10/50	422 à 447 m : argiles brun rouge à gypse 447 à 460 m : sel gemme
PBF7 ou 917/22	498.4	351.4	720	925	11/58	488 à 518 m : argiles brun rouge à gypse 518 à 798 m : sel gemme avec banc argileux 798 à 843 m : basaltes 843 à 859 m : sel gemme peu argileux 859 à 925 m : argiles rougeâtres

TabL. 9 : Lithologique du Trias d'après les forages pétroliers du bassin de Boufekrane

3.2.2 - Carte du toit du Trias

La carte du toit du Trias (Fig. 46) montre quant à elle un plongement de la surface du Trias en direction du Nord. En effet, la côte du toit du Trias qui est de 1245 m au sud d'El Hajeb (1038/22), atteint – 556 m au nord de Méknès (1933/15), soit un dénivelé d'environ 1800 m sur une distance de 35 km, ce qui correspond à une pente de l'ordre de 5 %. Au niveau du triangle EL Hajeb-Imouzzer-Ifrane, la pente est beaucoup plus modérée, traduisant un replat encadré au niveau de ses limites Est, Ouest et Nord par des pointements.

3.3 – Etablissement des cartes de l'aquifère liasique

3.3.1 - Carte de la profondeur du Lias

Les formations du Lias sont bien connues sur le Causse car elles sont portées à l'affleurement. Une nappe libre rechargée par infiltration des eaux pluviales et nivales s'y développe. Au niveau de la plaine du Saïs, ces formations carbonatées s'enfoncent de plus en plus en allant vers le Nord sous les terrains Mio-Plio-Quaternaires et forment une nappe en charge, devenant artésienne lorsque les marnes miocènes (couverture imperméable) deviennent très épaisses. Elles sont connues à travers les forages de reconnaissance ou d'exploitation dont la répartition sur la plaine est inégale.

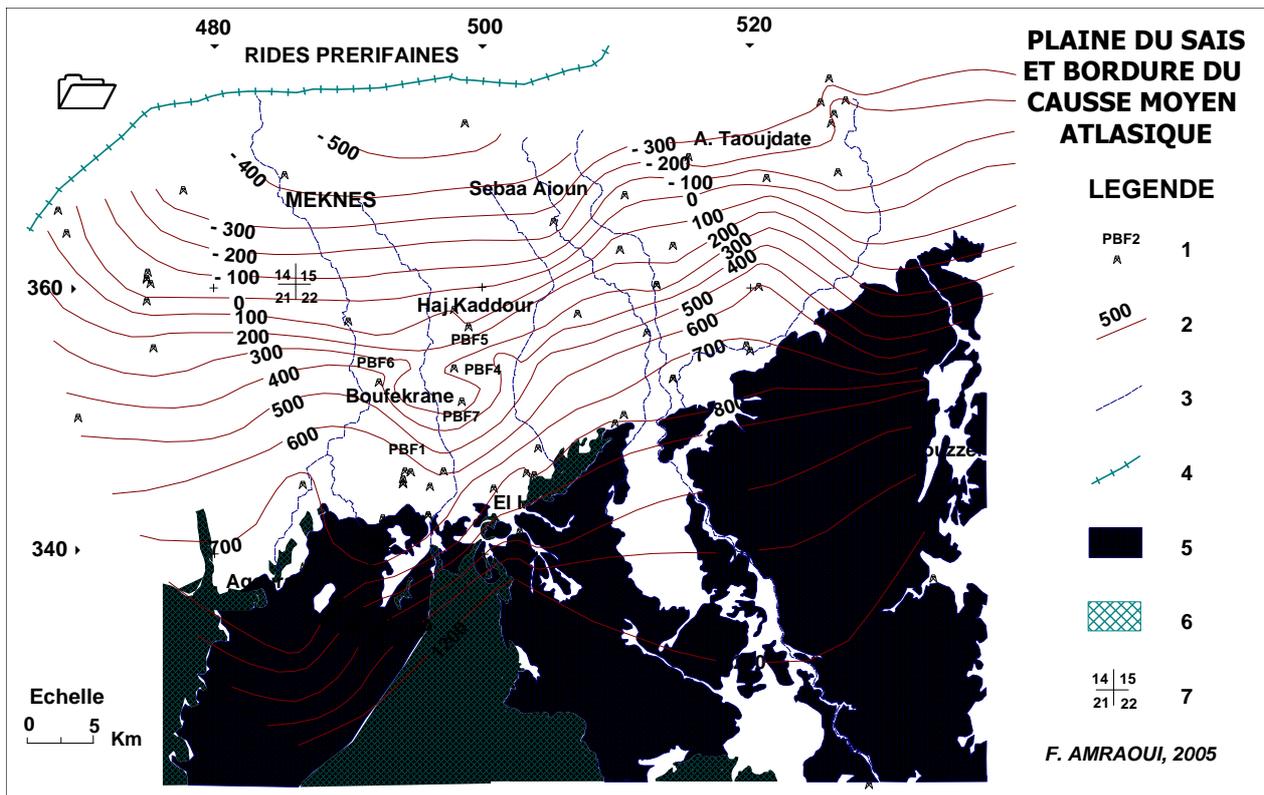


Figure 46 : Carte du toit du substratum triasique

1 : Forage profond 2 : Courbe d'égalité côte du toit du Trias 3 : Cours d'eau 4 : Limite des rides pré-rifaines 5 : Lias à l'affleurement 6 : Affleurements du Trias et du Paléozoïque 7 : Limite des indices

L'exploitation des renseignements lithologiques est parfois difficile en raison des confusions de termes ou de leur imprécision. Il est regrettable que la plupart des cuttings des forages n'aient pas été analysés du point de vue paléontologique et stratigraphique. Il arrive souvent que le terme global de Lias soit attribué à des séries de pétrographie très diverses, rendant les essais de corrélation entre ouvrages sujets à caution.

La carte de la profondeur de l'aquifère liasique (Fig. 47) montre un approfondissement progressif des formations carbonatées en direction du Nord ou du NW, avec une pente moyenne de l'ordre de 4.5 %. Cette pente peut être beaucoup plus importante, comme c'est le cas au SW de la ville de Fès, lorsque le plongement des assises liasiques vers le Nord se fait selon une pente de l'ordre de 8 %. Cette carte constitue un document pratique pour estimer la profondeur à atteindre si on désire capter la nappe profonde. Ainsi, un ouvrage exploitant la nappe du Lias doit avoir une profondeur d'environ : 300 m à Boufekrane, 550 à 600 m à Haj Kaddour, 650 à 700 m à Aïn Taoujdate, 900 à 950 m à Sebaa Aïoun et 1400 à 1500 m à Douyet.

Cette évolution irrégulière de la profondeur du Lias à travers le bassin est la conséquence des accidents tectoniques ayant engendré un compartimentage de l'aquifère profond en panneaux soulevés ou affaissés selon les endroits.

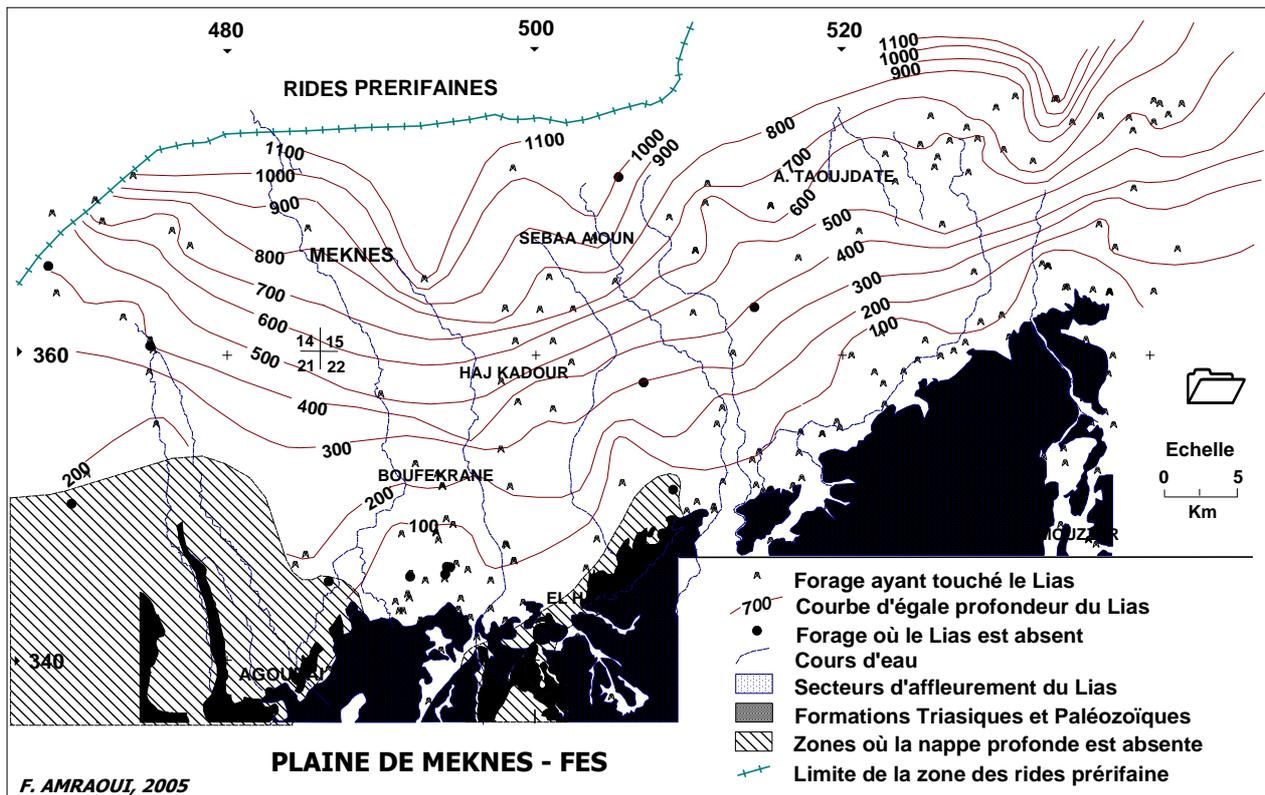


Figure 47 : Carte de la profondeur de l'aquifère liasique de la plaine du Saïs

3.3.2 - Carte du toit du Lias

La carte du toit du Lias (Fig. 48) a été élaborée sur la base des données d'environ 220 forages (dont 160 au niveau du bassin du Saïs) ayant atteint ou traversé l'aquifère profond. Le tracé des isohypses du toit du Lias n'a pas tenu compte des accidents tectoniques qui peuvent engendrer des discontinuités au niveau des tracés. La précision du document dépend bien entendu de la densité et de la répartition des données de forages. En bordure du Causse, le Lias est à des côtes qui varient entre 700 et 800 m NGM. Ces dernières atteignent - 400, voire - 600 m NGM au Nord à l'approche des rides pré-rifaines.

La pente de la topographie du Lias au niveau du Causse est plus modérée que celle au niveau de la plaine, ce qui laisse suggérer que le basculement vers le Nord des assises liasiques a été plus fort au niveau du bassin. Ce même basculement semble être plus fort à l'Est de la plaine où les courbes se resserrent par rapport au plateau de Méknès. L'accident d'Aïn Taoujdate pourrait constituer une limite entre deux compartiments ayant évolué de manière différente.

Le Lias s'enfonce progressivement par failles et flexures en direction du NW avec une pente moyenne de l'ordre de 6 % au niveau de la plaine de Fès, et de 4 % au niveau du plateau de Méknès. Le Lias est découpé en panneaux séparés par des failles de direction atlasique NE-SW, comme celle d'Aïn Chkef qui a un rejet d'environ 200 m.

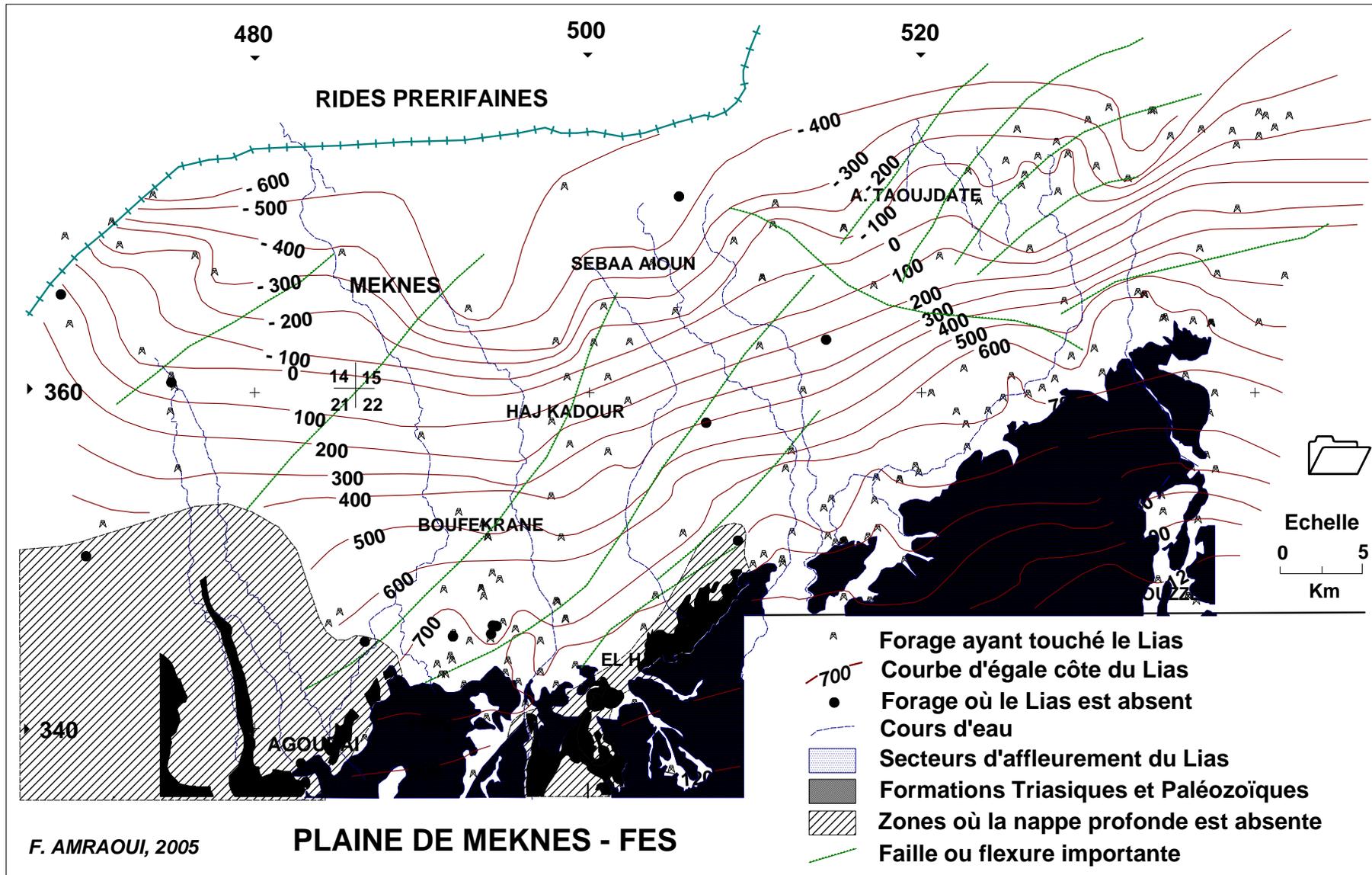


Figure 48 : Carte du toit de l'aquifère liasique

3.3.3 - Carte de l'épaisseur du Lias

Les épaisseurs des assises liasiques (Fig. 49) ont été représentées en quatre classes, en se basant sur les données de 115 forages dont 73 ayant traversé le Lias. Le rôle des failles ou des flexures importantes est bien mis en évidence. Ces accidents délimitent souvent des compartiments où l'épaisseur du Lias se retrouve d'un côté soit réduite, soit au contraire renforcée. Ainsi, la plaine de Fès située à l'Est de la flexure d'Aïn Taoujdate correspond à un large panneau où l'épaisseur du Lias dépasse toujours 60 m et atteint même 368 m au niveau du forage 2625/15 (situé en bordure de la route de Sefrou à environ 16 km au SE de la ville de Fès). Au sein de ce panneau, les flexures d'orientation NE-SW engendrent, en fonction de leurs jeux, des variations d'épaisseur du Lias qui peuvent être importantes.

Au niveau du plateau de Méknès, un panneau situé entre les deux flexures de Boufekrane-Haj Kaddour et de Souk Jemaa Del Gour semble avoir des épaisseurs relativement importantes par rapport aux panneaux encadrants. D'ailleurs, c'est le secteur le plus productif du plateau de Méknès. A l'Est de ce panneau, l'affleurement du môle primaire réduit considérablement l'épaisseur du Lias ou le fait disparaître totalement. Le rebord sud-ouest du plateau de Méknès correspond également à un secteur où le Lias est absent.

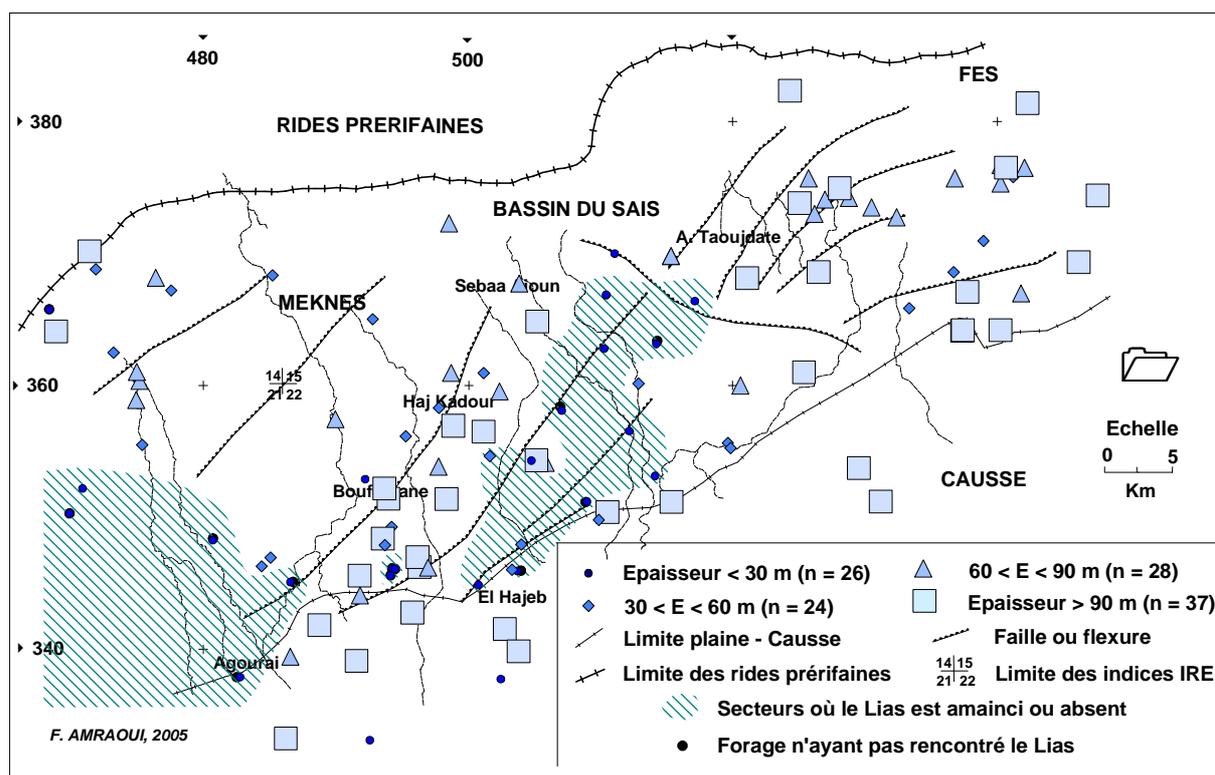


Figure 49 : Epaisseurs de l'aquifère liasique

Les descriptions lithologiques figurant sur les fiches de forages indiquent le plus souvent un faciès de dolomies grises. On note un développement des faciès jurassiques en allant vers l'Est, correspondant à un meilleur comblement par ces formations jurassiques. L'épaisseur moyenne du Lias à l'échelle du bassin, obtenue à partir de l'ensemble des données de forages, serait de l'ordre de 80 m.

3.4 – Etablissement des cartes du couvercle imperméable du Miocène

Le Miocène du bassin est représenté en grande partie par le Tortonien. La série débute par des calcaires gréseux à l'Ouest et des molasses au Sud qui sont rattachées au Burdigalien. La série se poursuit par des marnes grises à bleues à intercalations gréseuses ou sableuses. Ces marnes grises imperméables mettent en charge la nappe profonde du Lias et constituent la séparation entre les deux aquifères du bassin du Saïs (superficiel libre et profond captif).

3.4.1 - Carte de la profondeur des marnes miocènes ou épaisseur du Plio-Quaternaire

La carte de la profondeur des marnes miocènes (Fig. 50) correspond également à celle de l'épaisseur du remplissage plio-quaternaire. Cette carte a été construite sur la base des données de 153 forages répartis d'une manière assez uniforme sur l'ensemble de la plaine. Les profondeurs des marnes ont été réparties en quatre classes de même effectif. Elles varient entre 0 (affleurement) et 137 m, avec une moyenne de 56 m. Le centre du bassin suivant l'axe Boufekrane-Haj Kaddour-Aïn Taoujdate constitue le secteur où le remplissage plio-quaternaire (ou la profondeur des marnes) est le plus important. En revanche, en s'approchant des bordures pré-rifaines ou atlasiques, cette épaisseur se réduit d'une manière significative. On peut noter également la grande puissance du Plio-Quaternaire à l'Ouest et au SW de la ville de Méknès. En principe, plus le miocène est profond, plus les chances de réaliser des ouvrages productifs dans l'aquifère superficiel sont grandes.

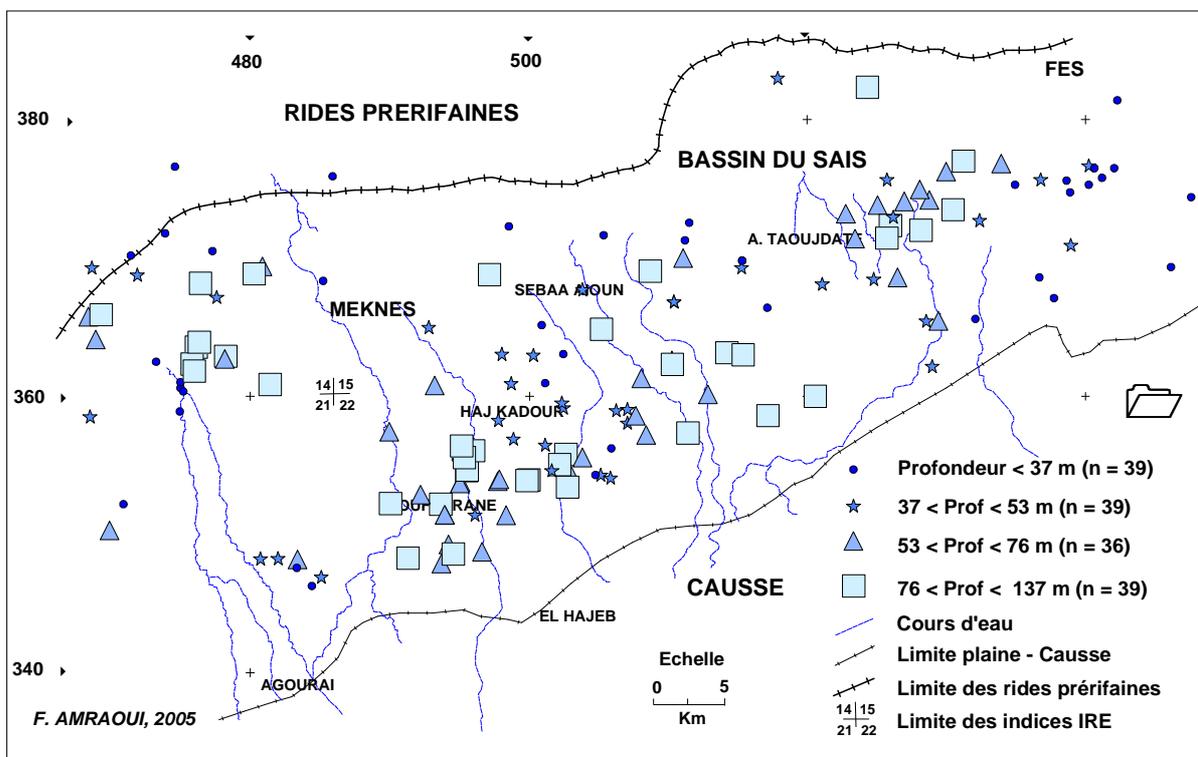


Figure 50 : Profondeurs des marnes miocènes ou épaisseur du Plio-Quaternaire

3.4.2 - Carte du toit des marnes miocènes

La carte du toit des marnes miocènes (Fig. 51) élaborée sur la base des données de 153 forages de la plaine montre la limite Sud de l'extension de la transgression miocène. Elle montre également que le toit des marnes miocènes varie de 600 et 700 m NGM au Sud à 300 m NGM au Nord.

L'évolution de la topographie du toit des marnes du Sud vers le Nord se fait d'une manière irrégulière, traduisant comme pour le cas du Lias l'effet des accidents tectoniques. La flexure d'Aïn Taoujdate et celle de Boufekrane-Haj Kaddour semblent avoir l'effet le plus important sur la topographie du Miocène. En effet ces deux accidents encadrent un secteur où les courbes d'égales côtes du Miocène sont déformées et ceci se traduit par une remontée du toit des marnes à ce niveau. Le phénomène inverse est observé mais à une échelle plus réduite à l'Ouest de la ville de Méknès où, les courbes de niveau 400 et 350 m s'invaginent marquant un approfondissement important du toit du Miocène. La flexure de Toulal ne serait pas étrangère à cette particularité.

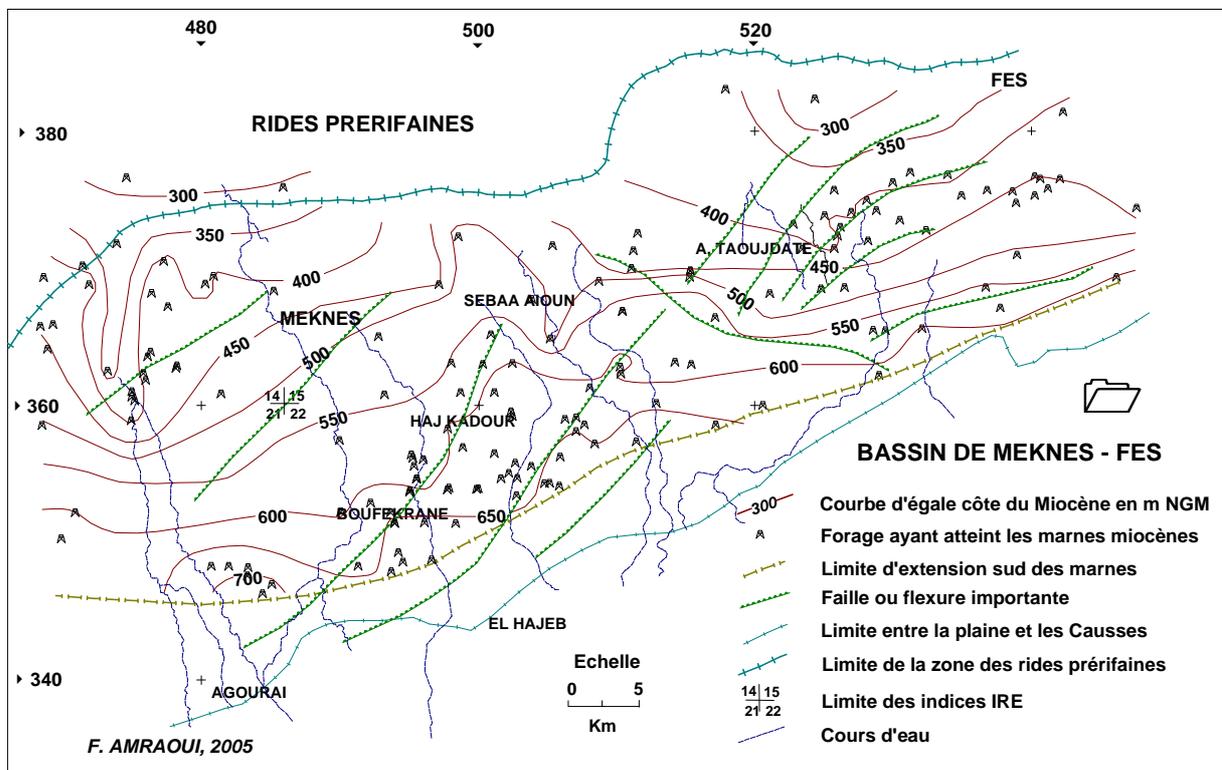


Figure 51 : Carte du toit des marnes miocènes de la plaine du Saïs

3.4.3 - Carte de l'épaisseur des marnes miocènes

La carte de l'épaisseur des marnes miocènes (Fig. 52) a été élaborée sur la base de 106 forages ayant traversé le Miocène entièrement. Les épaisseurs passent de 0 m au niveau de la limite sud de la transgression miocène à plus de 1000 m au Nord près des rides pré-rifaines. On peut estimer l'augmentation moyenne de l'épaisseur des marnes du Sud vers le Nord entre 40 et 50 m par km. Cette valeur moyenne peut être beaucoup plus importante comme c'est le cas au SW de la ville de Fès ou au Nord d'El Haj Kaddour.

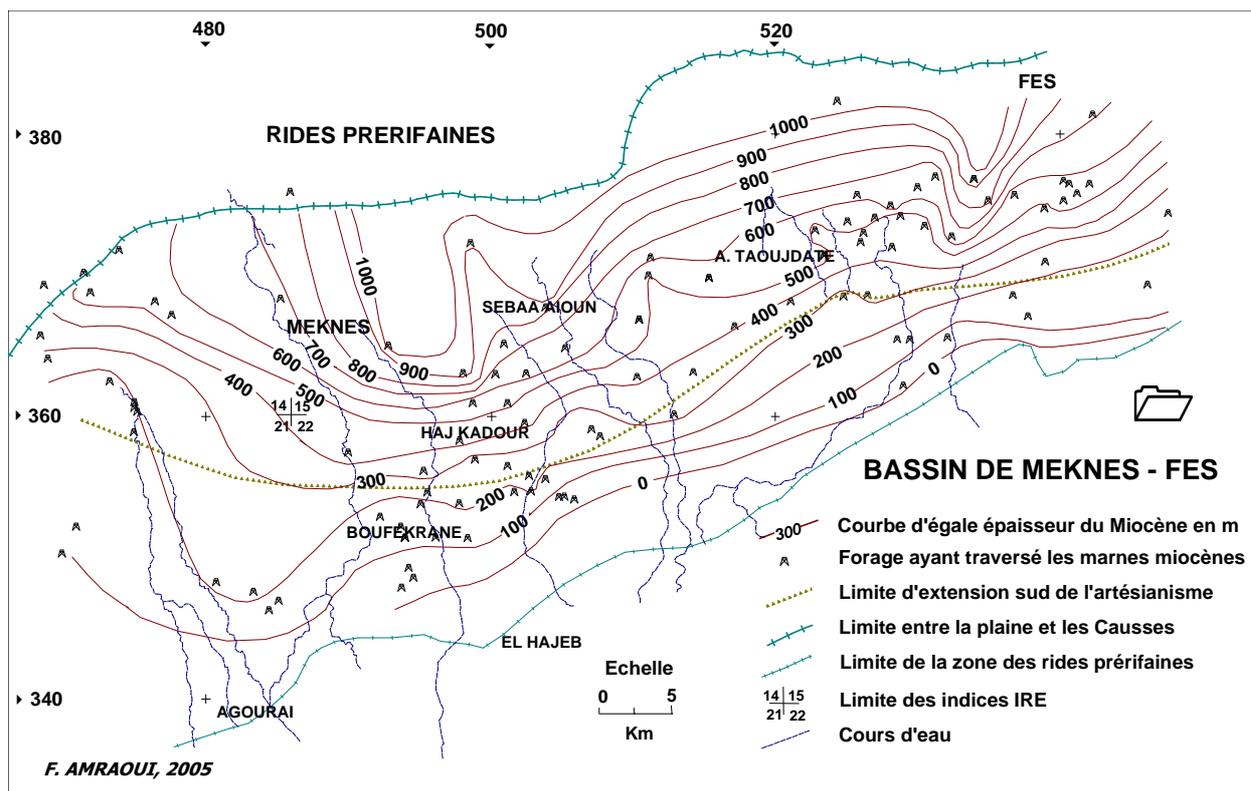


Figure 52 : Carte de l'épaisseur des marnes miocènes de la plaine du Saïs

Ces marnes sont responsables de la mise en charge de l'aquifère profond du Lias et on peut à partir des données de forages tracer la limite à partir de laquelle la nappe devient artésienne. Cette limite correspondait lors de la réalisation des ouvrages (Fig. 52) à une épaisseur des marnes variant entre 200 et 300 m selon les secteurs. En raison de la sécheresse et de l'exploitation intensive, cette limite, qui est en fait dynamique, se serait probablement déplacée actuellement vers le Nord, en réponse à la baisse du niveau de la nappe et à la chute des pressions dans les ouvrages.

La présence de cette épaisse couche marneuse sur une grande partie du bassin lui confère un rôle protecteur contre toute contamination à partir de la surface et réduit les échanges possibles entre les aquifères superficiel et profond. Ces échanges se limitent à la bordure sud du bassin où le Miocène est absent ou peu épais (cas où la drainage peut fonctionner), ou bien dans le bassin au niveau des fractures.

CHAPITRE 4 – EXPLOITATION DU SIG POUR L'ÉLABORATION DES CARTES HYDRODYNAMIQUES

4.1 – Cartographie piézométrique

La cartographie piézométrique de la nappe profonde du Lias (Fig. 53) a été construite sur la base de 258 valeurs relatives correspondant aux niveaux statiques ou à leurs équivalents pour les forages artésiens. Les données sont asynchrones puisqu'elles correspondent aux valeurs enregistrées lors de la réalisation des ouvrages. Ce document donne une idée grossière sur les modalités de l'écoulement de l'aquifère profond depuis le Causse jusqu'au pré-rif. L'équidistance adoptée pour les isopièzes est de 100 m sauf au Nord où une courbe intermédiaire à 50 m a été ajoutée.

La surface piézométrique de la nappe liasique varie entre 1700 m NGM à l'Est de la ville d'Ifrane et 400 m NGM à l'extrême NW de la plaine, avec un gradient hydraulique moyen de l'ordre de 2 %. Au niveau du Causse, l'écoulement général se fait d'une manière assez régulière du SE vers le NW avec un gradient hydraulique proche de 3 %. Au niveau du bassin de Saïs, l'écoulement semble se scinder en deux, de part et d'autre d'une ligne supposée de partage des eaux (Fig. 53) : à l'Est, l'écoulement s'effectue en direction du Nord avec un gradient très faible de l'ordre de 0.5 % alors qu'à l'Ouest, la nappe s'écoule vers le NW avec un gradient moyen de 2 %. Le faible gradient hydraulique de la plaine de Fès traduit les bonnes caractéristiques hydrauliques de l'aquifère, comme en témoigne la productivité exceptionnelle des ouvrages d'exploitation.

4.2 – Suivis piézométriques

Dans un contexte de sécheresse prolongée, les forts prélèvements pratiqués dans la nappe du Lias sont à l'origine de la chute des pressions des forages artésiens et de la baisse des niveaux piézométriques de la nappe. Ces prélèvements ont été pratiqués pour satisfaire les besoins croissants en eau potable, ainsi que les besoins en eau d'irrigation dans les secteurs où la nappe n'est pas très profonde. Cette baisse est bien mise en évidence par les historiques piézométriques mensuels des deux forages :

- 290/22 (coordonnées X = 497.8 et Y = 353.85) : suivi depuis février 1968 (34 ans), il contrôle le champ captant situé entre l'Haj Kaddour et Aïn Taoujdate.
- 2367/15 (coordonnées X = 534.5 et Y = 364.45) : suivi entre 1978 et 1999 (21 ans), il contrôle le champ captant situé au Sud de la ville de Fès.

Les graphiques (Fig. 54) montrent une certaine stabilisation jusqu'à 1980, suivie d'une baisse régulière importante interrompue en 1996/97 en raison d'une pluviométrie exceptionnelle. Durant les deux dernières décennies, la baisse de la nappe peut être chiffrée à 2.8 m/an en moyenne pour le plateau de Méknès (forage 290/22) et à 1.7 m/an pour la plaine de Fès (forage 2367/15).

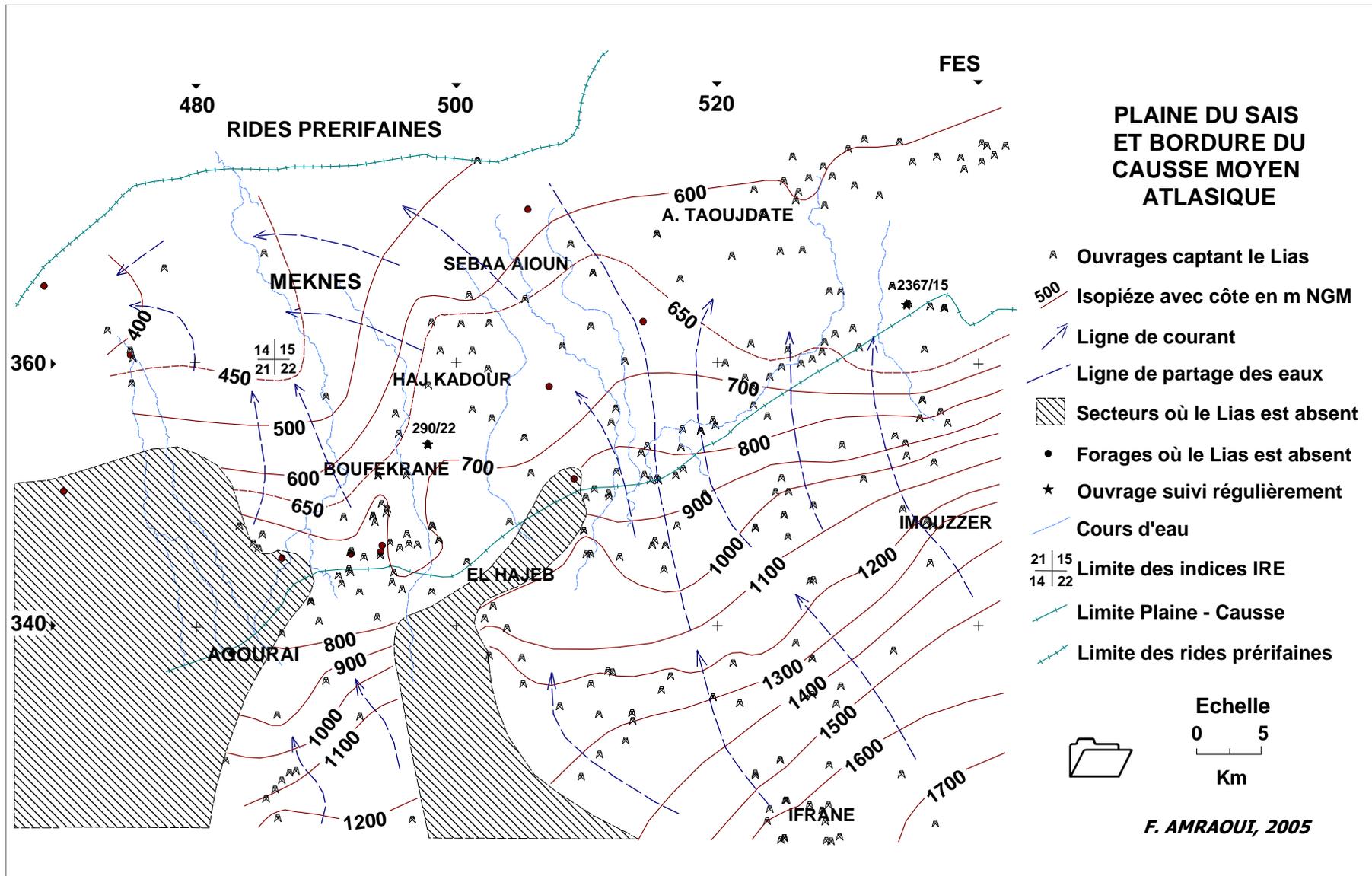


Figure 53 : Carte interprétative de la piézométrie de l'aquifère liasique de la plaine du Saïs et de la bordure du Causse

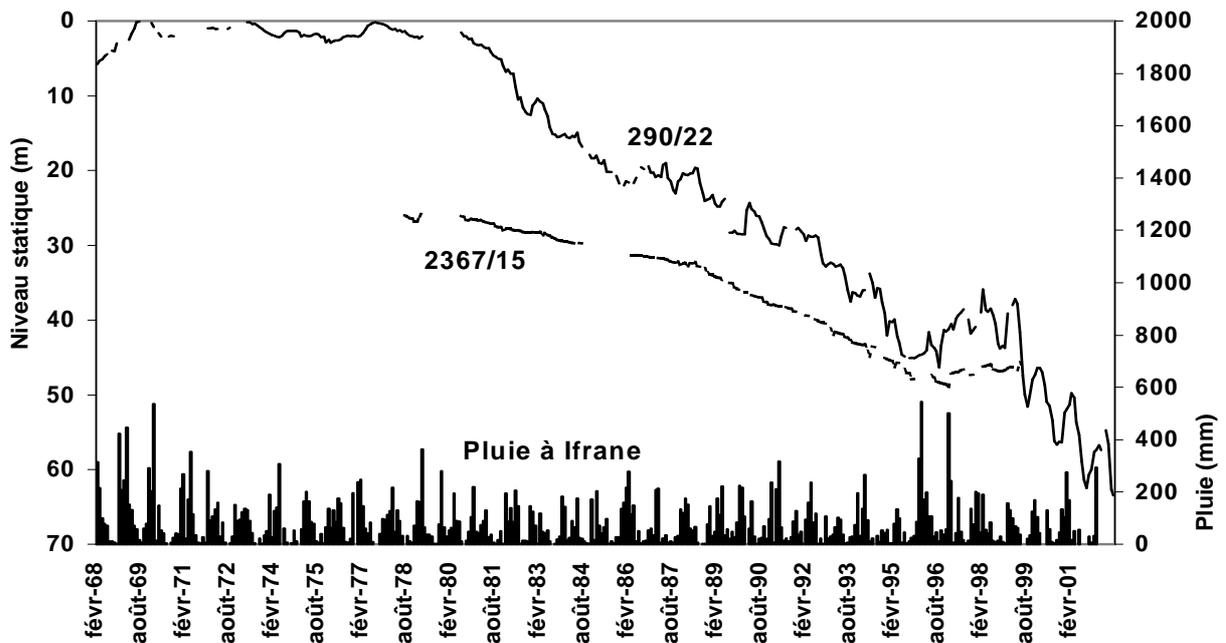


Figure 54 : Suivis piézométriques de la nappe profonde du Saïs et pluie à Ifrane

4.3 – Carte des Transmissivités

Tous les forages ayant atteint le Lias n'ont pas fait l'objet d'essais de pompage ou de vannage. La carte des transmissivités (Fig. 55) regroupe 113 valeurs à travers le secteur d'étude réparties d'une manière non uniforme. Les données ont été regroupées en cinq classes à intervalles égaux. La répartition spatiale des transmissivités ne semble pas répondre à un schéma précis. On peut délimiter toutefois des secteurs à faible ou à forte transmissivité (Fig. 55).

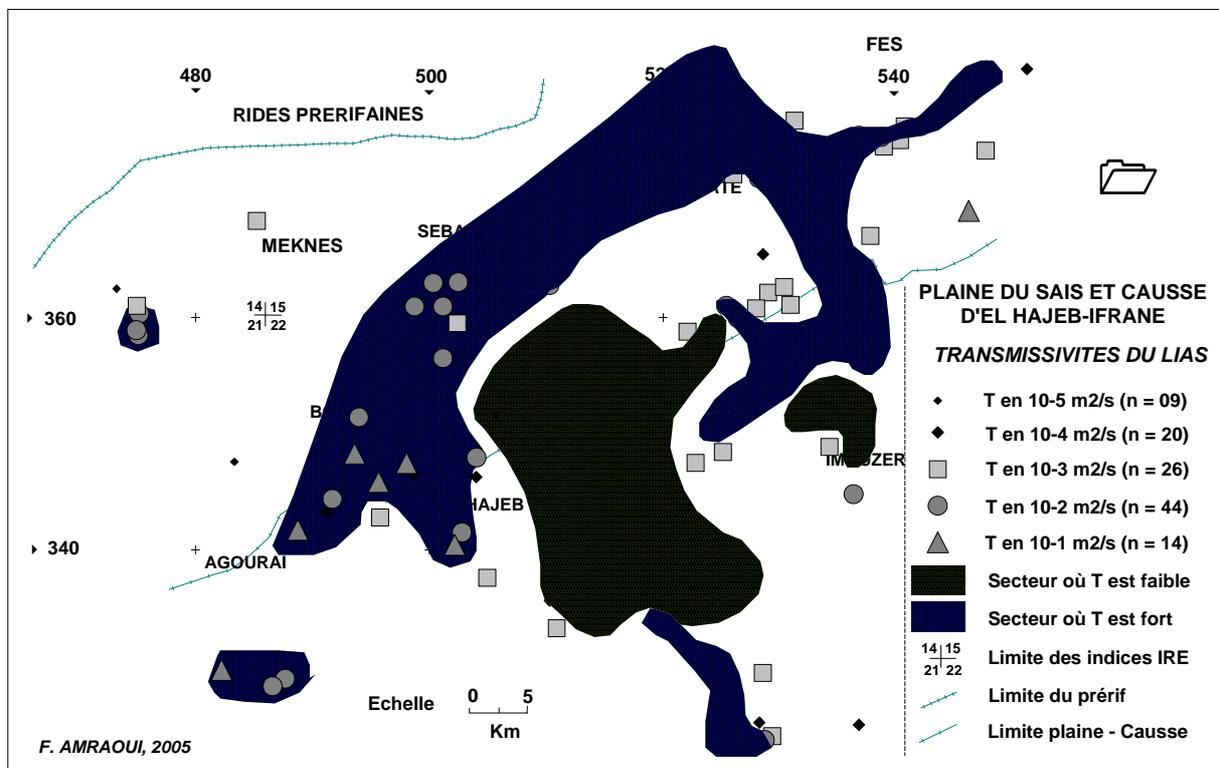


Figure 55 : Report des valeurs des transmissivités de l'aquifère liasique

Bien que l'on ne dispose pas de valeurs de la transmissivité à travers tout le secteur d'étude, on peut avancer que le centre de la plaine entre l'Haj Kaddour et le sud de la ville de Fès est relativement productif. C'est le cas également au niveau du triangle Boufekrane - El Hajeb - Agourai et en bordure du Causse au nord d'Imouzer. Par contre, un secteur d'une superficie de l'ordre de 350 km², situé à l'est de la ville d'El Hajeb est particulièrement peu transmissif. Il correspond à l'endroit où les formations paléozoïques sont portées à l'affleurement.

La répartition statistique des transmissivités (Fig. 56) montre que 79.6 % des valeurs varient entre 1.10⁻⁴ et 1.10⁻² m²/s. Cette grande dispersion des valeurs dépend d'une part, des variations de l'épaisseur de la nappe et d'autre part, de la perméabilité des formations carbonatées, liée à la fracturation qui les affecte.

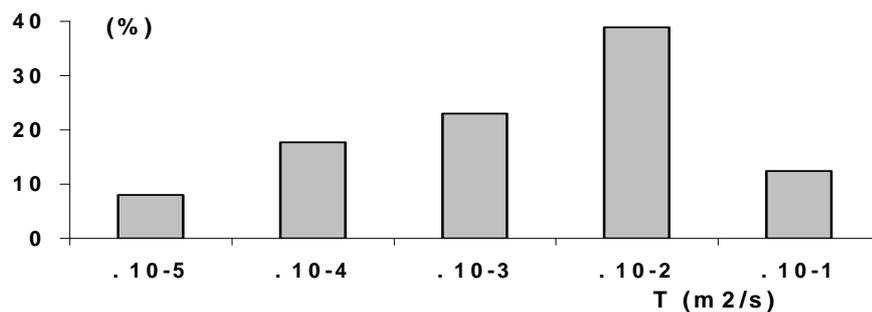


Figure 56 : Répartition statistique des transmissivités de l'aquifère liasique (n = 113)

4.4 – Carte des perméabilités

La carte des perméabilités (Fig. 57) regroupe 108 valeurs à travers le secteur d'étude. Les données ont été regroupées en cinq classes à intervalles égaux. Les secteurs à forts et à faibles perméabilités présentent beaucoup de similitudes avec ceux des transmissivités.

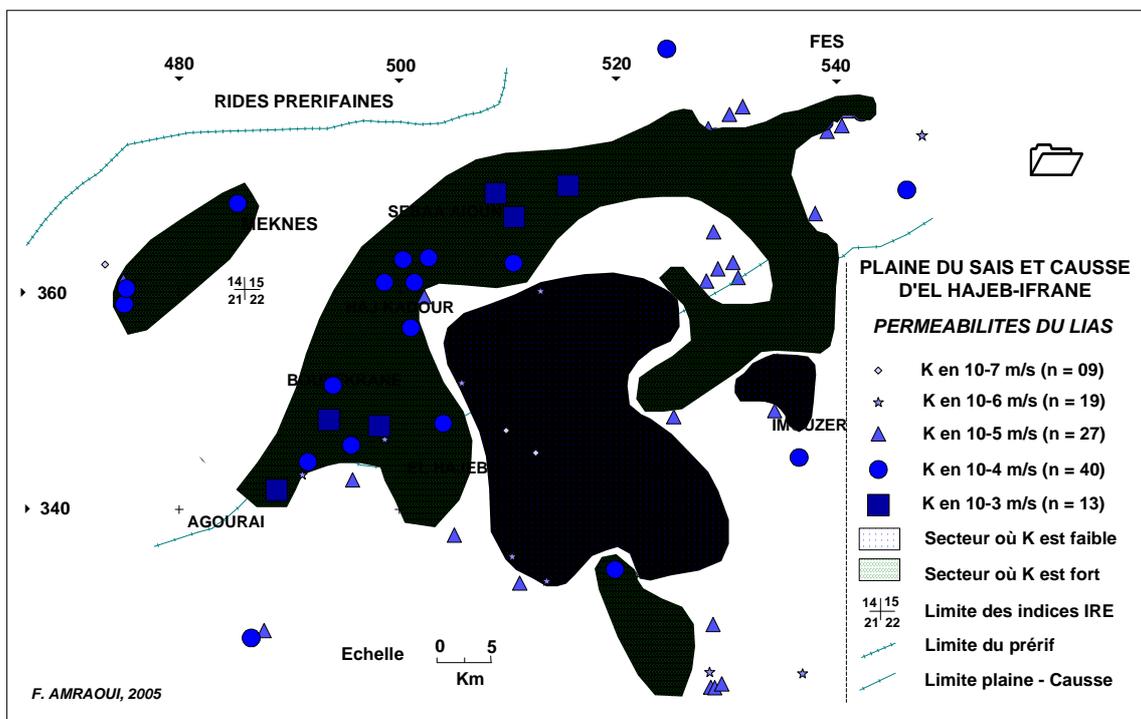


Figure 57 : Report des valeurs des perméabilités de l'aquifère liasique

La répartition statistique des perméabilités (Fig. 58) montre que 79.6 % des valeurs s'échelonnent entre 1.10^{-6} et 1.10^{-4} m/s. La variation des faciès liasiques, l'importance de la fracturation et de la karstification peuvent expliquer l'étalement des valeurs de la perméabilité de l'aquifère profond.

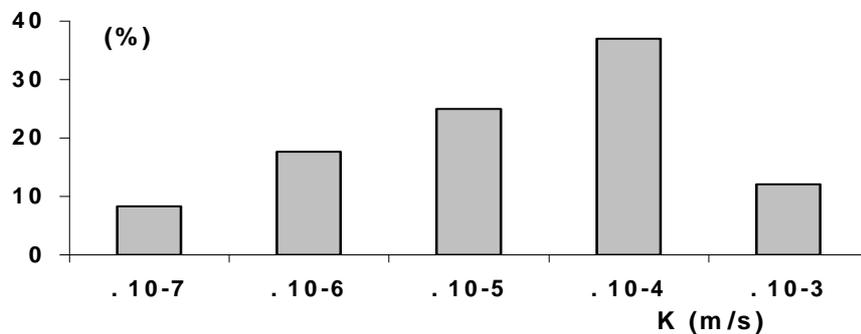


Figure 58 : Répartition statistique des perméabilités de l'aquifère liasique (n = 108)

4.5 – Débits des ouvrages d'exploitation de l'aquifère liasique

Les données sur les débits des ouvrages captant le Lias ont été fournies, soit par les essais par pompage exécutés lors de leur réalisation, soit par les essais de vannage pour les forages artésiens. Le report des débits d'exploitation de l'aquifère liasique (Fig. 59) a été établi sur la base de 254 valeurs de débits assez bien réparties à travers le secteur d'étude. Ces valeurs s'échelonnent du litre par seconde à 292 l/s au niveau du forage 2370/15 (coordonnées : x = 524.35, y = 382.35).

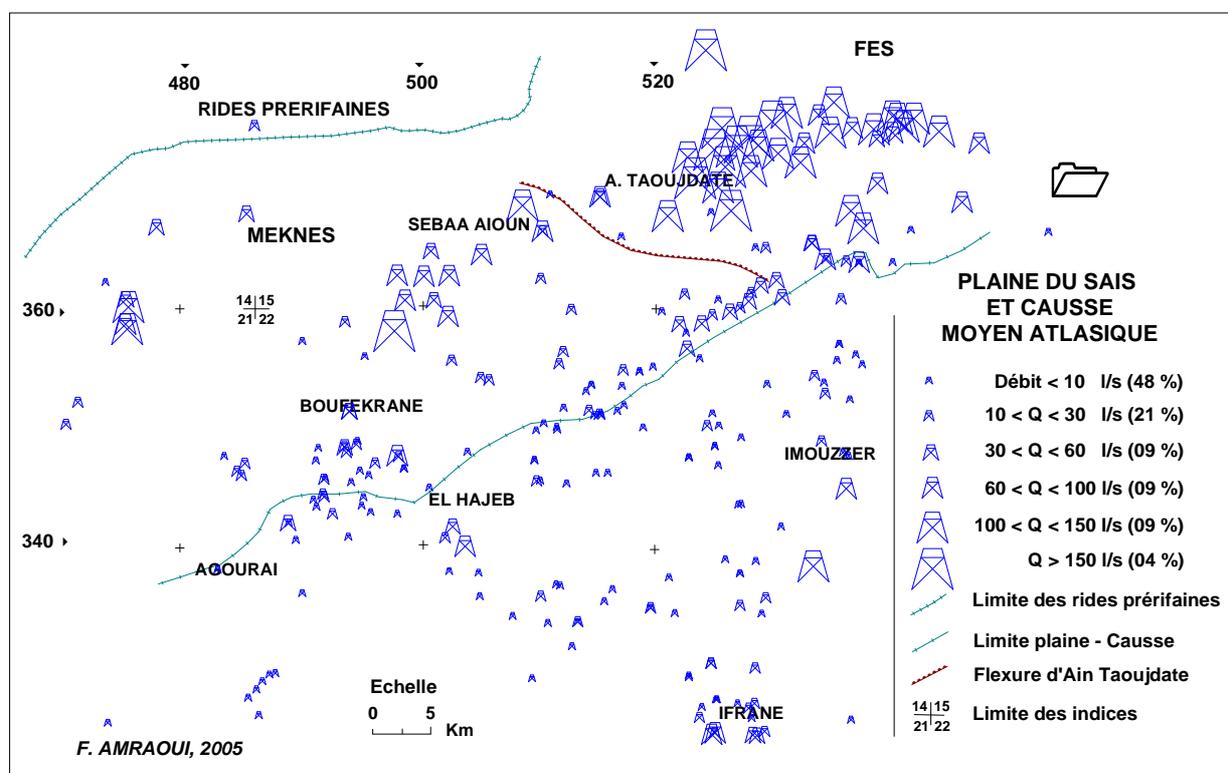


Figure 59 : Débits des ouvrages d'exploitation d'eau de l'aquifère liasique

Une analyse thématique a permis de regrouper les données en six classes à intervalles irréguliers (Fig. 59). Les débits les plus faibles (< 10 l/s) représentent 48 % de l'ensemble des valeurs et se localisent essentiellement au niveau du Causse moyen Atlasique. Les débits les plus forts (> 100 l/s) représentent 13 % de l'ensemble des valeurs et se localisent presque exclusivement (27 sur 32 ouvrages) au niveau de la plaine de Fès à l'Est de la flexure d'Aïn Taoujdate où l'aquifère liasique est mis en charge par une épaisse couche marneuse, au point où tous les ouvrages sont artésiens. En général, plus on va vers le Nord plus le débit augmente.

4.6 – L'artésianisme

L'artésianisme dans le bassin de Saïs est mesuré au niveau de 58 forages profonds dont plusieurs servent à l'alimentation en eau potable des deux grandes villes de Fès et de Méknès (Fig. 60). La pression relevée au niveau de ces forages lors de leur réalisation varie entre 1 et 24 bars. La flexure d'Aïn Taoujdate constitue une limite très nette entre deux compartiments de l'aquifère où la différence de pression entre les ouvrages est très importante.

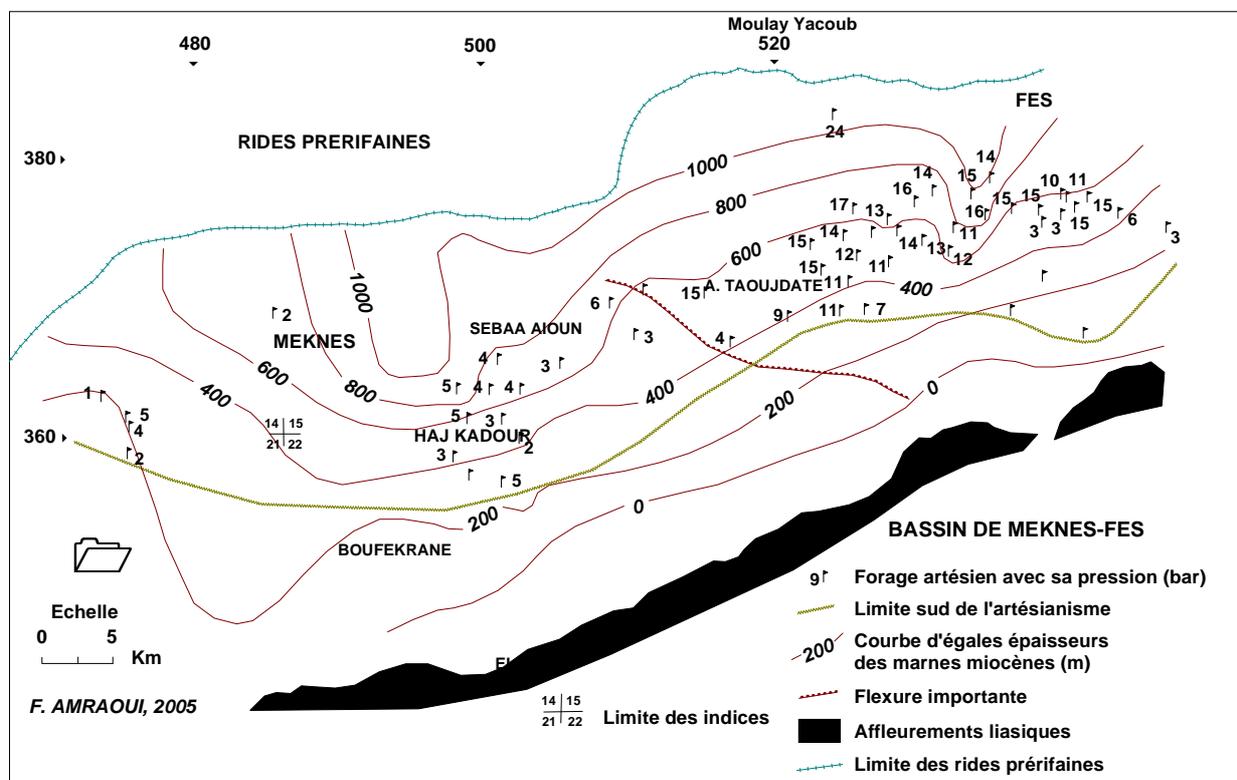


Figure 60 : Carte de l'artésianisme de la nappe du Lias du Saïs

En effet, au niveau de la plaine de Fès, les pressions en surface varient de quelques bars au Sud à 24 bars au Nord (forage 2370/15), alors qu'au niveau du plateau de Méknès, la pression varie 1 à 6 bars (NE de Sebba Aïoun) seulement. Au niveau de la figure 60, les courbes d'égalité d'épaisseurs des marnes miocènes (équidistance 200 m) ont été indiquées. Ces dernières varient de 0 m (limite de la transgression miocène) au sud à plus de 1000 m au Nord. La limite Sud de l'artésianisme est également indiquée, elle s'est probablement déplacée vers le Nord, en raison de l'exploitation intensive de la nappe et de la sécheresse importante qui dure depuis plus de deux décennies.

Nous disposons pour cinq forages artésiens situés au Sud de la ville de Fès et exploités par la Régie de la ville, d'un historique d'une quarantaine d'années, de mesures des pressions en tête des ouvrages. La figure 61 rend compte de l'évolution continue à la baisse de la mise en charge de l'aquifère liasique. La baisse moyenne du niveau de la nappe déduite de ces forages varie entre 1.1 et 2.1 m/an.

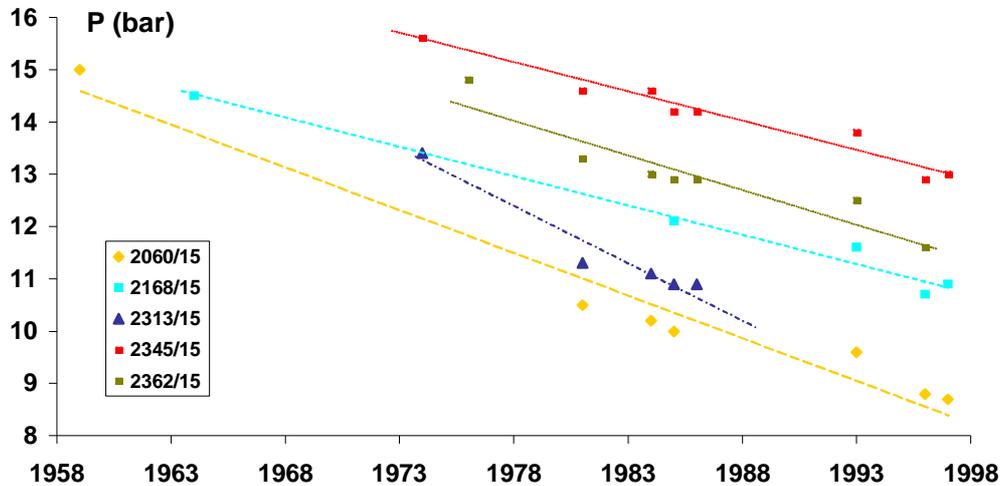


Figure 61 : Evolution de la pression des forages artésiens de la plaine de Fès

Des essais de corrélations linéaires ont été tentés entre la pression relevée au niveau des ouvrages artésiens lors de leur réalisation et l'épaisseur des marnes miocènes qui les mettent en charge. La corrélation tentée à l'échelle de l'ensemble de la plaine du Saïs (Fig. 62A) a fourni un coefficient de corrélation faible de 0.48, qui montre que la relation entre les deux paramètres n'est pas significative. La dispersion par rapport à la droite de corrélation concerne surtout les basses pressions. En se limitant aux 32 ouvrages appartenant à la plaine de Fès, la relation entre la pression des ouvrages et l'épaisseur des marnes s'améliore considérablement (Fig. 62B), puisque le coefficient de corrélation linéaire obtenu est de 0.64. Par contre, les 12 ouvrages du plateau de Méknès montrent une mauvaise relation entre les deux paramètres (Fig. 62C).

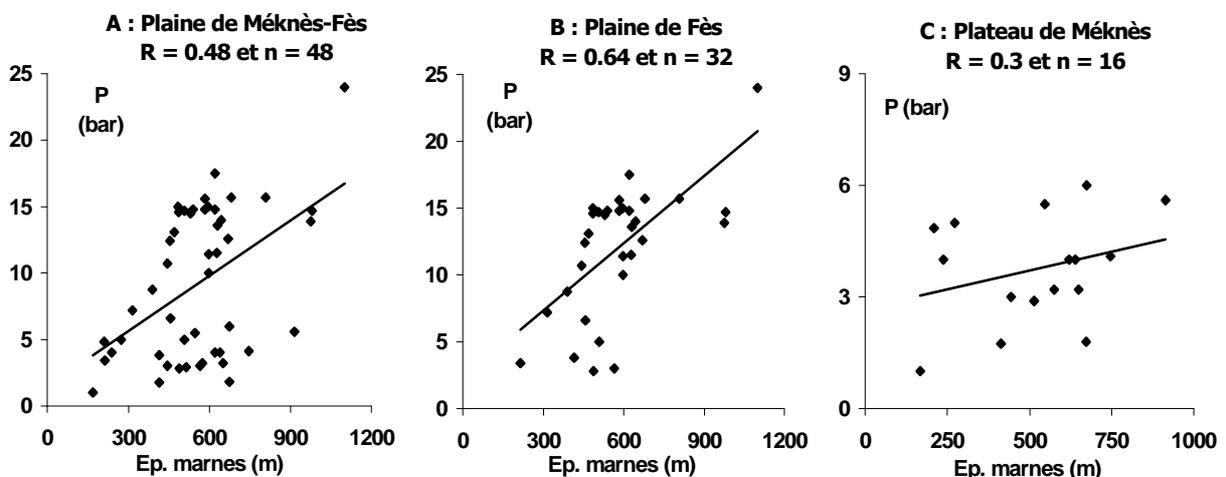


Figure 62 : Corrélations linéaires entre la pression des ouvrages et l'épaisseur des marnes miocènes

Pour expliquer cette relation moyenne entre la pression des ouvrages et l'épaisseur des marnes miocènes, on peut citer les raisons suivantes :

- Les dates de réalisation des ouvrages s'étalent entre 1959 et 1996, et de ce fait les données ne sont pas forcément comparables entre elles en raison de la baisse de la pression, surtout depuis 1980. Une correction de la pression consistant à appliquer une baisse de 0.15 bars/an n'a amélioré que sensiblement le coefficient de corrélation ;
- Le degré de fracturation qui parfois se propage vers la surface peut réduire la pression à l'intérieur de l'aquifère, même sous une épaisse couche marneuse ;
- La nature lithologique de l'assise miocène qui parfois comporte des niveaux sableux ou gréseux peut influencer sur l'étanchéité du toit imperméable ;
- L'importance de l'alimentation de l'aquifère favorise l'augmentation de la pression ;
- L'épaisseur de l'aquifère liasique et par conséquent sa richesse, devrait également favoriser la pression des captages.

CHAPITRE 5 – ESSAI DE BILAN DE LA NAPPE PROFONDE

L'approche du bilan comptable entre les entrées et les sorties d'un système aquifère reste sujette à caution à cause de l'incertitude sur les valeurs des différents termes qui entrent en jeu. La nature karstique de la nappe profonde du Lias, le type hydrodynamique de la nappe (libre sur le Causse et captive à artésienne sur la plaine), l'irrégularité des apports d'une année à l'autre et la sécheresse qui sévit depuis le début des années 1980, rendent la tâche encore plus délicate.

5.1 – Entrées

Les résultats du modèle global à réservoirs (Benjbara et Rhaoui ; 1989) ont été adoptés pour estimer les apports à la nappe profonde du Lias. Une révision à la baisse de la recharge a été opérée pour tenir compte de l'effet de la sécheresse qui sévit depuis 1980.

Pour rappel, le modèle Gardenia mis au point par le BRGM en 1984, assimile le comportement des systèmes aquifères à des remplissages et des vidanges de réservoirs (loi de vidange exponentielle). Les transferts entre réservoirs sont régis par des lois simples (temps de transfert, réserve utile, seuils de débordements...). Ces lois sont extrapolables à d'autres bassins analogues. Ce modèle a été calé pour les Causses d'El Hajeb-Ifrane et d'Agourai durant la période 1975-1987. Il a permis d'approcher les apports souterrains à la nappe profonde de la plaine de Fès-Méknès et le débit des sources de débordement suite à un événement pluviométrique dans les Causses.

La figure 63 montre la situation de la plaine du Saïs par rapport aux bassins versants des Causses qui l'alimentent. Y figurent également les principales sources de bordure ou de l'intérieur de la plaine qui ont pour origine la nappe du Lias. Le tableau 10 récapitule les données fournies par le modèle et les volumes de recharge adoptés pour établir un bilan actualisé.

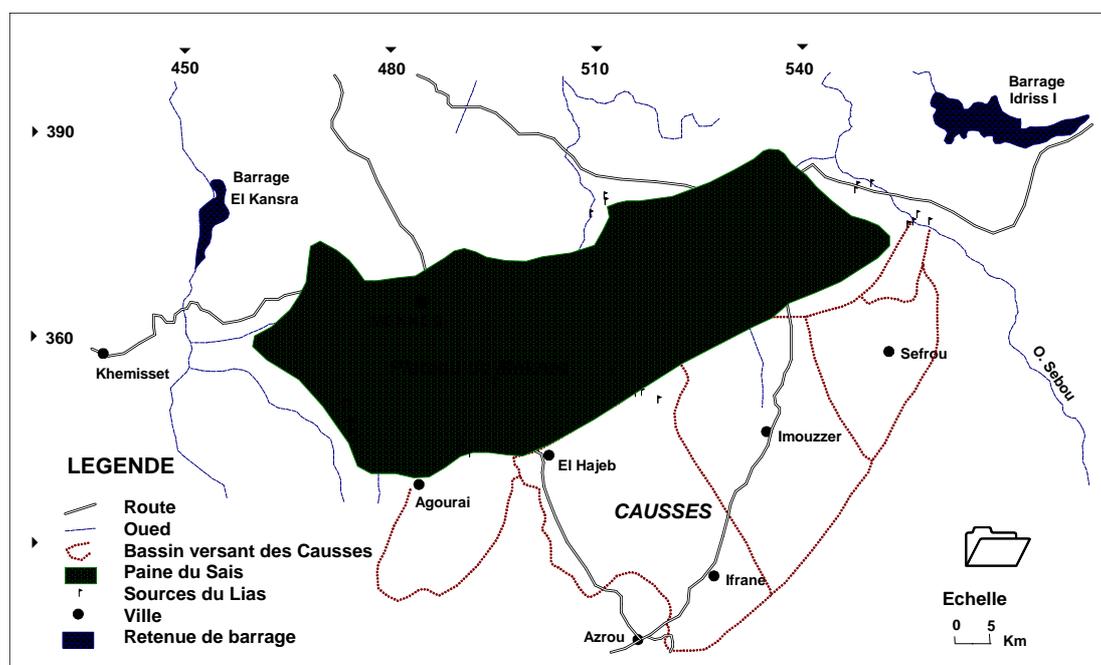


Figure 63 : Carte de la situation de la plaine du Saïs et des bassins versants des Causses qui l'alimentent

Causse	El Hajeb-Ifrane	Immouzer	Agourai	
Superficie du bassin versant (km ²)	852	523	266	
Altitude moyenne (m NGM)	1350	-	1100	
Pluie moyenne annuelle 75-87 (mm)	832	696	671	
ETR (mm)	566	520	480	
Coefficient d'Infiltration (%)	32	26	28	Total
Apports 1975-87 (Mm ³ /an)	202	56	33	291 Mm³/an

Tableau 10 : Données concernant la recharge de l'aquifère liasique

5.2 - Sorties

a) Prélèvements pour l'eau potable

La nappe profonde du Lias est très sollicitée pour satisfaire les besoins en eau potable des villes et des agglomérations de la région du Saïs. En effet, la ressource en eau de cet aquifère constitue la principale source d'approvisionnement en eau domestique d'une population urbaine de plus d'un million et demi d'habitants. Les volumes prélevés dans la nappe du Lias par l'ONEP ou par les Régies de Méknès et de Fès sont connus avec une bonne précision. En 2002, ils totalisaient **98 Mm³/an** et se répartissaient comme suit (le détail sur les ouvrages et les quantités prélevées pour l'alimentation en eau potable des différentes agglomérations du Saïs et du Causse figurent en annexe 3) :

- **Méknès** : 1289 l/s (70 % à partir des sources Bittit-Ribaa et 30 % à partir des forages ONEP)
- **Fès** : 1826 l/s (68 % à partir des forages ONEP et 32 % à partir des forages RADEEF)

b) Prélèvements agricoles

D'après une note de l'agence du bassin hydraulique du Sebou, 36 000 ha sont irrigués au niveau de la plaine du Saïs à partir des deux nappes : superficielle et profonde. On peut estimer au maximum à 20 % la superficie irriguée à partir de la nappe profonde et ceci pour les raisons suivantes :

- Approfondissement rapide du Lias en allant vers le Nord, ce qui rend coûteux et incertain le fonçage des ouvrages d'exploitation ;
- L'irrigation en bordure des Causse à partir des sources ou des oueds ;
- L'absence du Lias par endroits ;
- La taille des propriétés agricoles généralement réduite (< 5 ha), ne pouvant justifier de lourds investissements nécessaires à la réalisation de forages profonds.

Si on suppose que l'irrigation est pratiquée durant 6 mois de l'année et que la dotation à l'hectare est de 30 m³/jour/hectare (besoin moyen des cultures pratiquées), on totalise un volume de prélèvement de **39 Mm³/an** (7200 ha x 30 m³ x 182 jours).

c) Drainance ascendante

Une drainance ascendante depuis le Lias vers le Plio-Quaternaire existe, notamment là où les marnes miocènes sont absentes ou peu épaisses. C'est le cas dans deux secteurs importants, aux environs des sources Aïn Ribaa-Bittit et de Aïn Cheggag. Cette drainance est rendue possible en raison de la présence entre les deux nappes, de formations peu perméables et d'une différence de charge hydraulique. Le modèle de gestion des nappes établi par le bureau d'étude Mac Donald pour le compte de la DRPE (1990), évalue cette drainance à **20 Mm³/an**.

d) Emergences

Dans le bassin du Saïs et en bordure des Causses on peut dénombrer une quarantaine de sources issues de l'aquifère liasique. Ces exutoires naturels de la nappe jouent un rôle important pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. En excluant les sources qui se localisent en bordure de l'oued Sebou et qui sont probablement alimentées par le Causse de Sefrou, on peut estimer le débit total moyen actuel des émergences à partir du Lias à 7 m³/s, soit un volume moyen de **221 Mm³/an**.

Ce chiffre a été obtenu sur la base de l'inventaire des sources figurant dans le rapport Mac Donald (1990), en tenant compte uniquement de la part d'eau issue de l'aquifère liasique, et en y apportant une correction pour tenir compte de la baisse des débits suite à la sécheresse.

5.3 – Le Bilan hydraulique

Ensemble des entrées :	291 Mm³/an
Ensemble des sorties :	378 Mm³/an
Bilan	: - 87 Mm³/an

La nappe est donc déficitaire d'environ 87 Mm³/an, ce qui représente environ 30 % des apports moyens. Ce déficit au niveau de la recharge se traduit par : une baisse importante du niveau de la nappe (Fig. 54), une diminution de la pression des ouvrages artésiens et une baisse des débits voire un tarissement des émergences.

SYNTHESE DE LA TROISIEME PARTIE

Cette partie de la thèse a été consacrée à l'étude **hydrogéologique** de l'aquifère **profond** liasique de la région du **Saïs**. Ce dernier se recharge à partir des précipitations pluviales et nivales tombant sur le Causse. La nappe est libre sur le Causse et devient captive au niveau de la plaine du Saïs. Elle se développe au niveau des formations carbonatées à prédominance dolomitique. Le substratum de la nappe est constitué par les terrains triasiques, alors que le toit imperméable est constitué par une épaisse assise marneuse du Miocène.

Un Système d'Information Géographique (SIG) a été élaboré. Il englobe l'essentiel des données acquises depuis plusieurs décennies concernant les ressources en eau de la région. Ce SIG est constitué par deux grandes bases de données qui sont liées et qui se complètent mutuellement :

- Une base des **données spatiales** contenant les documents cartographiques : fonds topographiques, carte géologique, carte géomorphologique, cartes géophysiques, carte de situation des sources ;
- Une base des **données thématiques** qui repose sur un inventaire de plus de 400 forages dont les 4/5 ont atteint ou dépassé le Lias. Les informations recueillies concernent :
 - Les données **générales** : N° IRE, coordonnées, profondeur totale, date de réalisation ;
 - Les données de **production** : débit, rabattement, pression, niveau statique, transmissivité ;
 - Les données **physico-chimiques** : température, conductivité ;
 - Les données **géométriques** de l'aquifère : couvercle imperméable (profondeur, épaisseur et toit des marnes grises du Miocène), aquifère (profondeur, épaisseur et toit des dolomies du Lias) et substratum (profondeur et toit du Trias).

L'exploitation du SIG du Saïs en **mode vecteur** a été faite avec le logiciel **MapInfo**, et elle a permis d'élaborer un certain nombre de cartes, soit structurales, soit hydrodynamiques. Ces cartes ont permis de préciser la géométrie de l'aquifère et les modalités de l'écoulement de la nappe profonde du Lias. Les principaux résultats de cette exploitation du SIG sont les suivants :

- La carte de la **profondeur du Trias** : le Trias est porté à l'affleurement au niveau d'El Hajeb par une espèce de dôme allongé dans une direction NE-SW. De part et d'autre de ce dôme, le Trias s'enfonce progressivement mais avec une pente beaucoup plus modérée au sud qu'au nord. Les forages pétroliers ont permis de préciser la lithologie du Trias : on rencontre le plus souvent des argiles rouges à gypse dans lesquelles s'intercalent des niveaux salifères de sel gemme et des basaltes.
- La carte du **toit du Trias** : un plongement du toit du Trias en direction du Nord avec une pente de l'ordre de 5 % est mis en évidence. En effet, la côte du toit du Trias passe de 1245 m au sud d'El Hajeb à - 556 m au nord de Méknès.

- La carte de la **profondeur du Lias** : elle constitue un document pratique pour estimer la profondeur minimale des ouvrages devant capter la nappe profonde (300 m à Boufekrane, 900 m à Sebaa Aïoun et 1500 m à Douyet). La carte montre un approfondissement progressif des formations carbonatées en direction du Nord ou du NW avec une pente plus ou moins importante selon les secteurs. L'évolution irrégulière de la profondeur du Lias à travers le bassin traduit l'effet des accidents tectoniques qui sont responsables d'un compartimentage de l'aquifère profond en panneaux soulevés ou affaissés.
- La carte du **toit du Lias** : elle montre que le Lias s'enfoncé progressivement par failles et flexures en direction du NW avec une pente moyenne de l'ordre de 5 %. Le Lias est découpé en panneaux limités par des failles de direction atlasique NE-SW. En bordure du Causse, le Lias se situe à des côtes proches de 750 m NGM. Ces dernières atteignent – 500 m NGM au Nord à proximité des rides pré-rifaines.
- La carte de **l'épaisseur du Lias** : elle met en évidence le rôle des failles ou des flexures qui délimitent souvent des compartiments, où l'épaisseur du Lias se retrouve d'un côté soit réduite, soit au contraire renforcée. L'épaisseur moyenne du Lias à l'échelle du bassin serait de l'ordre de 80 m. On note un développement des faciès jurassiques vers l'Est du bassin.
- La carte de la **profondeur des marnes miocènes** : correspond également à celle de l'épaisseur du remplissage plio-quadernaire. La profondeur des marnes varie entre 0 m (affleurement) et 137 m, avec une moyenne de 56 m.
- La carte du **toit des marnes miocènes** : montre la limite Sud de l'extension de la transgression miocène. Elle montre également que le toit des marnes miocènes varie entre 600 m NGM au Sud et 300 m NGM au Nord. L'évolution de la topographie du toit des marnes du Sud vers le Nord se fait d'une manière irrégulière, traduisant l'effet des accidents tectoniques.
- La carte de **l'épaisseur des marnes miocènes** : montre que les épaisseurs passent entre 0 m au niveau de la limite sud de la transgression miocène et plus de 1000 m au Nord, à proximité des rides pré-rifaines. Ces marnes sont responsables de la mise en charge de l'aquifère profond, et on peut estimer à 300 m l'épaisseur minimale engendrant l'artésianisme de la nappe liasique. La présence de cette épaisse couche marneuse sur une grande partie du bassin lui confère un rôle protecteur contre toute contamination provenant de la surface du sol et réduit les échanges hydrauliques (drainance) entre les aquifères superficiel et profond.
- La cartographie **piézométrique** : la surface de la nappe liasique varie entre 1700 m NGM à l'Est de la ville d'Ifrane et 400 m NGM à l'extrême NW de la plaine du Saïs, avec un gradient moyen de l'ordre de 2 %. Au niveau du Causse, l'écoulement général de l'eau de la nappe se fait d'une manière assez régulière du SE vers le NW avec un gradient hydraulique proche de 3 %. Au niveau du bassin du Saïs, l'écoulement semble se scinder en deux de part et d'autre du môle primaire d'El Hajeb - Aïn Taoujdate : à l'Est, l'écoulement s'effectue en direction du Nord avec un gradient très faible de l'ordre de 0.5 %, alors qu'à l'Ouest, la nappe s'écoule vers le NW avec un gradient moyen de 2 %.

- Les historiques **piézométriques** : ils montrent une baisse régulière depuis 1980, traduisant l'effet conjugué de la sécheresse prolongée et de la surexploitation pour satisfaire les différents besoins, notamment de l'eau potable. Durant les deux dernières décennies, la baisse moyenne de la nappe est d'environ 2,8 m/an pour le plateau de Méknès et de 1,7 m/an pour la plaine de Fès.
- La carte des **transmissivités** : tous les forages ayant atteint le Lias n'ont pas fait l'objet d'essais de pompage ou de vannage. La répartition spatiale des transmissivités ne semble pas répondre à un schéma précis. Les 4/5 des valeurs de transmissivité varient entre 1.10^{-4} et 1.10^{-1} m²/s. Cette grande dispersion des valeurs dépend d'une part, des variations de l'épaisseur de l'aquifère et d'autre part, de la perméabilité des formations carbonatées qui est liée à la fracturation qui les affecte.
- La carte des **débits des ouvrages d'exploitation** : les valeurs fournies par les essais de pompage ou de vannage s'échelonnent du litre par seconde à 292 l/s. Les débits inférieurs à 10 l/s représentent 48 % de l'ensemble des valeurs et se localisent essentiellement au niveau du Causse. Les débits supérieurs à 100 l/s représentent 13 % de l'ensemble des valeurs et se localisent presque exclusivement au niveau de la plaine de Fès.
- La carte de **l'artésianisme** : la pression relevée en tête des forages artésiens varie entre 1 et 24 bars. La flexure d'Aïn Taoujdate constitue une limite très nette entre deux compartiments de l'aquifère où la différence de pression est importante.

Le SIG élaboré pour la région du Saïs constitue un véritable **outil d'aide à la prise de décision** pour les gestionnaires des ressources en eau du bassin de Sebou. En effet, les réponses aux requêtes fréquemment formulées par les différents utilisateurs de l'eau souterraine sont immédiates et peuvent être présentées sous forme graphique et/ou cartographique. La base de données pourra être actualisée et alimentée régulièrement avec les données qui seront collectées sur l'aquifère du Lias.

Ce SIG permettra également de préparer la réalisation d'un **modèle de gestion de la nappe**, en fournissant les données nécessaires, notamment celles relatives à la géométrie du réservoir, aux paramètres hydrodynamiques, à la piézométrie, etc.

Un **essai de bilan** de l'aquifère liasique a été tenté pour l'année 2002. Il a permis d'estimer les entrées à 291 et les sorties à 378 Millions de m³/an. Le déficit annuel relevé est donc de l'ordre de 87 Millions de m³/an. Ce déficit se manifeste actuellement par une forte baisse du niveau de la nappe (1.5 à 3 m/an), par une réduction de la pression des ouvrages artésiens et par une baisse des débits voire même un tarissement des émergences.

QUATRIEME PARTIE :

HYDRODYNAMIQUE DES EMERGENCES

CHAPITRE 1 – DESCRIPTION DES SOURCES DU PIEMONT DU CAUSSE

CHAPITRE 2 – CONDITIONS D’EMERGENCE DES PRINCIPALES SOURCES

CHAPITRE 3 - ETUDE DES DEBITS CLASSES

CHAPITRE 4 - ETUDE DES COURBES DE RECESSION

CHAPITRE 5 - ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES

CHAPITRE 6 - ETUDE DU PHENOMENE DE TURBIDITE

SYNTHESE DE LA QUATRIEME PARTIE

CHAPITRE 1 – DESCRIPTION DES SOURCES DU PIEMONT DU CAUSSE

1.1 - Présentation

Le Causse Moyen Atlasique tabulaire alimente en eau la nappe profonde du bassin du Saïs et également l'ensemble des sources situées à son piémont. Entre le Causse et le plateau de Méknès, deux groupes de sources d'importance inégale se mettent en évidence (Fig. 64) :

- Les sources du secteur Ribaa-Bittit situées au piémont du Causse d'El Hajeb-Ifrane ;
- Les sources Aghbal, Boujaoui et Maâruf, situées au piémont du Causse d'Agourai.

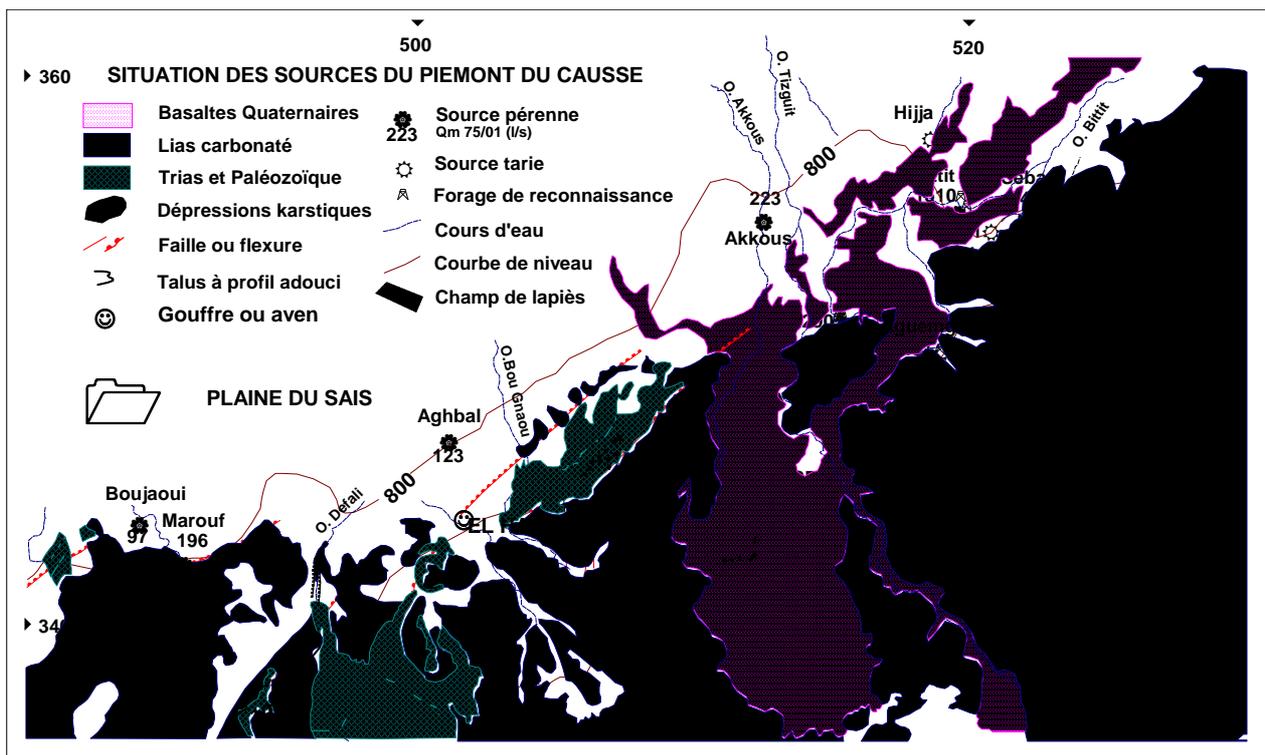


Figure 64 : Carte de la situation des sources de la bordure nord du Causse

1.2 – Historique des études et des mesures de débits

Plusieurs rapports d'études hydrologiques portant sur les différentes sources ont été élaborés par la Direction Générale de l'Hydraulique, particulièrement entre 1974 et 1984. La note de synthèse sur l'hydrologie des sources du bassin du Saïs (Normand, 1984) constitue le document le plus complet jusqu'à cette date. L'approche des infiltrations dans le Causse Moyen Atlasique par application d'un modèle global à réservoirs (modèle GARDENIA du BRGM) constitue également une référence intéressante sur ces émergences (Benjbara et Rhaouti, 1989).

Les mesures de débits dans ce secteur ont débuté en 1934 avec cependant des interruptions fréquentes. Des agents de la direction provinciale de l'équipement de Méknès sont chargés des mesures régulières de débit au niveau des sources. Trois périodes différentes de mesures sont distinguées :

- **Période 1934 à 1957** : les mesures étaient effectuées périodiquement avec une fréquence de 1 à 2 jaugeages par mois. Ces mesures se faisaient par des relevés de charges en mm au niveau de déversoirs rectangulaires à mince paroi. Le calcul des débits se faisait par la formule de Rhebock (1929) ;

- **Période 1967 à 1972** : les données de débits relatives à cette période sont de moindre qualité que celles de la période antérieure, car d'une part, les mesures de charges étaient effectuées au cm près, et d'autre part, les débits étaient mesurés avec le moulinet, appareil inadapté pour la mesure des faibles débits ;

- **Période postérieure à 1975** : à partir d'Avril 1975, les débits des sources sont mesurés au micro-moulinet avec une fréquence de 1 à 2 fois par mois. En parallèle, les mesures de charges sont effectuées en mm sur les anciens déversoirs.

Seules les données postérieures à 1975 seront prises en compte pour l'analyse hydrologique des sources. En effet, à partir de cette date, les mesures sont comparables entre elles et elles reflètent une nouvelle situation de ces émergences, fortement touchées par la sécheresse qui perdure depuis 1981.

1.3 – Sources du secteur Ribaa-Bittit

1.3.1 - Présentation

Représentant une dizaine d'émergences, elles sont situées à une trentaine de km au SE de la ville de Méknès. Les sources sont localisées sur un front de 7 km de long au piémont entre le Causse calcaire tabulaire du Moyen Atlas et la plaine du Saïs (Fig. 64).

Les eaux de ces sources servent à l'irrigation, mais également à l'alimentation en eau potable de la ville de Méknès. En effet, une partie des eaux de la source Bittit (environ 600 l/s) et la totalité des eaux de la source Ribaa aval (débit moyen 1975/2001 = 290 l/s) sont utilisées pour l'AEP de cette ville.

Presque toutes les sources sont issues directement des formations carbonatées du Lias, à l'exception des sources Akkous et Hijja, situées un peu plus à l'aval, qui sourdent des calcaires du Pliocène ou des basaltes Quaternaires. Les caractéristiques des sources sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

Nom	N°IRE/22	X	Y	Z	Débit moyen 1975/01 (l/s)	Débit moyen 2000 (l/s)
BITTIT Captée	106	519.66	355	758	1510	1358
RIBAA Amont	853	515.55	351.17	871	605	380
RIBAA Aval	854	515.45	351.1	871	290	70
SEBAA	108	520.85	355	745	348	162
AKKOUS	114	512.37	354.37	780	223	81
AGUEMGUEM	109	518.84	350.12	908	481	1
ATROUS	110	516.35	351.28	880	73	0
HIJJA	112	519.4	358.95	705	84	0
BITTIT NC	865	519.69	355.05	758	23	0
SI LMIR	107	520.8	354.6	755	31	0
Total					3668	2052

Tableau 11 : Coordonnées et débits moyens des sources (1975/2001)

Il apparaît que le débit des sources a fortement chuté depuis 1975 et que la moitié des émergences a complètement tari. Cet état est la conséquence directe de la sécheresse qui perdure dans la région depuis le début des années 80. Le déficit moyen du débit de l'année 2000, par rapport aux 26 dernières années est de 44 %. La source Bittit qui représentait à elle seule 41 % des apports (durant la période 1975/2001), représente actuellement les 2/3 de ces apports. Ceci s'explique par sa faible variabilité annuelle et inter-annuelle.

1.3.2 - Caractéristiques hydrologiques des sources

Les caractéristiques hydrologiques des sources seront étudiées pour différents pas de temps. Nous donnerons dans ce qui suit des indications générales pour des pas de temps annuels et mensuels. Les données journalières serviront par la suite à l'étude des débits classés, des courbes de récession et à l'analyse corrélatoire et spectrale.

Echelle annuelle

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques hydrologiques tirées des données d'observations annuelles de ce groupe de sources durant 25 ans (1976/2000) :

Nom	Q _{min}	Q _{moy}	Q _{max}	Ecart type	C.V (%)	I.V
BITTIT Captée	1252	1507	1898	159	10.6	0.4
RIBAA Amont	290	606	929	164	27.1	1.1
RIBAA Aval	33	285	691	175	61.6	2.3
SEBAA	162	344	649	126	36.7	1.4
AKKOUS	81	222	449	92	41.7	1.7
AGUEMGUEM	0	465	2106	630	135.5	4.5
ATROUS	0	72	249	76	105	3.4
HIJJA	0	78	465	148	188.8	5.9
BITTIT NC	0	22	139	45	205.4	6.3
SI LMIR	0	30	136	41	138.3	4.6
Ensemble des Sources	1643	3161	6829	1183	37.4	1.6

Tableau 12 : Caractéristiques hydrologiques annuelles des sources (1976/2000)

$$\text{C.V (\%)} = \text{Coefficient de variation} = (\text{Ecart type} / \text{Moyenne}) * 100$$

$$\text{I.V} = \text{Indice de variabilité} = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}) / Q_{\text{moy}}$$

Les modules annuels des sources sont très variables d'une année à l'autre. Plus le coefficient de variation et l'indice de variabilité sont faibles, plus le régime de la source est régulier. A cet égard, le régime de la source Bittit est le plus stable, suivi des sources Ribaa amont, Sebaa et Akkous. Par contre, Aguemguem, Si Lmir, Hijja et Bittit non captée ont des régimes très irréguliers.

Durant cette période d'observation de 25 ans, le module annuel de l'ensemble des sources a varié entre 1643 (année 1997) et 6829 (année 1976) l/s, avec une valeur moyenne de 3161 l/s, représentant un apport moyen annuel de l'ordre de 100 Mm³. L'indice de variabilité étant de 1.6 et le coefficient de variation de 37.4 %, témoignent d'un régime hydrologique peu régulier et d'une régulation inter-annuelle moyenne du système aquifère karstique. La figure 65 montre le graphique de l'évolution du débit moyen annuel de la totalité des sources entre 1976 et 2001. On note une tendance générale à la baisse, conséquence directe de la réduction des apports.

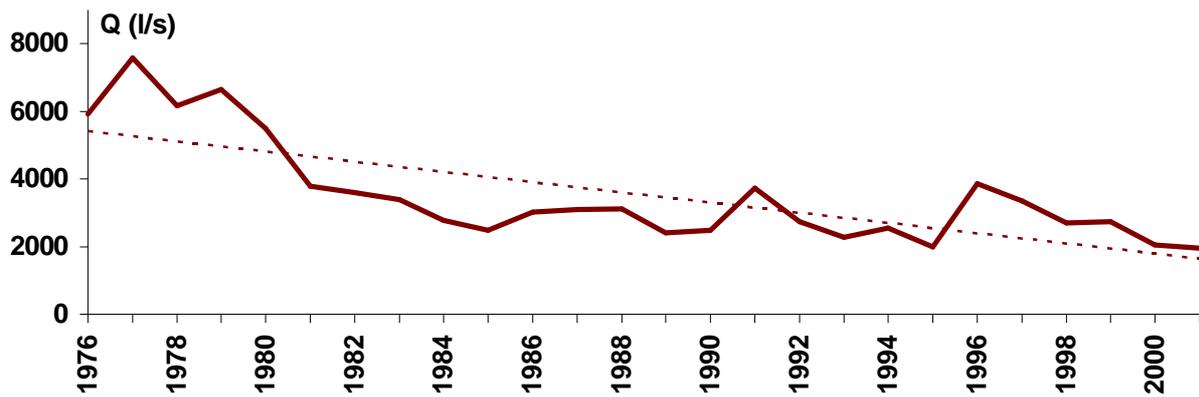


Figure 65 : Evolution du débit moyen annuel de l'ensemble des émergences du complexe Ribaa-Bittit (1976/01)

L'eau de ces sources a un double usage : agricole et domestique (AEP de Méknès). Durant la période 1976/2000, la part de l'agriculture était en moyenne de 73 % contre 27 % pour l'AEP. Cependant, compte tenu du fait que la dotation prélevée pour l'AEP est maintenue constante (tout au moins sur Bittit), le pourcentage d'eau réservée à l'irrigation diminue lorsque le débit total des sources diminue. La part réservée à l'AEP représente entre 15 et 50 % du débit total des sources, selon que l'année est humide ou sèche. Les pénuries d'eau dues à la sécheresse sont donc exclusivement supportées par l'agriculture.

Les graphiques représentant les débits annuels des sources prises séparément durant la période 1976/2000 (Fig. 66) montrent tous une tendance régulière à la baisse, avec une chute importante durant l'année 1981 où la sécheresse était très marquée. D'ailleurs, depuis cette année, les cinq sources les moins importantes ont soit complètement tari (Hijja et Bittit non captée), soit elles sont devenues des émergences temporaires qui se manifestent par intermittence lors des périodes de grandes averses (Attrous, Si Lmir et Aguemguem).

Pour bien comprendre cette tendance générale à la baisse des sources, il faut l'analyser en fonction de l'évolution des précipitations sur le Causse. En effet, en se référant par exemple à la station d'El Hajeb (z = 1050 m NGM), les déficits pluviométriques (en %) par rapport à la moyenne 1934/2001 sont beaucoup plus fréquents et plus importants depuis 1981. L'examen du graphique (Fig. 67) montre qu'avant les années 80, les années sèches s'alternaient avec les années humides. La période de sécheresse 1981/2001 était très sévère, elle enregistre dix années où le déficit de pluie dépasse 25 %, contre deux années seulement où l'excédent est supérieur à 25 %. Depuis 1981, le déficit pluviométrique moyen annuel à El Hajeb est de l'ordre de 14 %, soit l'équivalent de trois années moyennes de pluies.

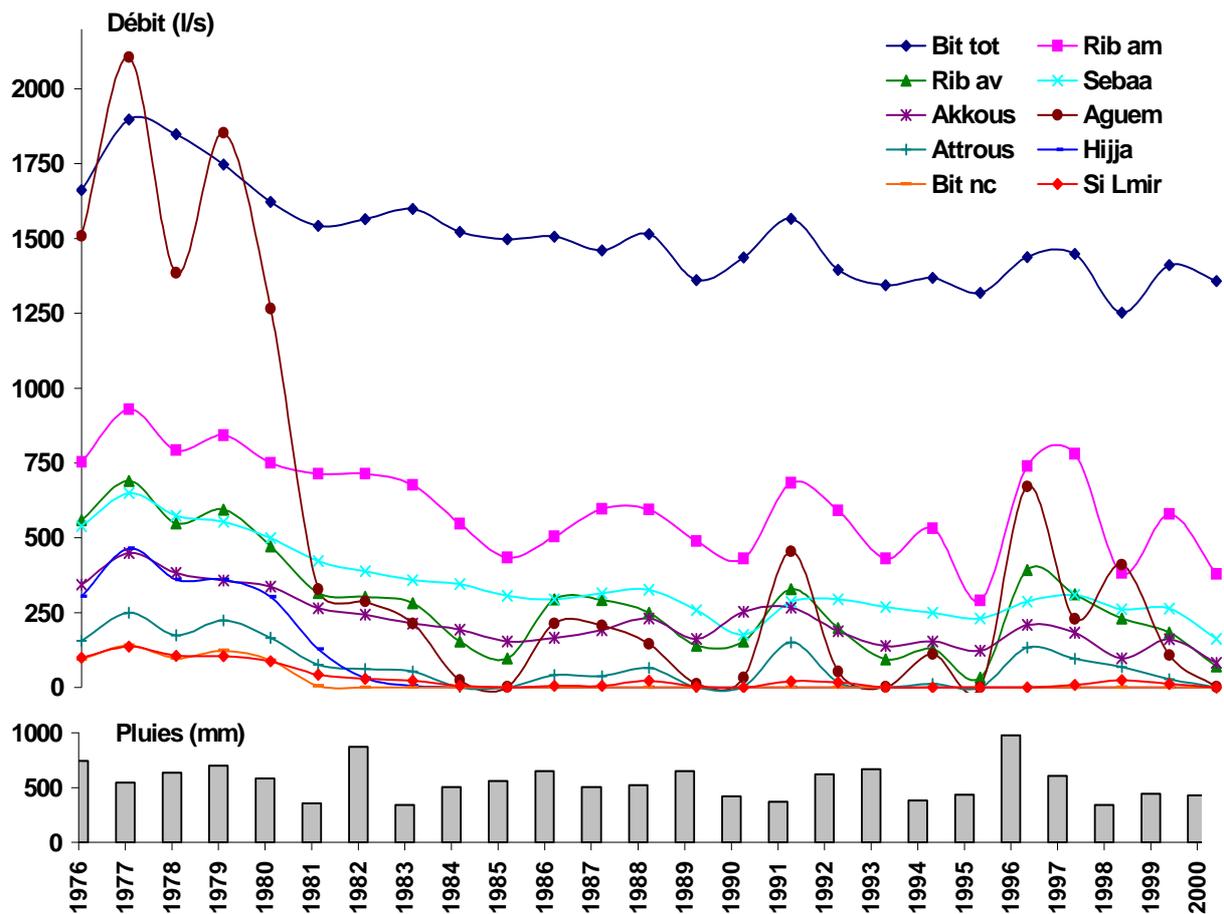


Figure 66 : Débits moyens annuels des sources et pluies à El Hajeb (1976/00)

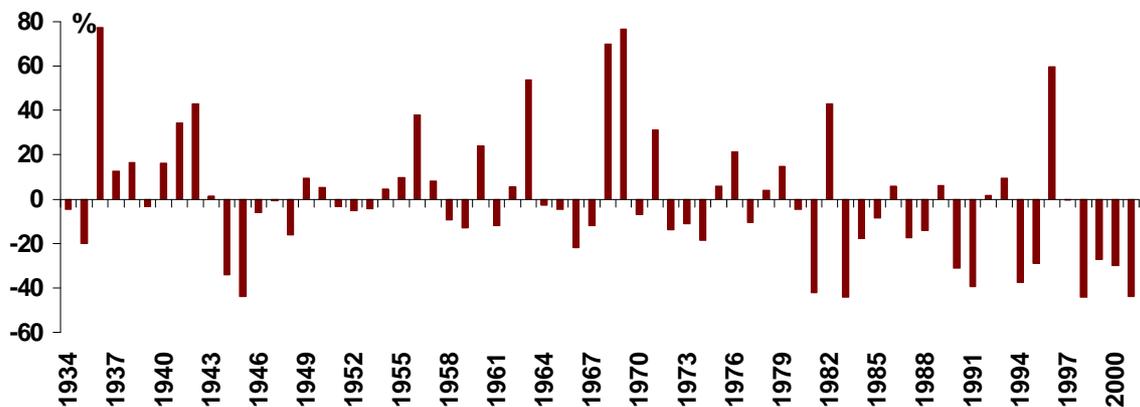


Figure 67 : Ecart pluviométrique par rapport à la moyenne à El Hajeb

Echelle mensuelle

Nous disposons d'un suivi régulier d'au moins 312 mois (26 ans) sur toutes les sources. Durant cette période d'observation (1975/2001), les mesures ont été effectuées de façon continue et homogène. Le tableau suivant récapitule les caractéristiques hydrologiques tirées des données d'observation mensuelles :

Nom	Q _{min} (l/s)	Q _{moy} (l/s)	Q _{max} (l/s)	Ecart type	C.V (%)	I.V
BITTIT Captée	811	1510	2000	186	12.3	0.8
RIBAA Amont	141	605	1484	198	32.7	2.2
RIBAA Aval	14	290	1019	199	68.6	3.5
SEBAA	77	348	840	144	41.4	2.2
AKKOUS	27	223	600	105	47.1	2.6
AGUEMGUEM	0	481	3163	729	151.6	6.6
ATROUS	0	73	376	88	120.5	5.2
HIJJA	0	84	609	153	182.1	7.3
BITTIT NC	0	23	182	48	208.7	7.8
SI LMIR	0	31	169	43	138.7	5.4
Ensemble des sources	1448	3647	9217	1684	46.2	2.1

Tableau 13 : Caractéristiques hydrologiques mensuelles des sources (1976/2001)

Le débit moyen mensuel de l'ensemble des sources a varié d'avril 1975 à septembre 2001 entre 1448 (08/1998) et 9217 l/s (02/1977) autour d'une valeur moyenne de 3647 l/s. L'indice de variabilité est de 2.1 et le coefficient de variation de 46.2 %. La figure 68 montre l'évolution du débit moyen mensuel de la totalité des sources durant les 26 années de suivi, couplée à la pluie mensuelle à El Hajeb. On constate l'importance des variations saisonnières et la tendance générale à la baisse des écoulements des sources, due à la sécheresse qui sévit depuis le début des années 80. Il apparaît également que ces émergences réagissent favorablement dès qu'un épisode de recharge important est enregistré.

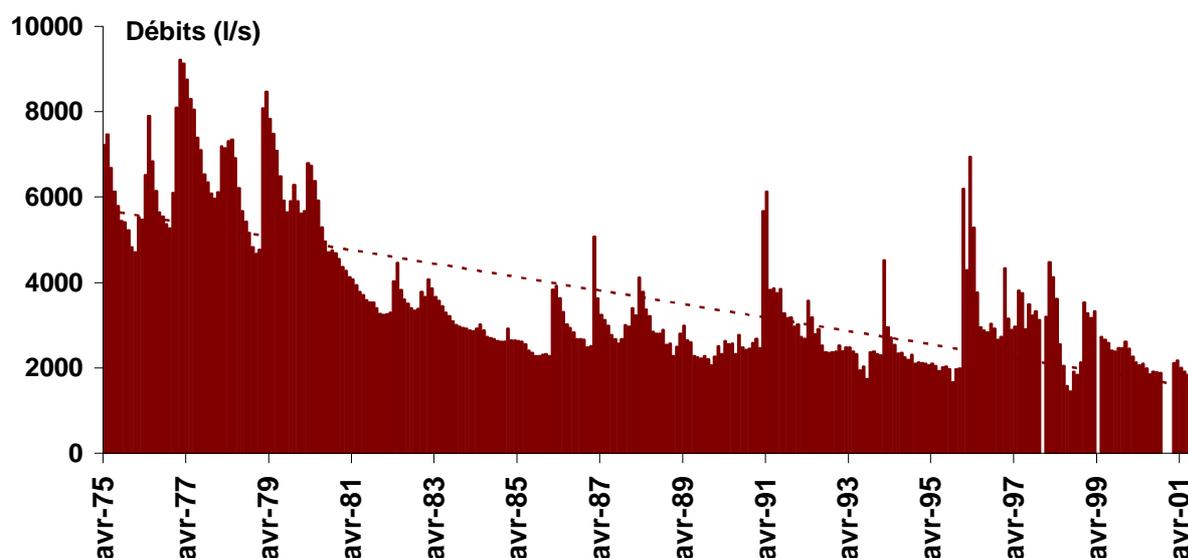


Figure 68 : Evolution du débit mensuel moyen de l'ensemble des émergences du complexe Ribaa-Bittit (04/75 au 09/01)

Les graphiques représentant les débits mensuels des sources prises individuellement durant la période 1975/2001 (Fig. 69) montrent des variations saisonnières importantes et une tendance générale à la baisse due à la sécheresse. Dans l'ensemble, les sources montrent un comportement proche en réagissant d'une façon similaire aux épisodes de recharge.

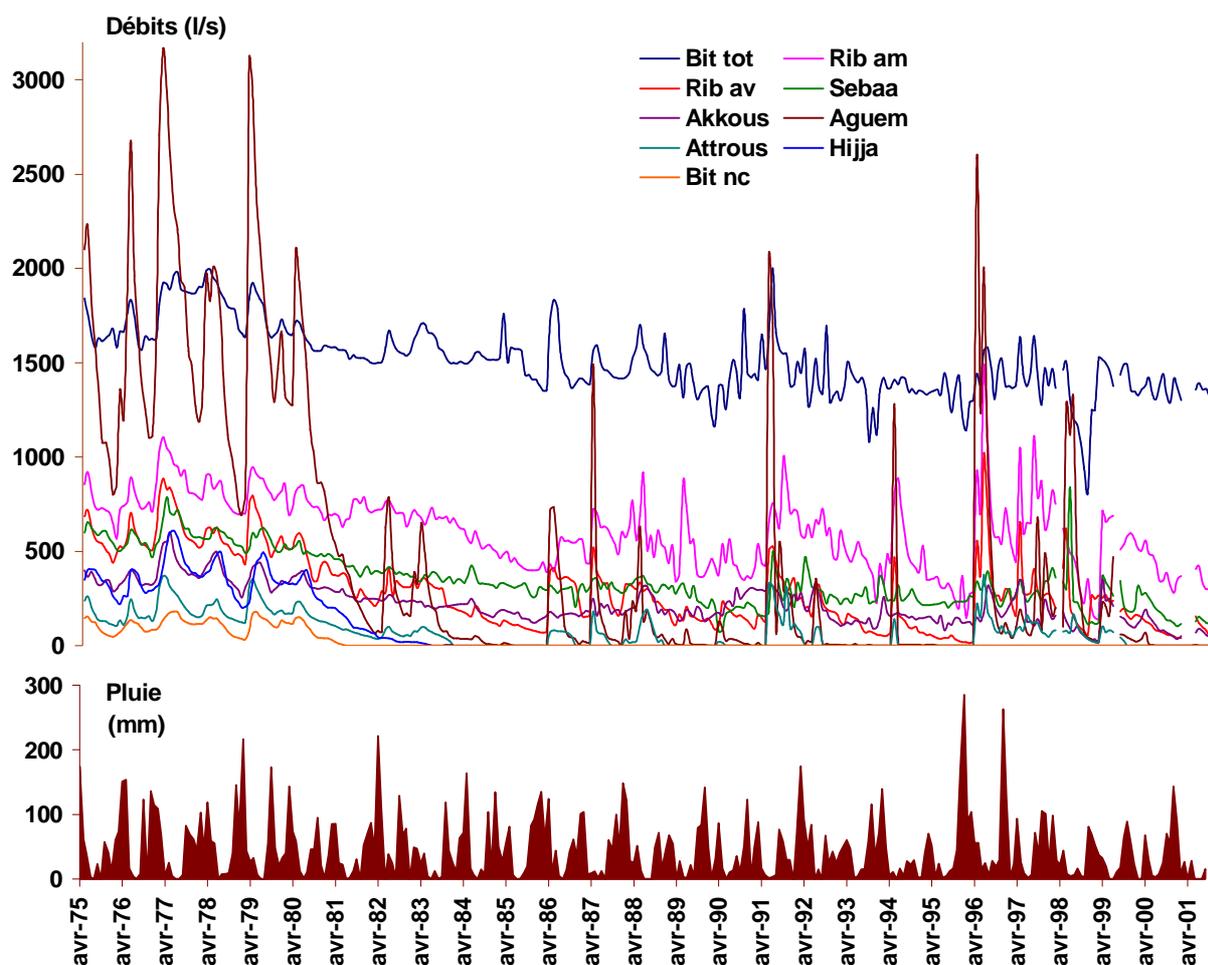


Figure 69 : Débits mensuels moyens des sources et pluies à El Hajeb (04/75 au 09/01)

Le tableau 14 montre les corrélations statistiques obtenues entre les débits des principales sources durant les 312 mois du suivi. L'examen précis du comportement des sources durant les 26 dernières années permet de relever les points suivants :

- * La source Bittit est de loin l'émergence dont le régime est le plus régulier. En effet, sa tendance baissière est plus modérée que les autres sources et ses fluctuations Saisonnières sont relativement faibles ;
- * Les quatre sources Ribaa amont, Ribaa aval, Sebaa et Akkous ont vu leur débit chuter brutalement entre 1980 et 1986. Ensuite, la tendance à la baisse est devenue plus modérée mais avec des variations Saisonnières plus marquées, notamment pour les sources Ribaa ;
- * Les cinq sources restantes n'ont pas pu résister au déficit d'apport. Ainsi, Bittit non captée (griffon proche de Bittit captée) a tari complètement dès le mois de Mai 1981. Elle a été suivie par la source Hijja en Mai 1983. Quant aux sources Aguemguem, Attrous et Si Lmir, elles sont devenues dès 1984 des émergences à régime temporaire se manifestant lors des grandes averses, avec des fluctuations saisonnières beaucoup plus marquées qu'auparavant.

Sources	Ribaa amont	Ribaa aval	Sebaa	Akkous
Bittit	R = 0.7 Rib _{am} = 0.73 Bit - 460	R = 0.78 Rib _{av} = 0.84 Bit - 973	R = 0.76 Seb = 0.59 Bit - 548	R = 0.79 Akk = 0.44 Bit - 450
Ribaa amont	1	R = 0.81 Rib _{av} = 0.83 Rib _{am} - 213	R = 0.76 Seb = 0.587 Rib _{am}	R = 0.75 Akk = 0.42 Rib _{am} - 28
Ribaa aval		1	R = 0.8 Seb = 0.58 Rib _{av} + 180	R = 0.8 Akk = 0.42 Rib _{av} + 100
Sebaa			1	R = 0.82 Akk = 0.59 + 16

Tableau 14 : Corrélations statistiques entre les débits des principales sources

La position des sources Aguemguem et Attrous en hauteur justifie la forte variabilité de leurs débits, ce qui n'est pas le cas par contre des sources Bittit non captée, Hijja et Si Lmir. Donc, les différences dans la variabilité des débits ne peuvent pas être expliquées uniquement par les situations topographiques, mais également par la structure complexe du réservoir karstique. Le tableau 15 récapitule les tarissements constatés sur certaines sources. Il en ressort que le tarissement de ces émergences ne suit pas non plus une logique topographique :

Source	Z (m NGM)	Date du tarissement	Reprise temporaire de l'écoulement
Bittit non captée	758	Mai 1981	-
Hijja	705	Mai 1983	-
Attrous	880	Décembre 1983	Février 1986
Si Lmir	755	Août 1984	Avril 1986
Aguemguem	908	Avril 1985	Février 1986

Tableau 15 : Tarissements constatés sur quelques sources depuis 1975

Le tableau 16 récapitule les débits moyens mensuels de chaque source du secteur Ribaa-Bittit pour la période 1975/01 : le débit maximum est enregistré généralement au mois d'avril, et le débit minimum au mois de septembre.

SOURCE	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Année
Bittit	1451	1469	1479	1481	1541	1539	1546	1595	1566	1504	1470	1479	1510
Ribaa am	546	564	559	584	612	628	681	674	643	606	583	578	605
Ribaa av	248	251	247	242	295	343	349	352	335	292	266	254	290
Sebaa	321	338	343	350	352	340	375	373	366	355	333	335	348
Akkous	191	202	217	234	233	231	235	256	242	226	207	201	223
Aguemg	311	296	288	294	444	723	753	761	612	527	403	367	482
Attrous	48	50	47	49	62	87	107	112	105	82	64	64	73
Hijja	76	75	71	68	67	71	80	98	108	108	97	82	83
Bittit NC	17	17	18	17	17	21	28	34	34	30	26	21	23
Si Lmir	29	29	26	23	25	29	32	37	39	38	35	32	31
Total	3238	3291	3295	3342	3648	4012	4186	4292	4050	3768	3484	3413	3668

Tableau 16 : Débits moyens mensuels des sources du complexe Ribaa-Bittit (1975/01)

La figure 70 montre les variations saisonnières moyennes des débits des sources durant les 26 années de suivi. Au cours d'une année hydrologique moyenne, on peut distinguer une période de recharge significative allant du mois janvier au mois de juin, avec un maximum de débit au mois d'avril, et une période de récession allant du mois de juillet au mois de décembre avec un débit minimum entre septembre et décembre. Les fluctuations saisonnières sont importantes sur les sources Aguemguem, Ribaa aval. Elles le sont beaucoup moins sur la source Bittit qui marque une régularité relativement remarquable.

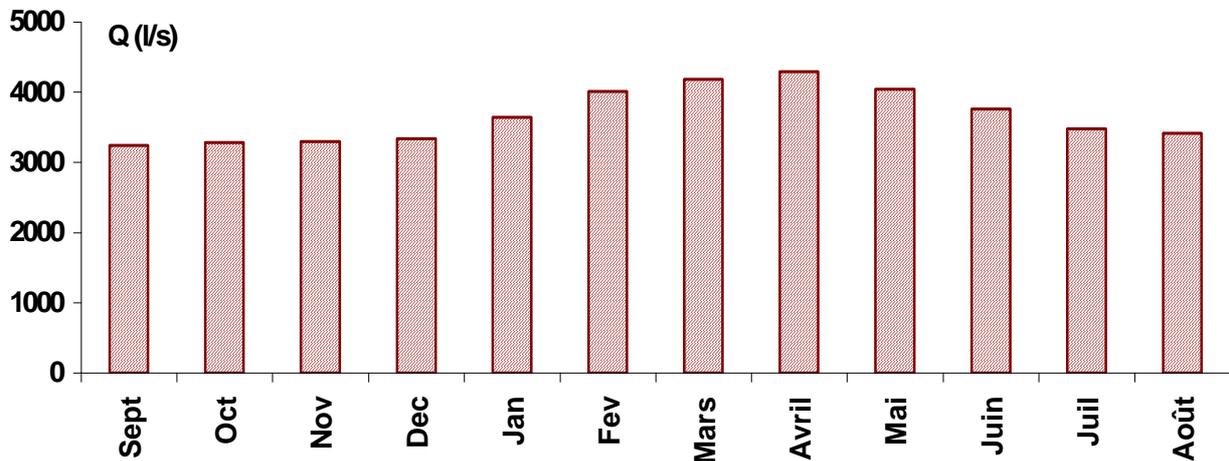


Figure 70 : Fluctuations saisonnières moyennes des débits de l'ensemble des sources du complexe Ribaa-Bittit (1975/01)

Echelle journalière

Il faut signaler un phénomène curieux et spectaculaire qui s'est produit le 05 juin 1981 : ce jour peu avant minuit, on avait noté à des intervalles très courts, une baisse importante du débit de la source Bittit captée (400 l/s au lieu de 1600 l/s habituellement) et de Ribaa, ainsi qu'un tarissement brutal et total des émergences Attrous et Aguemguem. Ce phénomène avait duré 24 heures et ensuite, l'écoulement des sources avait repris simultanément avec une eau très boueuse. L'état initial en terme de débit et d'eau claire n'a été atteint qu'au bout de 48 heures d'écoulement.

Cet évènement prouve le lien entre les différentes sources et l'unité de leur origine d'alimentation. Il est expliqué par l'éboulement souterrain probable d'une voûte qui faisait barrage à l'écoulement normal dans le drain principal alimentant le système des émergences. Une fois que la pression d'eau est devenue importante sur les blocs éboulés, le "barrage" a lâché et l'eau a repris son écoulement normal, chassant avec elle les argiles et les fines particules meubles.

Les données journalières sur les débits des sources dont on dispose sont répertoriées dans le tableau 17. Elles serviront par la suite à l'étude des débits classés, des courbes de récession et à l'analyse corrélatoire et spectrale.

Source	1 ^{ère} période de suivi	Nombre de jours	2 ^{ème} période de suivi	Nombre de jours	3 ^{ème} période de suivi	Nombre de jours
BITTIT Captée	01/09/75 au 31/08/77	731	01/09/95 au 04/02/98	888	-	-
RIBAA Amont	12/04/74 au 24/09/74	166	11/04/75 au 31/05/84	3339	01/09/95 au 04/02/98	888
RIBAA Aval	12/04/75 au 02/02/86	3950	-	-	-	-
SEBAA	31/05/67 au 14/07/69	776	26/05/70 au 20/08/71	452	-	-
ATRROUS	11/04/75 au 30/04/86	4038	16/05/86 au 22/03/87	677	-	-
BITTIT NC	11/04/75 au 31/08/86	4161	-	-	-	-

Tableau 17 : Données disponibles sur les débits journaliers des sources depuis 1975

1.4 – Sources du piémont du Causse d’Agouraï

1.4.1 - Présentation

Il s’agit de trois émergences de débordement de la nappe libre du Lias. Les sources Boujaoui et Maarouf sont situées à 20 km au Sud de la ville de Méknès au niveau du piémont du Causse d’Agouraï. Elles constituent les apports principaux de l’oued Boufekrane. La 3^{ème} source Aïn Aghbal est située au piémont d’El Hajeb à environ 20 km au SE de la ville de Méknès (Fig. 64).

Nous disposons d’un suivi mensuel régulier des débits au niveau des trois émergences depuis le mois de mai 1982. Bien que l’on dispose de données anciennes (1935/57), seules les 19 dernières années du suivi seront prises en compte pour la description hydrologique de ces sources, puisque les mesures sont comparables entre elles et décrivent mieux la nouvelle situation de ces émergences fortement touchées par la sécheresse. Les coordonnées des sources, ainsi que les débits moyens correspondant à la période 1982/2001 sont répertoriés dans le tableau 18 ci-dessous :

Nom	N°IRE/22	X	Y	Z	Débit moyen 1982/01 (l/s)	Débit moyen 2001 (l/s)
Maarouf	124	491.5	342.25	752	193	134
Boujaoui	126	489.85	343.66	755	97	71
Aghbal	131	501.05	346.65	769	123	69
Total					413	274

Tableau 18 : Caractéristiques des sources du Causse d’Agouraï (1982/2001)

1.4.2 - Caractéristiques hydrologiques des sources

Ne disposant pas de données journalières de ces sources, on se limitera à leur description hydrologique au pas de temps annuel et mensuel.

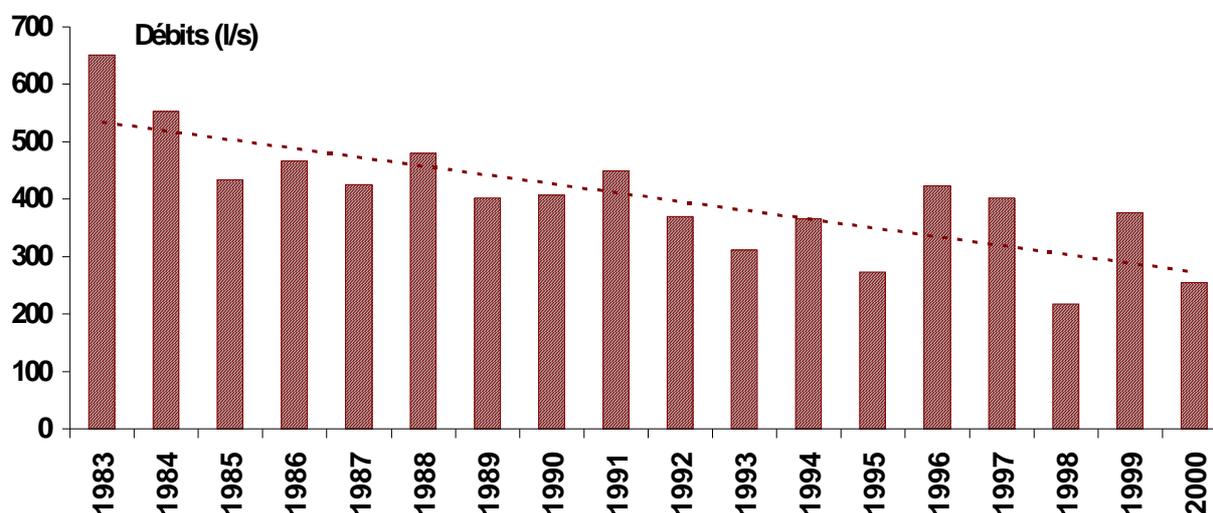
Echelle annuelle

Le tableau 19 suivant récapitule les caractéristiques hydrologiques tirées des données d’observation annuelles de ce groupe de sources durant 18 ans (1983/2000) :

Nom	Q _{min}	Q _{moy}	Q _{max}	Ecart type	C.V (%)	I.V
Maarouf	90	185	343	63	33.8	1.4
Boujaoui	43	94	141	24	25.3	1
Aghbal	65	124	185	40	32.3	1
Ensemble des Sources	198	403	669	127	31.5	1.2

**Tableau 19 : Caractéristiques hydrologiques annuelles
des sources du Causse d'Agourai (1983/2000)**

Durant cette période d'observation de 18 ans, le module annuel de l'ensemble des sources a varié entre 198 et 669 l/s autour d'une valeur moyenne de 403 l/s, représentant un apport moyen annuel de l'ordre de 12.7 Mm³. L'indice de variabilité étant de 1.2 et le coefficient de variation est de 31.5 %, témoignent d'un régime général régulier et d'une régulation interannuelle moyenne par le système aquifère karstique. La figure 71 montre l'évolution du débit moyen annuel des trois sources du piémont du Causse d'Agourai entre 1983 et 2000. On note une tendance générale à la baisse en relation directe avec la baisse des apports.



**Figure 71 : Evolution du débit annuel moyen des
trois émergences du piémont du Causse d'Agourai**

Les graphiques représentant les débits annuels des sources prises séparément durant la période 1983/2000 (Fig. 72) montrent tous une tendance régulière à la baisse. Les deux sources Maarouf et Boujaoui ont un comportement très proche avec des fluctuations annuelles modérées, preuve de leur appartenance à un même système aquifère à réserves relativement importantes. Par contre, la source Aghbal marque des fluctuations annuelles beaucoup plus importantes, en réagissant avec plus d'ampleur aux variations du régime pluviométrique d'une année à l'autre. Le réservoir aquifère qui alimente la source Aghbal est probablement moins important que celui des deux autres sources, car son pouvoir de régulation est moins important.

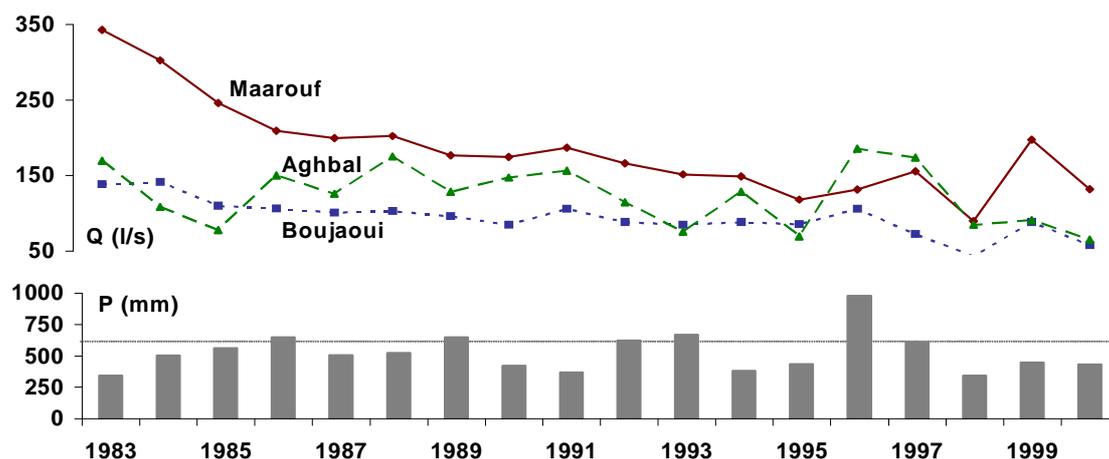


Figure 72 : Débits annuels moyens des sources et pluies à El Hajeb (1983/2000)

Echelle mensuelle

Nous disposons d'un suivi régulier d'au moins 228 mois (19 ans) sur les trois sources. Durant cette période d'observation (1982/01), les mesures ont été effectuées de façon continue et homogène. Le tableau 20 suivant récapitule les caractéristiques hydrologiques tirées des données d'observations mensuelles :

Nom	Q _{min}	Q _{moy}	Q _{max}	Ecart type	C.V (%)	I.V
Maarouf	29	193	521	87	45.1	2.5
Boujaoui	11	97	180	33	33.7	1.7
Aghbal	36	123	383	59	47.7	2.8
Ensemble des sources	76	413	1084	179	43.3	2.4

Tableau 20 : Caractéristiques hydrologiques mensuelles des trois sources (1982/2001)

Le débit moyen mensuel des trois sources a varié (de Mai 1982 à Septembre 2001) entre 1084 et 76 l/s autour d'une valeur moyenne de 413 l/s. L'indice de variabilité est de 2.4 et le coefficient de variation de 43.3 %. La figure 73 ci-dessous montre l'évolution du débit moyen mensuel des trois sources prises ensemble durant les 19 années de suivi. On constate l'importance des variations saisonnières et la tendance générale à la baisse due à la sécheresse qui sévit depuis le début des années 80. Il apparaît également que ces émergences réagissent favorablement dès qu'un épisode de recharge important est enregistré.

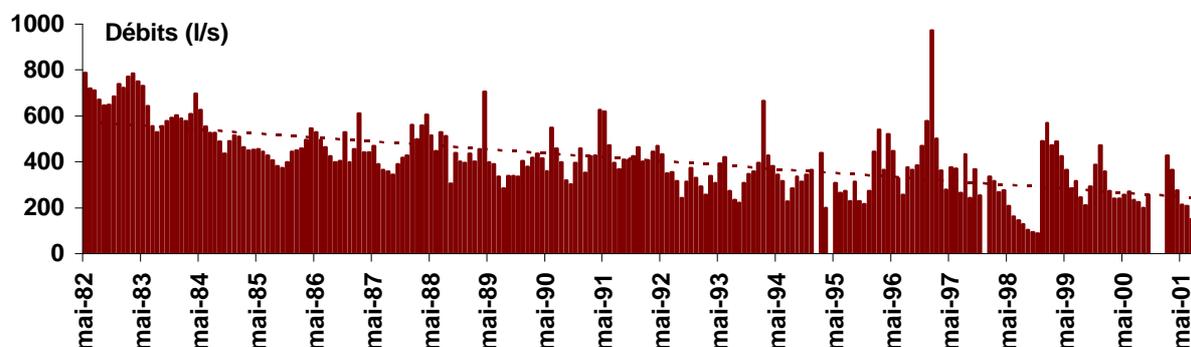


Figure 73 : Evolution du débit mensuel moyen des trois sources d'Agourai (1982-2001)

Les graphiques représentant les débits mensuels des sources prises individuellement durant la période 1982/2001 (Fig. 74) montrent des variations saisonnières importantes et une tendance générale à la baisse due à la sécheresse. Dans l'ensemble, les deux sources Maarouf et Boujaoui montrent un comportement proche en réagissant d'une façon similaire aux épisodes de recharge. La source Aghbal a un comportement différent marqué par des fluctuations saisonnières beaucoup plus accentuées. Les corrélations statistiques obtenues entre les débits des trois sources durant les 228 mois du suivi n'ont été significatives que pour les deux sources Maarouf-Boujaoui, où le coefficient de corrélation linéaire a atteint 0.78 avec la relation suivante : $\text{Boujaoui} = 0.3 \text{ Maarouf} + 40$. Les coefficients de corrélation obtenus avec la source Aghbal étaient de l'ordre de 0.3.

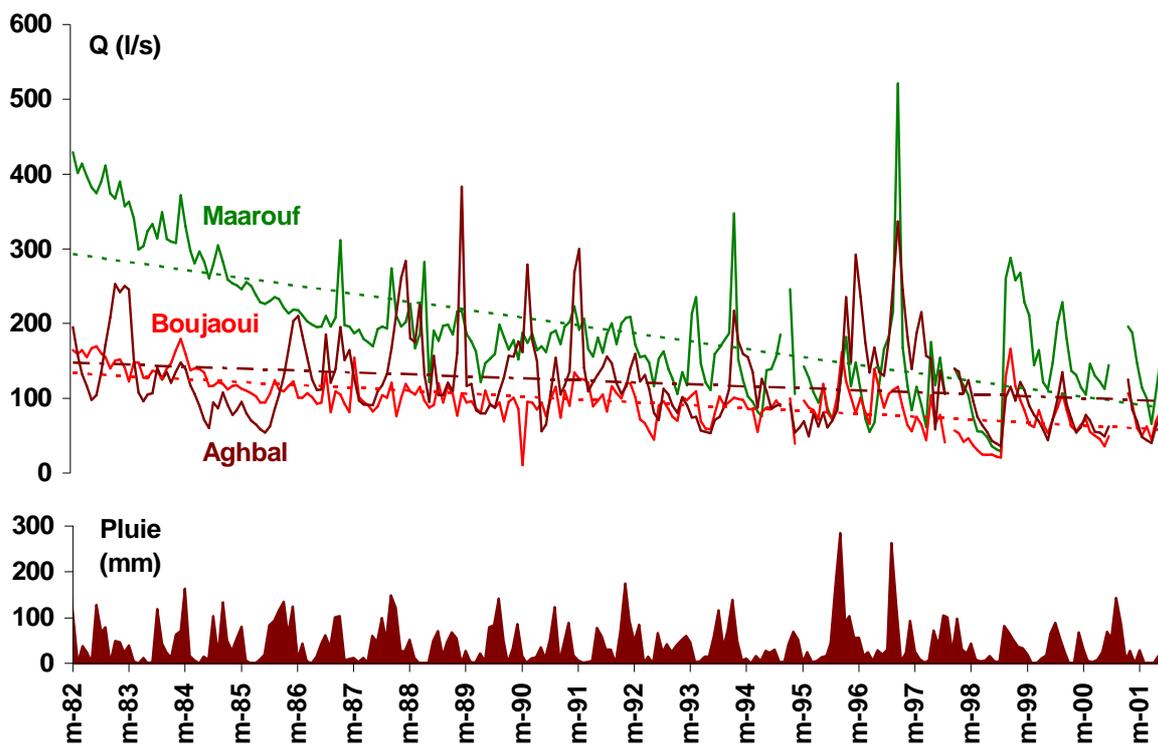


Figure 74 : Débits mensuels des sources et pluies à El Hajeb (05/1982 au 09/2001)

Le tableau 21 ci-dessous récapitule les débits moyens mensuels des trois sources du piémont du causse d'Agourai pour la période 1982/01. Il en ressort que pour les sources Maarouf et Boujaoui, le débit maximum est enregistré généralement au mois de janvier et le débit minimum au mois de juillet. Par contre pour la source Aghbal, le débit maximum est enregistré au mois d'avril et le débit minimum au mois de septembre.

SOURCE	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Année
Maarouf	182	181	189	222	235	221	194	193	196	182	168	171	195
Boujaoui	93	90	98	108	110	102	96	100	97	95	88	89	97
Aghbal	81	91	109	123	139	147	139	169	148	127	107	99	123
Total	356	362	396	453	484	470	429	462	441	404	363	359	415

Tableau 21 : Débits moyens mensuels des sources du Causse d'Agourai (1982/01)

La figure 75 montre les variations saisonnières moyennes des débits des trois sources durant les 19 années de suivi. Au cours d'une année hydrologique moyenne, on distingue une période de recharge significative allant du mois de novembre au mois de juin, et une période de décrue allant du mois de juillet au mois d'octobre.

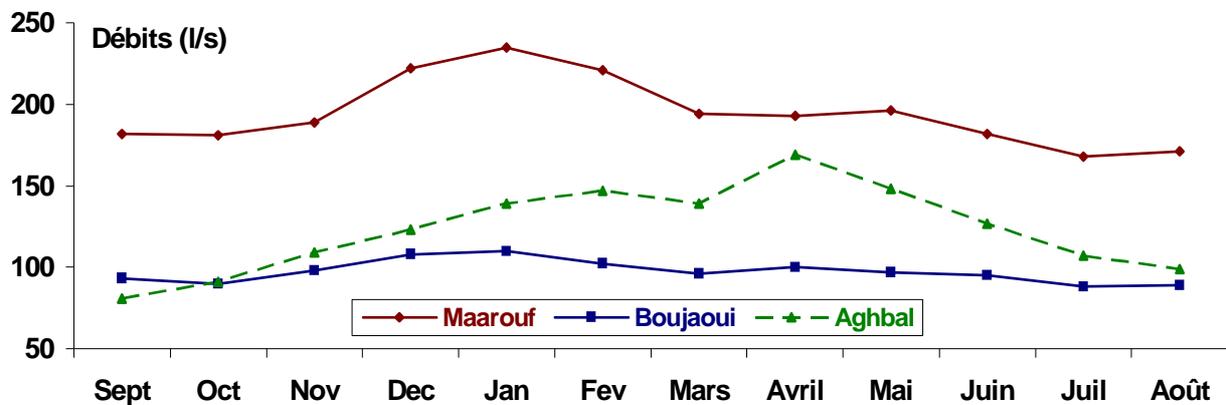


Figure 75 : Variations saisonnières des débits des sources du Causse d'Agourai (1982/01)

CHAPITRE 2 – CONDITIONS D'EMERGENCE DES PRINCIPALES SOURCES

2.1 – Présentation

Les conditions d'émergence des principales sources du secteur Ribaa-Bittit ont été traitées sommairement (Hakim, 1982). Ces exutoires appartiennent à l'unité hydrogéologique d'El Hajeb-Ifrane. Ils se localisent à l'extrémité NW de la gouttière synclinale de Tizguit-Ifrane, et ils se manifestent par une suite d'émergences au niveau du contact du Causse Moyen Atlasique et du plateau de Méknès sur un front d'environ 7 km. Les griffons des sources apparaissent à la faveur de la flexure de Sidi Lmir et de nombreuses failles.

La nappe profonde en charge du plateau de Méknès est alimentée le long du contact du Causse et de la plaine. Elle reçoit le maximum d'eau dans le secteur Ribaa-Bittit situé dans l'axe de drainage souterrain du synclinal de Tizguit. L'écoulement souterrain à partir des eaux pluviales et nivales infiltrées dans le Causse carbonaté liasique recharge non seulement la nappe profonde, mais également en partie l'aquifère superficiel du Plio-Quaternaire (Fig. 76).

Le débit et le temps de réponse à une impulsion (averse, transfert d'un polluant, turbidité ...) pour de telles sources karstiques peuvent varier considérablement. Ainsi, deux sources voisines en surface et provenant en principe d'un même aquifère, peuvent avoir des réactions analogues mais déphasées dans le temps, ou des réactions différentes et parfois contradictoires qui illustrent bien la complexité du système. Cette différence de comportement peut être liée à la structure géologique, aux aires d'alimentation plus ou moins proches, à la vitesse d'infiltration plus ou moins rapide et à la position par rapport aux drains principaux du système karstique.

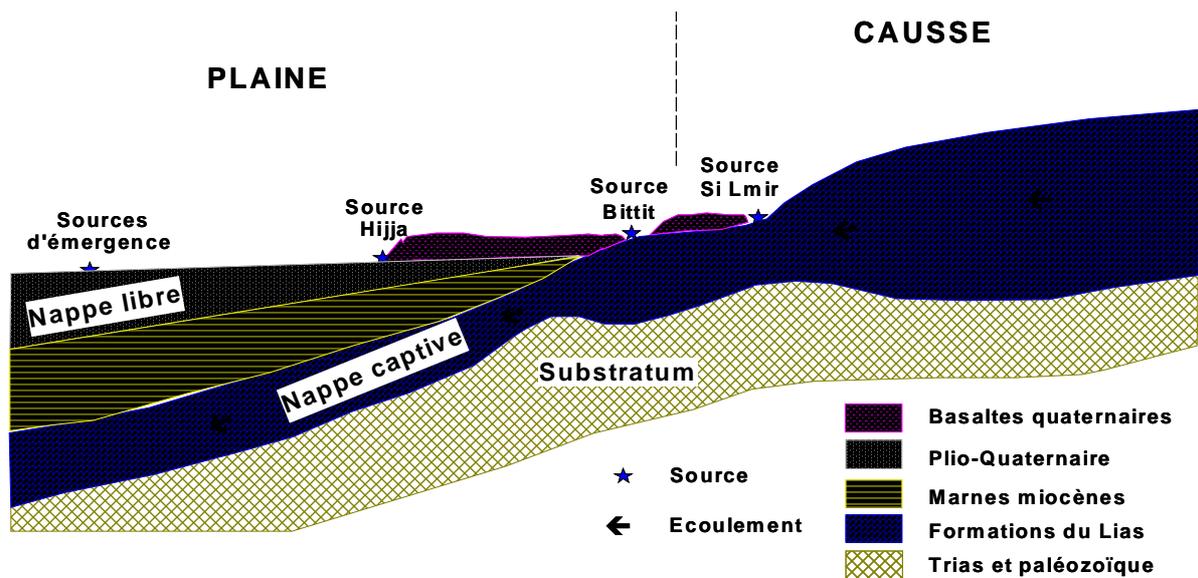


Figure 77 : Coupe hydrogéologique schématique du système Bittit-Si Lmir

2.2.2 - Source Aguemguem

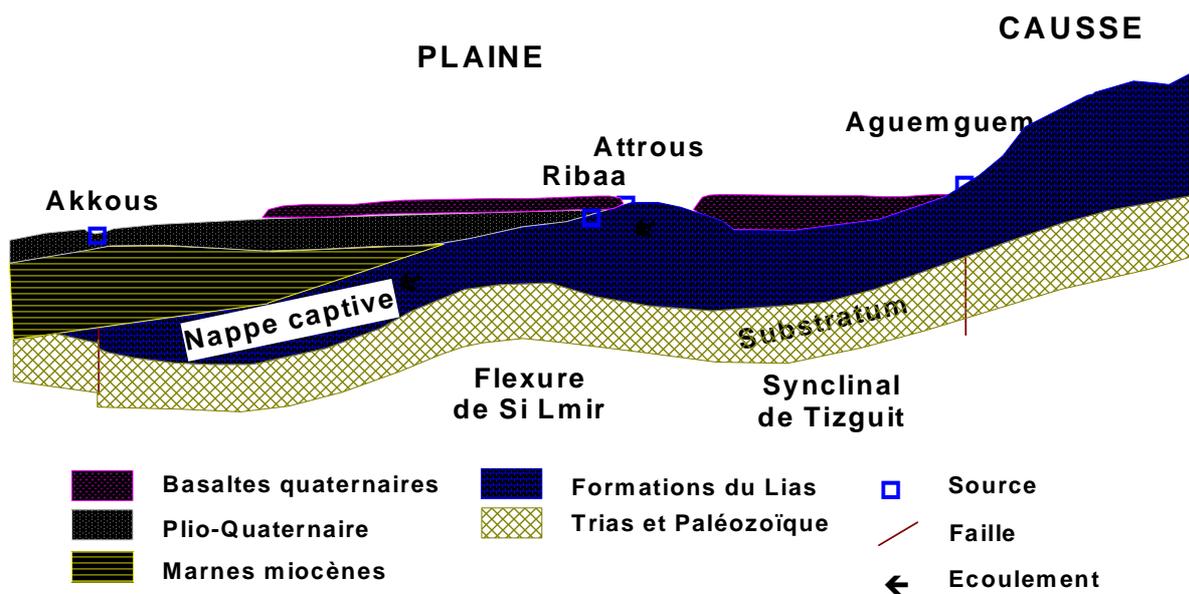


Figure 78 : Coupe hydrogéologique schématique passant par les sources Aguemguem-Attrous-Ribaa-Akkous

Cette source (N°IRE 109/22) qui était importante dans le passé, a été très touchée par la sécheresse au point qu'elle a tari en avril 1985, et elle ne se manifeste actuellement que lors des grandes averses. Cette émergence jaillit sur le Causse à une côte nettement plus élevée que celle de Bittit, à partir des calcaires du Lias moyen au contact des basaltes quaternaires (Fig. 78). Il s'agit d'une source de bordure de synclinal qui apparaît plus particulièrement à la faveur d'une importante faille. Sa position en altitude et en bordure de l'axe du drainage souterrain explique l'extrême irrégularité de son débit, ce qui permet de la considérer comme la source de trop plein des sources Bittit.

Un seul forage de reconnaissance a été exécuté à proximité de cette source. Il a rencontré sur toute la hauteur des formations fissurées et cavernueuses du Lias, avec des niveaux de sables dolomitiques meubles et bouillants surtout à partir de 31 m de profondeur.

N°IRE	X	Y	Z	Prof	Date	Q (l/s)	NS	RS (g/l)
1031/22	519	350.05	920	67 m	08/82	2.1	14.9	0.41

Tableau 23 : Données du forage réalisé à proximité de la source Aguemguem

2.2.3 - Le système Ribaa-Attrous

Ce système est formé d'abord, des sources Ribaa aval (N°IRE 854/22) et Ribaa amont (853/22) distantes de 140 m, et ensuite de la source Attrous (110/22) située à 600 m à l'Est de Ribaa amont. Les sources Ribaa jaillissent sur la bordure Ouest du synclinal de Tizguit, au pied de la flexure de Sidi Lmir et au contact des dolomies liasiques d'une part, et des formations du Saïs et des basaltes quaternaires d'autre part (Fig. 78). Ces émergences qui sourdent à l'aval des basaltes sont des sources de débordement par contact stratigraphique. L'amincissement du Lias par érosion anté-miocène et la proximité du substratum triasique, confèrent à ces deux sources une attitude de déversement qui rend ces exutoires peu sensibles aux fluctuations de la nappe profonde du Saïs.

La source Attrous quant à elle jaillit au contact des basaltes quaternaires. Elle a tari en décembre 1983 et ne se manifeste depuis, que lors des fortes périodes de recharge. La grande variabilité de son régime lui confère les signes d'une source de trop plein du système Ribaa.

Quelques forages de reconnaissance ont été réalisés à proximité des sources Ribaa. Leurs données sont résumées dans le tableau 24. Il en ressort que les débits sont très faibles ou nuls, notamment au niveau de l'ouvrage profond 187/22. Ceci confirme une remontée du Trias à ce niveau jouant un rôle de barrière, empêchant l'écoulement de l'eau vers la plaine.

N°IRE	X	Y	Z	Prof (m)	Date	Q (l/s)	NS (m)	Perte totale
184/22	515.37	351.23	873	40	10/49	0.3	7.1	9.3
185/22	515.46	351.07	880	80	12/49	1.2	5.6	12
186/22	515.24	351.14	870	20	12/49	1.2	Sec	-
187/22	515.4	351.19	871	280	05/50	0	Sec	-
188/22	515.3	351.17	870	10	01/50	1	0.5	-
FORAGE	LITHOLOGIE SOMMAIRE							
184/22	0 à 9 m : Basaltes plus ou moins fissurés. 9 à 13 m : Sable blanchâtre. 13 à 28 m : Calcaire vacuolaire fissuré à remplissage d'argile rouge. 28 à 32 m : Argile grise et rouge. 32 à 40 m : Calcaire à remplissage d'argile rouge.							
185/22	0 à 22 m : Calcaire blanc peu fissuré à remplissage d'argile rouge et calcite. 22 à 27 m : Calcaire très fissuré cavernueux. 27 à 37 m : Calcaire bréchoïde vacuolaire à remplissage d'argile rouge. 37 à 80 m : Calcaire blanc plus ou moins fissuré et cavernueux à remplissage argileux.							
186/22	0 à 3 m : Basalte. 3 à 8 m : Calcaire blanc cavernueux à remplissage d'argile. 8 à 13 m : Marnocalcaires compacts. 13 à 17 m : Calcaire blanc très fissuré et cristaux de calcite. 17 à 20 m : Argile verte puis grise avec conclusion de calcaire rose.							
187/22	0 à 8 m : Basaltes. 8 à 38 m : Calcaire dolomitiques avec niveaux gréseux et argiles rouges. 38 à 40 m : Argiles vertes. 40 à 272 m : Dolomies bréchiqes plus ou moins fissurées et colmatées d'argiles rouges et sables dolomitiques en fuite.							
188/22	0 à 8 m : Basaltes. 8 à 9 m : Argile rouge. 9 à 10 m : Calcaires dolomitiques							

Tableau 24 : Données des forages réalisés à proximité des sources Ribaa et Attrous

2.2.4 - Conclusion à propos des systèmes Ribaa-Bittit

Le système hydrogéologique des émergences Ribaa-Bittit, jouit d'une capacité de stockage très importante. Il est doté d'unités annexes très étendues pouvant emmagasiner une alimentation importante provenant des pluies et des fontes de neige, sans provoquer des crues brutales, tout en fournissant un débit bien soutenu durant toute l'année. La présence de dolomies sableuses à la base de l'aquifère liasique plaide en faveur de l'existence d'une nappe à perméabilité d'interstices et à écoulement relativement lent. On aurait donc dans l'ensemble un système ayant un pouvoir de régulation qui permet d'amortir les fortes recharges et de restituer l'eau avec modération.

La fissuration importante du Causse et la rareté des cavernes, nous amène à penser qu'on a affaire à un karst souterrain peu évolué, où toutes les fissures peuvent être généralement remplies d'eau avec un écoulement souterrain plus ou moins lent. Cela contraste avec le cas des karsts évolués aux drains préférentiels où l'écoulement rapide fait transiter l'eau en vitesse vers l'extérieur provoquant ainsi des crues brutales et des variations importantes de débit.

2.2.5 - Sources Si Lmir et Sebaa

Leurs eaux sourdent des dolomies du Lias inférieur. Elles s'alimentent sur la flexure de Sidi Lmir et jaillissent à l'amont de la coulée basaltique de Bittit qui les met en charge. Ces sources seraient indépendantes du système Ribaa-Bittit car d'une part, elles présentent des caractéristiques chimiques et thermiques différentes (voir cinquième partie : Etude Hydrochimique) et d'autre part, elles n'ont pas été touchées par l'arrêt brutal de débit survenu le 05/06/1981 sur ces dernières.

La source Sebaa (N°IRE 108/22) peut être considérée comme une des principales émergences du secteur. Elle est située à 2 km à l'Est de Bittit et regroupe trois griffons. Son débit est assez soutenu et son régime est relativement stable.

La source Si Lmir (107/22) est située à mi chemin entre Bittit et Sebaa. Elle a tari en Août 1984 et se manifeste modestement depuis, lors des grandes averses. Elle était caractérisée par un régime très irrégulier, ce qui lui confère le caractère de source de trop plein de la source Sebaa.

Il faut mentionner que les eaux des systèmes Si Lmir-Sebaa, et Ribaa-Bittit, aussitôt jaillies, s'infiltrèrent à nouveau et se perdent dans les formations plio-quadernaires du plateau de Méknès et dans ou sous les basaltes quadernaires, pour rejaillir dans des sources situées à l'aval, telle que la source Hijja (112/22) qui a tari complètement et brutalement en Mai 1983 et qui était caractérisée par une grande variabilité de son débit.

2.2.6 - Sources Akkous

Il s'agit d'un groupe de cinq sources voisines (N° IRE 114/22) jaillissant au niveau de la plaine à environ 7 km à l'Ouest de Bittit et 5 km au NW de Ribaa. Ses eaux en charge issues de la nappe profonde du Lias émergent au sein des calcaires lacustres pliocènes. Bien que marquant une tendance générale à la baisse depuis 1977, le régime de l'exutoire total peut être qualifié de relativement stable.

Les reconnaissances géophysiques réalisées dans le secteur ont montré l'absence du Lias par endroits, et il se trouve que les sources Akkous se localisent juste à la limite d'extension du Lias. En effet, à leurs niveaux une faille importante relève le substratum triasique et primaire, constituant ainsi un barrage souterrain imperméable (Fig. 78). Cette faille sert ainsi d'exutoire à la nappe en charge du Lias, en fournissant une eau abondante et bien soutenue toute l'année au groupe Akkous.

2.3 – Conclusion

Les sources du complexe Ribaa-Bittit sont issues de l'aquifère liasique et leur bassin d'alimentation se situe sur le Causse d'El Hajeb-Ifrane. Elles peuvent se regrouper comme suit :

- Les sources à débit important et bien soutenu ayant un faible indice de variabilité interannuel : il s'agit des sources de débordement (Bittit, Ribaa et Sebaa) jalonnant la flexure de "Si Lmir" et directement alimentées par la nappe liasique. Il s'agit également de la source artésienne d'Akkous dont les eaux remontantes traversent les couches tertiaires du Saïs.
- Les sources de trop plein qui se situent dans une position assez haute et dont les variations de débit sont notables (fort indice de variabilité). Ce sont les sources qui sont les plus sensibles aux épisodes de sécheresse : Attrous, Aguemguem et Si Lmir.
- Les sources d'émergence de la nappe plio-quadernaire du Saïs, aux débits faibles et aux indices de variabilité très élevés : parmi ces sources qui sont actuellement à l'arrêt, notons la source Hijja et les nombreuses petites sources de ce secteur.

CHAPITRE 3 - ETUDE DES DEBITS CLASSES

3.1 - La méthode

La méthode des débits classés couramment utilisée à des fins interférentielles en hydrologie de surface, a été transposée à l'étude des sources karstiques par Mangin (1971, 1975) dans une optique purement descriptive. La méthode consiste à étudier la distribution des fréquences cumulées des débits observés à la source. Cette méthode se révèle être un outil intéressant pour vérifier l'unité des systèmes karstiques. Ainsi, on peut mettre en évidence une fuite ou un apport d'eau vers le système karstique étudié. Ceci se traduit sur la courbe par des discontinuités.

Une loi de probabilité est ajustée. En pratique on reporte les fréquences cumulées des débits sur un diagramme fonctionnel. L'observation sur la courbe de plusieurs segments de droites traduit l'existence de plusieurs lois d'écoulement. Ces changements de loi d'écoulement peuvent avoir des origines diverses liées soit à des modifications hydrodynamiques internes au système karstique, comme le stockage-déstockage des réserves ou l'entrée en fonctionnement de trop-pleins, soit à des interrelations avec un système voisin qui se traduisent par des apports ou des fuites. La confrontation avec les observations faites sur le terrain permet en général de trancher entre les diverses causes imposant une loi d'écoulement donnée.

3.2 – Résultats et discussions

Dans un premier temps, les courbes des débits classés des quatre principales sources ont été construites sur la base des deux cycles hydrologiques à pluviométrie normale : 09/1975-08/1977. Par la suite, les mêmes courbes des deux sources captées (Bittit et Ribaa aval) ont été construites sur la base des deux cycles hydrologiques situés en période de sécheresse : 09/1995-08/1997. La comparaison entre les deux périodes devrait donner une idée sur le comportement de ces émergences karstiques soumises à une sécheresse prolongée.

L'intervalle de classe qui a été retenu pour le calcul des pourcentages cumulés des débits est de 40 l/s pour les émergences Bittit (chronique 1975/77) et Ribaa amont, 30 l/s pour les émergences Ribaa aval et Bittit (chronique 1995/97) et 20 l/s pour la source Attrous. Dans tous les cas, la liaison entre le débit et la variable aléatoire est de type arithmétique. Le tableau 25 ci-dessous donne les résultats des analyses des débits classés des sources pour les deux cycles 1975/77 et 1995/97.

3.2.1 - Cycles hydrologiques 1975-1977

Les graphiques des débits classés (Fig. 79) des quatre sources sont constitués de quatre segments de droites, sauf pour la source Attrous où les débits s'organisent en trois segments. L'interprétation ci-dessous distingue le comportement des émergences par rapport à leurs débits moyens. Le tableau 26 ci-dessous résume les résultats obtenus.

Bittit (1975/1977)			Bittit (1995/1997)			Ribaa amont (1975/1977)			Attrous (1975/1977)			Ribaa aval (1975/1977)			Ribaa aval (1995/1997)		
Q _m	Nb	% cum	Q _m	Nb	% cum	Q _m	Nb	% cum	Q _m	Nb	% cum	Q _m	Nb	% cum	Q _m	Nb	% cum
1520	16	2.2	1235	133	18.2	530	11	1.5	100	64	8.8	115	18	2.5	15	111	15.2
1560	64	10.9	1265	4	18.7	570	10	2.9	120	130	26.6	145	12	4.1	45	14	17.1
1600	98	24.3	1295	53	26	610	23	6	140	136	45.3	175	56	11.8	75	3	17.5
1640	145	44.1	1325	38	31.2	650	13	7.8	160	61	53.6	205	192	38.1	105	0	17.5
1680	56	51.8	1355	12	32.8	690	105	22.2	180	34	58.2	235	101	51.9	135	1	17.7
1720	44	57.8	1385	31	37.1	730	130	40	200	46	64.5	265	49	58.6	165	5	18.3
1760	19	60.4	1415	81	48.2	770	84	51.5	220	36	69.4	295	43	64.5	195	73	28.3
1800	43	66.3	1445	161	70.2	810	83	62.8	240	28	73.2	325	32	68.8	225	51	35.3
1840	36	71.2	1475	138	89.1	850	37	67.9	260	36	78.1	355	34	73.5	255	60	43.5
1880	98	84.7	1505	48	95.6	890	30	72	280	29	82.1	385	25	76.9	285	59	51.6
1920	60	92.9	1535	17	98	930	51	79	300	35	86.9	415	42	82.7	315	59	59.7
1960	20	95.6	1565	6	98.8	970	55	86.5	320	36	91.8	445	43	88.5	345	69	69.1
2000	11	97.1	1595	3	99.2	1010	25	89.9	340	22	94.8	475	32	92.9	375	35	73.9
2040	12	98.7	1625	3	99.6	1050	18	92.4	360	15	96.8	505	24	96.2	405	58	81.8
2080	3	99.1	1655	3	100	1090	44	98.4	380	13	98.6	535	17	98.5	435	50	88.7
2120	4	99.7				1130	6	99.2	400	10	100	565	11	100	465	20	91.4
2160	2	100				1170	6	100							495	52	98.5
															525	11	100

Tableau 25 : Résultats de l'analyse des débits classés des quatre principales sources

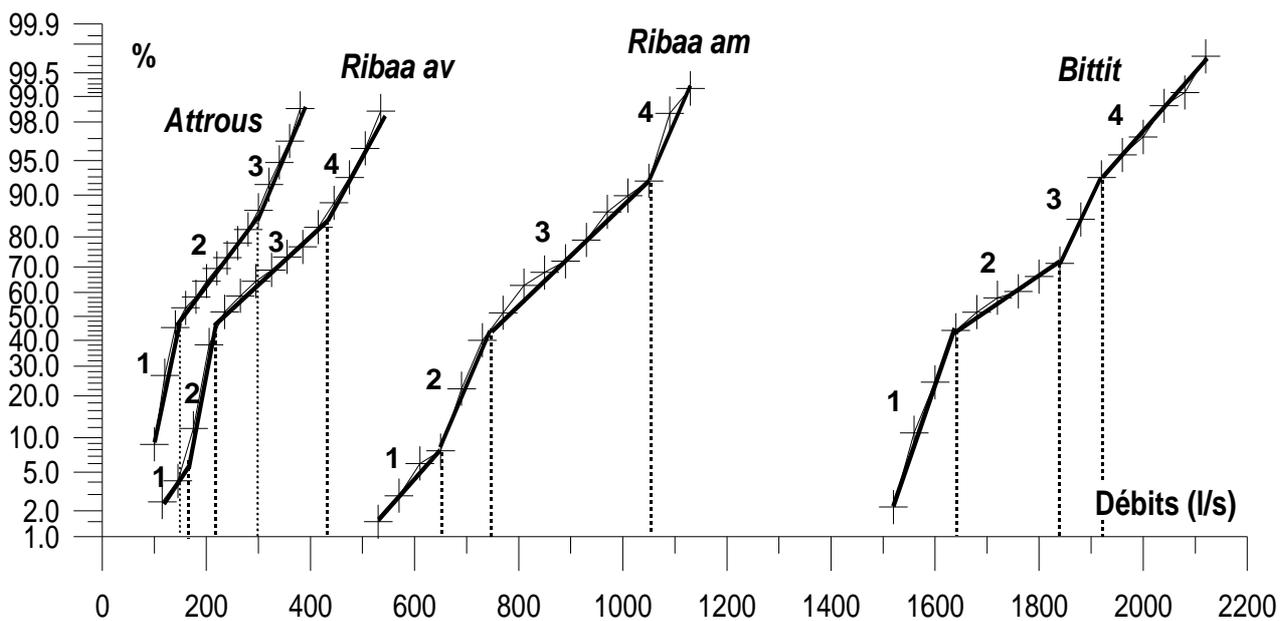


Figure 79 : Débits classés des principales émergences (cycles hydrologiques : 1975/77)

Emergence	Débit moyen l/s	Altitude (NGM)	1 ^{er} Intervalle	2 ^{ème} Intervalle	3 ^{ème} Intervalle	4 ^{ème} Intervalle
Bittit	1737	758	< 1640	1640 – 1840	1840 – 1920	> 1920
Ribaa amont	819	871	< 650	650 – 740	740 – 1050	> 1050
Ribaa aval	293	871	< 160	160 – 215	215 – 430	> 430
Attrous	194	880	< 140	140 - 290	> 290	-

Tableau 26 : Intervalles des classes de débits des quatre sources (cycles 1975-1977)

Tracées sur un même graphique (Fig. 79), les courbes des débits classés des quatre sources se positionnent selon leur importance. La source Bittit est de loin l'émergence la plus productive, alors que la source Attrous est la moins importante. D'ailleurs cette dernière qualifiée de source de trop plein a tari en décembre 1983, et depuis son écoulement est devenu temporaire.

L'observation sur les courbes de plusieurs segments de droites, révèle que l'évolution des débits aux émergences suit trois à quatre lois distinctes. Il est important de tenter de comprendre les réalités hydrodynamiques sous-jacentes à ces différentes lois.

Pour toutes les courbes, les changements des lois d'écoulement relevés au niveau des faibles débits s'expliquent par le passage d'un écoulement de décrue (Segments 2, Fig.79) à un écoulement de tarissement (Segments 1, Fig.79). La loi d'écoulement relative aux premiers segments de droite correspond à une loi de Maillet (1905).

Les segments 2 et plus représentent les débits de décrue. Dans le domaine des débits élevés, une discontinuité avec augmentation de pente, signifie une fuite d'eau vers l'extérieur du système et peut traduire l'existence probable de « trop-pleins » (par exemple un drain au-dessus de la source principale). Par contre, une discontinuité avec réduction de pente signifie un apport d'eau dans le système et peut traduire la mise en réserve temporaire d'un certain volume d'eau dans des structures annexes lors des crues et sa libération dès le début de la décrue. Un grand nombre de segments serait une indication d'une origine des apports plus diversifiée.

Durant la décrue, la source Bittit semble se comporter d'une manière inverse de celle des deux sources Ribaa. En effet, le passage des segments 2 aux segments 3 traduit pour Bittit, une fuite vers l'extérieur par la mise en route de trop plein, alors qu'en revanche, les sources Ribaa reçoivent un apport d'eau et procèdent à une mise en réserve. Il ne serait pas exclu que les volumes de fuite de la source Bittit puissent profiter à la recharge des griffons Ribaa.

Ce comportement différentiel entre ces deux groupes de sources concerne également le passage des segments 3 aux segments 4, qui correspond aux épisodes de crues. Alors que la source Bittit enregistre une alimentation d'eau, probablement par modification des limites du bassin, les sources Ribaa quant à elles se déchargent en faisant fonctionner leurs trop plein. Cette décharge d'eau des émergences Ribaa lors des crues, peut s'expliquer par la taille restreinte de leurs réservoirs, qui une fois saturés rejettent l'excédent vers l'extérieur du système.

3.2.2 - Cycles hydrologiques 1995-1997

Les graphiques des débits classés (Fig. 80) des deux sources captées durant les cycles 1995/97 sont constitués de trois segments de droites uniquement. Le tableau 27 résume les résultats de l'interprétation obtenus :

Emergence	Débit moyen l/s	Altitude (NGM)	1^{er} Intervalle	2^{ème} Intervalle	3^{ème} Intervalle
Bittit	1400	758	< 1400	1400 - 1515	> 1515
Ribaa aval	279	871	< 150	150 - 465	> 465

Tableau 27 : Intervalles des classes de débits des sources captées (cycles 1995-1997)

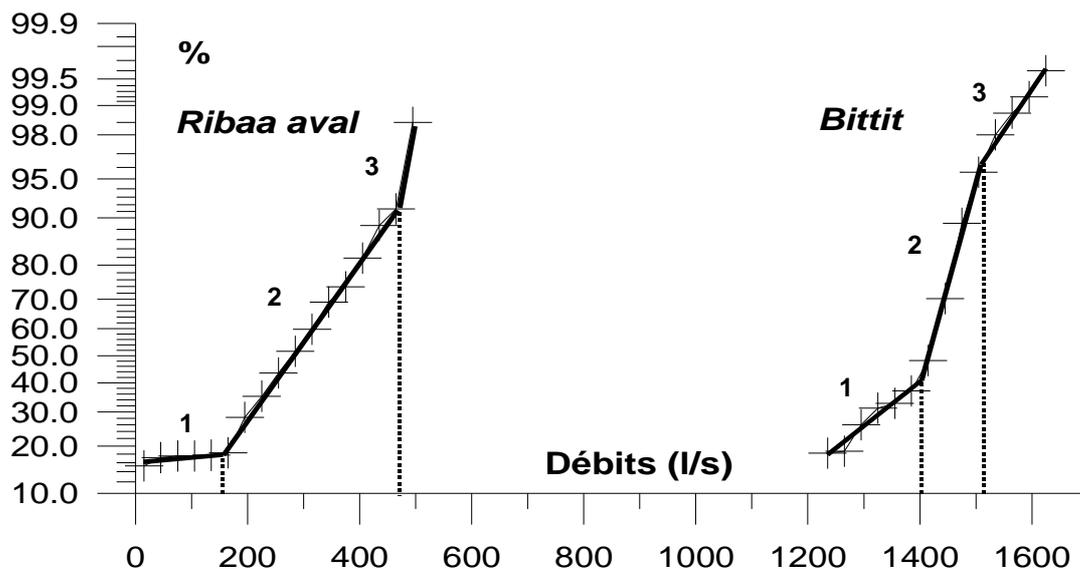


Figure 80 : Débits classés des deux sources captées (cycles hydrologiques : 1995/97)

Les changements des lois d'écoulement relevés peuvent être interprétés comme suit : la discontinuité entre les segments 2 et 1 (Fig. 80) correspond au passage d'un écoulement de décrue (segment 2 et plus) à un écoulement de tarissement (segment 1). Durant la décrue, la discontinuité entre les segments 3 et 2 (Fig. 80) enregistre de nouveau un comportement différentiel entre les deux émergences : un apport d'eau et une mise en réserve pour la source Bittit (réduction de la pente entre les segments 2 et 3), et une fuite d'eau vers l'extérieur pour la source Ribaa (augmentation de la pente entre les segments 2 et 3).

3.2.3 - Comparaison des cycles hydrologiques 1975/77 et 1995/97

A partir des graphiques des débits classés des deux émergences (Fig. 81), construits l'un en période de pluviométrie normale (1975/1977), et l'autre en période de sécheresse (1995/1997), on peut relever les points suivants :

- Les graphiques des débits classés des deux émergences sont constitués de trois (période 1995/97) à quatre (période 1975/77) segments de droites. Cette organisation révèle que l'évolution des débits est différente entre la période normale et la période sèche.
- Les pentes plus importantes des segments 1 de la période 1975/77 montrent qu'en période normale, les débits de tarissement sont moins dispersés.
- Le nombre de segments plus grand en période normale lors de la décrue est une indication d'une origine des apports plus diversifiée qu'en période sèche.
- La baisse des débits aux émergences entre les deux périodes est beaucoup plus marquée pour la source Bittit que pour la source Ribaa.

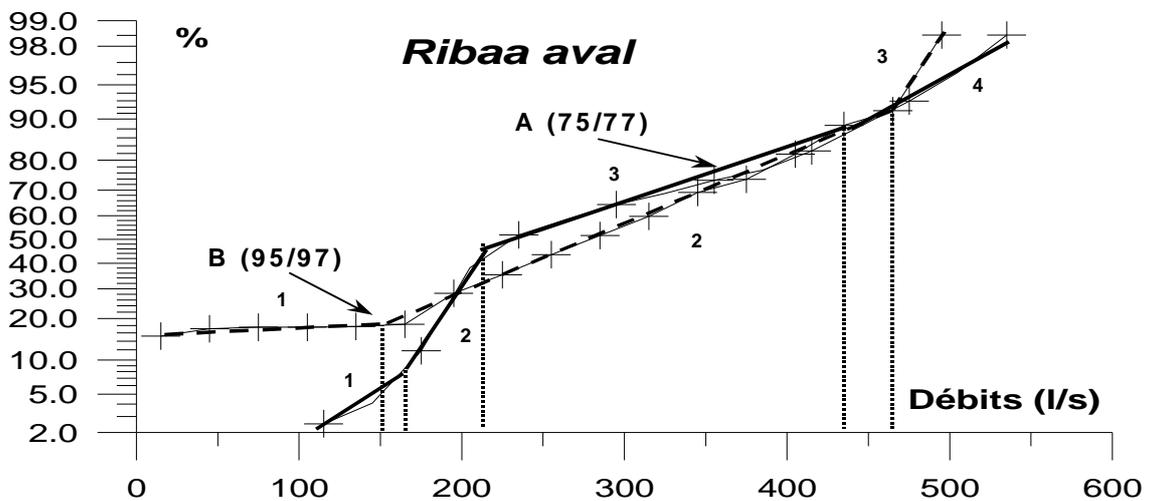
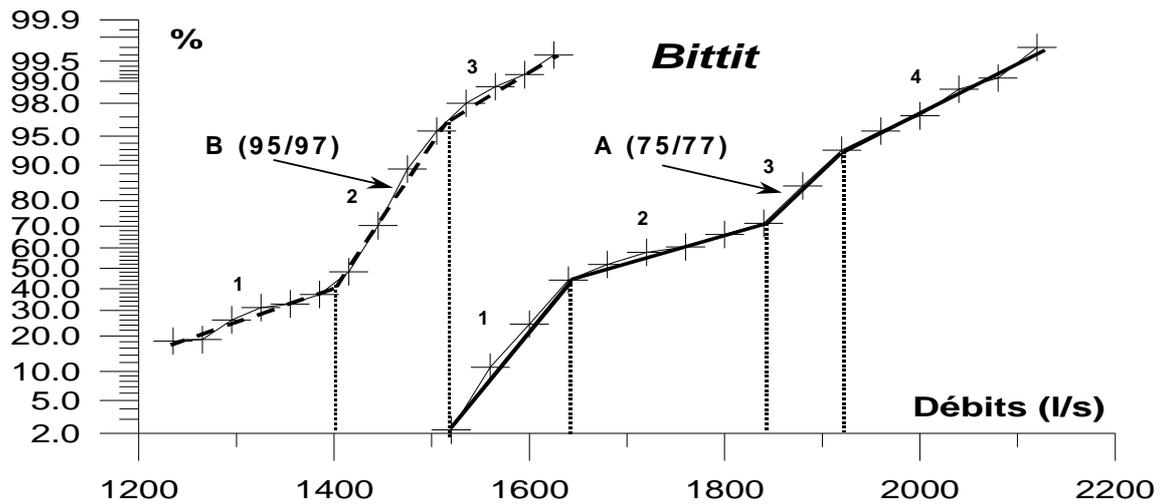


Figure 81 : Débits classés des deux sources captées (cycles hydrologiques 75/77 et 95/97)

3.2.4 - Conclusion

Durant la période 1975/77, les débits de l'émergence étaient plus importants qu'actuellement et ils s'organisaient en quatre segments de droite. L'alimentation des sources était plus soutenue et probablement plus diversifiée avant les années 1980 que durant la période de sécheresse actuelle. En effet, si le niveau de la nappe baisse à cause d'une réduction des apports, des drains secondaires se retrouvent dénoyés et l'aire d'alimentation s'en retrouve réduite. Ceci se traduit sur le graphique des débits classés par la réduction des lois d'écoulement (trois segments au lieu de quatre) et par un changement vers des valeurs plus faibles des limites des intervalles de débits. Les modifications d'impluvium envisagées ci-dessus sont des hypothèses, qui n'ont pu être vérifiées, faute d'essai de traçage dans le système.

Les méthodes d'étude des hydrogrammes et les méthodes corrélatoires et spectrales apporteront probablement des informations complémentaires sur le fonctionnement de ces systèmes karstiques.

CHAPITRE 4 – ETUDE DES COURBES DE RECESSION

4.1 – La méthode

Dans la méthode proposée par Mangin (1975), l'étude des courbes de récession constituées par la portion de l'hydrogramme allant de la pointe de crue à la fin du tarissement, permet de caractériser le comportement des deux sous systèmes qui constituent le système karstique : la zone non saturée ou sous système infiltration et la zone saturée ou sous système karst noyé. L'écoulement de décrue est représentatif de la manière dont s'effectue la vidange de la zone d'infiltration alors que l'écoulement de tarissement caractérise la vidange du karst noyé. L'intérêt de cette méthode est de définir les caractéristiques de chaque sous système à l'aide de quelques paramètres simples et de situer les systèmes étudiés dans une classification établie à partir de systèmes dont la structure est bien connue (détails de la méthodologie en annexe).

Néanmoins pour pouvoir prétendre déterminer ces caractéristiques, il est nécessaire d'étudier plusieurs courbes de récession pour un même système karstique. En effet, il est difficile de travailler sur l'hydrogramme unitaire, qui seul caractérise fidèlement le système étudié, puisque les hydrogrammes analysés ne correspondent jamais à une pluie unitaire. Leur forme est largement tributaire de l'allure de l'averse à l'origine de la crue étudiée ainsi que des événements hydrologiques qui sont survenus antérieurement. A ceci s'ajoute le fait que les systèmes karstiques sont rarement linéaires (signaux d'entrée correspondant aux signaux de sortie) et invariants (signal d'entrée non affecté par une translation dans le temps).

Pour ces raisons, l'étude des courbes de récession est une méthode approximative mais néanmoins utile qui permet, à partir d'une famille de réponses, d'obtenir une image sommaire de la structure des systèmes karstiques étudiés, alors que d'autres méthodes telles que l'analyse corrélatoire et spectrale (voir plus loin) permettront une interprétation plus précise.

4.2 – Résultats et discussions

Compte tenu des données hydrométriques disponibles à l'échelle journalière, notre choix s'est porté pour l'étude des courbes de récession vers les quatre sources principales : Bittit, Ribaa amont, Ribaa aval et Attrous. La figure 82 montre les hydrogrammes des sources étudiées durant neuf années de suivi (1975/84), à l'exception de Bittit où l'on ne dispose que de deux années d'observation (1975/77). On note sur ce graphique un comportement similaire des différentes émergences avec une tendance baissière bien marquée à partir de 1980 et des fluctuations saisonnières très amorties à partir de cette date.

La figure 83 montre les hydrogrammes des sources Bittit et Ribaa aval durant plus de deux cycles hydrologiques (09/95 au 02/98), couplés aux hauteurs des précipitations mesurées à la station de Bittit. On note que les épisodes pluvieux importants influent considérablement sur l'évolution des débits journaliers. Ainsi, après une grande averse les débits marquent des hausses spectaculaires, suivies de paliers de stabilisation liés au drainage diffus du système en absence des écoulements concentrés dans les chenaux. Les plus forts débits journaliers sont observés généralement à la fin de l'hiver et au début du printemps. Les périodes de décrues sont assez longues (6 à 8 mois) et dépendent de l'importance des précipitations reçues.

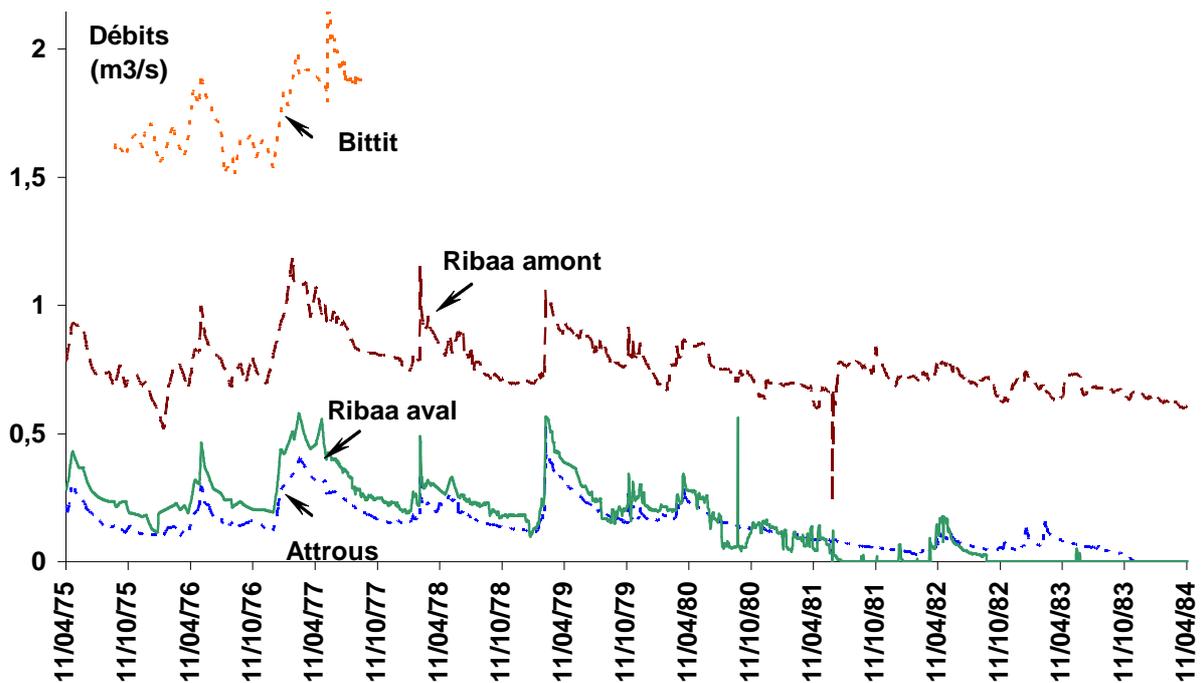


Figure 82 : Hydrogrammes des principales sources (1975/1984)

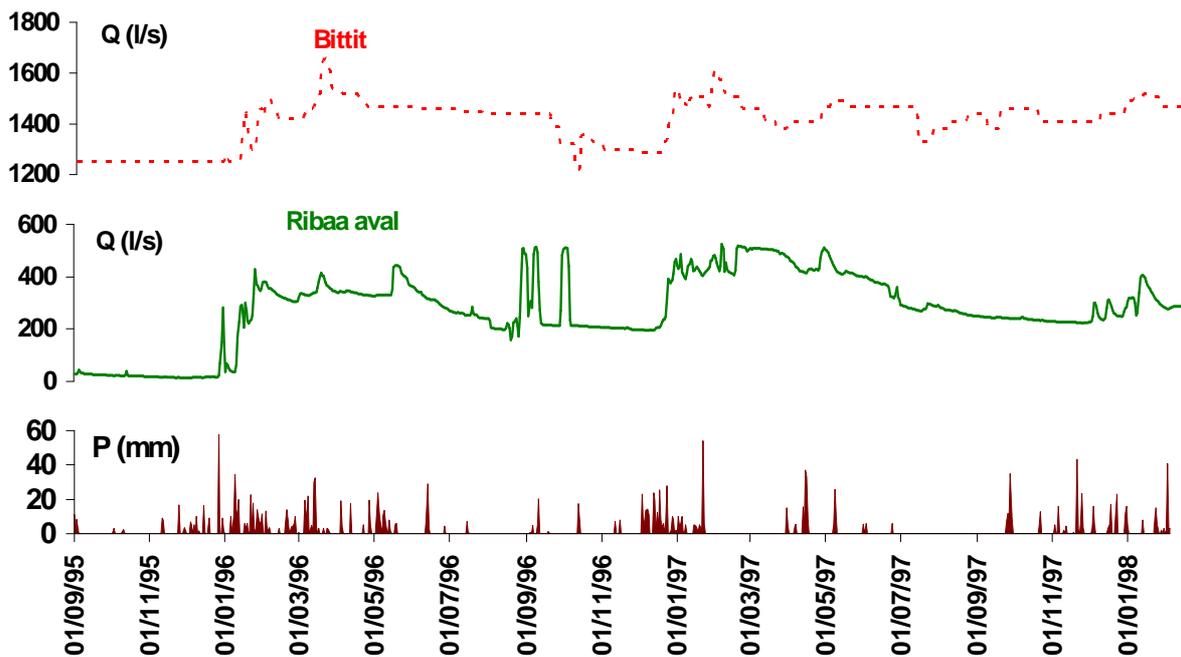


Figure 83 : Hydrogrammes des sources captées et pluies à Bittit (09/1995 au 02/1998)

4.2.1 – Etude des tarissements

Le choix des différentes crues qui ont servi à l'analyse des courbes de récession a été fait de telle façon qu'elles représentent les amplitudes maximales de chaque cycle hydrologique et précèdent de longues périodes d'étiage (Fig. 84 à 89). Le tableau 28 résume les résultats des paramètres calculés à partir des formules ci-dessus.

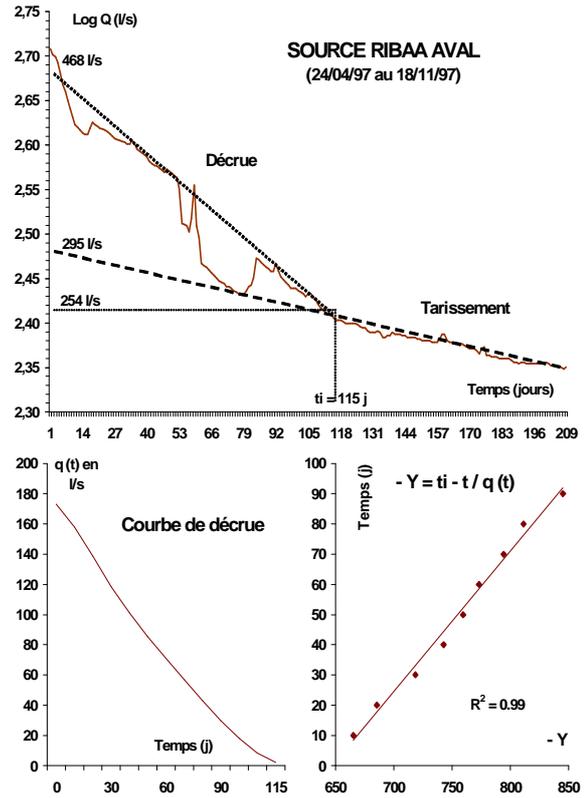
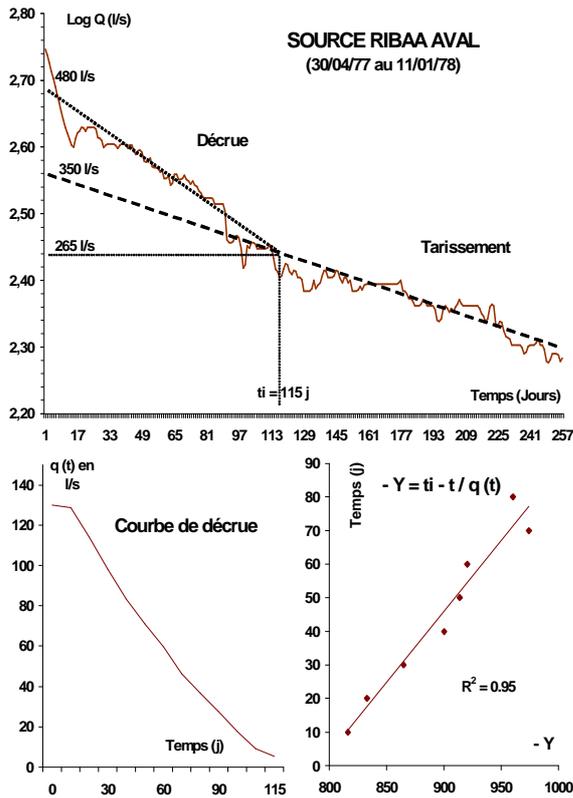
On s'aperçoit que les coefficients de tarissement sont faibles, notamment pour les grandes sources, à savoir Bittit ($1.5 \cdot 10^{-4} \text{ j}^{-1}$) et Ribaa amont ($3.1 \cdot 10^{-4} \text{ j}^{-1}$). Ils semblent reproductibles d'un tarissement à l'autre, traduisant ainsi la vidange lente des réserves et par conséquent la tendance de stockage.

L'importance des volumes dynamiques calculés varie d'une source à une autre. Ainsi, les sources Attrous et Ribaa aval disposent de peu de réserves (6 à 17 Mm^3), la source Ribaa amont dispose d'une réserve de l'ordre de 230 Mm^3 , alors que la source Bittit est de loin la source la plus riche avec une réserve proche de 1 Milliard de m^3 .

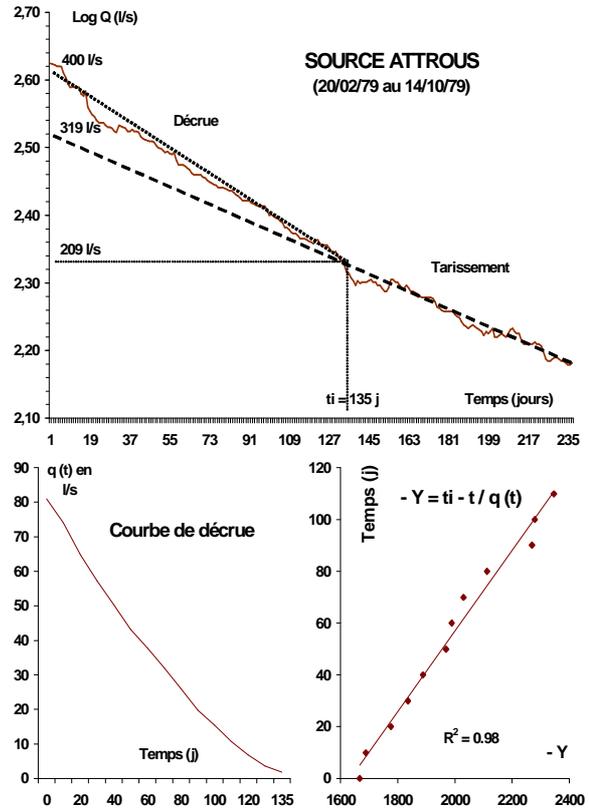
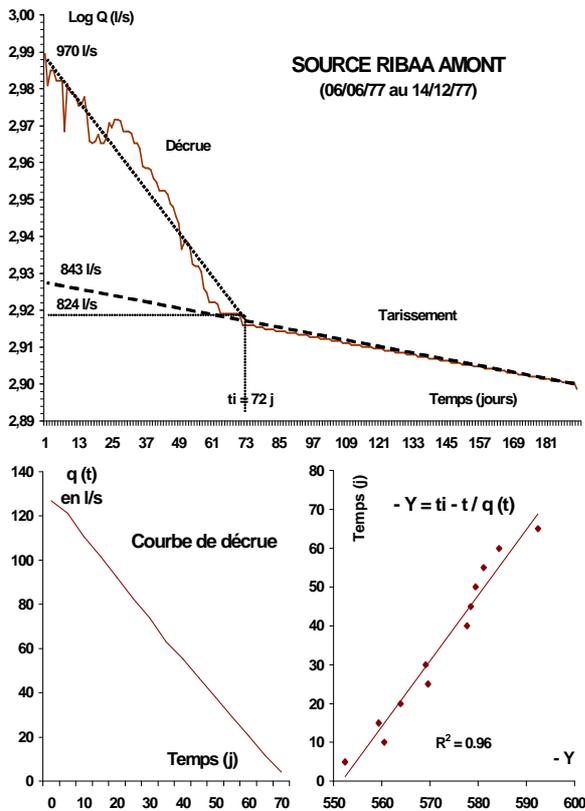
Il est important de noter la variation de la réserve dynamique de la source Bittit entre 1977 et 1996. En effet, en l'espace de 19 ans d'intervalle la source a perdu 179 Millions de m^3 , soit un volume moyen annuel de 9.4 Millions de m^3 . Cette perte est à mettre en relation directe avec la sécheresse qui sévit dans la région depuis 1981.

Source	Ribaa aval	Ribaa aval	Ribaa amont	Attrous	Bittit	Bittit
Date début de décrue	30/04/77	24/04/97	06/06/77	20/02/79	22/05/77	19/03/96
Date début du tarissement	23/08/77	17/08/97	17/08/77	05/07/79	10/07/77	22/04/96
Durée de la décrue t_i (jour)	115	115	72	135	49	34
Durée du tarissement (jour)	142	94	120	102	> 53	147
Débit Q_0 de base de début de la décrue (l/s)	480	468	970	400	2072	1630
Débit Q_{R0} de départ de la courbe de tarissement (l/s)	350	295	843	319	1898	1477
Débit q_0 (l/s) = $Q_0 - Q_{R0}$	130	173	127	81	174	153
Débit Q'_{R0} à la fin de la décrue (l/s)	265	254	824	209	1886	1470
Coefficient de tarissement α ($\cdot 10^{-3}$)	2.5	1.3	0.31	3.2	0.15	0.14
Coefficient de durée de la crue ξ	0.0087	0.0087	0.014	0.0074	0.02	0.029
Coefficient d'hétérogénéité ε	0.09	0.06	0.33	0.12	0.90	0.94
Volume de Tarissement ou volume dynamique V_R (Mm^3)	9.2	16.9	229.7	5.6	1086.3	907.2
Volume de décrue V_i (Mm^3)	0.5	0.6	1.7	0.4	0.7	0.5
Coefficient d'importance du Karst K	0.99	1.81	8.64	0.72	17.83	19.6
Indice d'infiltration ou d'apport au karst noyé i	0.83	0.88	0.58	0.79	0.34	0.33
Débit moyen au cours de l'année étudiée (l/s)	293	295	843	246	1932	1468
Volume de transit V_t (Mm^3)	9.2	9.3	26.6	7.8	60.9	46.3

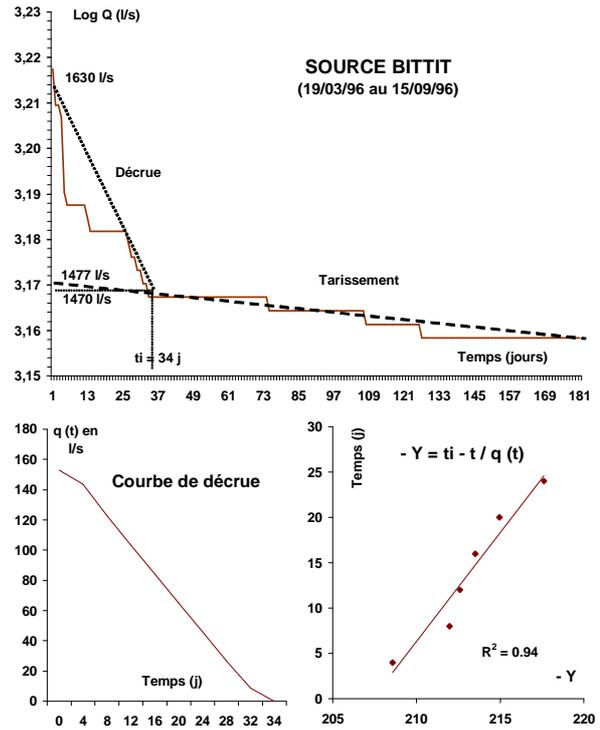
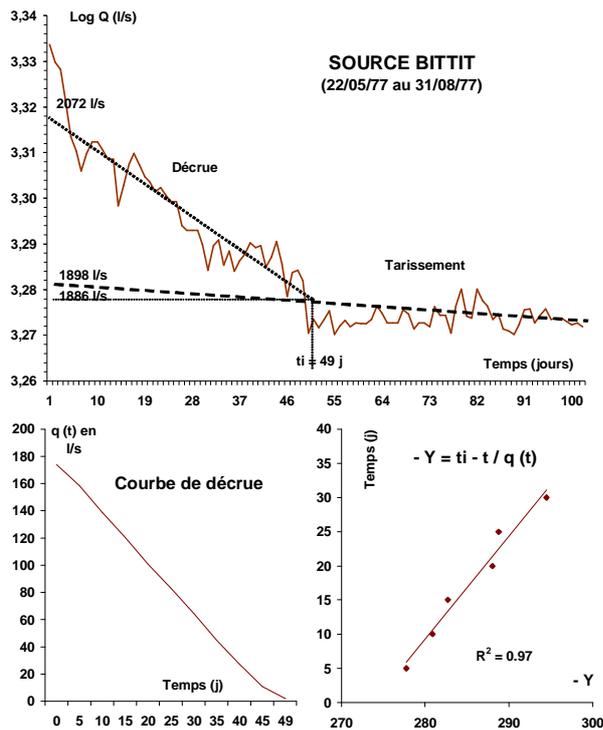
Tableau 28 : Différents coefficients et paramètres concernant les courbes de récession des principales sources du complexe Ribaa-Bittit



Figures 84 et 85 : Courbes de récession de la source Ribaa Aval (1977 et 1997)



Figures 86 et 87 : Courbes de récession des sources Ribaa Amont (1977) et Attrous (1979)



Figures 88 et 89 : Courbes de récession de la source Bittit (1977 et 1996)

4.2.2 – Etude des décrues

On note que la décrue est généralement étalée : 1 à 1.5 mois pour la source Bittit, 2.5 mois pour la source Ribaa amont, presque 4 mois pour la source Ribaa aval et 4.5 mois pour la source Attrous. Ceci traduit une réponse retardée au signal de pluie (entrée), et ce retard est d'autant plus grand que la source est moins importante. Les périodes d'intervention des décrues peuvent varier d'une source à une autre, et d'une année hydrologique à une autre en fonction de l'importance de l'impluvium et de sa répartition temporelle.

4.2.3 – Classification des sources étudiées

Les volumes de transit ont été calculés pour les sources à partir des volumes écoulés à l'exutoire durant les cycles étudiés. Ces volumes varient de 7,8 Millions de m³ pour la source Attrous à 60,9 Mm³ pour la source Bittit (cycle 1977). Ces volumes conduisent à des valeurs du pouvoir régulateur k variant de 0.72 pour la source Attrous à 19.6 pour la source Bittit (tabl. 28).

La source Bittit offre un système hydrogéologique étendu et complexe. Le volume d'eau soutenant le tarissement est très important (907 Mm³ en 1996), ce qui implique un immense réservoir et place cet aquifère parmi les domaines peu karstifiés (Mangin, 1975). Les dolomies sableuses renfermeraient donc une nappe comparable à celles des systèmes poreux classiques à pouvoir régulateur très élevé. Enfin le volume de décrue ($V_i = 0.5 \text{ Mm}^3$) est insignifiant par rapport au volume dynamique V_r .

4.2.4 – Conclusion

L'analyse des courbes de récession des sources permet de relever les points suivants :

- La vidange des réserves est lente et par conséquent la tendance est au stockage.
- La réponse au signal d'entrée représentée par la pluie est retardée.
- La source Bittit offre un système riche et bien soutenu par une assise de dolomies sableuses.
- La karstification est peu développée.
- Malgré son grand potentiel hydrique, l'effet de la sécheresse sur le système a été significatif.

L'analyse corrélatoire et spectrale qui va suivre permettra certainement de décrire ce système karstique, en traitant les signaux d'entrée (pluie) et de sortie (débit).

CHAPITRE 5 – ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES

5.1 – La méthode

Les analyses corrélatoires et spectrales s'inspirent directement des méthodes de traitement du signal. Leur application à l'étude des systèmes karstiques a été développée par Mangin (1984). Cette méthodologie s'est avérée tout à fait efficace pour identifier l'organisation et la dynamique des systèmes karstiques (Padilla et Pulido-Bosch, 1995 ; Laroque et al., 1997). Une description courte de ces méthodes est donnée en annexe. Une présentation plus détaillée est fournie par Mangin (1984), Box et Jenkins (1974). Les méthodes corrélatoires et spectrales ont été exclusivement appliquées aux séries chronologiques des précipitations et des débits des systèmes karstiques. Le recours à ces méthodes pour l'étude des chroniques de turbidité a été très rarement utilisé.

Le système karstique est assimilé à un filtre laissant passer plus ou moins l'information. Une partie de cette information est parfois différée, caractérisant les systèmes inertiels ou « à mémoire ». Par rapport au temps, l'information est plus ou moins modulée mettant en évidence des effets à court, moyen et long termes. L'interprétation des résultats des analyses corrélatoires et spectrales conduit à identifier le degré d'organisation d'un système karstique et la manière suivant laquelle il fonctionne (Mangin 1984). C'est une approche purement descriptive et il est nécessaire d'opérer l'interprétation des résultats des analyses par comparaison. L'analyse corrélatoire et spectrale (ACS) présente l'intérêt de travailler sur la totalité de la chronique disponible et non sur une portion de celle-ci, comme c'est le cas lorsqu'on analyse des courbes de récession ou des résultats de traçages.

5.2 – Organigramme adopté pour les analyses corrélatoires et spectrales

L'organigramme adopté pour les analyses corrélatoires et spectrales est représenté sur la figure 90 ci-dessous.

5.3 – Résultats et interprétations

L'analyse a porté sur des chroniques couvrant plus de deux cycles hydrologiques (28/12/95 au 04/02/98, soit 770 jours). L'analyse est donc réalisée à court terme avec un pas de temps journalier et une troncature de 120 jours. Les paramètres analysés sont : la pluie journalière à la station de Bittit ($z = 760$ m NGM) et les débits journaliers des deux sources Bittit et Ribaa.

5.3.1 – Analyse de la série chronologique des précipitations

Le corrélogramme des précipitations est reporté sur la figure 91 A. Il décroît très vite, prend une valeur de $r_k = 0.2$ dès le deuxième jour, devient nul au 28^{ème} jour et garde ensuite une valeur voisine de zéro, sans indiquer l'existence d'un cycle apparent. On peut donc considérer que la pluie, pour cette région, a un caractère aléatoire, sans composante saisonnière marquée. Ceci peut être corroboré par l'extrême variabilité des pluies mensuelles et annuelles d'un cycle à un autre dans cette région. Les périodes les plus sèches ou les plus humides ne se reproduisent pas nécessairement aux mêmes époques d'une année à l'autre. C'est le cas également des régions atlasiques (Hsissou 1991, El Ouali 1992, Bouchaou 1995 et 2002).

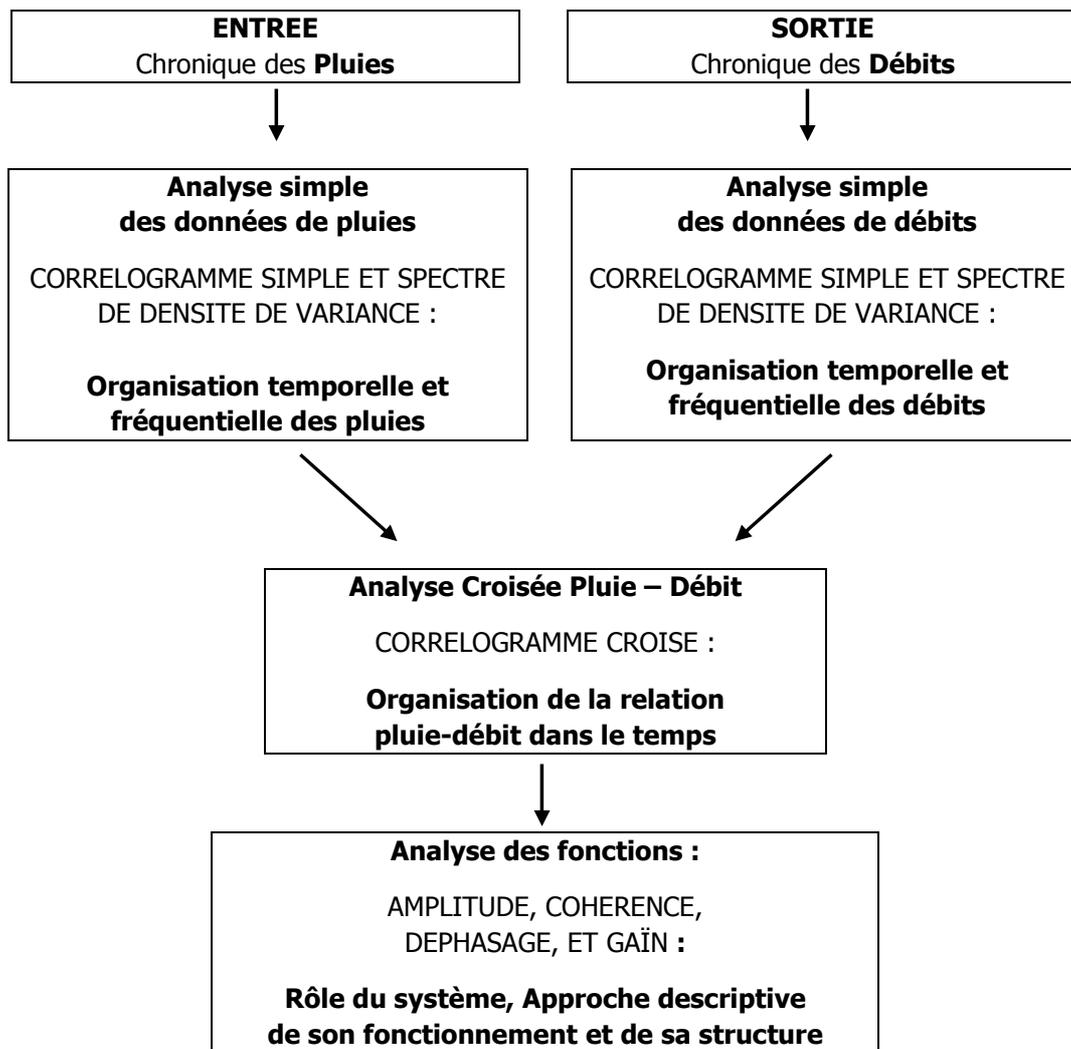


Figure 90 : Organigramme pour les analyses corrélatoires et spectrales

Le spectre de densité de variance (Fig. 91 B), par sa monotonie renforce le caractère aléatoire des précipitations en ne laissant pas apparaître de cycle saisonnier. Seuls quelques pics laissent supposer la présence d'une certaine périodicité annuelle.

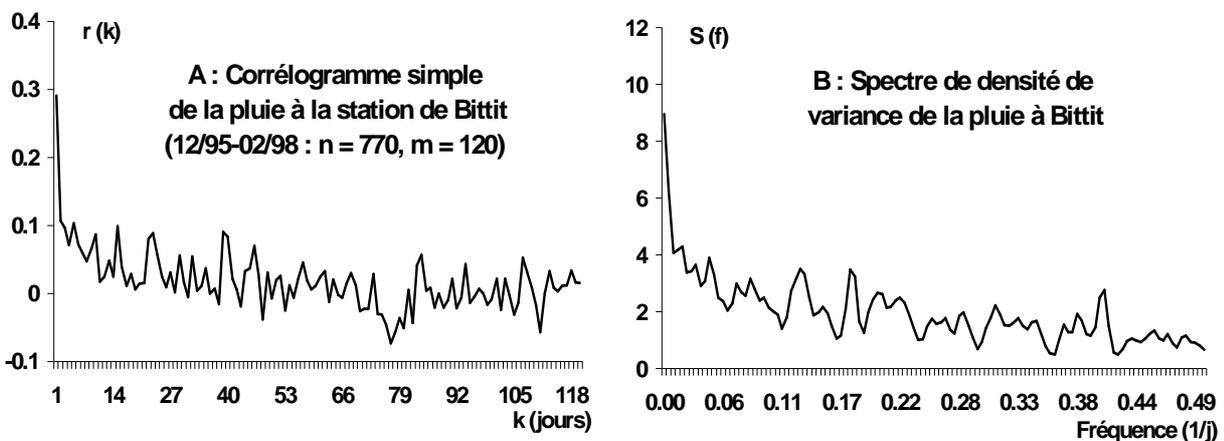


Figure 91 : Analyse corrélatoire et spectrale simple de la chronique des pluies

5.3.2 – Analyse de la série chronologique des débits

La figure 92A montre les corrélogrammes simples des débits des deux exutoires durant le cycle 1995/1998. Pour les deux sources, la décroissance est assez lente témoignant d'un effet mémoire important. Les deux systèmes modulent le signal d'entrée, ils ont un effet mémoire qui est en relation avec le rôle régulateur des réserves.

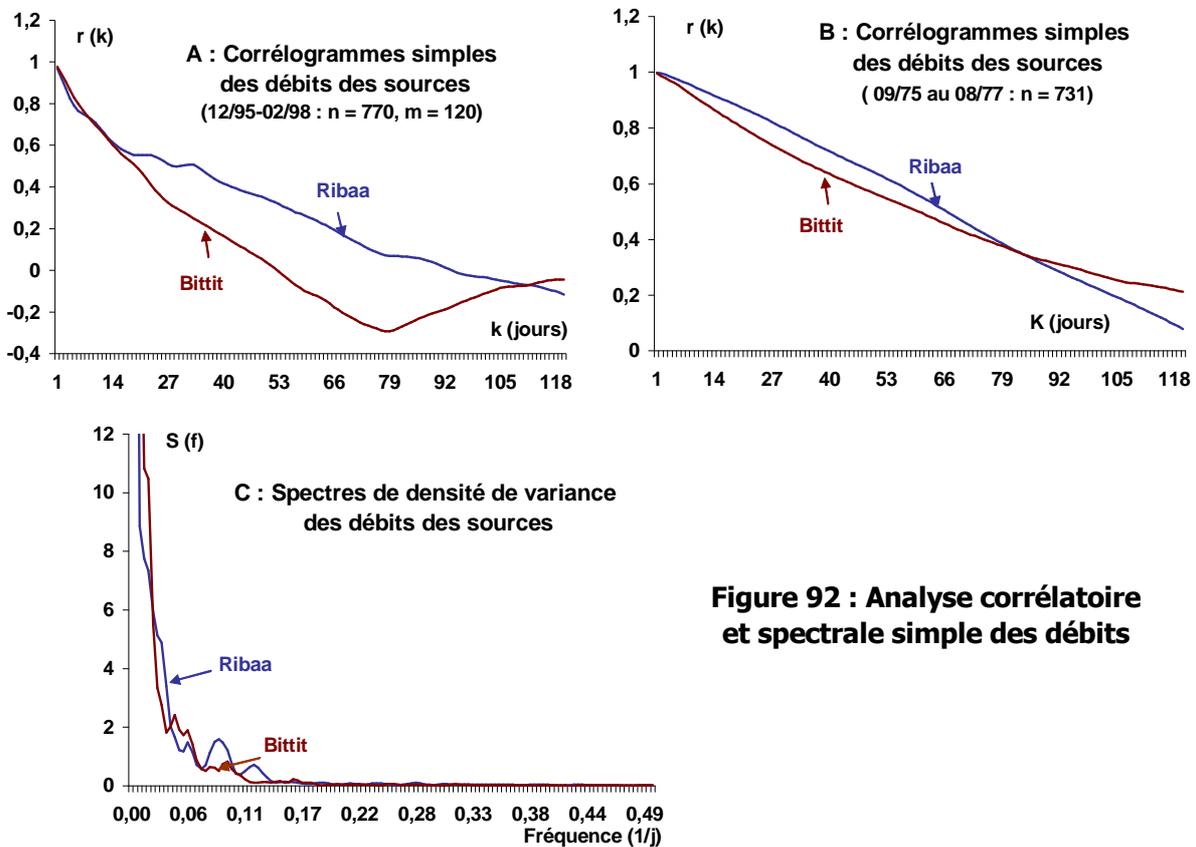


Figure 92 : Analyse corrélatoire et spectrale simple des débits

Le corrélogramme de Ribaa décroît moins vite ($r_k = 0,2$ pour $k = 66$ jours) que celui de Bittit ($r_k = 0,2$ pour $k = 37$ jours). Or on sait au préalable que la source Bittit possède des réserves largement plus importantes que la source Ribaa et que son fort débit relatif (1400 l/s) fluctue peu aussi bien à l'échelle saisonnière que pluriannuelle. Ceci peut s'expliquer par le fait que la pluie exceptionnelle de 1996 a généré un fonctionnement rapide au niveau de la source Bittit en relation probablement avec un degré de karstification plus important.

A titre de vérification, on a procédé à la même analyse corrélatoire simple des débits des deux sources pour deux autres cycles hydrologiques (01/09/1975 au 31/08/77, soit 731 jours). La Figure 92 B montre une décroissance encore plus lente que précédemment, témoignant d'un amortissement plus grand du signal d'entrée en relation avec des réserves beaucoup plus importantes. Pour cette période, le corrélogramme de Bittit décroît moins vite ($r_k = 0,2$ pour $k = 117$ jours) que celui de Ribaa ($r_k = 0,2$ pour $k = 104$ jours). A cette époque, le niveau de la nappe était plus haut et les réserves plus importantes, car l'effet de la sécheresse qui sévit depuis le début des années 1980 n'était pas encore enregistré. Ce résultat souligne l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques et montre l'influence significative de leur état de saturation sur les relations d'entrée-sortie.

Les spectres de densité de variance des deux sources (Fig. 92 C) montrent des fréquences de coupure ou bandes spectrales étroites ($0,11 \text{ J}^{-1}$ pour Bittit et $0,14 \text{ J}^{-1}$ pour Ribaa), et confirment qu'il s'agit de deux systèmes inertiels. En outre, les spectres permettent de calculer le temps de régulation qui dépend précisément de l'importance des réserves. Ce temps de régulation est un paramètre important pour la classification des systèmes karstiques. Il correspond à la durée d'influence du signal d'entrée et fournit donc une idée sur l'étendue de l'hydrogramme unitaire. Ce temps est d'autant plus court que le système est moins inertiel. Les temps de régulation calculés ici sont de 57 jours pour Ribaa et 35 jours pour Bittit.

Lorsque des aquifères karstiques sont très bien vidangés, leur temps de régulation est très faible (< 10 jours). Des durées élevées (> 50 jours) sont caractéristiques des aquifères à forte capacité de stockage. En conséquence, les systèmes étudiés ici ont une capacité de stockage significative. Ce résultat était prévisible, en raison des faibles coefficients de tarissement calculés.

En résumé : Les paramètres obtenus en analysant les débits des deux sources montrent un effet mémoire grand à considérable (37 à 74 jours), une bande spectrale étroite (0,11 à 0,14), et un temps de régulation de 35 à 57 jours. Ces données peuvent être comparées (tabl. 29) à celles des aquifères carbonatés étudiés par ailleurs. La source Bittit peut être classée dans les aquifères à effet mémoire important de type Fortestorbes, alors que la source Ribaa possédant un effet mémoire considérable a un comportement proche de celui de Torcal.

Auteur et date	Région	Système karstique	Effet mémoire ($r = 0,1 - 0,2$)	Bande spectrale : fréquence de coupure	Temps de régulation
Mangin, 1984	Pyrénées (France)	Aliou Baget Fontestorbes Torcal	Réduit (5 j) Petit (10 à 15 j) Grand (50 à 60 j) Considérable (70 j)	Très large (0,3) Large (0,2) Étroite (0,1) Très étroite (0,05)	10 à 15 j 20 à 30 j 50 j 70 j
Bouchaou, 1995	Moyen Atlas plissé (Maroc)	Asserdoune	Très grand (70 à 80 jours)	Très étroite (0,04 à 0,05)	70 à 80 j
Morales-Jubeira et al., 1996	NW de l'Espagne	-	-	-	10 j
Laroques et al., 1997	France occidentale	Rochfoucauld	-	-	76 j
Amraoui et al., 2003	Moyen Atlas Tabulaire (Maroc)	Bittit Ribaa	Grand (37 à 45 j) Considérable (70 j)	Étroite (0,11) Étroite (0,14)	35 j 57 j

Tableau 29 : Classification de quelques systèmes karstiques d'après l'analyse corrélatoire et spectrale simple portant sur le débit

5.3.3 – Analyse croisée pluie-débit

Les corrélogrammes croisés pluie-débit (Fig. 93) sont très étalés, ce qui indique que les systèmes possèdent une capacité de régulation très significative. Les systèmes sont mal drainés et hiérarchisés. Ces résultats confirment les faibles valeurs des coefficients de tarissement de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} (Amraoui 2001, 2003) caractérisant les deux sources. Le retard Δk est également significatif, $\Delta k = 25$ j pour la source Bittit et $\Delta k = 20$ j pour la source Ribaa. Les valeurs relativement faibles des corrélogrammes (maximum de $r_k = 0.2$) indiquent l'absence de relation immédiate entre les précipitations et les débits.

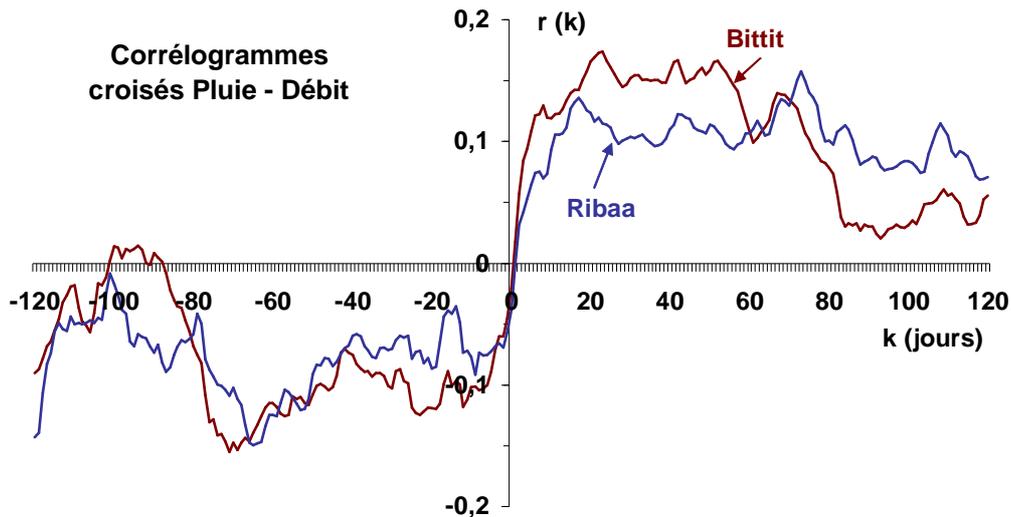


Figure 93 : Corrélogrammes croisés pluie-débit des sources captées (12/1995 au 02/1998)

Les fonctions d'amplitude croisées et de gain (Fig. 94 A et B) indiquent que le système amplifie le signal d'entrée aux basses fréquences ($f < 0.033 \text{ j}^{-1}$ période > 30 jours) et le filtre fortement aux fréquences inférieures à 0.083 j^{-1} (périodes < 12 jours). La première partie des graphiques donne une estimation sur le déstockage des réserves, alors que la seconde partie des graphiques correspond aux mises en réserve (déstockage très faible). On note également que les phénomènes de moyenne fréquence ($0.033 < f < 0.083 \text{ j}^{-1}$) ne sont pas totalement filtrés, ceci est à mettre en relation avec des épisodes pluvieux à plus court terme.

Le système karstique amplifie le signal des précipitations quand les débits arrivent aux sources avec un certain retard lié au dégagement de l'eau de stockage. Cette amplification exprime alors la grande capacité de stockage des deux systèmes karstiques. Durant les périodes d'averses, le système karstique reçoit de fortes infiltrations par les blocs finement fissurés. L'eau stockée ne contribue pas à l'écoulement des sources durant les périodes de fortes précipitations. Cette eau n'est libérée qu'en périodes de basses eaux quand les précipitations sont rares et quand les conduits fortement transmissifs sont désaturés.

La valeur moyenne de la fonction de cohérence CO_{xy} pour les deux sources est de 0.32 (Fig. 94C), ce qui indique que les systèmes karstiques sont loin d'être linéaires et sont en conséquence peu karstifiés. La fonction de phase des deux sources (Fig. 94D) qui doit montrer en principe le déphasage entrée – sortie pour chaque fréquence n'est pas interprétable ici, car la réponse du système au signal d'entrée est très étalée.

En conclusion : L'analyse croisée pluie – débit met en évidence un important pouvoir régulateur du système, une alimentation par infiltration retardée et un grand retard de réponse à la pluie. Le karst a une grande capacité à emmagasiner des réserves d'eau et la karstification est peu développée.

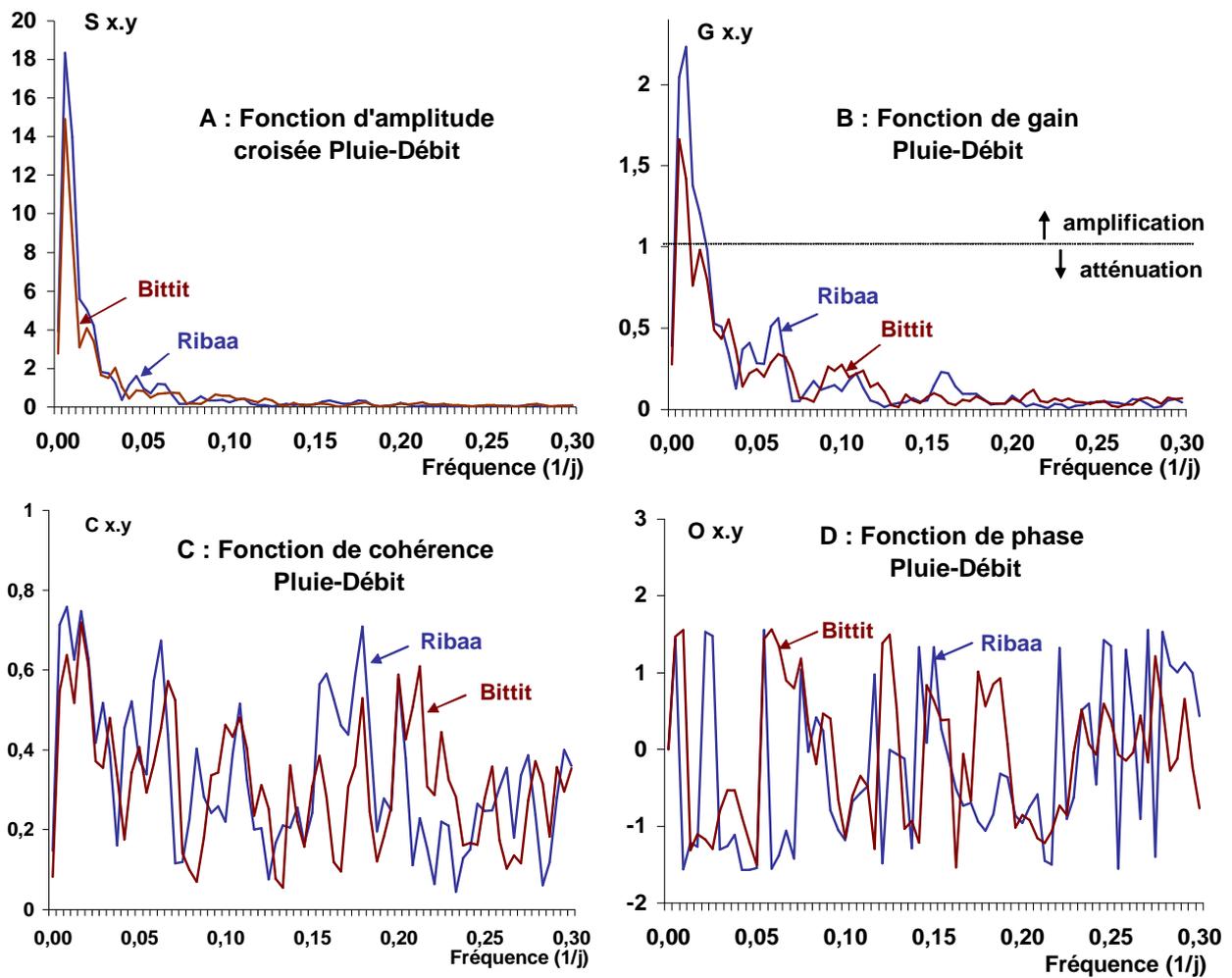


Figure 94 : Analyse spectrale croisée : pluie – débit des sources captées (12/95 – 02/98)

CHAPITRE 6 – ETUDE DU PHENOMENE DE TURBIDITE

6.1 – Présentation

Le phénomène d'apparition des eaux troubles au niveau des sources lors des grandes averses est une caractéristique de ces émergences karstiques. La qualité de l'eau du groupe de sources du complexe Ribaa-Bittit est en général très bonne, avec un résidu sec de l'ordre de 0.5 g/l et un faciès bicarbonaté calco-magnésien caractéristique des formations carbonatées. En période normale, la turbidité de l'eau des sources est le plus souvent inférieure à 2 NTU, Après les grandes averses, la turbidité peut atteindre 250 NTU.

Les deux sources de Ribaa aval et de Bittit sont actuellement captées par la régie de distribution d'eau et d'électricité pour alimenter en partie la ville de Méknès en eau potable. Une adduction gravitaire longue de 40 km, achemine environ 800 l/s d'eau jusqu'à l'entrée de la ville. Lors des violents orages, la forte turbidité des eaux pose un problème de qualité de l'eau distribuée.

6.2 – Données disponibles

La régie de distribution d'eau et d'électricité de la ville de Méknès procède depuis le 28 décembre 1995 à un suivi journalier régulier de la turbidité au niveau des deux sources captées. Le tableau 30 regroupe des statistiques sur les valeurs de la turbidité (en NTU) mesurées durant la période 1996/99. On dispose également d'un suivi horaire d'une durée totale d'un mois effectué pendant un épisode de forte turbidité (28/12/00 au 29/01/01).

Année	Pluie à Ifrane (mm)	Nb de jours de turbidité	Source Ribaa		Source Bittit	
			T moy	T max	T moy	T max
1996	1865	151	23	202	32	226
1997	1161	50	19	94	32	200
1998	652	19	32	115	29	120
1999	852	3	16	35	18	45

Tableau 30 : Données statistiques sur la turbidité (en NTU) des sources captées

6.3 – Interprétation des données

6.3.1 – Echelle journalière

Les graphiques correspondant à cinq années hydrologiques 95/00 (Fig. 95) montrent des fluctuations semblables de turbidité au niveau des deux sources, ce qui reflète probablement un effet régional et une appartenance à un même système karstique. La corrélation linéaire tentée entre les valeurs relevées au niveau des deux émergences est significative (Fig. 96). Le coefficient de corrélation est de 0.9 et la relation linéaire calculée est la suivante : $T_{\text{Bittit}} = 1.1 T_{\text{Ribaa}}$.

On note également une relation de cause à effet entre l'intensité de la pluie et l'apparition de la turbidité au niveau des sources. L'état hydraulique initial du système karstique joue également un rôle significatif, car quand les averses font suite à des périodes de sécheresse, le phénomène d'apparition de la turbidité est clairement amplifié. L'année 1996 a été très touchée par le phénomène, qui par la suite va se réduire progressivement et de manière significative.

En fait l'année hydrologique 1995/96 était particulièrement pluvieuse à l'intérieur d'un cycle de longue sécheresse. Durant cette année, les épisodes de turbidité se sont étalés entre les mois de novembre et mai alors que d'habitude, seuls les mois de janvier ou février sont affectés.

Les pluies relativement importantes du printemps 1997 n'ont pas été suffisantes pour produire un épisode de turbidité aussi marqué que lors des deux événements exceptionnels de janvier à février 1996 et de décembre à janvier 1997. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces pluies ont été enregistrées en début de la période de décrue des sources et qu'elles font suite à un lessivage important des conduits karstiques à peine deux mois auparavant.

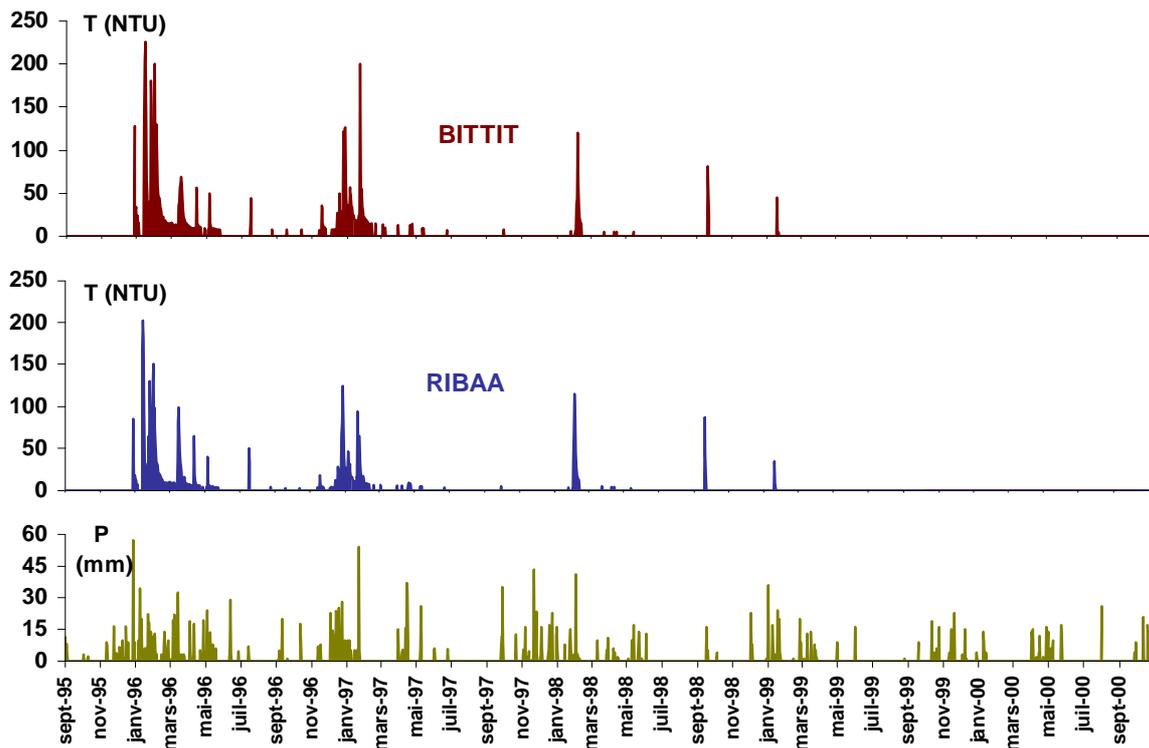


Figure 95 : Turbidités journalières aux sources et pluies à Bittit (09/95 au 10/00)

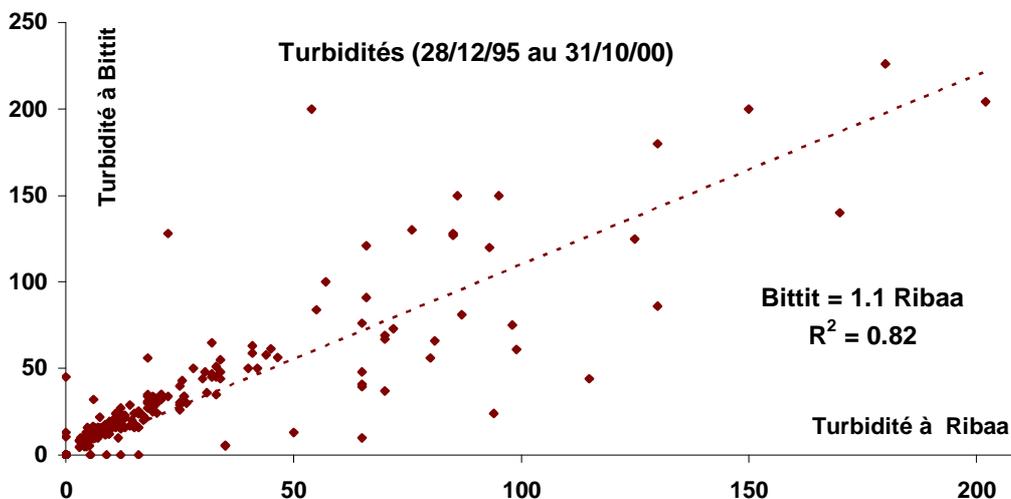


Figure 96 : Corrélation entre les turbidités à Ribaa et à Bittit (n = 1770 j)

6.3.2 – Echelle horaire

La figure 97 montre deux épisodes de turbidité relevés entre la fin du mois de décembre 2000 et la fin du mois de janvier 2001, couplés à la pluie journalière enregistrée à la station de Bittit. On note que chaque manifestation des eaux troubles fait suite à un épisode pluvieux important.

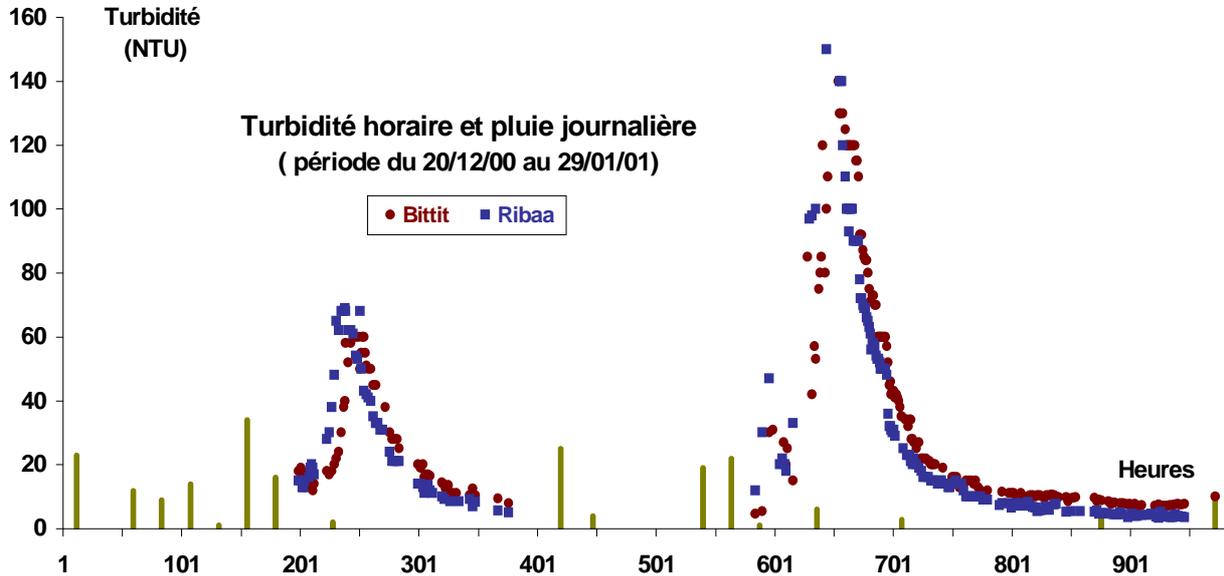


Figure 97 : Suivi horaire de la turbidité des sources et pluie journalière à Bittit

En détail (Fig. 98A), le premier épisode de turbidité fait suite à une pluie d'une semaine qui a totalisé 109 mm. Cette pluie a engendré une augmentation des matières argileuses en suspension dans l'eau durant 5 jours, avec un pic d'environ 70 NTU atteint au bout de 40 heures du déclenchement du phénomène. Une fois le pic atteint, on assiste à une décrue rapide, suivie d'un long tarissement de la même manière que pour une courbe de récession.

La vague de turbidité semble affecter la source Ribaa en premier et avec une intensité légèrement plus importante que la source Bittit. Le décalage d'apparition des troubles peut être estimé à 10 heures. Ce constat peut s'expliquer par le fait que d'une part, la source Ribaa est plus proche des points de pertes des eaux pluviales et que d'autre part, le débit de la source Bittit est plus important (5 fois plus élevé en relation avec une situation topographique plus basse) ; ce qui contribue à la dilution de l'eau et à la chasse rapide de cette turbidité.

Le deuxième épisode de turbidité (Fig. 98B) a duré deux fois plus longtemps que le premier (15 jours). Il a été provoqué par une pluie tombant en six jours et totalisant 70 mm. Bien que cette hauteur totale de pluie soit plus faible que la précédente, elle a généré un épisode de turbidité deux fois plus important que le précédent (pic à 150 NTU). Ceci peut s'expliquer par l'état initial du système qui a bénéficié lors du deuxième épisode d'un niveau de saturation et de mobilisation de la nappe plus importants. Là également, l'onde de la turbidité s'enregistre d'abord à Ribaa avec des valeurs légèrement plus importantes que celles de Bittit. Le décalage du passage de l'onde entre les deux sources est d'une dizaine d'heures.

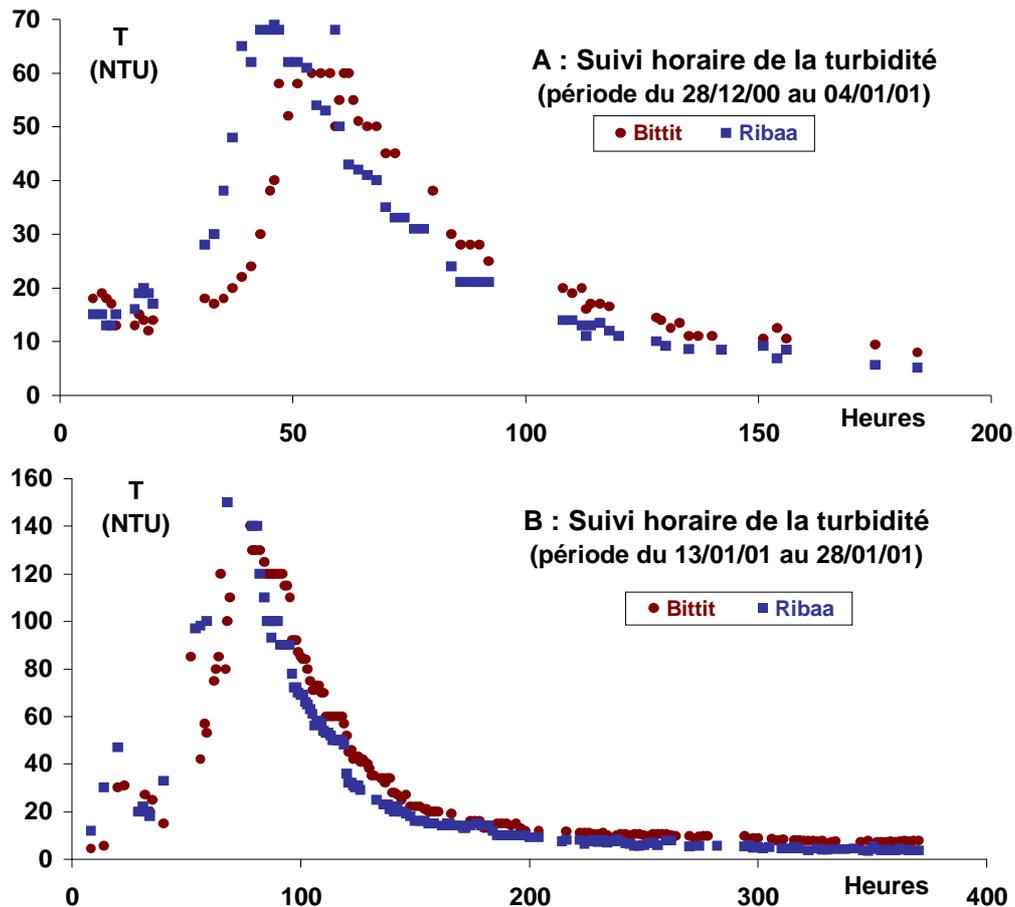


Figure 98 : Suivi horaire de la turbidité au niveau des sources captées

6.4 – Application de l’analyse corrélatoire et spectrale à une chronique de turbidité

D’habitude, les méthodes corrélatoires et spectrales sont appliquées exclusivement aux séries chronologiques des précipitations et des débits des systèmes karstiques. Le recours à ces méthodes pour l’étude des chroniques de turbidité a été très rarement utilisé (Bouchaou, 1995, 2002). Le but recherché est d’une part, l’identification des mécanismes de déclenchement de la turbidité qui peut être considérée comme un signal de sortie du système, et d’autre part, l’étude de sa relation avec le signal d’entrée représenté par la pluie.

L’analyse a porté sur des chroniques journalières de la turbidité relevées au niveau des deux sources captées. Les chroniques couvrent plus de deux cycles hydrologiques (28/12/95 au 04/02/98, soit 770 jours), L’analyse est donc réalisée à court terme avec un pas de temps journalier et une troncature de 120 jours.

6.4.1 – Analyse de la série chronologique de la turbidité

Les corrélogrammes de turbidité des deux sources sont tout à fait semblables (Fig. 99A), en raison d’un effet régional. Ils montrent que les séries chronologiques de turbidité ont une structure très différente de celles des débits (Fig. 92) et de la pluie (Fig. 91). En conséquence, on peut supposer que la turbidité n’a pas de relation évidente avec les débits des sources et qu’elle provient d’autres mécanismes

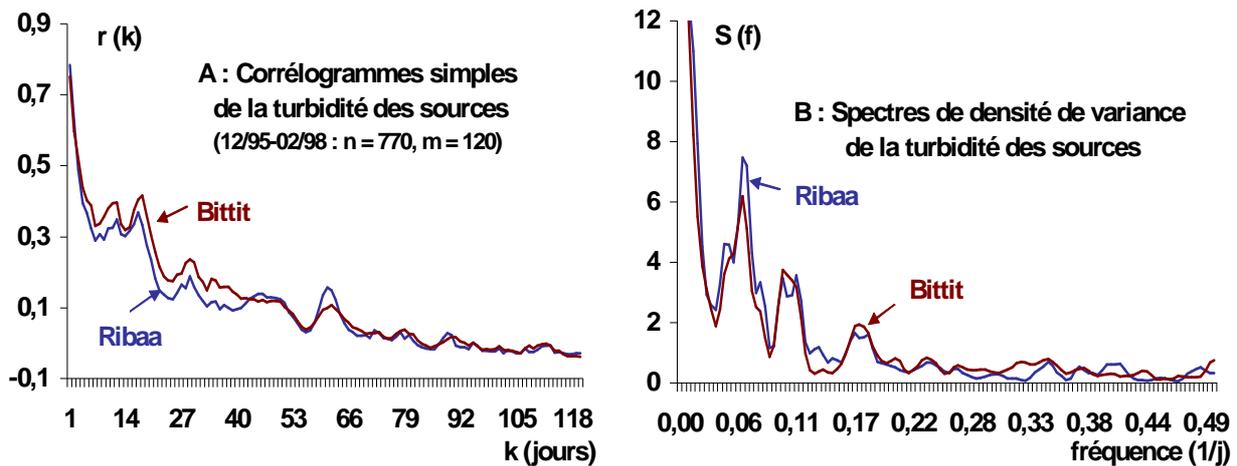


Figure 99 : Analyse corrélatrice et spectrale simple des turbidités des sources

Les corrélogrammes des deux sources peuvent être subdivisés en deux parties. La première partie est marquée par une décroissance rapide au début ($k < 8$ jours), suivie d'une stabilisation ($r_k = 0.32$; $8 \text{ jours} < k < 16$ jours). La deuxième partie est également marquée par une diminution rapide ($16 \text{ jours} < k < 20$ jours), suivie d'une diminution beaucoup plus modérée. On observe d'autres pics de moindre importance à $k = 30$ jours et à $k = 60$ jours, soulignant la présence d'évènements périodiques secondaires.

La dynamique complexe des systèmes karstiques (l'infiltration rapide et retardée, effet de rinçage, écoulement rapide et écoulement diffus) est bien connue et peut expliquer dans une certaine mesure le dégagement de la turbidité sous forme d'à-coups. La valeur $r_k = 0.2$ est atteinte après 21 jours pour Ribaa et 23 jours pour Bittit.

La décroissance au début du corrélogramme correspond à une réponse rapide à la pluie au cours des premiers jours. Elle est liée vraisemblablement au ruissellement souterrain à caractère rapide, traduisant un écoulement à travers un karst superficiel développé, où les fractures, les avens et les gouffres permettent la communication entre la surface et l'écoulement souterrain, mettant en mouvement des particules mises à sec dans les conduits karstiques. Passés les premiers jours, la dynamique du système prend le relais, la décroissance est beaucoup plus modérée avec des pics qui correspondraient à des effets composites. Au cours de ce palier, la restitution du signal d'entrée est ralentie dans le temps, signe d'une mise en réserve importante. L'effet mémoire est bien mis en évidence à partir de $k = 8$ jours.

Les spectres des densités de variance des deux sources (Fig. 99B) montrent un comportement similaire. On peut observer un pic principal à la fréquence $f = 0.06$ ($k = 16$ jours dans le domaine de temps) confirmant le comportement déduit des corrélogrammes. D'autres pics secondaires ($f = 0.11$; $f = 0.17$) apparaissent sur les spectres mais sont de faible dimension.

On note une certaine tendance saisonnière avec une fréquence de coupure d'environ 0.2 jours^{-1} indiquant un comportement caractérisé par une faible inertie. Cette inertie faible du système en ce qui concerne la turbidité est confirmée par le temps de régulation qui est de 23 jours pour Ribaa et de 26 jours pour Bittit.

En Résumé : Les paramètres obtenus en analysant les turbidités des deux sources montrent un effet mémoire moyen (23 à 52 jours pour Bittit et 21 à 35 jours pour Ribaa), une bande spectrale large (0.2), et un temps de régulation de 23 à 26 jours. Ces données peuvent être comparées (tabl. 31) à celles de l'aquifère carbonaté de l'Atlas de Beni Mellal (Bouchaou, 1995 ; Bouchaou et al, 2002). Il en ressort que l'effet mémoire et les temps de régulation sont très différents entre les deux secteurs d'étude.

Types	Effet mémoire ($r = 0.1 - 0.2$)	Bande spectrale : fréquence de coupure	Temps de régulation
Bittit	Moyen à fort (23 à 52 j)	Large (0.2)	26 jours
Ribaa	Moyen (21 à 35 j)	Large (0.2)	23 jours
Aïn Asserdoune	Réduit (4 j)	Large (0.2)	4.5 jours

Tableau 31 : Comparaison des paramètres obtenus à Bittit et Ribaa par rapport à ceux d'Aïn Asserdoune en analysant la turbidité

6.4.2 – Analyse croisée pluie-turbidité

Les corrélogrammes croisés pluie-turbidité sont montrés sur la figure 100. On note tout d'abord une relation pluie-turbidité identique pour les deux sources, ce qui témoigne de nouveau d'un effet régional et de leur appartenance à un même système karstique. Les corrélogrammes ne sont pas symétriques et n'indiquent pas de relation positive entre la turbidité et les précipitations, qui peuvent être interprétées comme étant la cause de son déclenchement. Comme la série chronologique des précipitations est quasi aléatoire, les corrélogrammes reflètent une bonne image de la réponse impulsionnelle du système. Cette réponse tout à fait brusque traduit un comportement plutôt non inertiel. Les corrélogrammes continuent avec une réduction de l'oscillation. Un pic majeur ($r_{xy}(k) > 0.3$) peut être observé au 5^{ème} jour et un second ($r_{xy}(k) < 0.2$) au 21^{ème} jour. Le premier pic avec un $r_{xy}(k)$ maximum définit le retard de la réponse, qui est de 5 jours pour les deux sources. Ce court délai confirme que l'évolution de la turbidité à l'intérieur du système n'est pas inertielle.

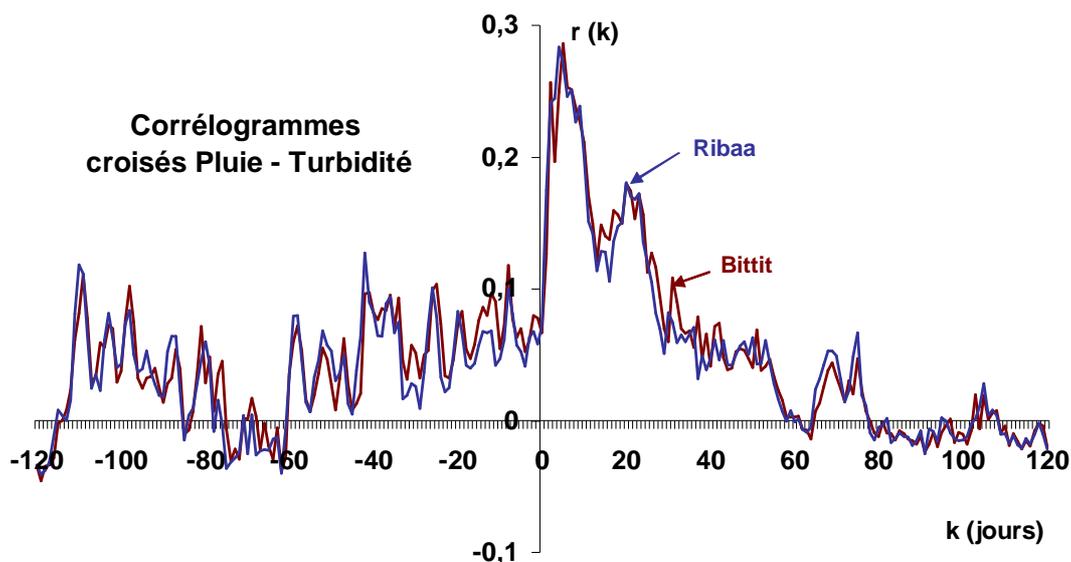


Figure 100 : Analyse croisée pluie-turbidité des sources captées (12/95-02/98)

Les fonctions d'amplitude croisées (Fig. 101A) et les fonctions de gain (Fig. 101B) montrent une atténuation remarquable du signal d'entrée par le système karstique pour des fréquences supérieures à $f = 0.083 \text{ j}^{-1}$ (périodes < 12.5 jours) et son amplification pour les fréquences très basses, ce qui confirme les résultats précédents. Cependant, la fonction de gain indique un comportement complexe de la relation pluie-turbidité dans les basses et moyennes fréquences ($f < 0.083 \text{ j}^{-1}$). Le signal de turbidité est amplifié avec le signal des pluies pour $f < 0.02 \text{ j}^{-1}$ (périodes > 50 jours) et pour $f = 0.07 \text{ j}^{-1}$ ($k = 16$ jours), ce qui reflète le comportement complexe des systèmes karstiques. La valeur moyenne de la fonction de cohérence CO_{xy} (Fig. 101C) pour les sources est très basse ($CO_{xy} = 0.36$ et 0.39 respectivement pour Ribaa et Bittit), ce qui indique que la relation précipitation-turbidité n'est pas linéaire.

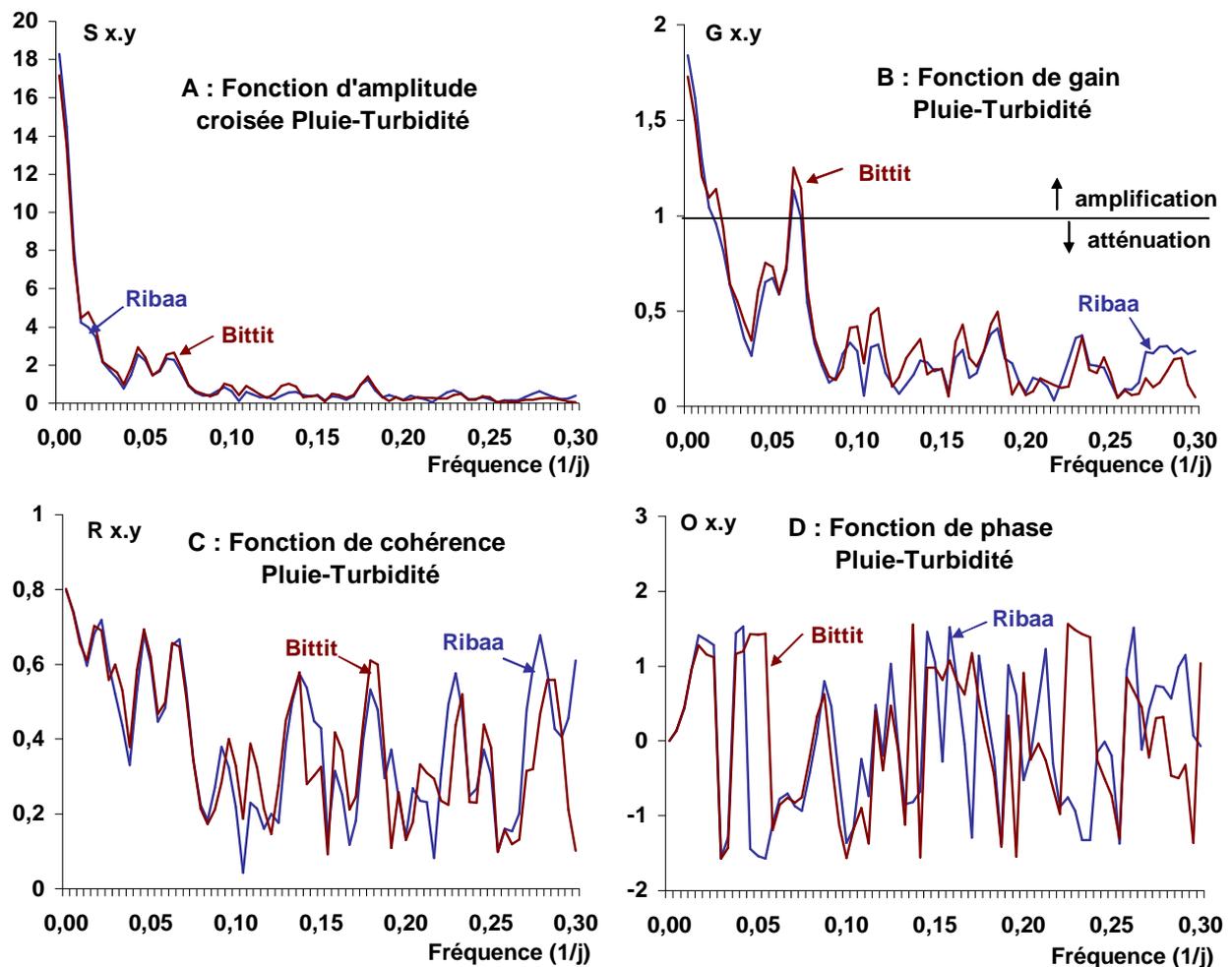


Figure 101 : Analyse spectrale croisée : pluie – turbidité des sources captées (12/95 – 02/98)

En résumé : contrairement à l'analyse pluie-débit qui a montré un effet significatif de mémoire et une forte inertie des systèmes karstiques, l'analyse pluie-turbidité donne en revanche des résultats très différents, à savoir un faible effet de mémoire et des systèmes karstiques peu inertiels. En conséquence, il est clair que le débit et la turbidité sont des phénomènes non corrélatifs.

6.5 – Discussion et conclusion concernant l'origine de la turbidité

Avant d'entamer la discussion sur les origines possibles des troubles qui affectent les sources du complexe Ribaa-Bittit lors des grandes averses, il est important de décrire brièvement les caractéristiques générales des aquifères karstiques et les conditions spécifiques du site d'étude.

6.5.1 – Modèle conceptuel du magasin karstique

Pour bien comprendre le fonctionnement d'un aquifère karstique du type moyen atlasique, on peut se référer aux modèles conceptuels proposés dans la littérature (Mangin, 1984 ; Drogue, 1980 ; Ford et Williams, 1994). Ces derniers distinguent deux ensembles présentant une dualité de comportement hydraulique se répercutant fortement sur le fonctionnement du système (inversion de gradient, différence de niveaux piézométriques, régime des sources...) : Un premier ensemble capacitif, constitué de blocs isolés de matrice calcaire de dimension hectométrique, séparés par des drains majeurs. Par leur micro-porosité et leur faible perméabilité, ils confèrent à l'aquifère sa fonction capacitive. Les circulations y sont lentes et la transmissivité y est faible. Le second ensemble est drainant (réseau de conduits majeurs) : du drain mineur au drain collecteur, ils sont le siège de circulations importantes. La transmissivité y est forte et par opposition la capacité faible.

La dynamique d'écoulement dans le système, et par conséquent le mécanisme de turbidité, est alors dépendant du degré de hiérarchisation entre les deux ensembles. Après un événement de précipitation, l'écoulement est principalement vidangé par les conduits transmissifs. Durant le tarissement, l'écoulement de l'émergence reste soutenu par la libération des eaux de stockage et de l'infiltration retardée.

Il faudrait également souligner l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques qui distingue entre deux systèmes parallèles : une zone noyée et un karst superficiel, qui possèdent des structures internes différentes et des comportements différentiels. La zone noyée peu transmissive est le siège de stockage des réserves, alors que le karst superficiel transmissif est le lieu de l'infiltration qu'elle soit rapide ou retardée.

6.5.2 – Conditions spécifiques du site de l'étude

Le Causse Moyen Atlasique constitue le secteur de recharge du système karstique qui est vidangé par les sources. Il est constitué de roches dolomitiques et calcaires du Lias voilées, par endroits, par des épanchements volcaniques récents. Il se caractérise par une structure tabulaire, plus faillée que plissée et par un relief monotone. Il s'agit de vastes plateaux karstiques diversement étagés, qui surplombent la plaine environnante du Saïs à des altitudes dépassant 1000 m. Des ondulations à très grands rayons de courbure, des systèmes de failles, créent des cuvettes ou des horsts.

Un karst de surface à lapiés ruiniformes et ouvalas s'est développé, ainsi qu'une dizaine d'ovens de faible importance. Les phénomènes karstiques sont mal développés. On note une faible présence de grottes ou de galeries souterraines accessibles. Les formes karstiques présentes sont constituées de petites cavités sommitales, et par de grandes et profondes cuvettes, d'effondrement ou des vasques de grande taille. Le fond des dépressions karstiques accueille des minéraux argileux rougeâtres.

6.5.3 – Essai d'interprétation de l'origine de la turbidité

On pense que l'hydrodynamique et la structure complexe du système seraient à l'origine de l'apparition de la turbidité. Cette manifestation récurrente de la turbidité est une caractéristique commune des sources karstiques. Les roches carbonatées qui affleurent à travers tout le bassin versant des sources étudiées s'altèrent, et libèrent des minéraux argileux qui forment un résidu (argile rouge de décalcification, argile à silex...) peu perméable. Ce résidu comble les points bas topographiquement (dépressions karstiques, dolines...). Lors des orages, des ruisseaux diffus s'organisent en surface. Les eaux chargées d'argile vont jusqu'aux ravins ou vers les entonnoirs de diamètres variables (grottes, avens, trous...), où elles sont infiltrées entièrement.

Les pertes qui récoltent les eaux de ruissellement sont localisées surtout dans les régions plates du bassin et communiquent directement ou indirectement avec l'aquifère à travers un jeu de fractures, de diaclases superficielles ou de trous absorbants. Cette eau véhiculée par les chenaux est vite évacuée par les sources karstiques. Sa turbidité est importante à l'instar des eaux des cours d'eau après les crues. Cette origine externe de la turbidité est prouvée au moins en partie par la présence de branchages et d'excréments de bétail rejetés par les sources lors des grandes averses et qui sont en relation avec l'activité agricole et l'élevage qui sont pratiqués sur le Causse.

L'apparition de la turbidité au niveau de l'exutoire peut s'expliquer par une origine externe, mais peut être justifiée également, tout au moins en partie, par une origine interne au système karstique. En effet, dans l'aquifère des dépôts argileux sont présents dans les conduits karstiques et au niveau de certaines fissures. L'infiltration rapide par la zone non saturée cause un effet de rinçage et un écoulement turbulent dans les conduits fortement transmissifs avec des vitesses très élevées. Cet écoulement turbulent peut causer la mise en suspension des particules déposées dans les conduits et leur transport vers les sources.

La présence des matières en suspension le long de l'écoulement peut s'expliquer partiellement par le phénomène de dé-colmatage des fissures. Ceci a été observé (Bakalowicz et al., 1994) pendant des expériences de pompage à fort débit dans un karst pyrénéen. Les vitesses élevées d'écoulement, provoquées par les forts pompages, augmentent la turbulence et provoquent un régime d'écoulement chaotique. Ce changement du régime d'écoulement a comme conséquence la libération des particules argileuses qui se retrouvent plus tard évacuées vers les exutoires. Cette turbidité d'origine interne est probablement la première à être évacuée après un événement pluvieux.

Cette double origine de la turbidité a été observée dans d'autres systèmes karstiques (Masséi et al., 2002). Les hypothèses avancées ici peuvent expliquer dans une certaine mesure les périodicités et les à-coups de la turbidité déduits des analyses corrélatoires et spectrales.

Ce travail fournit quelques réponses préliminaires au problème de turbidité observé au niveau des sources de Ribaa et de Bittit. Cependant, plusieurs autres facteurs autres que des facteurs hydrodynamiques peuvent expliquer le phénomène de turbidité (McCarthy et Schevenell, 1998). Pour une meilleure compréhension du problème de turbidité affectant les deux sources, les travaux de recherche en cours incluent des analyses minéralogiques et micro-granulométriques des dépôts argileux, des essais de traçage et des analyses physico-chimiques des eaux.

SYNTHESE DE LA QUATRIEME PARTIE

Le groupe des sources Ribaa-Bittit représente un exutoire de l'aquifère karstique du Lias et son bassin d'alimentation se situe sur le Causse. Le suivi des débits depuis 1975 et l'étude de leurs conditions d'émergence ont permis de les regrouper en trois classes :

- Les sources de **débordement** (Bittit, Ribaa et Sebaa) qui jalonnent la flexure de Si Lmir, sont caractérisées par un débit important et par un faible indice de variabilité inter-annuel ;
- Les sources de **trop plein** (Attrous, Aguemguem et Si Lmir) se caractérisent par une position topographique élevée et par des variations notables de débit ;
- Les sources **d'émergence** de la nappe plio-quadernaire (Hijja..) se caractérisent par de faibles débits et par des indices de variabilité élevés.

Toutes les sources ont été affectées par la **sécheresse** qui perdure depuis au moins deux décennies. Les sources de débordement marquent une tendance baissière régulière, celles de trop plein sont à régime temporaire, et les sources d'émergence sont actuellement à l'arrêt.

Les résultats obtenus par les différentes **méthodes du traitement du signal** (débits classés, récession et analyses corrélatoires et spectrales) sont cohérents entre eux et permettent une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique du Lias.

Les courbes des **débits classés** des principales sources ont montré une évolution des débits aux émergences suivant trois à quatre lois d'écoulements distinctes. Durant la décrue, la source Bittit semble se comporter d'une manière inverse de celle des sources Ribaa, en raison probablement de sa position privilégiée et de l'importance de son réservoir. La sécheresse a eu pour conséquence une baisse des apports aux sources et une réduction de l'aire d'alimentation.

L'analyse des **courbes de récession** des principales sources a permis de relever les points suivants :

- Les coefficients de tarissement sont faibles (10^{-3} à 10^{-4} j^{-1}) traduisant la vidange lente des réserves et par conséquent une tendance au stockage.
- La décrue est généralement étalée : 34 à 135 jours selon les sources. Ceci traduit une réponse retardée au signal d'entrée représenté par la pluie.
- La source Bittit offre un système hydrogéologique étendu et complexe. Le volume d'eau soutenant le tarissement est très important (907 Mm^3 en 1996), ce qui implique un immense réservoir et place cet aquifère parmi les domaines peu karstifiés. Les dolomies sableuses constitueraient un système poreux à pouvoir régulateur très élevé.
- Malgré la richesse de l'aquifère, l'effet de la sécheresse sur le système a été significatif. Le volume moyen annuel perdu par la source Bittit entre 1977 et 1996 a été estimé à 9.4 Mm^3 .

L'analyse **corrélatoire et spectrale** appliquée aux chroniques des débits des sources Ribaa aval et Bittit permet de dégager les points suivants :

- Le système module le signal d'entrée, il a un important effet mémoire (37 à 74 jours) qui est en relation avec le rôle régulateur des réserves. La bande spectrale est étroite (0.11 à 0.14) et le temps de régulation varie de 35 à 57 jours.
- La différence de comportement du système entre une période à pluviométrie normale et une période de sécheresse, a permis de souligner l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques, et de montrer l'influence significative de leur état de saturation sur les relations entrées-sorties.
- L'analyse croisée pluie-débit a confirmé : l'important pouvoir régulateur du système, l'alimentation par infiltration retardée, le grand retard de réponse à la pluie, le faible développement de la karstification et la grande capacité du karst à emmagasiner des réserves.

Les différentes méthodes hydrodynamiques utilisées dans cette partie montrent que le système hydrogéologique étudié est très capacitif : stockage important, débit régulé et soutenu durant toute l'année, écoulement relativement lent à cause de la présence à la base d'une assise de dolomies sableuses, karstification peu développée. Cependant malgré la grande capacité de réserve de cet aquifère karstique, le débit à l'exutoire marque une tendance régulière et significative à la baisse due à une longue période de sécheresse qui réduit considérablement l'alimentation de l'aquifère.

Le phénomène d'apparition des **eaux troubles** au niveau des sources lors des grandes averses a été étudié, en se basant sur un suivi journalier de la **turbidité** disponible depuis décembre 1995. L'application de l'analyse corrélatoire et spectrale à la chronique de turbidité a montré que :

- L'apparition de la turbidité n'est pas corrélée avec le débit.
- Une relation causale entre la pluie et l'apparition de la turbidité sous forme de vagues a été mise en évidence. On en déduit que la turbidité est liée aux conditions hydrodynamiques dans le karst.
- Les écoulements rapides turbulents ayant lieu dans les conduits karstiques transmissifs à la suite de fortes averses causeraient la mise en suspension des particules déposées dans les conduits et leur transport vers les exutoires.
- Une origine externe a aussi été envisagée, par l'infiltration d'eaux chargées en matières en suspension lessivées à la surface des bassins.

CINQUIEME PARTIE :

ETUDE HYDROCHIMIQUE

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION ET PRESENTATION DES DONNEES D'ANALYSES

CHAPITRE 2 – CARACTERISTIQUES GENERALES DES EAUX DU LIAS

CHAPITRE 3 – ETUDE HYDROCHIMIQUE DES EMERGENCES RIBAA-BITTIT

CHAPITRE 4 – APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES

SYNTHESE DE LA CINQUIEME PARTIE

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION ET PRESENTATION DES DONNEES D'ANALYSES

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

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

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

Les données hydrochimiques des eaux du Lias ont été récoltées en majorité au niveau du fichier central de la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau à Rabat. D'autres données relatives aux deux sources captées pour l'alimentation en eau potable de Méknès ont été fournies par la Régie chargée de la production et de la distribution de l'eau de la ville (RADEEM). Sur un grand nombre de forages ayant atteint le Lias, nous disposons d'informations relatives aux caractéristiques physiques et chimiques des eaux : température, conductivité, pH, salinité. En outre, des dizaines d'analyses totales à travers la zone d'étude sont disponibles. Elles ont été saisies et contrôlées par leur balance ionique, et les analyses douteuses ont été rejetées.

CHAPITRE 2 – CARACTERISTIQUES GENERALES DES EAUX DU LIAS

2.1 - Température de l'eau du Lias

La carte de la température de l'eau (Fig. 102) a été construite sur la base de 169 valeurs de température figurant sur les fiches des forages captant le Lias au moment de leur réalisation. Les températures relevées s'échelonnent entre 12 °c en amont (au niveau de la ville d'Ifrane) et plus de 45 °c en aval à proximité des rides pré-rifaines. Des courbes d'égales valeurs de la température ont été dessinées avec une équidistance de 2.5 °c quand la température de l'eau est inférieure à 20 °c, et avec une équidistance de 5 °c quand la température de l'eau enregistre plus de 20 °c. L'augmentation de la température du sud-est vers le nord-ouest s'explique par l'approfondissement progressif de la nappe qui, étant libre au niveau du Causse, devient captive en plaine sous des épaisseurs mio-plio-quadernaires de plus en plus importantes (vers le nord et le nord-ouest).

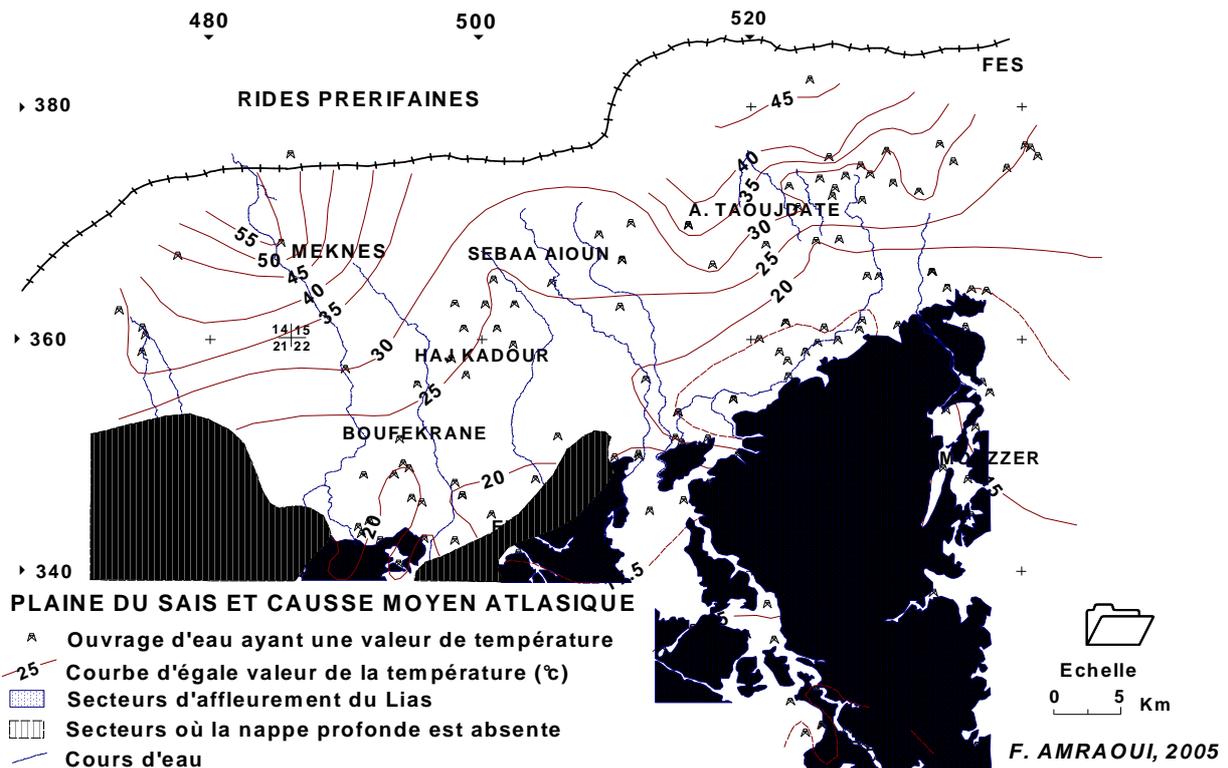


Figure 102 : Carte de la température de l'eau du Lias

Cette augmentation de température qui se fait dans le sens de l'écoulement, s'effectue d'une manière irrégulière traduisant ainsi une certaine complexité structurale du magasin liasique et reflète le rôle des grandes failles et flexures, responsables d'un compartimentage de l'aquifère profond, tel que l'ont montré les prospections géophysiques. Là où les courbes d'égale valeur de température s'invoignent, correspondrait à des compartiments relevés. Par contre là où les courbes marquent des avancées vers le nord, correspondrait à des blocs liasiques affaissés.

Il est intéressant de noter qu'à partir du centre de la plaine en allant vers le nord, l'augmentation de la température évolue beaucoup plus vite qu'avant. Ceci traduirait un plongement brusque des assises liasiques en direction des rides pré-rifaines.

La mise en évidence d'une corrélation entre la température de l'eau et la profondeur du Lias a été tentée sur un effectif de 150 couples de valeurs. La relation linéaire obtenue (Fig. 103) s'est révélée significative avec un coefficient de corrélation obtenu de 0.86. L'équation de corrélation est la suivante : $T (^{\circ}\text{C}) = 0.02 \text{ Prof} + 16$.

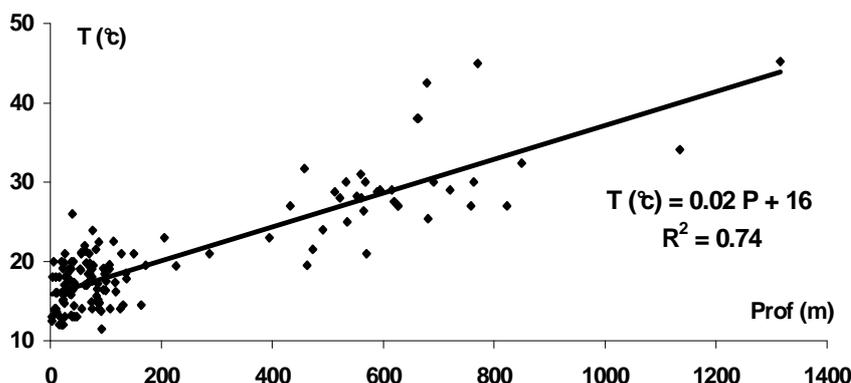


Figure 103 : Relation entre la température de l'eau et la profondeur du Lias

2.2 – Conductivité électrique de l'eau du Lias

La carte regroupant les données sur la conductivité électrique des eaux du Lias (Fig. 104) a été élaborée sur la base de 217 valeurs relevées sur les fiches des forages ayant atteint le Lias. Les données sont bien réparties entre le Causse et la plaine et les conductivités s'échelonnent entre moins de 500 et plus de 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Cinq classes inégales de conductivité ont été distinguées. Les résultats obtenus suggèrent les remarques suivantes :

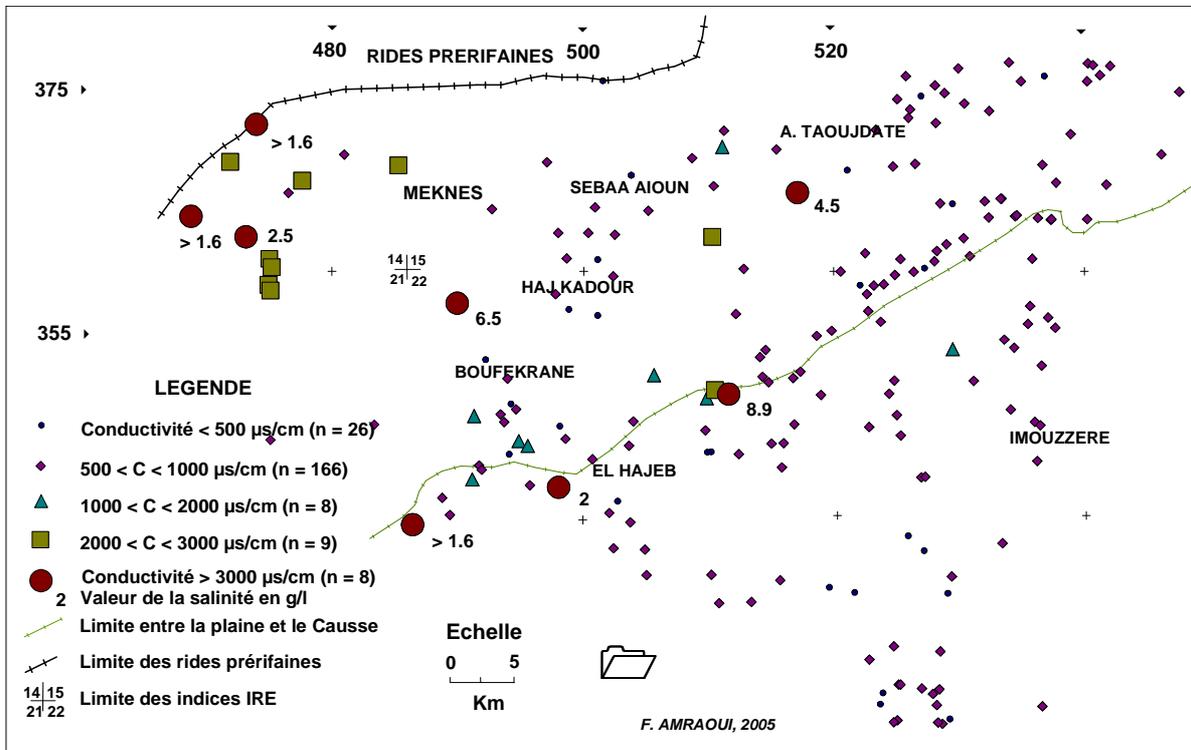


Figure 104 : Report de la conductivité électrique de l'eau du Lias

- Les deux premières classes correspondent à des eaux très douces (conductivité < 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$) et elles totalisent 88.5 % de l'ensemble des valeurs. Leurs eaux se situent au niveau du Causse, mais également en plaine à l'Est de la ville de Méknès ;
- Les deux classes suivantes correspondent à des eaux à minéralisation moyenne (1000 à 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Elles représentent 7.8 % de l'ensemble des valeurs. Leurs eaux se localisent principalement sur le plateau de Méknès, soit au niveau de la bordure du Causse, soit à l'approche des rides pré-rifaines ;
- La dernière classe de conductivité correspond à des eaux fortement minéralisées (> 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Elle représente 3.7 % de l'ensemble des valeurs et les eaux (dont la salinité varie de 1.6 à 8.9 g/l) se localisent ponctuellement en bordure du Causse, ou au centre de la plaine ou encore dans le secteur NW du plateau de Méknès. Pour expliquer la très forte minéralisation de ces eaux, deux causes majeures peuvent être évoquées : soit la contamination par le substratum triasique salifère, soit la forte température en profondeur qui favorise les échanges entre l'eau et l'encaissant (voir coupes géologiques et géophysiques).

2.3 – Teneurs en éléments chimiques des eaux du Lias

La figure 105 montre la situation de 21 points d'eau ayant fait l'objet d'une analyse totale de l'eau. Selon leur répartition, ces points peuvent être regroupés en quatre ensembles. L'intérêt de ce regroupement est de pouvoir suivre les variations de la chimie de l'eau du Lias en fonction de son cheminement depuis le Causse à l'amont jusqu'au Pré-rif à l'aval.

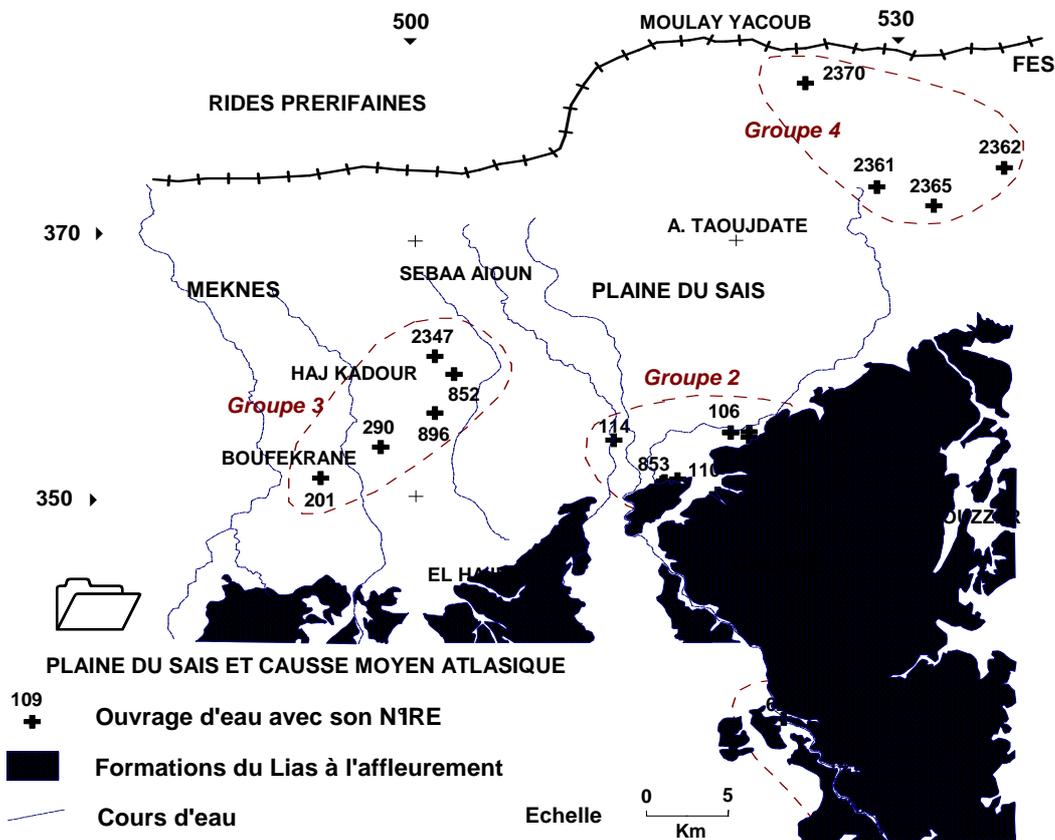


Figure 105 : Carte de la situation des points d'eau disposant d'analyses physico-chimiques

- le premier groupe G1 situé en amont au niveau du Causse contient un forage, deux puits et une prise sur l'oued Tizguit ;
- le second groupe G2 contient huit sources du complexe Ribaa-Bittit qui émergent en bordure du Causse ;
- le troisième groupe G3 composé de cinq forages, est situé au centre du plateau de Méknès, le long de l'axe Boufekrane-Haj Kaddour ;
- le quatrième groupe G4 composé de 4 forages, est situé dans la partie orientale de la plaine du Saïs au SW de la ville de Fès.

Le tableau 32 ci-après regroupe les données physico-chimiques moyennes de chaque groupe d'ouvrages. Y Figure certains paramètres (résidu sec, température et rapport Ca/Mg) et les teneurs moyennes en ions exprimées en me/l. Ces données moyennes ont été représentées sur un diagramme d'analyse d'eau (Fig. 106). De ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

Eau	RS (g/l)	T (°c)	pH	Cations (me/l)				Anions (me/l)				Ca/Mg
				K	Na	Ca	Mg	Cl	NO ₃	HCO ₃	SO ₄	
G 1	0.3	11.5	7.9	0.07	0.39	2.46	3.38	0.52	-	5.37	0.46	0.8
G 2	0.42	16.6	7.6	0.04	1.22	2.04	3.55	1.23	0.13	4.85	0.77	0.6
G 3	0.45	21.8	7.7	0.02	1.49	2.25	3.38	2.43	-	4.21	0.93	0.66
G 4	0.43	31.2	7.63	0.03	1.7	1.98	3.68	1.99	-	4.75	0.94	0.54

Tableau 32 : Données physico-chimiques moyennes par groupe d'ouvrages

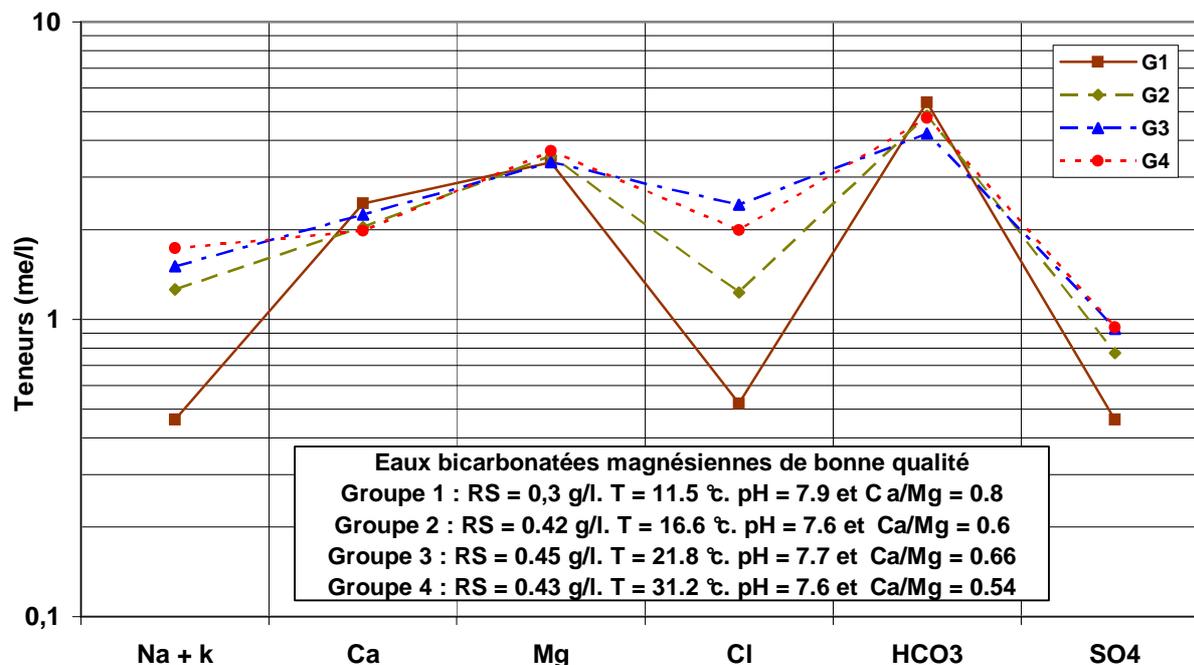


Figure 106 : Diagramme d'analyse de l'eau du Lias de la région du Saïs

- Les eaux du Lias sont peu minéralisées, avec un résidu sec ne dépassant pas 0.5 g/l ;
- La température de l'eau varie de l'amont vers l'aval d'une manière significative ;
- Le pH de l'eau est légèrement basique. Elle a donc tendance à provoquer des incrustations ;
- Le rapport Ca/Mg est inférieur à 1, ce qui témoigne de la nature dolomitique de l'aquifère ;
- Le faciès des eaux est généralement bicarbonaté magnésien, chloruré calcique ;
- Les teneurs en chlorures, en sodium et en sulfates augmentent d'une manière significative de l'amont vers l'aval. Ceci serait lié à l'enfouissement de la nappe vers l'aval qui s'accompagne d'une augmentation de température, qui favorise les échanges entre l'eau et l'encaissant triasique ;
- Les teneurs en calcium, en magnésium et en bicarbonates ne marquent pas de variations significatives entre le causse et la plaine ;
- La dureté de l'eau est moyenne et avoisine généralement les 30 °F ;
- Les nitrates n'ont pas toujours été dosés, mais ils ne semblent pas être bien représentés dans ces eaux.

CHAPITRE 3 – ETUDE HYDROCHIMIQUE DES SOURCES RIBAA-BITTIT

3.1 – Caractéristiques générales moyennes des eaux des émergences

Nous disposons pour les huit principales sources du complexe Ribaa-Bittit d'un certain nombre d'analyses totales (3 à 24 selon les sources). La plupart des analyses ont été effectuées entre 1975 et 1981. Seules les sources captées disposent d'analyses récentes. Le tableau 33 ci-après regroupe les caractéristiques physico-chimiques moyennes de ces émergences karstiques. Ces données moyennes ont permis de tracer sur un diagramme logarithmique d'analyse de l'eau, les courbes correspondant à la composition chimique de chaque source. Une telle représentation a l'avantage de pouvoir comparer plusieurs types d'eaux sur la base de leurs teneurs absolues (Fig. 107).

Source	Bittit	Ribaa am	Ribaa av	Akkous	Agmgm	Attrous	Sebaa	Si Lmir	
Date	1954-97	1975-81	1975-97	1966-81	1969-81	1975-81	1967-81	1975-81	
Nombre	20	20	24	6	17	19	3	20	
Q _{mov} (l/s)	1702	809	458	375	1653	183	365	93	
Cond (µs/cm)	508	535	534	530	525	548	517	1047	
Temp (°C)	16.3	15.9	16	17.6	15.6	16.2	17.7	17.5	
Altitude (m)	758	871	871	780	908	880	745	755	
PH	7.5	7.6	7.6	7.8	7.8	7.8	7.2	7.7	
TH (°F)	29	27	28	25	29	30	26	29	
Ca/Mg	0.91	0.48	0.67	0.82	0.35	0.43	0.68	0.49	
Cations (me/l)	K	0.03	0.06	0.02	0.05	0.03	0.02	0.05	0.05
	Na	0.41	0.46	0.41	0.96	0.38	0.67	1.17	5.29
	Ca	2.74	1.75	2.26	2.28	1.48	1.81	2.12	1.91
	Mg	3.02	3.67	3.39	2.77	4.26	4.22	3.12	3.91
Anions (me/l)	Cl	0.47	0.55	0.46	0.90	0.48	0.55	0.82	5.60
	NO ₃	0.17	-	0.19	0.03	-	-	-	-
	HCO ₃	5.33	4.88	5.16	3.90	5.22	5.61	3.96	4.72
	SO ₄	0.40	0.58	0.53	1.03	0.51	0.57	1.60	0.94

Tableau 33 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux des sources du complexe Ribaa-Bittit

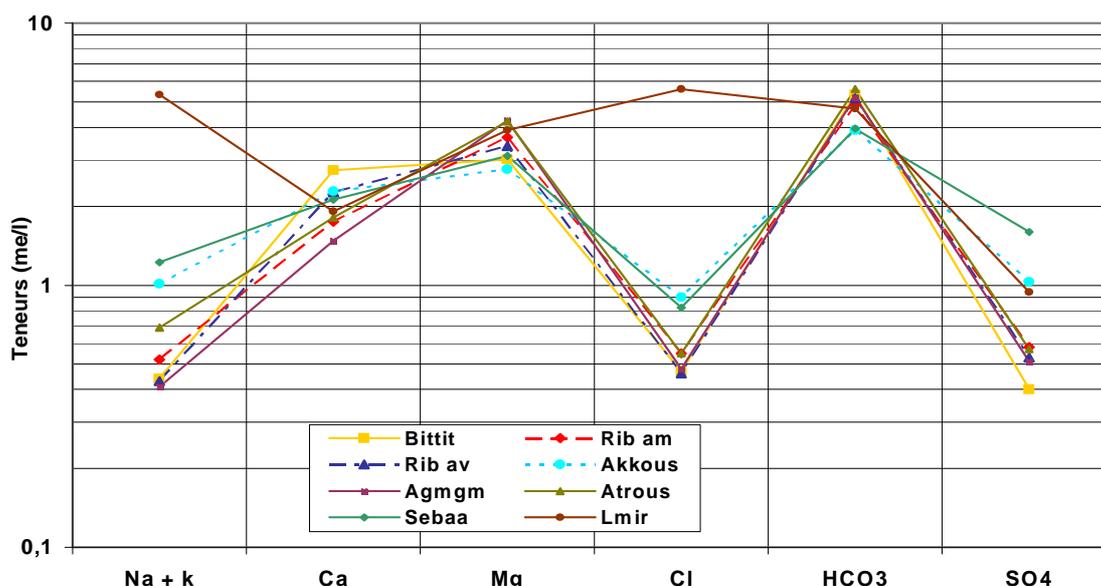


Figure 107 : Diagramme de la composition chimique des eaux des émergences karstiques du complexe Ribaa-Bittit

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

- Ces émergences peuvent être classées parmi les sources froides car leurs températures moyennes varient entre 15.6 et 17.7 °c. On note une homothermie remarquable des sources avec une température moyenne annuelle qui s'établit autour de 16.6 °c. Les différences de température sont minimales et elles sont liées à l'effet d'altitude. L'écart entre les températures minimales et maximales relevées au niveau des sources varie de 0.6 à 5.2 °c seulement, ceci peut attester de l'importance des réserves ;
- La conductivité électrique moyenne des eaux est en général faible ne dépassant pas 550 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (l'équivalent d'environ 360 mg/l). Seule la source Si Lmir marque une conductivité relativement importante atteignant 1050 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en moyenne. On peut donc qualifier les eaux des émergences de douces et noter que la nappe liasique est le plus souvent non influencée par la proximité du Trias salifère dont elle est séparée par une série basaltique du sommet du Trias ;
- Le faciès des eaux est bicarbonaté magnésien (sauf pour la source Si Lmir). La somme des concentrations en bicarbonates et en magnésium varie selon les sources de 55 à 79 % de la minéralisation totale de l'eau. Le rapport Ca/Mg est toujours inférieur à 1 (varie de 0.35 à 0.91). L'abondance de l'ion magnésium est certes liée à la nature dolomitique de l'aquifère liasique ;
- Les concentrations moyennes en Na, K, Cl, NO_3 et SO_4 sont minimales, sauf pour la source Si Lmir où le faciès de l'eau est chloruré sodique, secondairement bicarbonaté magnésien. La différence de la qualité de l'eau de cette émergence par rapport aux autres est liée à une origine de l'eau plus profonde dans une zone extrêmement tectonique où le contact avec les formations triasiques est très probable.

3.2 – Etat de saturation des eaux des sources

3.2.1 - Présentation

L'étude de l'état de saturation consiste à déceler si une eau naturelle est saturée (donc susceptible de déposer de son contenu dissous), ou sous-saturée (c'est à dire qu'elle est agressive et prête à dissoudre des quantités supplémentaires de carbonates), ou bien si elle est à l'équilibre. Cette connaissance est importante dans la mesure où, elle permet de déceler le comportement actuel des sources et à quantifier la dissolution des carbonates et leur accumulation dans des conditions bien déterminées.

L'eau ne peut dissoudre d'importantes quantités de carbonates que si elle contient du CO_2 dissous. Les mécanismes naturels de dissolution des carbonates font donc intervenir en plus des deux phases, solide (la roche carbonatée) et liquide (l'eau), une troisième phase, gazeuse (CO_2). L'ensemble de ces trois phases : $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ -carbonates, constitue le système calco-carbonique. Le problème se limite à l'étude de l'équilibre de ce système et au calcul du pH d'équilibre ainsi que de la pression du CO_2 dans l'eau. La question a été largement débattue (H. Schoeller, 1962 et 1969 ; H. Roques, 1964, 1967 et 1972 ; J. Miserez, 1972 ; M. Bakalowicz, 1979) et des méthodes d'approche ont été mises au point.

Il faut noter ici que la participation du CO₂ atmosphérique ne suffit pas à expliquer les teneurs élevées observées dans les eaux karstiques, c'est le CO₂ d'origine pédologique qui contribue d'une manière importante à l'agressivité des eaux infiltrées.

Nous utiliserons dans ce qui suit la méthode de Roques (1967) où les courbes d'équilibre basées sur la relation entre le pH et le TH (en °F (r Ca + r Mg)* 5) visualisent rapidement l'état de saturation, mais ne permettent pas de suivre ses variations dans le temps. L'eau est équilibrée si le point (pH/TH) est proche de la courbe d'équilibre correspondant à sa température. Elle est sursaturée si le point est au dessus de cette courbe.

L'état de l'eau souterraine vis à vis de l'équilibre calco-carbonique est fonction de son temps de contact avec la roche carbonatée encaissante. Une eau sous-saturée indique que son transit a été rapide et, ne permet pas de parvenir à l'équilibre. Elle est donc agressive et peut encore dissoudre des carbonates. En revanche, une eau sursaturée indique un écoulement lent qui permet un dégazage de l'eau et par conséquent, une tendance à la précipitation des carbonates.

Il est à noter que le dégazage peut intervenir soit au sein du système, soit au niveau de l'exutoire, soit encore dans le flacon de prélèvement lorsque les analyses ne sont pas faites in situ et effectuées plusieurs jours après le prélèvement. Il est donc nécessaire d'envisager ces trois éventualités avant de savoir si la sursaturation observée sur une eau est bien la conséquence d'une évolution de cette eau au sein du système.

3.2.2 – Résultats et interprétation

La figure 108 ci-après regroupe les couples de valeurs pH-TH de 180 analyses de l'eau de huit émergences du complexe Ribaa-Bittit, effectuées à différentes époques de l'année et ceci depuis 1954. La figure montre que pour toutes les émergences les points s'organisent équitablement soit à proximité, soit de part et d'autre de la droite correspondant à 15 °C (température proche de celle des sources). Ceci veut dire que les eaux rencontrées ici peuvent correspondre à différents états de saturation.

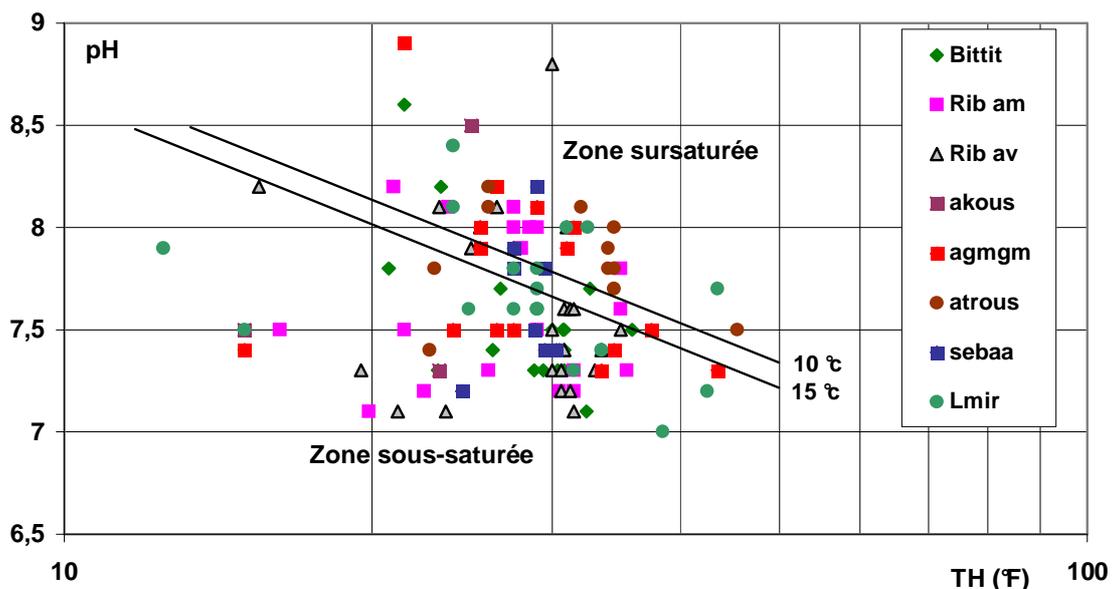


Figure 108 : Etat de saturation des eaux des émergences Ribaa-Bittit : diagramme d'équilibre (courbes de Roques)

En principe, les points situés dans la zone sursaturée devraient correspondre à des eaux analysées durant la période d'étiage, où les apports sont faibles et les écoulements retardés sont lents, permettant un bon contact entre l'eau et l'encaissant et un dégazage de CO₂. En revanche, les points situés au niveau de la zone sous-saturée devraient correspondre à des eaux échantillonnées durant la période humide, où la recharge est importante et les écoulements sont rapides, ne permettant pas un grand contact entre l'eau et la roche et où les eaux comportent des teneurs élevées en CO₂ les rendant agressives.

En distinguant les analyses correspondant aux mois humides de celles des mois secs, on retrouve toujours des points qui se situent de part et d'autre de la droite correspondant à 15 °c. En fait, vu le régime très irrégulier des pluies et la séquence de sécheresse qui touche cette région depuis plus de deux décennies, le régime d'écoulement et par conséquent l'état de saturation des eaux reste tributaire de l'importance et de la répartition des apports.

Afin de mieux cerner ce phénomène, on s'est basé sur 14 analyses physico-chimiques détaillées (effectuées par le laboratoire ELYO) intéressant les deux sources captées pour l'alimentation de la ville de Méknès. Pour chaque analyse, on a noté la pluie relevée à la station de Bittit par semaine durant le mois qui a précédé le prélèvement. Le tableau 34 ci-après résume les données recueillies.

Date	TH		pH		Pluie à Bittit par semaine précédant l'analyse			
	Bittit	Rib av	Bittit	Rib av	1	2	3	4
17/01/1991	30.8	30.8	7.40	7.40	0	0	0	2 mm (1J)
21/11/1991	32.4	30.6	7.10	7.30	15 mm (3 J)	0	0	3 mm (1 J)
19/11/1992	29.4	30.6	7.30	7.25	30 mm (1 J)	0	5 mm (2 J)	0
11/05/1994	30.0	30.0	7.50	7.35	5 mm (2 J)	0	0	2 mm (2 J)
08/03/1995	30.8	30.0	7.30	7.50	7 mm (2 J)	29 mm (3 J)	0	18 mm (2 J)
30/01/1996	23.2	23.6	7.30	7.15	57 mm (6 J)	39 mm (5 J)	44 mm (3 J)	55 mm (3 J)
30/06/1997	31.2	31.2	7.50	7.55	6 mm (1 J)	0	0	6 mm (1 J)

Tableau 34 : Données physico-chimiques et pluviométriques des deux sources Ribaa-Bittit

La figure 109 représente le diagramme d'équilibre correspondant à ces 14 analyses. Il apparaît que les eaux sont en majorité sous-saturées avec quelques unes proches de l'équilibre. Ces eaux sont donc agressives et peuvent dissoudre les carbonates. Les points qui s'éloignent le plus de la droite d'équilibre correspondent aux analyses effectuées suite à des périodes de pluie significatives (11/91, 11/92 et 1/96). L'absence d'eaux sursaturées peut être justifiée par le fait que toutes ces analyses ont été effectuées soit en début, soit à la fin de la période humide et aucune n'a été réalisée en pleine période d'étiage.

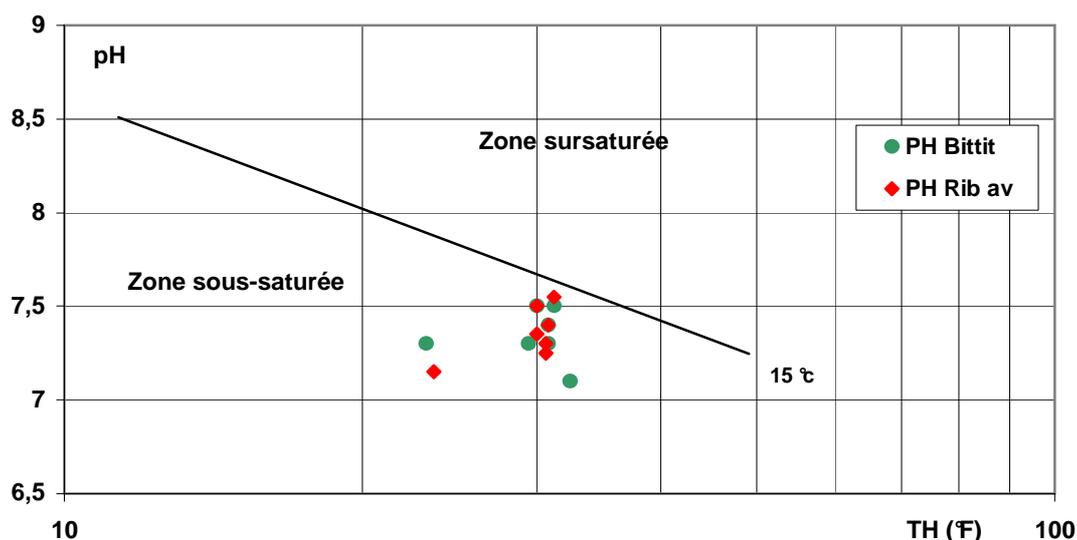


Figure 109 : Etat de saturation des eaux des sources Ribaa-Bittit. Diagramme d'équilibre (courbes de Roques)

3.3 – Variations saisonnières des paramètres physico-chimiques

3.3.1 – Variations mensuelles

La source Ribaa amont a été choisie pour représenter les variations saisonnières des différents paramètres physico-chimiques du groupe d'émergences karstiques Ribaa-Bittit. Le choix de cette source est justifié par la disponibilité d'un suivi d'une douzaine d'analyses au pas mensuel à bimensuel et ceci durant la période allant du mois d'octobre 1976 au mois d'avril 1978. Le tableau 35 regroupe les données moyennes et extrêmes et la figure 110 ci-après illustre les variations des différents paramètres de la source.

	Q (l/s)	Cond (µs/cm)	T (°c)	Ph (me/l)	K (me/l)	Na (me/l)	Ca (me/l)	Mg (me/l)	Cl (me/l)	HCO3 (me/l)	SO4 (me/l)
Min	710	385	15.0	7.2	0.01	0.11	0.80	2.60	0.20	4.00	0.00
Moy	889	539	16.0	7.7	0.02	0.46	1.56	3.98	0.60	5.04	0.39
Max	1105	720	16.8	8.1	0.05	1.25	2.25	5.25	1.50	7.00	1.40

Tableau 35 : Paramètres physico-chimiques de la source Ribaa amont (n = 12)

La variation des principaux paramètres de la source Ribaa amont à l'échelle mensuelle à bimensuelle (Fig. 110) suggère les remarques suivantes :

- **Pluie** : l'aquifère reçoit des apports significatifs depuis le mois d'octobre jusqu'au mois d'avril à mai ;
- **Débit** : la source réagit aux apports en fonction de leur importance et avec un certain délai. La pointe du débit est atteinte au mois de février 1977 (1105 l/s) suite aux fortes pluies de l'automne et de l'hiver. Par la suite, une longue période de tarissement est observée et elle dure jusqu'au mois de janvier 1978 (774 l/s) ;
- **PH** : sa variation est inférieure à 1 point et son évolution mensuelle est proche de celle de la conductivité. Il est donc influencé par les périodes d'apport et de l'étiage ;

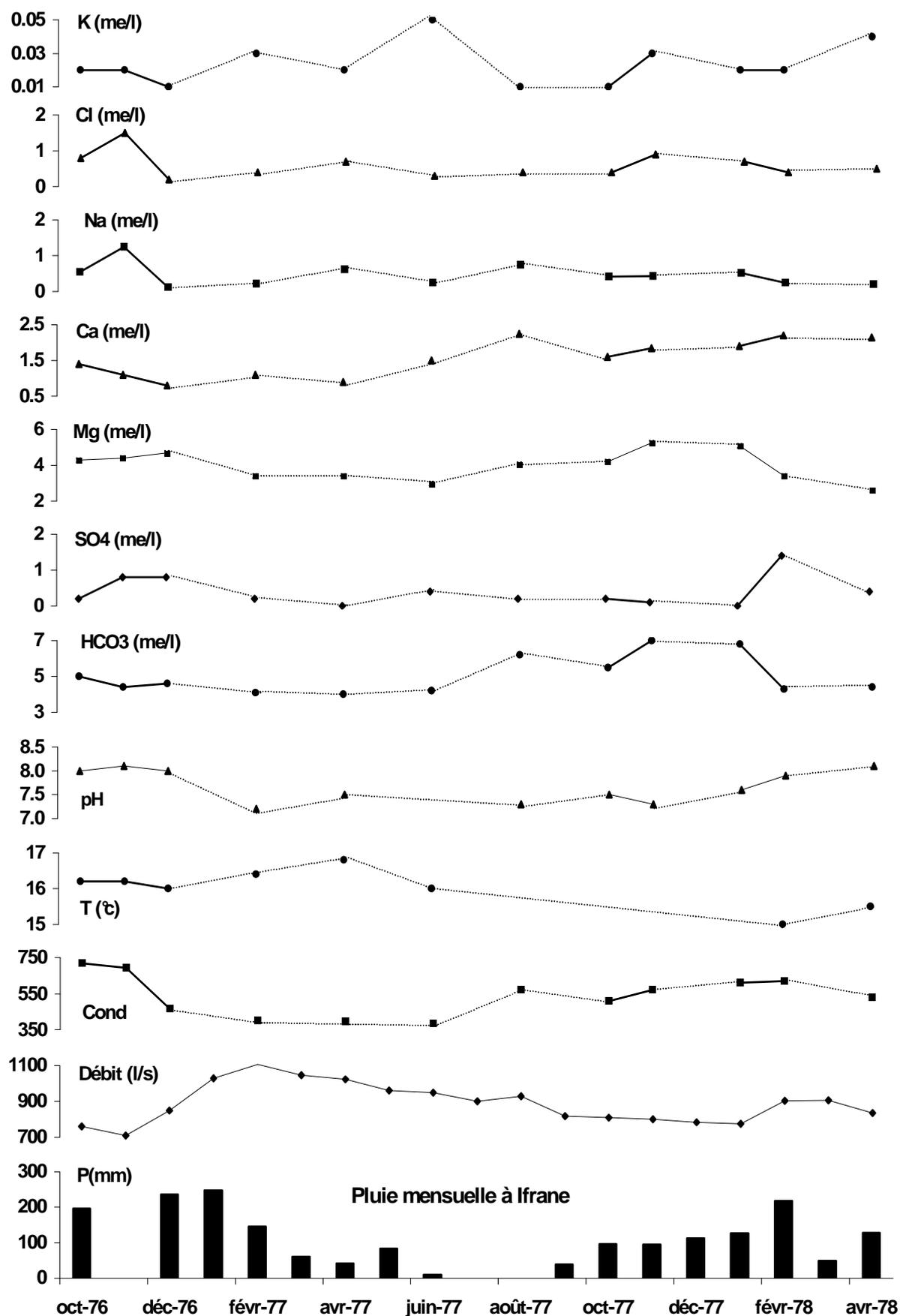


Figure 110 : Evolution des ions majeurs et de certains paramètres de l'eau de la source Ribaa amont

- **Conductivité** : l'augmentation du débit de la source à partir de novembre 1976 s'accompagne d'une baisse de la conductivité qui est importante et brusque au départ, puis plus modérée par la suite. A partir du mois de juin 1977 la conductivité marque une tendance régulière à la hausse. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que les apports pluvieux de l'hiver provoquent une chasse et une dilution de l'eau existante. Les premiers volumes d'eaux arrivés à l'exutoire correspondent à ceux des écoulements rapides dont le siège préférentiel sont les drains majeurs. Ces eaux n'ont pas eu le temps de faire des échanges avec l'encaissant et elles sont par conséquent peu minéralisées. En revanche, les eaux correspondant à l'écoulement retardé provenant des blocs et des micro-fissures, s'imprègnent mieux des conditions du milieu et se retrouvent à l'exutoire avec une minéralisation plus importante ;
- **Température** : sa variation montre que l'écart est de moins de 2 °c, ce qui reflète l'importance des réserves. Elle augmente légèrement à la suite d'une pluie intense et continue par effet de chasse, puis diminue en cours de tarissement. L'augmentation de température traduit l'arrivée des eaux de surface qui influence les réserves existantes ;
- **Ions majeurs** : en règle générale, les éléments de roches évacués par l'eau diminuent pendant la saison pluvieuse et jusqu'au mois de juin, pour augmenter par la suite et atteindre leur maximum en novembre-décembre. Dans le détail, les ions réagissent différemment en fonction de leur nature :
- **Calcium** : représente 13 % de la minéralisation de l'eau. Il marque parfois une évolution contraire à celle du magnésium (cycle hydrologique 1977/78) ;
- **Bicarbonates et magnésium** : représentent à eux seuls 75 % de la minéralisation de l'eau. Leurs concentrations diminuent en période des hautes eaux et augmentent en étiage ;
- **Chlorures, sodium, sulfates et potassium** : ils sont peu représentés dans les eaux de cette source karstique. Contrairement aux autres ions, leurs concentrations semblent augmenter avec les apports pluvieux, probablement en relation avec le lessivage des sols argileux par la pluie. Les concentrations baissent en étiage.

Les corrélations linéaires tentées deux à deux entre les ions majeurs ont montré deux relations significatives : Na-Cl et HCO₃-Mg avec respectivement un coefficient de corrélation de 0,83 et 0,74.

3.3.2 – Variations liées aux épisodes de turbidité

Après les grandes averses, les sources étudiées connaissent des épisodes de turbidité qui modifient la composition et la qualité de l'eau produite. Le tableau 36 ci-après regroupe les données de sept analyses physico-chimiques et bactériologiques détaillées de l'eau des deux sources captées en période normale, et une analyse effectuée lors de l'épisode de turbidité du mois de janvier 1996.

PARAMETRES	Source Bittit			Source Ribaa		
	Valeurs normales (n = 7)	Valeurs du 30/01/96	Variation	Valeurs normales (n = 7)	Valeurs du 30/01/96	Variation
Turbidité (NTU)	1 à 6	106	+ forte	1 à 2	94	+ forte
Température (°C)	15 à 18.6	15.2	Incluse	15 à 17	15.6	incluse
Conductivité (µs/cm)	485 à 540	405	+ faible	490 à 555	415	+ faible
PH au labo	7.1 à 7.5	7.3	Incluse	7.2 à 7.6	7.1	+ faible
RS à 105 °c (mg/l)	334 à 390	305	+ faible	335 à 352	305	+ faible
Silice SiO2 (mg/l)	5 à 11	16	+ forte	7 à 9	17	+ forte
TAC (°F)	28 à 31	21	+ faible	26 à 30	21	+ faible
TH (°F)	29 à 33	23	+ faible	30 à 33	24	+ faible
Na (mg/l)	6 à 8	5	+ faible	6 à 8	5	+ faible
K (mg/l)	0.8 à 0.9	1.5	+ fort	0.7 à 0.9	1.3	+ fort
Mg (mg/l)	32 à 38	19	+ faible	31 à 39	22	+ faible
Ca (mg/l)	61 à 74	61	Incluse	61 à 72	58	+ faible
Cl (mg/l)	10 à 18	9	+ faible	11 à 24	8	+ faible
NO3 (mg/l)	2 à 13	30	+ fort	7 à 13	25	+ fort
HCO3 (mg/l)	348 à 370	255	+ faible	315 à 370	260	+ faible
SO4 (mg/l)	8 à 20	5	+ faible	8 à 38	8	Incluse
Coliformes totaux /100 ml	0 à 2	1200	+ fort	0 à 2	500	+ fort
Coliformes fécaux /100 ml	0 à 10	10	Incluse	0 à 1	20	+ fort
Germes aéro-anaéro-facult/ml à 22 °c	6 à 840	3840	+ fort	6 à 1200	2940	+ fort
Germes aéro-anaéro-facult/ml à 37 °c	1 à 230	550	+ fort	0 à 60	290	+ fort
Spores anaéro-sulfito-rédu /100 ml	0 à 10	240	+ fort	1 à 10	220	+ fort

Tableau 36 : Variation des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des deux sources Ribaa et Bittit en période de turbidité

Ces résultats montrent que lors d'un épisode de turbidité on peut relever les points suivants :

- la minéralisation totale de l'eau diminue par un effet de dilution. Les eaux des averses provoquent des écoulements rapides dans les conduits principaux et arrivent à l'exutoire en échangeant peu avec l'encaissant carbonaté ;
- les teneurs en silice, en potassium et surtout en nitrates augmentent d'une manière significative, en relation avec le lessivage des formations en surface ;
- la contamination bactériologique est manifeste. Elle est probablement liée à l'activité de l'élevage de bétail qui s'opère au niveau du causse. D'ailleurs lors des grandes averses des branchages et des excréments de bétail sont recueillis à l'exutoire.

CHAPITRE 4 – APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES

4.1 - Généralités

Les isotopes du milieu sont devenus depuis quelques décades un véritable outil pour les études hydrologiques et hydrogéologiques et contribuent donc à la gestion durable des ressources en eau. Le présent chapitre synthétise les résultats et les interprétations des analyses isotopiques effectuées sur la plaine du Saïs. (Bichara et Louvat, 1990 ; Sinan, 1992 ; Michelot et al., 1992 ; Rhaouti, 1996).

4.2 - Analyses isotopiques réalisées au niveau de la plaine du Saïs

Les analyses isotopiques réalisées au niveau de la plaine du Saïs avaient pour objectif l'étude de la relation hydraulique existant entre la nappe superficielle et la nappe profonde, et la détermination du taux de participation de cette dernière à l'écoulement des sources de la plaine. Les résultats devaient être comparés à ceux déduits du modèle de gestion des nappes du bassin de Fès-Méknès (Mac Donald, 1990). Pour ceci, trois campagnes de prélèvements d'échantillons d'eau ont été réalisées respectivement en février 1988 (Bichara et Louvat, 1990), en avril et en octobre 1990 (Sinan 1992). Seize points d'eau ont été échantillonnés (10 sources et 6 forages profonds), et les analyses effectuées comprenaient : le Deutérium (^2H), l'Oxygène 18 (^{18}O) et le Tritium (^3H). La figure 111 montre la situation des points d'eau analysés dans la plaine du Saïs :

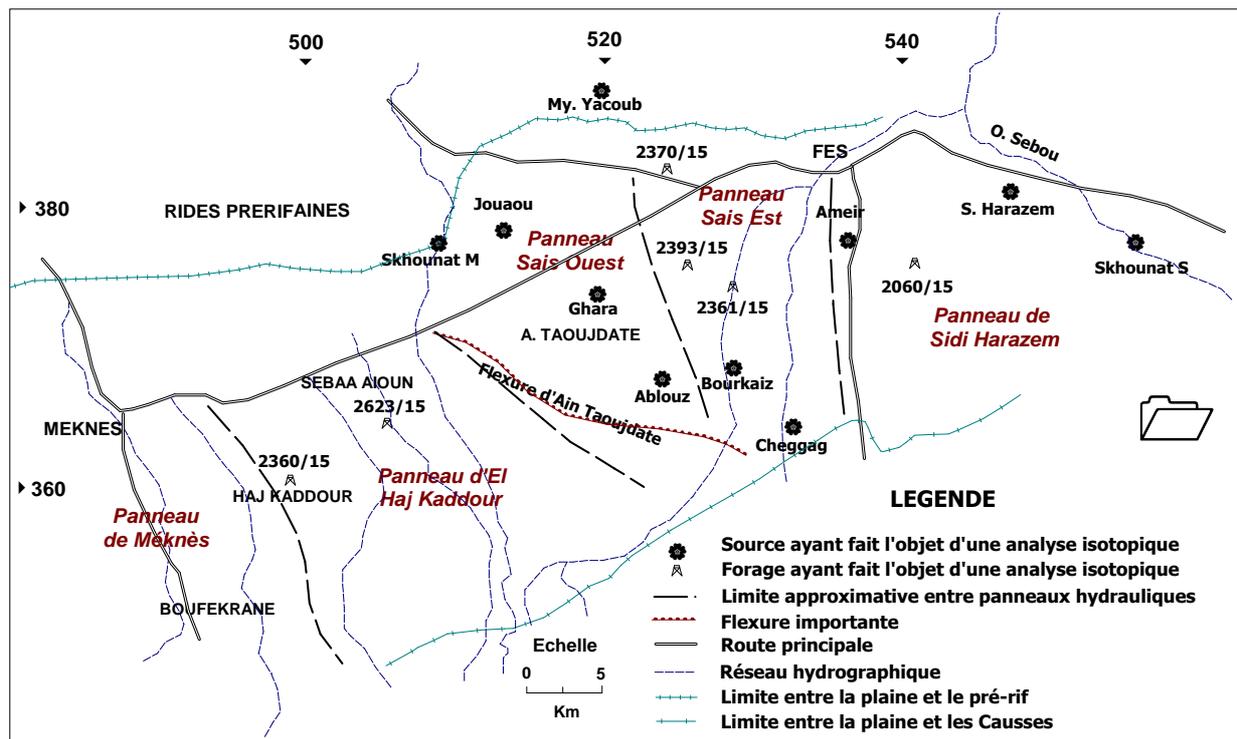


Figure 111 : Report des points d'eau ayant fait l'objet d'analyses isotopiques au niveau de la plaine de Méknès-Fès

4.3 – Méthodologie

La méthode adoptée (Michelot et al., 1992) était fondée sur l'utilisation d'un bilan de mélange isotopique (détails en annexe).

4.4 - Principaux résultats déduits des analyses isotopiques

* **Relation Oxygène-18 – Deutérium** : la figure 112 montre que les différents points d'eau analysés s'alignent à proximité de la droite mondiale des précipitations d'origine océanique (Craig, 1961). On peut relever un certain décalage dans les teneurs en deutérium entre les prélèvements d'octobre d'une part, et ceux de février et d'avril d'autre part. Ce décalage serait dû à un effet saisonnier et ou à une différence de calibrage entre les laboratoires qui ont effectué les analyses.

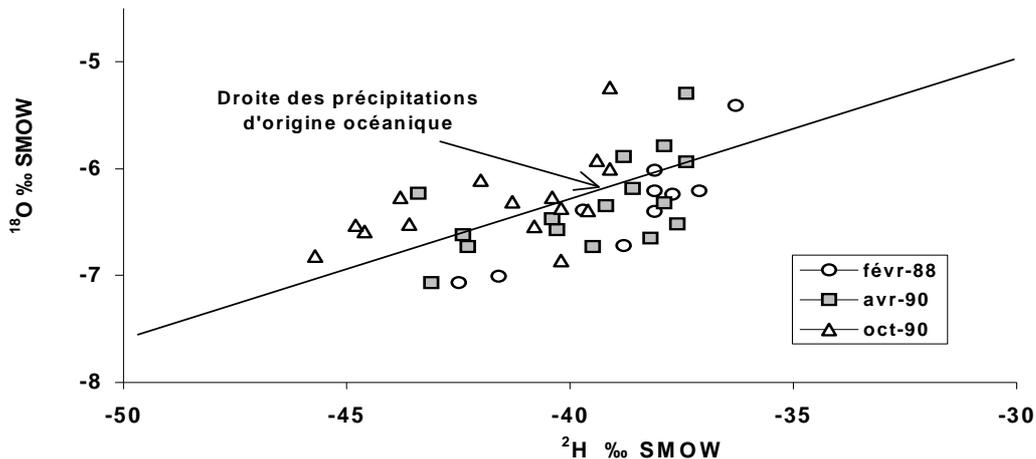


Figure 112 : Relation entre les teneurs en oxygène-18 et les teneurs en deutérium dans les eaux de la plaine du Saïs

* **Résultats des Bilans en ^{18}O et en ^3H** : les teneurs isotopiques des eaux des sources et des forages de la plaine du Saïs varient selon un large éventail (Tableau en annexe). Ils s'échelonnent entre - 7 et - 5 (‰ S.M.O.W) pour l' ^{18}O , de - 36 à - 46 (‰ S.M.O.W) pour le deutérium et de 0 à 11 (U.T.) pour le tritium. Les principaux résultats fournis par les bilans isotopiques peuvent être résumés comme suit :

- Les sources du bassin du Saïs sont alimentées conjointement par l'aquifère liasique profond et par la nappe superficielle. Le taux de participation de la nappe profonde varie de 50 % (Aïn Bourkais) à 100 % (Aïn Skhounat M'Haya et Sidi Harazem).
- Les résultats des bilans isotopiques sont plus ou moins concordants avec ceux du dernier modèle hydraulique de la nappe. Pour cinq sources les estimations s'accordent de façon très satisfaisante et pour quatre sources l'accord peut être qualifié de correct. Pour la source Aïn Skhounat Sebou, située en dehors du bassin, le bilan calculé d'après les teneurs en ^{18}O et en ^3H donne un taux de participation du Lias qui varie entre 50 et 100 %, alors que le modèle hydraulique calcule une participation nulle, ce qui est aberrant compte tenu de la température (25 °c) et de la régularité du débit de l'émergence.
- Dans la partie Nord du panneau de Saïs, les teneurs relativement élevées en ^{18}O , la forte température et la richesse en sulfates (> 30 mg/l), suggèrent une aire d'alimentation de l'aquifère profond moins haute, qui pourrait correspondre au Rif (Bichara et Louvat, 1990). L'existence d'apports significatifs d'eaux précipitées sur le Rif et transitant par le Trias où elles se chargent en sulfates est probable. Cette hypothèse nécessite une confirmation par des analyses isotopiques complémentaires et par une piézométrie détaillée dans ce secteur.

SYNTHESE DE LA CINQUIEME PARTIE

Les données hydrochimiques des eaux du Lias relevées sur les fiches de forages ou fournies par la régie qui produit et distribue l'eau des sources, ont permis de se faire une idée assez précise sur la qualité chimique de ces eaux et de son évolution aussi bien spatiale que temporelle. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- La température de l'eau du Lias varie de 12 °c en amont au niveau de la ville d'Ifrane à plus de 45 °c en aval en s'approchant des rides pré-rifaines. Cette augmentation de température du SE au NW est liée à l'approfondissement progressif de la nappe qui se met de plus en plus en charge vers l'aval. L'évolution de température s'effectue d'une manière irrégulière, traduisant une certaine complexité structurale du magasin liasique, confirmée par les résultats des reconnaissances géophysiques et par les données de forages.
- A l'échelle de l'aquifère, l'eau est généralement douce puisque 88.5 % des eaux présentent une conductivité inférieure à 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Seulement 3.7 % des eaux ont une conductivité qui dépasse 3000 $\mu\text{s}/\text{cm}$, et cette forte minéralisation est à mettre en liaison avec une contamination par le substratum triasique salifère, ou bien avec la forte température en profondeur qui favorise les échanges entre l'eau et l'encaissant.
- Le faciès des eaux du Lias est bicarbonaté magnésien, caractéristique des aquifères carbonatés de nature à prédominance dolomitique. Le rapport Ca/Mg est toujours inférieur à 1, la dureté de l'eau est moyenne et avoisine 30 °F. Les nitrates sont peu représentés dans les eaux et les teneurs en chlorures, en sodium et en sulfates augmentent d'une manière significative entre l'amont et l'aval.
- Les émergences du complexe Ribaa-Bittit situées en bordure du Causse peuvent être classées parmi les sources froides, à température peu variable, ce qui reflète l'importance des réserves. Les eaux sont douces avec un résidu sec ne dépassant pas 360 mg/l et le faciès est bicarbonaté magnésien (Lmir fait exception avec une eau plus chargée et un faciès chloruré sodique).
- Les eaux des émergences peuvent être rencontrées à différents stades de saturation. L'état initial du système, le mode d'écoulement, l'importance, et la répartition des apports conditionnent l'état de saturation des eaux. Après les grandes averses, les eaux sont sous-saturées car l'écoulement est rapide, le contact entre l'eau et le terrain est réduit et le dégazage est faible, ce qui rend l'eau agressive et apte à dissoudre les carbonates. En revanche en étiage, le phénomène inverse se produit.
- Les concentrations en bicarbonates et en magnésium (75 % de la minéralisation totale de l'eau) diminuent en période des hautes eaux (effet de dilution) et augmentent en étiage (effet de dissolution et d'évaporation). Contrairement aux ions dominants, et en raison du lessivage des sols argileux, les concentrations en chlorures, en sodium, en sulfates et en potassium semblent augmenter avec les apports pluvieux.

- Lors d'un épisode de turbidité, on note une réduction de la minéralisation totale (dilution), une augmentation des teneurs en silice, en potassium et surtout en nitrates (lessivage en surface), et une contamination bactériologique liée à l'élevage de bétail sur le Causse.
- Les analyses isotopiques pratiquées dans la plaine du Saïs ont montré que les teneurs isotopiques des eaux s'échelonnent de - 7 à - 5 (‰ S.M.O.W) pour l' ^{18}O , de - 36 à - 46 (‰ S.M.O.W) pour le deutérium et de 0 à 11 (U.T.) pour le tritium. Les bilans isotopiques en ^{18}O et en ^3H ont permis d'estimer entre 50 et 100 % la contribution de la nappe profonde du Lias à l'alimentation des sources du bassin du Saïs. En excluant la source Aïn Skhounat Sebou, les résultats obtenus sont concordants avec ceux du modèle hydraulique de la nappe (Mac Donald, 1990). L'existence d'apports significatifs d'eaux précipitées sur le Rif et transitant par le Trias dans le panneau « Saïs » est probable et reste à confirmer.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

I - SYNTHÈSE GENERALE

La méthodologie adoptée dans ce travail de recherche a été appliquée à l'aquifère karstique profond du Lias, qui regroupe une zone montagneuse représentée par les Causses du Moyen Atlas tabulaire, et la plaine adjacente du Saïs avec laquelle elle est en liaison hydraulique. Le secteur d'étude qui couvre une superficie d'environ 4200 km² recèle des ressources en eau relativement importantes, et dispose d'une base de données considérable et variée, acquise durant plusieurs décennies à travers les travaux de prospection, de suivi et d'exploitation.

La ressource en eau profonde de cette région est très sollicitée pour satisfaire les besoins, notamment domestiques (2 millions d'habitants) et agricoles. Elle constitue un facteur déterminant pour le développement économique et social. Une longue période de sécheresse couplée à la surexploitation, a rendu urgent le recours à une gestion appropriée de la ressource en eau aussi bien sur le plan quantitatif que qualitatif. Ceci nécessite au préalable une bonne connaissance du fonctionnement de cet aquifère profond.

L'ensemble de l'information recueillie sur le secteur d'étude a été trié, organisé, stocké et représenté le plus souvent sur des supports cartographiques. Les résultats scientifiques et pratiques obtenus au terme de ce travail de recherche peuvent être synthétisés comme suit :

CONTEXTE GENERAL

Le Causse est constitué de roches dolomitiques et calcaires du Lias. Il se caractérise par une structure tabulaire faillée à relief monotone. Les systèmes de failles créent des cuvettes et des horsts et les phénomènes karstiques sont mal développés. La plaine du Saïs quant à elle, est affectée de flexures qui engendrent une structuration topographique en paliers basculés avec un regard le plus souvent NW.

Il pleut abondamment sur le Causse (980 mm à Ifrane) et modérément sur la plaine (560 mm à Méknès). A l'échelle inter-annuelle, les pluies sont irrégulières et une sécheresse perdure depuis 1981. Les températures moyennes marquent 10.9 °c à Ifrane et 17.3 °c à Méknès. La pluie efficace moyenne sur le Causse a été estimée à un taux de 40 %. Le réseau hydrographique est peu développé sur le Causse, et il est le plus souvent, à régime temporaire. L'oued Tizguit constitue certainement une des formes d'alimentation des sources du complexe Ribaa-Bittit.

GEOLOGIE ET GEOPHYSIQUE

La synthèse géologique a permis de situer l'aquifère étudié dans son contexte lithologique et structural régional. Sur le Causse, les faciès sont essentiellement carbonatés d'âge mésozoïque, alors que le bassin est considéré comme un vaste synclinal à remplissage tertiaire, s'enfonçant du Sud vers le Nord et se redressant au contact des rides pré-rifaines.

L'étude structurale a montré que l'histoire géologique du bassin de Saïs s'intègre dans l'évolution des domaines montagneux encadrants, en particulier celle du domaine rifain. Trois phases tectono-sédimentaires allant du Tortonien au Plio-quaternaire ont été distinguées. L'analyse de la fracturation a montré que les directions orthogonales N45° et N145° peuvent être considérées comme les principales directions de fracturation de la région. Ces orientations relevées sur le Causse d'El Hajeb-Ifrane se retrouvent dans le domaine rifain et au niveau du bassin de Saïs. L'examen de la tectonique quaternaire a montré que cette dernière est à l'origine de la morphologie actuelle du bassin du Saïs, et que cette activité tectonique se manifeste aussi bien dans ses bordures nord et sud, qu'à l'intérieur du bassin.

La synthèse des reconnaissances géophysiques du bassin du Saïs a permis de préciser la structure de la plaine, et d'apporter une bonne connaissance sur la géométrie des aquifères superficiel et profond. Les reconnaissances ont montré que les terrains dolomitiques du Lias qui affleurent sur le Causse, s'enfoncent vers le Nord, en une série de gradins limités par des accidents sub-verticaux de direction SW-NE.

HYDROGEOLOGIE DU LIAS

L'aquifère profond du Lias se développe au niveau des formations carbonatées à prédominance dolomitique. La nappe est libre sur le Causse et devient captive au niveau de la plaine. Elle se recharge à partir des précipitations pluviales et nivales tombant sur le Causse. Le substratum de la nappe est constitué par les terrains triasiques, alors que le couvercle imperméable est formé par une épaisse assise marneuse du Miocène.

Un Système d'Information Géographique (SIG) a été élaboré. Il englobe l'essentiel des données acquises depuis plusieurs décennies concernant les ressources en eau de la région. Ce SIG est constitué par deux grandes bases de données qui sont liées et qui se complètent mutuellement : une base des données spatiales contenant les documents cartographiques, et une base des données thématiques qui repose sur un inventaire de plus de 400 forages. Le SIG élaboré pour la région du Saïs constitue un véritable outil d'aide à la prise de décision pour les gestionnaires des ressources en eau du bassin de Sebou. En effet, les réponses aux requêtes fréquemment formulées par les différents utilisateurs de l'eau souterraine sont immédiates et peuvent être présentées sous forme graphique et/ou cartographique. La base de données pourra être actualisée et alimentée régulièrement avec de nouvelles informations recueillies dans l'avenir sur l'aquifère du Lias. Ce SIG permettra également de préparer la réalisation d'un modèle de gestion de la nappe, en fournissant les données nécessaires, notamment celles relatives à la géométrie du réservoir, aux paramètres hydrodynamiques, à la piézométrie, etc..

L'exploitation du SIG du Saïs en mode vecteur a été faite avec le logiciel MapInfo, et elle a permis d'élaborer un certain nombre de cartes, soit structurales (profondeur et toit du Trias ; profondeur, toit et épaisseur du Lias et du Miocène), soit hydrodynamiques (piézométrie, transmissivités, débits d'exploitation, artésianisme). Ces cartes ont permis de préciser la géométrie de l'aquifère et les modalités de l'écoulement de la nappe profonde du Lias.

L'essai de bilan de l'aquifère liasique tenté pour l'année 2002 a permis d'estimer les entrées à 291 et les sorties à 378 Millions de m³/an. Le déficit annuel relevé est donc de l'ordre de 87 Millions de m³/an. Ce déficit se manifeste actuellement par une forte baisse du niveau de la nappe (1.5 à 3 m/an), une réduction de la pression des ouvrages artésiens et une baisse des débits voire un tarissement des émergences.

HYDRODYNAMIQUE DES SOURCES

Le suivi des débits des exutoires du complexe Ribaa-Bittit depuis 1975 et l'étude de leurs conditions d'émergence, ont permis leur regroupement en trois classes : les sources de débordement (Bittit, Ribaa et Sebaa), les sources de trop plein (Attrous, Aguemguem et Si Lmir), et les sources d'émergence de la nappe plio-quadernaire (Hijja ..). Toutes les sources ont été affectées par la sécheresse : les sources de débordement marquent une tendance baissière régulière, celles de trop plein sont à régime temporaire, et les sources d'émergence sont actuellement à l'arrêt.

Les résultats obtenus par les différentes méthodes du traitement du signal (débits classés, récession et analyses corrélatoires et spectrales) sont cohérents entre eux et permettent une meilleure compréhension du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique du Lias.

Les courbes des débits classés des principales sources ont montré une évolution des débits aux émergences suivant trois à quatre lois d'écoulement distinctes. Durant la décrue, la source Bittit (débit moyen inter-annuel = 1.4 m³/s) semble se comporter d'une manière inverse de celle des sources Ribaa, en raison probablement de sa position privilégiée et de l'importance de son réservoir. La sécheresse a eu pour conséquence une baisse des apports aux sources et une réduction de l'aire d'alimentation.

L'analyse des courbes de récession a permis de mieux comprendre le mode de fonctionnement des principales sources. Les coefficients de tarissement sont faibles (10^{-3} à 10^{-4} j⁻¹) traduisant la vidange lente des réserves et par conséquent, la tendance au stockage. La décrue est généralement étalée (34 à 135 jours selon les sources) et témoigne d'une réponse retardée au signal d'entrée représenté par la pluie. La source Bittit offre un système hydrogéologique étendu et complexe, et le volume d'eau soutenant le tarissement est très important (907 Mm³ en 1996). Ceci implique un immense réservoir et place cet aquifère parmi les domaines peu karstifiés. Les dolomies sableuses constitueraient un système poreux à pouvoir régulateur très élevé. Malgré la richesse de l'aquifère, l'effet de la sécheresse sur le système a été significatif, et le volume moyen annuel perdu par la source Bittit entre 1977 et 1996 a été estimé à 9.4 Mm³.

L'application des analyses corrélatoires et spectrales aux chroniques des débits des sources Ribaa et Bittit a montré que d'une part, le système module le signal d'entrée, et que d'autre part, il dispose d'un important effet mémoire (37 à 74 jours) qui est en relation avec le rôle régulateur des réserves. La bande spectrale est étroite (0.11 à 0.14) et le temps de régulation varie de 35 à 57 jours.

La différence de comportement du système entre une période à pluviométrie normale et une période de sécheresse, a permis de souligner l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques, et de montrer l'influence significative de leur état de saturation sur les relations entrées-sorties. L'analyse croisée pluie-débit a confirmé : l'important pouvoir régulateur du système, l'alimentation par infiltration retardée, le grand retard de réponse à la pluie, le faible développement de la karstification et la grande capacité du karst à emmagasiner des réserves.

Les différentes méthodes hydrodynamiques utilisées montrent que le système hydrogéologique étudié est très capacitif : stockage important, débit régulé et soutenu durant toute l'année, écoulement relativement lent à cause de la présence à la base d'une assise de dolomies sableuses et karstification peu développée. Cependant malgré la grande capacité de réserve de cet aquifère karstique, le débit à l'exutoire marque une tendance régulière et significative à la baisse due à une longue période de sécheresse qui réduit considérablement l'alimentation de l'aquifère.

L'analyse corrélatoire et spectrale a été appliquée aux données de la turbidité suivie depuis décembre 1995. Les résultats ont montré que l'apparition de la turbidité à l'exutoire n'est pas corrélée avec le débit. Une relation causale entre la pluie et l'apparition de la turbidité sous forme de vagues a été mise en évidence, on en déduit que la turbidité est liée aux conditions hydrodynamiques dans le karst. Les écoulements rapides turbulents ayant lieu dans les conduits karstiques transmissifs à la suite de fortes averses causeraient la mise en suspension des particules déposées dans les conduits et leur transport vers les exutoires. Une origine externe a aussi été envisagée, par l'infiltration d'eaux chargées en matières en suspension lessivées à la surface des bassins.

HYDROCHIMIE

Les données hydrochimiques des eaux du Lias ont permis une caractérisation de la qualité chimique de ces eaux et de son évolution aussi bien spatiale que temporelle. A l'échelle de l'aquifère, l'eau est généralement douce (88.5 % des eaux présentent une conductivité inférieure à 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$). Le faciès des eaux du Lias est bicarbonaté magnésien, caractéristique des aquifères dolomitiques. La dureté de l'eau avoisine 30 °F. Les nitrates sont peu représentés dans les eaux et les teneurs en Cl, en Na et en SO_4 augmentent entre l'amont et l'aval.

L'augmentation de la température de l'eau du SE (12°C) vers le NW (45°C) est liée à l'approfondissement progressif de la nappe vers l'aval. L'évolution de la température s'effectue d'une manière irrégulière, traduisant une certaine complexité structurale du magasin liasique, confirmée par les résultats des reconnaissances géophysiques et par les données de forages.

Les émergences du complexe Ribaa-Bittit situées en bordure du Causse peuvent être classées parmi les sources froides, à température peu variable, ce qui reflète l'importance des réserves. Les eaux sont douces avec un résidu sec ne dépassant pas 360 mg/l et le faciès est bicarbonaté magnésien (Si Lmir fait exception avec une eau plus chargée et un faciès chloruré sodique).

Les eaux des émergences peuvent être rencontrées à différents stades de saturation. Cette dernière est conditionnée par : l'état initial du système, le mode d'écoulement, l'importance et la répartition des apports. Après les grandes averses, les eaux sont sous-saturées car l'écoulement est rapide, le contact entre l'eau et le terrain est réduit et le dégazage est faible, ce qui rend l'eau agressive et apte à dissoudre les carbonates. En revanche en étiage, le phénomène inverse se produit.

Les concentrations en bicarbonates et en magnésium (75 % de la minéralisation totale de l'eau) diminuent en période des hautes eaux (effet de dilution) et augmentent en étiage (effet de dissolution et d'évaporation). Contrairement aux ions dominants, et en raison du lessivage des sols argileux, les concentrations en Cl, en Na, en SO₄ et en K semblent augmenter avec les précipitations. Lors d'un épisode de turbidité, on note une réduction de la minéralisation totale (dilution), une augmentation des teneurs en silice, en potassium et surtout en nitrates (lessivage en surface), et une contamination bactériologique liée à l'élevage de bétail sur le Causse.

Les analyses isotopiques pratiquées dans la plaine du Saïs ont montré que les teneurs isotopiques des eaux s'échelonnent de - 7 à - 5 (‰ S.M.O.W) pour l'¹⁸O, de - 36 à - 46 (‰ S.M.O.W) pour le deutérium et de 0 à 11 (U.T.) pour le tritium. Les bilans isotopiques en ¹⁸O et en ³H ont permis d'estimer entre 50 et 100 % la contribution de la nappe profonde du Lias à l'alimentation des sources du bassin du Saïs. En excluant la source Ain Skhounat Sebou, les résultats obtenus sont concordants avec ceux du modèle hydraulique de la nappe (Mac Donald, 1990). L'existence d'apports significatifs d'eaux précipitées sur le Rif et transitant par le Trias dans le panneau « Saïs » est probable et reste à confirmer.

II – PERSPECTIVES

Au terme de ce travail de recherche portant sur l'aquifère karstique profond de la région du Saïs, une meilleure connaissance de la géométrie et du fonctionnement hydrodynamique de la nappe a été acquise. Néanmoins, ce travail reste perfectible sur un certain nombre de points, moyennant la mise à disposition de moyens supplémentaires, notamment d'investigation de terrain, d'échantillonnage, d'analyse et d'outils informatiques de traitement des données. Les points suivants représentent des orientations de recherche, qui pourraient être suivies et approfondies, en vue de compléter la réflexion sur le mode de fonctionnement de ce type d'aquifère.

L'AIRE D'ETUDE

Sur le plan géographique, l'aire d'étude pourra être élargie pour intégrer toute la superficie du Causse Moyen Atlasique tabulaire, dont la limite orientale correspond à l'accident de Tizi N'Tretten (Fig. 22). De cette manière, les Causses d'Imouzzet et de Sefrou seront également étudiés, et leur contribution à l'alimentation de la plaine du Saïs sera mieux appréciée. Les modalités d'écoulement de toute la partie montagneuse seront également précisées.

EXPLOITATION DU SIG DU SAÏS EN MODE RASTER

Les différents documents cartographiques réalisés dans ce travail de recherche ont exploité le SIG en mode vecteur avec le logiciel MapInfo. L'exploitation du SIG en mode raster, grâce à des logiciels tel que ArcView ou ArcInfo, permet de caractériser la variation spatiale des paramètres et d'effectuer des calculs entre les différentes couches du SIG. Ainsi, par exemple, la carte de vulnérabilité de la nappe pourra être élaborée à partir de plusieurs couches d'information relatives au sol, à la recharge et à la zone non saturée. C'est le cas également de la carte des potentialités en eau souterraine, qui combinera les secteurs de productivités et ceux de la qualité de l'eau.

GEOSTATISTIQUE

Le recours à la géostatistique s'avère indispensable pour estimer de façon optimale le champ des différents paramètres, qu'ils soient géométriques ou bien hydrodynamiques, à l'échelle de l'aquifère. Ceci facilitera le passage d'une phase de collecte, de traitement et de représentation cartographique de l'information, à une phase de modélisation et de gestion optimale de la ressource en eau souterraine de la nappe liasique.

MODELE GLOBAL A RESERVOIRS

En vue de se faire une idée plus précise sur l'organisation interne du réservoir karstique du Lias du Causse, et d'estimer plus précisément la contribution du plateau carbonaté à l'alimentation de la plaine, il serait intéressant de reprendre le modèle global à réservoir effectué (Benjbara, Rhaouti, 1989). Le calage sera tenté cette fois-ci sur une période longue d'une trentaine d'années avec des périodes contrastées du point de vue des apports pluviométriques. Si le calage s'avère satisfaisant, le modèle servira d'outil de gestion et de prévision de l'écoulement des émergences, chose d'autant plus importante que deux sources sont captées pour alimenter une grande ville en eau potable.

PROBLEME DE LA TURBIDITE

Le problème de la turbidité affectant les sources karstiques après les grandes averses a été traité dans ce travail de recherche. Des approches nouvelles apporteront probablement un complément d'information fort utile pour la compréhension du phénomène :

* Des traçages effectués sur le karst permettront de déterminer l'extension du bassin d'alimentation des sources et les vitesses de circulation des eaux souterraines dans le massif. Les résultats pourront être comparés à ceux obtenus avec les autres méthodes de traitement du signal (débits classés, récession, analyse corrélatoire et spectrale), et permettront également d'estimer le temps de transfert d'une éventuelle pollution accidentelle, qui pourrait rendre l'eau des sources captées, impropre à la consommation ;

* L'analyse minéralogique et micro-granulométrique comparée des argiles rouges recueillies au niveau des sources d'une part, et à proximité des points absorbants d'autre part, pourrait renseigner sur l'origine externe, interne ou mixte des troubles occasionnels dans l'eau ;

* On dispose depuis décembre 1995 d'un suivi journalier de la turbidité sur deux sources. D'un autre côté, les pluies journalières dans la région et les relevés des débits journaliers des sources sont disponibles. Ces données pourraient être exploitées pour procéder à une analyse corrélatrice et spectrale combinant les trois paramètres et ceci sur une période de plus de huit ans. Les résultats de cette analyse qui sera réalisée à moyen terme avec un pas de temps journalier, confirmerait probablement les résultats déjà obtenus à court terme (deux cycles hydrologiques), mais pourrait apporter des éléments nouveaux quant au fonctionnement d'un système soumis à une irrégularité des apports d'un cycle à un autre.

ANALYSES ISOTOPIQUES

Les analyses isotopiques réalisées au niveau de la plaine du Saïs ont permis l'étude de la relation hydraulique existant entre la nappe superficielle et la nappe profonde, et la détermination du taux de participation de cette dernière à l'écoulement des sources de la plaine. Les techniques isotopiques peuvent être appliquées de nouveau dans la région, pour affiner les connaissances déjà acquises, et pour apporter des informations essentielles, parfois inaccessibles par les moyens d'investigation classiques (piézométrie, essais par pompage, hydrochimie, etc...).

Ces techniques sont particulièrement adaptées aux régions caractérisées par de rapides et importantes variations d'altitudes et/ou soumises à des conditions climatiques très marquées, tel est le cas au niveau de la région du Saïs. Les exemples d'application de ces méthodes isotopiques sont nombreux, on citera de manière exhaustive : les modalités de recharge des nappes (isotopes stables : ^2H , ^{18}O et ^{13}C), les traçages naturels, la datation des eaux par les isotopes radioactifs (^{14}C , ^3H , etc..), la détermination de l'origine de la salinité des eaux, l'évaluation des relations entre les cours d'eau et les nappes souterraines (cas de l'oued Tizguit qui perd une grande partie de son débit le long de son trajet dans le Causse)...

ANNEXES

Annexe 1 : ARTICLE HSJ 2003

Annexe 2 : ARTICLE CRAS 2004

Annexe 3 : CLIMATOLOGIE

Annexe 4 : IVENTAIRE DES FORAGES PROFONDS

Annexe 5 : ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Annexe 6 : METHODES DU TRAITEMENT DU SIGNAL

Annexe 7 : APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES

Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco)

F. AMRAOUI

Hydrogeology Laboratory, Faculty of Science Ain Chock, Hassan II University, BP 5366 Maarif, Casablanca, Morocco

M. RAZACK

Hydrogeology Department UMR 6532, University of Poitiers, 40 avenue du Recteur Pineau, F-86022 Poitiers Cedex, France

moumtaz.razack@hydrasa.univ-poitiers.fr

L. BOUCHAOU

Applied Geology and Geo-environment Laboratory, Faculty of Science, Ibn Zohr University, BP 28/5, 80000 Agadir, Morocco

Abstract The identification of the turbidity mechanisms in two karstic springs (Ribaa and Bittit) located in the Middle Atlas Plateau in Morocco was performed by means of correlation and spectral analyses applied to time series of rainfall, flow rates, and turbidity. Time series analyses of rainfall and discharges revealed high inertia and storage capacities of the karstic systems. However, the occurrence of turbidity in the springs proved independent of discharges. A causal relationship between rainfall and the occurrence of turbidity in the form of waves was established. Accordingly, turbidity was assumed to be related to the hydrodynamic conditions prevailing in the karst. Turbulent quickflows in the karst transmissive conduits, following heavy rainfall, are thought to provoke the resuspension of solid particles deposited in the conduits, as well as their transport towards outlets. An external origin has also been contemplated, concerning infiltration waters may be loaded with suspended matters washed from the watershed.

Key words karstic spring; turbidity; correlation analysis; spectral analysis; Middle Atlas, Morocco

Dynamique de la turbidité dans les systèmes karstiques. Exemples des sources de Ribaa et Bittit dans le Moyen Atlas (Maroc)

Résumé Les chroniques de pluie, de débit et de turbidité ont été analysées à l'aide de méthodes corrélatoires et spectrales pour identifier les mécanismes de déclenchement de la turbidité de deux sources karstiques du plateau du Moyen Atlas marocain (Ribaa et Bittit). Les analyses des séries de pluie et de débit ont montré que les systèmes sont inertiels avec des réserves importantes. Par ailleurs, l'apparition de la turbidité n'est pas corrélée avec le débit. Une relation causale entre la pluie et l'apparition de la turbidité sous forme de vagues a été mise en évidence. On en déduit que la turbidité est liée aux conditions hydrodynamiques dans le karst. Les écoulements rapides turbulents ayant lieu dans les conduits karstiques transmissifs à la suite de fortes averses causeraient la mise en suspension des particules déposées dans les conduits et leur transport vers les exutoires. Une origine externe a aussi été envisagée, par l'infiltration d'eaux chargées en matières en suspension lessivées à la surface des bassins.

Mots clés sources karstiques; turbidité; analyse corrélatoire; analyse spectrale; Moyen Atlas, Maroc

INTRODUCTION

The Sais plain is one of Morocco's major agricultural zones. Its water resources are provided mainly by a karstic aquifer, the Liassic aquifer of the Middle Atlas Plateau

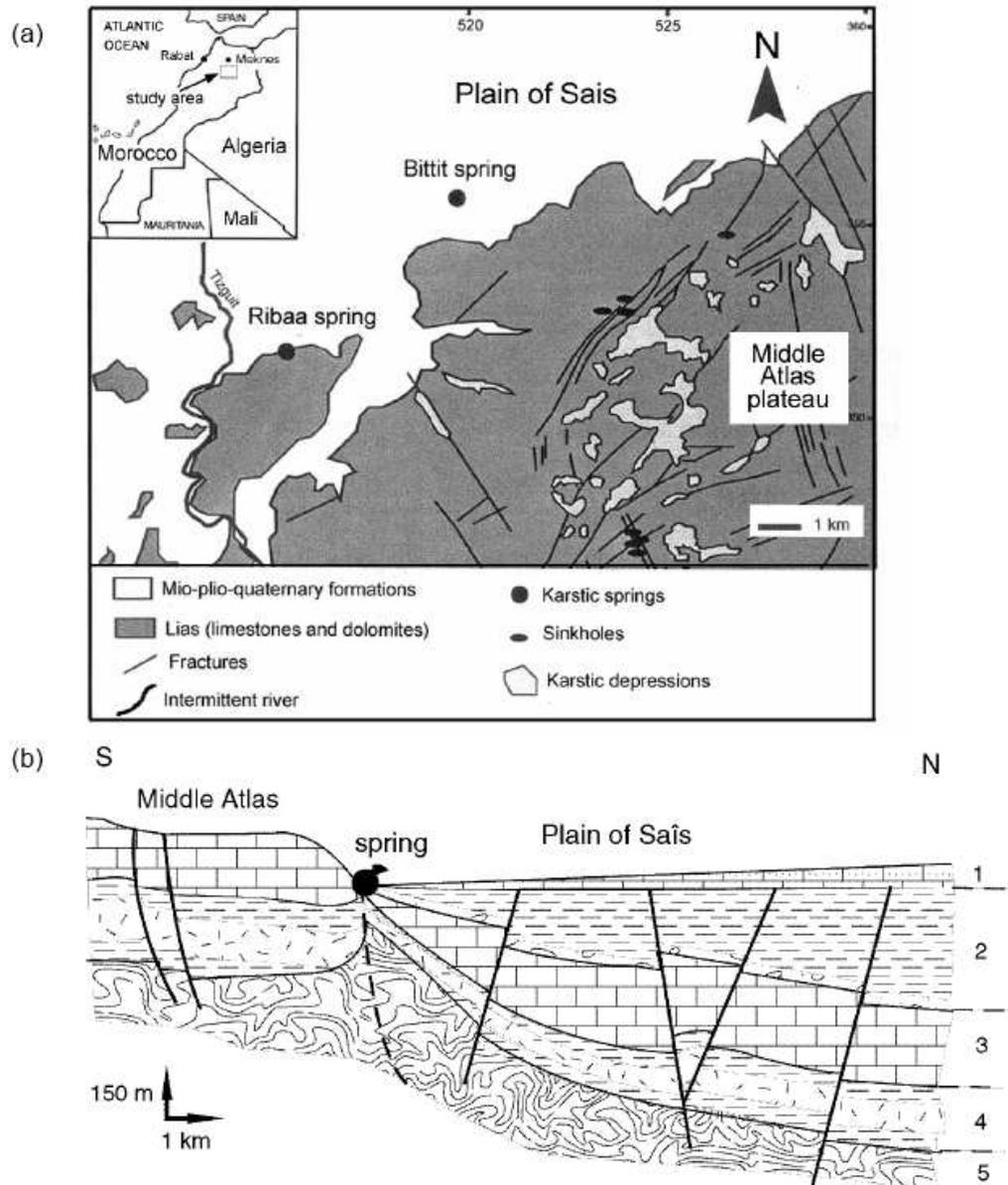


Fig. 1 Location of the Ribaa and Bittit karstic springs along the northern border of the Middle Atlas Plateau. (a): geological map; and (b) schematic S–N cross-section. 1: Plio-quaternary formations; 2: Miocene; 3: Liassic; 4: Triassic; 5: Paleozoic.

(Fig. 1(a)). The plateau is partly drained by the Ribaa and Bittit springs. These two springs are currently exploited to supply the town of Méknès with drinking water. The spring waters are generally of good quality. However, in rainfall periods, water quality is impaired due to a strong turbidity. This phenomenon is well known in karstic springs (Atteia & Kozel, 1997; McCarthy & Schevenell, 1998) and can make water unfit for consumption.

The studies undertaken to better understand the turbidity mechanisms are in fact very recent (Atteia & Kozel, 1997; Atteia *et al.*, 1998; Lacroix *et al.*, 2000; Bouchaou *et al.*, 2002; Massei *et al.*, 2002). The difficulty in handling this phenomenon is that karstic aquifers are heterogeneous and discontinuous complex systems. The conceptual

karstic models proposed in the literature (Mangin, 1984a; Drogue, 1980; Ford & Williams, 1994) take into account highly transmissive conduits together with finely-fissured blocks with low transmissivity. The karstic system stems from the ordered distribution of different voids (primary pores, fissures and karstic voids) about a drainage axis, according to a certain hierarchy. The flow dynamics within the system, and hence the turbidity mechanism, are dependent on the degree of hierarchy. After a rainfall event, flow is primarily drained through the most transmissive conduits (quickflow). During rainless periods, quickflow is almost negligible, and water yields are sustained by water released from storage (baseflow).

Two decades ago, the managers of the water resources initiated studies of the hydrogeology of the Bittit and Ribaa springs in order to obtain a better understanding of their hydrodynamics (Benjbara, 1987; Amraoui, 2001). However, the occurrence of turbidity was not approached in these studies. The objective of this paper is to study this phenomenon, in particular its relationships with rainfall. The study has used correlation and spectral analyses applied to times series of rainfall, flow rates and turbidity recorded simultaneously at both springs for over two years (28 December 1995–4 February 1998, i.e. 770 days).

STUDY AREA

The Middle Atlas Plateau consists mainly of Liassic limestones, which lie on argillaceous and basaltic Triassic layers. The springs are located along a fault contact between the Liassic plateau and the Sais Plain (Fig. 1(b)). Their watersheds correspond to a sub-tabular plateau whose altitude ranges between 1000 and 1450 m a.m.s.l. A surface karst with ruiniform lapies and ouvalas has developed, as well as several sink holes of lesser importance. Other karstic forms are represented by small surface cavities and by large and deep depressions.

The plateau constitutes the recharge area of the karstic systems drained by the springs. The precipitation regime is of Mediterranean type. Rainfall is highest in December (83 mm on average at the El Hajeb station), and lowest in July and August (4–5 mm at El Hajeb). Very localized and sudden storms can trigger flow in the dry

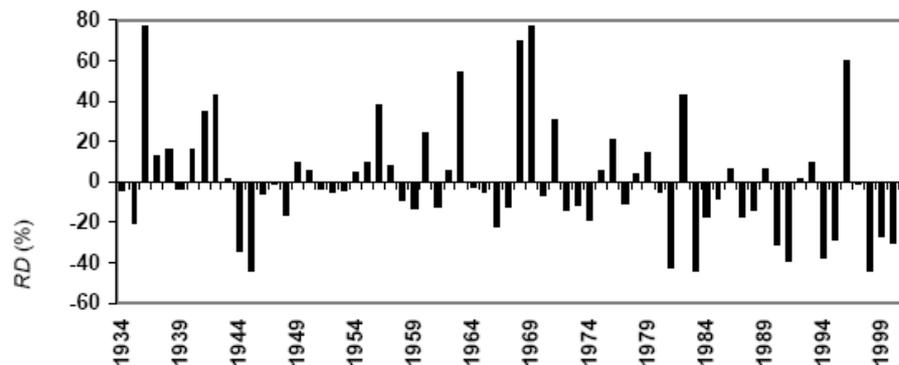


Fig. 2 Relative deviation (RD , %) of annual rainfall at El Hajeb station. $RD = [(P_i - \bar{P}) / \bar{P}] \times 100$ where P_i is precipitation in year i ; and \bar{P} is average precipitation.

valleys. The comparison of rainfall variations with the annual average value at El Hajeb (Fig. 2) confirms the precipitation irregularity and shows a significant reduction since 1976.

HYDROLOGICAL AND TURBIDITY DATA

Turbidity was usually measured once a day, except during rainy periods when measurements were taken three times a day. In the latter case, the average daily value was kept. Discharges at both springs were measured once a day. Note that during high water periods, part of the flow is evacuated by overflow springs located at higher altitudes and thus is not included in the discharges measured at both springs. Table 1 gathers some hydrological characteristics of the Bittit and Ribaa springs over the period 1975–2001. The lower the coefficient of variation (*CV*) and the variability index, the more regular the spring regime. In this respect, the Bittit Spring discharge is stable (*CV* = 12.3%), whereas the Ribaa Spring discharge fluctuates (*CV* = 66.7%), showing a relatively weaker interannual regulation by the karstic system. The area has been undergoing a pluviometric deficit since 1976. Accordingly, the average annual flow rate of both springs has been regularly decreasing since the onset of drought.

In normal periods, the turbidity of the spring waters generally ranges between 1 and 2 NTU (Nephelometric Turbidity Units). After heavy rainfalls, turbidity can reach 250 NTU. Turbidity records during the period 1996–1999 (Table 2) show that the year 1996 was particularly affected by the turbidity phenomenon, which subsequently decreased gradually. In fact, the hydrological year 1995/96 was a particularly rainy period within a long drought cycle (Fig. 2). Diagrams corresponding to the hydrological years 1995/96 and 1996/97 (Fig. 3) reveal similar turbidity fluctuations recorded at both springs, which probably reflects a regional effect. A probable causal relationship must be noted between the rainfall intensity and the occurrence of turbidity at both springs. The initial hydraulic state of the karstic system also plays a significant role, since turbidity is clearly amplified when rainfall events occur after drought periods. The relatively significant rainfalls during the spring of 1997 did not

Table 1 Coordinates and monthly hydrological characteristics of discharges of two springs.

Spring	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	Q_{\min} (l s ⁻¹)	Q_{\max} (l s ⁻¹)	Q_{ave} (l s ⁻¹)	Standard deviation	<i>CV</i> (%)	<i>IV</i>
Bittit	519.8	355.12	758	811	1510	2000	186	12.3	0.8
Ribaa	515.4	351.1	871	14	290	1019	199	66.7	3.5

CV = coefficient of variation (%); *IV* = index of variability $(Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_{\text{ave}}$.

Table 2 Turbidity (*T*, NTU) statistics.

Year	No. of days	Ribaa Spring		Bittit Spring	
		T_{ave}	T_{max}	T_{ave}	T_{max}
1996	151	23	202	32	226
1997	50	19	94	32	200
1998	19	32	115	29	120
1999	3	16	35	18	45

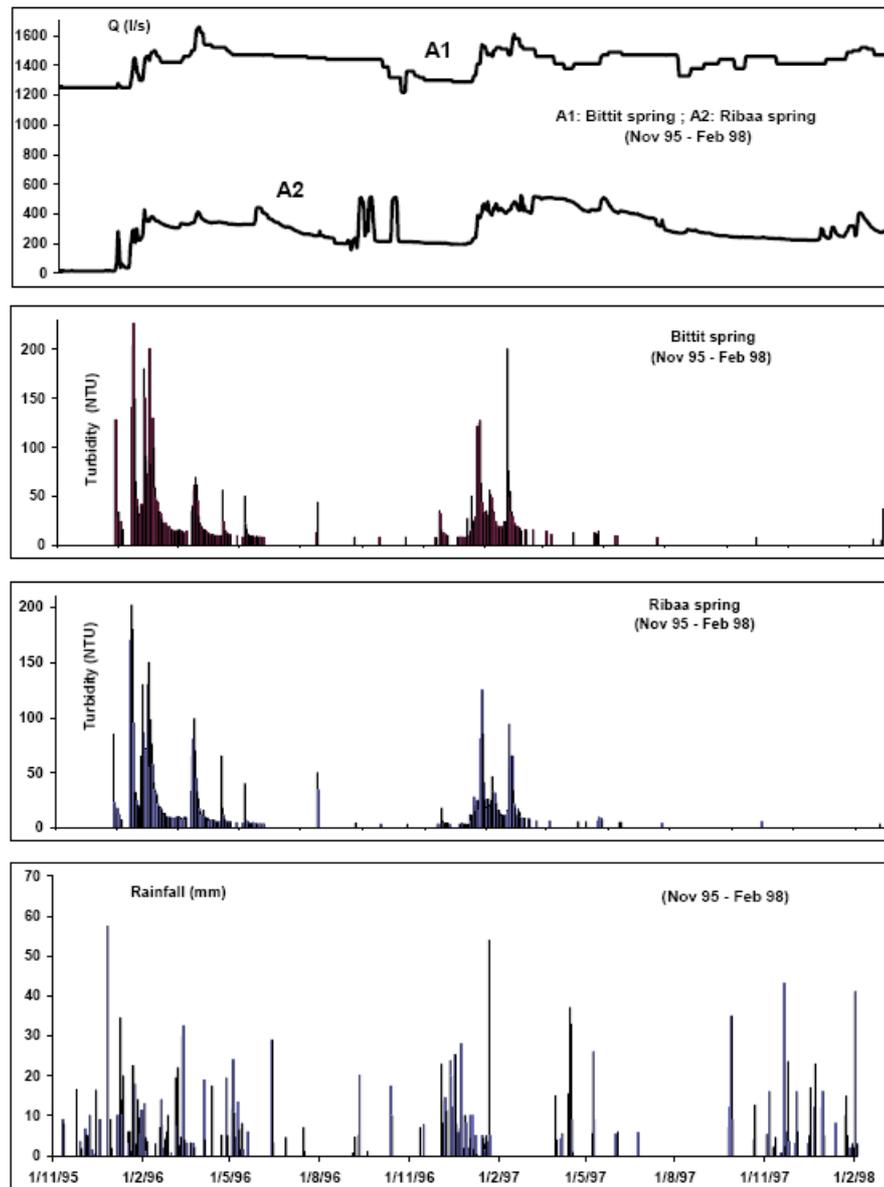


Fig. 3 Discharge rates and turbidity at Bittit and Ribaa springs, and rainfall at El Hajeb station, recorded from November 1995 to February 1998.

cause a turbidity episode as marked as the one caused by the two exceptional events of January–February 1996 and December 1996–January 1997. This can be explained by the fact that rainfalls of Spring 1997 took place at the beginning of the depletion period of the springs, following a significant leaching of the karstic systems two months earlier.

MATERIALS AND METHODS

Correlation and spectral analysis methods are related to signal theory. Their application in the study of karstic systems was introduced by Mangin (1984b). This

methodology proved quite efficient in identifying the organization and dynamics of karstic systems (Padilla & Pulido-Bosch, 1995; Larocque *et al.*, 1998). A short description of these methods is given here. A more detailed presentation is provided by Mangin (1984b) and Box & Jenkins (1974). Correlation and spectral methods have been exclusively applied to the time series of rainfall and discharges of karstic systems. To date, turbidity data have been rarely studied using these methods.

The correlogram stresses the linear dependence of successive events for increasing time intervals. Analytically, it shows the evolution of the autocorrelation coefficient r_k :

$$r_k = C_k/C_0 \quad \text{with} \quad C_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (1)$$

where k is the time lag ($k = 0, \dots, m$), m is the cut-off point, determining the interval in which the analysis is carried out, n is the length of the time series, x is the value of the variable of concern, in the time instant k , and \bar{x} is the average value of this variable. A steep slope in the correlogram indicates events independent of each other. By contrast, a smooth slope characterizes events related to each other. The correlogram value $r_k = 0.2$ is noteworthy, since events can be considered quasi-independent when $r_k < 0.2$.

The cross-correlogram $C_{xy}(k)$, used to analyse the linear dependence of input time series x_i and output time series y_i for increasing positive or negative time intervals (k), is written as:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{with} \quad C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (2)$$

where σ_x and σ_y are the standard deviations of the time series. When the input time series is random, the cross-correlation function $r_{xy}(k)$ represents the impulse response of the system. The delay between input and output can also be inferred from the cross-correlogram, as the time lag between $k=0$ and the maximum $r_{xy}(k)$. The delay provides an estimation of the transfer times of pressure pulses through the system. The cross-correlation function is not symmetrical in principle ($r_{xy}(k) \neq r_{yx}(k)$). If $r_{xy}(k) > 0$ for $k > 0$, the input signal influences the output signal.

The spectral analysis corresponds to a change from a time domain to a frequency domain through a Fourier transform of the correlogram. The spectral density function $S(f)$ represents the decomposition of the variance of the time series in the frequency domain and is written as:

$$S(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k) r(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad \text{with} \quad D(k) = \left[\left(1 + \cos \pi \frac{k}{m} \right) \right] / 2 \quad (3)$$

where $f = j/2m$ for $j = 1, \dots, m$, f is the frequency and $D(k)$ ensures that the $S(f)$ estimated values are unbiased. The term $D(k)$ is the Tukey filter (Mangin, 1984b). Interpretation of the spectral density function consists of identifying the different peaks representing periodical phenomena, which then leads to the characterization of the system. When such components characterize the output signal, this shows how the input signal has been modified by the system. The cut-off frequency (such that $S(f)$ is almost zero) is relevant, since the lower its value, the more inertia is present in the system. The simple spectral density function also enables the regulation time (T_{reg}) of

the system to be calculated, which represents the influence of the input signal and gives an indication of the length of the impulse response of the system ($T_{reg} = S(Z=0)/2$). The longer the regulation time, the higher the inertia in the system. The inertia of karstic systems is related to their storage capacity and drainage organization.

Spectral analysis can also be applied to the covariance study between two time series, i.e. input and output signals of the system. The cross-spectral density function $S_{xy}(f)$ then corresponds to the Fourier transform of the cross-correlation function and is written as:

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f) \quad (4)$$

where $h_{xy}(f)$ and $\lambda_{xy}(f)$ are the co-spectrum and the quadrature spectrum, respectively, and i is the imaginary unit:

$$h_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k))D(k) \cos(2\pi fk) \right] \quad (5)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k))D(k) \sin(2\pi fk) \right] \quad (6)$$

The cross-spectrum can also be expressed as a function of cross-amplitude $|S_{xy}(f)|$ and phase $\Phi_{xy}(f)$:

$$S_{xy} = |S_{xy}(f)| e^{-i\Phi_{xy}(f)} \quad (7)$$

Expressions of cross-amplitude and phase are, respectively:

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad \text{and} \quad \Phi_{xy}(f) = \arctan\left(\frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)}\right) \quad (8)$$

The cross-amplitude function $|S_{xy}(f)|$ is an expression of how the input signal has been modified by the system. The spectral analysis of time series permits calculation of two additional functions that are helpful to characterize the system: the coherence function $CO_{xy}(f)$ and the gain function $G_{xy}(f)$:

$$CO_{xy}(f) = S_{xy}(f) / \sqrt{S_x(f)S_y(f)} \quad \text{and} \quad G_{xy}(f) = S_{xy}(f) / S_x(f) \quad (9)$$

The coherence function indicates if variations in the output time series correspond to the same type of variations in the input series and thereby expresses the linearity between these series. The gain function represents an attenuation (<1) or amplification (>1) of the output signal as compared to the input signal. In karstic systems, an amplification means a release of water from storage, whereas an attenuation means a storage of water.

RESULTS

The time series extend over more than two hydrological cycles (28 December 1995–4 February 1998, i.e. 770 days). The analysis was carried out at a daily time step and at

a 120-day cut-off point. The time series are: (a) daily rainfall recorded at the Bittit station, (b) daily discharges at Bittit and Ribaa springs, and (c) daily turbidity at both springs.

Rainfall time series analysis

The rainfall correlogram is reported in Fig. 4(a). It decreases very quickly, takes a value of $r_k = 0.2$ on the second day, and is almost zero from the 28th day onward. No indication of any apparent cycle can be depicted. Thus rainfall has a quasi random character. This is consistent with the extreme variability of rainfall as pointed out previously. The randomness of precipitation is confirmed by the spectral density function (not reported).

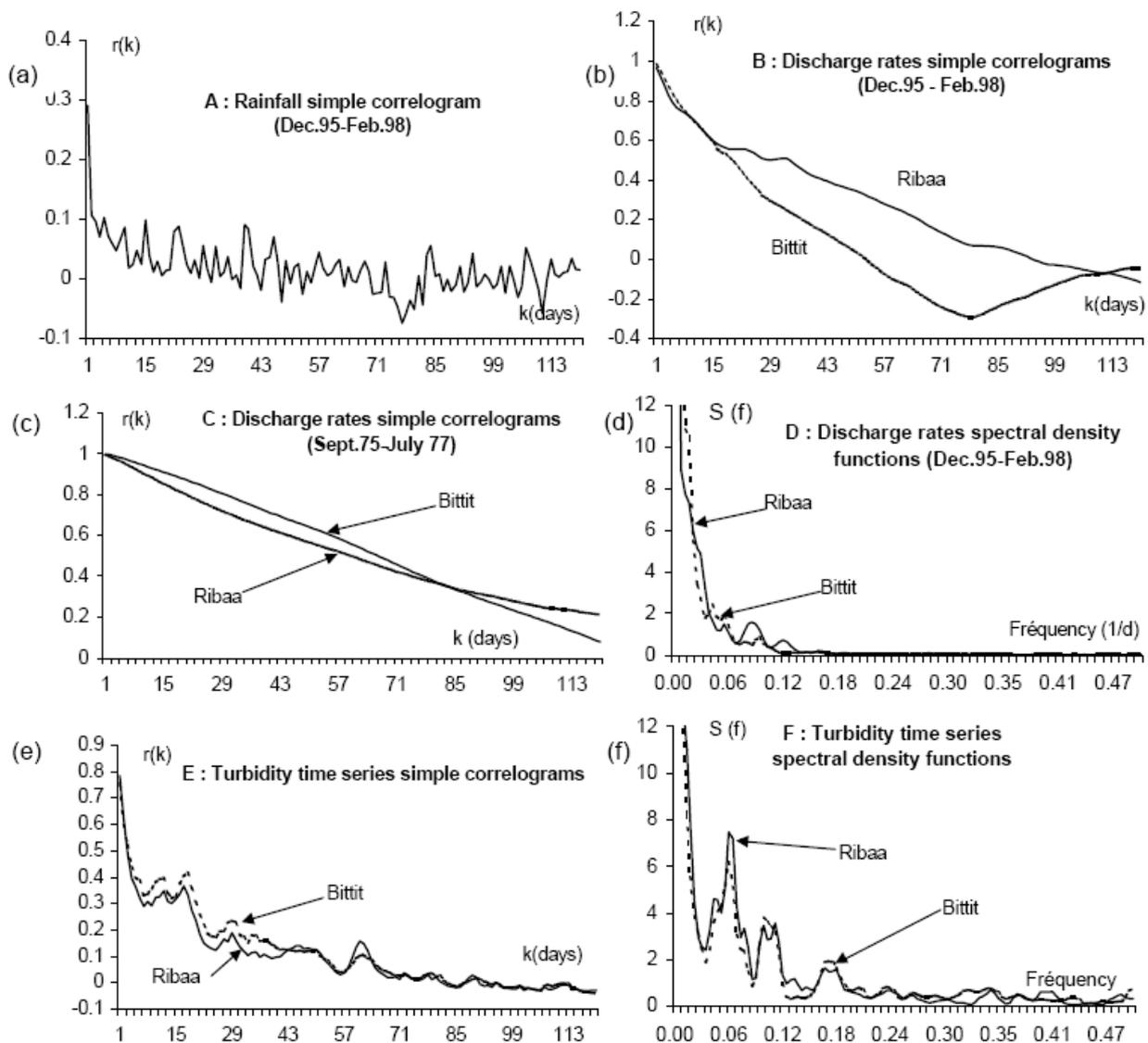


Fig. 4 Simple correlation and spectral analysis of rainfall, discharge rates and turbidity data.

Discharge time series analysis

Figure 4(b) shows the simple discharge correlograms $r(k)$. Correlograms decrease very slowly as the time lag increases. The memory effect can thus be estimated to be very significant, in relation to a high storage capacity. The memory effect is higher for the Ribaa Spring. The correlogram of the latter decreases less fast ($r_k = 0.2$ for $k = 66$ days) than that of the Bittit Spring ($r_k = 0.2$ for $k = 37$ days). However, the previous hydrographic analysis of the two springs had shown that the Bittit Spring had a greater storage capacity than the Ribaa Spring.

A correlation analysis of flow rates at both springs was undertaken over two other hydrological cycles for 731 days (1 September 1975–31 August 1977). The decrease in the correlograms (Fig. 4(c)) is even slower, showing a greater attenuation of the input signal in relation to a greater storage. For the period 1975–1977, the Bittit correlogram decreases less quickly ($r_k = 0.2$ for $k = 117$ days) than the Ribaa correlogram ($r_k = 0.2$ for $k = 104$ days). However, at that time the water table was much higher, as the drought effect which had been prevailing since the beginning of the 1980s was not recorded yet. This result emphasizes the vertical heterogeneity of the karstic systems and shows the significant influence of their saturation state over input–output relationships.

The spectral density functions of flow rates at both springs are shown in Fig. 4(d). The cut-off frequency is narrow (0.11 day^{-1} at Bittit and 0.14 day^{-1} at Ribaa) and confirms that inertia in both karst systems is rather strong. The regulation times are 57 days for Ribaa and 35 days for Bittit. These figures can be compared to those for other karstic systems. Values of T_{reg} varying between 14 and 70 days were calculated for karst aquifers in the French Pyrenees (Mangin, 1984b); $T_{reg} = 9.9$ days was found for a karst aquifer in northwestern Spain (Morales-Jubeira *et al.*, 1996); and $T_{reg} = 76$ days was obtained for La Rochefoucauld aquifer in western France (Larocque *et al.*, 1998). When karst aquifers are very well drained, their T_{reg} value is very low (<10 days). High T_{reg} values (>50 days) are related to aquifers having a considerable storage capacity. Accordingly, both systems studied here are shown to have a significant storage capacity.

Turbidity time series analysis

During periods of heavy rainfall, spring waters are loaded with suspended matter (red clays). This turbidity is regarded as an output signal of the system. The study of turbidity time series is not very developed yet in the literature. The application of correlation and spectral analysis methods to this phenomenon is quite novel (cf., Bouchaou *et al.*, 2002). Simple and cross-analyses of rainfall–turbidity are presented here.

The turbidity correlograms of both springs are quite similar (Fig. 4(e)), as a result of a regional effect. They show that the structure of turbidity time series is very different from that of flow rates. Accordingly, it can be assumed that turbidity has no obvious relation with spring discharges and that it originates from other mechanisms. The correlograms from both springs can be subdivided into two parts. The first part is marked by a rapid decrease at the beginning ($k < 8$ days) followed by a stabilization ($r_k = 0.32$; $8 < k < 16$ days). The second part is equally marked by a rapid decrease

($16 < k < 20$ days) followed by a much more moderate decrease. Other peaks of lesser importance are observed at $k = 30$ and 60 days, underlining the presence of secondary periodic components. The complex dynamics of karstic systems (fast and delayed infiltration, flushing effect, quickflow and diffuse flow, multiple-point sources of allochthonous turbidity, etc.) is well known and can explain, to a certain extent, the release of turbidity in the form of waves. The value $r_k = 0.2$ is obtained after 21 days for Ribaa and 23 days for Bittit.

The spectral density functions (Fig. 4(f)) show a similar behaviour. A major peak can be observed at frequency $f = 0.06$ ($k = 16$ days in time domain), confirming the behaviour inferred from correlograms. Other secondary peaks ($f = 0.11$, $f = 0.17$) appear on the spectra but are smaller. The cut-off frequency is about 0.2 day^{-1} , indicating a behaviour characterized by a rather weak inertia. This weak inertia of the system with respect to turbidity is confirmed by the regulation time, which is 23 days for Ribaa and 26 days for Bittit.

The comparison of the parameters characterizing the time series of flow rates and turbidity clearly indicates that these two phenomena do not have the same evolution within the karstic system. The time t (days) for which the correlogram value $r_k = 0.2$ is reached, is very different between both series: for flow rates t ranges between 104 and 117 days while for turbidity t ranges between 21 and 23 days. The cut-off frequencies (cove day^{-1}) of spectral density functions are also very different: for flow rates cove varies from 0.14 to 0.11 day^{-1} , while for turbidity series cove is about 0.2 day^{-1} . The regulation time T_{reg} (days) is also a discriminatory parameter: T_{reg} ranges from 35 to 57 days for flow rates while it ranges from 23 to 26 days for turbidity rates. That is, the flow rate signal is characterized by a considerably stronger inertia than the turbidity signal, and discharge rates at the springs are not directly correlated with turbidity.

Rainfall–discharge cross-analysis

The rainfall–discharge cross-correlograms (Fig. 5) are rather rounded and indicate that the systems possess a very significant regulating capacity. The systems are poorly drained. These results are consistent with the low recession coefficient values of about 10^{-3} (Amraoui, 2001) characterizing these two springs. The delay Δk is equally significant, $\Delta k = 25$ days at the Bittit Spring and $\Delta k = 20$ days at the Ribaa Spring. The relatively low values of the correlograms ($r_k = 0.2$ maximum) implies the absence of any immediate relation between rainfall and discharges.

The cross-amplitude and gain functions (Fig. 6) reveal that the system amplifies the input signal at rather low frequencies ($f < 0.033 \text{ day}^{-1}$; periods > 30 days) and strongly filters and attenuates the input signal at frequencies higher than 0.083 day^{-1} (periods < 12 days). The karstic system amplifies the rainfall signal when flow rates at the springs are derived, with a delay, from the release of storage water. This amplification then expresses the large storage capacity of both karstic systems. Karstic systems store water during periods of heavy rainfall through the finely-fissured blocks. The stored water does not contribute to spring discharges in periods of heavy rainfall but is released when the highly transmissive fractures or conduits are desaturated during periods of low rainfall. Note that the phenomena of intermediate frequency ($0.033 < f < 0.083 \text{ day}^{-1}$) are not totally filtered and are

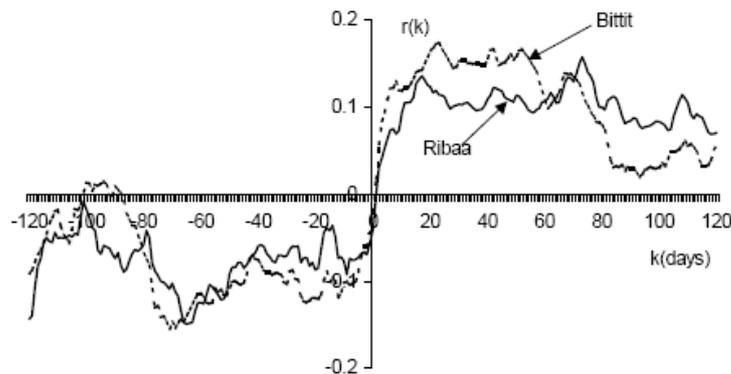


Fig. 5 Cross-correlograms of rainfall and discharge rates.

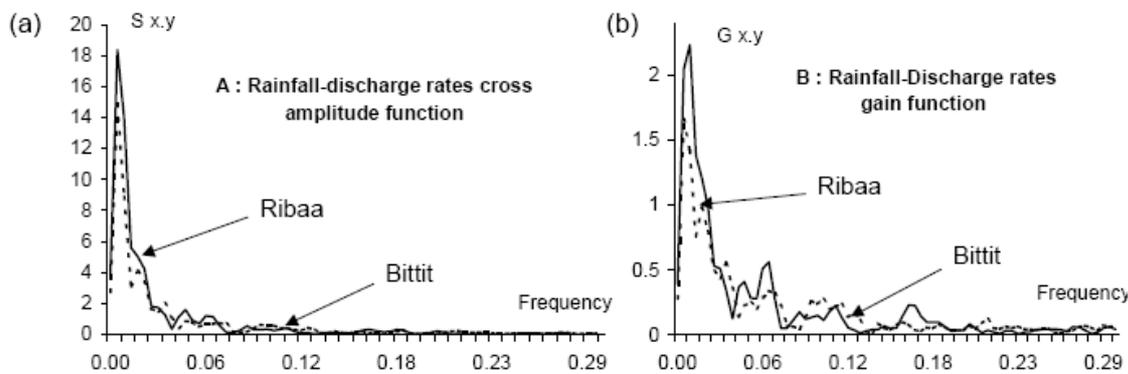


Fig. 6 Cross-spectral analysis of rainfall and discharge rates.

thought to be related to rainy episodes in the medium term. The average value of the coherence function CO_{xy} for both springs is 0.32, which indicates that the karstic systems are far from being linear.

Rainfall–turbidity cross-analysis

The rainfall–turbidity cross-correlograms are shown in Fig. 7. First an identical rainfall–turbidity relationship is observed for both springs, which further demonstrates a regional effect. Cross-correlograms are not symmetrical and indicate a positive relationship between rainfall and turbidity, which can be interpreted as a causal relationship. Since the rainfall time series is quasi random, the cross-correlograms reflect the impulse response of the system. This response is quite abrupt and depicts a rather non-inertial behaviour. The correlograms continue with reduced oscillation. A major peak ($r_{xy}(k) > 0.3$) can be observed at $k=5$ days and a secondary peak ($r_{xy}(k) < 0.2$) at $k=21$ days. The first peak with the maximum $r_{xy}(k)$ defines the delay of the response, which is 5 days at both springs. This short delay confirms that the turbidity evolution within the system is not inertial.

The cross-amplitude (Fig. 8(a)) and gain functions (Fig. 8(b)) show the noteworthy filtration and attenuation of the input signal by the karstic system for frequencies higher than $f=0.083 \text{ day}^{-1}$ (periods < 12.5 days) and its amplification for very low

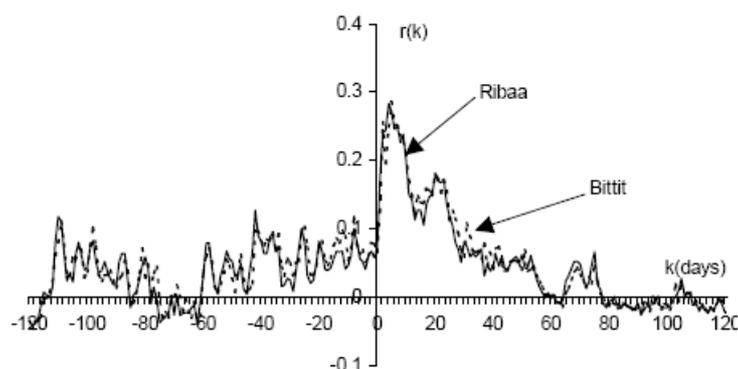


Fig. 7 Cross-correlograms of rainfall and turbidity.

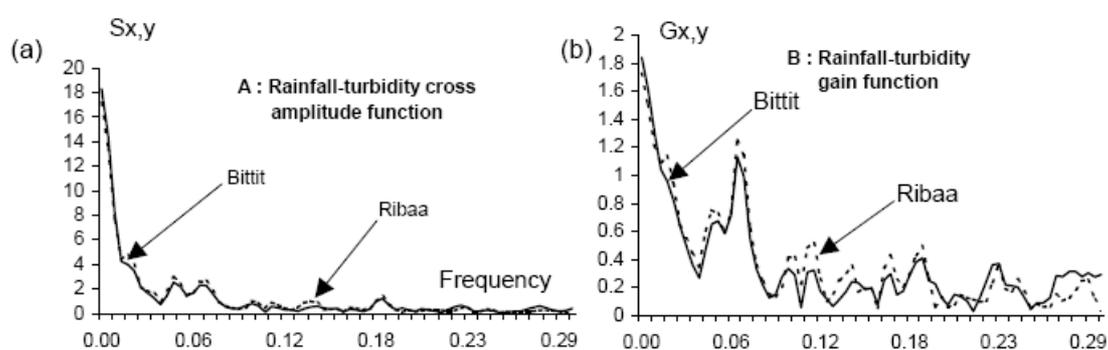


Fig. 8 Cross-spectral analysis of rainfall and turbidity.

frequencies, which confirms the previous results. However, the gain function indicates the complex behaviour of the rainfall–turbidity system in the low and intermediate frequencies ($f < 0.083 \text{ day}^{-1}$). The turbidity signal is amplified with regard to the rainfall signal for $f < 0.02 \text{ day}^{-1}$ (periods > 50 days) and for $f = 0.07 \text{ day}^{-1}$ ($k = 16$ days), which further stresses the complex behaviour of karstic systems.

The average value of the coherence function CO_{xy} for the Ribaa Spring is very low ($CO_{xy} = 0.36$ and 0.39 at Ribaa and Bittit, respectively), which indicates that the rainfall–turbidity system is highly nonlinear.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The rainfall–flow rate analysis shows a significant memory effect and high inertia of karstic systems. By contrast, the rainfall–turbidity analysis shows a weak memory effect and little inertia of the karstic systems with regard to turbidity.

The complex hydrodynamic behaviour related to the system hierarchy is thought to be at the origin of turbidity. The occurrence of turbidity following storm events is a common feature of karstic springs. The weathering of carbonated rocks over the watershed outcrops and within the aquifer yields argillaceous minerals that form a residue (decalcification red clays). This residue fills the low topographic points (karstic depressions, dolines). As a consequence of storm events, a strong surface runoff occurs. Waters loaded with clayey sediments flow towards the various sinkholes in to

which they infiltrate entirely. In the aquifer, this residue can form a deposit in the conduits and may clog certain fractures.

The fast infiltration through the unsaturated zone causes a flushing effect and a turbulent quickflow in the highly transmissive conduits with very high velocities. This turbulent flow can cause the resuspension of the particles deposited in the conduits and their transport towards the springs. Along with the particle resuspension, a fracture unclogging phenomenon can be added. This was observed by Bakalowicz *et al.* (1994) during high pumping rate experiments in a Pyrenean karst. The high flow velocities, caused by the high pumping rates, give rise to a turbulent, even chaotic flow regime. This change in the flow regime results in the destruction of clay layer limits and in the release of particles that are subsequently evacuated towards the outlets. This turbidity of internal origin (autochthonous turbidity) is probably evacuated first through the karstic outlets after a storm event. The waters infiltrated following the storm, originating from runoff on the watershed and after having eroded soils and/or superficial formations, may also convey a turbidity of external origin (allochthonous turbidity) towards the outlet. The mixed origin of turbidity was observed in other karstic systems (Massei *et al.*, 2002, 2003). The assumptions advanced here may explain to a certain extent the characteristic delayed responses and the waves of turbidity inferred from the correlation and spectral analyses.

Amplification of the turbidity signal with respect to rainfall and the weak inertia of the systems with regards to the turbid signals could be related to the occurrence of resuspension phenomena and to particle deposition in the conduits at the end of floods. This interpretation provides a possible origin of the intra-karstic sedimentary budget and its extent. Further investigations are needed however to correlate both phenomena more precisely.

It is worthwhile to compare our results with those of Bouchaou *et al.* (2002) from the Ain Asserdoune Spring, one of the most important springs in Morocco, located in the Beni Mellal Atlas. This spring drains a karstic aquifer and is also affected by the occurrence of turbidity phenomenon during floodwater periods. Discharge rate analysis indicated a high inertia in the system with significant reserves. In contrast, the turbidity signal showed little inertia. These results are similar to those found in the present study. The rainfall–turbidity cross-analysis at Ain Asserdoune showed that the response was made up of quite sharp and narrow peaks indicating that at given moments, fine suspended sediments occurred and then progressively disappeared. Bouchaou *et al.* (2002) interpreted the response as an index of nonlinearity and the appearance of a chaotic regime. They stated that, in view of the response form, the turbidity phenomenon applies only to the flooded area (autochthonous turbidity). In the case of the Ribaa and Bittit springs, the signal processing results indicate that two components can be distinguished that constitute the turbid signal: an allochthonous component and an autochthonous component. Massei *et al.* (2003) reached the same conclusion.

The work presented here provides some preliminary answers to the turbidity problem observed at Ribaa and Bittit springs. However, several factors other than hydrodynamic ones may account for the turbidity phenomenon (McCarthy & Schevenell, 1998). Research works in progress include mineralogical and microgranulometric analyses of sediments, tracer tests and physico-chemical analyses of spring waters for a better identification of the turbidity problem prevailing in these two springs.

Acknowledgements This research was partly funded by the programme France-Maroc Action Intégrée 221-STU-00. The authors wish to acknowledge the very insightful and pertinent comments of two reviewers, which greatly helped to improve the manuscript quality.

REFERENCES

- Amraoui, F. (2001) L'aquifère karstique du moyen atlas tabulaire: problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc). In: *Limestone Hydrology and Fissured Media* (Proc. Seventh Conf., Besançon, France). *Sci. Tech. Environ., Mém. H.S.* **113**, 45–48.
- Atteia, O. & Kozel, R. (1997) Particle size distributions in waters from a karstic aquifer: from particles to colloids. *J. Hydrol.* **201**(1–4), 102–119.
- Atteia, O., Couture, C. & Perret, D. (1998) Factors controlling colloidal transport in a karst aquifer. *Phys. Chem. Earth* **23**(2), 163–169.
- Bakalowicz, M., Crochet, P., D'Hulst, D., Mangin, A., Marsaud, B., Ricard, J. & Rouch, R. (1994) High discharges pumping in a vertical cave. Fundamental and applied results. In: *Basic and Applied Hydrogeological Research in French Karstic Areas* (Proc. Symp., Montpellier-Millau, France), 93–110. Eur.Com. Publ. COST 65 Action, Bruxelles, Belgium.
- Benjbara, A. (1987) Observations sur les sources de la plaine de Fès-Méknès. *Rev. Eau et Développement*, 31–37. Direction de l'hydraulique, Maroc.
- Bouchaou, L., Mangin, A. & Chauve, P. (2002) Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Morocco). *J. Hydrol.* **265**(4), 34–42.
- Box, G. & Jenkins, G. (1974) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Holden Day, San Francisco, USA.
- Drogue, C. (1980) Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés. *Mém. H. S., Soc. Géol. France* **11**, 101–108.
- Ford, D. & Williams, P. (1994) *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman & Hall, London, UK.
- Lacroix, M., Rodet, J., Wang, H., Massei, N. & Dupont, J.-P. (2000) Origin of suspended particulate matter in a karstic aquifer system: contribution of the microgranulometry. *C. R. Acad. Sci. IIA* **330**(5), 347–354.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. & Banton, O. (1998) Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *J. Hydrol.* **205** (3–4), 217–231.
- McCarthy, J. F. & Shevenell, J. F. (1998) Processes controlling colloid composition in a fractured and karstic aquifer in Eastern Tennessee USA. *J. Hydrol.* **206**(3/4), 191–214.
- Mangin, A. (1984a) Ecoulement en milieu karstique. *Annales des Mines* **5/6**, 135–142.
- Mangin, A. (1984b) Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *J. Hydrol.* **67**, 25–43.
- Massei, N., Lacroix, M., Wang, H., Mahler, B. J. & Dupont, J.-P. (2002) Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *J. Hydrol.* **260**(1–4), 88–101.
- Massei, N., Wang, H., Dupont, J.-P., Rodet, J. & Laignel, B. (2003) Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *J. Hydrol.* **275**(1–2), 109–121.
- Morales-Juberias, T., Cruz-Sanjulian, J., Zafra, P., Olazar, M. & Arandes, J. M. (1996) Etudes des réponses naturelles du système karstique d'Olalde (Pays basque). *Hydrogéologie* **1**, 39–51.
- Padilla, A. & Pulido-Bosch, A. (1995) Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J. Hydrol.* **168**, 73–89.

Received 5 March 2003; accepted 19 July 2003



Géosciences de surface (Hydrologie–Hydrogéologie)

Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée : la source Bittit (Maroc)

Fouad Amraoui^a, Moumtaz Razack^{b,*}, Lhoussaine Bouchaou^c

^a Laboratoire d'hydrogéologie, faculté des sciences Ain Chock, université Hassan-II, BP 5366, Maarif, Casablanca, Maroc

^b Département d'hydrogéologie, UMR 6532, université de Poitiers, 40, av. du Recteur-Pineau, 86022 Poitiers cedex, France

^c Laboratory de géologie appliquées et de géo-environnement, faculté des sciences Ibn-Zohr, BP 28/5, 80000 Agadir, Maroc

Reçu le 19 mai 2003 ; accepté après révision le 29 mars 2004

Présenté par Ghislain de Marsily

Résumé

Le comportement d'une émergence karstique (source Bittit, Moyen Atlas marocain) soumise à une sécheresse prolongée (> 20 ans), est analysé par des méthodes d'étude des hydrogrammes et des méthodes corrélatoires et spectrales. Deux séries de débit, correspondant à une période pluviométrique normale et à une période de sécheresse, sont analysées. Les résultats montrent que le système karstique est inertiel, avec des réserves très importantes. Cependant malgré le grand pouvoir régulateur des réserves, la longue période de sécheresse a eu pour conséquence une diminution significative des débits, du fait d'apports moins diversifiés et d'une réduction des réserves. *Pour citer cet article* : F. Amraoui et al., C. R. Geoscience 336 (2004). © 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Behaviour of a karstic spring subjected to a long drought period: Bittit spring (Morocco). The behaviour of a karstic spring (Bittit spring, Middle Atlas, Morocco) subjected to a prolonged drought (> 20 yr), is analysed using spring hydrographs analysis methods and correlation and spectral methods. Two series of discharges, corresponding to a normal rainfall period and a drought period, are analysed. The results show that the karstic system is inertial, with very significant storage. However, in spite of the great regulating capacity of the storage, the long drought period significantly reduced the spring discharges, due to less diversified inputs, and to the karstic system storage depletion. *To cite this article*: F. Amraoui et al., C. R. Geoscience 336 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : source karstique ; Moyen Atlas ; Maroc ; sécheresse ; hydrogrammes ; analyses corrélatoire et spectrale

Keywords : karstic spring ; Middle Atlas ; Morocco ; drought ; hydrographs ; correlation and spectral analysis

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : moumtaz.razack@hydrasa.univ-poitiers.fr (M. Razack).

Abridged English version

1. Introduction

The object of this article is, from a general point of view, to characterize the hydrodynamic behaviour of large karstic systems according to their storage level. The study site is represented by the Bittit spring, located in the Middle Atlas, in Morocco. The reason for this choice is the large size of this system and its complexity, the existence of a long series of rainfall deficit and the availability of more than 70 yr of data. A better understanding of the evolution of such large karstic systems, taking into account their storage level, is particularly important within the context of climatic changes, evolving in the studied region towards aridity.

The plain of Sais is one of the great agricultural regions of Morocco. Its water resources are provided mainly by the karstic aquifer of the Liasic carbonate plateau of Middle Atlas (Fig. 1). This plateau is drained by a group of springs of which the most significant is the Bittit spring (average annual discharge = $1.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) [1–3,5]. This spring is currently exploited to partly supply the town of Meknès with drinking water. The Middle Atlas area has undergone since two decades a regular rainfall deficit (Fig. 2A) with significant consequences on water resources (Fig. 2B).

The Middle Atlas plateau is made of limestone of Liasic age. Several springs are located along the contact between the carbonate plateau and the plain of Sais. The Middle Atlas plateau is the recharge area of the karstic system, which is drained by the springs. Fig. 2A represents the rainfall variations compared to the annual average rainfall, from 1934 to 2000. It confirms the irregularity of the rains and highlights a significant reduction since 1980. The total rainfall deficit since 1980 at the El Hajeb station is equivalent to three years of average rainfall.

The hydrogeologic system of Bittit has a very significant storage capacity, allowing storage of a significant recharge from rainfall and snow melting, without causing brutal floods. The spring discharge is indeed quite constant all the year around. The presence of sandy dolomites at the base of the Liasic aquifer suggests the existence of an aquifer with interstitial porosity and relatively slow flow. The Bittit spring is characterized by a high average discharge (1510 l s^{-1}

calculated over the period 1975–2001) and a reduced dispersion (standard deviation = 186 l s^{-1} ; CV = 12.3%). The spring thus presents a relatively stable discharge, indicating a good inter-annual regulation by the karstic system. Fig. 3 illustrates the discharge evolution, which shows a regular decrease since the beginning of the drought. The discharge time series of the Bittit spring, used in this work, cover respectively the periods 1975–1977 and 1995–1998.

2. Methods

Three methods have been used in this work to analyse the influence of the long drought period on the spring hydrodynamic behaviour. These methods are the discharge distribution analysis, the recession curves analysis and correlation and spectral analysis. Other methods, like the use of natural tracers [4,7] will be applied shortly.

The first method deals with the distribution of the discharge cumulative frequencies [11] and allows us to check (or not) the unity of the karstic systems. Thus, one can highlight sinks (or sources) out of (or into) the studied karstic system. These features appear as discontinuities on the frequency curve. The fitted probability distribution function is Gaussian. In practice, one plots the discharge frequencies on a Gaussian functional diagram. The observation on the diagram of several segments displays the existence of several flow regimes. These changes of flow regimes can have internal origins related to hydrodynamic modifications within the karstic system (storage and/or release of water; overflows), or external origins related to relationships with nearby systems resulting in water contributions or losses.

The recession curves analysis [11] allows us to characterize the behaviour of two subsystems: the unsaturated zone or infiltration subsystem and the saturated zone or drowned karst subsystem. The flood discharge shows how the infiltration zone is drained, whereas the base flow discharge characterizes the draining of the drowned karst. The interest of this method is to define the characteristics of each subsystem using some simple parameters.

Correlation and spectral methods are inspired by signal processing methods. Their application to karstic systems proved efficient to identify the organization and the dynamics of karstic systems [6,8,9,12,13].

The correlogram highlights the dependence between each other of successive events for increasing time intervals. Analytically, it shows the evolution of the autocorrelation coefficients r_k . If the correlogram decreases quickly, it indicates events independent from each other. On the other hand, a slow decrease characterizes events dependent on each other. The value $r_k = 0.2$ is a remarkable value, as the events can be considered independent when $r_k < 0.2$. The spectral analysis corresponds to a change from a time domain to a frequency domain by a Fourier transform of the correlogram. The spectral function $S(f)$ of density represents the decomposition of the time series variance in the frequency domain. Interpretation of this function consists in identifying the various peaks representing periodic phenomena, which helps to characterize the system. The weaker the cut-off frequency (the frequency such as $S(f)$ is almost null), the more inertial the system. The $S(f)$ function also allows the calculation of the regulation time of the system, which represents the influence of the duration of the input signal [$T_{\text{reg}} = S(F = 0)/2$]. The longer the regulation time, the more inertial the system.

3. Results and discussion

Frequency distributions of the discharge were analysed for two periods. The first corresponds to two hydrological cycles with normal rainfall 09/1975–08/1977 and the second with two hydrological cycles located in a drought period 09/1995–08/1997. The diagrams (Fig. 4) show three (period 1975–1977) to four (period 1995–1997) segments. This feature reveals that discharge evolution is different between normal and dry periods. Table 1 summarizes the results. The changes in flow regimes noted for a low discharge are explained by the passage from a flood flow (segment 2, Fig. 4) to a recession flow (segment 1, Fig. 4). The flow regime related to the first segment corresponds to a Maillet distribution [10]. The steeper slope of segment 1 of period 75/77 shows that in a normal period, the recession discharge is less dispersed. Segments 2, 3, 4 (period 1975–1977) and 2, 3 (period 1995–1997) represent the flood discharge. The larger number of segments in the normal period indicates that the origin of the water contributions is more diversified than in a dry period.

In the high-discharge domain, a discontinuity with a slope increase (segments 2 and 3, period 1975–1977) means water outlets outside the system and can suggest the probable existence of overflows (for example, a drain above the principal spring). In a dry period, one observes a discontinuity with reduction in slope between segments 2 and 3. This characteristic means the existence of a different water contribution to the system and can represent a temporary retention of a certain volume of water in additional structures at the time of the flood and its release at the beginning of the recession. The discontinuity between segments 3 and 4 of period 1975–1977 suggests the contribution of an external water volume only at the time of the flood periods (modification of the basin limits, snow melting, rain). During the period 1975–1977, the spring discharge was higher than at present and it was distributed in four segments. Recharge of the spring was more constant and probably more diversified before the years 1980 than during the current drought period. Indeed, if the groundwater level drops because of a reduction of the contributions, secondary drains become unsaturated and the recharge area is reduced. This can be seen on the frequency diagram by the reduction of the number of flow regimes (three segments instead of four). The modifications of the recharge area considered above are only assumptions, which could not be checked as no tracing tests [3] were performed in the system.

The choice of the various floods that were used for the recession analysis was made in such a way that they represent the maximum amplitudes of each hydrological cycle and they precede long periods of low water level (Fig. 5). The recession coefficients (Table 2) are low ($1.5 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$) and seem similar from one recession to another, thus translating the difficulty for the system to drain stored water and consequently its facility to create reserves. Dynamic volumes are large and can be estimated at nearly a billion cube metres. It is significant to note the variation of the dynamic reserve between 1977 and 1996. Indeed, in 19 years, the system lost 179 Mm^3 , that is an average annual volume of 9.4 Mm^3 . This loss is to be connected directly with the drought that prevails in the area since 1981. The recession is generally spread out: 1 month to 45 days for the studied spring. This expresses a delayed response to the input signal represented by the rain.

The Bittit spring is the outlet of a wide and complex hydrogeologic system. The water volume sustaining recession is very significant (907 Mm³ in 1996), which implies a huge reservoir and places this aquifer among weakly karstified domains [11]. Sandy dolomites are porous systems with very high regulation capacity. Finally, the flood volume ($V_f = 0.5 \text{ Mm}^3$) is much less important compared to the dynamic volume V_r .

Spectral and correlation analysis is carried out with a daily time step and a 120-day truncation. Fig. 6 shows the discharge simple correlograms during the two periods. One notes a rather slow decrease, indicating a significant memory effect. The system modulates the input signal, it has a memory effect in relation with the regulating role of the reserves. During the period 1975–1977, the decrease is much slower ($r_k = 0.2$ for $k = 117$ days) than during the period 1995–1998 ($r_k = 0.2$ for $k = 37$ days). This highlights the effect of the groundwater reserve reduction on the damping of the input signal. This result also highlights the vertical heterogeneity of the karstic system and shows the significant influence of its storage level on input–output relations. The spectral density function (Fig. 7) shows narrow cut-off frequencies (0.11 d^{-1}), which confirms that the system is very inertial. The calculated regulation times are of 53 days over the period 1975–1977 and 37 days over the period 1995–1998. This result shows a significant reduction in the inertia of the system during the drought period due to the reserve decrease.

4. Conclusion

The various hydrodynamic methods used in this study show that the Bittit hydrogeologic system is very capacitive: significant storage, sustained discharge all year round, relatively slow flow because of the presence of a sandy dolomite base. However, in spite of the great storage capacity of this karstic aquifer, the spring discharge shows a regular and significant lowering tendency due to a long drought period that considerably reduced the aquifer recharge. The analyses of two discharge series allowed comparing the spring differential behaviour between a normal period and a dry period. This shows that the water deficit induced a reduction of the recharge area and of the reserve (estimated at $9.4 \text{ Million m}^3 \text{ yr}^{-1}$ on average), during the two last decades, and a change

in the input–output relations of the system, expressing the non-steadiness of the system. Thus, the drought phenomenon became a feature that should at present be taken into account for a sustainable management of water resources, particularly in semi-arid zones with irregular climates.

1. Introduction

L'objet de cet article est, d'un point de vue général, de caractériser le comportement hydrodynamique des grands systèmes karstiques en fonction de leur état de remplissage. Le site d'étude est représenté par la source de Bittit, localisée dans le Moyen Atlas marocain. Ce choix est lié à la grande taille de ce système et à sa complexité, à l'existence d'une longue série de pluies déficitaires et à la disponibilité de données sur plus de 70 ans.

La plaine du Saïs est l'une des grandes régions agricoles du Maroc. Ses ressources en eau sont fournies en grande partie par l'aquifère karstique du Lias du plateau carbonaté du Moyen Atlas (Fig. 1). Ce causse se vidange par un groupe de sources dont la plus importante est celle de Bittit ($Q_{\text{moy annuel}} = 1,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) [1–3,5]. Cette dernière est actuellement exploitée pour alimenter en partie la ville de Meknès en eau potable. Le Moyen Atlas marocain connaît, depuis une vingtaine d'années, un déficit pluviométrique chronique (Fig. 2A) dont les conséquences sont sensibles sur les ressources en eau (Fig. 2B). La région a été ainsi soumise, au cours de ces dernières décades, à un régime pluviométrique irrégulier.

Mieux comprendre l'évolution de ces grands systèmes karstiques, compte tenu de leur état de remplissage, revêt une importance particulière au moment où l'on parle de plus en plus de changements climatiques, allant, dans la région étudiée, vers l'aridification.

2. Région d'étude

Le Causse moyen-atlasique est constitué essentiellement de formations calcaires d'âge Liasique, qui reposent sur le Trias argileux et basaltique. Une dizaine de sources sont localisées le long du contact entre le plateau carbonaté et la plaine du Saïs. Le causse moyen-atlasique constitue le secteur de recharge du

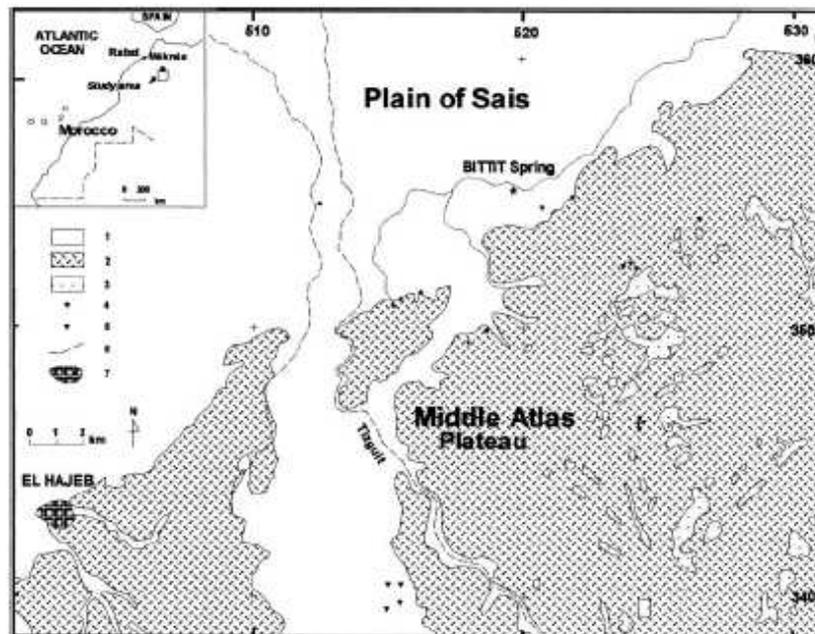


Fig. 1. Carte hydrogéologique de la bordure septentrionale du causse du Moyen Atlas (extrait de la carte géologique au 1/100 000 d'El Hajeb). 1, Formations mio-plio-quaternaires; 2, affleurements carbonatés liasiques; 3, dépressions karstiques à remplissage argileux; 4, source karstique; 5, gouffres ou avens; 6, faille ou flexure; 7, cours d'eau; 8, ville.

Fig. 1. Hydrogeological map of the northern border of the Middle Atlas Plateau (from the geological map of El Hajeb at 1/100 000). 1, Mio-Plio-Quaternary formations; 2, Liasic formations; 3, karstic depressions with argillaceous deposits; 4, karstic spring; 5, sink-holes; 6, fault; 7, River; 8, Town.

système karstique, qui est vidangé par les sources. Le régime des précipitations est du type méditerranéen. Le mois de décembre est en général le plus arrosé (83 mm en moyenne à El Hajeb), alors que les mois de juillet et d'août sont les plus secs (4 à 5 mm à El Hajeb). Des averses orageuses concentrées et brutales peuvent déclencher l'écoulement dans les vallées sèches.

La Fig. 2A représente les écarts pluviométriques par rapport à la pluie moyenne annuelle (612 mm) entre 1934 et 2000. Elle confirme l'irrégularité des pluies et met en évidence une diminution importante des apports depuis 1980. Le déficit cumulé des pluies depuis 1981 à El Hajeb équivaut à trois années moyennes.

L'émergence Bittit jaillit au pied de la flexure de Sidi Lmir, au sein d'une surface d'aplanissement recouverte par les basaltes quaternaires qui jouent le rôle d'un toit relativement imperméable. La source sort sous les basaltes en profitant probablement d'une

faille qui aurait guidé son installation. Les forages de reconnaissance creusés au voisinage de la source montrent que le Lias est peu épais à cet endroit et que le Trias marque une remontée, jouant ainsi un rôle de barrière, en empêchant l'écoulement de l'eau vers la plaine.

Le système hydrogéologique de Bittit jouit d'une capacité de stockage très importante, permettant d'emmagasiner une recharge importante provenant des pluies et des fontes de neige, sans provoquer de crues brutales. Le débit de la source est, en effet, bien soutenu durant toute l'année. La présence de dolomies sableuses à la base de l'aquifère liasique plaide en faveur de l'existence d'un aquifère à porosité d'interstices et à écoulement relativement lent. On aurait donc, dans l'ensemble, un système ayant un pouvoir de régulation qui permet d'amortir les pics de recharge et de restituer l'eau avec modération.

La source Bittit est caractérisée par un débit moyen élevé (1510 l s^{-1} calculé sur la période 1975–2001) et

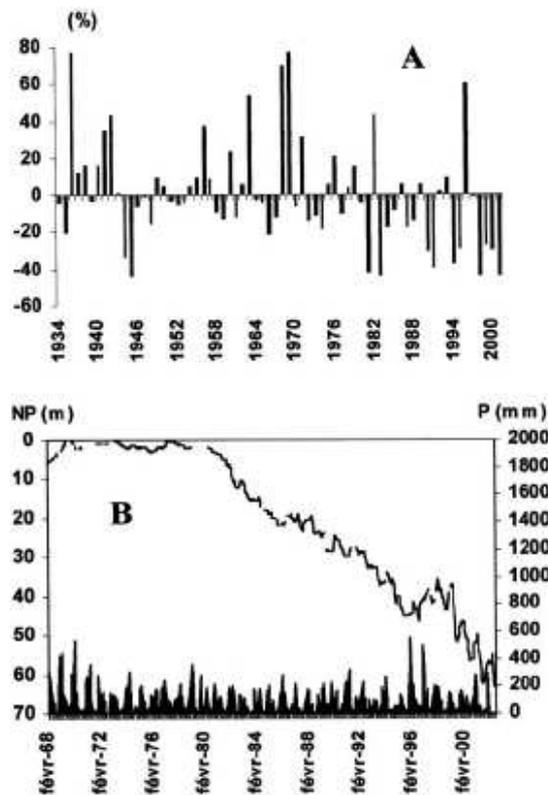


Fig. 2. Déficit pluviométrique et conséquences sur les ressources en eau. (A) Écarts pluviométriques relatifs (%) par rapport à la moyenne à El Hajeb (1934–2001). (B) Suivi piézométrique sur le forage 290/15 dans la plaine du Saïs, montrant une baisse régulière du niveau de la nappe consécutive à la sécheresse.

Fig. 2. Rainfall deficit and its effects on water resources. (A) Relative deviations (%) from average rainfall at El Hajeb station (1934–2001). (B) Groundwater monitoring at borehole 290/15 in the plain of Saïs showing a regular decrease of the water level due to the drought.

une dispersion réduite (écart type = 186 l s^{-1} ; CV = 12,3%). L'exutoire présente donc un écoulement relativement stable, témoignant d'une bonne régulation interannuelle par le système aquifère karstique. La Fig. 3 illustre l'évolution du débit de la source, qui marque une tendance baissière régulière depuis le début de la sécheresse. Les séries chronologiques des débits de la source Bittit, utilisées dans ce travail, recouvrent respectivement les périodes 1975–1977 et 1995–1998.

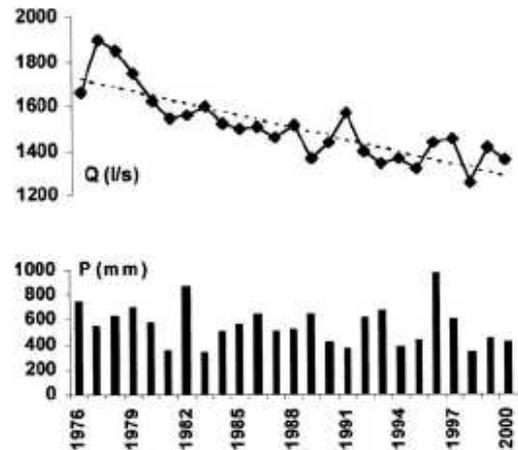


Fig. 3. Évolution du débit annuel de la source Bittit (A) et pluie annuelle à El Hajeb (B) (1976–2000).

Fig. 3. Annual discharge evolution of the Bittit spring (A) and annual rainfall at El Hajeb station (B) (1976/2000).

3. Méthodologie

3.1. Étude des débits classés

La méthode des débits classés [11] consiste à étudier la distribution des fréquences cumulées des débits observés à la source. Elle permet de caractériser la structure de l'hydrogramme unitaire. Cette méthode se révèle être un outil intéressant pour vérifier ou non l'unité des systèmes karstiques. Ainsi, on peut mettre en évidence une fuite ou un apport d'eau vers le système karstique étudié. Ceci se traduit sur la courbe par des discontinuités.

La loi de probabilité ajustée est la loi normale. En pratique, on reporte les fréquences cumulées de débits sur un diagramme fonctionnel. L'observation sur la courbe de plusieurs segments de droites traduit l'existence de plusieurs lois d'écoulement. Ces changements de loi d'écoulement peuvent avoir des origines diverses, liées soit à des modifications hydrodynamiques internes au système karstique, comme le stockage-déstockage des réserves ou l'entrée en fonctionnement de trop-pleins, soit à des interrelations avec un système voisin, qui se traduisent par des apports ou des fuites.

3.2. Étude des courbes de récession

L'étude des courbes de récession [11] permet de caractériser le comportement des deux sous-systèmes qui constituent le système karstique : la zone non saturée, ou sous-système «infiltration», et la zone saturée ou sous-système «karst noyé». L'écoulement de décrue est représentatif de la manière dont s'effectue la vidange de la zone d'infiltration, alors que l'écoulement de tarissement caractérise la vidange du karst noyé. L'intérêt de cette méthode est de définir les caractéristiques de chaque sous-système à l'aide de quelques paramètres simples.

3.3. Analyses corrélatoires et spectrales

Les analyses corrélatoires et spectrales s'inspirent directement des méthodes de traitement du signal. Leur application à l'étude des systèmes karstiques s'est avérée tout à fait efficace pour identifier l'organisation et la dynamique des systèmes karstiques [6,8,9,12,13].

Le corrélogramme met en évidence la dépendance, les uns avec les autres, des événements successifs pour des intervalles de temps croissants. Analytiquement, il montre l'évolution du coefficient r_k d'autocorrélation. Si le corrélogramme décroît très vite, il indique des événements indépendants les uns des autres. En revanche, une décroissance lente caractérise des événements dépendants les uns des autres. La valeur $r_k = 0,2$ est une valeur remarquable, car des événements peuvent être considérés indépendants quand $r_k < 0,2$.

L'analyse spectrale correspond à un changement d'un domaine de temps à un domaine de fréquence par une transformée de Fourier du corrélogramme. La fonction spectrale $S(f)$ de densité représente la décomposition de la variance de la série chronologique dans le domaine des fréquences. Les phénomènes périodiques apparaissent sous forme de pics dans le graphe de $S(f)$. Quand ces pics caractérisent le signal de sortie, ceci montre comment le signal d'entrée a été modifié par le système. Plus la fréquence de coupure (la fréquence telle que $S(f)$ est presque nulle) est faible, plus le système est inertiel. La fonction $S(f)$ permet également le calcul du temps de régulation du système, qui représente la durée d'influence du signal d'entrée [$T_{\text{reg}} = S(f = 0)/2$]. Plus le temps de régulation est long, plus le système

est inertiel. L'inertie du système karstique est liée à son organisation de stockage (mise en réserve) et de drainage.

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse des débits classés

Deux courbes des débits classés de la source Bittit ont été construites. La première correspond aux deux cycles hydrologiques à pluviométrie normale 09/1975–08/1977 et la seconde aux deux cycles hydrologiques situés en période de sécheresse 09/1995–08/1997.

Les graphiques des débits classés de l'émergence Bittit (Fig. 4) sont constitués de trois (période 1975–1977) à quatre (période 1995–1997) segments de droite. Cette organisation révèle que l'évolution des débits est différente entre période normale et période sèche. Il est important de tenter de comprendre les réalités hydrodynamiques sous-jacentes à ces différentes lois. L'interprétation ci-dessous distingue le comportement de l'émergence par rapport à son débit moyen pour les deux périodes étudiées. Le Tableau 1 résume les résultats obtenus.

Les changements des lois d'écoulement relevés au niveau des faibles débits s'expliquent par le passage d'un écoulement de décrue (segment 2, Fig. 4) à un écoulement de tarissement (segment 1, Fig. 4). La loi d'écoulement relative à ce premier segment de droite correspond à une loi de Maillet [10]. La pente plus importante du segment 1 de la période 1975–1977 montre qu'en période normale, les débits de tarissement sont moins dispersés.

Les segments 2–4 (période 1975–1977) et 2, 3 (période 1995–1997) représentent les débits de décrue. Le nombre de segments, plus grand en période normale, est une indication d'origines des apports, plus diversifiées qu'en période sèche.

Dans le domaine des débits élevés, une discontinuité avec augmentation de pente (segments 2 et 3, période 1975–1977), signifie une fuite d'eau vers l'extérieur du système et peut traduire l'existence probable de «trop-pleins» (par exemple un drain au-dessus de la source principale). En période sèche, on observe une discontinuité avec réduction de pente entre les segments 2 et 3. Cette particularité signifie un apport

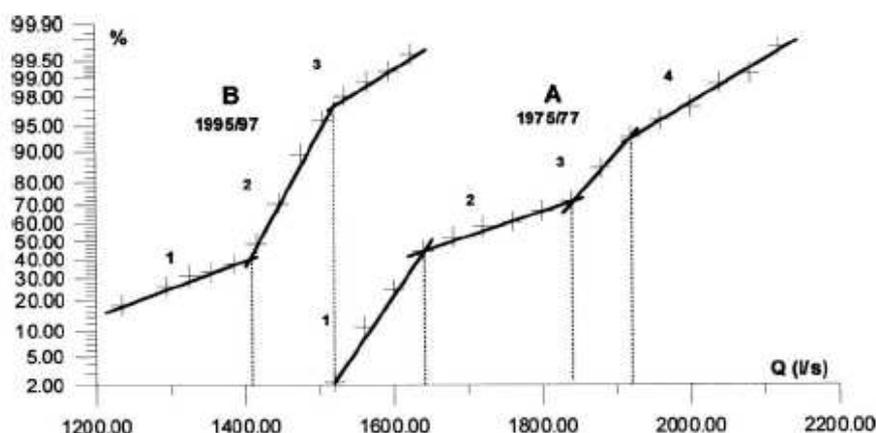


Fig. 4. Distribution des débits en période normale (A : 1975–1977) et en période sèche (B : 1995–1997).

Fig. 4. Discharges distribution during a normal period (A: 1975–1977) and a drought period (B: 95/97).

Tableau 1

Analyse de la distribution des débits ($l s^{-1}$)

Table 1

Analysis of the discharges ($l s^{-1}$) distribution

	Débit moyen ($l s^{-1}$) / Average discharge ($l s^{-1}$)	1 ^{er} intervalle / 1st interval	2 ^e intervalle / 2nd interval	3 ^e intervalle / 3rd interval	4 ^e intervalle / 4th interval
Chronique / Series 1975–1977	1737	< 1640	1640–1840	1840–1920	> 1920
Chronique / Series 1995–1997	1400	< 1400	1400–1515	> 1515	–

d'eau dans le système et peut traduire la mise en réserve temporaire d'un certain volume d'eau dans des structures annexes lors des crues et sa libération dès le début de la décrue.

La discontinuité entre les segments 3 et 4 de la période 1975–1977 traduit l'apport d'un volume d'eau extérieur, uniquement lors des périodes de crue (modification des limites du bassin, pluie, fonte de neige).

Durant la période 1975–1977, les débits de l'émergence étaient plus importants qu'actuellement et ils s'organisaient en quatre segments de droite. L'alimentation de la source était plus soutenue et probablement plus diversifiée avant les années 1980 que durant la période de sécheresse actuelle. En effet, si le niveau de l'aquifère baisse à cause d'une réduction des apports, des drains secondaires se retrouvent dénoyés et l'aire d'alimentation s'en retrouve réduite. Ceci se traduit sur le graphique des débits classés par la réduction des lois d'écoulement (trois segments au lieu de quatre) et par un changement vers des valeurs plus

faibles des limites des intervalles de débits. Les modifications d'impluvium envisagées ci-dessus sont des hypothèses, qui n'ont pu être vérifiées faute d'essais de traçage dans le système [3].

4.2. Analyse des courbes de récession

Le choix des différentes crues qui ont servi à l'analyse des courbes de récession a été fait de telle façon qu'elles représentent les amplitudes maximales de chaque cycle hydrologique et précèdent de longues périodes d'étiage (Fig. 5). Les coefficients de tarissement (Tableau 2) sont faibles ($1,5 \times 10^{-4} j^{-1}$) et semblent reductibles d'un tarissement à l'autre, traduisant ainsi la vidange lente des réserves et, par conséquent, la tendance au stockage. Les volumes dynamiques sont considérables et peuvent être estimés à près d'un milliard de mètres cube. Il est important de noter la variation de la réserve dynamique de la source entre 1977 et 1996. En effet, en l'espace de 19 ans, le système a perdu 179 millions de mètres

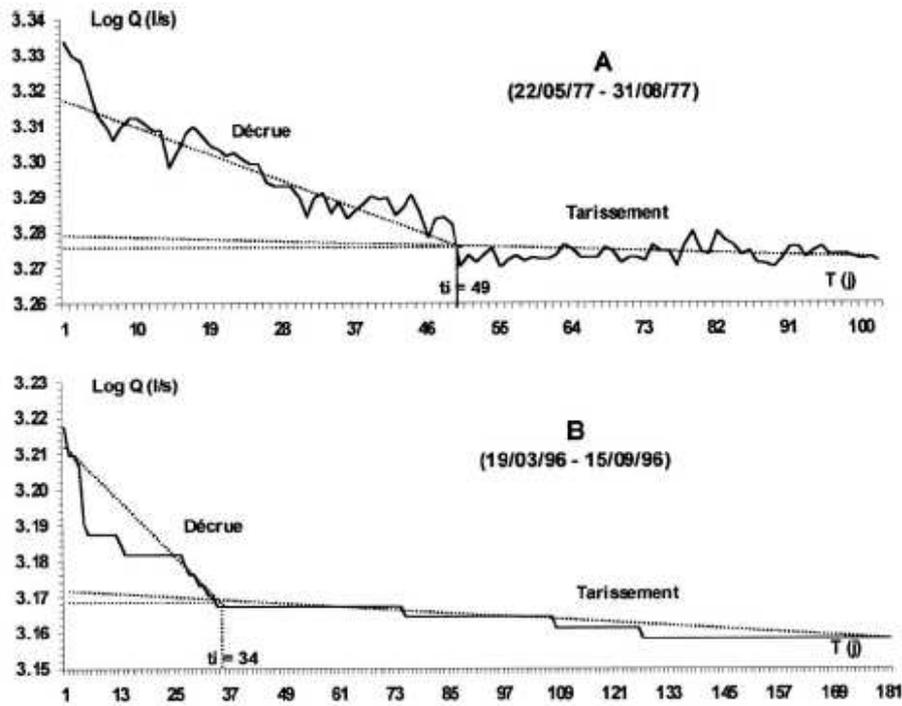


Fig. 5. Courbes de récession de la source Bittit en période normale (A) et en période sèche (B).

Fig. 5. Recession curves of the Bittit spring in a normal period (A) and in a drought period (B). 'décrue': flood recession; 'tarissement': baseflow.

Tableau 2
Analyse des courbes de récession

Table 2
Analysis of recession curves

Date début de décrue / Recession starting time	22/05/77	19/03/96
Durée de la décrue t_i (jour) / Flood recession (d)	49	34
Durée du tarissement (jour) / Baseflow recession (d)	> 53	147
Débit de début Q_0 de la décrue ($l s^{-1}$) / Flood starting discharge Q_0 ($l s^{-1}$)	2072	1630
Débit de base Q_{R0} du tarissement ($l s^{-1}$) / Baseflow discharge Q_{R0} ($l s^{-1}$)	1898	1477
q_0 ($l s^{-1}$) = $Q_0 - Q_{R0}$	174	153
Débit Q'_{R0} à la fin de la décrue ($l s^{-1}$) / Discharge Q'_{R0} at the end of the flood ($l s^{-1}$)	1886	1470
Coefficient de tarissement α (10^{-3}) / Recession coefficient α (10^{-3})	0,15	0,14
Volume dynamique V_R (Mm^3) / Dynamic volume V_R (Mm^3)	1086,3	907,2
Volume de décrue V_i (Mm^3) / Flood volume V_i (Mm^3)	0,7	0,5

cube, soit un volume moyen annuel de $9,4 Mm^3$. Cette perte est à mettre en relation directe avec la sécheresse qui sévit dans la région depuis 1981. L'absence de forage sur le causse ne permet pas de visualiser la réaction de la nappe à cette sécheresse. L'aquifère du Lias se prolonge sous la plaine du Sais, vers le nord (Fig. 1), où il devient captif sous les formations mio-plio-quadernaires. Le suivi piézométrique dans le forage 290/22 ($X = 497,5$; $Y = 353,8$) depuis février 1968 (Fig. 2B) montre une baisse régulière de la charge de la nappe depuis 1980 ($-2,7 m an^{-1}$ en moyenne).

La décrue est généralement étalée : 30 à 45 j pour la source étudiée. Ceci traduit une réponse retardée au signal d'entrée représenté par la pluie. Les durées des décrues peuvent varier d'une année hydrologique à une autre, en fonction de l'importance de l'impluvium et de sa répartition temporelle.

La source Bittit offre un système hydrogéologique étendu et complexe. Le volume d'eau soutenant le tarissement est très important ($907 Mm^3$ en 1996),

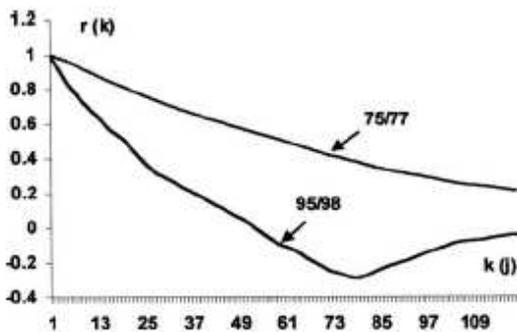


Fig. 6. Corrélogrammes simples des débits de la source Bittit ($m = 120$) (septembre 1975–août 1977 : $n = 731$ et décembre 1995–février 1998 : $n = 770$); l'abscisse est graduée en jours.

Fig. 6. Simple correlograms of the Bittit spring discharges ($m = 120$ d) (September 1975–August 1977: $n = 731$ and December 1995–February 1998: $n = 770$); the horizontal axis is in days.

ce qui implique un immense réservoir et place cet aquifère parmi les domaines peu karstifiés [12]. Les dolomies sableuses constitueraient un système poreux à pouvoir régulateur très élevé. Enfin, le volume de décrué ($V_i = 0,5 \text{ Mm}^3$) est insignifiant par rapport au volume dynamique V_r .

4.3. Analyse corrélatoire et spectrale

L'analyse est réalisée à court terme, avec un pas de temps journalier et une troncature de 120 j. La Fig. 6 montre les corrélogrammes simples des débits de la source durant les deux périodes d'observation. On note une décroissance assez lente, témoignant d'un effet mémoire important. Le système module le signal d'entrée; il a un effet mémoire qui est en relation avec le rôle régulateur des réserves. Durant la période 1975–1977, la décroissance est beaucoup plus lente ($r_k = 0,2$ pour $k = 117$ j) qu'au cours de la période 1995–1998 ($r_k = 0,2$ pour $k = 37$ j). Ceci traduit l'effet de la diminution de la réserve de la nappe sur l'amortissement du signal d'entrée. Ce résultat souligne l'hétérogénéité verticale des systèmes karstiques et montre l'influence significative de leur état de remplissage sur les relations entrées–sorties.

Les spectres de densité de variance de la source (Fig. 7) montrent des fréquences de coupure ou bandes spectrales étroites ($0,11 \text{ j}^{-1}$), et confirment qu'il s'agit d'un système inertiel. Les temps de régulation calculés sont de 53 j pour la période 1975/77 et 37 j pour la période 1995–1998. Ce résultat montre une réduction

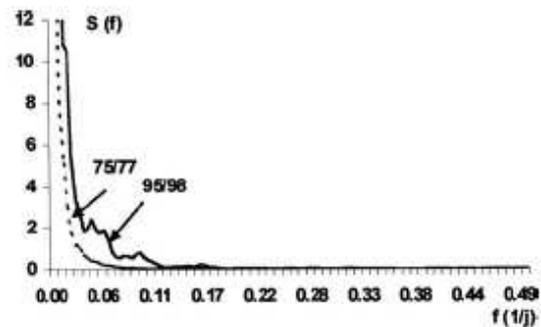


Fig. 7. Spectres de densité de variance des débits de la source Bittit ($m = 120$) (septembre 1975–août 1977 : $n = 731$ et décembre 1995–février 1998 : $n = 770$); l'abscisse est graduée en jours^{-1} .

Fig. 7. Spectral density functions of the Bittit spring discharges ($m = 120$ d) (September 1975–August 1977: $n = 731$ and December 1995–February 1998: $n = 770$); the horizontal axis is in days^{-1} .

sensible de l'inertie du système durant la période de sécheresse, due à la baisse des réserves.

Les paramètres obtenus en analysant les débits de la source montrent un effet mémoire grand à très grand (37 à 117 j), une bande spectrale étroite ($0,11 \text{ j}^{-1}$), et un temps de régulation de 37 à 53 j. Ces données peuvent être comparées à celles des aquifères carbonatés étudiés par ailleurs [6,11]. La source Bittit peut être classée parmi les aquifères à effet mémoire important de type Fontestorbes.

5. Conclusion

Les différentes méthodes hydrodynamiques utilisées dans cette étude montrent que le système hydrogéologique de Bittit est très capacitif: stockage important, débit régulé et soutenu durant toute l'année, écoulement relativement lent à cause de la présence à la base d'une assise de dolomies sableuses, karstification peu développée. Cependant, malgré la grande capacité de réserve de cet aquifère karstique, le débit à l'exutoire marque une tendance régulière et significative à la baisse, due à une longue période de sécheresse, qui réduit considérablement l'alimentation de l'aquifère.

L'analyse de deux chroniques de débits de l'émergence a permis de comparer le comportement différentiel de la source entre une période normale et une période sèche. Il en ressort que le déficit hydrique a produit une réduction de l'aire d'alimentation, une diminution des réserves estimée à 9,4 millions de mètres

cube par an en moyenne durant les deux dernières décennies et un changement dans les relations entrée–sortie du système, dû à l'influence significative de son état de remplissage, mettant en évidence son caractère non stationnaire.

Les méthodes mises en œuvre dans ce travail (étude des débits classés et des courbes de récession, analyses corrélatoires et spectrales) ont permis de mieux comprendre l'évolution d'un grand système karstique tel que celui de Bittit. D'autres méthodes, notamment les traceurs naturels [4,7], peuvent contribuer à cet objectif. Leur application fera l'objet d'un prochain travail.

Ainsi, le phénomène de sécheresse est devenu un paramètre dont il faut tenir compte pour une gestion durable de la ressource, notamment en zone semi-aride à climat irrégulier, où les changements climatiques tendent vers une aridification.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de l'Action intégrée France–Maroc AI 221/STU/00. Les auteurs tiennent à remercier chaleureusement le Pr. G. de Marsily et le second réviseur anonyme, pour l'ensemble de leurs remarques et suggestions, qui ont permis d'améliorer cet article.

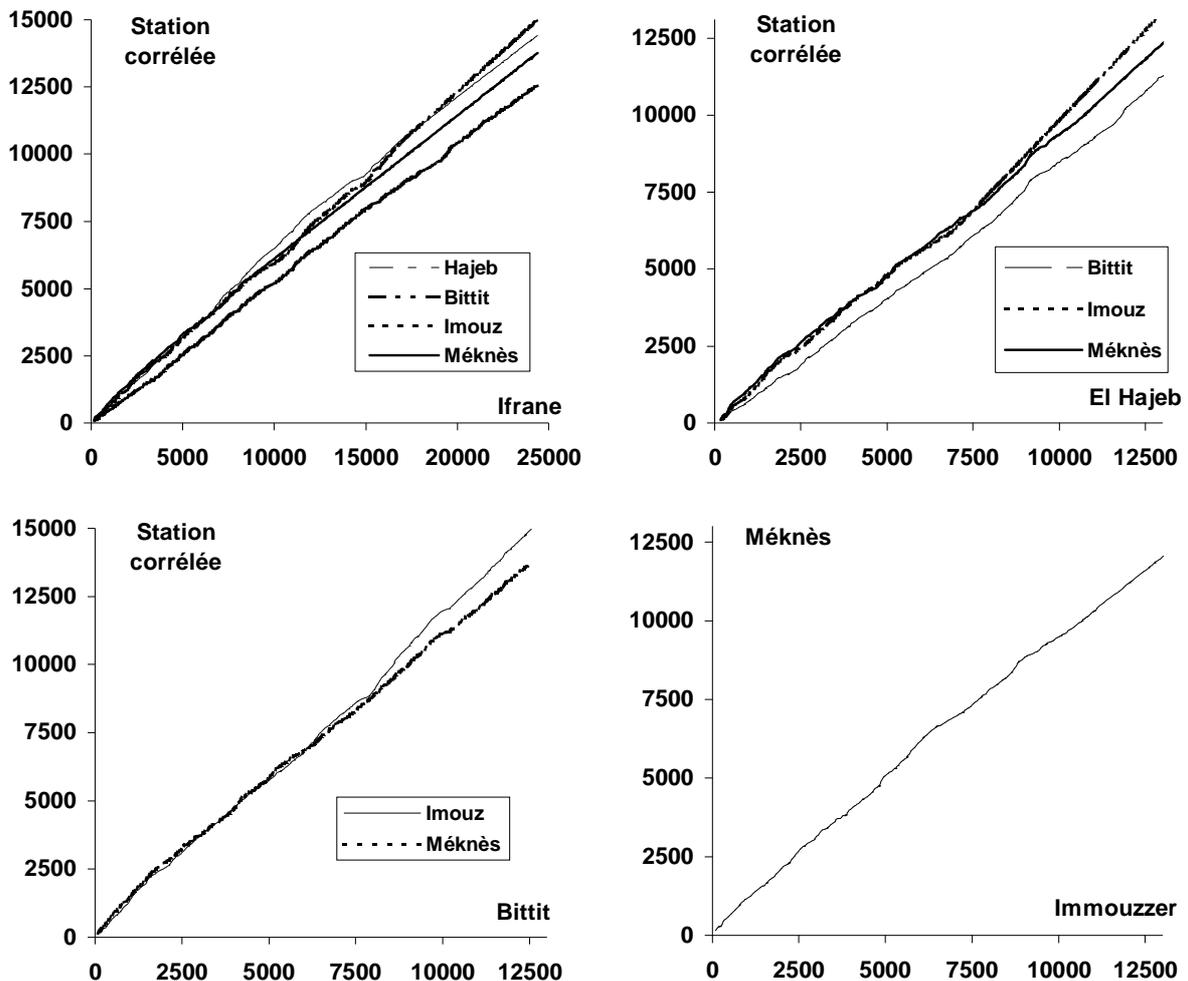
Références

- [1] F. Amraoui, L'aquifère karstique du Moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc), Proc. 7th Conf. On Limestones Hyd. and Fissured Media, Besançon, France, Sci. Tech. Environ. 113 (2001) 45–48 (Mém. H.S.).
- [2] F. Amraoui, L'aquifère karstique du Moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc), Les Cahiers de la Recherche, Éditions du Rectorat de Casablanca (Maroc), Série A, Sciences et Techniques 5 (2003) 81–92.
- [3] F. Amraoui, M. Razack, L. Bouchaou, Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco), Hydrol. Sci. J. 48 (6) (2003) 971–984.
- [4] C. Batiot, C. Emblanch, B. Blavoux, Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg^{2+}) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique, C. R. Geoscience 335 (2) (2003) 205–210.
- [5] A. Benjbara, Observations sur les sources de la plaine de Fès–Meknès, Rev. Eau et Développement, in: Direction de l'Hydraulique (Maroc), 1987, pp. 31–37.
- [6] L. Bouchaou, P. Chauve, J. Mudry, J. Mania, Y. Hsissou, Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride : cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc), J. Afr. Earth Sci. 25 (2) (1997) 225–236.
- [7] A.M. Delaunay, M. Calleja, J.-P. Faillat, S. Pistre, P. Cour, Traçage pollinique naturel dans un hydrogéosystème karstique thermo-minéral, C. R. Acad. Sci., Ser. IIA 331 (7) (2000) 467–472.
- [8] D. Labat, R. Ababou, A. Mangin, Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques, C. R. Geoscience 334 (8) (2002) 551–556.
- [9] M. Larocque, A. Mangin, M. Razack, O. Banton, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), J. Hydrol. 205 (3–4) (1998) 217–231.
- [10] E. Maillet, Essais d'hydraulique et fluviale, Hermann, Paris, 1905, 218 p.
- [11] A. Mangin, Étude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique, Ann. Spéléol. 26 (2) (1971) 283–329.
- [12] A. Mangin, Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, J. Hydrol. 67 (1984) 25–43.
- [13] A. Padilla, A. Pulido-Bosch, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, J. Hydrol. 168 (1995) 73–89.

ANNEXE 3 : CLIMATOLOGIE

Calculs des doubles cumuls

Afin de s'assurer du bon fonctionnement des stations, des calculs de double cumul ont été effectués entre les stations prises deux à deux. Les points des graphes de double cumul s'ajustent en une seule droite. Aucun changement de pente significatif traduisant l'apparition d'une dérive n'apparaît quelle que soit la station considérée. On peut donc admettre qu'aucun dérèglement n'est survenu dans la mesure de la pluie mensuelle durant la période d'observation (1975-01). Cette vérification étant faite, ces stations pourront servir a priori pour reconstituer les données manquantes sur telle ou telle station.



Graphiques des doubles cumuls mensuels (1975/01) entre stations

Présentation de la base de données de la pluviométrie

Les observations les plus anciennes remontent à janvier 1934 et elles se poursuivent jusqu'à décembre 2001 (68 ans). Dans le détail, les données récoltées auprès de la Direction de l'Hydraulique étaient les suivantes :

Station	Ifrane	Immouzer	El Hajeb	Bittit	Méknès
Période	09/34 à 10/01	01/34 à 09/87	01/34 à 12/93	04/78 à 12/01	01/34 à 08/84
Nombre d'années	67	54	53	24	51
Nb mois manquants	10	171	180	531	208

Données pluviométriques mensuelles disponibles

Reconstitution des données manquantes

A partir des valeurs mensuelles de la pluviométrie disponibles, les paramètres de corrélation et de régression linéaires entre stations ont été calculés. Ceci a permis de combler les lacunes des chroniques incomplètes pour la période 1934 - 2001. Le tableau suivant résume les résultats de ces corrélations :

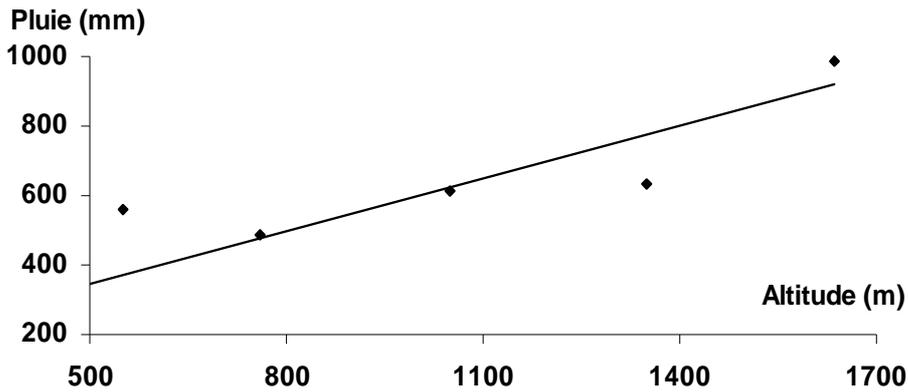
Stations	Nombre de couples	Coefficient de corrélation	Droite de régression
Ifrane - Immouzer	637	0.87	Imm = 0.528 Ifr + 9.8
Ifrane - El Hajeb	627	0.85	El Haj = 0.524 Ifr + 10
Ifrane - Bittit	283	0.92	Bit = 0.486 Ifr + 2.4
Ifrane - Méknès	599	0.9	Mék = 0.532 Ifr + 3.9
Immouzer - El Hajeb	645	0.88	El Haj = 0.857 Imm + 7.5
Immouzer - Bittit	114	0.91	Bit = 0.904 Imm + 5.6
Immouzer - Méknès	607	0,87	Mék = 0.843 Imm + 2.4
El Hajeb - Méknès	540	0.87	Mék = 0.816 El Haj + 3.9
El Hajeb - Bittit	189	0.90	Bit = 0.8 El Haj + 1.6
Méknès - Bittit	77	0.89	Mék = 0.923 Bit + 5.1

Résultats des corrélations entre stations

On constate que les coefficients de corrélation sont toujours élevés, traduisant une liaison significative entre les cinq stations. Les droites de régression sont du type $y = ax + b$, montrant le fait que les stations ne sont pas soumises exactement au même climat, en raison principalement des variations d'altitude. Les données manquantes ont été reconstituées grâce aux droites de régressions à constante nulle ($y = ax$). La station d'Ifrane a servi pour la reconstitution des lacunes des chroniques d'El Hajeb, de Bittit et de Méknès, par contre la station d'El Hajeb a servi pour la reconstitution des lacunes des chroniques d'Ifrane et d'Immouzer.

Détermination du gradient altimétrique des pluies

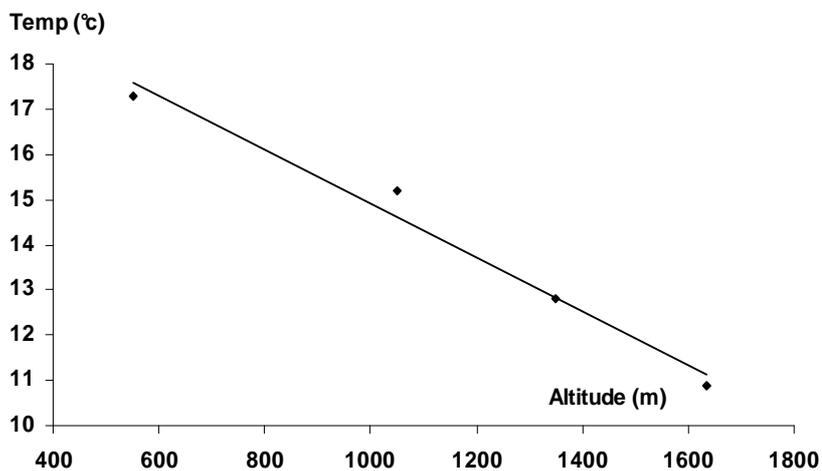
L'analyse des corrélations entre stations a déjà mis l'accent sur l'existence d'un accroissement de la pluviométrie avec l'altitude. La valeur du gradient altimétrique de précipitation est utile à déterminer, elle sert entre autres à tracer la carte des isohyètes qui permet le calcul des lames d'eau précipitées sur le massif. En se basant sur les moyennes pluviométriques interannuelles (1934-01) des cinq stations, on détermine un gradient approximatif de 51 mm pour 100 m d'élévation. Les pluies étant très irrégulières d'une année à l'autre, le gradient altimétrique est bien entendu très variable d'une année à l'autre et doit être déterminé sur la période où l'on désire évaluer une quantité d'eau précipitée. D'un autre côté, l'existence d'effets orographiques locaux, peut influencer dans la répartition spatiale de la pluviométrie, et par conséquent peut fausser la détermination d'un gradient altimétrique correct, d'où la nécessité de disposer d'un réseau dense de stations d'observation.



Variation de la pluviométrie avec l'altitude (1934/01)

Détermination du gradient altimétrique des températures

Les températures moyennes annuelles de quatre stations pour la période 1933-63 ont été reportées sur un graphe en fonction des altitudes respectives. La figure ci-dessous laisse clairement apparaître l'existence d'un gradient vertical de température à l'échelle du secteur d'étude qui est de l'ordre de $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une élévation d'altitude de 100 m.



Variation de la température avec l'altitude (1933-63)

Données thermométriques

Le tableau suivant regroupe les données de températures minimales, moyennes et maximales des quatre stations d'étude.

Station	Temp	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Ifrane	Min	-4	-2.6	0.2	2.2	4.8	8.7	12	12.2	8.9	4.9	1	-2.7	3.8
	Moy	2.2	3.7	6.4	8.8	11.6	16.4	21.2	21.2	17	11.8	7	3.2	10.9
	Max	8.4	10	12.6	15.4	18.4	24.2	30.3	30.1	25.1	18.7	13.1	9	17.9
Immouzer	Min	-0.1	0.9	3.2	5	7.2	11.2	14.9	14.9	11.9	8.3	4.3	0.9	6.9
	Moy	5.2	6.4	8.6	10.8	13	17.6	21.9	21.9	18.4	14.1	9.4	6	12.8
	Max	10.6	11.8	14	16.5	18.9	23.9	28.9	28.9	25	19.9	14.5	11.2	18.7
El Hajeb	Min	2.7	3.4	5.4	6.9	9.2	11	16.4	16.6	13.9	10.1	6.4	3.6	8.8
	Moy	7.6	8.8	11	13	15.6	19.3	24.6	24.8	21.2	16.5	11.8	8.5	15.2
	Max	12.6	14.3	16.7	19	22	27.6	32.9	33	28.5	22.9	17.3	13.4	21.7
Méknès	Min	4.9	5.5	7.5	9	11.3	14.3	17.1	17.6	15.4	12.3	8.7	6.2	10.8
	Moy	9.8	11.2	13.4	15.3	18	21.9	25.5	25.7	22.7	18.6	14.2	11	17.3
	Max	14.8	16.8	19.2	21.6	24.6	29.5	33.9	33.8	30	25	19.6	15.7	23.7

Données thermométriques des stations d'étude (1933/63)

Evapotranspiration potentielle (ETP)

Son estimation mensuelle est souvent faite par la formule empirique de **Thornthwaite** :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^a \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 0.49 + 1.8 \cdot 10^{-2} I - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} I^3$$

(a = 1.19 à Ifrane ; 1.33 à Immouzer ; 1.57 à El Hajeb et 1.8 à Méknès)

T = température moyenne annuelle du mois considéré

I = Indice thermique cumulé = $\sum i$

Il convient de multiplier les valeurs ainsi calculées par un terme correctif, selon le mois et la latitude. La région d'étude est en latitude Nord correspondant au 33^{ème} degré. Les tableaux suivants résument les résultats des calculs d'ETP pour les quatre stations météorologiques. Fonction directe de la température, l'ETP décroît avec l'altitude. Elle marque les valeurs les plus faibles au mois de Janvier (6 mm à Ifrane) et les plus fortes au mois de Juillet (152 mm à Méknès).

Ifrane	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
T (°C)	2.2	3.7	6.4	8.8	11.6	16.4	21.2	21.2	17	11.8	7	3.2	-
I	0.29	0.63	1.45	2.35	3.58	6.04	8.78	8.78	6.38	3.67	1.66	0.51	44.1
ETP	7.0	13.0	24.9	36.4	50.5	76.3	104	104	79.7	51.6	27.7	10.9	586
Ind cor	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETP cor	6	11	26	40	60	92	126	119	82	50	24	9	646

Imouze	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
T (°C)	5.2	6.4	8.6	10.8	13	17.6	21.9	21.9	18.4	14.1	9.4	6	-
I	1.06	1.45	2.27	3.21	4.25	6.72	9.36	9.36	7.19	4.8	2.6	1.32	53.6
ETP	15.4	20.3	30.0	40.6	52.0	77.8	104	104	82.5	57.9	33.8	18.6	637
Ind cor	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETP cor	14	17	31	44	62	93	127	120	85	56	30	16	695

El Hajeb	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
T (°C)	7.6	8.8	11	13	15.6	19.3	24.6	24.8	21.2	16.5	11.8	8.5	-
I	1.88	2.35	3.3	4.25	5.6	7.73	11.2	11.3	8.91	6.1	3.67	2.23	68.5
ETP	18.9	23.7	33.7	43.8	58.3	81.4	119	121	94.3	63.6	37.6	22.5	717
Ind cor	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETP cor	17	20	35	48	69	98	145	139	97	62	33	19	782

Méknès	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
T (°C)	9.8	11.2	13.4	15.3	18	21.9	25.5	25.7	22.7	18.6	14.2	11	-
I	2.77	3.39	4.45	5.44	6.95	9.36	11.8	11.9	9.88	7.31	4.86	3.3	81.4
ETP	22.4	28.4	39.2	49.8	66.7	95.0	125	127	101	70.8	43.5	27.5	796
Ind cor	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.2	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86	-
ETP cor	20	24	40	54	79	114	152	146	104	69	38	24	865

Calculs de l'évapotranspiration potentielle des quatre stations d'étude

Evapotranspiration réelle (ETR)

- Formule de Turc :

$$ETR = \frac{P}{(0.9 + P^2/L^2)^{0.5}} \quad L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

P = pluie annuelle en mm.
T = température moyenne annuelle en °c.

Le tableau suivant regroupe les données de calcul de l'ETR annuelle des quatre stations d'étude :

Station	T _{moy an} (°c)	L	P _{moy an} (mm) 1934-01	ETR (mm)	(ETR/P)
Ifrane	10.9	637	984	543	55 %
Immouzer	12.8	725	634	491	77 %
El Hajeb	15.2	856	612	515	84 %
Méknès	17.3	991	559	508	91 %

Résultats des calculs d'ETR annuelle selon la formule de Turc

- Formule de Coutagne : $ETR = P - \lambda P^2$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T} \quad \text{applicable si } 1/8\lambda < P < 1/2\lambda$$

P = pluie annuelle en m.
T = température moyenne annuelle en °c.

Le tableau suivant regroupe les données de calcul de l'ETR annuelle des quatre stations d'étude. Il en ressort que les résultats sont proches de ceux obtenus par la formule de Turc :

Station	T _{moy an} (°c)	λ	P _{moy an} (mm) 1934-01	ETR (mm)	(ETR/P)
Ifrane	10.9	0.430	0.984	568	58 %
Immouzer	12.8	0.386	0.634	479	75 %
El Hajeb	15.2	0.341	0.612	484	79 %
Méknès	17.3	0.310	0.559	462	83 %

Résultats des calculs d'ETR annuelle selon la formule de Coutagne

- Bilan hydrique de Thornthwaite :

Le sol va évaporer en fonction de son degré de saturation. L'infiltration efficace (recharge de l'aquifère) se produit quand l'ETR et la saturation du sol sont satisfaites. On fixe arbitrairement une RFU (réserve facilement utilisable) de 100 mm. Ce bilan hydrique est plus fiable que les méthodes précédentes, puisqu'on travaille à l'échelle mensuelle qui permet de tenir compte de certaines influences, qui peuvent être masquées à l'échelle annuelle.

Les tableaux suivants résument les calculs de l'ETR par la méthode du bilan hydrique de Thornthwaite. Il en ressort que la période de recharge de l'aquifère est : de huit mois à Ifrane (novembre à juin), de six mois à Immouzer et El Hajeb (décembre à mai) et de cinq mois à Méknès (janvier à mai). La période de recharge allant du mois de janvier au mois d'avril représente 75 % des apports à Ifrane, 88 % à Immouzer, 90 % à El Hajeb et 97 % à Méknès.

Ifrane	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Total
Pluie mm	128	122	114	111	68	28	9	12	34	79	124	155	984
ETP mm	6	11	26	40	60	92	126	119	82	50	24	9	646
P – ETP	122	111	88	71	8	-64	-117	-107	-48	29	100	146	-
Saturation	100	100	100	100	100	36	0	0	0	29	100	100	-
ETR mm	6	11	26	40	60	92	45	12	34	50	24	9	409
P – ETR	122	111	88	71	8	0	0	0	0	0	29	146	575
Recharge	134	116.5	99.5	79.5	39.5	4	0	0	0	0	14.5	87.5	575

Imouzzer	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Pluie mm	74	72	83	77	51	20	5	7	24	58	76	87	634
ETP mm	14	17	31	44	62	93	127	120	85	56	30	16	695
P – ETP	60	55	52	33	-11	-73	-122	-113	-61	2	46	71	-
Saturation	100	100	100	100	89	16	0	0	0	2	48	100	-
ETR mm	14	17	31	44	62	93	21	7	24	56	30	16	415
P – ETR	60	55	52	33	0	0	0	0	0	0	0	19	219
Recharge	39.5	57.5	53.5	42.5	16.5	0	0	0	0	0	0	9.5	219

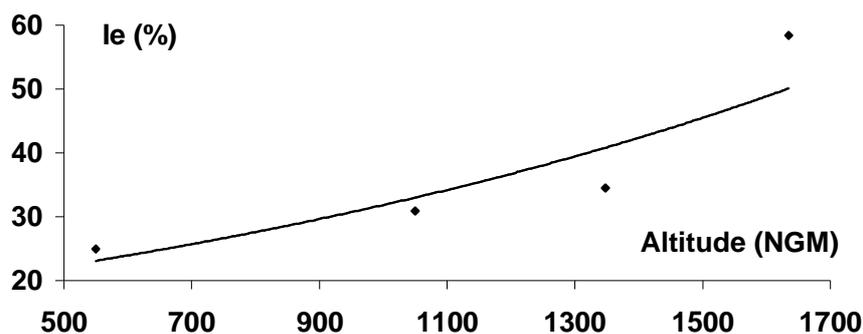
El Hajeb	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Pluie mm	76	68	80	78	50	19	4	5	21	52	75	84	612
ETP mm	17	20	35	48	69	98	145	139	97	62	33	19	782
P – ETP	59	48	45	30	-19	-79	-141	-134	-76	-10	42	65	-
Saturation	100	100	100	100	81	2	0	0	0	0	42	100	-
ETR mm	17	20	35	48	69	98	6	5	21	52	33	19	423
P – ETR	59	48	45	30	0	0	0	0	0	0	0	7	189
Recharge	33	53.5	46.5	37.5	15	0	0	0	0	0	0	3.5	189

Méknès	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sept	Oct	Nov	Déc	Total
Pluie mm	77	73	70	63	37	12	4	4	16	46	67	90	559
ETP mm	20	24	40	54	79	114	152	146	104	69	38	24	865
P – ETP	57	49	30	9	-42	-102	-148	-142	-88	-23	29	66	-
Saturation	100	100	100	100	58	0	0	0	0	0	29	95	-
ETR mm	20	24	40	54	79	70	4	4	16	46	38	24	419
P – ETR	52	49	30	9	0	0	0	0	0	0	0	0	140
Recharge	26	50.5	39.5	19.5	4.5	0	0	0	0	0	0	0	140

Résultats des calculs d'ETR par le bilan hydrique de Thornthwaite

Relation entre l'infiltration efficace et l'altitude

La figure suivante montre la relation qui semble exister entre l'infiltration efficace et l'altitude. Si on admet que l'altitude moyenne sur le Causse est de 1350 m, on en déduit une infiltration moyenne de l'ordre de 40 %. Cette valeur estimée est assez proche de celle adoptée lors de l'établissement du modèle global à réservoirs portant sur le Causse moyen atlasique (DRPE, 1989), où l'ETR moyenne calculée sur l'ensemble du Causse d'El Hajeb-Ifrane était de 566 mm, soit 68 % de la pluie moyenne estimée (832 mm), ce qui correspond à une infiltration efficace de 32 %.



Variation de l'infiltration efficace avec l'altitude

ANNEXE 4 : INVENTAIRE DES FORAGES PROFONDS

Indice 14

NIRE/14	X	Y	Z	Prof	Date
1161	481450	360850	565	115	nov-52
1181	478250	362900	508	104	nov-59
1247	471900	368800	482	776	avr-53
1248	468910	364100	514	732	mai-52
1249	473900	371780	340	1644	mai-52
1250	468630	369330	455	803	mars-53
1251	476430	368170	484	752	mai-53
1252	475000	360610	399	300	avr-52
1253	468390	365760	482	801	avr-52
1255	471430	370180	411	898	mai-53
1265	483600	360450	580	80	avr-67
2035	485250	368350	430	958	mai-82
2036	477600	367200	450	816	août-82
2048	475200	360350	405	484	avr-85
2082	475000	361020	390	452	oct-87
2097	473250	362500	345	409	janv-89
2145	478190	362710	509	73	avr-91
3771	474600	376600	325	103	juil-96
3778	477300	370500	420	81	juin-96
3780	476000	366300	480	108	juil-96
3869	480920	360670	560	111	janv-98
3903	476600	366400	480	170	févr-00
3920	469300	365900	495	102	oct-99
3922	480900	369400	465	210	oct-99
3947	480300	368850	440	176	nov-00
3948	476600	366400	480	170	déc-00

Indice 15

NIRE/15	X	Y	Z	Prof	Date
2345	542070	376500	460	690	nov-74
2347	501200	360950	652	620	déc-74
2360	498750	360950	620	682	sept-75
2361	528800	374200	480	630	oct-75
2362	536800	375700	480	760	juin-76
2363	538650	375600	473	701	août-76
2364	530500	373500	495	800	mai-77
2365	532400	372750	495	931	juil-77
2366	537400	364190	648	200	nov-77
2367	534500	364450	647	201	oct-77
2368	512900	360150	715	428	juin-78
2369	537400	364150	648	81	sept-77
2370	524350	382350	382	1516	janv-78
2371	526990	374090	468	666	janv-78
2372	525070	373830	453	775	avr-78
2375	528200	372000	513	767	avr-79
2379	535850	361050	705	150	mars-80
2392	530000	376250	455	903	avr-81
2393	525750	375700	436	757	nov-81
2429	538900	374750	492	586	déc-81
2430	522800	373200	459	601	déc-81
2431	502500	363050	632	802	févr-82
2432	500350	363000	632	900	mars-82
2438	514250	363150	688	946	oct-82
2444	526000	372350	480	705	juil-82
2445	533800	376800			
2487	523450	371400	467	605	août-83
2520	537600	360000	754	175	juil-84
2526	510300	362800	670	515	déc-84
2527	515350	369800	488	727	févr-85
2531	505400	371650	500	1041	juil-85
2553	508750	369050	585	851	juil-86
2557	508100	361300	675	108	mars-86
2558	510450	366850	622	655	oct-86
2572	527250	360300	694	174	avr-86
2592	528000	360850	685	220	févr-88
2593	530850	361200	670	160	mars-88
2601	540650	376500	495	812	avr-88
2602	528100	374950	475	807	mai-88
2608	531250	377000	446	911	juin-88
2609	530370	362650	660	130	mars-88
2613	533000	366000			
2617	529000	362200	667	166	nov-88
2621	526400	359950	695	148	août-89
2623	505250	364850	620	900	avr-89
2624	521100	368150	523	540	juin-89
2625	546150	369350	630	667	juin-89
2626	537750	367100	600	366	oct-89
2627	547600	374400	440	704	oct-89
2631	526500	368600	538	715	janv-90
2632	517150	366400	566	487	mars-90

Indice 15

NIRE/15	X	Y	Z	Prof	Date
67	537350	364150	655	160	mars-48
156	553500	366800	640	252	mars-51
157	493250	360790	600	70	
288	540250	364200	658	261	mai-51
290	538960	370960	559	400	août-51
555	536700	368600	581	244	nov-51
732	503880	367740	573	1135	1955
920	492830	365020	575	1172	1955
1224	534630	364500	651	131	juin-52
1225	541800	366980	617	311	nov-50
1539	511240	371280	445	755	1952
1566	542300	381400	410	900	1931
1929	517900	383040	435	2288	1953
1930	531560	385740	805	600	1953
1933	498590	372290	538	1200	1952
2060	541200	375800	505	673	janv-59
2168	540250	376700	484	752	juil-64
2313	540250	375300	496	690	août-74

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

Indice 15

N1RE/15	X	Y	Z	Prof	Date
2639	533400	365850	630	104	févr-90
2661	498080	363080	598	1105	mai-90
2670	525750	371440	480	100	sept-90
2725	534950	375300	447	1000	avr-91
2732	533950	376820	452	1433	avr-91
2742	510330	362300	675	94	mai-91
2760	522600	359800	709	95	mai-91
2792	515420	363000	696	150	nov-91
2800	523500	364900	678	118	déc-91
2884	529000	365900	610	150	
2892	528570	365470	626	255	oct-92
3029	485930	375910	303	792	janv-94
3031	498290	368220	545	102	août-94
3060	511550	372550	430	375	mars-95
3147	515300	369350	500	61	mars-96
3148	497200	368800	530	150	août-96
3203	532100	365600	628	151	avr-97
3237	500950	365150	609	895	déc-98
3240	528200	361600	680	153	oct-98
3258	522550	361460	701	121	mars-99
3261	499000	378600	800	282	mai-99
3288	532400	364350	640	130	mars-00
3305	501600	375400	605	160	01-sept
3306	533350	365850	630	120	avr-01
3312	515350	369820	488	727	juin-01
3313	510450	366870	622	654	avr-01
3314	536300	364300	668	141	août-01
3315	520600	360000	712	120	août-01
3316	522550	361460	701	120	oct-01
3317	525400	361000	705	193	oct-01
3319	524800	368500	520	286	nov-01
3321	529450	365450	627	240	01-oct
3325	526200	373000	475	588	janv-02
3326	511100	370000	476	588	01-nov
3332	520600	360010	712	96	mars-02

Indice 22

N1RE/22	X	Y	Z	Prof	Date
48	494260	349290	750	161	oct-49
136	494750	352750	675	60	oct-49
137	494500	346100	787	165	1949
184	515370	351230	873	40	août-50
185	515460	351070	880	80	août-50
186	515240	351140	870	20	janv-50
187	515400	351190	871	280	1950
188	515300	351170	870	10	1951
189	493590	348390	741	229	mai-51
198	491840	345600	768	120	janv-51
199	495100	346350	780	120	août-50
201	494010	351420	707	300	juil-51
213	491860	344090	769	120	nov-51
214	494170	345600	787	74	nov-51
215	492250	352900	702	288	nov-51
217	493750	347900	743	142	sept-51
290	497800	353850	692	1072	sept-57
460	507900	333900	1292	40	nov-53
522	513500	332800	1382	70	mars-54
526	498180	347550	765	106	août-54
527	494150	345350	780	120	déc-54
553	497830	358300	655	560	août-57
554	498910	356950	668	1160	déc-57
599	500030	353950	692	86	févr-67
600	500000	353950	692	32	janv-67
601	491150	347220	750	71	avr-67
604	486600	345100	767	95	févr-67
605	493630	359100	635	80	mai-67
852	502400	359550	665	559	janv-75
896	501200	356500	685	447	nov-75
908	498100	347630	763	101	1977
914	494300	346150	775	900	mars-57
915	491600	339140	870	603	1957
916	493700	352200	710	824	oct-58
917	498400	351400	720	925	nov-58
974	507100	358100	695	366	févr-79
1014	502800	341550	1075	150	juil-81
1016	528700	323650	1675	150	oct-81
1027	536300	344800	1390	150	mai-82
1029	514150	353150	855	105	août-82
1030	510550	350400	858	175	août-82
1031	519000	350050	920	70	août-82
1032	516900	347650	988	160	août-82
1033	515900	344300	1090	160	août-82
1034	517370	351950	915	73	août-82
1035	514850	351100	872	105	août-82
1037	519650	355650	760	60	août-82
1038	519850	355250	760	45	sept-82
1052	491750	344350	780	150	avr-83
1076	486600	339450	828	105	juin-83
1077	489450	340400	825	96	juil-83
1079	528250	325150	1650	81	août-84
1080	490000	357450	640	604	juin-84
1087	537100	356300	865	182	juil-84
1088	530450	354570	875	87	juil-84

Indice 21

N1RE/21	X	Y	Z	Prof	Date
561	475400	355500	457	300	
769	482700	328000	1149	125	juin-86
771	485500	332550	1009	91	mai-86
772	474950	358900	415	383	nov-88
773	475100	358470	413	297	nov-89
823	482800	337900	910	163	janv-96
847	483400	348200	730	62	mai-97
854	482300	329800	1075	141	avr-99
855	475200	346350	720	142	avr-99
866	483350	347600	730	414	août-01
868	473450	324750	1098	98	sept-01
870	485400	326900	1190	185	oct-01
873	468500	358550	543	95	févr-02
875	482000	348300	725	90	déc-01

Indice 22

N1RE/22	X	Y	Z	Prof	Date
1089	530440	354570	875	152	août-84
1090	529650	353770	878	92	août-84
1091	536000	355630	872	60	août-84
1092	533500	356550	822	160	août-84
1093	537650	355450	890	151	août-84
1094	536200	355550	878	98	sept-84
1095	537300	358800	782	195	sept-84
1096	535750	358800	777	57	sept-84
1097	525100	323900	1635	101	sept-84
1098	529350	324000	1675	105	sept-84
1099	528550	329450	1609	137	sept-84
1100	528500	326400	1655	96	sept-84
1102	525200	326750	1595	150	sept-84
1103	521700	334150	1367	84	oct-84
1127	525140	323900	1635	57	mars-85
1130	505100	335600	1275	245	juil-85
1131	517500	338000	1285	195	juil-85
1132	518350	341200	1190	182	août-85
1133	509950	345470	1060	126	août-85
1134	523820	355970	770	165	août-85
1135	528650	322640	1668	413	1985
1144	510950	330250	1370	85	oct-85
1145	512950	331300	1380	139	nov-85
1146	509550	328550	1400	127	nov-85
1147	502500	337750	1250	50	nov-85
1149	511600	336600	1260	151	oct-85
1150	511850	355500	745	128	oct-85
1151	529450	335450	1508	143	nov-85
1152	528600	338600	1385	211	nov-85
1153	527400	342650	1295	135	nov-85
1154	527100	343450	1260	163	nov-85
1156	533500	338150	1500	272	déc-85
1168	495050	343350	800	122	mars-86
1169	495200	344070	808	149	mars-86
1171	492900	345250	780	95	mars-86
1172	497150	343400	793	132	mars-86
1173	496250	341530	850	145	mars-86
1174	499250	343800	828	127	mars-86
1175	527350	349200	1150	155	mars-86
1176	525100	348450	1090	91	avr-86
1177	525450	350210	1048	120	avr-86
1178	524900	351250	1010	109	juin-86
1179	531370	349500	1225	73	avr-86
1180	530750	341550	1360	193	avr-86
1181	527250	334800	1473	139	avr-86
1182	522900	328650	1570	163	avr-86
1185	517200	353600	860	169	avr-86
1186	512240	351720	860	125	avr-86
1187	525400	346800	1194	79	avr-86
1188	491450	343250	754	175	mai-86
1189	492570	342650	760	155	mai-86
1190	493920	340670	840	121	mai-86
1191	492600	333120	1110	76	mai-86
1192	493120	337330	918	183	mai-86
1193	490950	343850	762	135	mai-86

Indice 22

N1RE/22	X	Y	Z	Prof	Date
1194	488850	341870	788	145	mai-86
1198	490000	335850	960	85	juin-86
1199	487200	328880	1143	165	juil-86
1207	521200	337200	1295	192	août-86
1208	515350	347850	1020	105	sept-86
1209	515200	346500	1068	195	juin-86
1211	534100	328750	1720	157	juil-86
1230	524900	359700	703	170	mai-88
1233	522750	356800	735	130	mai-88
1234	522100	358900	724	150	juin-88
1236	522670	358150	730	150	oct-88
1237	512200	356550	766	198	oct-88
1238	524000	358950	713	140	oct-88
1258	515700	335150	1312	110	sept-90
1265	511950	336500	1245	103	oct-90
1296	533100	353350	1010	88	sept-89
1308	496650	348750	742	66	mars-91
1310	508450	357200	718	73	avr-91
1322	511450	357350	759	102	nov-91
1323	536000	347890	1360	180	nov-91
1324	536020	347900	1360	200	oct-91
1325	536500	347600	1360	85	oct-91
1332	499900	353900	692	99	nov-91
1333	491200	343250	750	159	déc-91
1335	510300	335600	1275	100	mai-92
1339	497910	354000	695	65	déc-91
1340	502500	359200	667	56	déc-91
1341	517200	358600	752	93	déc-91
1342	493600	348350	743	114	déc-91
1346	488800	341850	792	121	avr-92
1351	531200	351200	1060	163	mars-92
1360	529550	353750	877	235	nov-92
1361	517300	354970	830	213	août-92
1365	527400	352200	1030	169	nov-92
1380	529500	350750	1090	103	déc-92
1404	494700	348900	753	152	sept-93
1405	491900	345500	770	158	sept-93
1406	491950	345700	764	150	oct-93
1407	510250	345500	1050	153	sept-93
1411	533300	354300	956	177	nov-93
1412	524850	323750	1633	100	oct-93
1417	533600	354500	940	181	janv-94
1419	491350	348300	735	120	déc-93
1420	494900	346350	780	135	déc-93
1424	535500	355800	900	191	déc-93
1439	527050	326420	1645	102	avr-94
1448	529100	334100	1515	100	juil-94
1459	527350	343500	1260	150	nov-94
1464	514400	351500	869	156	nov-94
1474	528000	326000	1640	180	août-85
1496	496600	325300	1280	95	août-95
1497	486300	325400	1280	91	sept-95
1500	486100	327600	1150	199	sept-95
1501	490100	352250	706	133	juil-95
1521	485850	325700	1270	97	sept-95

Indice 22

N ^o RE/22	X	Y	Z	Prof	Date
1526	509900	349800	865	166	déc-95
1531	513450	333400	1370	150	déc-95
1533	503850	339850	1140	119	juin-96
1534	511650	350100	940	157	mars-96
1536	534500	352950	1080	180	avr-96
1537	523800	325200	1670	145	août-96
1540	523250	358850	722	110	sept-96
1541	519650	334600	1390	127	mai-96
1543	511700	349850	930	105	août-96
1551	516800	351450	895	224	janv-97
1557	503350	346050	890	68	mai-97
1559	524800	329850	1490	90	avr-97
1574	536700	325000	1750	100	août-97
1575	522900	328800	1570	128	sept-97
1580	525400	346800	1195	235	nov-97
1581	525300	326750	1595	104	oct-97
1590	524800	329840	1490	100	mai-98
1593	519650	334600	1390	150	juil-98
1660	524000	326100	1670	250	nov-98
1748	515000	346150	1065	238	déc-98
1750	495950	345000	804	210	janv-99
1751	500800	344900	825	210	févr-99
1754	514600	353700	849	216	févr-99
1756	504050	347950	800	103	mars-99
1757	495820	342800	820	187	nov-99
1759	498650	346540	770	162	mars-99
1760	498100	342650	830	162	avr-99
1761	518700	354850	825	187	mars-99
1764	513450	333400	1370	145	avr-99
1765	516000	346150	1065	196	juil-99
1767	526000	338750	1440	265	avr-99
1768	527250	337550	1380	120	mai-99
1770	527250	337550	1380	122	juil-99
1771	495650	345950	790	170	août-99
1773	522900	347500	1100	130	juin-99
1776	509750	347250	1035	121	oct-99
1782	512500	345250	1075	201	nov-99
1783	503750	345950	870	81	nov-99
1786	516400	336200	1310	100	nov-99
1787	497150	345250	797	146	janv-00
1790	535700	357200	825	190	déc-99
1793	486600	328300	1150	150	mars-00
1794	528350	323700	1660	132	févr-00
1795	487700	329000	1145	150	avr-00
1796	522900	347450	1120	132	nov-00
1797	525100	348450	1090	110	févr-01
1801	493990	351430	707	315	juin-00
1808	524450	350200	1048	100	janv-01
1814	505700	351650	762	136	mars-01
1815	498650	346540	770	125	mai-01
1816	502150	340600	1093	108	avr-01
1823	514600	353700	849	220	mai-01
1827	535700	357200	825	200	août-01
1828	534200	348900	1170	150	juin-01
1829	505000	337600	1190	130	juin-01

Indice 22

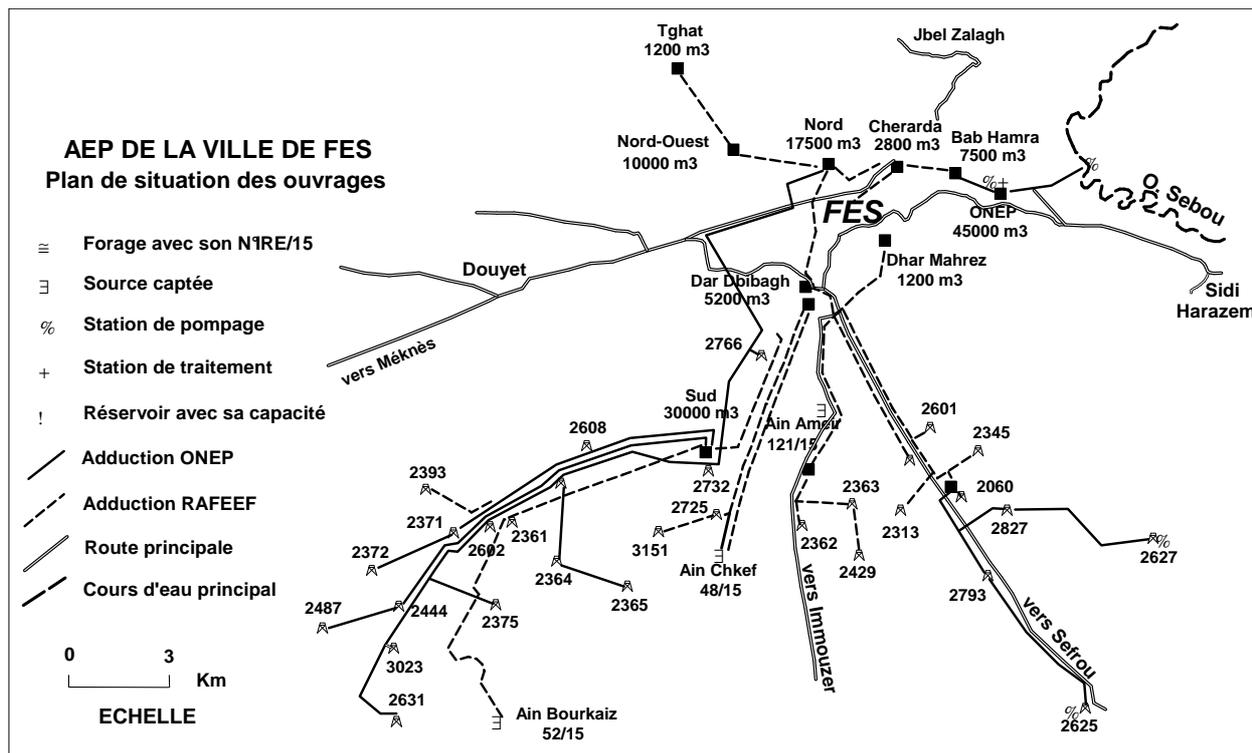
N ^o RE/22	X	Y	Z	Prof	Date
1830	510900	333300	1290	150	juil-01
1831	536600	352450	1100	96	juil-01
1837	518700	354850	825	180	sept-01
1854	509000	351200	810	110	déc-01
1855	515800	342800	1190	170	déc-01
1863	534400	353900	1000	180	févr-02
1864	509760	347250	1035	116	févr-02
PBF3/22	486250	333250	975	466	1957

ANNEXE 5 : ALIMENTATION EN EAU POTABLE DES AGGLOMERATIONS DU SAÏS ET DU CAUSSE

Les informations concernant l'AEP de la région d'étude ont été fournies par les deux Directions Régionales de l'ONEP de Méknès et de Fès. Un complément a été fourni par l'agence du bassin hydraulique du Sebou.

* Alimentation en eau potable de la wilaya de Fès

En 2002, les besoins en eau potable de la wilaya de Fès se chiffraient entre 2500 l/s en moyenne et 3000 l/s en pointe. L'approvisionnement en eau était assuré à partir de :



Carte de la situation des ouvrages et des adductions de l'AEP de la ville de Fès

- La prise sur l'oued Sebou et le traitement dans une station dont la capacité est de 1700 l/s, mais exploitée actuellement à environ 500 l/s.
- 27 forages profonds, dont 17 de l'ONEP (Office National de l'Eau Potable) et 10 de la RADEEF (Régie autonome de distribution de l'eau et de l'électricité de la ville de Fès). Le débit équipé de l'ensemble des forages de l'ONEP est de 1790 l/s. En 2002, ces ouvrages ont produit un débit moyen de 1142 l/s et un débit de pointe de 1247 l/s. Les forages de la RADEEF ont produit quant à eux durant la même année un débit total de 580 l/s.
- 3 sources (Ain Chkef, Ain Amer et Ain Bourkaiz)

Les projections des besoins moyens en eau potable de la wilaya de Fès pour les horizons 2010 et 2020 ressortent les débits respectifs de 3160 et 3830 l/s, soit des volumes respectifs de 100 et 120 Mm³/an. Ces projections se basent sur une dotation moyenne de 120 l/habitant/jour.

La ressource mobilisée actuellement peut satisfaire les besoins jusqu'à l'horizon 2010. Au delà le recours aux eaux de surface à partir de la retenue du barrage Idriss 1^{er} s'impose. La source artésienne Skhounate située en bordure de l'oued Sebou à environ 25 km de la ville de Fès constitue également une source d'approvisionnement pour l'AEP de la ville à moyen terme. En effet, cette source a un débit constant de 800 l/s et une bonne qualité comparable à celle de Sidi Harazem.

Il est à signaler également que l'ONEP a relié le réseau d'adduction d'eau potable de la ville de Fès à celui de Méknès afin de combler le déficit constaté au niveau de cette dernière. Ainsi, quatre forages de la région de Ras El Ma (2444, 2487, 2602 et 3023 de l'indice 15) peuvent contribuer au besoin à l'alimentation de la ville de Méknès à hauteur de 400 l/s. Le tableau suivant regroupe les informations sur les forages captés actuellement pour l'AEP de la Wilaya de Fès :

N°IRE /15	Prof (m)	Date	P _{initiale} (bar)	P ₂₀₀₂ (bar)	Temp (°c)	Cond (µs/cm)	Q _{équipé} (l/s)	Q _{exploité} moy en 2002	Q _{exploité} pointe 2002
2364	800	05/77	13,1	10	29	677	110	75	77
2365	931	07/77	12,6	7,4	32,4	740	90	34	35
2371	666	01/78	5	13	29	382	130	98	118
2372	775	04/78	14,5	14,5	29	546	170	110	112
2375	767	04/79	10,7	14	28,8	642	85	53	54
2392	903	04/81	15,7	8,5	30	690	120	88	90
2444	705	07/82	12,4	14	28	550	160	104	105
2487	605	08/83	14,7	11,5	31	675	120	92	130
2602	807	05/88	13,6	13	30	648	130	87	108
2608	911	06/88	14	13,5	-	-	100	65	65
2631	715	01/90	7,2	15,5	21	623	120	90	91
2766	1468	06/91	13,9	7	34	689	85	52	54
2793	129	11/91	-	-	19	598	70	69	71
3023	635	04/94	10,9	11	23,5	530	120	41	45
2625	667	06/89	-	Pompe	21	550	40	1	2
2732	1433	04/91	14,7	-	34,1	637	Arrêt	-	-
2627	704	10/89	3,4	Pompe	19,5	584	70	-	-
2827	681	02/92	6,6	7	18,1	540	70	82	89
Total							1790	1141	1246

Données concernant les forages de l'ONEP servant à l'AEP de la Wilaya de Fès

* Alimentation en eau potable de la ville de Méknès

La gestion du service de l'eau potable est assurée simultanément par l'ONEP et la RADEM au niveau de la production. La distribution est assurée par la RADEM. Les besoins de pointe de la ville de Méknès (incluant Toulal, Haj Kaddour et Wislane) sont de 1350 l/s en l'an 2003. Il est prévu qu'ils atteignent 1465 l/s en l'an 2010. La capacité de production actuelle permet de satisfaire les besoins en période de pointe jusqu'à l'horizon 2010. Cette production est répartie comme suit :

- **ONEP** : 950 l/s répartis comme suit :

- 250 l/s à partir des forages du champ captant d'El Haj Kaddour
- 300 l/s à partir du Saïs
- 400 l/s à partir de Rass El Ma (plaine de Fès)

- La non pérennité des ressources (baisse du niveau de la nappe et des débits des émergences) ;
- Apparition épisodique d'une forte turbidité lors des grandes averses nécessitant l'installation d'une station de traitement ;
- La production est assurée par deux opérateurs dont les intérêts et la vision ne sont pas forcément les mêmes. Exemple : la régie disposant de ses propres ressources, n'utilise les eaux produites par l'ONEP que comme appoint pour la satisfaction des besoins de la ville. Par conséquent, le taux d'utilisation de la production ONEP demeure tributaire des besoins de la régie chargée de la distribution.

Pour répondre aux besoins en eau de la ville à moyen et à long terme, l'ONEP avait programmé la réalisation d'une adduction à partir des eaux de surface de la retenue de Sidi Echahed, pour un débit global de 2 m³/s. La réalisation de ce projet a été avortée à cause de la forte salinité de l'eau de la retenue. En contre partie, quatre forages appartenant à la ville de Fès ont été équipés et une conduite longue de 55 km a été posée afin de renforcer l'alimentation en eau de la ville pour un débit total de 400 l/s.

*** Alimentation en eau potable des centres du plateau de Méknès**

Centre de Sebaa Ayoun

La gestion du service de l'eau potable dans le centre est assurée par l'ONEP au niveau de la production et de la distribution. Les besoins de pointe de ce centre en 2003 sont de 15 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 26 l/s en l'an 2010. La capacité de production est fournie par le Complexe Adducteur de Saïs qui permettra de satisfaire les besoins du centre au delà de l'an 2010. La population du centre est de 23 400 habitants en 2003 et le taux de branchement est de 60 %. La capacité de stockage est de 350 m³ et le rendement du réseau est de 74 %. Le réseau d'assainissement est de type pseudo-séparatif avec un taux de raccordement de 80 % ; le reste de la population utilise des puits perdus. Les eaux usées récoltées sont rejetées à l'état brut dans la nature.

Centre d'Aïn Taoujdate

La gestion du service de l'eau potable dans le centre est assurée par l'ONEP au niveau de la production et de la distribution. Les besoins de pointe de ce centre en 2003 sont de 37 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 46 en l'an 2010. La production nécessaire est fournie par le complexe adducteur de SAÏS qui permettra de satisfaire les besoins en eau potable au delà de l'an 2010. La population du centre est de 27 600 habitants en 2003 et le taux de branchement est de 92 %. La capacité de stockage est de 1500 m et le rendement réseau atteint 75 %. Le réseau d'assainissement est de type unitaire et couvre 60 % du centre. Quelques quartiers du centre sont assainis par des fosses septiques. Les eaux usées sont rejetées sans traitement dans la nature. Cette situation s'est aggravée par les rejets saisonniers des huileries dans le réseau, ce qui se répercute sur la qualité des eaux de la retenue du barrage Sidi Echahed.

Centre de Boufekrane

La production et de la distribution de l'eau potable est assurée par l'ONEP. Les besoins de pointe du centre en l'an 2003 sont de 11 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 16 l/s en l'an 2010. La capacité de production actuelle est de 35 l/s, elle permettra la satisfaction des besoins jusqu'à l'horizon 2015. La population du centre est de 9 200 habitants en l'an 2003 et le taux de branchement est de 90 %. La capacité de stockage est de 250 m³ et le rendement du réseau atteint 85 %. Le réseau d'assainissement est de type unitaire et pseudo séparatif , et le taux de raccordement est de 80 %. Les eaux usées sont rejetées dans l'Oued Boufekrane sans aucun traitement.

*** Alimentation en eau potable des villes du Causse**

Ville d'El Hajeb

La gestion du service de l'eau potable dans le centre d'EL HAJEB est assurée par l'ONEP au niveau de la production et de la distribution. Les besoins de pointe de ce centre en 2003 sont de 48 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 61 l/s en l'an 2010. La capacité de production actuelle est de 100 l/s. Elle permettra de satisfaire les besoins de pointe du centre en eau potable au delà de l'an 2010. La population du centre est de 35 100 habitants en 2003 et le taux de branchement est de 84 %. La capacité de stockage est de 3000 m³ et le rendement du réseau est de 64 %. Le réseau d'assainissement est de type unitaire et couvre 60 % du centre. Les eaux usées sont réutilisées à l'état brut pour l'irrigation.

Centre d'Agourai

La gestion du service de l'eau potable dans le centre est assurée par l'ONEP au niveau de la production et de la distribution. Les besoins de pointe de ce centre en 2003 sont de 15 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 24 l/s en l'an 2010. La capacité de production installée actuellement est de 34 l/s. Les besoins de pointe seront satisfaits jusqu'à l'horizon 2020. La population du centre est de 16 700 habitants en 2003 et le taux de branchement est de 63 %. La capacité de stockage est de 1300 m³ et le rendement du réseau est de 72 %. Le centre est doté d'un réseau d'assainissement de type unitaire en état moyen avec un taux de raccordement de 40 %. Les rejets des eaux usées sont effectués dans l'Oued sans aucun traitement.

Ville d'Ifrane

La gestion du service de l'eau potable dans le centre est assurée par l'ONEP au niveau de la production et de la distribution. Les besoins de pointe de ce centre en 2003 sont de 96 l/s. Il est prévu qu'ils atteignent 120 l/s en l'an 2010. La capacité de production actuelle permettra de satisfaire les besoins du centre au delà de l'an 2020. La population du centre est de 15 400 habitants en 2003 et le taux de branchement est de 92 %. La capacité de stockage est de 4 430 m³ et le rendement du réseau est de 62 %. Le Centre dispose d'un réseau d'assainissement de type unitaire en état moyen avec un taux de raccordement de 65 %. Les rejets sont effectués dans l'Oued Tizquit sans traitement.

* Récapitulatif des besoins et des prélèvements pour l'AEP

Le tableau suivant récapitule les besoins actuels et futurs ainsi que la production en eau potable de l'ensemble de la région d'étude. Il en ressort que la pression est forte sur les eaux souterraines et notamment sur la nappe profonde. Les volumes prélevés sur la nappe du Lias en 2002 atteignent 101 Millions de m³, dont 54 Mm³ pour la wilaya de Fès, 41 Mm³ pour la wilaya de Méknès et 6 Mm³ pour le causse moyen Atlasique.

REGION	BESOINS EN 2002	PRODUCTION EN 2002	BESOINS EN 2010
Wilaya de Fès (y compris les centres de la plaine)	2500 l/s	2222 l/s dont 1720 l/s à partir de la nappe du Lias et le reste par la prise sur le Sebou	3160 l/s
Wilaya de Méknès (y compris les centres du plateau)	1350 l/s	1290 l/s dont 800 l/s à partir des sources et le reste à partir des forages profonds	1465 l/s
Causse moyen Atlasique (Ifrane, Immouzer, El Hajeb et Agourai)	230 l/s	200 l/s produits à partir des sources et des forages et des puits captant le Lias	250 l/s
TOTAL	4080 l/s	3712 l/s dont 3210 l/s à partir de l'aquifère du Lias	4875 l/s

Récapitulatif des besoins et des prélèvements pour l'AEP du secteur d'étude

ANNEXE 6 : METHODES DE TRAITEMENT DU SIGNAL

A - ETUDE DES COURBES DE RESSION

Elle consiste à considérer que l'écoulement durant la période de récession est la résultante d'un écoulement de base relatif au karst noyé et d'un écoulement lié à l'infiltration, uniquement observable durant la phase de décrue :

$$Q(t) = q^*(t) + Q_R(t)$$

Les fonctions mathématiques qui paraissent le mieux décrire ces deux types d'écoulement sont la loi de Maillet (1905) pour l'écoulement de base et une fonction homographique pour l'écoulement de décrue. L'évolution du débit en fonction du temps lors de la phase de récession est alors représentée par la formule :

$$Q(t) = q_0 (1 - \eta t) / (1 + \varepsilon t) + Q_{R0} e^{-\alpha t}$$

Etude du tarissement

L'équation de l'écoulement de base n'a de sens physique que lors du tarissement, mais elle sera également extrapolée à la phase de décrue. Elle s'écrit :

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

t = temps (l'origine des temps coïncide avec le pic de crue)

Q_{R0} = Ordonnée à l'origine de la courbe de tarissement

α = constante appelée coefficient de tarissement

Ces paramètres sont calculés en reportant sur un papier semi logarithmique de crue étudié, les débits étant reportés en coordonnées logarithmiques. Lorsque les points s'alignent sur une droite, le tarissement est atteint. A partir de cette droite sont déterminés :

Q'_0 = débit à partir duquel débute le tarissement

Q'_{R0} = débit relevé à l'intersection de la droite de tarissement avec l'axe des ordonnées

α = pente de la droite

$$\text{On a donc : } \alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0,4343 (t_2 - t_1)}$$

α est exprimé en jour^{-1} si les débits sont en m^3/s et le temps en jour. Ce coefficient est directement lié aux pertes de charges subies par l'écoulement de base et indique ainsi la facilité que peuvent avoir ou non les réserves du karst noyé à se vidanger.

Etude de la décrue

La courbe de décrue s'obtient d'abord graphiquement en retranchant point par point à l'hydrogramme de crue $Q(t)$, la part de l'écoulement relative à l'écoulement de base qui est représenté par l'extrapolation de la courbe de tarissement $Q_R(t)$:

$$q^*(t) = Q(t) - Q_R(t)$$

On tente ensuite d'ajuster à cette courbe expérimentale une fonction homographique du type :

$$q^*(t) = q_0 (1 - \eta t) / (1 - \varepsilon t)$$

avec $q_0 = Q(t_0) - Q_{R0}$ et $\eta = 1/t_i$

Cette fonction n'est définie qu'entre $t_0 = 0$ et t_i qui est l'instant où prend fin l'infiltration et débute le tarissement. T_i représente la durée de la décrue ou de l'infiltration après la passage de la pointe de crue. ε est appelé indice d'hétérogénéité, il caractérise la concavité de la courbe de décrue. Pour calculer la valeur de ce coefficient, il est nécessaire de tester la validité de l'ajustement d'une fonction homographique. Pour cela, on fait un changement de variable en posant :

$$-Y(t) = (t_i - t) / q^*(t)$$

L'ajustement est alors vérifié si cette fonction $-Y(t)$ est linéaire. Dans ce cas, on prend les points expérimentaux de $q^*(t)$ s'alignant le mieux, pour déterminer plusieurs valeurs de ε et ne retenir que la valeur moyenne. ε s'obtient par la relation :

$$\varepsilon = \frac{q_0 - q^*(t)}{t q^*(t)} - \frac{\eta q_0}{q^*(t)}$$

L'ensemble des courbes de décrue d'un même système permet sa caractérisation. Leur dispersion est un moyen de tester la linéarité du système étudié et de faire une distinction entre les différentes modalités d'infiltration.

Classification des systèmes karstiques

Les données des courbes de décrue et de tarissement permettent de caractériser chaque système karstique, il devient alors possible de classer les systèmes à partir de leur fonctionnement hydrodynamique. Mangin (1975) propose pour cela deux paramètres dérivant de l'étude des courbes de récession :

- un paramètre i représentatif de l'infiltration et correspondant à la valeur prise par la fonction $y(t)$ au bout d'un temps égal à 2 jours. Il traduit les retards à l'infiltration sur les systèmes. Ceux-ci sont à mettre en rapport avec l'existence d'un ruissellement de surface ou bien encore la présence de neige ;
- un paramètre k en relation avec le karst noyé et appelé pouvoir régulateur. C'est le rapport entre le volume dynamique (V_d) maximal observé et le volume de transit moyen annuel (V_t) calculé sur plusieurs cycles :

$$k = V_d / V_t$$

V_d se calcule à partir de l'équation de la courbe de tarissement et équivaut au volume d'eau contenu dans le karst noyé dont l'écoulement détermine les variations de débit à l'exutoire lors du tarissement (Mangin, 1975). Cela revient à intégrer la courbe de tarissement entre le début du tarissement et un temps infini :

$$Vd = Q_o' e^{-\alpha t} dt$$

Si Q_o' est exprimé en m^3/s et α en $jour^{-1}$, le volume dynamique exprimé en m^3 sera :

$$Vd = (Q_o'/\alpha) \cdot 86400$$

Pour déterminer k , on retient la plus forte valeur prise par Vd .

Le volume de transit annuel représente le volume écoulé à l'exutoire au cours du cycle moyen correspondant à une durée d'un an. Il se détermine en calculant le volume écoulé au cours du plus grand nombre de cycles observés et en ramenant ensuite cette valeur à une valeur annuelle (365 jours).

B - ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES

L'analyse des séries chronologiques peut être menée soit dans le domaine temporel, on parle alors d'analyse corrélatrice, soit dans le domaine fréquentiel et on parle alors d'analyse spectrale.

L'analyse corrélatrice

L'outil de cette analyse est le corrélogramme. Il met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps croissants. Cette analyse peut porter sur l'étude de la dépendance qui existe entre les événements d'une même chronique d'entrées ou de sorties (corrélogramme simple) ou bien entre les événements de la chronique des sorties en fonction de ceux de la chronique des entrées (corrélogramme croisé).

*** Le corrélogramme simple**

Il analyse la dépendance des événements dans le temps et caractérise de ce fait « la mémoire » du système étudié. Analytiquement le corrélogramme simple montre l'évolution du coefficient r_k d'autocorrélation :

$$r_k = C_k/C_0 \text{ avec } C_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}) \quad (1)$$

où k est le délai ($k = 0$ à m), m est le point de troncature et détermine l'intervalle dans lequel l'analyse est effectuée, n est la longueur de la série chronologique, x est un événement simple, \bar{x} est la moyenne.

Si le corrélogramme décroît très vite, il indique des événements indépendants les uns des autres et dans ce cas, le phénomène peut être considéré comme quasi aléatoire. En revanche, si la décroissance du corrélogramme est lente, elle caractérise des événements dépendants les uns des autres. La valeur du corrélogramme $r_k = 0,2$ est une valeur remarquable, puisque des événements peuvent être considérés indépendants dès que $r_k < 0,2$.

Dans le cas des données hydrométriques, le corrélogramme montre la façon dont le système module le signal d'entrée. Si le corrélogramme des débits décroît lentement, l'effet mémoire du système est important, ce qui se traduit par une régulation liée à l'importance des réserves.

Au contraire, si le corrélogramme décroît rapidement, le système module très peu le signal d'entrée, il est donc sans mémoire et de ce fait, il est bien drainé avec des réserves négligeables. Ainsi, le corrélogramme simple fournit une idée qualitative de l'importance globale des réserves.

* Le corrélogramme croisé

Le corrélogramme croisé $C_{(xy)}(k)$ est employé pour analyser la dépendance linéaire entre la série chronologique d'entrée x_i à l'égard de la série chronologique de sortie y_i et ceci pour des pas de temps (k) positifs ou négatifs de plus en plus grands. Le corrélogramme croisé est décrit comme suit :

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{avec} \quad C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (2)$$

où σ_x et σ_y sont les écarts type des séries chronologiques. Quand la série chronologique d'entrée est aléatoire, la fonction de corrélation croisée $r_{(xy)}(k)$ représente la réponse impulsionnelle du système. Le retard entre l'entrée et la sortie peut également être déduit du corrélogramme croisé, comme délai entre $k = 0$ et le maximum $r_{(xy)}(k)$.

Le retard fournit une évaluation des temps de transfert de l'impulsion par le système. La fonction de corrélation croisée n'est pas symétrique en principe [$r_{xy}(k) \neq r_{yx}(k)$]. Si $r_{xy}(k) > 0$ pour $k > 0$, le signal d'entrée influence le signal de sortie.

Dans le cas des systèmes hydrologiques, la fonction d'entrée représentée par la pluie, peut être considérée comme quasi aléatoire. Par conséquent, le corrélogramme croisé fournit une image assez correcte de l'hydrogramme unitaire.

L'analyse spectrale

L'outil de cette analyse est le spectre de densité de variance. Il représente la décomposition de la variance d'une série dans le domaine fréquentiel. De la même façon que l'analyse corrélatrice, l'analyse spectrale peut porter sur l'étude de la variance d'une seule série (spectre simple) ou sur celle de la covariance entre les entrées et les sorties d'un système (spectre croisé).

* Le spectre simple

L'analyse spectrale correspond à un changement d'un domaine de temps à un domaine de fréquence grâce à une transformée de Fourier du corrélogramme. La fonction de densité spectrale $S(f)$ représente la décomposition de la variance de la série chronologique dans le domaine de fréquence. $S(f)$ est écrite comme suit :

$$S(f) = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k) r(k) \cos(2\pi f k) \right] \quad \text{avec} \quad D(k) = \left[1 + \cos \pi \frac{k}{m} \right] / 2 \quad (3)$$

où $f = j/2m$, $j = 1$ à m , f est la fréquence et $D(k)$ assure que les valeurs de $S(f)$ estimées ne sont pas impartiales. $D(k)$ est le filtre de Tukey (Mangin, 1984). L'interprétation de la fonction spectrale de densité consiste à identifier les différents pics représentant des phénomènes périodiques, ce qui mène alors à une caractérisation du système.

Quand de tels composants caractérisent le signal de sortie, ceci montre comment le signal d'entrée a été modifié par le système. Plus la fréquence de coupure (la fréquence telle que $S(f)$ est presque nulle) est faible, plus le système est inertiel.

La fonction de densité spectrale simple permet également le calcul du temps de régulation du système qui représente la durée d'influence du signal d'entrée [$T_{\text{régulation}} = S(f=0)/2$]. Plus le temps de régulation est long, plus le système est inertiel. L'inertie du système karstique est liée à son organisation de stockage (mises en réserves) et de drainage.

* Le spectre croisé

L'analyse spectrale peut également être appliquée à l'étude de la covariance entre deux séries chronologiques : signaux d'entrée et de sortie du système. La fonction spectrale croisée de densité $S_{xy}(f)$ correspond alors à la transformée de Fourier de la fonction de corrélation croisée. On l'écrit comme suit :

$$S_{xy}(f) = h_{xy}(f) - i\lambda_{xy}(f) \quad (4)$$

où $h_{xy}(f)$ et $\lambda_{xy}(f)$ sont le spectre croisé et le spectre de quadrature respectivement :

$$h_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \cos(2\pi fk) \right] \quad (5)$$

$$\lambda_{xy}(f) = 2 \left[r_{xy}(0) + \sum_1^m (r_{xy}(k) + r_{yx}(k)) D(k) \sin(2\pi fk) \right] \quad (6)$$

Le spectre croisé peut également être exprimé en fonction de l'amplitude croisée $|S_{xy}(f)|$ et de la phase $\Phi_{xy}(f)$

$$S_{xy} = |S_{xy}(f)| e^{-i\Phi_{xy}(f)} \quad (7)$$

Les expressions de l'amplitude croisée et de la phase sont respectivement :

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{h_{xy}^2(f) + \lambda_{xy}^2(f)} \quad \text{et} \quad \Phi_{xy}(f) = \arctan\left(\frac{\lambda_{xy}(f)}{h_{xy}(f)}\right) \quad (8)$$

La fonction de cohérence et la fonction de gain

La fonction d'amplitude croisée $|S_{xy}(f)|$ exprime la façon dont le signal d'entrée a été modifié par le système. L'analyse spectrale de la série chronologique permet le calcul de deux fonctions additionnelles qui sont utiles pour caractériser le système : la fonction de cohérence $CO_{xy}(f)$ et la fonction de gain $G_{xy}(f)$:

$$CO_{xy}(f) = S_{xy}(f) / \sqrt{S_x(f)S_y(f)} \quad \text{et} \quad G_{xy}(f) = S_{xy}(f) / S_x(f) \quad (9)$$

La fonction de cohérence indique si les variations de la série chronologique de sortie correspondent au même type que celles de la série d'entrée et expriment de ce fait les linéarités entre ces séries. La fonction de gain représente une atténuation (< 1) ou une amplification (> 1) du signal de sortie par rapport au signal d'entrée. Dans les systèmes karstiques, une amplification signifie un déstockage de l'eau tandis qu'une atténuation signifie une mise en réserves lors des crues.

ANNEXE 7 : APPORT DES ANALYSES ISOTOPIQUES

Les techniques isotopiques permettent d'apporter des informations essentielles parfois inaccessibles par les moyens d'investigation classiques (piézométrie, essais de pompage, hydrochimie, etc.). Les exemples d'application des méthodes isotopiques sont nombreux, on citera de manière exhaustive : les modalités de recharge des nappes (isotopes stables : ^2H , ^{18}O , et ^{13}C), les traçages naturels, la datation des eaux par les isotopes radioactifs (^{14}C , ^3H , etc.), la détermination de l'origine de la salinité des eaux, l'évaluation des relations entre les cours d'eau et les nappes souterraines, etc..

Méthodologie adoptée pour les analyses isotopiques réalisées au niveau du Saïs

La méthode adoptée (Michelot et al., 1992) était fondée sur l'utilisation d'un bilan de mélange isotopique (^{18}O) :

$$\delta^{18}_M = (1 - x) \delta^{18}_P + x \delta^{18}_L$$

- δ^{18}_M = Teneur en ^{18}O mesurée dans l'eau de la source.
- δ^{18}_P = Teneur en ^{18}O des précipitations sur la plaine (-5 ‰ SMOW d'après Bichara et Louvat, 1990) alimentant directement la nappe superficielle.
- δ^{18}_L = Teneur en ^{18}O des eaux du Lias pour le panneau hydraulique considéré. Ces eaux précipitées à plus haute altitude sont appauvries en isotopes lourds par rapport aux précipitations sur la plaine.
- X = Fraction du débit fourni par les eaux du Lias.

Les teneurs en deutérium ont été mesurées pour détecter une éventuelle évaporation qui fausserait le bilan en oxygène-18.

Le même type de bilan a été réalisé en utilisant les teneurs en tritium. En effet, le temps de transit entre les affleurements des Causses et les sources est assez long pour permettre à la décroissance radioactive de réduire les teneurs en tritium à une valeur proche de 0 pour les eaux du Lias, alors que, plus récentes, les eaux de l'aquifère superficiel présentent des teneurs en tritium que l'on peut estimer entre 15 et 25 U.T., reflétant celles des précipitations de la dernière décennie.

Résultats des analyses isotopiques et des Bilans en ^{18}O et en ^3H

Il est à signaler que les prélèvements d'avril et d'octobre 1990 ont été analysés au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay à Paris, alors que ceux de février 1988 ont été analysés à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à Vienne.

Nom et N° IRE/15	Date	¹⁸ O (‰ S.M.O.W)	² H (‰ S.M.O.W)	“d” (‰ S.M.O.W)	³ H (U.T.)	% du Lias d'après ¹⁸ O	% du Lias d'après ³ H	% du Lias d'après le modèle 91
Aïn AMEIR 121/15	02/88	- 6.02	- 38.1	10.1	6.3 6 0.4	-	-	70 %
	04/90	- 6.52	- 37.6	14.6	6.3 6 0.5	89 %	72 %	
	10/90	- 6.86	- 40.2	6.7	5.1 6 0.4	64 %	78 %	
Aïn CHEGGAG 42/15	04/90	- 6.73	- 39.5	14.3	5.9 6 0.5	75 %	74 %	95 %
	10/90	- 6.52	- 43.6	8.6	5.1 6 0.4	66 %	78 %	
Aïn BOURKAIS 52/15	02/88	- 6.39	- 39.7	11.4	10.8 6 0.5	-	-	70 %
	04/90	- 6.65	- 38.2	15.0	10.3 6 0.6	72 %	51 %	
	10/90	- 6.27	- 43.8	6.4	10.5 6 0.5	55 %	50 %	
Aïn ABLOUZ 54/15	02/88	- 7.07	- 42.5	14.1	-	-	-	70 %
	04/90	- 6.73	- 42.3	11.5	6.0 6 0.5	75 %	74 %	
	10/90	- 6.82	- 45.7	12.3	6.7 6 0.4	79 %	83 %	
Aïn GHARA 1156/15	02/88	- 6.72	- 38.8	15.0	-	-	-	70 %
	04/90	- 6.57	- 40.3	12.3	8.0 6 0.5	68 %	63 %	
	10/90	- 6.31	- 41.3	9.2	7.0 6 0.5	57 %	68 %	
Aïn SKHOUNAT M'HAYA 872/15	02/88	- 6.24	- 37.7	12.2	-	-	-	100 %
	04/90	- 6.32	- 37.9	12.7	0.1 6 0.3	100 %	100 %	
	10/90	- 6.39	- 39.6	11.5	0.1 6 0.3	100 %	100 %	
Aïn JOUAOU 889/15	02/88	- 6.21	- 37.1	12.6	-	-	-	70 %
	04/90	- 5.94	- 37.4	10.1	6.3 6 0.5	71 %	72 %	
	10/90	- 6.00	- 39.1	8.9	4.6 6 0.5	76 %	81 %	
Aïn MY YACOUB 105/15	02/88	- 5.41	- 36.3	7.0	-	-	-	
	04/90	- 5.30	- 37.4	5.0	0.1 6 0.3	-	100 %	
	10/90	- 5.24	- 39.1	2.8	0.7 6 0.3	-	100 %	
SIDI HARAZEM Aïn BERDA 2056/15	02/88	- 7.01	- 41.6	14.6	0.0 6 0.3	-	-	100 %
	04/90	- 6.62	- 42.4	10.6	0.1 6 0.3	75 %	100 %	
	10/90	- 6.59	- 44.6	8.1	0.1 6 0.3	74 %	100 %	
Aïn SKHOUNAT SEBOU 2528/15	02/88	- 6.40	- 38.1	13.1	-	-	-	0 %
	04/90	- 6.23	- 43.4	6.5	0.8 6 0.4	57 %	100 %	
	10/90	- 6.11	- 42.0	6.9	1.7 6 0.3	48 %	96 %	
Forage du LIAS 2060/15	04/90	- 7.07	- 43.1	13.5	0.7 6 0.4	-	-	
	10/90	- 6.53	- 44.8	7.4	1.5 6 0.3	-	-	
Forage du LIAS 2361/15	04/90	- 6.47	- 40.4	11.4	0.5 6 0.3	-	-	
	10/90	- 6.54	- 40.8	11.5	0.8 6 0.3	-	-	
Forage du LIAS 2370/15	04/90	- 5.79	- 37.9	8.4	0.1 6 0.4	-	-	
	10/90	- 5.92	- 39.4	8.0	0.0 6 0.2	-	-	
Forage du LIAS 2623/15	04/90	- 6.35	- 39.2	11.6	0.1 6 0.3	-	-	
	10/90	- 6.37	- 40.2	10.8	0.1 6 0.3	-	-	
Forage du LIAS 2360/15	04/90	- 6.19	- 38.6	10.9	0.3 6 0.3	-	-	
	10/90	- 6.27	- 40.4	9.8	0.7 6 0.3	-	-	
Forage du LIAS 2393/15	02/88	- 6.21	- 38.1	11.6	-	-	-	
	04/90	- 5.89	- 38.8	8.3	0.8 6 0.3	-	-	

Teneurs isotopiques et taux de participation du Lias à l'écoulement des sources de la plaine du Saïs d'après les bilans en ¹⁸O et en ³H (Michelot et al. 1992)

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- Ahmamou M., 1987.** Etude sédimentologique des calcaires lacustres Saïssiens (Plio-Quaternaire) du bassin de Fès-Méknès (Maroc). *Thèse 3^{ème} cycle, Aix Marseille III, 178 p.*
- Aït Brahim L., Chotin P., 1984.** Mise en évidence d'un changement de direction de compression dans l'avant pays rifain au cours du tertiaire et du Quaternaire. *Bull. Sec. Géol. France, (7), t.26, N°4, pp. 681-691.*
- Aït Brahim L., Chotin P., Ramdani M., et Tadili B., 1989.** Carte sismotectonique du Maroc septentrionale au 1/1.000.000. *Coll. Géol. Franco-Marocain, Strasbourg, 24-26 Mai, p.8.*
- Aït Brahim L., 1991.** Tectonique cassante et états de contraintes récents au Nord du Maroc. Contribution à l'étude du risque sismotectonique, *Thèse de doctorat Es Sci., Rabat, 223 p.*
- Amraoui F., 1994.** Etude hydrogéologique des sources Ribaa et Bittit. *Rapport EWI pour la RADEEM. 21 p. (inédit).*
- Amraoui F., 2001.** L'aquifère karstique du moyen Atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit. *7^e Colloque d'hydrologie en pays calcaire et milieu fissuré. Besançon (France). Sci.Tech.Env., Mém. H.S.,113 : 45-48.*
- Amraoui F., 2003.** L'aquifère karstique du moyen atlas tabulaire : problème de la turbidité affectant les sources du complexe Ribaa-Bittit (Maroc). *Les Cahiers de la Recherche, Edition du rectorat de Casablanca, Maroc, Série A : Sciences et techniques, Volume 5, pp.81-92.*
- Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2003.** Turbidity dynamics in karstic systems. Example of Ribaa and Bittit springs in the Middle Atlas (Morocco). *Hydrological Sciences Journal (HSJ), Vol. 48, number 6, pp. 971-984.*
- Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2004.** Comportement d'une source karstique soumise à une sécheresse prolongée. Exemple de la source Bittit (Maroc). *Comptes rendus Geoscience. Volume 336, Issue 12, pp. 1099-1109.*
- Amraoui F., Razack M., Bouchaou L., 2005.** Impact of a long drought period on a large carbonate aquifer. The liasic aquifer of the Saïs plain and Middle Atlas plateau (Morocco). *7^e Assemblée scientifique de l'AIHS (Brésil). Symposium S6. Publication dans la série Redbook 296, pp. 184-193.*
- Atteia O., and Kozel R., 1997.** Particle size distributions in waters from a karstic aquifer: from particles to colloids. *J. Hydrol., 201(1-4), 102-119.*
- Atteia O., Couture C. and Perret D., 1998.** Factors Controlling Colloidal Transport in a Karst Aquifer. *Phys. and Chem. of the Earth, , 23(2) :163-169.*
- Bakalowicz M., 1979.** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. *Thèse de doctorat d'état ès sciences. Univ., P., et M., Curie. Paris VI, 270 p.*

Bakalowicz M., Crochet P., D'Hulst D., Mangin A., Marsaud B., Ricard J. and Rouch R., 1994. High discharges pumping in a vertical cave. Fundamental and applied results. *COST 65 action, Europ.Com., Montpellier-Millau workshop, May 1994 : 93-110.*

Batiot C., Emblanch C., et Blavoux B., 2003. Carbone organique total (COT) et magnésium (Mg^{2+}) : deux traceurs complémentaires du temps de séjour dans l'aquifère karstique. *C.R.Geosciences, 335 (2), 205-210.*

Benjbara A., 1987. Observations sur les sources de la plaine de Fès-Méknès. *Article de la revue eau et développement. Edition DRPE. P31 à 37.*

Benjbara A., Rhaouti S., 1989. Approche des infiltrations dans les Causses du moyen Atlas septentrional : Application d'un modèle global à réservoirs. *Rapport DRPE. (Inédit).*

Bentayeb A., Leclerc C., 1977. Le Causse Moyen Atlasique. Ressources en eau du Maroc. *Tome 3 : domaines atlasiques et sud-atlasiques. Notes et mém. du service géologique N° 231. p 37 à 66.*

Bichara S., Louvat D., 1990. Etude de plusieurs systèmes aquifères du Maroc à l'aide des isotopes du milieu. *Rapport AIEA, Vienne, 30 p.*

Blavoux B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du Deutérium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone tempérée. *Thèse Doct. D'Etat. Univ. Paris VI, 333 p.*

Bouchaou L., Michelot J.L., Chauve P., Mania J., et Mudry J., 1995. Apports des isotopes stables à l'étude des modalités d'alimentation des aquifères du Tadla (Maroc) sous climat semi aride. *C.R. Acad. Sci. Paris, t.320 série Iia, 95-101.*

Bouchaou L., Chauve P., Mania J., Mudry J et Michelot J.L., 1995. Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride : cas de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc). *Revue des sciences de l'eau, 8 (1995). 43-55.*

Bouchaou L., 1995. Fonctionnement des aquifères atlasiques et leur relation avec les aquifères de la plaine : cas de l'Atlas de Beni Mellal et de la plaine du Tadla (Maroc). *Thèse de doctorat d'état ès sciences. Univ Cadi Ayyad, Marrakech, 154 p.*

Bouchaou L., Chauve P., Mudry J., Mania J et Hsissou Y., 1997. Structure et fonctionnement d'un hydrosystème karstique de montagne sous climat semi-aride : cas de l'Atlas de Beni-Mellal (Maroc). *J. African Earth Sciences, 25 (2), 225-236.*

Bouchaou L., Mangin A and Chauve P., 2002. Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Morocco). *J.Hydrol., 265 (4), 34-42.*

Boumir Kh., 1987. Nouvelle interprétation du mode de mise en place des « sables fauves » dans le bassin du Sais (Maroc). *Thèse 3^{ème} cycle, Fès, 169 p., 55 fig., 5 Tab., 9 Pl.*

Boutakiout M., 1990. Les foraminifères du Jurassique des rides sud-rifaines et des régions voisines (Maroc). *Thèse d'Etat. Docum. Lab. Géol. Lyon. N°112, 274 p. 15 pl.*

Box G. & Jenkins G., 1974. Time series analysis : forecasting and control. *Holden Day, San Francisco, USA.*

Bureau de Recherche et de Participation Minière (BRPM). Le gisement de potasse triasique de Khémisset. *Mines, Géol. et Energie, n° 23, Rabat.*

Carron J.P., 1977. Basaltes. *Ency. Uni., vol. 3, pp. 20-22.*

Castany G., Margat J., 1977. Dictionnaire français de l'Hydrogéologie. *BRGM, 249 p.*

Chamayou J., Combe M., Genetier B., Leclerc C., 1968. Ressources en eau du bassin de Méknès-Fès. *82 p, in : Rapport final du projet Sebou. F.A.O., Maroc.*

Chamayou J., Combe M., Genetier B., Leclerc C., 1975. Le bassin de Méknès-Fès. Ressources en eau du Maroc. *Tome 2 : plaines et bassins du Maroc Atlasique. Éditions du service géologique du Maroc. p 41 à 71.*

Charrière A., 1984. Evolution néogène des bassins continentaux et marins dans le moyen atlas central (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France, (7), t.XXXVI, n°6, 1127-1136.*

Charrière A. 1990. Héritage Hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intra-continente : le moyen Atlas au SE de Fès (Maroc). *Thèse de doctorat d'état ès sciences. Univ P. Sabatier, Toulouse.*

Chapon G., 1964. Etude hydrogéologique du bassin de Fès-Méknès. *Rapport DRPE (inédit), 92 p.*

Chapon G., 1967. Hydrogéologie, in : Mémoire explicative de la carte géotechnique de Fès. *Notes et mém. serv. géol. Maroc, n° 186 bis, pp. 33-43, 1 carte au 1/20 000 (feuille 2) : hydrogéologie –esquisse structurale, par Chapon G., et Humbert M.*

Choubert G., Marçais J., 1952. Aperçu structural in « Géologie du Maroc », *XIXème Congrè Géol. Inter. Alger, monogr. rég., 3^{ème} série, Maroc, n°6, p 9-73, 2 cartes, Notes et mém. serv. Géol. Maroc N°100.*

Choubert G., Fauve-Muret A., 1960-62. Évolution du domaine atlasique marocain depuis les temps paléozoïques. *In : livre mémoire P. FALLLOT, Mém. h. ser. soc. géol. france, 1, 447-527.*

Cirak P., 1985. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur, évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours des phases de comblement. *Thèse Doct. Etat. Univ. Bordeaux I, N°837, 285 p.*

Cirak P., 1987. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur, évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours des phases de comblement. *Mém. Inst. Géol., Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, N° 21, 187 p.*

Collet C., 1992. Systèmes d'information géographique en mode image. *Presses polytechniques et universitaires romandes – Lausanne, 183 pages.*

Collignon B., 1988. Spéléologie : aspects scientifiques, *chez Edisud.*

Colo G., 1961. Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen Atlas septentrional. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc, n° 139, 226 p.*

Compagnie Africaine de Géophysique (CAG), 1988. Synthèse géophysique des bassins de Fès-Méknès et Boudnib-Errachidia. *Projet PNUD/DTCD. MOR 86/004. Rapport DRPE. (Inédit).*

Craig H., 1961. Standart for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in naturel waters. *Science, Vol. 133, p. 1833-1834.*

Delaunay A.M., Calleja M., Faillat J.P., SPistre S., et Cour P., 2000. Traçage pollinique naturel dans un hydrogéosystème karstique thermo-minéral. *C.R.A.S. Iia, 331 (7), 467-472.*

Didon E., 1990. Systèmes d'information géographique : concepts, fonctions, applications. *CEMAGREF / ENGREF, 44 pages.*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1980. Bassin de Fès-Méknès : Synthèse des connaissances du Lias d'après les forages. *33 p. (Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1981. Inventaire spéléologique du Maroc. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1984. Plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins de Sebou - Bou Regreg et d'Oum Erbia. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1989. Etude du plan directeur intégré d'aménagement des eaux des bassins Sebou-Oum Erbia et Tenfist. Ressource en eau souterraine. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1989. Elaboration des séries des pluies des causes du Moyen Atlas. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1989. Exploration des eaux profondes : Historique des sources du piémont du cause moyen Atlasique. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1994. Inventaire des principales sources dans le bassin du Sebou. *(Inédit).*

Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau (DRPE), 1995. Etude d'aménagement des sources. *Rapport MEDITERRE. (Inédit).*

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1974. Etude préliminaire des sources de la zone Ribaa-Bittit. *3 volumes : rapport + annexe hydrologique + annexe géologique et hydrogéologique. (Inédit).*

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1979. Source Ain Si Lmir : Résultats et interprétation des mesures effectuées entre Avril 1975 et Mars 1979. *(Inédit).*

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1980. Bilans hydrauliques mensuels et annuels du secteur d'Aguemguem d'Avril 1975 à Décembre 1979. *(Inédit).*

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Cause Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique de la source Ain Bittit non captée : Résultats et interprétation des mesures effectuées entre Novembre 1974 et Mars 1981. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique de la source Ain El Atrous : Résultats et interprétation des mesures effectuées entre Novembre 1974 et Décembre 1980. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique de la source Ain Si Lmir. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique des sources Aïoun Akkous : Résultats et interprétation des mesures effectuées entre Novembre 1974 et Mars 1981. *(Inédit)*

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique des sources Aïoun Hijja. *(Inédit)*

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1981. Etude hydrologique des sources Aïoun Sebaa : Actualisation des données hydrologiques de Novembre 1974 à Avril 1981. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1982. Débits des sources Bittit captée et non captée, Si Lmir et Sebaa (période allant de Novembre 1974 à Juin 1982). *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1983. Source Ain El Attrous : Etude fréquentielle des débits moyens mensuels et annuels. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1984. Etude hydrologique de la source Ain El Atrous : Actualisation de l'annuaire jusqu'à Décembre 1983. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1986. Observations sur les sources de la plaine Fès-Méknès. *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1989. Historique des sources du piémont du causse moyen atlasique septentrional : Sources du secteur Ribaa-Bittit, Sources Boujaoui-Maarouf et Aghbal". *(Inédit)*.

Direction de la Région Hydraulique du Sebou (DRHS), 1989. Note sur la campagne de jaugeages des sources et oueds de la plaine de Fès-Méknès (Octobre 1988). *(Inédit)*.

Drogue C., 1980. Essai d'identification d'un type de structure de magasins carbonatés. *Mém. H.S., Soc. Géol. Fr., 11, 101-108.*

Dubar G., 1952. Compte rendu de l'excursion A30 et GG (1^{ère} partie). *Pub. XIXème. congr. Géol. inter., Alger, série Maroc, N°16, 35-45.*

El Arabi H., 1987. Etude stratigraphique et sédimentologique aux confins du causse moyen Atlasique et du moyen Atlas plissé (Maroc). *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ P. Sabatier, Toulouse.*

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

El Ouali A., 1992. Contribution du Haut Atlas central au sud de Midelt à l'alimentation des aquifères profonds du bassin crétacé d'Errachidia (Maroc). *Doct. Univ. Franche comté*, 234 p.

Essahlaoui A., 2000. Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Méknès-Fès (Maroc) : prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. *Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées. EMI. Rabat*. 250 p.

Fassi D., 1999. Les formations superficielles du Sais de Fès et de Méknès. *Notes et mémoires du service géologique N°389*. 527 p.

Faugeres J.C., 1978. Les rides sud-rifaines. Evolution sédimentaire et structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge africaine. *Thèse de doctorat d'état. Univ. Bordeaux I, N°290, 2 vol., 510 p., 11 tab., 119 fig., 42 pl.*

Faugeres J.C., 1981. Evolution structurale d'un bassin atlantico-mésogéen de la marge africaine : les rides sud-rifaines (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France, Paris, 7, t.XXIII, N°3, 229-244.*

Fedan B., 1988. Évolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements : le Moyen Atlas (Maroc) durant le méso-cénozoïque. *Thèse de doctorat d'état, Rabat*, 338 p. 127 fig.

Feeny V., 1993. Comportement d'un aquifère crayeux karstifié : incidences des eaux d'origine agricole sur la ressource en eau du département de l'Eure. *Thèse de doctorat de l'Univ de Rouen*.

Ford D. and Williams P., 1994. Karst geomorphology and hydrology. *Chapman & Hall, London, UK*

Gouisset Y., 1981. Le Karst superficiel : genèse, hydrodynamique et caractéristiques hydrauliques. Application à un karst du Languedoc. *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ Sci et Tech du Languedoc, Montpellier*.

Hakim B., 1982. Recherches hydrologiques et hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Syrie et Maroc. *Thèse de doctorat d'état. Univ d'Aix Marseille II*.

Hsissou Y., 1991. L'aquifère des calcaires du Turonien (bassin de Tadla, Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. *Thèse Univ. Franche Comté. Besançon*, 196 p.

Hsissou Y., Chauve P., Mania J., 1996. L'aquifère des calcaires du Turonien (Bassin du Tadla, Maroc). Alimentations locales et lointaines à partir de l'Atlas. *J. of Hydro. 183, 433-443.*

Kaoukaya A., 1987. La plateforme carbonatée liasique de la bordure septentrionale du Maroc central (région de l'oued Beht, El Kansera, Agouraï, El Hajeb). Etude sédimentologique et diagénétique. *Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Pau, Ronéot*, 207 p.

Laadila M., 1996. Stades de l'évolution de la plate-forme carbonatée liasique du moyen Atlas (Maroc). *Thèse de doctorat d'état ès sciences. Univ Mohamed V, Rabat*.

Labat D., Ababou R. and Mangin A., 2002. Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques. *C. R. Geoscience, 334 (8), 551-556*

Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : Cas du Lias de la plaine du Saïs et du Causse Moyen Atlasique tabulaire (Maroc). Thèse d'Etat en Hydrogéologie (F. AMRAOUI, juillet 2005).

Lacroix M., Rodet J., Wang H., Masséi N. and Dupont J.P., 2000. Origin of suspended particulate matter in a karstic aquifer system: contribution of the microgranulometry. *C.R.Acad. Sc., IIA, 330 (5), 347-354.*

Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O., 1997. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *J. Hydrol., 205, (3-4), 217-231*

Lattati A., 1986. Ressources en eau karstiques du moyen Atlas. *Article de la revue eau et développement N°1, édité par la DRPE, Rabat. p 16 à 27.*

Leclerc C., 1971. Hydrologie de la plaine de Méknès-Fès. *Rapport DRPE (inédit), 12 p.*

Leclerc C., 1973. Ressources en eau du Moyen Atlas tabulaire. *Thèse 3^{ème} cycle. Rapp.DRPE, inédit, 150 p.*

Lepiller M., 1980. Contribution de l'hydrochimie à la connaissance du comportement hydrogéologique des massifs calcaires : Etude de quelques systèmes karstiques du massif du Semnoz et de la région d'Annecy (Savoie, Haute-Savoie, France). *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ Scientifique et médicale de Grenoble.*

Mac Donald et Partners, 1990. Etablissement et mise au point du modèle de gestion des nappes du bassin de Fès-Méknès. *Département de coopération technique pour le développement. Nations Unis. Rapport DRPE (inédit).*

Mc Carthy J.F., Schevenell L., 1998. Processes controlling colloid composition in a fractured and karstic aquifer in eastern Tennessee, USA. *J. Hydrol. 206 (3/4), 191-218.*

Maillet E., 1905. Essais d'hydraulique et fluviale. *Ed.Hermann, Paris, 218 p.*

Mangin A., 1971. Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléo., 26, 2, pp. 283-329.*

Mangin A., 1975. Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. *Doctorat d'Etat, Univ. Dijon (Ann. Spéléo. 1974, 29 (3) p. 283-332, 29 (4) p. 495-601, 30 (1) p. 21-124).*

Mangin A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales. *J. Hydrol., 67, 25-43.*

Mangin A., 1984. Ecoulement en milieu karstique. *Annales des Mines, 5/6, 135-142.*

Margat J., Taltasse P., 1952. Hydrogéologie du Maroc : Bassin lacustre de Fès-Méknès. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc, n°97 : 128-141.*

Margat J., Taltasse P., 1954. Existence d'un golf pliocène dans la partie occidentale du couloir sud-rifain. *C.R. somm. Soc. géol. Fr., 10, pp. 190-193.*

Margat J., 1958. Découverte d'un nouveau bassin artésien au Maroc dans la région de Méknès. *Bull. trim., n°2, deuxi. Trim.*

Margat J., 1960. Carte hydrogéologique au 1/100.000 du bassin de Méknès-Fès. *Edition de l'office national des irrigations.*

Martin J., 1981. Le Moyen Atlas central : étude Géomorphologique. *Notes et mémoires du service géologique N° 258 bis. 445 p.*

Massei N., Lacroix M., Wang H., Mahler B.J. and Dupont J.P., 2002. Transport of suspended solids from a karstic to an alluvial aquifer: the role of the karst/alluvium interface. *J.Hydrol. 260,(1-4), 88-101.*

Mazzouji M., >1996. La plate forme carbonatée liasique (Lias inférieur et moyen) aux abords de Michlifen, Ifrane et Immouzzet : lithostratigraphie, biostratigraphie, sédimentologie et stratigraphie séquentielle. *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ Mohamed V, Rabat.*

McCarthy J.F. & Shevenell J.F., 1998. Processes controlling colloid composition in a fractured and karstic aquifer in Eastern Tennessee USA. *J. Hydrol.,206(3/4),191-214.*

Michard A., 1976. Eléments de géologie marocaine. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc N° 252, 408*

Michelot J.L., Sinan M., Krimissa M., Bichara S., Louvat D., 1992. Hydrologie isotopique des systèmes aquifères de Fès-Méknès, Errachidia et Kheng El Hamam. Projet MOR/8/004, AIEA, Vienne, (Rapport DRPE inédit).

Misarez J.J., 1972. Géochimie des eaux du karst jurassien. *Thèse Fac. Sci. Univ. Neuchâtel, 313 p.*

Mondain P-H., 1989. Hydrogéologie des systèmes karstiques de l'unité Delphino-Helvétique inférieure entre les vallées du Fier et du Borne (Massif des bornes, Haute-Savoie, France). *Thèse de doctorat de l'université d'Orléans.*

Morales-Juberias T., Cruz-Sanjulian J., Zafra P., Olazar M. and Arandes J.M., 1996. Etudes des réponses naturelles du système karstique d'Olalde (Pays basque). *Hydrogéologie, 1,39-51.*

Morel J.L., 1989. Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'Actuel. *Géodyn.Acta, n° 3-4, p.283-294.*

Mudry J., 1987. Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés. *Thèse Doct. Sc. Nat., Univ. Besançon, 381 p.*

Normand M., 1984. Hydrologie des sources du bassin de Méknès-Fès (situation au 1^{er} trimestre 1984) : Note de synthèse. *Rapport DRHS. (Inédit).*

Orange A., 1985. Etude de deux systèmes aquifères contrastés en terrains carbonatés du NW de la Nièvre : aspects hydrodynamiques et hydrochimiques. *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ d'Orléans.*

Padilla A. and Pulido-Bosch A., 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J.Hydrol., 168,73-89.*

- Rachid A., 1997.** Les bassins néogènes du sillon sud-rifain et du Rif nord-oriental (Maroc) : sédimentologie, paléogéographie et évolution dynamique. *Doctorat es-sciences, Fès, 318 p.*
- Razack M., 1978.** Contribution à l'étude de la structure des aquifères en roches fissurées, numérisation et analyse quantitative de la fracturation relevée sur clichés aériens. *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ. Sc. et Tech. Languedoc, Montpellier. France.*
- Razack M., 1984.** Applications des méthodes numériques statistiques à l'identification des réservoirs fissurés carbonatés. *Thèse d'Etat. Univ. Sc. et Tech. Languedoc, Montpellier. France.*
- Rhaouti S., 1996.** Rapport de stage en hydrologie isotopique effectué au laboratoire d'hydrogéologie à l'Université d'Avignon. *Référence AIEA : C6/MOR/95025R (Rapport DRPE inédit).*
- Rico G., 1990.** Hydrogéologie de la craie : le système aquifère karstique de l'Aubette (Seine maritime). *Thèse de doctorat de l'Université de Rouen.*
- Roques H., 1964.** Contribution à l'étude statique et cinétique des systèmes CO₂-H₂O-Carbonates. *Ann. Spéleo., 19, 2, pp. 255-484.*
- Roques H., 1967.** Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique - CRDCG. *Mém. et Doc. 1967, vol. 4, phénomènes karstiques.*
- Roques H., 1972.** Sur une nouvelle méthode graphique d'étude des eaux naturelles. *Ann. Spéleo., 27, 1, pp. 79-92.*
- Rouiller D., 1987.** Etude des systèmes karstiques de la Touvre et de la Leche (Angoulême, Charente) : Géologie, Hydrodynamique et Hydrochimie. *Thèse de 3^{ème} cycle. Univ. d'Avignon.*
- Saint Martin J.P., 1987.** Les formations récifales coralliennes du Miocène supérieur d'Algérie et du Maroc. Aspect paléocéologique et paléogéographique. *Thèse D. Etat, Aix-Marseille I, 499 p*
- Sakho A.M., 1998.** Le système d'information géographique (SIG), l'hydrologie et la gestion des ressources en eau. *Word Meteorological organisation. Technical reports in hydrology and water resources. N° 59, 14 pages.*
- Schoeller H., 1962.** Les eaux souterraines. *Editions Masson, Paris, 640 p.*
- Sinan M., 1992.** Initiation à l'utilisation des isotopes stables et radioactifs en hydrogéologie. *Rap. stage, lab. d'hydrologie et de géochimie isotopique, Orsay - Paris. (Rap. DRPE inédit).*
- Sinan M., 2000.** Méthodologie d'identification, d'évaluation et de protection des ressources en eau des aquifères régionaux par combinaison des SIG, de la géophysique et de la géostatistique : application à l'aquifère du Haouz de Marrakech (Maroc). *Thèse de doctorat d'état ès sciences. Ecole Mohammadia des Ingénieurs. Rabat, 371 p.*
- Sinan M., Haddouchi B., Razack M., El Hebil A., 2000.** Évaluation et gestion des ressources en eau souterraine des aquifères régionaux à l'aide des systèmes d'informations géographiques : application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). *Article revue Hydrogéologie N°4. p 89 à 100.*

Suter G., Du Dresnay R., 1975. Carte géologique d'El Hajeb, 1/100 000. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc, 160 bis.*

Taltasse P., 1953. Recherche géologique et hydrogéologique dans le bassin de Fès-Méknès. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc N° 115, 300 p., 71 fig., 40 pl.*

Termier H., 1936. Carte géologique provisoire du Maroc central, 1/200 000. Notice explicative. *Note et mémoires du service géologique du Maroc, n°24 bis, 743 p.*

Vassilios A.T., Rizwan H., 1996. Use of Geographic Information Systems (GIS). *in Water Resources : A Review. Water Resources Management, n° 10, pp. 251-277.*

Vidal J.C., 1977. Structure actuelle et évolution depuis le Miocène de la chaîne rifaine (partie sud de l'arc de Gibraltar). *Bull. Soc. géol. Fr., t. 19, 4, pp. 789-796.*

Wernli R., 1988. Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. *Notes et mémoires du service géologique du Maroc N° 331. 270 p.*

Winckel A., Marlin C., Dever L., Morel J.L., Morabiti K., Ben Makhoul M., Chalouan A., 2002. Apport des isotopes stables dans l'estimation des altitudes de recharge de sources thermales du Maroc. *C. R. Géoscience 334. 469-474.*

Yoder H.S., Tilley C.E., 1962. Origin of basalt magmas : experimental study of natural and synthetic rock systems. *Jour. of Petrology, vol. 3, part 3, pp. 342-542.*

Zizi M., 2002. Triassic-Jurassic extensional systems and their Neogene reactivation in northern morocco : the rides Prerifaines and Guercif basin. *Notes et mémoires du service géologique N° 416.*

Zouhri L., Gorini C., Lamoureux C., Dikki M., 2003. Interprétation hydrogéologique de l'aquifère des bassins sud-rifains (Maroc) : apports de la sismique réflexion. *Comptes rendus Géosciences, Vol 335, Issue 3, p. 319-326.*