



**HAL**  
open science

# Hydrogéologie du bassin versant du Moharlu : hydrodynamique des massifs calcaires de la région de Chiraz (Iran)

Mahmoud Zaman Khan

► **To cite this version:**

Mahmoud Zaman Khan. Hydrogéologie du bassin versant du Moharlu : hydrodynamique des massifs calcaires de la région de Chiraz (Iran). Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1975. Français. NNT: . tel-00744019

**HAL Id: tel-00744019**

**<https://theses.hal.science/tel-00744019>**

Submitted on 22 Oct 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Doctorat d'Etat

N° d'ordre

DOUBLE  
205.142  
1975  
84

205142  
1975  
84

T H E S E

présentée

à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble

pour obtenir

le grade de DOCTEUR ÈS SCIENCES

HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU  
HYDRODYNAMIQUE DES MASSIFS CALCAIRES DE LA REGION DE  
CHIRAZ (IRAN)

par

MAHMOUD ZAMAN KHAN



Soutenue le 10 Juin 1975 devant la commission d'examen

R. BARBIER	Professeur	Président
G. CASTANY	Directeur Scientifique au B.R.G.M	
R. MICHEL	Professeur	Examineurs
J. SARROT REYNAULD	Professeur Directeur de la thèse	
R. MARGRITA	Ingénieur au C.E.N.G	

Doctorat d'Etat

N° d'ordre

205142

1975

84

T H E S E

présentée

à l'Université Scientifique et Médicale de Grenoble

pour obtenir

le grade de DOCTEUR ÈS SCIENCES

HYDROGEOLOGIE DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU  
HYDRODYNAMIQUE DES MASSIFS CALCAIRES DE LA REGION DE  
CHIRAZ (IRAN) T.75/675

par

MAHMOUD ZAMAN KHAN



Soutenu le 10 Juin 1975 devant la commission d'examen

R. BARBIER	Professeur	Président
G. CASTANY	Directeur Scientifique au B.R.G.M	
R. MICHEL	Professeur	Examineurs
J. SARROT REYNAULD	Professeur Directeur de la thèse	
R. MARGRITA	Ingénieur au C.E.N.G	

BU DE GRENOBLE



D 052 052216 8

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE  
ET MEDICALE DE GRENOBLE

M. Michel SOUTIF  
M. Gabriel CAU

INSTITUT NATIONAL POLY-  
TECHNIQUE DE GRENOBLE

Présidents M. Louis NEEL  
Vice-Présidents MM. Lucien BONNETAIN  
Jean BENOIT

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE LA SAISON

PROFESSEURS TITULAIRES

M. ANGLES D'AURIAU Paul  
ARNAUD Georges  
AUBERT Paul  
AYART Yves  
Mme BARBIER Marie-Jeanne  
M. BARBIER Jean-Claude  
BARON Robert  
BARRON Robert  
BARRIE Joseph  
BEAUDOIN André  
BERNARD Alain  
BEZES Henri  
BLAMBERT Maurice  
BOLLLET Louis  
BONNET Georges  
BONNET Jean-Louis  
BONNET-ETIARD Joseph  
BOUCHERLE André  
BOUCHER Robert  
BOUSSARD Jean-Claude  
BRAVARD Yves  
CABANEL Guy  
CALAS François  
CARAZ Gilbert  
CAU Gabriel  
CAULUIS Georges  
CHABAUTY Claude  
CHABACON Robert  
CHATEAU Robert  
CHIBON Pierre  
CONTAMIN Robert  
COUDERC Pierre  
CRATA Antoine  
DEBELMAS Anne-Marie  
DEBELMAS Jacques  
DEBRANGE Charles  
DEPORTES Charles  
DESRE Pierre  
DESSAUX Georges  
DODU Jacques  
DOLIQUE Jean-Michel  
DREYFUS Bernard  
DUCROS Pierre  
DUGOIS Pierre  
FAU René

Mécanique des fluides  
Chimie  
Physique  
Physique approfondie  
Electrochimie  
Physiologie expérimentale  
Géologie appliquée  
Physiologie nucléaire  
Biosynthèse de la cellulose  
Statistiques  
Clinique chirurgicale  
Pédiatrie  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Chirurgie générale  
Mathématiques Pures  
Informatique (IUT B)  
Electrotechnique  
Clinique ophtalmologique  
Pathologie médicale  
Chimie et Toxicologie  
Physique nucléaire  
Mathématiques Appliquées  
Géographie  
Clinique rhumatologique et hydrologie  
Anatomie  
Biologie animale et pharmacodynamie  
Vétérinaire légale et Toxicologie  
Chimie organique  
Mathématiques Pures  
Oto-Rhino-Laryngologie  
Thérapeutique  
Biologie animale  
Pharmacologie chimique et chimie analytique  
Chimie gynécologique  
Anatomie Pathologique  
Mécanique  
Mathématiques Pures  
Géologie générale  
Zoologie  
Chimie minérale  
Médecine  
Physiologie animale  
Mécanique des plasmas  
Physiologie appliquée  
Cristallographie  
Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie  
Clinique neuro-psychiatrique

PROFESSEURS ASSOCIES

M. ASCARELLI Gianni  
CHEEKE John  
GILLESPIE John  
ROCKAFELLAR Ralph  
WOHLFARTH Erich

M.

GAGNAIRE Didier  
GALLISSOT François  
GASTINEL NOEL  
GAYNOU Michel  
GEMPE Michel  
GERBER Robert  
GERVIN Jean-Pierre  
GIRAUD Pierre  
KHANE André  
KLEIN Joseph  
KOSZUL Jean-Louis  
KRAVCHENKO Julian  
KUNTZMANN Jean  
LACHAZE Albert  
LACHARME Jean  
LAZERONICZ Joseph  
LATREILLE René  
LAURENT Pierre  
LEDRU Jean  
LIBOURY Louis  
LONGUEUE Jean-Pierre  
LOUP Jean  
LUTZ Elisabeth  
MALGRANGE Bernard  
MALINAS Yves  
MARTIN-NOEL Pierre  
MAZRE Yves  
MICHEL Robert  
MOURQUAND Claude  
NEEL Louis  
OZENOA Paul  
PAYAN Jean-Jacques  
PEBAY-PEYROULA Jean-Claude  
RASSAT André  
RENAUD Michel  
REULOS René  
RINALDI Renaud  
ROGET Jean  
DE ROUGE-MONT Jacques  
SEIGNEURIN Raymond  
SENGEL Philippe  
SOUTIF Michel  
TANCHE Maurice  
TRAYNARD Philippe  
VAILLANT François  
VALENTIN Jacques  
VERAIN Alice  
VERAIN André  
VEYRET Paul  
VIGNAIS Pierre  
YOCOZ Jean

Chimie physique  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Analyse numérique  
Pharmacologie  
Electroradiologie  
Mathématiques Pures  
Mécanique  
Géologie  
Physique générale  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Mécanique  
Thermodynamique  
Biologie végétale  
Physique  
Chirurgie générale  
Biochimie pharmacologique  
Mathématiques Appliquées  
Clinique médicale  
Géophysique  
Physique nucléaire  
Géographie  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Clinique obstétricale  
Sémiologie médicale  
Minéralogie et pétrographie  
Histologie  
Chimie nucléaire  
Physique du Solide  
Botanique  
Mathématiques Pures  
Chimie systématique  
Thermodynamique  
Physique Industrielle  
Physique  
Clinique de pédiatrie et de puériculture  
Neuro-chirurgie  
Microbiologie et Hygiène  
Zoologie  
Physique générale  
Physiologie  
Chimie générale  
Zoologie  
Physique Nucléaire  
Calcul électronique  
Pharmacologie galénique  
Géographie  
Biochimie médicale  
Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS SANS CHAIRE

Mlle AGNIUS-DELORD Claudine  
M. ALARY Josette  
BELORIZKY Ette  
BERPANDIAS Jean-Paul  
BONNET Jean-Pierre  
BONNET Jene  
BRUGEL Lucien  
CARLIER Georges  
CONTE René  
DEPASSAL Roger  
GAUTHIER Yves  
GAUTRON René  
GIDON Paul  
GLEMAT René  
HACQUES Gérard  
HOLLARD Daniel  
HUGONOT Robert  
IDELMAN Simon  
JANIN Bernard  
JOLY Jean-René  
JULLIEN Pierre  
KHANE Josette  
KHAN Gérard  
LUU-DUC-Cuong  
MAYNARD Roger  
NOLLER Jean-Michel  
PERRIAUX Jean-Jacques  
PFISTER Jean-Claude  
PIERY Yvette  
REBOCO Jacques  
REVOL Michel  
REYMOND Jean-Charles  
ROBERT André  
SARRAZIN Roger  
SARROT-REYNAUD Jean  
SIBILLE Robert  
SIROT Louis  
SOUTIF Jeanne  
M. VIAON Pierre  
Mme VAN COUTSEM Bernard

Physique pharmaceutique  
Chimie analytique  
Physique  
Mathématiques appliquées  
Mathématiques appliquées  
Mécanique  
Chimie générale  
Energétique  
Biologie végétale  
Physique  
Mécanique des Fluides  
Sciences biologiques  
Chimie  
Géologie et Minéralogie  
Chimie organique  
Calcul numérique  
Hématologie  
Hygiène et Méd. Préventive  
Physiologie animale  
Géographie  
Mathématiques pures  
Mathématiques appliquées  
Physique  
Physique  
Chimie Organique  
Physique du solide  
Thérapeutique  
Géologie et minéralogie  
Physique du solide  
Physiologie animale  
Biologie (CUS)  
Urologie  
Chirurgie générale  
Chimie papetière  
Anatomie et chirurgie  
Construction Mécanique  
Chirurgie générale  
Physique générale  
Géologie  
Mathématiques appliquées

MATRES DE CONFERENCES ET MATRES DE CONFERENCES AGREGES

Mme AMBLARD Pierre  
M. AMBROISE-THOMAS Pierre  
ARMAND Yves  
BEGUIN Claude  
BERTEL Hélène  
BILLET Jean  
BOUCHERET Jacques  
BOUCHE Liane  
BOUCHERAT Jacques  
Mme BRODEAU François  
BRODEAU Roger  
BUTTEL Jean  
M. BUISSON Roger  
CHAMBAZ Edmond  
CHAMPETIER Jean  
CHERADAME Hervé  
CHIAPERINA Jean

« وأنزلنا من السماء  
 ماء بقدر فأسكناه في  
 الارض »

قرآن كريم

"Et nous avons fait  
 tomber du ciel une eau en  
 quantité déterminée et  
 Nous l'avons emmagasi-  
 née dans le sol".

Coran

MM. COHEN-ADDAO Jean-Pierre

COUDON Maurice  
 COULOMB Max  
 CROUZET Guy  
 CYROT Michel  
 DELOBEI Claude  
 DISSAUD René  
 ETEPADOSSI Jacqueline  
 Mme FAUPE Jacques  
 FONTAINE Jean-Marc  
 GENSAC Pierre  
 GIDON Maurice  
 GRUFFINS Michèle  
 GROS Yves  
 GROULADE Joseph  
 GUTTON Jacques  
 IANES Marcel  
 JALBERT Pierre  
 KRAKONIAK Sacha  
 Mme LAZEMOIZ Jeanline  
 LEROY Frilippe  
 LOISEUX Jean-Marie  
 MACHÉ Ragnis  
 MARCHAL Jean  
 MARTIN-BOUYER Michel  
 MICHOLLIER Jean  
 Mme MINIER Colette  
 M. MICOUD Max  
 NÈGRE Robert  
 PARANVILLE Bernard  
 PECCOU François  
 PEFREN René  
 PELMONT Jean  
 PERRET Jean  
 PHELIP Xavier  
 RACHAIL Michel  
 RACHINET Claude  
 RAYNAUD Hervé  
 RAYNAUD Maurice  
 Mme RENAUDET Jacqueline  
 M. RICHARD Lucien  
 Mme RIVAUDO Marguerite  
 M. ROMIER Guy  
 SHOU Jean Claude  
 STRIEGLITZ Paul  
 STOEHNER Pierre  
 VROUSOS Constantin

Spectrométrie physique  
 Biochimie médicale  
 Radiologie  
 Radiologie  
 Physique du solide  
 M.I.A.G.  
 Mathématiques (C.S.)  
 Physiologie  
 Médecine légale  
 Mathématiques Pures  
 Botanique  
 Géologie  
 Mathématiques Appliquées  
 Physique (Stage)  
 Biochimie médicale  
 Chimie  
 Electricité  
 Histologie  
 Mathématiques appliquées  
 Physique  
 Mathématiques  
 Physiologie Nucléaire  
 Physiologie végétale  
 Hygiène et Médecine préventive  
 Mécanique  
 Chimie (C.S.)  
 Chimie (I.U.T. "A")  
 Physique  
 Mécanique  
 Maladies infectieuses  
 Pneumologie  
 Analyse (I.U.T. B)  
 Métrologie  
 Physiologie animale  
 Neurologie  
 Physiologie  
 Rhumatologie  
 Médecine Interne  
 Gynécologie et obstétrique  
 M.I.A.G.  
 Chimie  
 Bactériologie  
 Chimie  
 Chimie macromoléculaire  
 Mathématiques (I.U.T. B)  
 Chimie Générale  
 Anesthésiologie  
 Anatomie pathologique  
 Radiologie

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE T.1. N.P.G.

PROFESSEURS TITULAIRES

M. BENOIT Jean  
 BESSON Jean  
 BONNETAIN Lucien  
 BONNIER Edouard  
 BRISONNEAU Pierre  
 BUIX-BOUDIN Maurice  
 COLMES René  
 FELICI Noël  
 FLOURNET René  
 FERRIC René  
 SANCHE Lucien  
 SILBER Robert

Radiolécitricité  
 Electrochimie  
 Chimie Minérale  
 Electrometallurgie  
 Physique du solide  
 Action laser  
 Radiolécitricité  
 Electrochimie  
 Physique du solide  
 Servomécanisme  
 Mécanique  
 Mécanique des Fluides

PROFESSEUR ASSOCIE

M. BODOURIS Georges

Radiolécitricité

PROFESSEURS SANS CHAIRE

M. BILMAN Samuel  
 BLOCH Daniel  
 COHEN Joseph  
 DURAND Francis  
 MOREAU René  
 POLJOUADOFF Michel  
 VEILLON Gérard  
 ZADMOHNY François

Electronique  
 Physique du solide et Cristallographie  
 Electrochimie  
 Métrologie  
 Mécanique  
 Electrochimie  
 Informatique fondamentale et appliquée  
 Electronique

MAITRES DE CONFERENCES

M. BOUYARD Maurice  
 CHARTIER Germain  
 FOLJARD Claude  
 QUYOT Pierre  
 JOUBERT Jean Claude  
 LACOUR Jean Louis  
 LANCIA Roland  
 LESPIVARD Georges  
 MORET Roger  
 ROBERT François  
 SABONNIERE Jean Claude  
 SAUCIER Gabriel  
 Mme SANCHEUR Gabriel

Génie mécanique  
 Electronique  
 Automatique  
 Chimie minérale  
 Physique du solide  
 Géophysique  
 Physique atomique  
 Mécanique  
 Electrochimie nucléaire  
 Analyse numérique et appliquée  
 Informatique fondamentale et appliquée  
 Automatique

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE

M. LANDAU Ioan Doré

Automatique

CHARGE DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

M. ANCEAU François

Mathématiques appliquées

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

M. CRABEE Pierre  
 M. CUREL Jan

C.E.R.M.O.  
 Mathématiques appliquées  
 Mathématiques appliquées

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

M. BARGE Michel  
 CONTAMIN Charles  
 CORRONNIER Daniel  
 DENIS Bernard  
 ROLOUE Lucien  
 RAYNAUD Pierre  
 ROCHART Jacques

Neurochirurgie  
 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire  
 Néphrologie  
 Cardiologie  
 Hématologie  
 Radiologie  
 Hygiène et hydrologie

## AVANT PROPOS

Je voudrai, au moment de conclure ce mémoire, exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours encouragé dans l'accomplissement de mes études et à ma femme, qui, par sa grande affection et sa patience m'a permis de parachever ce travail.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à Monsieur le professeur J. SARROT-REYNAULD qui m'a accueilli à l'Institut Dolomieu et m'a guidé et conseillé sans relâche dans l'élaboration de ce travail dont nous avons pu examiner ensemble un grand nombre d'aspects, lors de la tournée que nous avons fait ensemble sur le terrain.

Je remercie Monsieur le professeur R. BARBIER qui m'a fait l'honneur de présider le Jury et me fait bénéficier de sa connaissance de l'Iran.

Je remercie Monsieur le professeur G. CASTANY, qui a bien voulu participer au jury et qui connaît tous les problèmes de l'hydrogéologie des régions arides.

Je remercie Monsieur le professeur R. MICHEL, qui est à l'origine de la coopération entre les géologues iraniens et l'Institut Dolomieu, et qui a bien voulu accepter de participer à ce jury.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur F. BAZIN, qui a bien voulu, malgré ses lourdes charges, discuter certains problèmes d'hydrodynamique.

Je remercie également tout le corps enseignant de l'Institut Dolomieu et spécialement son directeur, Monsieur P. GIRAUD;

Je n'oublierai pas non plus de remercier Mlle S. GUEIRARD, professeur à l'Université de Marseille Saint-Jérôme, qui m'a accueilli dans son laboratoire, lors de mon premier séjour en France.

Je remercie Monsieur M. R. SEPEHR, sous-directeur du département des eaux souterraines de l'Iran, pour nos nombreuses discussions fructueuses pour l'avancement de cette étude.

Je remercie également mes amis MM. S. FIROUZI, directeur du département des eaux souterraines du Fars ainsi que F. PANAH, N. NAVIDAR, K. BOZORGUI et N. TAHERI de l'aide amicale qu'ils m'ont accordé pour la réalisation de cette étude.

Je remercie également le personnel du laboratoire d'analyses chimiques de l'Organisation de l'Eau du Fars.

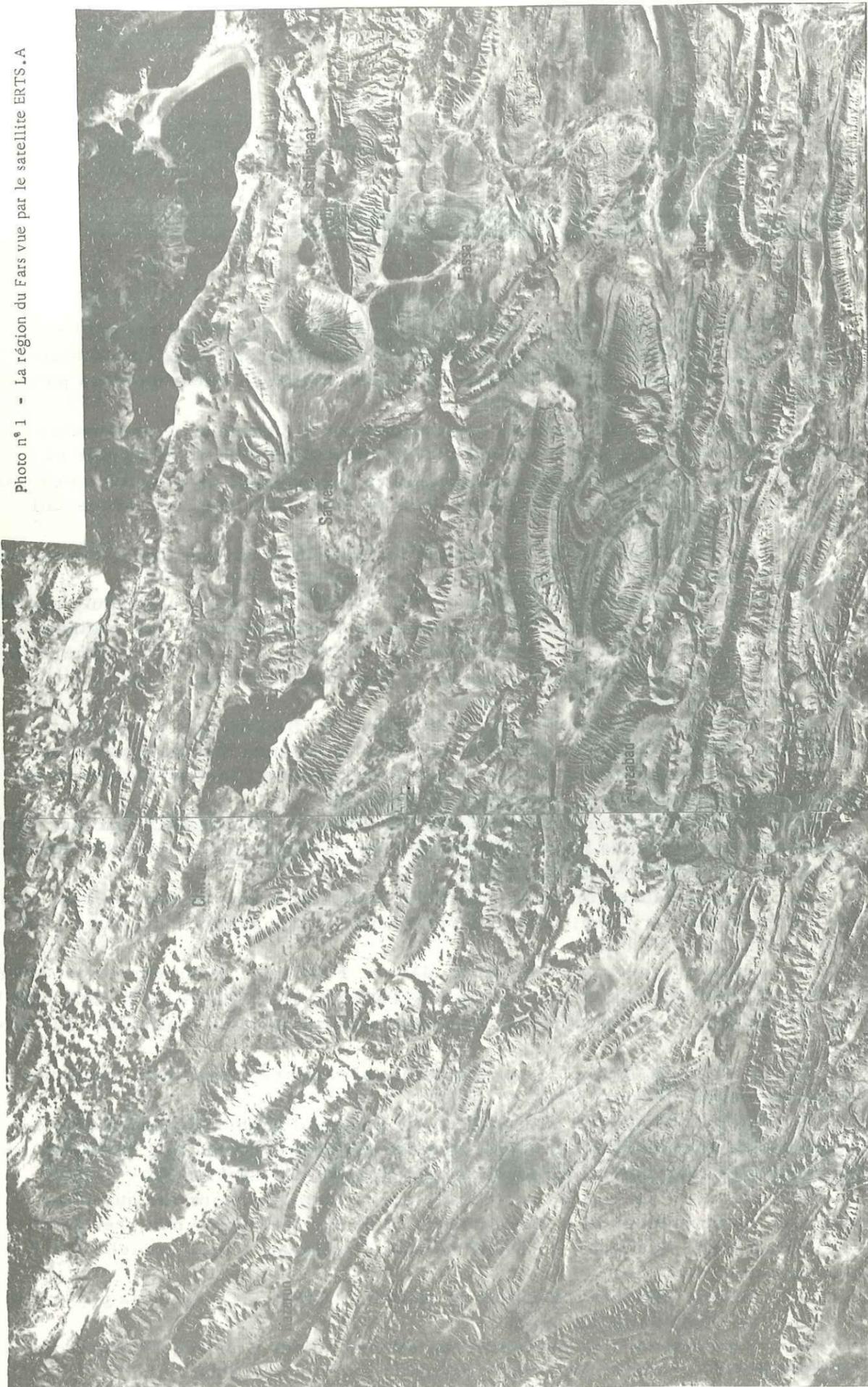
Je remercie Monsieur MARGRITA, du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble et Monsieur MARCE du Service des Laboratoires du B. R. G. M. qui ont bien voulu effectuer des mesures de teneur en tritium et soufre 34.

Je remercie l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique qui a bien voulu nous communiquer des résultats sur la teneur isotopique des précipitations.

Je remercie Monsieur D. FABRE, pour l'obligeance avec laquelle il m'a initié au calcul matriciel.

Je remercie Madame TELMAT et Monsieur CHABERT, pour la part qu'ils ont pris dans l'édition de ce texte.

Ma reconnaissance va également au Ministère des Affaires Etrangères français qui m'a accordé une bourse d'études par l'intermédiaire du C. R. O. U. S.



## INTRODUCTION

### 1. - BUT ET METHODE DE L'ETUDE

La région de Chiraz, qui fait l'objet de cette étude se situe au centre de la province du Fars (ancienne Perse).

Dans la province du Fars, il existe un problème en ce qui concerne les eaux potables, parce que les nappes alluviales sont riches en sulfates, du fait de l'existence des sédiments du Miocène, parce que dans certaines régions, en raison de l'existence de dômes de sel, toutes les eaux sont salées (rivière Chur). Il y a aussi en raison de l'existence de bassins d'évaporation beaucoup de nappes superficielles très salées.

Le climat de cette région est semi-aride mais tempéré. Les moyennes des précipitations des plaines dépassent rarement 300 mm, mais les précipitations sur les montagnes sont plus abondantes, et l'on a beaucoup de neige dans les zones du Nord.

Les affleurements de calcaire sont abondants et en raison des éléments tectoniques et climatologiques, les calcaires de cette région sont très fissurés et fracturés. La karstification est assez avancée.

Les sources issues des massifs calcaires sont abondantes et considérables au point de vue du débit : par exemple la source de Khosro-Chirin à l'amont de la rivière de Kor a un débit de plus de 2 000 l/s, la source de Ghadamgah, près du village de Droudzan fournit plus de 500 l/s, la source de Hosseinabad au pied de la montagne de Beyza donne, elle, plus de 1 500 l/s, tandis que la source de Djouchak, dans le bassin versant du Moharlu a un débit moyen de plus de 500 l/s. Il existe donc dans les calcaires de la région du Fars des ressources considérables en eau douce.

Il y a déjà quelques années que l'on a étudié suffisamment les nappes des alluvions et les réserves de ces nappes ne sont pas suffisantes pour les besoins en eau potable, industrielle et agricole.

Pour ces raisons le Ministère de l'Eau et de l'Electricité a organisé des équipes pour étudier et rechercher l'eau douce dans les massifs calcaires qui affleurent dans la province du Fars.

Nous avons travaillé pendant trois ans dans cette organisation pour étudier les bassins du lac Moharlu et de Bakhtegan.

Dans les pages suivantes, on tentera de montrer les problèmes hydrogéologiques que l'on rencontre dans les calcaires du bassin versant du lac Moharlu. Notre étude sera donc en grande partie une contribution à la connaissance des phénomènes karstiques dans la province du Fars et de leur répercussion sur l'hydrogéologie.

Dans le cadre de cette étude, nous avons travaillé tout d'abord sur les éléments climatologiques mais il faut préciser que nous n'avons pas disposé de toutes les données souhaitables pour l'ensemble de la région.

Nous avons cependant essayé de déterminer la lame d'eau précipitée, en établissant la carte des **isohyètes**, puis en déterminant le gradient altimétrique de précipitation afin de l'utiliser compte tenu des moyennes arithmétiques. Nous avons également utilisé la méthode de Thiessen.

L'utilisation des différentes formules de calcul de l'évapotranspiration ne conduit pas à des résultats cohérents dans la région étudiée. En raison de l'incompatibilité entre les valeurs trouvées, on a déterminé la valeur de l'infiltration à partir de l'analyse des débits des sources et de la valeur des précipitations pour les massifs calcaires. On a ensuite calculé la lame d'eau écoulee grâce aux photos successives de la surface de l'eau du lac Moharlu, prises depuis les satellites (E. R. T. S. A) (1).

(1) - Earth Ressource tech satellite A

A partir de ces deux éléments, nous avons pu évaluer l'évapotranspiration dans la région de Chiraz.

En ce qui concerne la géologie de la région, nous utiliserons la nomenclature stratigraphique du Zagros, établie par les géologues pétroliers et présentée par JAMES et WYND en 1965.

Nous avons établi une carte géologique au 1/200 000 pour le bassin versant du lac du Moharlu avec huit coupes semi-schématiques et nous avons replacé l'évolution de la région dans son cadre paléogéographique, après avoir décrit la structure.

Pour l'étude de l'hydrogéologie karstique proprement dite de la région nous avons analysé en détail les caractères des divers massifs calcaires et des sources qui en proviennent.

Nous avons ainsi établi pour onze sources de cette zone les courbes de tarissement par les méthodes de MAILLET et TISON, à partir de trois ans environ de mesures mensuelles.

A partir de ces courbes, nous avons déterminé les volumes des réserves contenues dans les calcaires, la transmissivité et le coefficient d'emménagement des nappes.

L'interprétation des essais de pompage faits sur six puits dans la région de Chiraz et six puits situés dans d'autres régions de la province du Fars, a été entreprise pour déterminer les caractères hydrodynamiques des nappes aquifères contenues dans les calcaires et qui ont été rencontrées par ces ouvrages.

Nous avons étudié également la fissuration et la fracturation sur les différents affleurements des calcaires de cette région pour essayer de déterminer la valeur de la "perméabilité équivalente" de ces calcaires.

Nous avons enfin précisé tous les caractères physico-chimiques des eaux des sources et des puits et nous avons complété les recherches par des analyses sur les teneurs en tritium et en carbone 14 des eaux les plus intéressantes.

C'est à partir de l'ensemble de tous les résultats ainsi obtenus que nous essaierons de présenter une synthèse faisant ressortir les traits fondamentaux de l'hydrogéologie karstique que l'on observe dans cette région de l'Iran.

## 2. - CADRE GEOGRAPHIQUE

### 2.1. - Situation géographique

Le bassin versant de Moharlu est situé au Sud de l'Iran, à 910 km au Sud de Téhéran (fig. 1).

Ce bassin est situé entre les latitudes 29°, 01' - 30°, 01' et les longitudes 52°, 11' - 53°, 29'. Il est limité par la rivière de Kor au Nord et la rivière de Ghara-aghatch au Sud.

La ville de Chiraz qui est le centre de la province du Fars est située dans le bassin versant du lac du Moharlu.

### 2.2. - Habitants et surface de la région

La population de la ville de Chiraz et des villages de la banlieue est de 545 000 habitants.

Les habitants de la ville de Chiraz sont au nombre de 270 000.

La surface totale de ce bassin est de 4 250 km<sup>2</sup>. L'altitude moyenne de la plaine de Chiraz est de 1 500 m et l'altitude moyenne des montagnes que l'on trouve dans cette région est de 1 900 m.

### 2.3. - Agriculture

Dans cette région il y a 22 500 hectares de terrain de culture qui sont arrosés par la pluie, et 32 500 hectares de culture qui sont irrigués.

Dans cette région, on trouve 200 puits profonds, 1 500 puits superficiels ainsi que 105 ghanates et plus de 30 sources.

## 3. - INDUSTRIE

L'industrie, dans la région de Chiraz est peu développée. On trouve dans cette zone seulement une usine de ciment au pied de la montagne de Darak.

Mais en dehors de la ville de Chiraz, il y a deux usines de sucre, dans les villes de Marvdacht et de Kavar, une raffinerie de pétrole à 20 km au Nord de Chiraz, et aussi une usine d'engrais chimique à Marvdacht (40 km au Nord de Chiraz).

CHAPITRE 1

HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT DU LAC MOHARLU

1.1. - Météorologie

1.1.1. - Situation géographique des stations

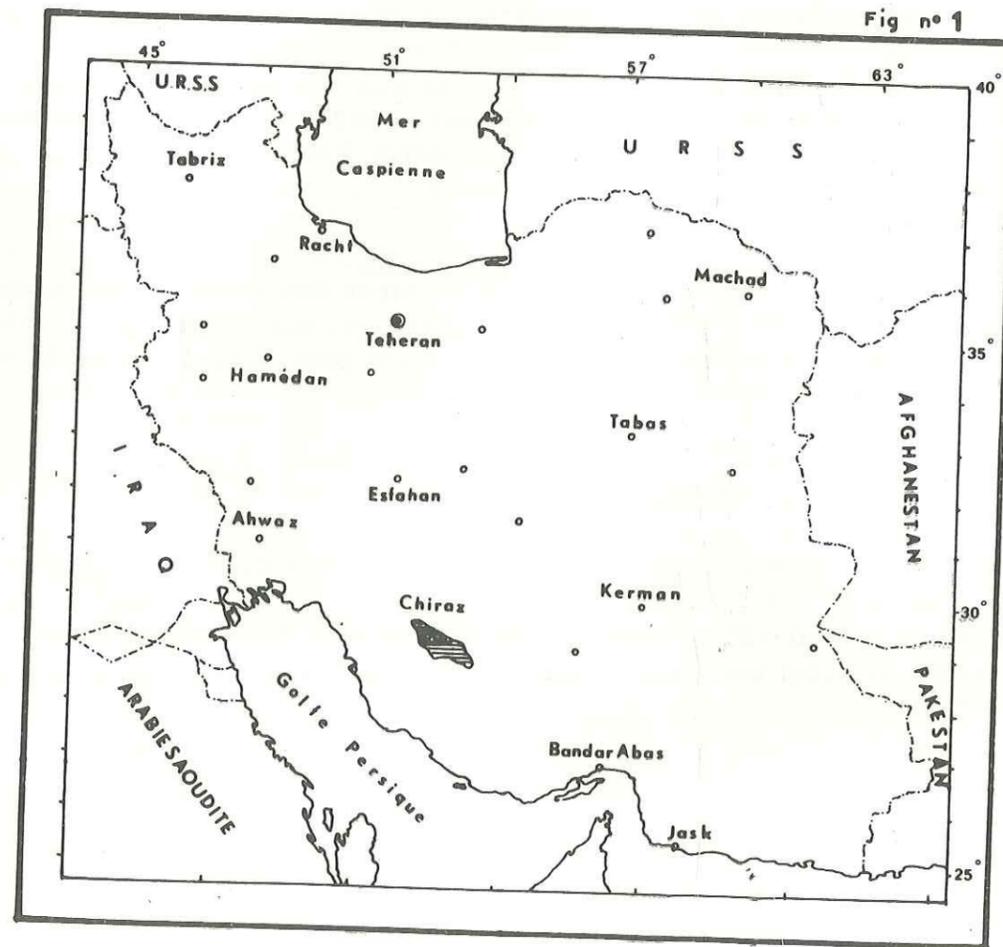
Dans la région de Chiraz, on trouve une station synoptique à l'aéroport, à 10 km au Sud Est de la ville de Chiraz. On a aussi trois stations climatologiques : une à l'Université, une autre à Kavar, à 40 km au Sud de Chiraz qui n'a plus fonctionné après 1969. La troisième station qui est à Sarvestan, à 100 km au SE de la ville de Chiraz, n'a pas fonctionné non plus, malheureusement après 1969.

Par ailleurs, on a dans cette région, quelques stations pluviométriques :

- au village de Dokuhak, à 20 km au NW de Chiraz et à l'altitude 1 800 m ;
- dans le village de Moharlu, à 35 km au SE de la ville de Chiraz ; l'altitude de ce pluviomètre est de 1 490 m ;
- dans le village de Deubaneh, il y a un pluviomètre à 10 km du village de Moharlu.
- dans le village de Kuhendjan, à 50 km au SE de Chiraz ; l'altitude du pluviomètre est de 1 469 m ;
- dans le village de Ghalat, à 30 km au NW de la ville de Chiraz l'altitude de ce pluviomètre est de 2 000 m ;
- à la Faculté d'Agriculture, à 17 km au N de Chiraz, à l'altitude 1 765 m.

Nous avons aussi deux stations pluviométriques dans la ville de Chiraz, l'une à l'Organisation de l'Eau et l'autre au Consulat de Grande-Bretagne.

On constate donc que le nombre des stations par rapport à la surface de la région n'est pas suffisant et que la distribution des stations dans la région n'est pas satisfaisante non plus, néanmoins nous essaierons d'exploiter au mieux les données disponibles.



Situation du bassin versant du lac Moharlu dans le cadre de l'Iran

1.1.2 - Répartition altitudinale du bassin versant

Les altitudes du bassin de Moharlu sont comprises entre 1 460 m près du lac et 2 960 m au sommet du synclinal perché de Ghalat. On a calculé la distribution des altitudes du bassin versant et avec ces résultats on a tracé la courbe de fréquence altimétrique. L'altitude moyenne du bassin du lac Moharlu est 1 640 m (fig. 2).

Altitude m	Surface km <sup>2</sup>	%	Somme des surfaces km <sup>2</sup>	Somme des %
<1 500	955	22,5	955	22,5
1 500-1 600	995	23,4	1 950	45,9
1 600-1 800	840	19,8	2 790	65,7
1 800-2 000	580	13,6	3 370	79,3
2 000-2 200	420	9,9	3 790	89,2
2 200-2 400	268	6,3	4 058	95,5
2 400-2 600	152	3,6	4 210	99,1
> 2 600	40	0,9	4 250	100

Tableau n° 1

1.1.3 - Climatologie

Le climat de la région est sous l'influence de l'altitude et des montagnes qui sont autour de la ville de Chiraz. Les précipitations de cette région sont d'origine cyclonique.

Les cyclones qui viennent de l'Atlantique, de la Méditerranée et du Nord de l'Afrique, au contact de l'air froid qui existe sur les montagnes donnent des précipitations brutales. En effet, on a dans cette région de fortes intensités de précipitations, et cette intensité peut atteindre 110 mm par jour.

Les précipitations de la région commencent au milieu de l'automne et continuent jusqu'au début du printemps. Pendant l'été, on a de rares précipitations; par exemple entre 1950 - 1972 on a eu seulement 24,6 mm de précipitation, pendant l'été 1956.

En été, la région de Chiraz est sous l'influence de hautes pressions sub-tropicales et de vents secs du NW. Pour cette raison, les précipitations sont rares.

De façon générale, on peut dire que la distribution des précipitations de la région de Chiraz est de 55 % en hiver, 125 % au printemps et 32,5 % à l'automne, et on peut considérer les précipitations de l'été comme nulles. En tout cas le régime des pluies est hivernal.

1.1.4 - Précipitations

Comme nous l'avons déjà indiqué, il y a dans le bassin du Moharlu sept stations pluviométriques, trois stations climatologiques et une station synoptique.

On ne dispose que des relevés pluviométriques de 25 années pour la station de l'aéroport de Chiraz.

Les résultats de cette station montrent que la hauteur moyenne des précipitations est de 332 mm.

Les écarts des précipitations annuelles dans cette région sont considérables, par exemple on a eu 96 mm en 1966 et 784 mm pour l'année 1954 (fig. 3).

Les distributions mensuelles des précipitations dans cette station sont reportées sur le tableau n° 2. Ces résultats montrent que le mois de janvier est le mois le plus humide et qu'aux mois de juin et septembre on n'a pas de précipitations.

Tableau n° 2 Précipitations mensuelles de la période 1950 - 1974 Station de l'Aéroport de Chiraz (en mm)

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	
1950	70.7	35.5	52.5	6.5	31.9	-	-	0.3	-	-	82.3	17.8	297.5	
51	68.2	98.2	66	3.6	51.8	-	-	-	-	-	-	95.7	383.5	
52	42.9	60.4	46.2	57.9	20.4	-	-	-	-	-	30.7	73.9	332.4	
53	8.6	89.7	69.9	22.3	-	-	-	-	-	0.8	50.7	192.8	434.8	
54	37.1	93.4	184.6	33.4	-	-	-	-	-	-	305.5	129.9	783.9	
55	35.5	2.8	71.9	16.8	1.5	-	-	-	-	-	-	100.8	229.3	
56	111.8	1.8	65.3	21.3	-	-	24.6	-	-	-	-	196.4	421.2	
57	140	59.9	31.2	38.6	44.4	-	-	-	-	-	239	99	652.1	
58	129.2	18.4	28.1	7.5	5	-	-	-	-	-	5.3	46.7	240.2	
59	136.3	35.5	9.6	6	4.4	-	-	-	-	-	19.5	2.5	213.8	
1960	69.4	6.9	61.8	37	-	-	-	-	-	-	2	8.2	185.7	
61	67.7	63.8	96.7	53.4	-	-	-	-	-	-	47.4	30	359	
62	12.8	18.6	tr	171	-	-	-	-	-	-	7	3.4	212.8	
63	1.8	69.3	34.1	10.1	11	-	-	-	-	-	28.1	65.1	219.5	
64	39.3	75.6	15.2	9.9	tr	tr	0.7	-	-	-	3.5	105.2	249.4	
65	330	29.8	2	25	0.3	tr	-	-	-	2.9	tr	11	401	
66	24.3	32.1	1.4	11.6	-	-	-	-	-	0.3	-	26.4	96.1	
67	76.6	88.7	7.1	41.5	3.5	-	0.1	-	-	-	138.9	34.3	390.7	
68	18.6	99.4	46.6	41.2	0.7	-	-	-	-	1.6	6.7	104	318.8	
69	146	16.3	38.5	87.9	22.4	-	-	1.5	-	27.4	31.2	20.1	391.3	
1970	82.1	15	52.2	19.2	-	-	-	-	-	-	-	-	10.5	179
71	39.7	42.5	-	36.8	-	-	-	-	-	-	17.2	55.4	191.6	
72	167.4	67.8	183.2	16	6.4	-	-	-	-	-	-	48.6	489.4	
73	81.6	20.2	31.6	4.5	-	-	18	-	-	-	22	21.4	199.3	
74	155.3	38.7	25.3	24.1	1.6	-	40	-	-	1.2	-	146.9	433.1	

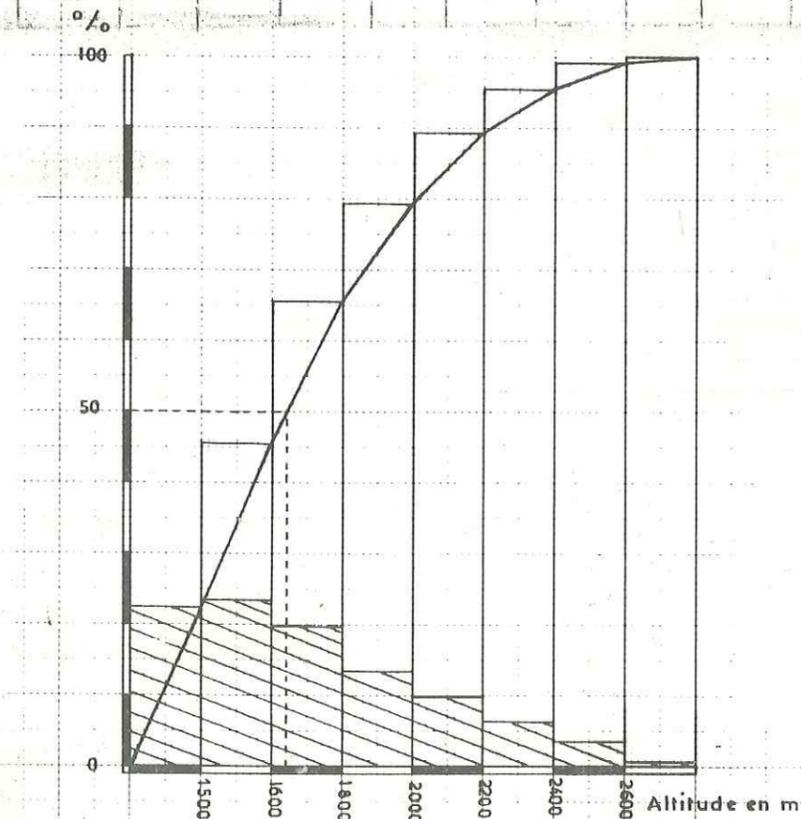


Figure n° 2 = Courbe hypsométrique du bassin MOHARLU

Tableau n° 3 - Précipitations et pourcentages saisonniers de la période 1950 - 1974  
Station de l'Aéroport de Chiraz (en mm)

Année	P. saisonnières				Pourcentage			
	hiver	printemps	été	automne	hiver	print.	été	automne
1950	158.7	38.4	0.3	100.1	53.35	12.9	0.1	33.65
51	232.4	55.4	-	95.4	60.6	14.5	-	24.9
52	149.5	78.3	-	104.6	44.98	23.55	-	31.47
53	168.2	22.3	-	244.3	38.68	5.13	-	56.19
54	315.1	33.4	-	435.4	40.20	4.26	-	55.54
55	110.2	18.3	-	100.8	48.06	7.98	-	43.96
56	178.9	21.3	24.6	196.4	42.47	5.06	5.84	46.63
57	231.1	83	-	338	35.44	12.73	-	51.83
58	175.7	12.5	-	52	73.15	5.2	-	21.65
59	181.4	10.4	-	22	84.85	4.86	-	10.29
1960	138.1	37	-	10.2	74.53	19.97	-	5.5
61	228.2	53.4	-	77.4	63.57	14.87	-	21.56
62	31.4	171	-	10.4	14.75	80.36	-	4.89
63	105.2	21.1	-	93.2	47.93	9.61	-	42.46
64	130.1	9.9	0.7	108.7	52.17	3.97	0.28	43.58
65	361.8	25.3	-	13.9	90.22	6.31	-	3.47
66	57.8	11.6	-	26.7	60.15	12.07	-	27.78
67	172.4	45	0.1	173.2	44.13	11.52	0.02	44.33
68	164.6	41.9	-	112.3	51.63	13.14	-	35.23
69	200.8	110.3	1.5	78.7	51.32	28.19	0.38	20.11
1970	149.3	19.2	-	10.5	83.41	10.73	-	5.86
71	82.2	36.8	-	72.6	42.90	19.21	-	37.89
72	418.4	22.4	-	48.6	85.49	4.58	-	29.93
73	133.4	4.5	18	43.4	66.93	2.26	9.03	21.27
74	219.3	25.7	40	148.1	50.7	5.9	9.2	34.2

Tableau n° 4 - Précipitations moyennes mensuelles, saisonnières et coefficient pluviométrique

Mois	Moyens mens. en mm	% mens.	Coefficient pluvio. mens.	Moyen. sais. en mm	% saisonnière	Coefficient pluvio. saison.
Janvier	83.7	25.2	2.97	Hiver 179.7	54.1	2.19
Février	47.2	14.2	1.85			
Mars	48.8	14.7	1.73			
Avril	32.1	9.7	1.17	Print. 40.3	12.2	0.5
Mai	8.2	2.5	0.29			
Juin	-	--	-	été 3.3	1	0.04
Juillet	3.3	1	0.12			
Août	-	-	-			
Septembre	-	-	-	automne 108.7	32.7	1.29
Octobre	1.4	0.4	0.05			
Novembre	41.5	12.5	1.52			
Décembre	65.8	19.8	2.33			
Moyenne annuelle	332	-	-			

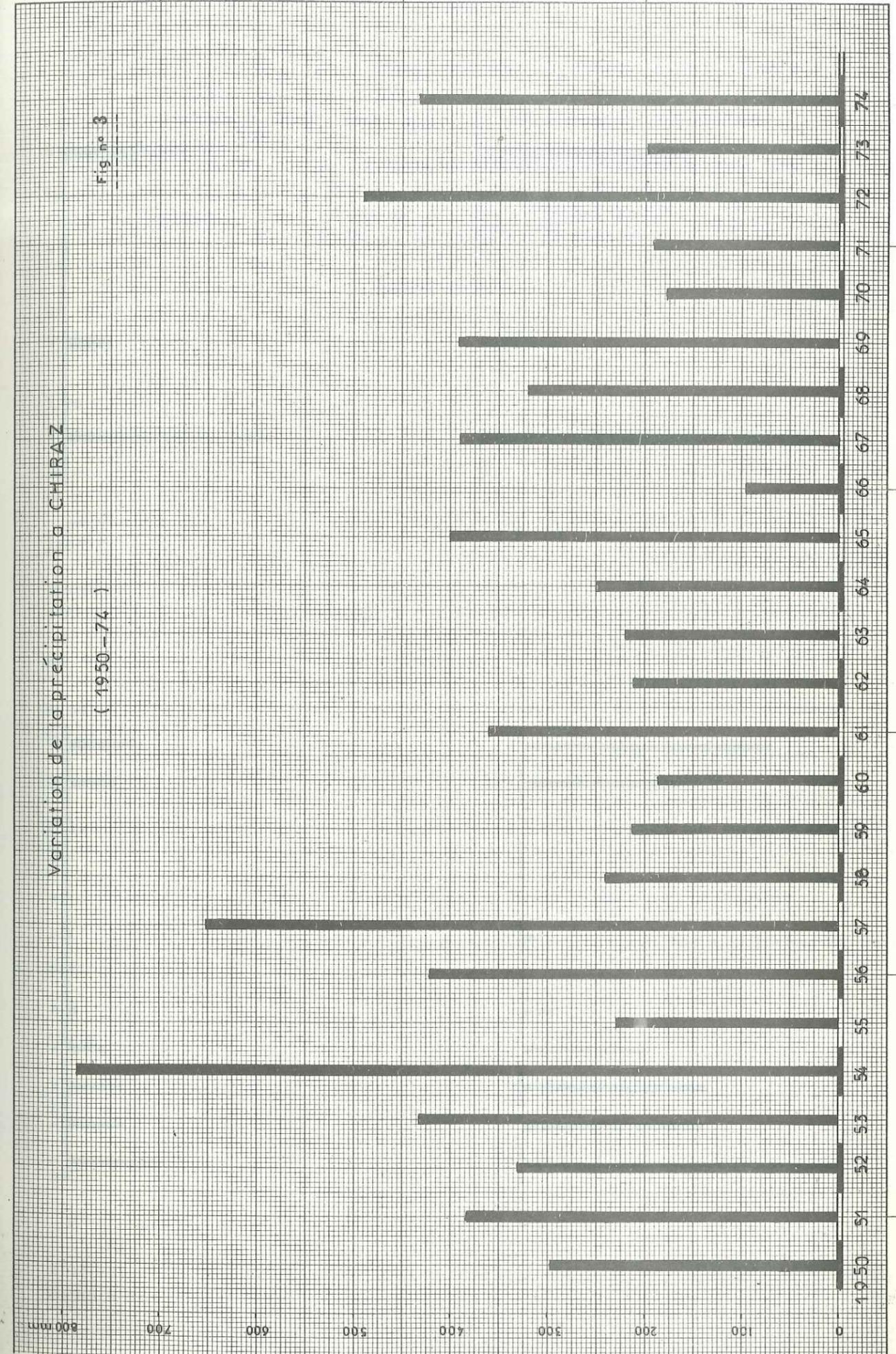


Fig n° 5

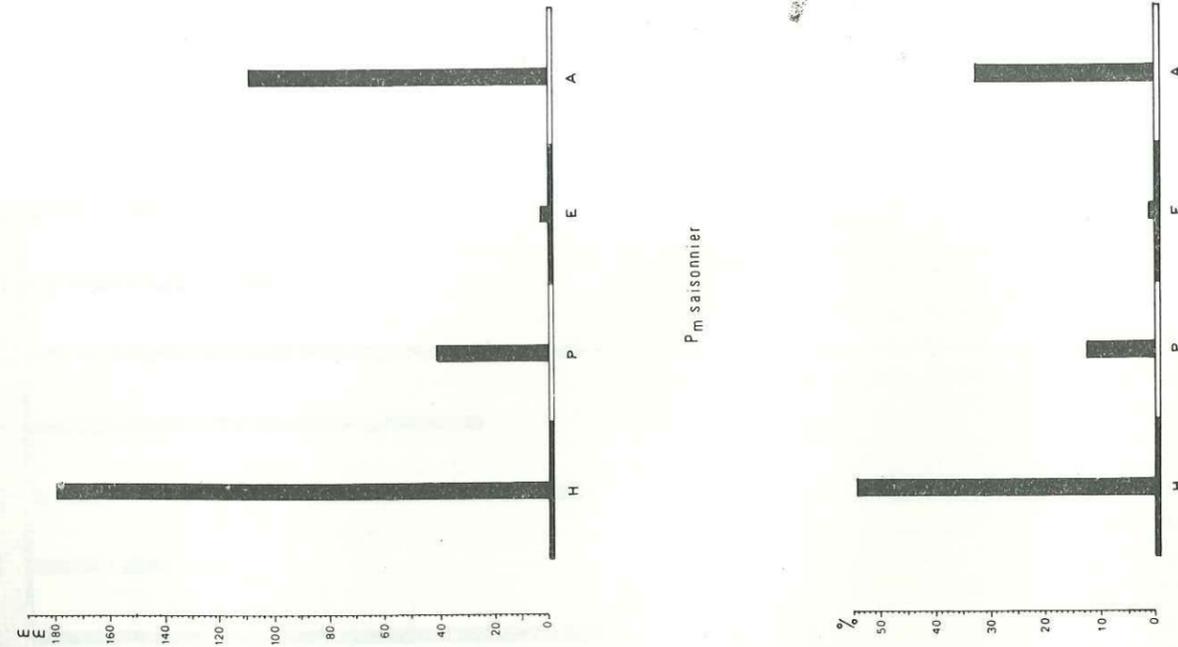
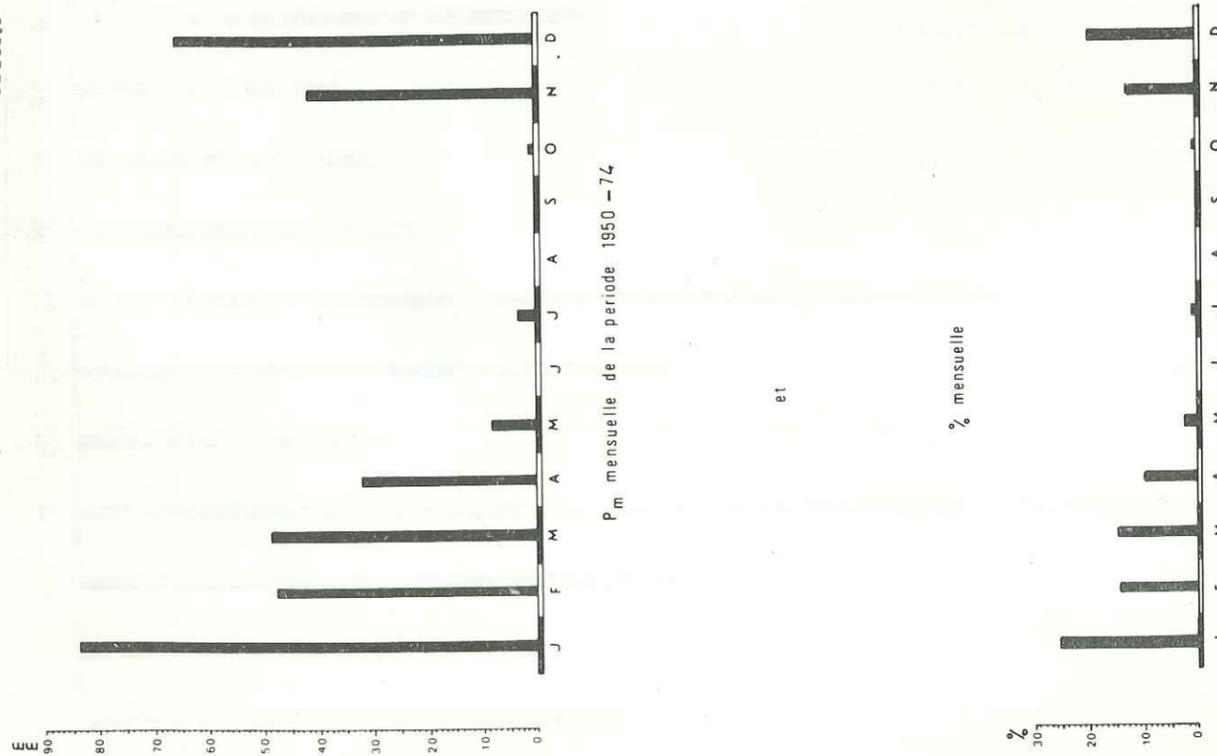


Fig n° 4

Precipitations de la region de CHIRAZ



Les précipitations saisonnières de cette région sont fournies sur le tableau n° 3. Les résultats nous montrent que l'hiver, avec 54,1 % est la saison pluvieuse, et l'été avec un pourcentage très faible des précipitations annuelles d'1 % est une saison très sèche.

A l'aéroport de Chiraz, la pluie fictive quotidienne est de 0,91 mm. La pluie fictive mensuelle est de 27,29 mm pour les mois de 30 jours et de 28,19 mm pour ceux de 31 jours.

Le coefficient pluviométrique mensuel est le rapport entre la pluie fictive mensuelle et la moyenne mensuelle. Il indique l'écart à une distribution uniforme.

S'il est plus petit que 1, le mois auquel il se rapporte est considéré comme un mois sec. Les mois qui ont un coefficient supérieur à 1, sont des mois "humides". Les mois sont d'autant plus secs ou plus humides que le coefficient s'écarte de l'unité.

Le tableau n° 4 donne les valeurs de ce coefficient pour l'aéroport de Chiraz. Les coefficients pluviométriques sont de 2,19 pour l'hiver, 0,5 pour le printemps et 1,29 pour l'automne. L'indice de l'été est très faible (tableau n° 4).

Le nombre moyen de jours de pluies pour la période 1959 - 1969 est de 45 j, le nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 1 mm est de 28 jours et le nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 10 mm est de 9 jours.

La plus grande hauteur de pluie mesurée en 24 heures est de 107,2 mm en janvier 1965.

Les précipitations des années 1971 et 1972 montrent que l'année 1971 est une année sèche avec 192 mm de précipitation et que 1972, avec des précipitations de 490 mm est une année très humide pour cette région.

Notons que 15,4 % des années ont été moins pluvieuses que l'année 1971 et 88,5 % des années ont été moins pluvieuses que l'année 1972.

La hauteur moyenne des précipitations en 1971 et 1972 est de 340 mm, c'est-à-dire d'environ 8 mm de plus que la moyenne des précipitations annuelles de la période 1950-1974.

Pendant l'hiver 1972, on avait plus de 84 % des précipitations et les précipitations du printemps et de l'automne représentent moins de 10 %.

En été, comme toujours, on n'avait pas de précipitations. On peut dire qu'en raison de l'évapotranspiration faible en hiver dans cette région, les précipitations de l'hiver augmentent considérablement les réserves souterraines.

#### Détermination de la lame d'eau précipitée

Pour le calcul de la lame d'eau du bassin du Moharlu, on a utilisé différentes méthodes :

##### 1° - Méthode de Thiessen

Cette méthode est moins précise que la méthode des isohyètes, on calcule la lame d'eau du bassin à partir des stations qui sont dans la région.

Il en résulte que la lame d'eau serait de 340 mm, soit environ  $1444 \times 10^6 \text{ m}^3$  annuels.

2° - La moyenne arithmétique des précipitations des 10 stations est de 342 mm, soit :  $1453 \times 10^6 \text{ m}^3$  annuels.

##### 3° - Carte des isohyètes

Si l'on trace les courbes d'égales précipitations à partir des nombreuses stations que l'on a dans la province du Fars, on trouve par cette méthode que la lame d'eau précipitée est de 407 mm, soit :  $1728 \times 10^6 \text{ m}^3$  annuels (fig. 6).

4° - Gradient altimétrique de précipitation

A partir des hauteurs annuelles de précipitation en fonction de l'altitude de chaque station, on établit une droite représentative du gradient altimétrique de précipitation dont sa valeur est de 293 mm pour 1000 mètres et à partir de l'équation de cette droite et de la distribution des altitudes du bassin versant, on a calculé la lame d'eau précipitée sur le bassin versant.

A partir des deux points A et B de coordonnées : (fig. n° 7)

$$A \begin{cases} P = 200 \\ h = 104 \end{cases} \quad B \begin{cases} P = 500 \\ h = 2065 \end{cases}$$

On peut calculer l'équation de la droite qui est :

$$P = ah + b$$

$$500 = 2065a + b$$

$$300 = 1024a + b$$

d'où

$$a = \frac{300}{1024} = 0,293$$

$$500 = 2065a + b$$

$$b = -105$$

$$P = 0,293h - 105$$

On peut donc calculer le volume des précipitations par tranche d'altitude  
Tableau n° 5

h m	S km <sup>2</sup>	P mm	V 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
< 1500	955	334	319
1500-1600	995	349	347
1600-1800	840	393	330
1800-2000	580	452	262
2000-2200	420	510	214
2200-2400	268	569	153
2400-2600	152	628	95
> 2600	40	686	27
Total	4250	411	1747

En affectant les divers termes des indices m pour les zones de montagne et p pour les zones de plaine on a :

$$V = S \times p \quad P_p = 344 \text{ mm}$$

$$V_p = 1710 \times 344 = 589, \times 10^6 \text{ m}^3 \quad P_m = 470 \text{ mm}$$

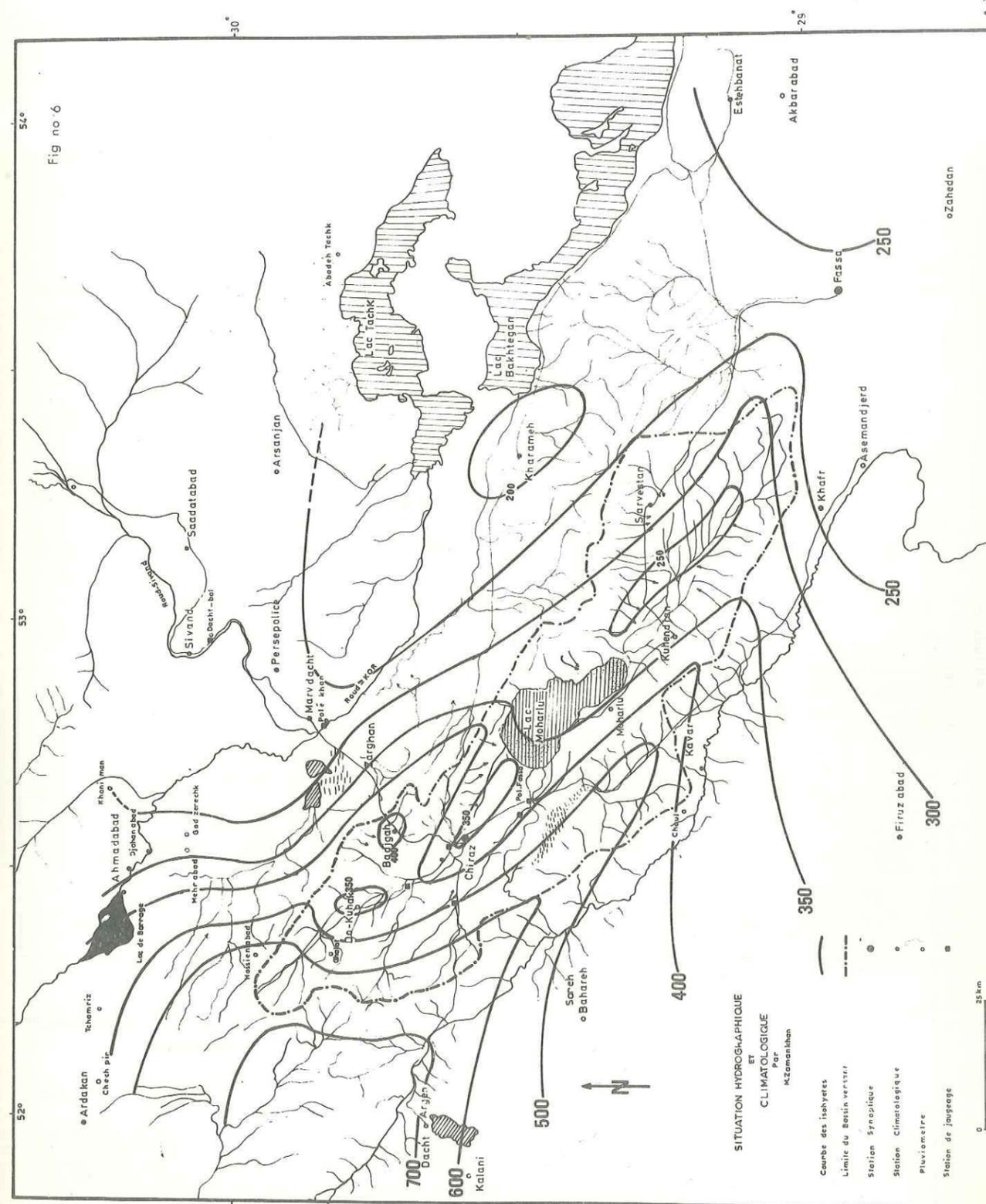
$$V_m = 2300 \times 470 = 1081 \times 10^6 \text{ m}^3$$

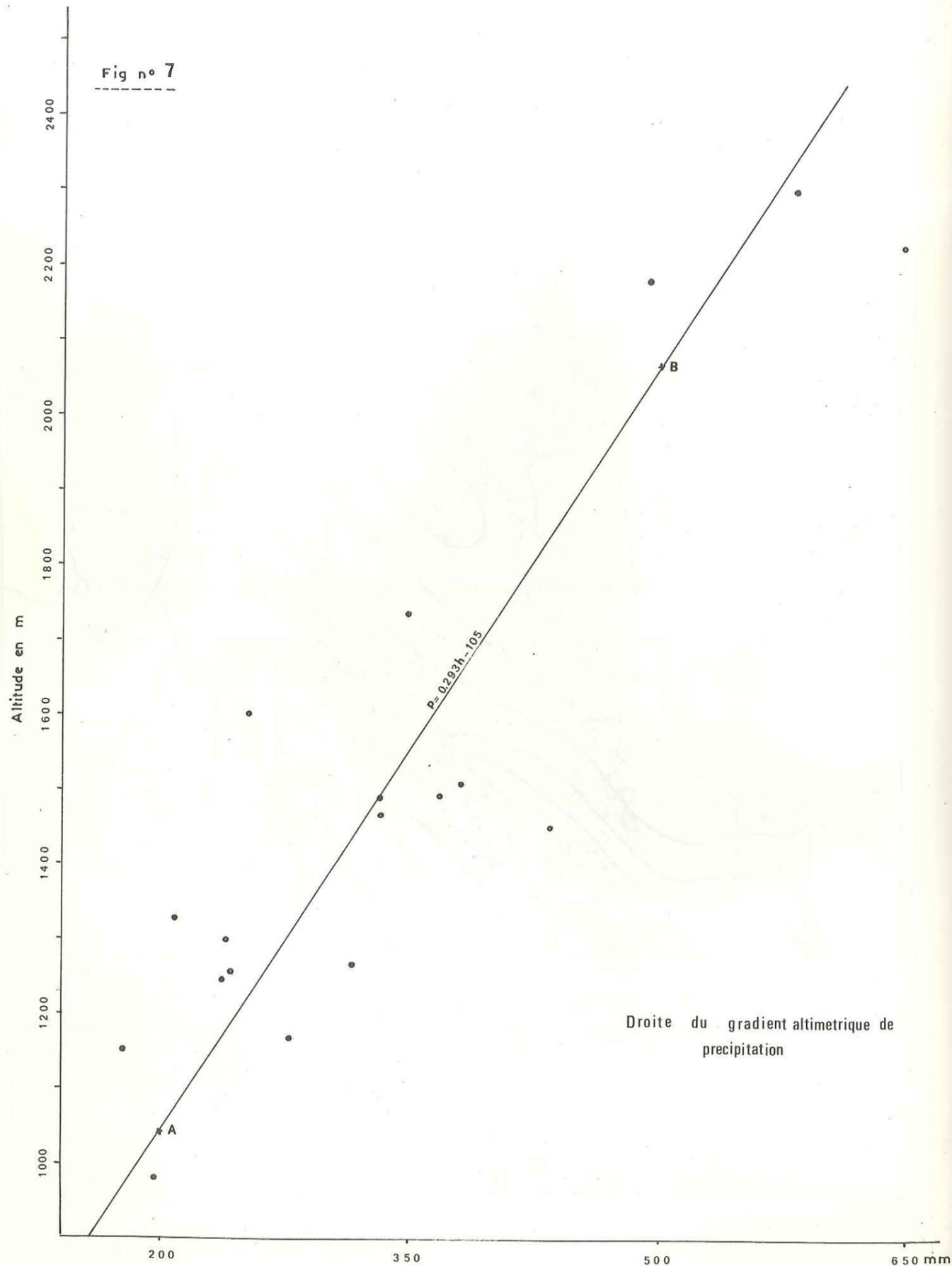
$$V_{lac} = 240 \times 321 = 77 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad P_{total} = \frac{1747}{4250} = 0,411$$

$$P_T = 411 \text{ mm}$$

Par cette méthode, on trouve une lame d'eau de 411 mm, soit  $1747 \times 10^6 \text{ m}^3$  pour l'ensemble du bassin, cette hauteur est de 470 mm, soit  $1081 \times 10^6 \text{ m}^3$  pour les zones de montagne et elle n'est plus que de 344 mm, soit  $589 \times 10^6 \text{ m}^3$  annuels pour les secteurs de plaine.

En conclusion, on voit que la méthode de Thiessen et la moyenne arithmétique





ne donnent pas des résultats très favorables parce que les distributions des stations ne sont pas suffisantes pour les montagnes et les plaines.

Il faut ajouter, que pour la carte des isohyètes, on avait la même difficulté, mais on a modifié les courbes originelles en fonction des caractères climatiques locaux de la région, en particulier sur les montagnes de Sabzpuhan, Darak et surtout Ghalat.

Il y a deux ans que l'on a un pluviomètre à Ghalat, et la moyenne des précipitations est de 610 mm. Il faut noter que l'altitude où est situé le pluviomètre, près du village, est d'environ 2 000 m, mais le sommet de la montagne a 3 000 m d'altitude.

Neige

La neige est rare dans les plaines de cette région, mais sur les montagnes la neige est abondante ; malheureusement, nous n'avons pas disposé de stations de mesure sur les montagnes.

1.1.5 - Température

La température moyenne annuelle de l'air est de 17° pour la période 1950-1973.

Le mois le plus chaud est le mois de juillet avec 28°3 C, et le mois le plus froid est le mois de janvier avec 5°7 C. Mais au cours de cette étude, en 1972, le mois de mars était le mois le plus froid, avec 3°1 C (tableau n° 6).

Les écarts entre les minimums et les maximums absolus sont très considérables, de 56,2°C avec le minimum de -14°C en mars 1972 (tableau 7), et le maximum de 42,2°C.

Le tableau ci-dessous montre les températures moyennes mensuelles et annuelles de l'air à la station de l'aéroport de Chiraz.

Tableau n° 6

1950-72	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année	
Moy. min.	-0.9	0.6	3.4	7.2	11.8	16.0	19.3	18.2	13.9	8.4	3.1	0	8.4	
Moy. max.	12.3	15.2	19.3	23.4	30.4	35.2	37.2	36.6	33.7	28	20.7	14.8	25.6	
Moy. mens.	5.7	7.9	11.3	15.3	21.2	25.6	28.3	27.4	23.8	18.2	11.9	7.4	17°	
1971	Min.	-7	-6	-1.4	-1.4	11	12	18.8	16.8	6.8	3.4	-3.8	-5.4	3.6
	Max.	19.4	22.8	25.6	28.4	34.6	38.8	38.8	38.8	38.6	30.4	26	20	30.2
1972	Moyen	6.2	8.4	12.1	13.5	22.8	25.4	28.8	27.8	22.7	16.9	11.1	17.3	16.9
	Min.	-5.4	-6.8	-14	3.5	6	12	14	12.4	10	5.6	-2.6	-5	2.5
1972	Max.	14.4	19	20.2	25.2	33.8	37.6	40.6	37.4	37	31.6	26.2	21.6	28.7
	Moyen	4.5	6.1	3.1	14.4	19.9	24.8	27.3	24.9	23.5	18.6	11.8	8.4	15.6

Les gelées

La moyenne des jours où il y a des gelées dans cette région est d'environ 60 jours par an.

Tableau n° 7

1950-1972	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Min absolu	-10.2	-8.4	-14	-2.5	3.6	3.7	13.3	11.6	1.4	2	-7.5	-8.5	
Max. absolu	22.2	24	27.8	32	38.6	40.6	42.2	42.2	38.8	33.3	26.7	21.7	

L'humidité relative mesurée à la station de l'aéroport est de 43 %. Le tableau suivant montre les humidités moyennes mensuelles de la période 1950-1970 en %.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	année
humidité moyenne	65	59	54.5	49.5	37.5	26.5	25	26	28.5	36	49	61.5	43.1

1.1.6 - Evaporation

Les résultats obtenus sur bacs colorado dans les stations du Ministère de l'Eau et de l'Electricité de la région sont les suivants :

1° - à la station de Pol-Khan, à 40 km au Nord de la ville de Chiraz, à côté de la rivière Kor, les valeurs moyennes d'évaporation calculées sur trois années (1964-66) étaient de 2 643 mm.

Les valeurs extrêmes observées sont : 36 mm pour le mois de janvier et 413 mm pour le mois de juillet.

On note que l'année 1966 a été une année vraiment sèche avec des précipitations de 96 mm.

2° - Station d'Ahmad-Abad, au Nord de Chiraz, près de la rivière Kor, l'évaporation moyenne calculée sur quatre années était de 3 080 mm avec les valeurs extrêmes de 60 mm en janvier et de 480 mm en juillet.

3° - Station de Mehr-Abad. Elle est située au Nord de Chiraz. L'évaporation annuelle est de 2 464 mm et les valeurs extrêmes ont été de 60 mm en janvier et de 394 mm en juillet.

4° - A la station God-Zerechk, au Nord de Chiraz, les valeurs moyennes annuelles sont de 2 400 mm.

5° - A la station de Tang-Ab, au Sud de Chiraz, sur la route de Firuzabad, l'évaporation moyenne annuelle est de 2 942 mm.

6° - A la station de Nobandegan, à Fassa, l'évaporation moyenne annuelle est de 2 516 mm.

7° - Station de Deubaneh. C'est la seule station du bassin versant du Moharlu. Les résultats de cette station sont de 3 100 mm pour l'année 1972 et de 3 270 mm pour l'année 1973.

La station de Debaneh est située au Sud du lac, au pied de la montagne de Ghareh.

La valeur moyenne de l'ensemble de ces résultats est de 2 800 mm. Si l'on multiplie les chiffres obtenus par un coefficient réductif de 0,8 pour tenir compte des caractéristiques du bac colorado, on obtient une évaporation de 2 240 mm.

Ce chiffre est encore très élevé, mais il n'y a pas de pluie disponible pour l'évaporation.

1.1.7 - Evapotranspiration

Les formules permettant de calculer l'évapotranspiration sont très nombreuses. Parmi les méthodes, nous avons choisi les formules de Turc et Coutagne pour l'évapotranspiration réelle annuelle, et les formules de Turc et Thornthwaite pour l'évapotranspiration potentielle mensuelle.

a - Méthode de Turc

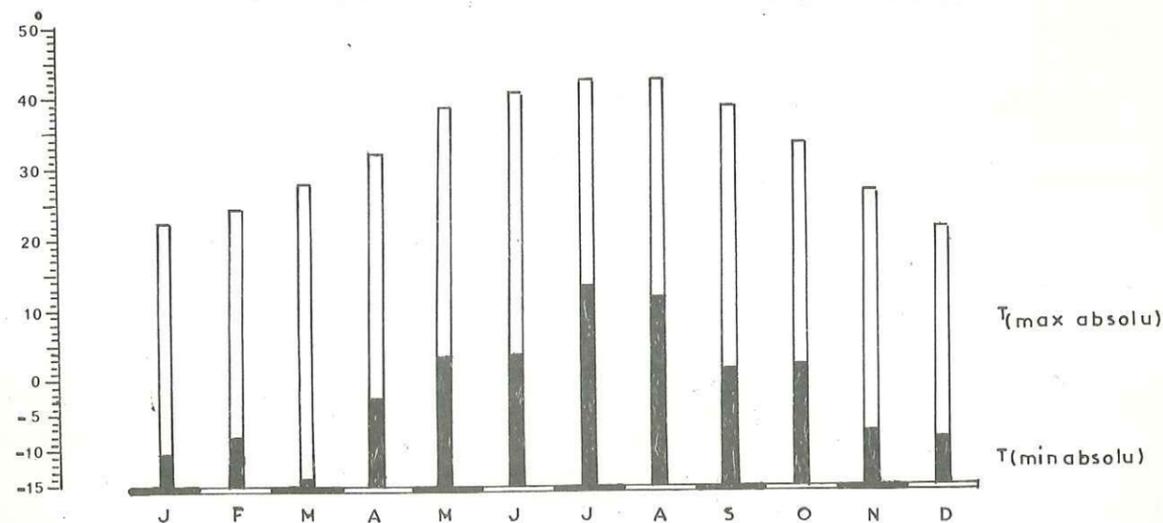
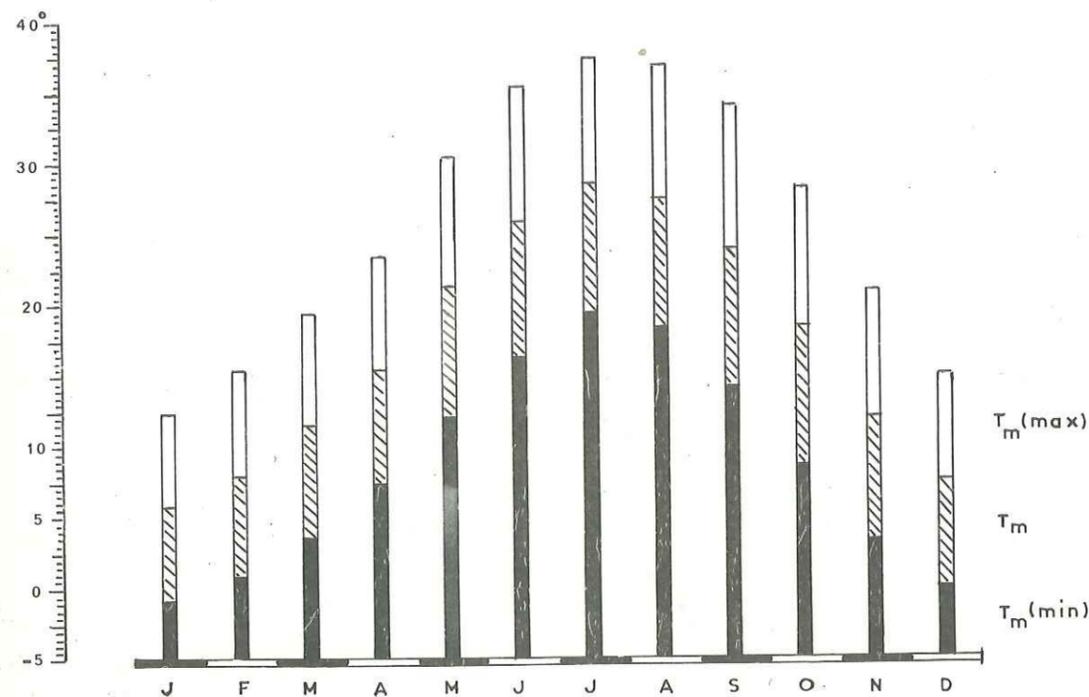
La formule de Turc est basée sur la température moyenne annuelle et la hauteur moyenne des précipitations annuelles :

$$Er = \frac{p}{\sqrt{0,9 + \frac{p^2}{L^2}}}$$

avec : p : précipitation moyenne annuelle  
t : température moyenne annuelle en °C  
L :  $300 + 25 T + 0,05 T^3$ .

Températures mensuelles de la période 1950-72

Fig n° 8



Nous avons appliqué cette formule pour la période 1950-1974. La valeur obtenue avec  $P = 332$  mm,  $T = 17^\circ$  est :

$$L = 970$$

d'où  $E_r = 329$  mm

L'application de la formule pour la seule année 1972 donne :

$$P = 489,4 \text{ mm} \quad L = 880$$

$$T = 15,6^\circ \text{ C} \quad \text{d'où} \quad E_r = 445 \text{ mm}$$

Tandis que pour l'année 1971,

on a :  $T = 16,9^\circ \text{ C} \quad P = 192 \text{ mm} \quad L = 964$

d'où :  $E_r = 198$

b. - Méthode de Coutagne

L'évapotranspiration réelle est calculée selon la formule suivante :

$$E_r = P - \lambda P^2$$

avec :

$P$  = précipitation moyenne annuelle en m  
 $T$  = température moyenne annuelle en  $^\circ \text{ C}$

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 T}$$

Cette formule n'est valable que pour les précipitations comprises entre  $\frac{1}{8\lambda}$  et  $\frac{1}{2\lambda}$  c'est-à-dire pour notre région, entre 398 et 1590 mm.

L'application de la formule de Coutagne pour la période 1950-1974 donne :

$$P = 0,332 \text{ m} \quad T = 17^\circ \text{ C} \quad \lambda = 0,3145$$

d'où  $E_r = 0,297$  m ou 297 mm

tandis que le résultat obtenu pour l'année 1972 avec :

$$P = 489 \text{ mm} ; T = 15,6 \text{ est } E_r = 409 \text{ mm}$$

En 1971,  $P = 192$  mm ;  $T = 16,9$  d'où  $E_r = 180$  mm

c. - Formule de Thornthwaite

Calcul de l'évapotranspiration potentielle. Un abaque est obtenu à partir de la formule :

$$E_p = 1,6 \left(10 \frac{t}{1}\right)^\alpha \quad \text{avec } I = \sum I_i, \quad i_i = \left(\frac{t}{5}\right)^{0,514}$$

et  $\alpha = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} I - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} I^3$  (Thornthwaite)

$$\text{ou } x = \frac{1,6}{100} I + 0,5 \text{ (Serra).}$$

$E_p$  : évapotranspiration potentielle en cm d'eau.

$I$  : indice thermique annuel ;  $i$  : indice thermique mensuel

$K$  : coefficient de correction fonction de la latitude et du nombre de jours du mois.

$t$  : température moyenne mensuelle en  $^\circ \text{ C}$ .

Nous avons calculé les indices thermiques à l'aide des tableaux classiques tenant compte de la latitude et de la température. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau n° 10.

Il en ressort que l'évapotranspiration potentielle  $E_p$  est de 947 mm pour une année moyenne correspondant à la période 1950-1974. Pour 1971,  $E_p = 946$  mm, tandis qu'en 1972  $E_p$  serait de 888 mm.

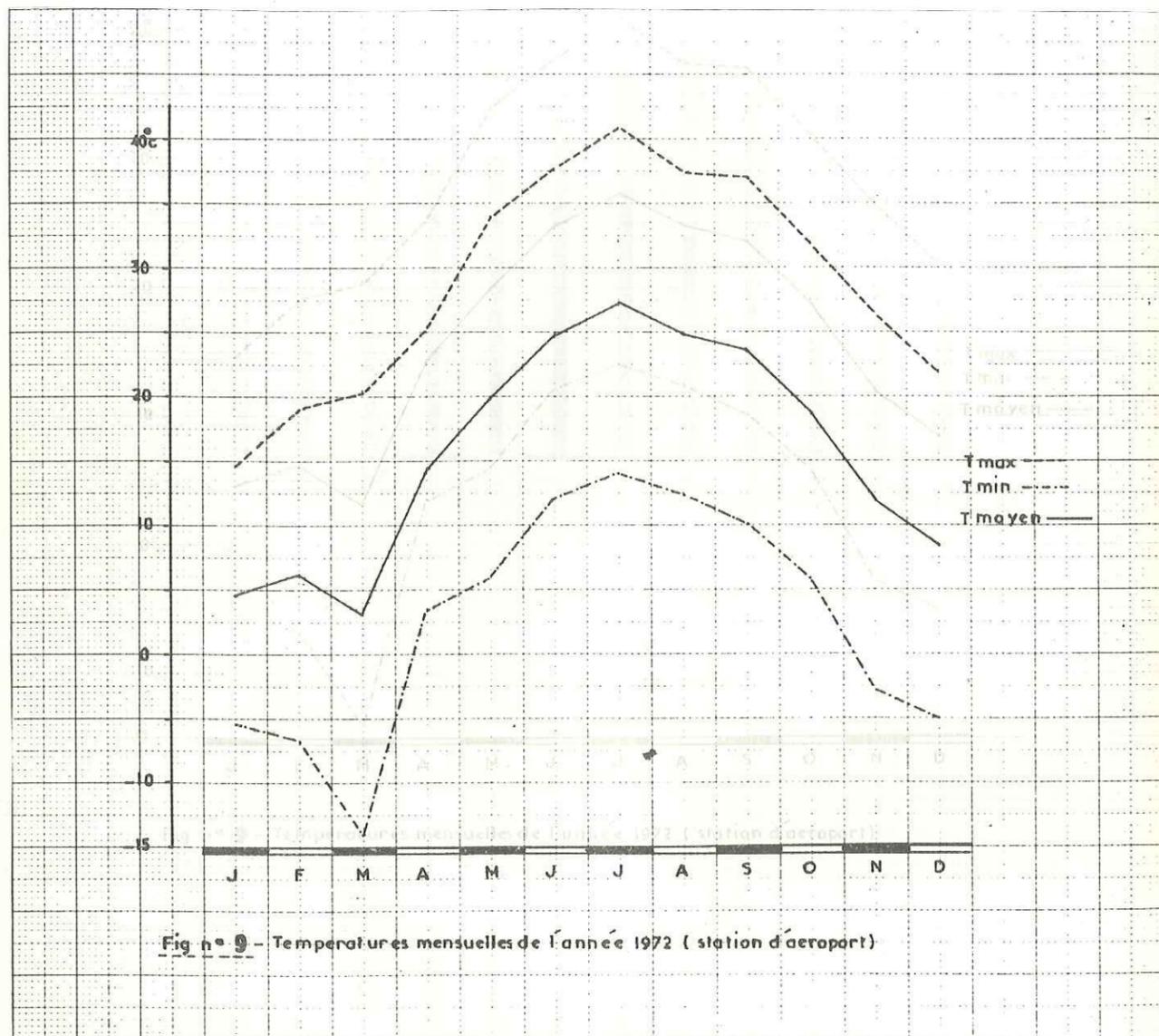


Fig n° 9 - Températures mensuelles de l'année 1972 (station d'aéroport)

d. - La deuxième formule de L. TURC

On calcule aussi l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Turc; la formule de L. Turc permet d'évaluer l'E<sub>p</sub> mensuelle moyenne en tenant compte de la durée réelle de l'insolation.

$$E_{\text{mois}} = 0,40 \frac{T}{T + 15} (I_g + 50)$$

E<sub>mois</sub> : l'E<sub>p</sub> mensuelle moyenne en mm

T : température moyenne du mois considéré en ° C

I<sub>g</sub> : la radiation globale moyenne du mois considéré en petites calories par cm<sup>2</sup> de surface horizontale et par jour pendant le mois considéré.

Pour février, le coefficient 0,40 est remplacé par 0,37, En fait, on écrit :

$$E_{\text{mois}} = 0,40 \frac{T}{T + 15} (I_g + 50) \left(1 + \frac{50 + h.r}{70}\right) \text{ pour le cas où}$$

h, r : humidité relative du mois considéré en % est inférieure à 50 %.

La radiation globale moyenne du mois considéré est calculé par la formule :

$$I_g = I_{gA} \left(0,18 + 0,62 \frac{h}{H}\right)$$

I<sub>gA</sub> : l'énergie de radiation qui atteindrait le sol si l'atmosphère n'existait pas en petites calories/cm<sup>2</sup>.

$\frac{h}{H}$  : l'insolation relative.

H : la durée astronomique du jour.

h la durée d'insolation mesurée en principe à l'héliographe Campbell-Stokes.

La valeur de I<sub>gA</sub> et de H dépendent de la latitude et sont données par les tables d'Angot.

L'abaque de M. MLAVEK permet les calculs rapides.

Les résultats de l'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Turc pour la période 1950-1973 sont portés sur le tableau n° 9.

Tableau n° 9

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D.	année
T en °C	5.7	7.9	11.3	15.3	21.2	25.6	28.3	27.4	23.8	18.2	11.9	7.4	17
I <sub>g</sub>	340	480	480	555	625	660	650	590	540	450	345	310	
h.r	65	59	54.5	49.5	37	26.5	25	26	28.5	36	49	61.5	
E <sub>p</sub> en mm	43	67.5	91	123	187.5	239	248	222	189	131.5	71	47.5	1660

e. - Calcul de l'évapotranspiration réelle par le bilan hydrologique

En cours d'année les mois excédentaires reconstituent les réserves en eau du sol (capacité de rétention). Celles-ci sont dépensées au cours des mois déficitaires. C. W. THORNTHWAITTE a fixé arbitrairement à 100 mm la quantité maximale d'eau que le sol peut emmagasiner. Ce sont les réserves en eau I<sub>r</sub> du bilan. Ce chiffre donne un ordre de grandeur admis par de nombreux agronomes. COUTAGNE a observé à St-Genis-Laval, près de Lyon, des variations de 84.7 à 126 mm, FISCHER, dans le bassin de la Weser admet 121 mm ; de Montmarin, en Tunisie du Nord, 300 mm. D'après HALLAIRE, cette évaluation ne serait qu'une moyenne générale grossière. Nous prendrons, pour la région de Chiraz 140 mm, à partir des résultats des centres de recherche de l'eau et du sol à Märvdacht à 40 km au N de la ville de Chiraz.

Le mois de novembre est le début de l'année hydrologique dans la région de Chiraz.

Fin novembre, les précipitations mensuelles moyennes P = 42 mm sont supérieures à l'E<sub>p</sub> = 29 mm. La réserve est de 13 mm.

Fin décembre, les précipitations P = 66 mm sont supérieures à l'E<sub>p</sub> = 12 mm, la réserve atteint 67 mm.

Fin janvier, P = 84 mm et l'E<sub>p</sub> = 8 mm, le mois est excédentaire en eau de 76 mm ; cet excédent sert à reconstituer les réserves du sol. Fin décembre, la réserve était de 67 mm, elle passe donc fin janvier à 67 + 76 = 143 mm.

Comme la réserve est fixée à 140 mm, on a fin janvier, un excédent de 3 mm. Cet excédent alimente les eaux souterraines. Fin février, l'excédent d'alimentation est égal à 34 mm, Fin mars, l'excédent est égal à 18 mm. L'excédent d'alimentation est donc de 55 mm pour l'année hydrologique (tableau n° 10).

On calcule aussi l'évapotranspiration réelle. L'E<sub>r</sub>, mensuelle étant liée au volume des précipitations nous pouvons considérer deux cas :

- la hauteur de précipitation mensuelle est égale ou supérieure à l'E<sub>p</sub> mensuelle,

$$E_p = E_r ;$$

- la hauteur des précipitations mensuelles est inférieure à l'évapotranspiration potentielle E<sub>p</sub> mensuelle. Dans ce cas l'E<sub>r</sub> est égale à E<sub>p</sub> jusqu'à épuisement des réserves du sol, et après l'épuisement des réserves du sol l'E<sub>r</sub> est égale aux précipitations.

Pour la région de Chiraz, E<sub>r</sub> est égale à 277 mm pour l'année hydrologique, soit 83,4 % des précipitations.

1.1.8 - Conclusion

Nous avons essayé les différentes méthodes de calcul de l'évapotranspiration pour la région de Chiraz. Mais nous pensons que la formule de Coutagne, pour l'évapotranspiration réelle annuelle est la plus proche de la réalité.

On trouve également que la méthode de Thornthwaite donne des résultats favorables pour cette région, et pour cette raison on a établi, pour la période 1950-1974, le bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite, avec les résultats de la station de l'aéroport de Chiraz. Dans tout les cas, nous sommes amenés à admettre que dans cette région la valeur de l'évapotranspiration réelle sur la plaine est égale à 75-85 % des précipitations annuelles.

1.2. - RESEAU HYDROGRAPHIQUE

1.2.1 - Les rivières saisonnières

a. - La rivière Khochk, qui est alimentée par la montagne Ghalat, et les montagnes que l'on trouve au NE de la région de Chiraz, passe par la ville (Nord), et aboutit dans la partie NW du lac Moharlu.

Dans cette rivière, on trouve de l'eau en hiver et au début du printemps. Actuellement, on n'utilise pas l'eau de cette rivière, mais on peut construire des barrages successifs pour alimenter la nappe de la plaine de Chiraz, puisqu'elle coule en amont de la plaine.

b. - La rivière de Tchenar-Rah-Dar

Elle commence à la partie sud de Darak et de la montagne Tchakhar-Makan au SW de la région ; elle passe au Sud de la ville de Chiraz et aboutit aussi au lac Moharlu.

c. - La rivière de Sarvestan

Elle commence dans les montagnes que l'on trouve à l'Est de la région. Elle traverse toute la plaine de Sarvestan et aboutit au lac Moharlu.

### 1.2.2 - Le lac Moharlu

Il est situé au centre du bassin versant et a une superficie moyenne d'environ 160 km<sup>2</sup> et une profondeur maximale de 1 m. Ce lac est l'exutoire des eaux de surface et souterraines. Il forme un système évaporant considérable. A cause de l'évaporation, l'eau est très salée avec une conductivité très forte et on exploite du sel.

Le lac Moharlu est alimenté par trois rivières saisonnières, les sources qui sont autour du lac et la nappe souterraine.

Nous avons calculé la superficie du lac sur les photos de satellite depuis décembre 1972 jusqu'en août 1973 (fig. 11).

Au début du mois de décembre, la superficie du lac était de 170 km<sup>2</sup>, le 7 janvier, elle était de 190 km<sup>2</sup> et le premier mars de 220 km<sup>2</sup>. Le 19 mars la superficie du lac était de 210 km<sup>2</sup>, le 12 mai elle était de 140 km<sup>2</sup> et le 28 août on n'avait plus qu'une surface de 10 km<sup>2</sup>.

Il faut dire que, au cours de cette période les précipitations mensuelles étaient de 122 mm inférieures à la moyenne mensuelle. Pour cette raison on estime la superficie moyenne du lac Moharlu à 160 km<sup>2</sup> et pour la valeur de l'eau évaporée, on prend les valeurs mensuelles de la station de Debaneh, située à côté du lac, au pied de la montagne de Ghareh, pour l'année 1972 parce que la température moyenne de l'année 1972 était égale à la température moyenne interannuelle de la région.

Sur le tableau suivant, on montre les variations de surface du lac et la valeur de l'eau évaporée chaque mois.

Tableau n° 10

mois	Surface km <sup>2</sup>	Evaporation mm	volume d'eau évaporé en 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
J	220	48	11
F	230	70	16
M	230	97	22
A	230	168	39
M	180	231	42
J	140	337	47
J	90	385	35
A	40	402	16
S	40	312	14
O	120	195	23
N	200	152	30
D	220	91	20
année	160	2488	315

### 1.3. - BILAN HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU LAC MOHARLU

La formule classique du bilan hydrologique est :

$$P = E + R + I$$

Et pour un bassin sans pertes souterraines :

$$P = E + R + dw$$

P = précipitation moyenne annuelle en mm ;

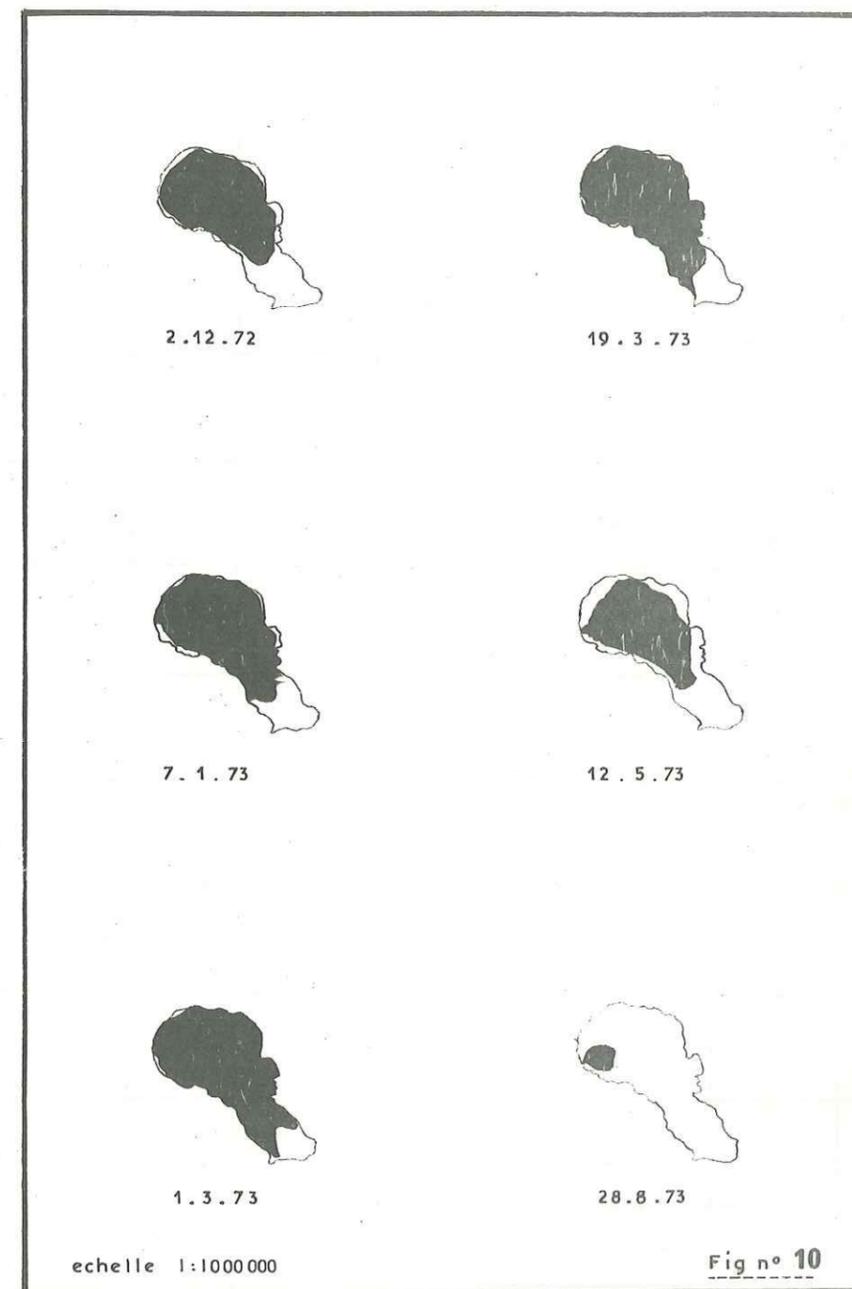
E = évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm ;

I = infiltration moyenne annuelle en mm

R = ruissellement moyen annuel en mm

dw = variation des réserves hydrologiques du bassin versant du lac Moharlu est basé

sur les résultats de la station de l'aéroport de Chiraz pendant la période 1950-1974.



Superficies du lac MOHARLU en 1972 et 1973

Tableau n° 11 - Bassin hydrologique du bassin versant du lac Moharlu  
D'après la méthode de Thornthwaite - Période 1950 - 1974

Mois	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Année
Température en °C	11,9	7,4	5,7	7,9	11,3	15,3	21,2	25,6	28,3	27,4	23,8	18,2	17
i	3,72	1,81	1,22	2,0	3,44	5,44	8,91	11,85	13,80	13,14	10,62	7,07	83,02
E non corrigée en mm	32,5	13,8	8,5	15,6	30,5	54	95	130	150	142	116	71	858,9
K	0,89	0,88	0,9	0,87	1,03	1,08	1,18	1,17	1,20	1,14	1,03	0,98	
E corrigée en mm	29	12	8	13	31	59	112	152	180	162	120	69	947
P moyennes en mm	42	66	84	47	49	32	8	--	3	--	--	1	332
Variation de l'eau du sol en mm		--	--	--	--	-27	-104	-9	--	--	--	--	
Réserve d'eau utile saturation (water surplus) en mm	13	67	140	140	140	113	9	0	0	0	0	0	
Déficit d'alimentation (water efficiency) en mm								-143	-177	-162	-120	-68	-670
Excédent d'alimentation en mm	3			34	18								55
Evapotranspiration en mm	29	12	8	13	31	59	112	9	3	--	--	1	277
Ecoulement en mm	0	0	1	18	18	9	5	3	1	0	0	0	55

Bilan hydrologique de la plaine

La précipitation moyenne annuelle est de 344 mm.  
 Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on prend la méthode de Thornthwaite parce que l'on pense qu'elle est le mieux adaptée à cette région.  
 Selon cette méthode, on avait l'évapotranspiration réelle de 287 mm.  
 Si on calcule la valeur du ruissellement par la formule de Berkaloff-Tixeront, mise au point en Tunisie et qui paraît valable pour les plaines de cette région, on obtient :

$$R = \frac{P^3}{3}$$

avec :

$$P = 0,344 \text{ d'où } R = 0,014$$

$$R = 14 \text{ mm}$$

Le ruissellement moyen pour la période 1950-1974 est donc de 14 mm, soit 4,1 % des précipitations.

On peut donc écrire :

$$P = E + R + I$$

$$344 = 287 + 14 + I$$

L'infiltration (I) est donc de 43 mm, soit 12,5 % des précipitations.

$$P = E + R + I$$

$$100 \% = 83,4 + 4,1 + 12,5$$

Bilan hydrologique du bassin versant

a. - Ruissellement

Nous avons calculé le ruissellement à partir de l'évaporation du lac Moharlu.  
 Le volume total de l'eau évaporée est de  $315 \times 10^6 \text{ m}^3$  et il reste toujours  $40 \times 10^6 \text{ m}^3$  dans le lac Moharlu.

Le volume de l'eau précipité sur le lac est de  $77 \times 10^6 \text{ m}^3$ . On suppose que  $78 \times 10^6 \text{ m}^3$  sont dus à l'alimentation par les eaux souterraines et les sources situées autour du lac.

Le reste qui est de  $200 \times 10^6 \text{ m}^3$  est dû au ruissellement de surface par les trois rivières de cette région.

Si on divise  $200 \times 10^6 \text{ m}^3$  par la superficie du bassin on constate que la lame d'eau ruisselée est de 49 mm, soit 12 % des précipitations.  
 $R = 49 \text{ mm.}$

b. - Infiltration

Pour la valeur de l'infiltration, on a pris les débits des sources et l'eau précipitée sur les surfaces d'alimentation, la valeur que l'on a obtenue est de 25,3 % des précipitations, soit 104 mm.

c. - Evapotranspiration

En remplaçant chacun des termes de l'équation du bilan :

$$P = E + R + I$$

avec :

$$P = 411 \text{ mm} \quad I = 104 \text{ mm} \quad R = 49 \text{ mm}$$

On obtient une évapotranspiration :

$$E = 258 \text{ mm}$$

c'est-à-dire égale à 62,7 % des précipitations.

Si l'on applique ces données aux deux domaines principaux de la région : domaine des plaines de Chiraz, de Sarvestan, de Gharah-Bagh et de Kavarr et domaine des montagnes qui les entourent on obtient l'équation suivante :

$$P = E + R + I$$

$$(P_p(1) + P_m(2)) = (E_p + E_m) + (R_p + R_m) + (I_p + I_m)$$

$$(590 \times 10^6 + 1080 \times 10^6) = (495 \cdot 10^6 + 552 \times 10^6) + (14 \cdot 10^6 + 186 \cdot 10^6) + 81.10$$

342)

(1) - plaine ; (2) montagne

BILAN HYDROLOGIQUE  
(1950-74)

Fig. n° 11

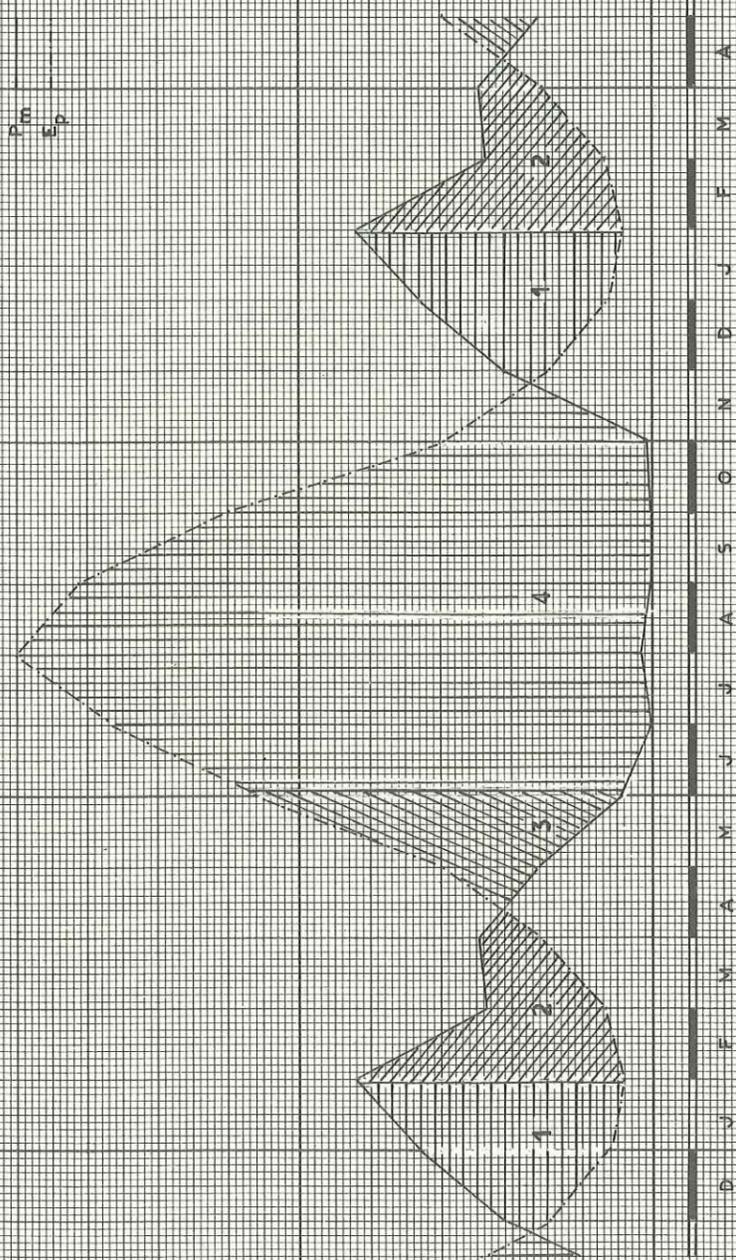
200

150

100

50

0



1) Reconstitution des réserves d'humidité du sol: 140 mm  
2) Ecoulement annuel moyen: 55 mm (water surplus)  
3) Reconstitution des réserves d'eau du sol: 140 mm  
4) Déficit agricole 670 mm (water efficiency)

$$\begin{aligned}
 1670 \cdot 10^6 \text{ m}^3 &= 1047 \cdot 10^6 \text{ m}^3 + 200 \cdot 10^6 \text{ m}^3 + 423 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \\
 411 \text{ mm} &= 258 \text{ mm} + 49 \text{ mm} + 104 \text{ mm} \\
 100 \% &= 62,7 + 12 + 25,3
 \end{aligned}$$

d. - Conclusion

L'établissement du bilan hydrologique par les différentes méthodes, nous a permis d'admettre que la valeur du ruissellement est comprise entre 10 et 15 %, et la valeur de l'infiltration est comprise entre 20 et 30 % des précipitations annuelles/

$$\begin{aligned}
 E_r &= 60 \text{ à } 65 \% \text{ de } P \text{ annuelle} \\
 R &= 10 \text{ à } 15 \% \text{ de } P \text{ annuelle.} \\
 I &= 20 \text{ à } 30 \% \text{ de } P \text{ annuelle}
 \end{aligned}$$

Le schéma suivant résume les données du bilan tel que nous l'avons établi pour le bassin versant du lac Moharlu.

1.4. - CONCLUSION GENERALE

Dans le bassin versant du Moharlu, nous constatons une répartition plus élevée des précipitations sur les versants montagneux que sur les plaines (figureau n° 12 ).

Le ruissellement sur les montagnes est également plus fort que sur les plaines.

Par contre l'évapotranspiration, elle, est de 83 % dans les plaines et de 47 % dans les massifs montagneux.

Quant à l'infiltration, bien qu'apparemment très faible sur les plaines, elle y atteint tout de même 12,5 % des précipitations. L'infiltration dans les plaines se trouve accrue par l'infiltration des eaux des rivières qui amènent des débits importants provenant du ruissellement sur les montagnes.

Sur ces dernières, le taux d'infiltration atteint 23 % en moyenne et selon les zones doit être compris entre 20 et 30 % de la lame d'eau précipitée.

Nous avons tenu compte enfin dans l'établissement du bilan des apports provenant des canaux d'irrigation qui amènent l'eau de rivières situées à l'extérieur du bassin versant, Et des pertes par évaporation directe sur le lac Moharlu ainsi que des prélèvements naturels ou artificiels dans les nappes.

En conclusion, l'étude de l'hydrologie du bassin versant du lac Moharlu nous montre que malgré son caractère semi-aride, la région étudiée possède, du fait du fort coefficient d'infiltration des eaux de précipitation ou de ruissellement des possibilités importantes d'existence de réserves souterraines dans la mesure où les formations géologiques qui constituent tant le substratum que la couverture récente de cette région présenteront une lithologie et une structure tectonique favorable.

L'évapotranspiration qui réduit modérément les quantités d'eau disponibles au moment des précipitations qui sont surtout hivernales ne peut influencer sur le volume des réserves souterraines que dans la mesure où celles-ci seront proches de la surface, et là encore, ce sont les conditions géologiques qui joueront un rôle prépondérant.

Ce sont enfin les conditions géologiques locales que nous allons étudier qui pourront amener une modification des propriétés physico-chimiques des eaux infiltrées.

DEUXIEME CHAPITRE

SITUATION GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU LAC MOHARLU



Photo n° 1 (b) - Failles et chenaux dans les conglomérats siliceux pliocènes du synclinal perché de Ghalat

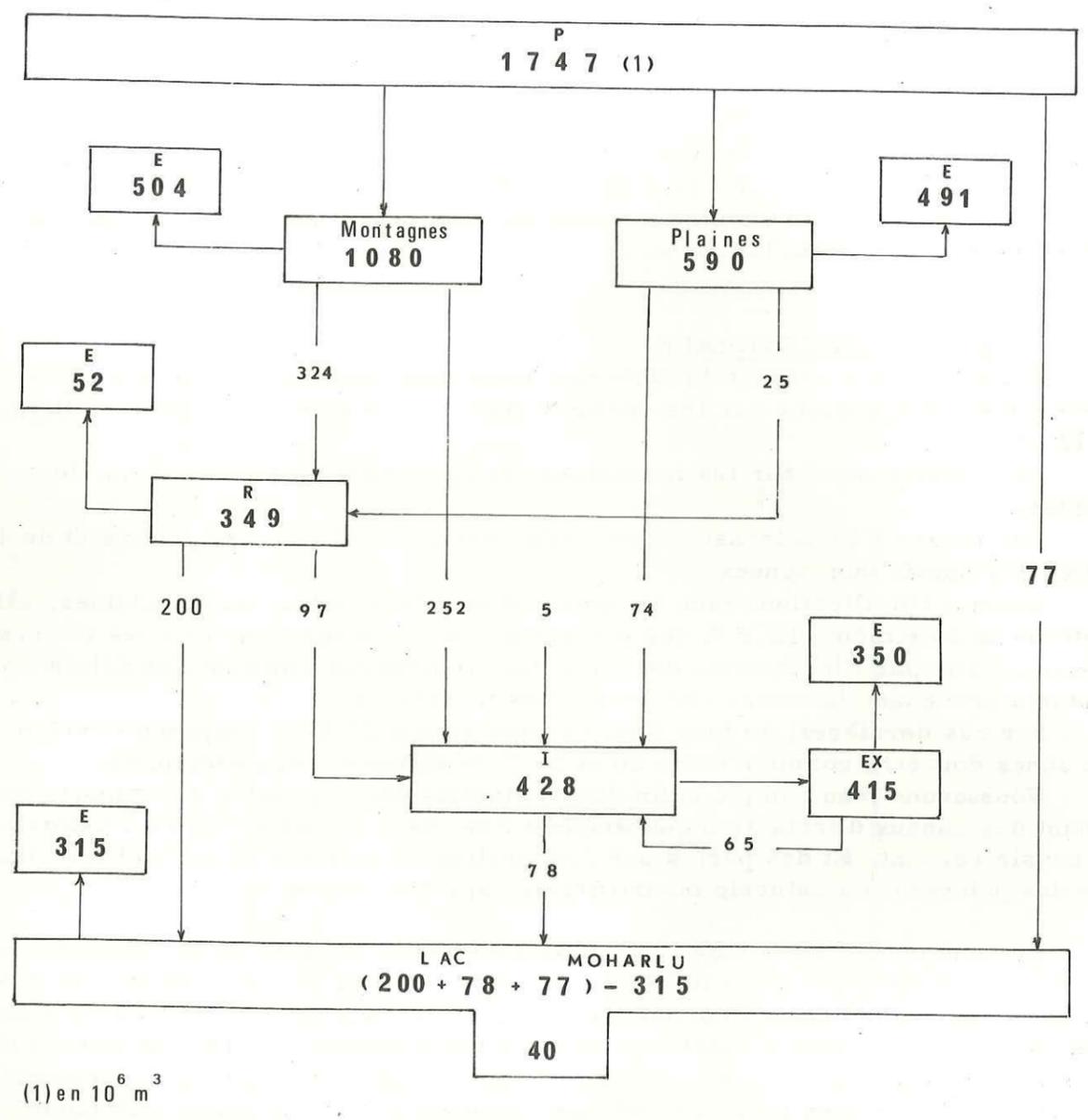


Fig no 12 BILAN HYDROLOGIQUE du BASSIN MOHARLU

CHAPITRE 2

SITUATION GEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU LAC MOHARLU

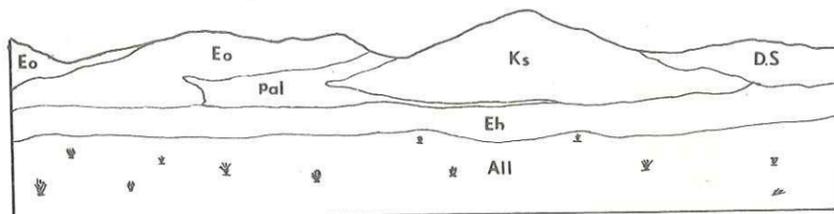


Fig n°13 - Schema du dome de Sel de SARVESTAN

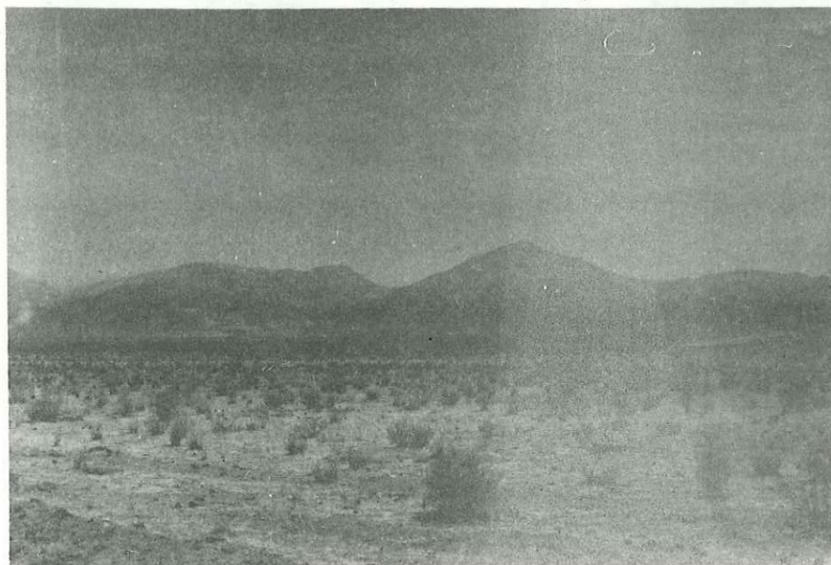


Photo n° 1 (c) - Dôme de sel de Sarvestan vu du Sud -

2.1. - INTRODUCTION

Le bassin versant du lac Moharlu se situe dans la zone plissée du Zagros qui est une zone bordière comprise entre la plate-forme arabique au Sud Ouest et la zone de chevauchement du Zagros au Nord Est.

La stratigraphie et l'évolution tectonique de ce secteur sont directement déterminées par cette position de telle sorte que les sédiments y sont très épais, mais que les zones de sédimentation se déplacent au cours des temps géologiques sous l'influence des déformations qui ont peu à peu abouti à la formation de la chaîne.

2.2. - STRATIGRAPHIE

Dans le bassin versant du lac Moharlu les sédiments les plus anciens se présentent sous forme de dômes de sel qui seraient d'âge infracambrien.

Les formations du Secondaire qui sont peu développées n'occupent qu'une faible partie de la surface de la région.

Les sédiments du Tertiaire, par contre sont très développés. Ils sont calcaires et souvent marneux ou représentés par des calcaires marneux, des niveaux gypsifères et des conglomérats.

On peut dire que dans le bassin versant du lac Moharlu, la majorité des affleurements est formée par les calcaires tertiaires.

2.2.1 - Infracambrien

On attribue classiquement à l'Infracambrien les formations évaporitiques qui forment dans la région du lac Moharlu, comme en bien des points du Sud de l'Iran des "dômes de sel".

Ces formations qui comprennent des évaporites : gypses, anhydrite, sel gemme appartiennent à la série de l'Hormoz qui a été datée par les méthodes palynologiques.

Dans le bassin versant du lac Moharlu, on connaît deux de ces dômes de sel, le premier au NE de Sarvestan, mesure 12 km de longueur et 2 km de largeur (fig. 18) ; le second, à la limite E du bassin, dans la partie est de Siyah-Kuh s'étend sur 9 km et 2 km.

Un autre dôme de sel, de même type, existe encore à 35 km au NW de Sarvestan dans la région de Dariyan.

Les évaporites s'accompagnent de dolomies grises à patine brune qui constituent la carapace apparemment disloquée du dôme.

Là, comme dans les deux autres dômes, le contact est brutal entre les structures diapryriques allongées NS ou EW et les couches des calcaires jurassiques et crétacés qui forment un anticlinal de direction N 100° E.

On ne note aucun lambeau de formations plus anciennes entre les éléments évaporitiques et les couches calcaires dolomitiques du Secondaire.

Les "dômes de sel" se situent d'ailleurs sur le tracé de grandes fractures de direction N 130° E qu'ils jalonnent et qui peuvent représenter des accidents profonds de décrochement du socle.

Les conditions d'apparition des "dômes de sel" et l'absence d'écaillés de terrains primaires à leur périphérie permettent de se demander si les évaporites rencontrées correspondent bien à celles qui se sont déposées sur une vaste plate-forme peu profonde ayant persisté du Précambrien à la fin du Cambrien en donnant des couches très épaisses dans tout le Sud de l'Iran ou s'il s'agit d'évaporites sédimentées à une époque plus récente tel que le Carbonifère ou le Permo-Trias dans des secteurs où la paléogéographie est encore mal connue.

Ces évaporites de la fin du Primaire pourraient résulter d'une sédimentation en bordure de mer, mais peut-être plus simplement pourraient provenir du remaniement avec resédimentation dans des cuvettes fermées des évaporites de l'Infracambrien de même qu'à l'heure actuelle se redéposent sur des épaisseurs variables dans le bassin du Moharlu des évaporites qui proviennent du lessivage des couches solubles des dômes de sel ou du Miocène qui, pour ces dernières pourraient aussi être des évaporites de deuxième ou troisième génération.

2.2.2 - Ere secondaire

Dans le bassin versant du Moharlu, il n'existe pas de sédiments du Trias, du Jurassique ou du Crétacé inférieur en surface. Mais grâce à un sondage de reconnaissance effectué sur la montagne de Sabzpuchan jusqu'à la profondeur de 3100 m, on a reconnu toutes les formations de l'ère secondaire.

2.2.2.1 - Trias

A cette période, dans le Zagros, la sédimentation est encore de type peu profond et comprend des sédiments de précipitation chimique : évaporites et dolomies.

La coupe type des formations du Trias a été étudiée par Thomas KENT et SLINGER en 1951 au Sud du lac Bakhtegan dans le Sud Ouest du village de Khaneh-Kat (2,5 km) et en raison de cette proximité, on désigne le Trias sous le nom de formation Khaneh-Kat.

Près du village de Khaneh-Kat, on trouve 400 m de dolomies siliceuses grises à l'affleurement, mais de couleur brune en forage.

L'épaisseur de la série triasique aux affleurements semble bien être d'environ 400 m, mais peut varier de façon importante latéralement.

2.2.2.2 - Jurassique

a. - Lias

Formation Neyriz (Thomas KENT, SLINGER)

Au Lias aussi, se déposent des sédiments évaporitiques. La coupe type de cette formation est située près du village de Khaneh-Kat où la série liasique repose sur la formation de Khaneh-Kat.

Dans la région étudiée, les assises du Lias sont constituées à la base d'une alternance d'argiles, et de dolomies à fins cristaux d'anhydrite.

Au-dessus, on trouve des quartzites et la partie supérieure de la série est dolomitique. La puissance de cette formation dans l'anticlinal de Sabzpuchan est à peu près de 200 m.

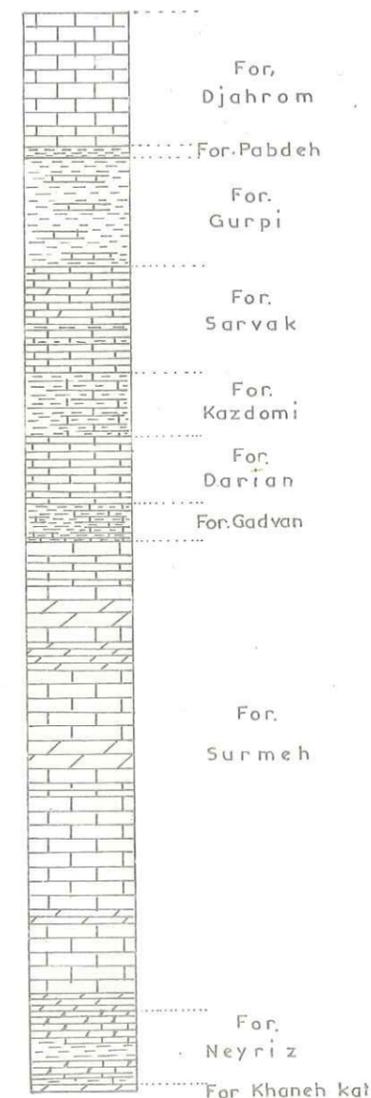
Tous les sédiments qui se sont déposés depuis le Jurassique moyen jusqu'au Crétacé moyen (Albien) dans le Zagros forment le groupe Khami qui comprend cinq formations : formation Surmeh, Anhydrite Hit h, Fahliyan, Gadvan et Dariyan (M. W. STRONG, N. L. FALCON).

b. - Dogger et Malm

Formation Surmeh

Au Dogger et au Malm, les formations à faciès profonds remplacent les sédiments évaporitiques et les sédiments argileux font place à des couches calcaires. Ces sédiments n'affleurent cependant pas dans le bassin versant du

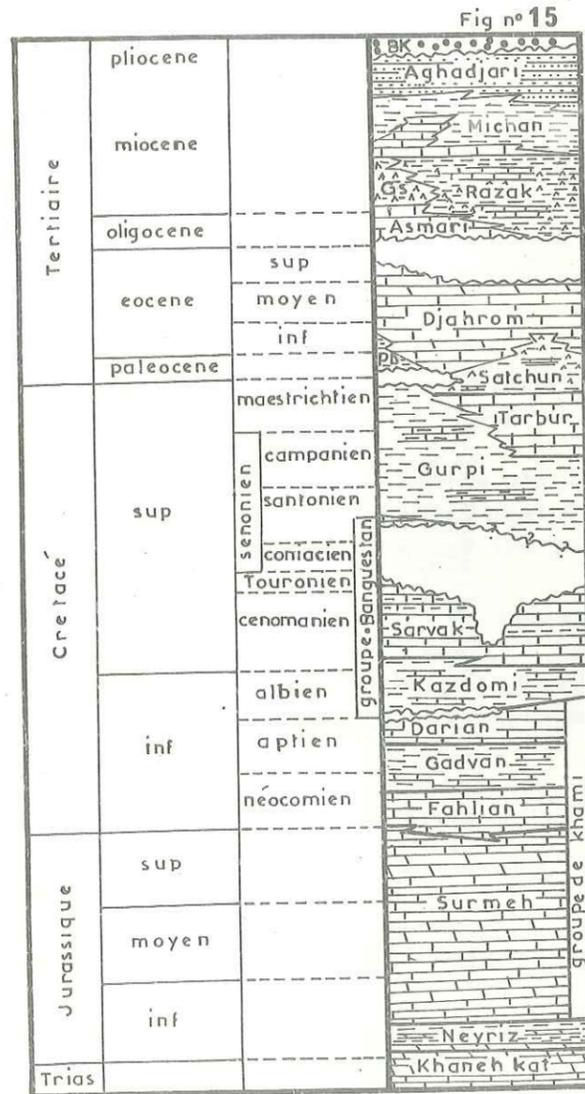
Coupe géologique de la montagne de SABZPOUCHAN



Echelle 1:20000

Fig n°14

Colonne géologique de la région de  
CHIRAZ



d'après James et Wynd

Moharlu, mais dans la coupe d'un sondage sur Sabzpuchan, ils sont constitués de trois parties. Dans la partie inférieure, on trouve des alternances de calcaires sombres et de dolomies grises avec fins cristaux d'anhydrite et des alternances de calcaires sombres avec des marnes ou des calcaires compacts de teinte claire. Dans la partie moyenne, il y a des dolomies blanches et brunes, puis une alternance de calcaires et de dolomies. La partie supérieure est constituée de calcaires avec un peu de marnes.

L'ensemble de la formation Surmeh atteint 1200 m d'épaisseur dans la coupe du forage de Sabzpuchan.

### 2.2.2.3 - Crétacé

#### 2.2.2.3.1 - Conditions de sédimentation

Au Crétacé, les conditions de sédimentation sont favorables au dépôt des calcaires.

Du fait des transgressions et des régressions successives de la mer, on note cependant de nombreuses variations de faciès des sédiments dans lesquels on peut définir des cycles sédimentaires.

Au Crétacé moyen, dans le bassin du Zagros, après une régression de la mer (entre l'Aptien et l'Albien), commence au début de l'Albien une sédimentation de calcaires néritiques qui se poursuit jusqu'à la fin du Campanien.

Tous les sédiments que l'on trouve dans le Zagros, au Crétacé moyen constituent le groupe Banguestan (CRICHTON - SLINGER).

Ce groupe est constitué de quatre formations : Kazdomi, Sarvak, Surgah, Ilam. Dans la région du Fars, on trouve seulement les formations Kazdomi, Sarvak et Ilam, mais dans le bassin du Moharlu, on a une épaisseur très faible qui n'est que de quelques mètres dans certaines zones (Siyah-Kuh) de cette formation Ilam, qui est l'équivalent de la partie inférieure de la formation Gurpi.

Dans la région du Fars, au Cénomaniens, les sédiments néritiques de la formation Sarvak correspondent au Cénomaniens. A la fin du Cénomaniens, la mer régresse de nouveau. Dans cette zone, au Turonien et au Coniacien, il n'y a pas de sédimentation, et après cette lacune stratigraphique et une phase d'érosion, on trouve des sédiments marneux avec de rares couches calcaires de la formation Gurpi, ainsi que dans certaines zones, quelques mètres de la formation Ilam.

A la fin du Campanien, dans la partie N, NE, E et SE du bassin du Moharlu la partie supérieure de cette formation passe à des calcaires peu profonds, récifaux avec Rudistes de la formation Tarbur qui monte jusqu'au milieu du Maestrichtien.

A la fin du Maestrichtien, on a encore une régression assez importante. En raison de cette régression entre Crétacé supérieur et Tertiaire, il y a une lacune stratigraphique importante.

Cette lacune existe seulement au Sud et à l'Ouest du bassin du Moharlu, mais au N, NE, E et SE de cette région, entre la formation Tarbur et le Paléocène il n'y a plus de lacune stratigraphique.

#### 2.2.2.3.2 - Crétacé inférieur et fin du Malm

##### Formation Fahliyan

Dans la région de Chiraz, l'Anhydrite Hith, si importante dans le golfe persique, comme "cap Rock" n'apparaît pas. La formation Surmeh est donc directement recouverte par les calcaires massifs de Fahliyan, cette formation, dans la montagne Gadvan, à 40 km au NE de Chiraz forme une puissante falaise d'environ 60 m de hauteur.

Le contact à la base avec les dolomies de Surmeh et le contact au sommet avec les marnes et les marno-calcaires bien lités de Gadvan, sont concordants.

##### Formation Gadvan

Ces sédiments sont des alternances d'argiles et de calcaires d'une puissance

totale de 150 mètres dans la coupe du forage de Sabzpuchan.

Formation Dariyan

Elle est constituée de calcaires bruns et de calcaires oolithiques avec orbitolines. La puissance de cette formation est de 190 m, reconnus par sondage.

Les coupes-type de cette formation, liée au Crétacé inférieur sont à 42 km au NE de Chiraz, au Nord de la route Kherameh-Chiraz, près du village de Dariyan (Nord).

2.2.2.3.3 - Crétacé moyen

Formation Kazdomi

Elle est constituée d'alternances de calcaires et d'argiles brunes à orbitolines et globigérines. La puissance de cette formation est de 180 m reconnus en sondage.

Formation Sarvak

Les sédiments les plus anciens de l'ère secondaire qui affleurent en surface dans le bassin du Moharlu, sont des calcaires marneux fins avec quelques silex qui constituent la formation Sarvak. On trouve cette formation au centre de l'anticlinal déversé de Ghareh, au Sud du lac Moharlu, près du village de Moharlu et dans l'axe de l'anticlinal Guchtasb, au Sud de la plaine de Sarvestan, ainsi qu'à l'Est de la région, sur l'anticlinal de Siyah-Kuh.

Les microfossiles que l'on trouve dans cette formation sont :

Oligostegine sp. ; Orbitolina concava ; Lenticularia ovalveolina.

La coupe-type de cette formation est étudiée au défilé de Sarvak, dans le flanc S de la montagne Banguestan où elle a une puissance de 450 m qui comprend 280 m de calcaires marneux fins gris associés à des couches minces de marnes grises et 120 m de craie calcaire, massive, où l'on trouve aussi des nodules de silice rouge. La partie supérieure de cette formation est constituée de 50 m environ de calcaires ferrugineux.

L'âge de cette série est albien, cénoomanien et turonien.

2.2.2.3.4 - Crétacé supérieur

Formation Gurpi

Cette formation repose en discordance sur la formation Sarvak, dans la région étudiée, dans la partie centrale de la montagne Ghareh et Guchtasb et aussi au centre de l'anticlinal de Bamu, au Nord de Chiraz.

Elle est constituée d'argiles bleues avec alternances de lits de calcaires marneux que l'on peut voir près du village de Moharlu, au point d'émergence de la source. La puissance de cette formation dans la région étudiée est de 300 mètres.

Les microfossiles de cette formation sont des Globotruncana concavata, G. sigalis, G. elevata, G. stuarti.

Ces microfossiles confèrent à cette formation un âge santonien-maestrichtien.

La coupe type de ces sédiments est étudiée au défilé de Pabdeh, au SW de la montagne de Pabdeh, au N du champ pétrolifère de Leali (épaisseur 350 m).

Formation Tarbur

La coupe typique de Tarbur est à 12 km au N du village de Tarbur, à 40 km à l'E de Chiraz, à côté de la région étudiée. Elle est constituée de 580 m de calcaires massifs montrant des cristaux d'anhydrite.

Les montagnes que l'on voit autour de la ville de Zarghan, à 30 km au N de Chiraz sont toutes formées par ces calcaires.

Cette formation repose sur la formation Gurpi en parfaite concordance. On ne trouve ces sédiments que dans la province du Fars, qui commence au Nord de Chiraz, jusque dans la région de Darab (coupe n° 5).

Dans le bassin versant du Moharlu, on a trouvé, dans la partie E de la montagne Ahmadi la formation Tarbur en contact avec les sédiments évaporitiques de "l'Infacambrien", ainsi que dans une partie bien définie de la montagne Siyah à l'E de la région, près de la ville de Sarvestan, où l'on a une source qui émerge de ces calcaires avec un débit considérable.

Dans la région étudiée la formation Tarbur est équivalente de la partie supérieure de la formation Gurpi (coupe n° 7).

Le forage pétrolier a bien défini ce phénomène dans la plaine de Sarvestan.

Dans les sédiments de Tarbur, on a des fossiles néritiques avec microfossiles pélagiques accompagnés de coquilles de mollusques et rudistes, et d'algues. Les microfossiles de cette formation sont :

Omphalocyclus macroporus, Sidérolites, Calcitropoïdes, Orbillella medi et Lepidorbitoïdes sp. qui correspondent à un âge campanien supérieur-maestrichtien.

2.2.3 - Ere tertiaire

2.2.3.1 - Conditions de sédimentation

De façon générale, à la fin du Maestrichtien, l'extension de la mer en Iran était la suivante :

La Tethys recouvrait la partie nord du bassin du Zagros jusqu'aux zones d'Alborz, et au Sud on avait un bassin relativement plus petit que le premier, qui recouvrait la partie est de l'Irak et les parties sud et sud ouest de l'Iran. Une chaîne montagneuse s'étendait de l'Ouest jusqu'au Sud Est, et séparait les deux bassins sédimentaires principaux de l'Iran.

Les faciès liés au début de l'ère tertiaire au Sud de l'Iran, après une lacune stratigraphique, sont des marnes et des couches minces de calcaires marneux qui constituent la formation Pabdeh. Les sédiments de Pabdeh s'observent au S et au SW de la région étudiée, avec une épaisseur d'environ 50 m, tandis que dans les parties nord, est et sud est ils passent à des sédiments marneux et marno-calcaires et à des gypses (coupe n° 4) de la formation Satchun. Sur les sédiments de Satchun on a la formation Djahrom, on peut dire que l'on a eu encore un changement de niveau et d'extension de l'eau, par suite de la transgression de la mer dans cette région. On note que la formation Djahrom est aussi équivalente de la formation Pabdeh.

A l'ère tertiaire, les mouvements orogéniques étaient actifs au Sud de l'Iran. Le bassin sédimentaire qui recouvrait l'Iran méridional a été divisé durant la deuxième moitié de l'ère tertiaire par ces mouvements en quelques bassins séparés. Pour cette raison, dans le bassin versant du Moharlu, on a une lacune stratigraphique entre les formations Djahrom et Asmari qui correspond à une régression de la mer.

De ce fait, on trouve parfois la formation Razak sur les sédiments de Djahrom.

Après la sédimentation de l'Asmari, à l'Oligocène et au début du Miocène, on trouve encore des conditions favorables au dépôt de formations évaporitiques. A la suite de mouvements orogéniques et de la régression, on avait un bassin sédimentaire fermé. Dans cette région, au Miocène inférieur, on observe donc les marnes rouges et grises avec des couches de gypse de la formation Razak.

Au Miocène moyen, par suite de la subsidence régionale et de la transgression de la mer, les conditions évaporitiques disparaissent et on trouve les marnes grises accompagnées de couches de calcaires de la formation Michan.

A la fin du Miocène, la mer répète sa régression, et de ce fait, on a au Miocène supérieur des grès et microconglomérats de la formation Aghadjari.

Au Pliocène des mouvements orogéniques très forts affectent tous les bassins du Zagros, qui sont plissés. A cause de ce plissement, on a une discordance très nette entre la formation Aghadjari et le conglomérat Bakhtiyari d'origine fluviale qui est un sédiment post-orogénique.

### 2.2.3.2 - Paléocène

#### Formation de Satchun

Cette formation n'existe que dans la province intérieure du Fars. Dans la coupe type à 250 km au NW de la région étudiée, à 5 km au N du village de Satchun c'est une formation évaporitique dénommée gypse-infra-nummulitique. La partie supérieure de la formation Satchun est équivalente de la partie inférieure des formations Djahrom et Pabdeh.

Les sédiments de la formation Satchun sont marneux et marno-calcaires avec des gypses et des dolomies.

Les meilleures coupes se situent dans les virages de la route de Chiraz à Persopolis au Nord et au Sud de Badjgah.

Le développement de la formation Satchun dans le bassin du Moharlu commence au Nord et au Nord Ouest d'une ligne allant de la ville de Chiraz à la montagne de Ghareh, au Sud du lac Moharlu.

Mais au Sud et au Sud Ouest de Chiraz, on a, au lieu de cette formation, les marnes et marno-calcaires de la formation Pabdeh (coupe n° 3).

Les microfossiles confèrent à cette formation un âge fin maestrichtien-paléocène.

On trouve cette formation dans les montagnes Kaftarak, Bamu, Ahmadi, Siyah et Sorkhan, dans le bassin versant du Moharlu.

Notons aussi que cette formation constitue le substratum des calcaires karsatiques de l'Eocène.

La partie inférieure de la formation Djahrom est liée au Paléocène, car on y trouve les microfossiles : Miscellanea sp., Nummulites globosus.

### 2.2.3.3 - Eocène

#### Formation Djahrom

Le calcaire dolomitique de Djahrom est un trait important du paysage dans la région de Chiraz, avec une épaisseur d'environ 400 m.

La coupe type de cette formation se situe au Nord de la montagne Djahrom. A la base, on a 30 m de dolomies massives brunes, puis 190 m de dolomies fines, au sommet, on a 300 m de calcaires dolomitiques (photo n° 2).

Dans le bassin du Moharlu, cette formation est très développée. On peut la voir à peu près dans toutes les montagnes. Dans les sédiments de Djahrom, il y a beaucoup de fossiles, particulièrement des nummulites, de telle sorte que l'on peut les appeler : les calcaires à nummulites.

Le caractère bien lité de cette formation donne une géomorphologie spéciale. L'intersection des bancs avec la surface topographique donne des courbes fermées, bien visibles sur photos aériennes.

Les microfossiles que l'on peut trouver dans cette partie de la formation Djahrom sont Alveolina oblonga, Orbitolines complanatus, Nummulites beaumontis, Nummulites atacicus.

La faune donne à cette formation un âge éocène.

De façon générale, on peut dire que la formation Djahrom est liée au Paléocène et à l'Eocène.

#### Formation Pabdeh

Dans les montagnes Sabzpuchan et Darak, on trouve la formation Pabdeh avec une épaisseur faible (30 m). Elle est équivalente de la partie inférieure de la formation de Djahrom et constitue le substratum des calcaires Djahrom dans les montagnes de Sabzpuchan et Darak, mais on doit noter que cette formation n'affleure pas dans le bassin du Moharlu.

Il s'agit d'une assise post-orogénique car il y a une discordance entre les formations Gurpi et Pabdeh.

Photo n° 2 - Panorama de la montagne de Kaftarak vu du Sud - La retombée vers le Sud des calcaires Asmari-Djahrom de l'anticlinal de Kaftarak est affectée par une cassure parallèle au bord de la plaine -



2.2.3.4 - Oligocène, début Miocène

Formation Asmari

Ce sont des calcaires marins fossilifères, poreux, résistants, souvent à matrice de calcite microcristalline de couleur crème, quand ils sont altérés.

La partie inférieure de la formation Asmari est formée par des conglomérats siliceux, très résistants, qui sont bien définis au Sud de la montagne Khoda, au Nord de la ville de Sarvestan.

Les calcaires d'Asmari sont développés, au NW de Chiraz. Comme faune on y trouve principalement : Nummulites intermedius, Nummulites vascus (Oligocène).

La coupe type se situe au passage de Guel Torch, sur le flanc SW de la montagne Asmari et a été étudiée par R.K. RICHARDSON, THOMAS, (1950).

La formation Asmari repose en discordance cartographique sur les sédiments de Djahrom.

La distinction entre les formations d'Asmari et de Djahrom est difficile à faire quand il n'existe pas de niveaux conglomératiques entre les deux ensembles.

Il semble toutefois que la base de la formation Asmari soit marquée par une sédimentation plus calcaire succédant aux formations dolomitiques de la formation Djahrom et précédant un nouvel épisode dolomitique.

Les calcaires Asmari traduisent une modification temporaire des conditions de dépôt des sédiments liés à la profondeur et à la température de la mer.

Il faut souligner toutefois que, comme l'a montré L. E. RICOU, il y a eu migration des zones de sédimentation dans la bordure du Zagros entre l'Eocène et l'Oligocène, ce qui se traduit par un diachronisme des faciès. Sur la montagne de Sabzpuchan, on ne peut pas distinguer les deux formations qui sont désignées sous le nom d'Asmari-Djahrom. Il en est de même dans la montagne de Darak, tandis que dans la montagne de Sarvestan un niveau conglomératique siliceux forme un repère bien net entre la formation Asmari et la formation Djahrom.

2.2.3.5 - Miocène

Groupe du Fars

Dans le Sud de l'Iran, le Miocène est représenté par le groupe du Fars. Ces sédiments qui reposent en concordance sur la formation Asmari, comportent trois formations (PILGRIM, 1908).

Ces trois formations du Miocène sont : Gatchsaran, Michan, Aghadjari.

Dans le bassin du Moharlu, au lieu de la formation Gatchsaran (Miocène inférieur), on a des sédiments marno-gypseux accompagnés d'un peu de calcaire que l'on appelle la formation Razak, qui est équivalente de la formation Gatchsaran.

On note que les sédiments de Gatchsaran, particulièrement dans la zone pétrolière servent de couverture aux gisements de pétrole situés dans l'Asmari (Cap. Rock).

Formation Razak

La coupe type s'observe à la montagne Djahrom, au NE de la ville de Djahrom.

Dans la région de Chiraz, on ne peut pas distinguer facilement les formations Razak (Miocène inférieur) de la formation Michan (Miocène moyen). Pour cette raison, nous les avons groupé en un seul ensemble sur la carte géologique du bassin du Moharlu, sous le nom de groupe du Fars.

Ces formations à Chiraz sont très abondantes, particulièrement à l'Ouest de la ville de Chiraz, autour de l'anticlinal de Darak et aussi au NE et à l'E du lac du Moharlu.

Les sédiments du Miocène inférieur et moyen, dans cette région, sont marneux avec des couches gypseuses très visibles (photo n° 3).



Photo n° 3 ; Vue de détail du Miocène gypseux de la formation Razak à l'Ouest de Ghalat

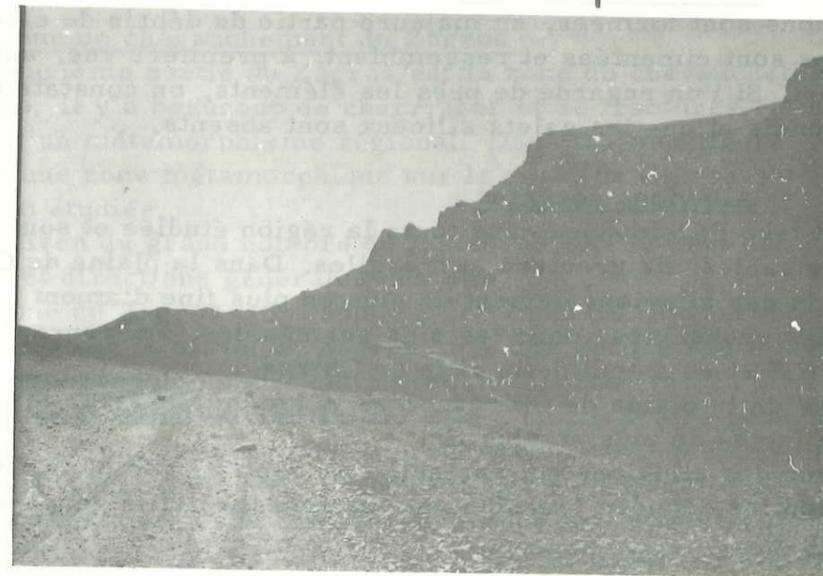


Photo n° 4 - Bordure du synclinal perché de conglomérats pliocènes (formation Bakhtiyari) près du village de Ghalat vue de l'Ouest -

Miocène supérieur

Formation Aghadjari

Les dépôts d'Aghadjari reposent en concordance sur la formation de Michan.

Dans la région étudiée, on les a trouvés au Sud de Chiraz, et à côté de la route de Kherameh, en petits bancs à peu près verticaux. Ils sont constitués de grès altérés et de microconglomérats siliceux.

2.2.3.6 - Pliocène

Formation Bakhtiyari

On trouve cette formation au Sud et à l'Ouest de Chiraz, où elle constitue deux synclinaux perchés, très distincts.

On note que les dépôts du Pliocène reposent en discordance angulaire sur les formations du Miocène supérieur.

Les sédiments de Bakhtiyari sont constitués de conglomérats résistants contenant surtout des galets de roches siliceuses (jaspes) et de calcaires nummulitiques de couleur claire. La formation Bakhtiyari est une formation post-orogénique consécutive au démantèlement de la chaîne naissante du Zagros, pendant les mouvements alpins (photo n° 4).

2.2.4. - Ere quaternaire

2.2.4.1 - Alluvions anciennes

Ces alluvions sont formées, en majeure partie de débris de calcaires tertiaires. Elles sont cimentées et ressemblent, à première vue, au conglomérat de Bakhtiyari. Si l'on regarde de près les éléments, on constate que ceux-ci sont moins arrondis et que les galets siliceux sont absents.

Alluvions récentes

Elles sont très développées dans toute la région étudiée et sont formées d'un mélange de sables, de graviers et d'argiles. Dans la plaine de Chiraz, la granulométrie de ces alluvions devient de plus en plus fine d'amont en aval. Les alluvions les plus grossières, donc les plus perméables, se trouvent apparemment au NE ou NW et en amont de la ville de Chiraz.

Vers le SW de la plaine de Chiraz, vers le lac du Moharlu, les alluvions récentes sont à faciès de plus en plus fin.

L'épaisseur des alluvions est variable. Au centre de la plaine de Chiraz elle serait, selon les données fournies par les sondages et la géophysique, de 200 m (coupe n° 3).

Cônes de déjection et éboulis

Les épandages et cônes d'alluvions sont très développés dans la région de Chiraz. Au flanc sud de la montagne Kaftarak, au flanc nord des montagnes Sabzpuchan et Ghareh, il y a beaucoup de puits superficiels avec des débits considérables dans ces formations.

On note aussi que les canaux des ghanates coupent toujours dans cette région les cônes de déjection qu'ils drainent partiellement.

2.3. - TECTONIQUE

2.3.1 - Structure générale du Sud de l'Iran

La chaîne du Zagros, située à l'Ouest et au Sud Ouest de l'Iran, commence à la frontière de la Turquie et se poursuit jusqu'au Sud Est de l'Iran, près de la ville de Kerman.

La direction des plis est NW-SE, la structure de la chaîne du Zagros est liée aux mouvements orogéniques de la fin du Crétacé et aux mouvements plus forts de la fin du Tertiaire. Le sens des compressions tectoniques fortes éventuellement est dirigé de l'Iran central vers le bouclier arabe et on a dans cette zone un resserrement et un déversement des plis.

2.3.2 - Classification de la zone du Zagros

De façon générale, on peut dire que la zone du Zagros, au point de vue tectonique, comporte deux parties :

1° / - La zone plissée du Zagros

C'est la zone pétrolière de Khousestan en Iran et Karkouk en Irak. Dans cette partie, les plissements sont réguliers et simples, on a à peu près toujours les sédiments Mio-Pliocène en surface, qui recouvrent des calcaires de la formation Asmari qui sont riches en pétrole.

Si on avance vers le centre de l'Iran, les compressions augmentent. On peut voir dans cette zone des plis verticaux et inverses, à cause de la proximité de la zone de chevauchement du Zagros. Le bassin du Moharlu est situé dans cette partie du Zagros.

2° / - La zone de chevauchement du Zagros

La deuxième partie du Zagros est la zone du chevauchement du Zagros. Dans cette partie, il y a beaucoup de charriages et de fractures, et on peut voir aussi les effets d'un métamorphisme régional. Dans les montagnes Kolikoch, on peut distinguer une zone métamorphique sur la route de Chiraz-Isfahan à 190 km au N de la région étudiée.

En raison du grand nombre de fractures, on ne peut pas retrouver facilement les pentes et directions générales des plis.

La zone du Zagros correspond à une ligne de chevauchement du bouclier de l'Iran central sur le sillon du Zagros, par une grande faille inverse.

Paléogéographiquement cette zone du Zagros était la plus profonde au Secondaire et au début du Tertiaire. Elle a un caractère géosynclinal. Les eaux du géosynclinal ont été repoussées progressivement au cours des temps géologiques du NE vers le SW pour prendre la position actuelle du Golfe Persique.

Cette zone a été sous l'influence de tous les mouvements orogéniques du Trias au Pliocène. On l'appelle zone de chevauchement (crushed-zone, overthrust) du Zagros.

2.2.3 - Tectonique du bassin versant du Moharlu

La zone étudiée est, du point de vue tectonique, liée à la zone plissée du Zagros.

Les plissements dans cette partie sont tellement intenses que l'on voit les couches anciennes en surface. Par exemple, on peut voir, au Sud du lac du Moharlu un anticlinal inverse, et au centre de cet anticlinal les sédiments du Crétacé moyen (coupe n° 5). Il en est de même à l'Est du bassin du Moharlu.

Les plissements au Sud et au Sud Ouest de la région étaient moins forts que dans le secteur du lac du Moharlu, et on peut voir dans cette zone les sédiments de l'Eocène et de l'Oligocène en surface. La partie à l'Ouest de la région de

Chiraz était à peu près calme. Au Nord de la zone étudiée, les compressions tectoniques étaient fortes, au point que l'on peut distinguer les sédiments paléocènes en surface.

Dans la région étudiée, on ne voit pas de déplacements de massifs ignés ou magmatiques dans les sédiments, mais autour des dômes de sel on peut voir certains échantillons de roches basiques.

### 2.3.3.1 - Paléogéographie

La position géologique du bassin du Moharlu montre que les limites des sédiments de l'ère tertiaire se trouvent au Nord de la région de Chiraz, près du village d'Ab-Barik (20 km au Nord de Chiraz).

On note qu'au centre du bassin du lac Bakhtegan, situé au Nord et à l'Est du bassin du Moharlu, il n'existe pas de sédiments du Tertiaire. On peut donc dire que la partie centrale du bassin de Bakhtegan a émergé après les mouvements orogéniques de la fin du Crétacé. Au Paléocène - Miocène, dans cette zone on n'a pas eu de sédimentation par suite d'une régression. On y trouve les sédiments post-orogéniques de Bakhtiyari, qui correspondent à des dépôts d'origine fluviatile.

Au cours des ères secondaire et tertiaire, dans le bassin du Moharlu la sédimentation est liée aux changements d'extension de la mer, liés eux-mêmes avec les mouvements tectoniques. Par exemple, la mer profonde de l'Eocène disparaît au Miocène. Les sédiments évaporitiques du Miocène indiquent la présence d'un bassin sédimentaire fermé à cette période.

En général, on peut dire que le bassin du Moharlu a émergé à la fin du Miocène par suite des mouvements orogéniques très forts du Pliocène.

### 2.3.3.2 - Plis de la région

#### Anticlinal inverse de Ghareh et Gochtash

Situé au S, SE et au SW du lac du Moharlu, l'anticlinal de Ghareh montre des compressions tectoniques intenses, il est déversé vers le lac du Moharlu, comme on peut l'observer près du village du Moharlu, et près du village Debaneh.

Les sédiments de la formation Djahrom qui sont sur le flanc sud forment une falaise d'environ 100 m, mais on peut supposer qu'il y a un décollement relativement important au pied de cette falaise.

En tout cas, on peut voir dans cette zone beaucoup de cassures et de failles. La direction des failles est NW-SE et celle des cassures normalement NE-SW.

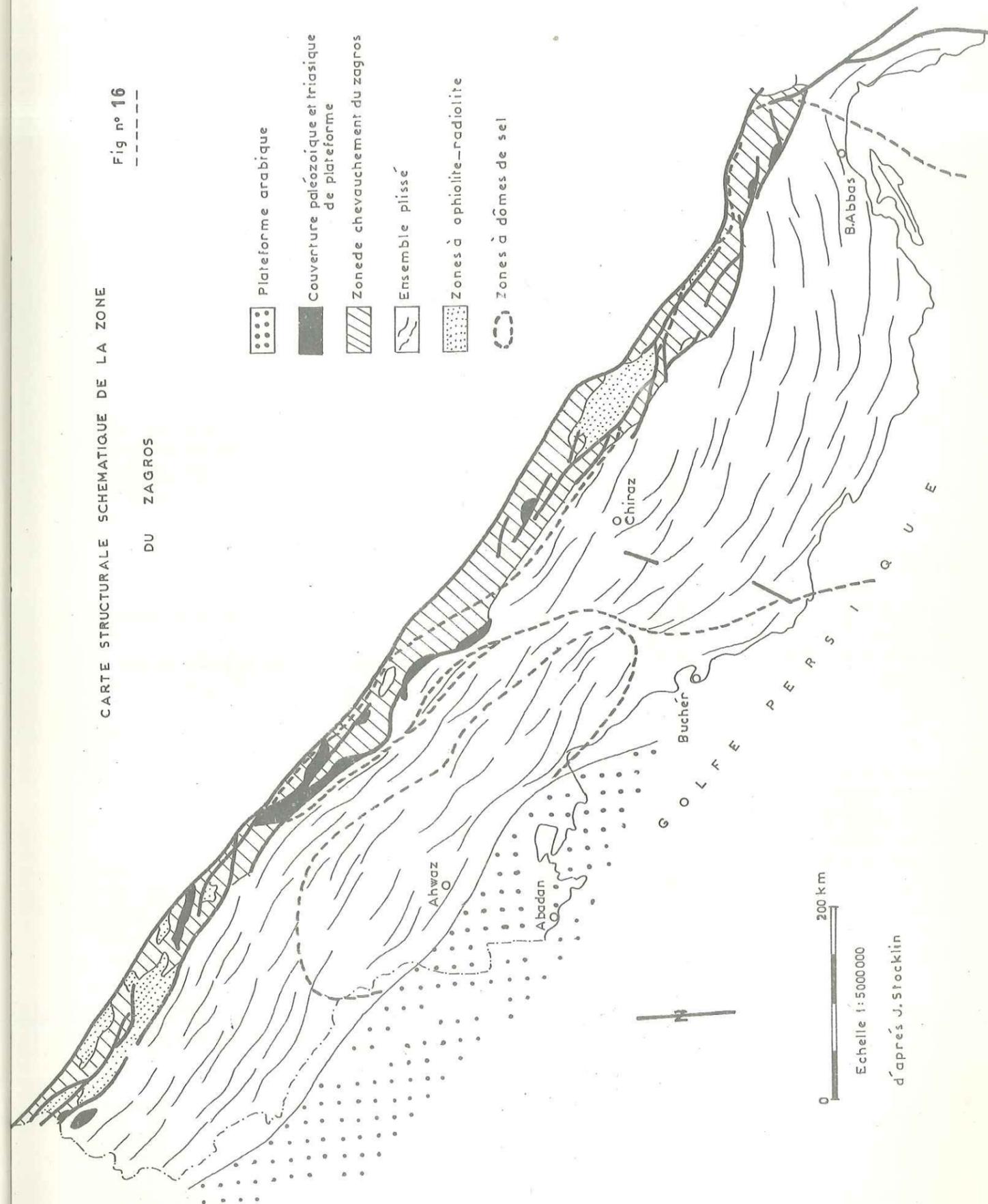
#### Anticlinal Siyah-Kuh

Situé au Sud Ouest de la région, près de la ville de Sarvestan, Siyah-Kuh, du point de vue géologique est très intéressant et classique. On peut voir dans cette zone les sédiments allant du Crétacé moyen jusqu'à l'époque actuelle :

les formations Sarvak, Ilam, Gurpi, Tarbur, Satchun, Djahrom, Asmari, Razak, Michan, Aghadjari, Bakhtiyari, les alluvions anciennes et les alluvions récentes.

Dans cette zone, il y a beaucoup de failles sur le flanc sud de l'anticlinal de Siyah-Kuh et une grande faille de direction (NW-SE) délimite le graben de Nazarahad, et se situe dans le prolongement des dômes de sel. Cette faille est post-orogénique (coupe n° 8), et est désignée sous le nom d'accident du Siyah-Kuh.

Quand on monte sur Siyah-Kuh, en cassant les roches de la formation Tarbur, on peut sentir l'odeur d'hydrocarbure et on trouve aussi du pétrole brut dans les gypses de Satchun.



Les calcaires de Tarbur dans cette zone contiennent en effet du pétrole. Les sédiments de Gurpi et Satchun forment le mur et le toit de la formation productive. Il existe aussi éventuellement du pétrole dans les calcaires du Crétacé moyen compris entre les formations Kazdumi et Gurpi qui en forment alors le mur et le toit.

Anticlinal d'Ahmadi et de Khoda

Cette zone a subi une compression tectonique intense. Au flanc sud de cet anticlinal il y a une grande faille légèrement inverse près du village Ala-Dolat.

Si on passe sur la route montagneuse Sarvestan-Kherameh, on peut voir beaucoup de cassures et de failles. La direction des failles est E-W et celle des cassures est NE-SW.

Les anticlinaux Sorkhan, Kaftarak et Bamu, Baba-Kuhi et Beiyza

Ils sont situés de l'Est jusqu'au Nord Ouest de la ville de Chiraz.

Cette zone a été soumise à des compressions tectoniques intenses, et l'on observe, dans cette partie, deux anticlinaux inverses : Kaftarak et Bamu.

Au flanc sud de Kaftarak, il y a une grande faille de direction NW-SE qui continue jusqu'à Chiraz (photo n° 1), on peut voir cette faille très nettement près de la source Barm-Delak et on peut interpréter cette partie de la plaine de Chiraz comme un graben (coupe n° 4).

L'existence dans cette zone de très nombreuses failles (normalement NW-SE) et cassures affectant les anticlinaux inverses (coupes 2, 3, 4) montre que la région a été soumise à plusieurs phases de déformation.

Dans la partie NW de la région, près de la route Chiraz-Ardekan, les compressions tectoniques intenses se traduisent encore par des anticlinaux inverses.

Dans cette partie, on voit les conglomérats pliocènes sur les calcaires oligocènes (Asmari). On peut donc dire qu'après les mouvements orogéniques de la fin du Miocène et du début du Pliocène, on a eu une phase d'érosion dans cette zone, et c'est en raison de cette érosion que l'on ne peut pas voir les sédiments du Miocène entre l'Oligocène et le Pliocène.

Anticlinal Darak

Il s'appelle à Chiraz, montagne Adamu. Autour de cet anticlinal, il y a beaucoup de sédiments miocènes. Au flanc SW de cet anticlinal, il y a une faille relativement importante de direction NW-SE et l'anticlinal est légèrement déversé vers la route Chiraz-Kazerune. Sur cette montagne il y a encore beaucoup de failles et de cassures. Les directions de failles sont 60°, 25°, 15°, 45°, NW-SE et les cassures sont identiques aux directions des lignes de pente des couches, c'est-à-dire vers le NE. Les pentes augmentent vers le NW. A côté des sédiments miocènes, on a une pente de 75°, et sur le flanc S de cet anticlinal les pendages sont à peu près verticaux (environ 80°, coupe n° 2).

Anticlinal de Sabzpuchan

C'est le seul anticlinal normal de la région de Chiraz. Mais dans cette montagne aussi, on trouve beaucoup de failles ; les directions de ces failles sont normalement NW-SE et N-S. On trouve aussi des cassures avec des directions NE-SW. En particulier sur le flanc nord, on a une grande faille normale (30° NW-SE) et, sur le tracé de cette faille, il y a quatre sources (coupe n° 4).

Synclinaux perchés

Dans la région étudiée il y a beaucoup de synclinaux perchés : Ghalat, Tchahar-Makan, Soltan-Abad... Ces synclinaux perchés se sont formés par suite de la dureté des conglomérats Bakhtiyari et parce que les sédiments miocènes qui étaient autour de cette formation ont été facilement érodés. Seuls sont restés les conglomérats durs du Pliocène (coupes 1, 6, 8).

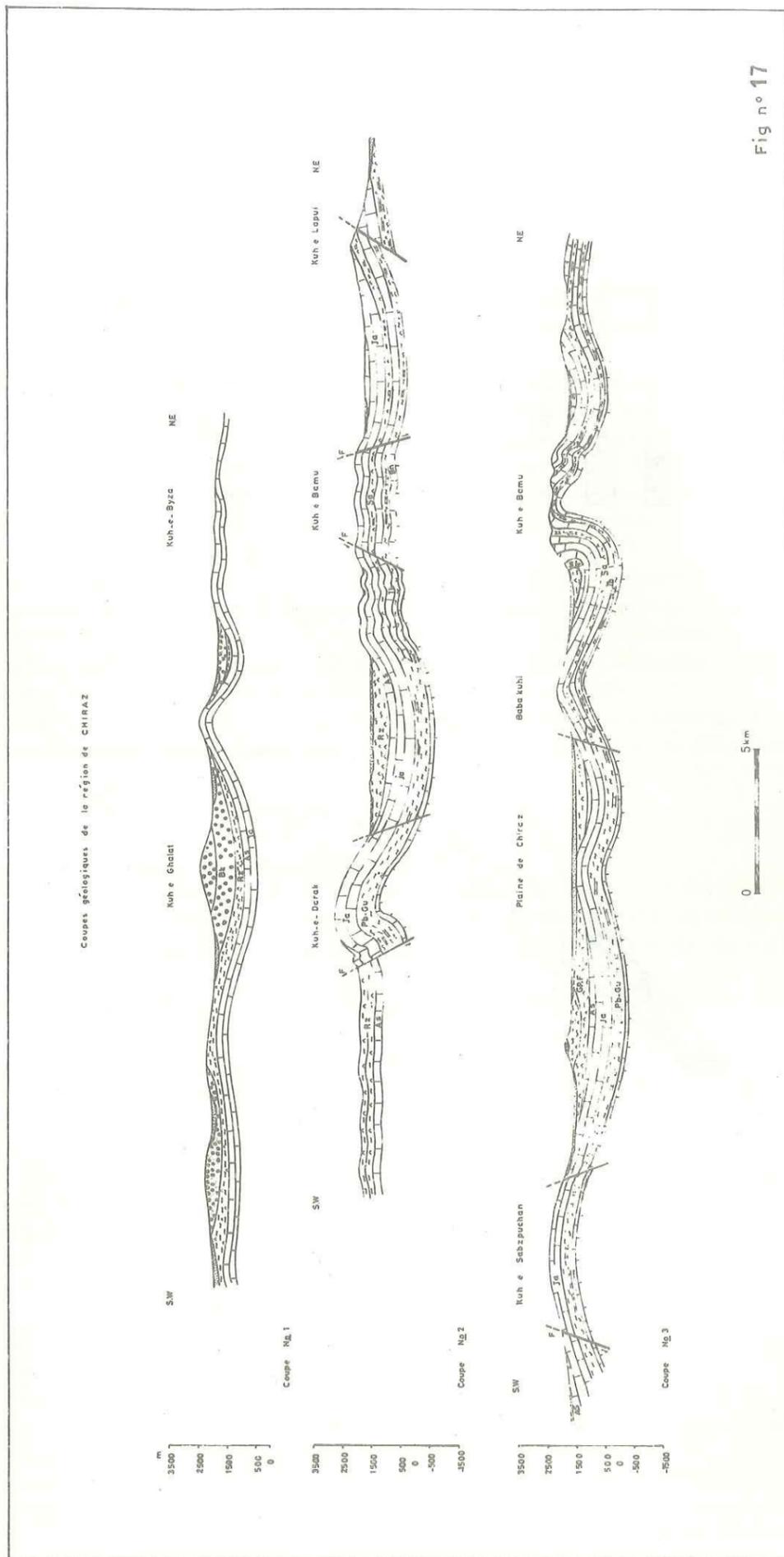


Fig n° 17

Coupes géologiques de la région de CHIRAZ

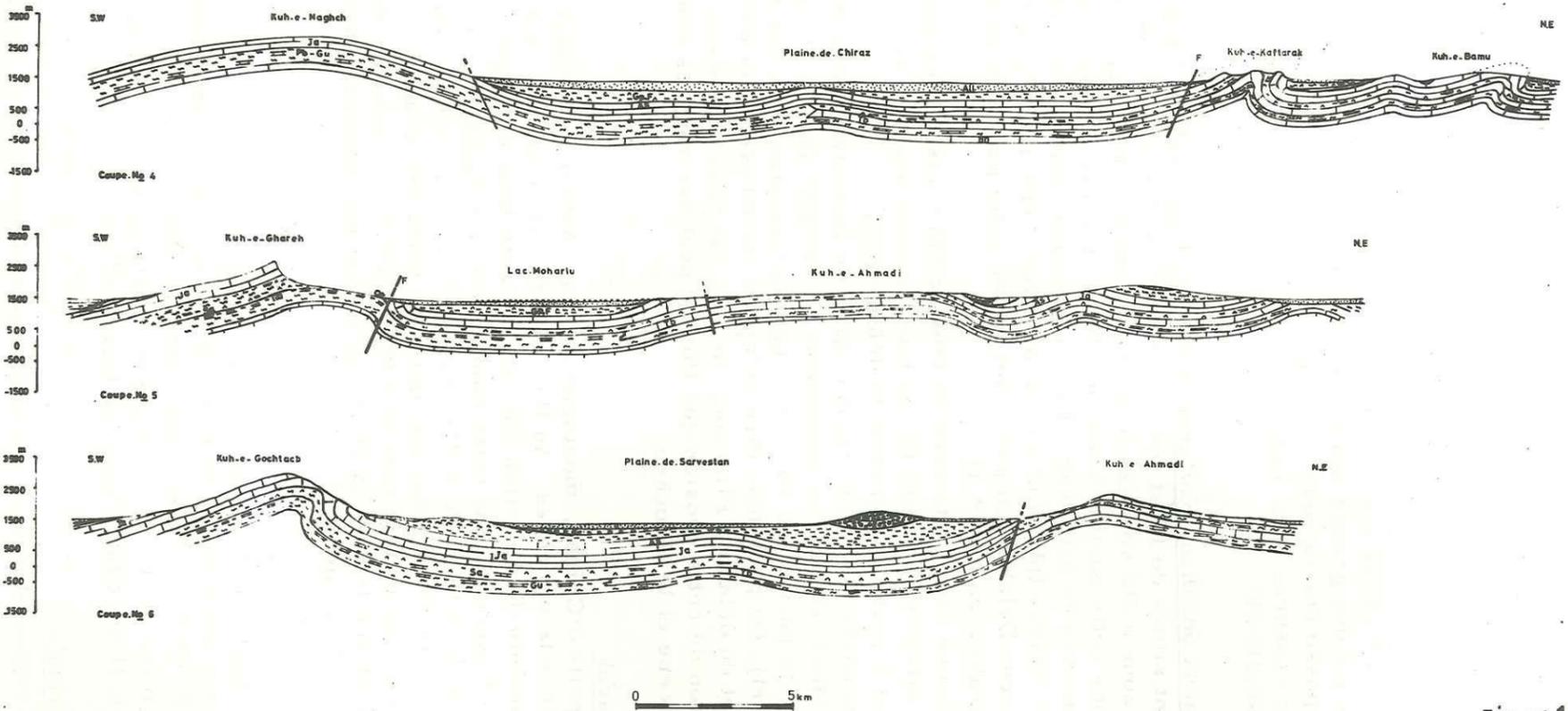
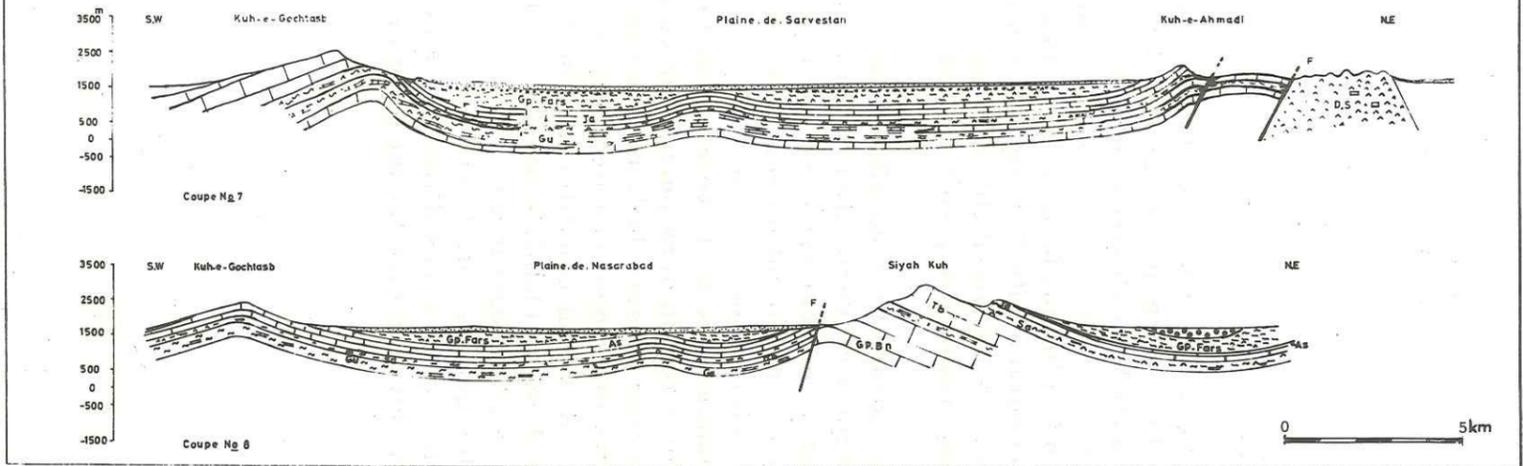


Fig n° 18

Fig n° 19

Coupes géologiques de la région de CHIRAZ





CHAPITRE 3

COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES MASSIFS CALCAIRES ET DES SOURCES DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU

3.1. - LES FORMATIONS DES DIFFERENTES ERES GEOLOGIQUES

3.1.1 - Ere secondaire

a. - Formations Sarvak et Ilam<sup>2</sup>

Elles n'occupent que 15 km<sup>2</sup> de la région étudiée. Au point de vue karstification elles sont peu importantes. On ne voit pas de source qui émerge de ces formations. Dans la région de Chiraz, et spécialement des plaines de Chiraz et de Sarvestan, ces formations sont situées en profondeur et on peut y trouver du pétrole plutôt que de l'eau.

b. - Formation Gurpi

Les sédiments Gurpi sont marneux avec alternance de couches calcaires. Dans la région de Chiraz, de cette formation émerge seulement une source sulfureuse au Sud du village de Moharlu. Le débit de la source du Moharlu est lié exactement aux précipitations de cette zone, et on peut dire que la formation Gurpi n'est pas intéressante du point de vue des phénomènes de karstification.

c. - Formation Tarbur

Les calcaires du Tarbur sont riches en eau, mais à cause de leur position topographique, on ne peut pas exploiter ces calcaires. On a dans le bassin versant du Moharlu une source qui émerge du Tarbur à l'Est de Sarvestan, au contact des marnes de la formation Satchun (Paléocène), avec un débit considérable (max. 180 l/s).

En dehors du bassin du Moharlu (30 km au Nord de Chiraz) autour de la ville de Zarghan, on a beaucoup d'affleurements des calcaires Tarbur. Nous avons fait un forage sur ces calcaires jusqu'à 200 m et il a donné un débit de 120 l/s avec une pompe de 8 pouces, un tube de 300 mm de diamètre et un rabattement de 40 cm seulement.

3.1.2 - Ere tertiaire

a. - Formation Satchun

Cette formation est le substratum des calcaires éocènes.

b. - Formation Asmari-Djahrom

Cette formation, avec une surface d'environ 1200 km<sup>2</sup> est la plus importante du point de vue de l'hydrogéologie karstique (photo n° 3).

Les calcaires Djahrom

Dans ces calcaires, il y a beaucoup de fissures, plus ou moins ouvertes et des cavités de quelques mètres ainsi que des failles et des diaclases.

Les failles jouent tantôt le rôle de drain, comme sur le flanc nord de l'anticlinal Sabzpuchan, tantôt le rôle d'écran comme à Siyah-Kuh.

Dans les montagnes calcaires de Chiraz, il y a beaucoup de diaclases qui peuvent avoir une largeur allant jusqu'à 2 mètres comme celle que l'on observe au-dessus de la source (Pol-Brendji).

Les cavités sont très abondantes, par exemple au Nord de Chiraz (Tchah-Mortaz Ali) et aussi sur les montagnes de Ghareh et de Sabzpuchan (Sid-Abu-Eshagh).

Pendant la réalisation des sondages, on a trouvé plusieurs de ces cavités. Par exemple dans le puits n° 4 réalisé sur l'anticlinal de Darak, on avait entre 60-70 m de profondeur des cavités vides avec un fond de marnes, puis on avait entre 90-100 m d'une cavité remplie de marnes (la puissance de ces cavités est de 1 à 4 m).

Au forage n° 3 sur Darak, à 75 mètres, on a trouvé également une cavité remplie de marnes.

En tout cas on peut dire que les calcaires de Djahrom sont très riches en eau. On a fait cinq sondages sur les calcaires de l'Eocène de la région de Chiraz, qui dans les conditions de pompages expérimentaux ont fourni un débit total de plus de 500 l/s.

On peut dire qu'à peu près 90 % des sources de cette région émergent de cette formation.

Au point de vue de la fissuration, les calcaires de Djahrom sont très fissurés, mais il faut signaler que souvent les fissures sont recimentées par de la calcite.

Par exemple, à la montagne de Sabzpuchan, sur une surface de mesure pour la fissuration et la fracturation, on a 87 fissures pour 42 m<sup>2</sup> avec une largeur moyenne de 4,4 cm, mais il faut noter que toutes les fissures fines sont recimentées.

On peut penser qu'après la phase de fracturation, une modification du régime de circulation des eaux est produite et en raison de ce phénomène les fissures auraient été coimantées par des dépôts calciteux.

Ce phénomène d'obturation des fissures est très fréquent dans tous les calcaires de l'Eocène de la région, à l'exception des zones superficielles.

Il faut ajouter aussi qu'on voit ce phénomène dans des zones assez peu profondes malgré tout et que l'on ne sait pas encore si en profondeur il en est de même et si les fissures y sont ouvertes ou cimentées.

Les calcaires Asmari

Développés au Nord Ouest et à l'Est de Chiraz, ils ont à peu près le même comportement hydrogéologique que les calcaires de Djahrom.

Mais au point de vue fracturation et fissuration, il y a une différence essentielle entre les deux calcaires. C'est-à-dire que les fissures et fractures des calcaires Asmari sont un peu plus ouvertes que celles des calcaires Djahrom, dans la mesure où l'on peut identifier les deux formations.

Le pourcentage de marne joue un rôle important dans ce phénomène. Par exemple, sur les calcaires Asmari, près de la source de Djuchak, on a des diaclases très grandes allant jusqu'à 40 cm de largeur.

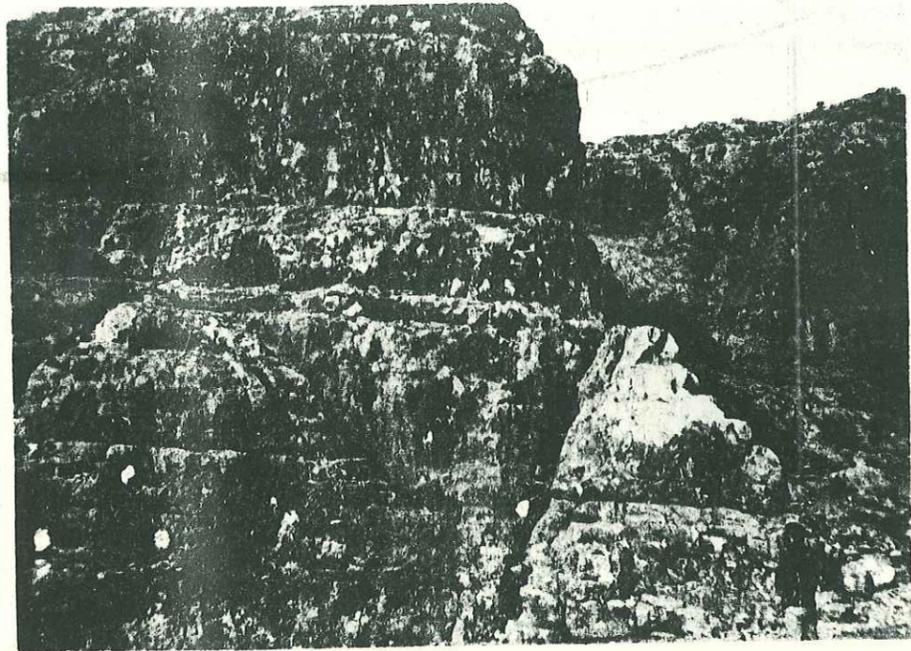


Photo n° 5 - Les calcaires Asmari-Djahrom de la falaise de Barm-Delak  
vus du Sud -



Photo n° 6 - Vue de détail de la surface structurale et d'une diaclase dans les  
calcaires Asmari-Djahrom sur la montagne Sabzpuchan

Dans ces calcaires, sur une surface de mesure, on avait environ une fissure pour chaque m<sup>2</sup>, avec une largeur moyenne de 7 cm. Au pied de cette montagne, on trouve une source très importante avec un débit de plus de 500 l/s.

d. - Les sédiments miocènes

Du point de vue hydrogéologie karstique les sédiments miocènes ne sont pas importants.

e. - Les sédiments pliocènes

Ils sont sous la forme de conglomérats. Ces conglomérats, particulièrement à la montagne de Ghalat, jouent le rôle d'un karst. On a dans ces sédiments des fissures et des cassures, et même on peut trouver des chenaux et des cavités.

Dans les sédiments du Pliocène, près du village de Ghalat, on a des sources considérables avec un débit maximum de 1200 l/s en avril 1972. La source se situe au contact entre les sédiments miocènes et pliocènes. Ces sédiments pliocènes, vus de loin apparaissent très semblables aux calcaires de la région, dont ils ont souvent le comportement.

Dans ces conglomérats, il y a en effet des galeries souterraines qui alimentent les sources. Par exemple, la source de Gourouk est alimentée par une fracture ouverte et l'eau qui émerge de cette fracture est en charge, même pendant la période de tarissement.

3.2. - HYDROGEOLOGIE DES AFFLEUREMENTS CALCAIRES ET DESCRIPTION DES SOURCES

3.2.1 - Anticlinal de Darak

L'anticlinal de la montagne de Darak est constitué par les calcaires éocènes (Djahrom) qui sont entourés par les calcaires oligocènes (Asmari).

La surface des calcaires est de 73 km<sup>2</sup>. Les précipitations annuelles sont de 500 mm et le débit de trois puits est de 12 millions de m<sup>3</sup> par an.

L'infiltration serait donc de 33 % des précipitations, soit 165 mm, ceci sans tenir compte de l'alimentation des alluvions par les calcaires. On pourrait penser que cette montagne est alimentée partiellement par des apports venant des montagnes qui sont toujours recouvertes de neige et qui sont au NW de celle-ci, mais il faudrait faire un essai de traçage pour vérifier cette idée, qui est difficile à admettre en raison de la distance existant entre les deux secteurs.

On peut cependant noter que le débit spécifique des calcaires de Darak est de 6,41 l/s par km<sup>2</sup>.

Les calcaires de cette montagne sont fissurés et on a environ une fissure pour 2 m<sup>2</sup>. La largeur moyenne des fissures est d'environ 5 cm à la surface. Sur un plan de mesure, au-dessus du puits n° 2, on a distingué quatre familles de fissures en fonction de leur direction. Les distributions de ces familles sont comparables.

Dans ces calcaires, les fissures de l'ordre du millimètre sont recimentées par des dépôts de calcite. Les fissures centimétriques sont remplies par des marnes. On peut ajouter que les fissures sont normalement comprises entre 1 et 10 cm. On note que pour la mesure de l'indice de fissuration et de fracturation on doit négliger les fissures recimentées.

Les familles des fissures sont :

1 -	$F_1$ (70-100)° N	N = 29	$f_1 = 0,13$ par $m^2$	$d_1 = 4$ cm
	$F_2$ (110-130)° N	N = 23	$f_2 = 0,11$ " "	$d_2 = 5$ cm
	$F_3$ (140-160)° N	N = 27	$f_3 = 0,12$ " "	$d_3 = 6,6$ cm
	$F_4$ (10-40)° N	N = 13	$f_4 = 0,06$ " "	$d_4 = 5$ cm
2 -	$F_1$ (160-180)° N	N = 7	$f_1 = 0,35$ par m	$d_1 = 4$ cm
	$F_2$ (70-100)° N	N = 7	$f_2 = 0,35$ " "	$d_2 = 5$ cm
3 -	$F_1$ 0°	N = 32	$f_1 = 1,6$ par m	$d_1 = 1,4$ cm
	$F_2$ 90°	N = 3	$f_2 = 0,15$ " "	$d_2 = 4$ cm

3.2.2 - Anticlinal de Sabzpuchan

3.2.2.1 - Hydrogéologie et géologie

L'anticlinal de Sabzpuchan est formé par les calcaires Djahrom (Eocène). Sur le flanc SW et sur la terminaison périclinale de cet anticlinal il y a des calcaires oligocènes (Asmari).

La surface de la partie de Sabzpuchan qui est liée au bassin du Moharlu est d'environ 200 km<sup>2</sup>. Les précipitations annuelles sont de 500 mm, soit un volume précipité sur cette montagne de 100 millions de m<sup>3</sup>/an.

Les débits annuels de quatre sources et deux ghanates que l'on a dans cette zone sont de 22 millions de m<sup>3</sup>/an.

Il en résulte que le pourcentage d'eau infiltrée est de 22 %, soit une lame d'eau de 110 mm.

Le débit spécifique de ce calcaire est ici de 3,45 l/s/km<sup>2</sup>. Ceci sans tenir compte de l'alimentation des alluvions.

Les calcaires de Sabzpuchan sont fissurés. On y distingue 2 familles de fissures qui sont perpendiculaires entre elles. Le phénomène de recimentation des fissures est très différent de celui observé dans les calcaires de Darak, mais surtout les fissures y sont millimétriques. Dans les calcaires de Sabzpuchan on a deux fissures par m<sup>2</sup>. La largeur moyenne des fissures est d'environ 4,5 cm.

Dans ces calcaires, les diaclases décimétriques sont assez abondantes et de l'ordre d'une fracture par 4 m<sup>2</sup>. La largeur moyenne de ces fractures est de 30 cm. Il y a donc beaucoup de grandes fractures dans la montagne de Sabzpuchan et ces fractures déterminent des falaises. La direction de ces grandes fractures est 40° N.

Sur le bord de cette montagne, il y a des sources considérables dont les débits unitaires sont de l'ordre de 200 l/s.

Les familles de fissures de Sabzpuchan sont :

$F_1$ (0-40)° N	N = 77	$f_1 = 1,8$ par $m^2$	$d_1 = 4,8$ cm
$F_2$ (80-120)° N	N = 7	$f_2 = 0,17$ par $m^2$	$d_2 = 2$ cm

3.2.2.2 - Les sources de l'anticlinal de Sabzpuchan

La plus importante des sources issues de l'anticlinal de Sabzpuchan est la source de Pir Benau qui alimente trois villages.



Photo n° 7 - Source de Pol-Brendji au pied de la falaise des calcaires Asmari-Djahrom de la montagne de Sabzpuchan -

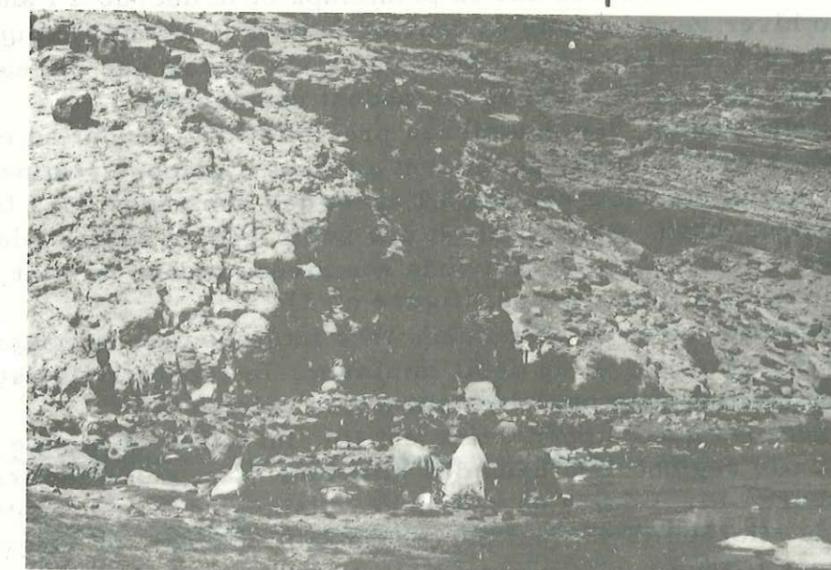


Photo n° 8 - Vue de détail de la source de Pol-Brendji et de la fracture qui affecte les calcaires Asmari-Djahrom -

a. - Source de Pir Benau (86 222 2)

Les calcaires qui affleurent à l'émergence de cette source sont broyés et on peut y voir de très nombreuses fissures. Il y a également une faille de direction NW-SE, avec des brèches tectoniques au-dessus de la source. Le pendage des couches est dirigé vers la source (20°), dont l'altitude est de 1 470 m.

Le débit de la source de Pir Benau, lors des mesures, variait de 180 à 320 l/s. L'eau de cette source est sulfatée.

b. - Source de Pol-Brendji (84 222 3)

A l'emplacement de la source il y a une faille de direction (NW-SE) très nette (photo n° 8) et aussi une diaclase verticale (photo n° 6) dirigée vers la source.

Les pendages se font vers la source (25°) et les fissures sont fréquentes.

Le débit de Pol-Brendji a varié entre 110 et 370 l/s lors de nos mesures. L'eau de cette source est chlorurée. L'altitude de l'émergence est de 1 450 m (photo n° 7).

c. - Les autres sources

La position de ces sources est plus ou moins comparable à celle des autres sources de Sabzpuchan.

Les cotes des émergences des deux sources sont proches de 1 450 m. Les débits sont considérables, mais les terrains qui sont au voisinage des sources étant des marécages, on ne peut pas mesurer ces débits.

3.2.2.3 - Conclusions

La crue de ces sources est au printemps et la décrue à l'automne. On a aussi un étiage en hiver vers le mois de janvier (sauf Pol-Brendji), qui n'est pas en général dû au gel de l'eau dans le terrain, mais au fait que les eaux qui sont sous forme de neige sur les montagnes ne fondent pas encore.

Dans cette région, les premières précipitations se font au mois de novembre, mais les débits des sources augmentent au mois d'octobre. On peut donc dire que cette augmentation du débit est due à l'arrêt des pompages dans les puits de la plaine de Gharéh-bagh. Après l'arrêt des pompages de surface dans la nappe qui imprègne les calcaires et les alluvions son niveau monte en effet, d'où une augmentation du débit à l'émergence. (figure n° 21).

On a observé aussi un phénomène très intéressant ; la conductivité augmente quand le débit augmente, et au débit minimum, la conductivité est minimum. Les conditions sont identiques pour les teneurs en chlorures.

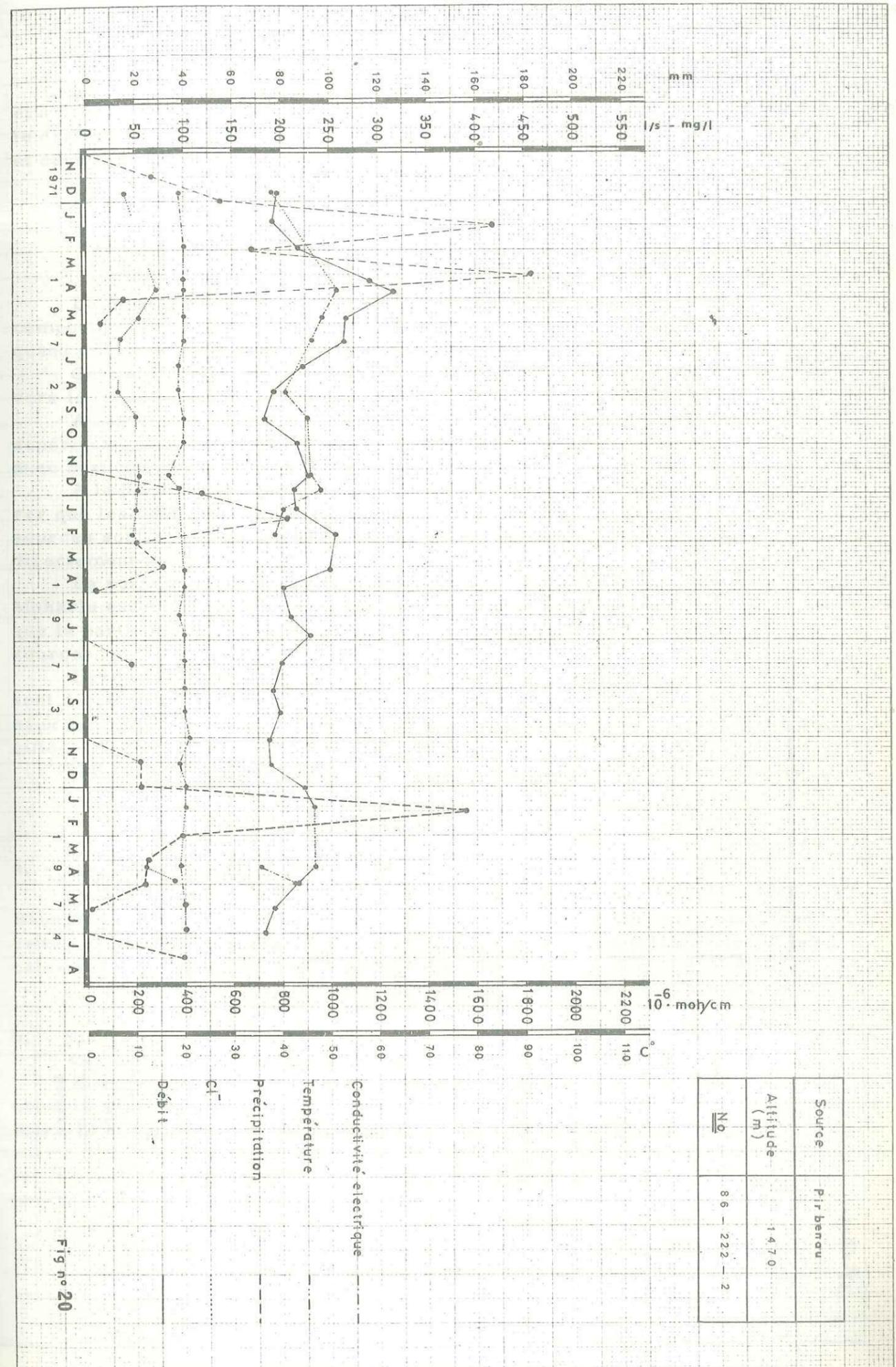
Nous pensons que ce phénomène est lié, lui aussi, à la cote de la surface de la nappe dans cette région. Les eaux des alluvions étant sulfatées (en particulier à côté de la source Pir-Bénaou) en raison du voisinage des sédiments marnogypsifères du Miocène (synclinal perché de Seultanabad), ou chlorurés près des autres sources (parce que le niveau de l'eau est près de la surface et que l'on a beaucoup d'évaporation). On assiste à une invasion de ces eaux dans les calcaires quand ceux-ci n'ont plus d'alimentation amont importante. (figure n° 20).

On peut dire que dans cette région, il y a interférence entre les eaux des calcaires et les eaux des alluvions.

Les températures des eaux de ces sources ne varient que de 5° de l'été à l'hiver (pour la source de Pol-Brendji cette variation est de 7°, mais le seul emplacement de mesure possible est situé assez loin de l'émergence).

L'ordre de grandeur des amplitudes de variation des températures permet de dire que ces sources sont alimentées par un karst profond.

Par ailleurs les quatre sources de Sabzpuchan sont sur une ligne de faille, et cette faille draine toutes les eaux qui sont contenues dans le massif calcaire.



La plaine de Ghareh-Bagh qui est voisine de cette montagne est marécageuse, et à cause de l'évaporation on y trouve des eaux salées. Il est possible de réaliser le drainage de cette plaine avec des canaux et des puits à la fois dans les calcaires et dans les alluvions.

### 3.2.3 - Anticlinal de Ghareh

#### 3.2.3.1 - Hydrogéologie et géologie

La montagne de Ghareh est constituée de calcaires éocène-oligocène qui comportent beaucoup de fissures et de cavités. On voit beaucoup de ces cavités quand on passe vers la ville de Fassa.

Cet anticlinal a subi des compressions orogéniques intenses, il est déversé vers le lac du Moharlu.

Au centre de l'anticlinal de Ghareh, on a les sédiments du Crétacé moyen et supérieur. La karstification dans ces affleurements est fréquente et en liaison avec beaucoup de fractures et de failles.

A la bordure de cette montagne, il y a huit sources. Nous n'avons pu mesurer que les débits et caractéristiques de deux sources, parce que les autres sources sont à côté du lac du Moharlu, et que les eaux de ces sources s'écoulent directement au lac.

La surface de la partie de cette montagne, qui appartient au bassin du Moharlu est de 350 km<sup>2</sup>, dont nous ne retiendrons seulement que 240 km<sup>2</sup> parce que la partie SE de l'anticlinal ne joue aucun rôle dans l'alimentation de ces sources.

Les précipitations annuelles sont de 500 mm. Les débits annuels des sources sont de 16 millions de m<sup>3</sup>/an. Si on calcule le pourcentage correspondant aux eaux infiltrées, on trouve 13,3 %, soit une lame d'eau de 67 mm. Le débit spécifique de ces calcaires est donc de 2,08 l/s/km<sup>2</sup>.

Notons qu'on ne compte toujours pas l'alimentation des alluvions et du lac.

#### 3.2.3.2 - Les sources

##### a. - Source de BabaHadji (Barm) 84 224 4

Elle est située à la terminaison de la plaine de Chiraz, à côté du tombeau de Baba Hadji. La cote de l'émergence est de 1 500 m. Les calcaires au niveau de cette source sont fissurés, mais on ne voit pas de cavité considérable, et ces calcaires sont marneux, liés à l'Oligocène (Asmari).

Le débit de cette source varie entre 90 et 390 l/s et les eaux sont sulfatées.

##### b. - Source Moharlu 84 224 7

Cette source est au Sud du village de Moharlu (Sud du lac).

Elle émerge d'un banc de calcaire appartenant à la formation Gurpi qui est constituée de marnes avec des couches calcaires. La variabilité du débit se situait entre 12 et 510 l/s, lors de nos mesures. La source du Moharlu possède plusieurs points d'émergence, mais il n'y a qu'un point où l'eau s'écoule de façon permanente, les autres points sont des trop-pleins temporaires sous l'influence directe des précipitations sur la région.

La cote de l'émergence est de 1 450 m. La qualité de l'eau de la source du Moharlu n'est pas bonne, car elle est sulfatée et chlorurée, mais les paysans du village du Moharlu disent que cette eau est bonne pour soigner les maladies de la peau.

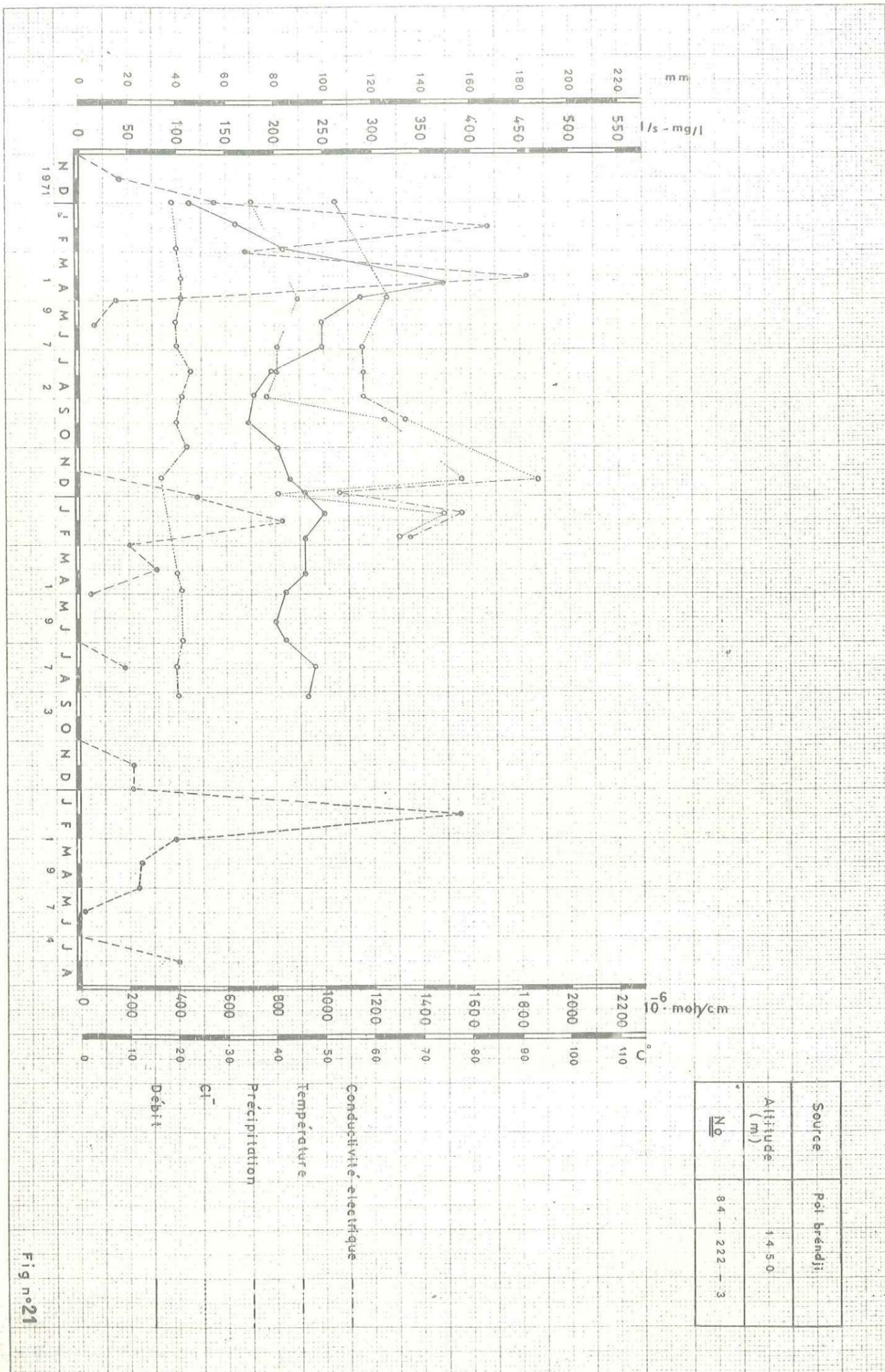


Fig. n°21

c. - Les autres sources

Elles se situent à la bordure du lac du Moharlu : ce sont les sources Tolé-Tofangue-Tchi (2240-840-1), Pousé-Siyah (2240-840-2), Chor-Choraki (2240-840-3), Chah Tcheraghi (2240-840-4), Do baneh (2240-840-5) et Gol-Rou (2240-840-1).

Les eaux de ces sources s'écoulent directement dans le lac du Moharlu, et on peut estimer que les débits de ces sources sont, au total, de 100 l/s.

Les eaux de ces sources sont beaucoup moins chlorurées que l'eau du lac.

3.2.3.3 - Conclusions

L'étiage des sources du Ghareh est à l'automne et la crue au printemps. Les débits de ces sources augmentent avant les précipitations. Ce phénomène est dû à l'arrêt des pompages sur les puits des alluvions. (figure n° 22).

L'étiage d'hiver pour la source du Moharlu se situe au mois de janvier, mais pour les sources Baba Hadji et Pol-Brendji, sur l'anticlinal de Sabzpuchan on a, une crue de débit en hiver et on ne peut pas expliquer exactement les raisons de ce phénomène. Car on a vu par exemple la source Pir-Benau présenter, dans les mêmes conditions une décrue au même moment. (fig. n° 23).

La relation entre le débit et la conductivité n'est pas identique à celle observée à la source Pir-Benau, mais comme on l'a déjà vu il y a une relation directe entre le changement de niveau de l'eau dans les alluvions et la conductivité.

L'eau de la source Baba Hadji est sulfatée à cause du voisinage de la formation Razak, de même que les eaux des nappes alluviales. L'eau de la source du Moharlu est aussi sulfatée, et la qualité chimique de cette source est due aux formations Satchun et Gurpi.

Entre les températures d'été et d'hiver, pour l'eau de la source Baba Hadji, il y a 7° C de différence. Cette variation est due à la position de l'émergence que l'on ne peut pas distinguer exactement, en raison de la présence d'un marécage. La température de l'eau est liée, dans ces conditions, à la température de l'air, bien que la source soit alimentée par des karsts profonds.

3.2.4. - Anticlinal Kaftarak et Baba Kuhi

3.2.4.1 - Hydrogéologie et géologie

La plus grande partie de cette montagne est formée par les calcaires éocènes et oligocènes. On a aussi des sédiments du Paléocène et du Crétacé supérieur au centre de cette montagne. Sur le flanc sud de l'anticlinal de Kaftarak, il y a une grande faille (photo n° 2 ). Cette faille joue le rôle de drain pour ces calcaires. On a sur la ligne de faille huit sources et on peut voir des brèches tectoniques, près de la source Babounak.

Dans cette montagne, il y a beaucoup de fractures, cavités, fissures et diaclases. Par exemple, au-dessus du puits n° 5, on a une diaclase verticale de direction NE-SW, avec une largeur de 50 cm, qui est apparemment remplie.

Pour connaître les caractères hydrodynamiques de ces calcaires on a mesuré l'indice de fissuration.

Dans ces calcaires on a trouvé 3 à 4 familles de fissures.

Par exemple, au-dessus de la source de Delak, on a distingué quatre familles de fissures au point de vue des directions. 15 % des fissures sont millimétriques, les autres sont centimétriques et on a aussi une vingtaine de chenaux verticaux avec un diamètre moyen de 7 cm, mais il faut souligner que ces chenaux ne sont pas présents dans tout le massif.

Les familles de fissures que l'on trouve dans les calcaires de Kaftarak sont :

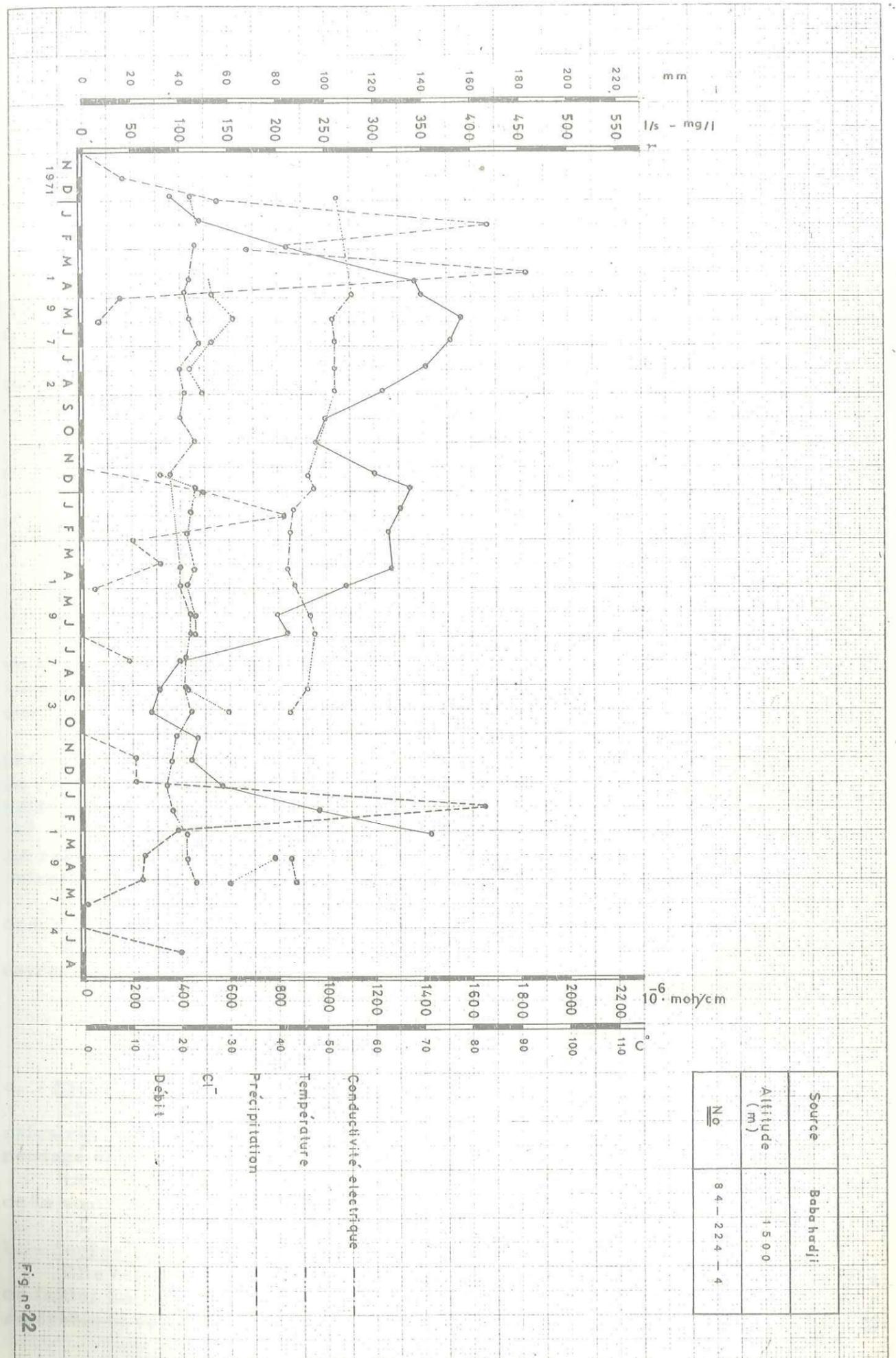


Fig n°22

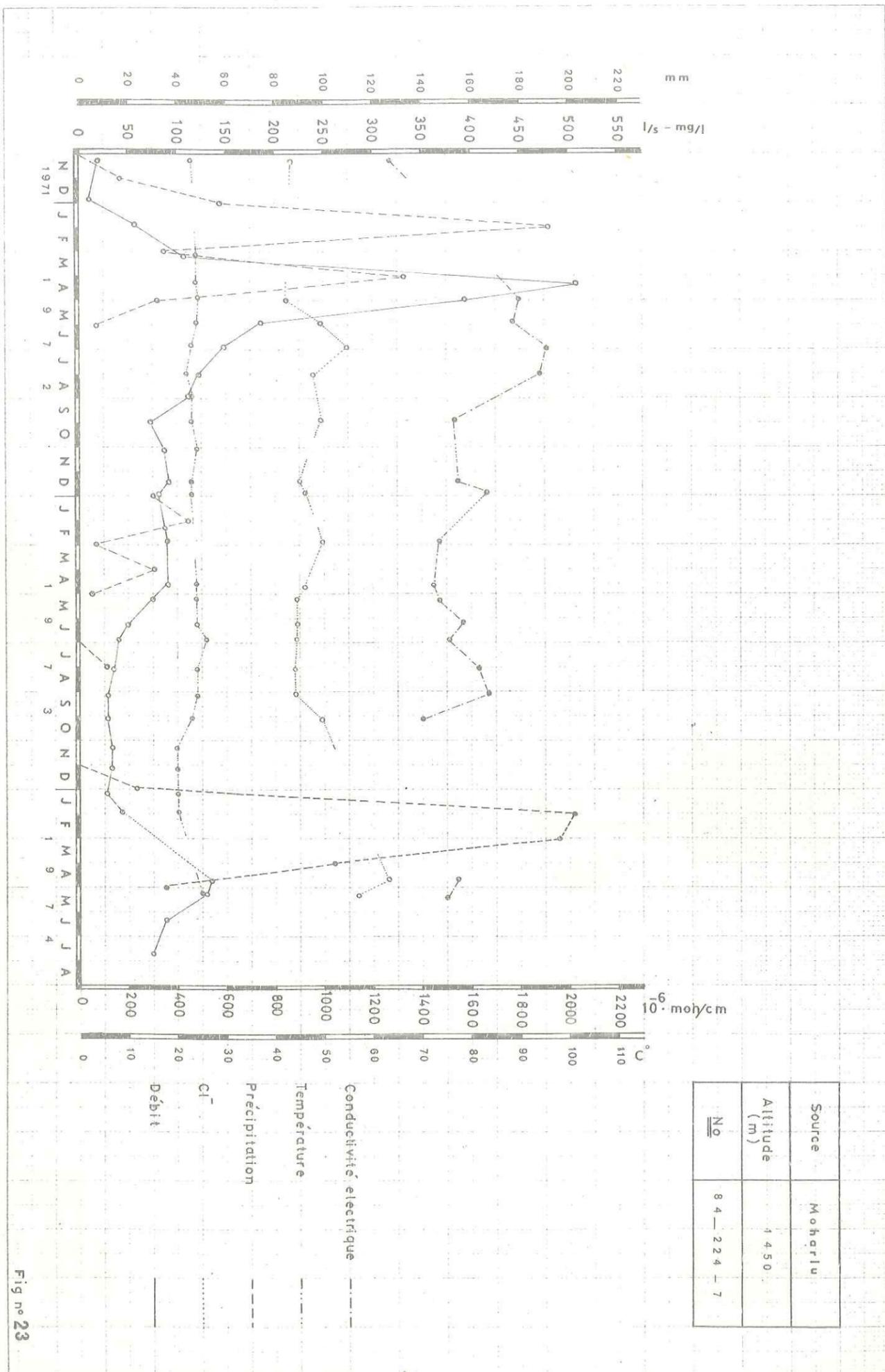


Fig n° 23

$F_1$ (0-30)° N = 16	$f_1 = 0.16$ fissure par $m^2$	$d_1 = 2$ cm
$F_2$ (40-60)° N = 37	$f_2 = 0.37$ "	$d_2 = 2,2$ cm
$F_3$ (80-120)° N = 32	$f_3 = 0.32$ "	$d_3 = 2$ cm
$F_4$ (130-160)° N = 12	$f_4 = 0.12$ "	$d_4 = 1.7$ cm

On a fait aussi une mesure sur les calcaires de Babakuhi près du village de Saadi. Ces calcaires sont très fracturés et l'on a beaucoup de fractures décimétriques (plus de 50 % des fractures).

Dans les calcaires de Babakuhi, on a trouvé trois familles de fissures qui sont :

1°/ - $F_1$ (0-30)° N = 16	$f_1 = 0.02$ fissure par $m^2$	$d_1 = 9$ cm
$F_2$ (60-100)° N = 91	$f_2 = 0.12$ "	$d_2 = 20$ cm
$F_3$ (150-170)° N = 17	$f_3 = 0.02$ "	$d_3 = 10$ cm
2°/ - $F_1$ (0-50)° N = 4	$f_1 = 0.2$ fissure par m	$d_1 = 6$ cm
$F_2$ (60-100)° N = 11	$f_2 = 0.55$ "	$d_2 = 14$ cm
$F_3$ 150° N = 2	$f_3 = 0.1$ "	$d_3 = 12$ cm

Il faut ajouter que l'ouverture des fissures en surface est très élargie, mais on ne peut pas dire que ces ouvertures se maintiennent en profondeur. On note aussi un phénomène de cimentation qui est dominant pour les fissures millimétriques.

La surface de l'anticlinal (partie du bassin du Moharlu) est de  $140 \text{ km}^2$ . Les précipitations annuelles sont de 500 mm. Le débit moyen des douze points d'eau de cette montagne (9 sources, 2 puits calcaires et une galerie) est de 800 l/s et le débit annuel est de 25 millions de  $m^3$ . Les eaux précipitées sont de 70 millions de  $m^3$ . On en déduit que les eaux infiltrées représentent 35,7 % des précipitations. Le reste correspond à l'alimentation des alluvions et du lac ainsi qu'aux débits des autres puits et ghanates qui sont dans cette zone.

On peut donc dire que 179 mm des précipitations s'infiltrent et que le débit spécifique de ces calcaires est de  $5.71 \text{ l/s/km}^2$ .

En tout cas, la grande faille qui est au flanc sud de Kaftarak draine les calcaires de Kaftarak et de Babakuhi.

3.2.4.2. - Les sources

- a. - Source Delak (Barm) 86-224-5  
Située à l'Est de Chiraz (10 km), la cote de l'émergence est de 1 485 m. Les calcaires liés à cette source sont compacts, avec des cavités fréquentes. Leur pendage est de 15° vers la source, et ils contiennent beaucoup de nummulites. Le débit varie entre 50 et 250 l/s. L'eau de la source est sulfurée. Au-dessus de la source on voit bien la faille dont on a déjà parlé (photo n° 9).
- b. - Source Djafar-Khani (Barm) 86-224-4  
Elle est située à 12 km à l'Est de Chiraz. Cette source est aussi sur une ligne de faille. La cote de l'émergence est de 1 450 m, le débit de cette source est considérable et varie entre 100 et 180 l/s, mais l'eau de Djafar-Khani est très salée,

avec une conductivité supérieure à 5 000 micromhos/cm. Il y a plus de 1 200 mg/l d'ion Cl. Les calcaires de l'émergence de cette source sont comparables à ceux de la source Delak. (photo n° 9).

c. - Source Kaftarak (86-224-11)

La source Kaftarak est à 16 km à l'Est de Chiraz, elle est alimentée par les calcaires Djahrom. Cette source a été captée par une galerie avec six puits qui se dirige en direction d'un ravin.

Près du dernier puits, le pendage des couches calcaires est de 60° vers le Sud, et on trouve, au niveau de cette source, une faille de direction NW-SE. Le débit de la source est faible par rapport aux autres (15 l/s). L'eau de Kaftarak est sulfatée (560 mg/l), et la cote de l'émergence est de 1 550 m.

d. - Source Babounak (Barm) (86-224-6)

Elle est située à l'Est de Chiraz (15 km). Elle émerge de la formation Djahrom (Eocène). Au Nord de cette source, on observe des brèches tectoniques dues à l'existence d'une faille qui alimente cette source.

La cote de l'émergence de cette source est de 1 425 m. Le débit est considérable (entre 170 et 330 l/s), mais la qualité chimique de cette source n'est pas bonne (conductivité supérieure à 3 500 micromhos, plus de 950 mg/l d'ions Cl<sup>-</sup> et plus de 240 mg/l d'ions SO<sub>4</sub><sup>-</sup>).

Les calcaires de cette source sont fissurés. Le pendage des couches est de 15° vers la source, c'est-à-dire vers le Sud.

e. - Les autres sources

On trouve aussi cinq sources qui sont :  
Taher-Kochte (1 465 m), Khalili (1 440 m), Garou (1 440 m), Mirza Khani (1 445 m)  
Tchah Chirine (1 620 m).

La source Taher Kochte est comparable à la source Delak, et les sources Garou et Mirza Khani et Khalili sont analogues à la source Djafar Khani. La source Tchah Chirine est comparable à la source Kaftarak, malgré une légère différence concernant la composition chimique et plus spécialement les teneurs en SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup>.

3.2.4.3 - Conclusions

La période de crue de ces sources se situe au printemps et la décrue à l'automne. On a aussi un étiage du débit en hiver. (figure n° 24).

Les débits de ces sources augmentent avant les précipitations, du fait de l'arrêt des pompages des puits dans les alluvions (montée de la surface de l'eau), mais pour la source Kaftarak le débit augmente avec les précipitations parce qu'autour de cette source il n'y a plus de puits et que la cote d'émergence de Kaftarak est 50 m au-dessus de celle de la plaine de Chiraz. (figure n° 25).

Les sources de cette zone sont riches en sulfates, du fait de la présence de la formation Satchun qui est constituée de marnes et de gypses, et que l'on trouve au centre de l'anticlinal de Kaftarak.

Les sources qui sont situées à l'Est de la source Kaftarak sont chlorurées. Ce phénomène est dû à la proximité du lac du Moharlu et aux relations existantes avec la nappe des alluvions. Dans cette zone, le niveau de l'eau souterraine est proche de la surface, et du fait de l'évaporation l'eau devient salée.

La relation entre la conductivité et le débit pour la source Babounak est directe. Cette relation est liée au niveau de l'eau souterraine qui est normalement fortement salée. Pour les autres sources, il y a la même relation, du fait de l'influence de la nappe des alluvions sur le comportement des sources.

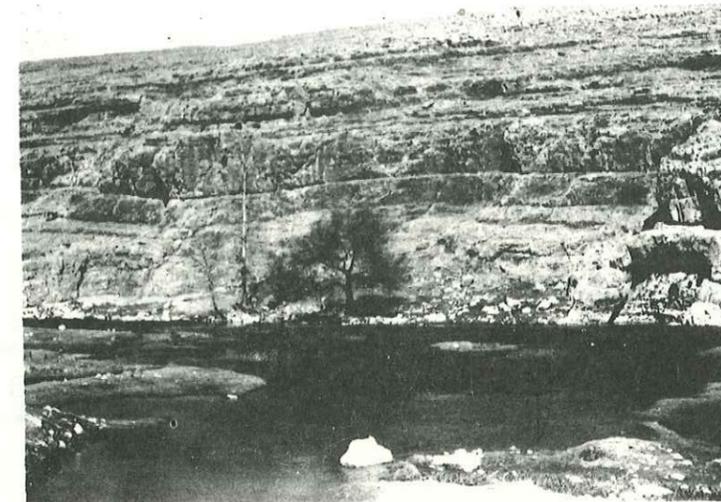


Photo n° 9 - Source de Barm-Delak et cavité karstique dans les calcaires Asmari-Djahrom -

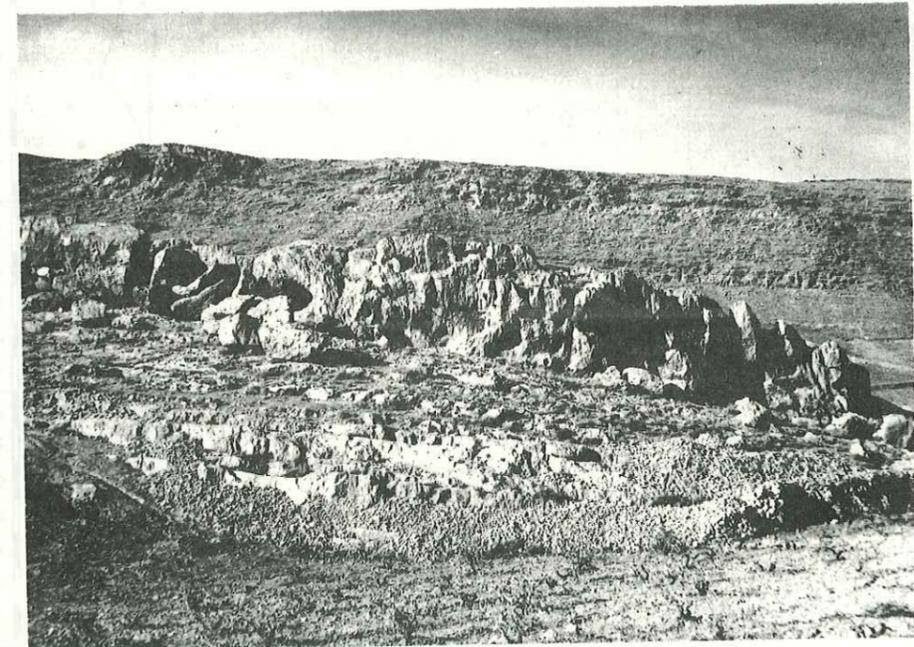


Photo n° 10 - Exemple de surface structurale dans les calcaires Asmari-Djahrom de la montagne de Babakuh utilisée pour les mesures de fissuration -

Source	Barm Delak
Altitude (m)	1485
No	86-224-5

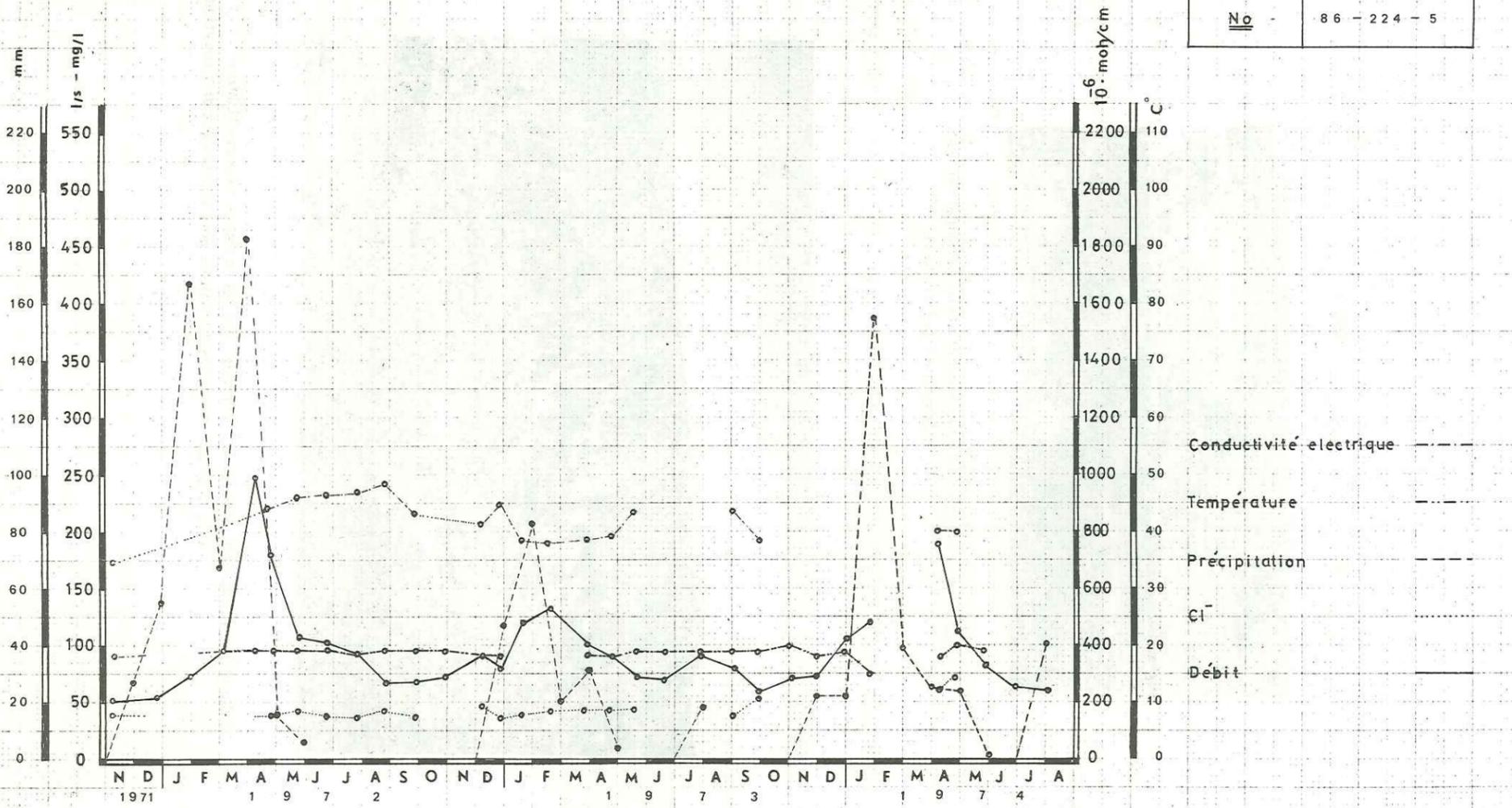


Fig n°24

Source	Bebounek
Altitude (m)	1425
No	86-224-6

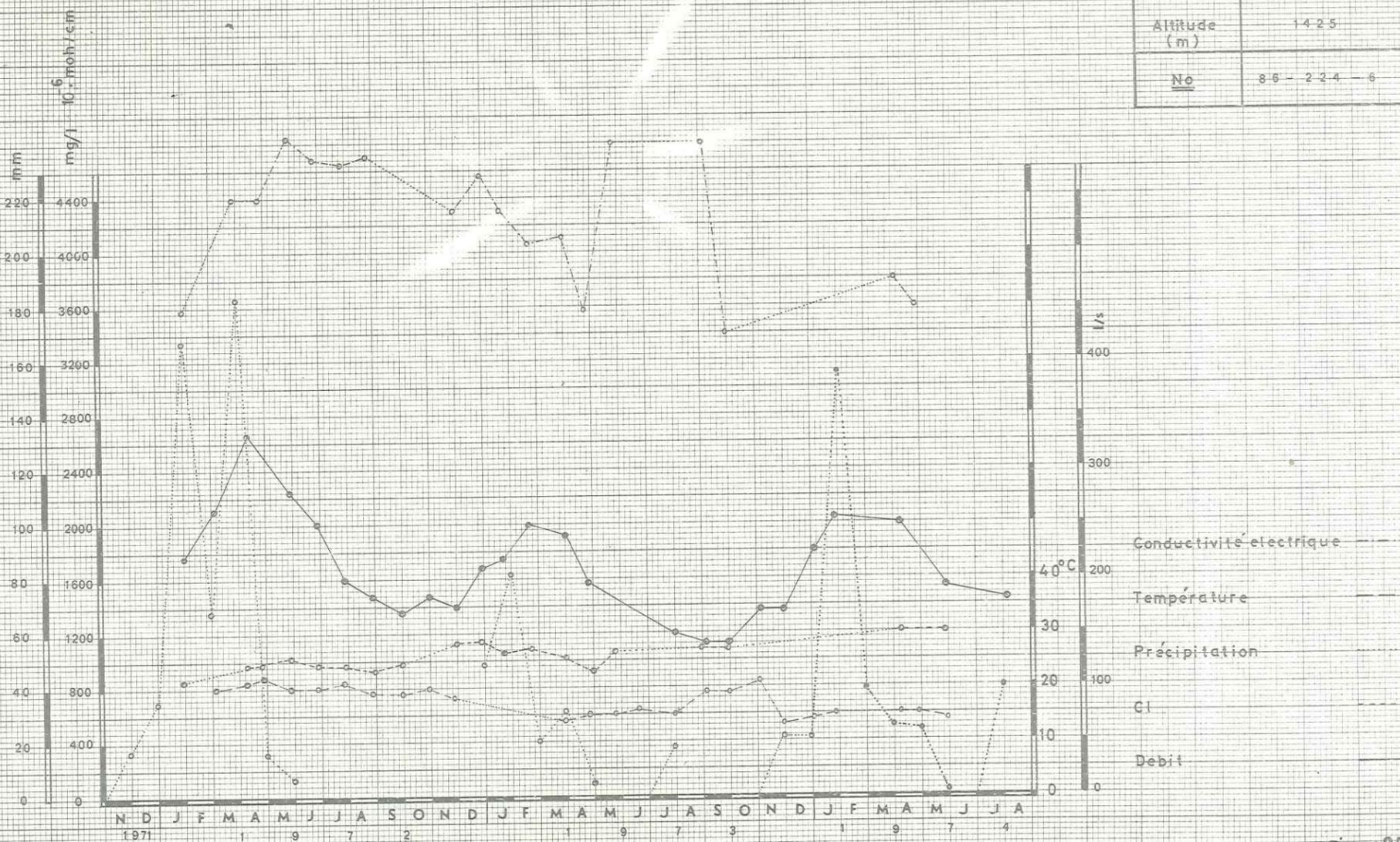


Fig n°25

Entre la température de l'eau en hiver et en été, il y a 5° C de différence, mais pour la source Kaftarak, à cause de la circulation dans la galerie souterraine et pour la source de Babounak, à cause de la situation de l'émergence dans un marécage, cette différence est de 9° C.

3.2.5. - Les montagnes Bamu et Beiyza

La surface de ces montagnes est de 220 km<sup>2</sup> (partie du bassin du Moharlu). Sur la montagne Bamu, il n'y a pas de sources considérables. Les eaux des calcaires du Bamu alimentent la nappe alluviale (particulièrement la plaine de Badjgah).

Sur la montagne de Beiyza, il n'y a pas aussi, de sources considérables dans le bassin du Moharlu, mais de l'autre côté de cette montagne, dans le bassin de Bakhtegan, il y a des sources très importantes.

Ces sources sont à la bordure nord de la montagne Beiyza.

a. - Source Sarab-Hossein abad

Le débit de cette source est considérable (entre 830 et 2 200 l/s). La conductivité est de 360 micromhos due à la présence de 14 mg/Cl<sup>-</sup>, 26 mg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et 84 mg HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. La cote de l'émergence de cette source est de 1 630 m.

b. - Source Gareh-djivé

Le débit de cette source varie entre 200 et 280 l/s. La qualité des eaux est très bonne. La conductivité est de 360 micromhos, (Cl = 10 mg, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = 19 mg, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 92 mg). La cote de l'émergence de cette source est de 1 635 m.

c. - Source Malusdjan

Le débit de cette source varie entre 800 et 960 l/s. La cote de l'émergence de Malusdjan est de 1 620 m. La conductivité est de 530 micromhos (Cl<sup>-</sup> = 14 mg, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 92 mg, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = 90 mg). La quantité de sulfates de cette source est un peu plus forte que celle des autres sources qui sont dans cette zone, par suite de la proximité de la formation Satchun.

On peut comparer ces sources à la source Djuchak, au Sud de la montagne de Beiyza.

Il est probable que les quatre sources de cette région ont une même origine, car leurs compositions chimiques sont assez comparables, et l'augmentation des débits pour les sources Sarab et Djuchak se produit en même temps, après une période de précipitation intense (238 mm) au mois d'avril.

3.2.6. - La montagne Ghasr-ghomcheh

Au pied de cette montagne, il y a une source très importante dont le débit ajouté à celui des ghanates qui sont dans cette zone varie de 850 à 1 600 l/s.

On peut penser que le débit de cette source est à peu près de 500 l/s. La surface de cette montagne est de 7 km<sup>2</sup>. Le débit annuel est donc quatre fois plus élevé que celui fourni par les seules précipitations. Cette montagne est donc alimentée par des ressources provenant du flanc nord du synclinal constitué par les calcaires Asmari dont elle constitue le flanc sud et en particulier du secteur de Beiyza qui se trouve à une cote très supérieure à celle de Ghasr-ghomcheh et de la source.

On note qu'après de cette source et derrière la montagne Ghasr-ghomcheh, il y a un grand ravin qui peut alimenter la source, qui peut aussi recevoir des apports par une faille située au Sud de cette montagne.

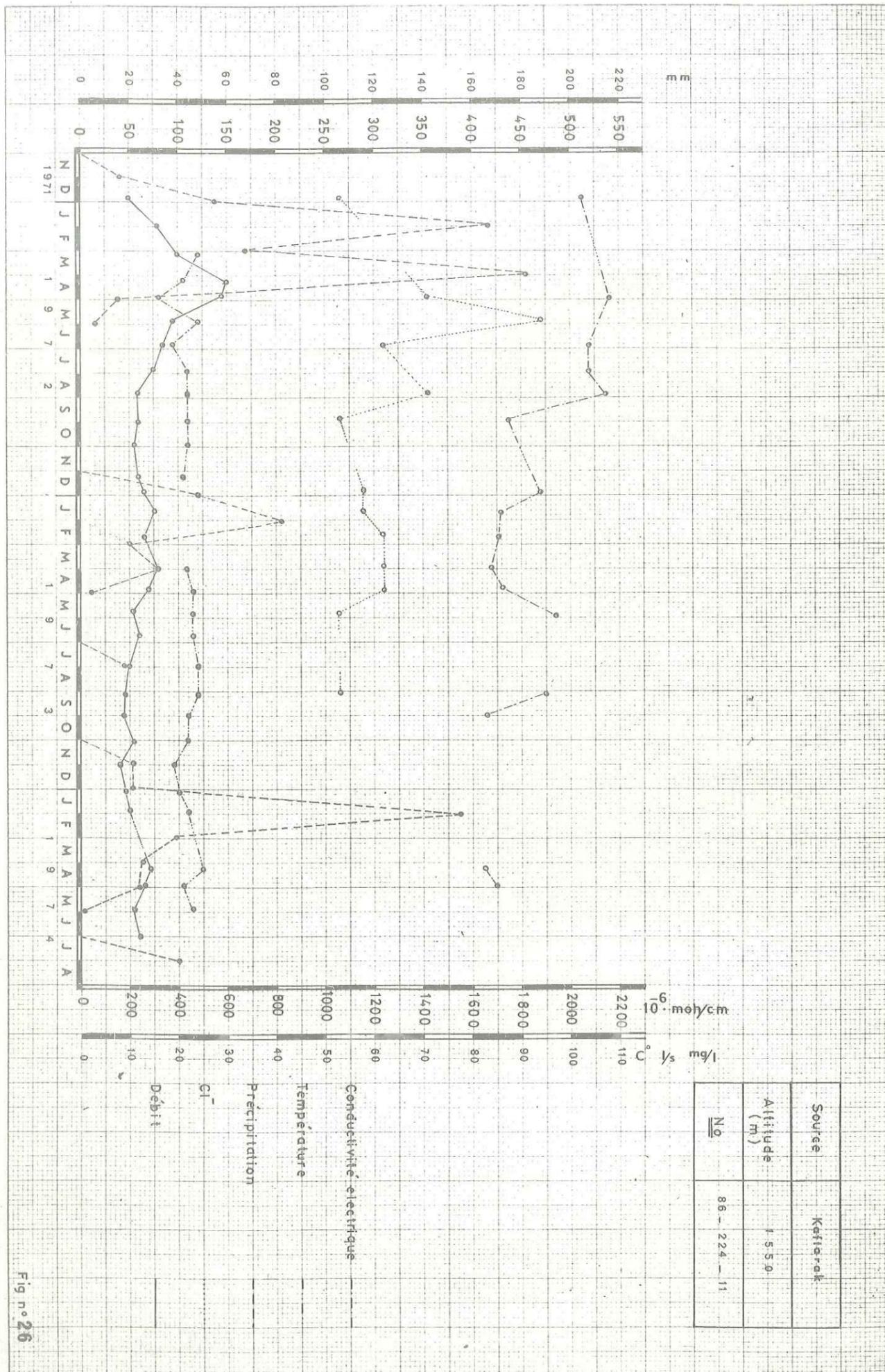


Fig n° 26



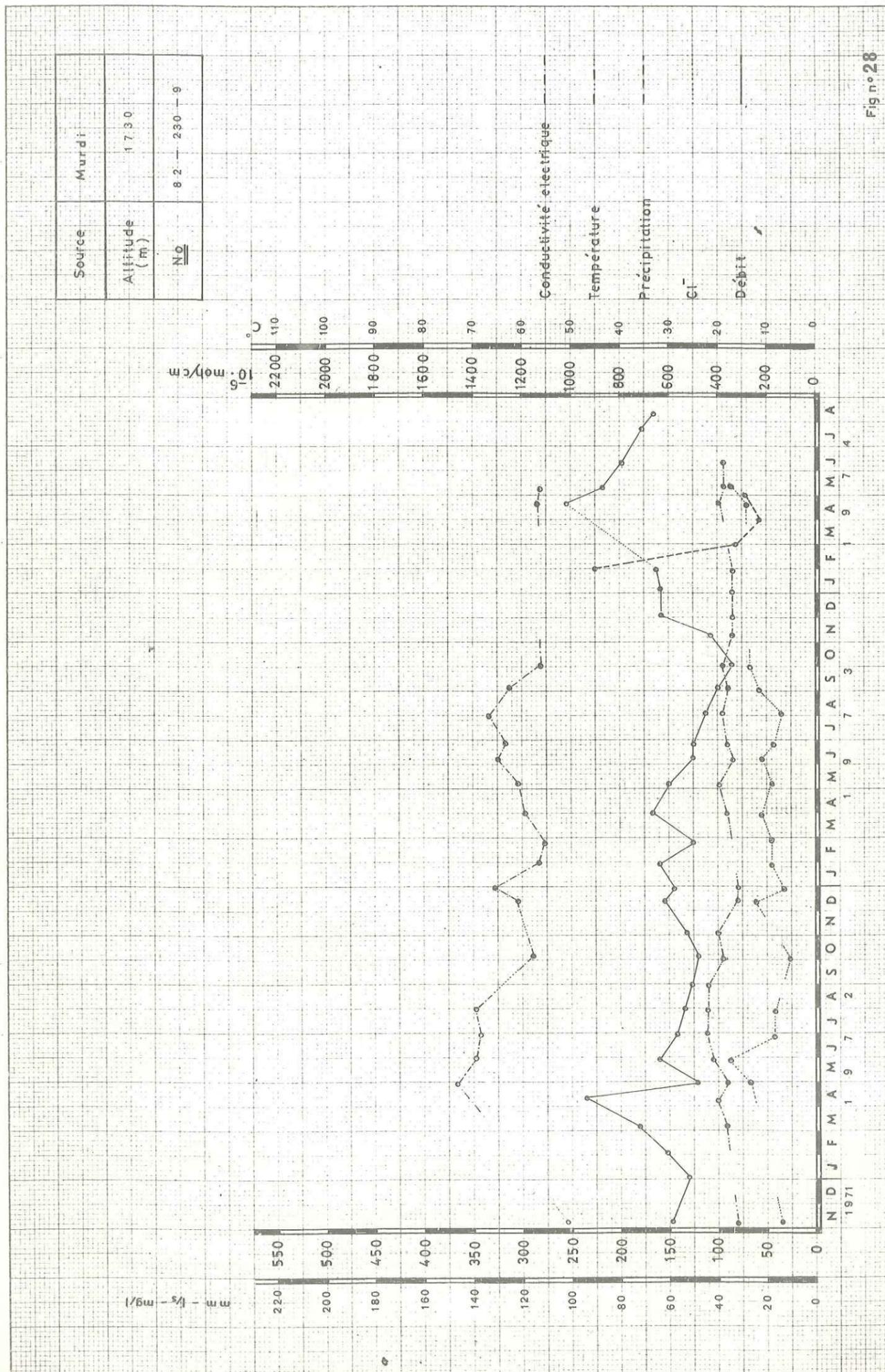


Fig. n° 28

3.2.8. - Anticlinal de Siyah-Kuh

A cause d'une faille qui affecte la partie sud ouest de cet anticlinal, et de la présence de deux dômes de sel, on peut dire que la moitié de cet anticlinal est effondrée sous les alluvions (voir la carte géologie et coupe n° 8), et cet anticlinal se comporte comme un horst.

Les pendages des couches du flanc subsistant de l'anticlinal sont vers le Nord Est. Du fait de ces pendages, on a trois sources au Nord de la montagne : Mourdi, Sarvestan (ghomp), Abtchenar.

a. - Source de Mourdi

Elle émerge des calcaires 'Asmari. Le débit de cette source varie entre 50 et 100 l/s. La cote de l'émergence est de 1 730 m. L'eau de Mourdi est riche en sulfates (540 mg/l).

b. - Source de Sarvestan (ghomp)

Elle émerge des calcaires du Crétacé supérieur (Tarbur) au contact des marnes et gypses du Paléocène (Satchun). Le débit de cette source varie entre 30 et 180 l/s. La cote de l'émergence est de 1 580 m. La qualité chimique de l'eau est la suivante: 197 mg de SO<sub>4</sub><sup>-</sup>; 120 mg de Cl<sup>-</sup>.

c. - Source d'Abtchenar

Cette source est près de la limite E du bassin du Moharlu, près d'un café. Elle émerge des calcaires Djahrom (Eocène). Le débit de cette source n'est pas considérable (4 - 20 l/s). La quantité de sulfates est de 430 mg. La cote de l'émergence est de 1 750 m.

La surface de cet anticlinal est de 100 km<sup>2</sup>, les précipitations annuelles sont de 400 mm. Le débit annuel de ces sources est de 7,5 millions de m<sup>3</sup>.

On voit donc que 18,75 % des précipitations s'infiltrent dans les calcaires, c'est-à-dire 75 mm de l'eau précipitée et le débit spécifique de ce calcaire est de 2.36 l/s/km<sup>2</sup>.

On ne compte toujours pas le facteur alimentation des alluvions.

A la partie SW de cette montagne, on a des eaux très sulfatées et riches en Cl<sup>-</sup>. On pense que ce phénomène est dû à l'existence de dômes de sel et de la faille.

d. - Conclusion

La crue de débit de ces sources se situe au printemps et la décrue à l'automne. On a aussi un étiage en hiver pour les sources de Sarvestan et Mourdi qui est dû à ce que les précipitations se font sous forme de neige.

Il y a une forte relation entre les précipitations et les débits de ces sources avec un décalage de deux mois entre les précipitations et l'augmentation des débits

Pour les autres sources du bassin du Moharlu, cette relation n'est pas définie comme pour les sources de Siyah-Kuh.

Ces sources sont riches en SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, en raison de la proximité des sédiments paléocènes et miocènes qui sont des marnes et des gypses.

Les sources Mourdi et Abtchenar sont pauvres en Cl<sup>-</sup>, mais la source Sarvestan, à cause de la proximité d'une faille entre deux dômes de sel, contient 120 mg de Cl<sup>-</sup> (pour les autres sources, la teneur en Cl<sup>-</sup> est entre 7 et 10 mg).

Source	Ghomp Sarvestan
Altitude (m)	1 5 8 0
No	8 2 - 2 3 0 - 8

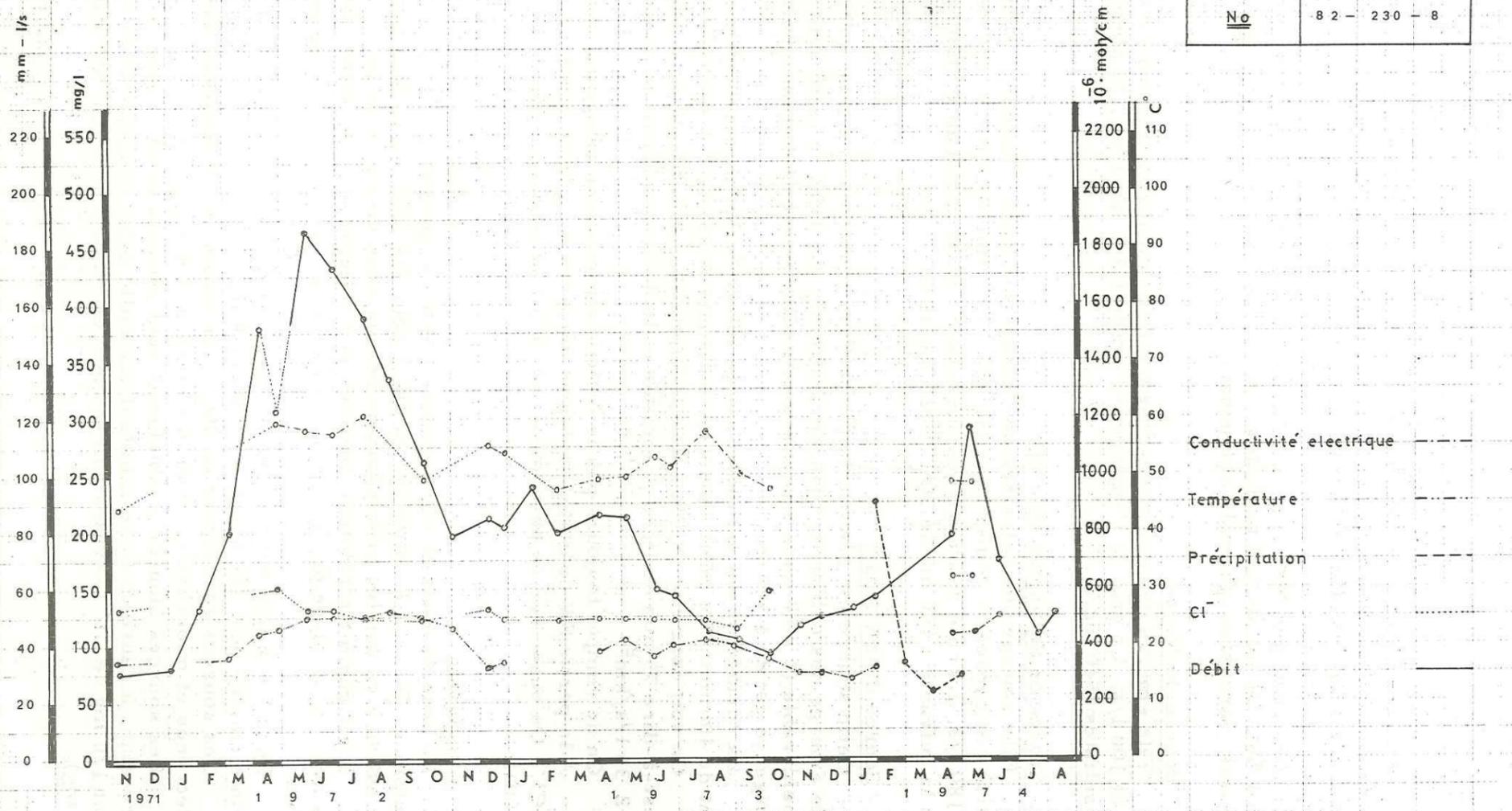


Fig n°29

Source	Ab tchenar
Altitude (m)	1 7 5 0
No	8 2 - 2 3 0 - 1 0

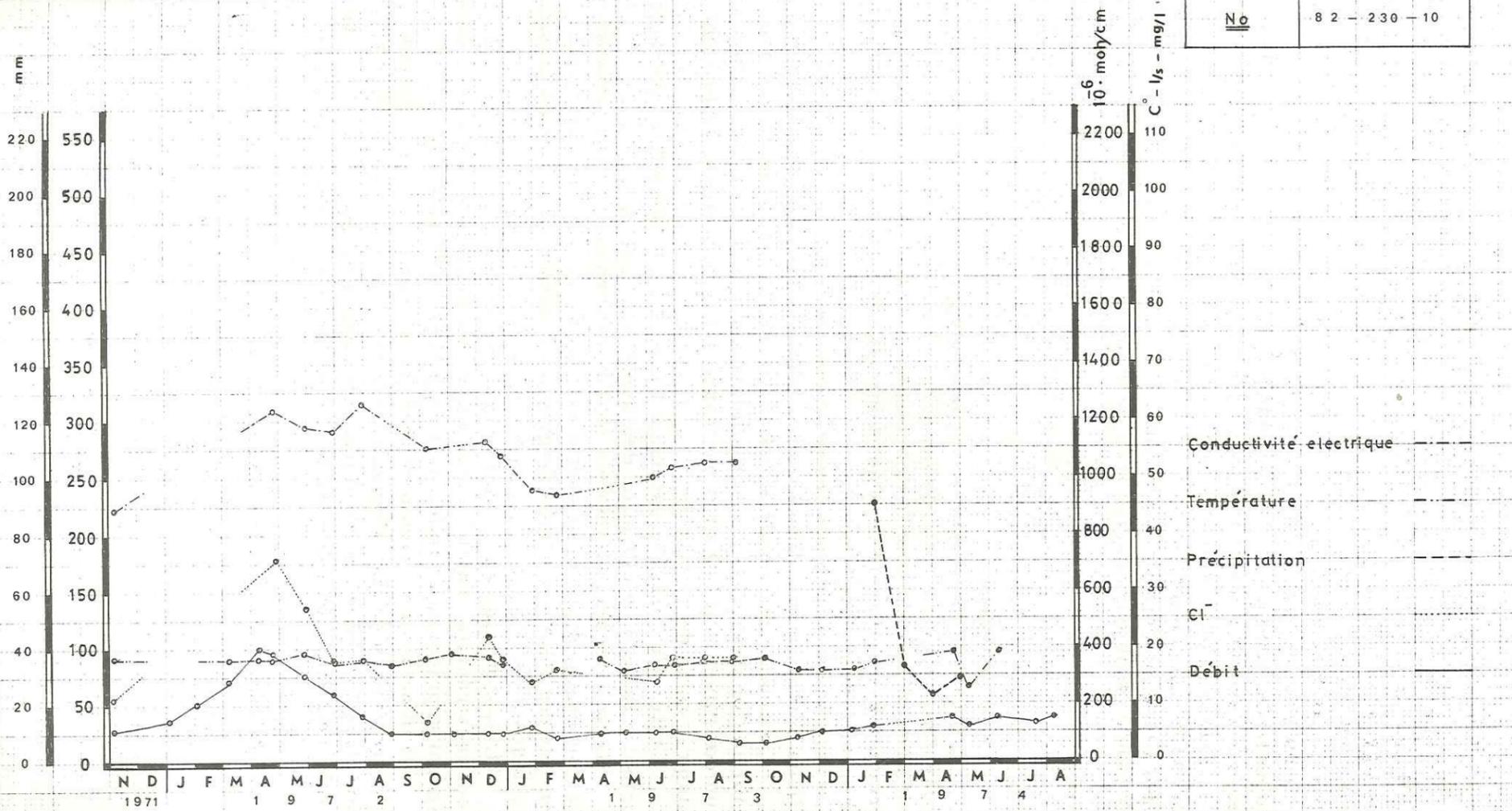


Fig n° 30

### 3.2.9. - Kuh-Ghalat (montagne)

Elle est située au Nord Ouest de la ville de Chiraz. Cette montagne est constituée de conglomérats pliocènes. Par suite de l'érosion des sédiments marines et gypses qui étaient autour des conglomérats, on a un synclinal perché. Dans cette montagne, on trouve plus de huit sources, mais toutes ne sont pas des sources réelles, car lorsque l'on monte le plus haut possible (la source de Mur Ghalat), on ne trouve pas toujours l'emplacement de l'émergence véritable. On peut dire qu'il s'agit en fait parfois de ruissellements superficiels provenant de la fonte de la neige qui recouvre cette montagne dont l'altitude est d'environ 3 000 m.

Dans ces formations pliocènes, il existe une série de sources (Gurouk), qui sortent des conglomérats au contact des sédiments du Miocène supérieur et ces sources se comportent comme des sources karstiques, car on voit de véritables chenaux de plusieurs décimètres de diamètre en de nombreux points.

### 3.3. - CONCLUSION

L'étude du comportement hydrogéologique des massifs et des sources fait apparaître l'importance considérable de la fracturation et de la fissuration des calcaires de la formation Asmari-Djahrom, dans la localisation et la répartition des circulations souterraines et des sources sur la bordure des plaines de comblement du bassin versant du Moharlu.

L'examen des débits des diverses sources conduit à montrer que le débit spécifique des massifs calcaires de la région de Chiraz se situe entre 2 et 5 l/s/km<sup>2</sup>.

Ce débit, très important pour une région semi-aride, puisqu'il est voisin de celui que l'on observe dans de nombreuses régions à climat tempéré, correspond à un coefficient d'infiltration par rapport aux précipitations lui-même très élevé puisqu'il varie de 13 % à 35 %.

Cette valeur élevée est due à l'absence de sol et de couverture végétale mais surtout à l'état de dislocation des massifs calcaires.

Le caractère anticlinal de chacun des massifs est responsable de la distension des couches constituant la partie externe de la voûte qui se traduit par une fissuration intense que la présence de grandes fractures et de leurs très nombreuses diaclases satellites vient encore renforcer.

L'évapotranspiration après infiltration dans les massifs calcaires est également très réduite, car les eaux y sont stockées assez loin de la zone superficielle gagnant rapidement, semble-t-il, des zones profondes.

Il importe donc de déterminer les caractéristiques d'ensemble des massifs calcaires: "perméabilité équivalente", transmissivité et coefficient d'emmagasinement dans la mesure où l'influence des nappes des alluvions dont nous avons vu l'influence sur la qualité chimique des eaux ne sera pas trop importante.

## QUATRIEME CHAPITRE -

### LES SONDAGES D'EXPLORATION SUR LES CALCAIRES DU BASSIN VERSANT ET LES ESSAIS DE POMPAGE



Photo n° 11 - Essai de débit sur le puits n° 3 en bordure de la montagne de Darak, dans les calcaires Asmari-Djahrom -

CHAPITRE 4

LES SONDAGES D'EXPLORATION SUR LES CALCAIRES DU BASSIN VERSANT  
ET LES ESSAIS DE POMPAGE

Sur le bassin versant du lac du Moharlu, on a fait neuf forages d'exploration, et sur six sondages on a fait les essais de pompage (tableau n° 12).

4.1. - LES FORAGES SUR LES CALCAIRES

4.1.1 - Puits n° 1

4.1.1.1. - Ouvrages de sondage

Ce puits est situé au flanc sud de la montagne de Baba-Kuhi, sur un repli secondaire des calcaires Asmari-Djahrom (Eocène, Oligocène).

Ce forage constitue une première expérience sur les calcaires de cette région et on peut dire que ce puits est mal placé.

Les travaux de sondage commencés le 15-1-72 ont été terminés au 27-2-72 à la profondeur de 240 mètres.

Diamètre de sondage : 6 m en 22", 144 m en 16", 90 m en 6".

Diamètre de tubage : 85,5 m en 12" non crépiné, 64,5 m en 12" crépiné.

Contact de l'eau:85 m;après le sondage;81:m (fig. 31).

4.1.1.2 - Les essais de pompage (10-6-72)

Le niveau statique étant à 79 m, on a nettoyé pendant 44 heures avec le débit maximum de 162 m<sup>3</sup>/h, le rabattement obtenu était de 17 m, soit un débit spécifique de 10 m<sup>3</sup>/h/m.

Au bout de 44 heures, on a arrêté le pompage pour étudier la remontée. Après 24 heures, on avait le niveau 79,05 m. Puis, on a refait l'essai et le débit maximum était de 162 m<sup>3</sup>/h.

En raison de l'inclinaison du tubage, la mesure du rabattement s'est avérée impossible.

4.1.1.3 - Mesures géophysiques

Les mesures de polarisation spontanée et de résistivités réalisées dans le forage ne font ressortir que quelques pics dus à des interbancs plus marneux ou au contraire plus ouverts (fig. 31).

Numéro du puits	Date		Profondeur (m)	Altitude (m)	Surface de l'eau (m)			Hydrochimie						Pompage			Carottage	Manière du sondage	Formation	Observations
	Debut	Fin			Contact de l'eau	Statique	Dynamique	Conductivité	Cl mg/l	odh	PH	Température	Debit l/s	Rabattement	Pompe	Temps (h)				
1	2220 - 870	15.1.72 - 27.2.72	240	1560	85	79	96	807	42	300	7.2	22	42	17	8"	110	Jd			
2	2220 - 870	10.6.72 - 4.7.72	150	1587	31	30.25	31.36	731	64	300	7.9	21	128	1.11	8"	110	Jd			
3	2220 - 870	22.7.72 - 6.8.72	150	1589	35	34.75	41.09	608	32	270	6.9	20	128	6.34	8"	109	Jd			
4	2220 - 870	6.7.72 - 2.8.72	150	1598	42.5	42.96	44.21	376	11	175	6.8	20	112	1.25	8"	111	Jd			
5	2230 - 870	7.8.72 - 22.8.72	150	1535	51	48	48.83	954	53	395	6.8	22.5	125	0.83	8"	98	Jd			
6	2300 - 840	13.8.72 - 13.9.72	217	1593	5220	38.18	48.18	1650	53	740	6.4	20	110	10	8"	72	Jd			

Tableau n° 12

4.1.2. - Puits n° 2

Ce sondage est situé à l'Ouest de Chiraz, sur l'anticlinal de Darak.

4.1.2.1 - Les travaux de sondage ont été réalisés entre le 10-6-72 et le 4-7-72

La profondeur totale est de 150 mètres.

Diamètre du sondage : 8,5 m en 20" ; 57,5 m en 16" ; 14 m en 14" ; 70 m en 12".

Diamètre du tubage : 31 m en 14" non crépiné ; 35 m en 14" crépiné.  
Contact de l'eau 31 m. La cote de ce forage est 1 589,191 m.

4.1.2.2. - Les essais de pompage (5-7-72)

Le niveau de l'eau avant pompage était à 29,87 m, la pompe était placée à 63 mètres.

Développement et nettoyage

On a fait 30 heures de pompage pour nettoyer le forage, et après 18 heures on a eu de l'eau claire.

Après le développement du forage, on a arrêté le pompage pendant 36 heures et le niveau de l'eau est arrivé à 30,06 m. Puis on a fait l'essai de rabattement à 8 heures du matin le 8-7-72, avec le débit à peu près constant de 341 m<sup>3</sup>/h. On a continué 48 heures, et on a obtenu 1,15 m de rabattement. Le niveau dynamique est alors de 31,21 m.

Dans ce forage, le rabattement se poursuit de façon graduelle et on peut dire qu'au bout de 48 heures de pompage on n'a pas atteint la stabilisation.

Essai de remontée

Après 48 heures, le niveau de l'eau arrive à 30,25 m, soit 0,19 m plus bas que le niveau de l'eau avant l'essai de rabattement. La remontée est donc comme le rabattement : lente et graduelle.

Essai de rabattement par paliers

Les résultats sont sur le tableau suivant

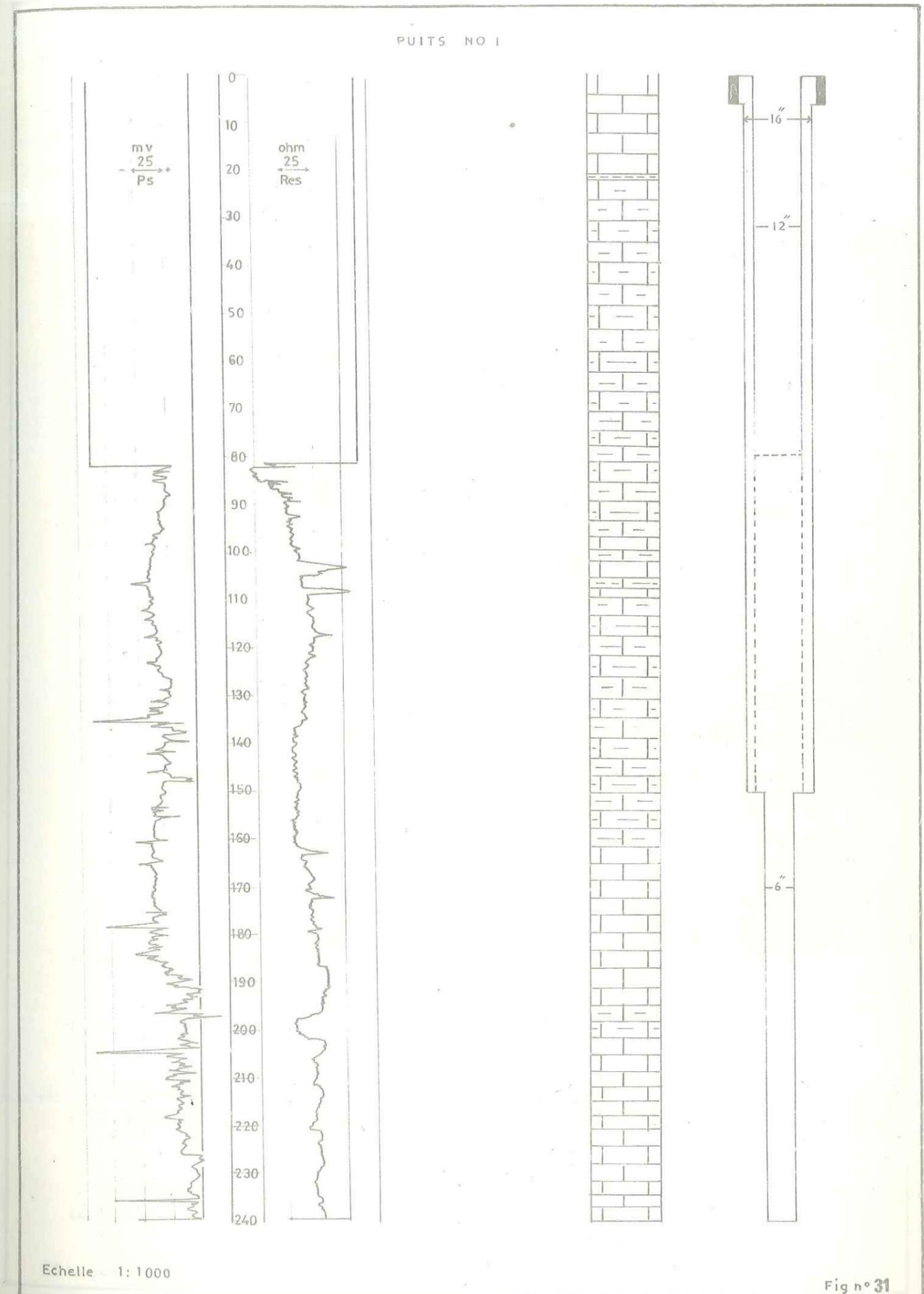
Tableau n° 13

Palier de pompage	Q m <sup>3</sup> /h	N.D (m)	Δ (m)	temps d'essai (min)	R.P.M	conductivité micromhos	débit spécifique m <sup>3</sup> /h/m $\frac{dQ}{d\Delta}$
1re	255	30.77	0.52	180	1000	790	490
2 eme	314	31.00	0.75	300	1150	800	418
3 eme	391	31.17	0.92	180	1300	800	425
4 eme	464	31.36	1.11	180	1450	770	418

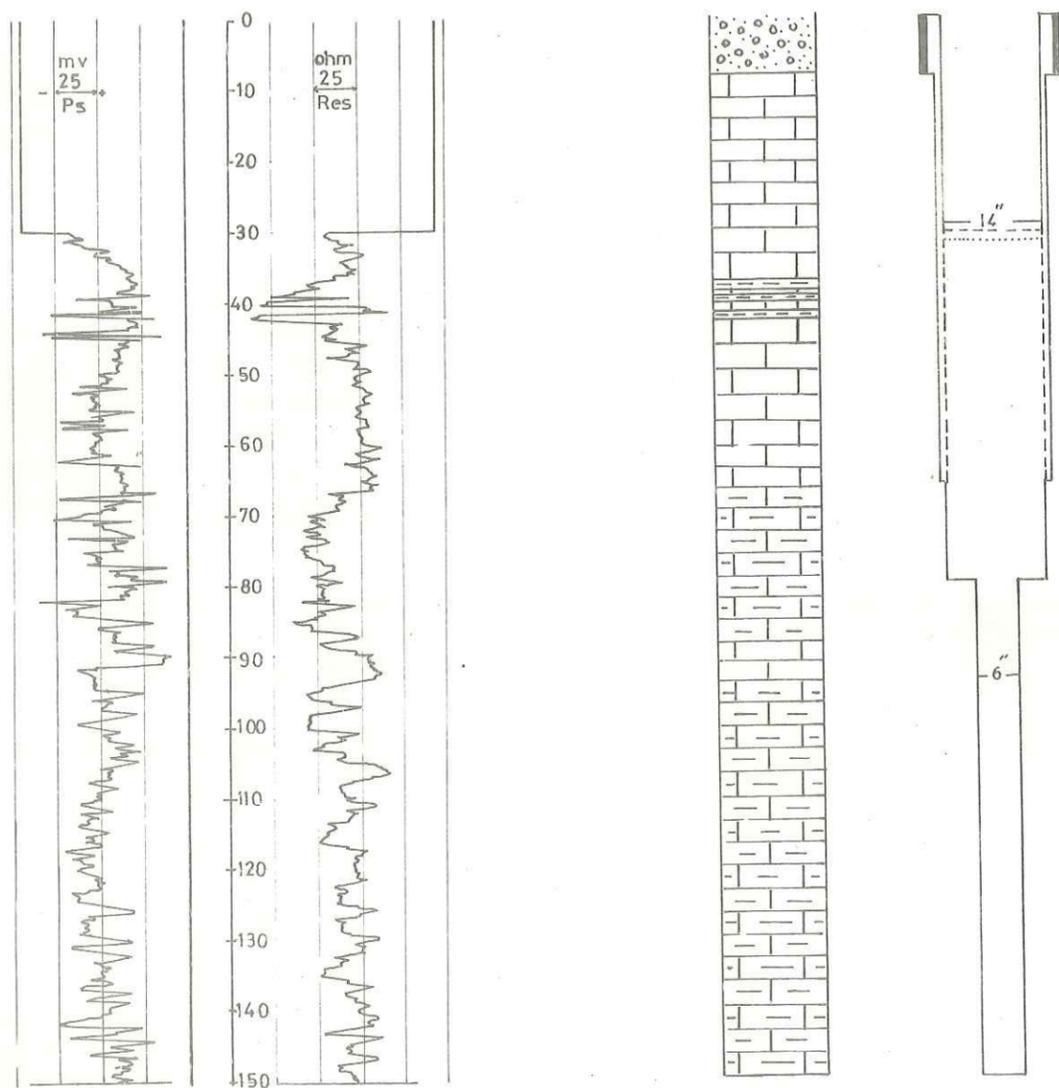
On constate que la qualité chimique de l'eau de pompage a changé un peu, mais le débit spécifique change aussi avec le débit de pompage.

4.1.2.3 - Mesures géophysiques

Les carottages électriques (P. S. et résistivité) font ressortir l'existence d'un horizon plus marneux vers 40 mètres, et de zones fracturées vers 90 mètres, ce qui confirme les observations réalisées lors du carottage mécanique (fig. 32).



PUITS NO 2



Echelle 1:1000

Fig n° 32

#### 4.1.3. - Puits n° 3

Il se situe à 500 m du puits n° 2, sur le bord NE de l'anticlinal de Darak.

4.1.3.1 - Les travaux de sondage ont été faits entre le 22-7-72 et le 6-8-72 jusqu'à 150 mètres.

Diamètre de sondage : 36 m en 20" ; 30 m en 16" et 84 m en 6".

Diamètre du tubage : 23 m en 18" et 35 m en 14" non crépiné ; 31 m en 14" crépiné.

Contact de l'eau : 35 m, après le sondage : 34,5 m

La cote de ce puits est 1 589,668 m

#### 4.1.3.2 - Essai de pompage

- Développement, on a fait 52 heures de pompage pour nettoyer ce puits, avec un débit de 450 m<sup>3</sup>/h, et un rabattement de 6,5 m

#### 4.1.3.3 - Mesures géophysiques

Les résultats enregistrés en polarisation spontanée et résistivité rendent bien compte de l'alternance de calcaires marneux et de calcaires francs entre 115 et 150 mètres, mais ne font malheureusement pas apparaître l'importance de la cavité rencontrée lors du forage à 70 mètres (fig. 33).

#### 4.1.4. - Puits n° 4

Il est aussi sur le flanc NE de l'anticlinal de Darak, à 1000 m du puits n° 3, avec une profondeur de 150 m dans les sédiments éocènes.

#### 4.1.4.1 - Les travaux de sondage ont eu lieu entre le 6-7-72 et le 2-8-72

Diamètre du sondage : 20,5 m en 20" ; 63,5 m en 16" ; 66 m en 6".

Diamètre du tubage : 20,5 m en 18" ; 43 m en 14" non crépiné ; 41 m en 14" crépiné.

Contact de l'eau à 45 m ; après le sondage : 41,68 m. La cote du puits est 1 598,012 m.

#### 4.1.4.2 - Les essais de pompage (5-9-72)

Avant le pompage, le niveau statique était à 42,68 m. On a mis la pompe à la profondeur de 57 mètres.

#### - Développement

Pour nettoyer le forage, on a pompé 54 heures au débit de 400 m<sup>3</sup>/h avec un rabattement de 1,5 mètre.

#### a. - Les essais de pompage simultanés sur les puits n° 3 et n° 4

On a fait cette expérience pour connaître l'influence des deux puits sur le puits n° 2 et un puits dans les alluvions, et aussi l'influence de chaque puits sur l'autre.

#### - Premier essai (rabattement le 12-9-72)

Pompage sur les puits n° 3 et n° 4 et mesure du rabattement sur les trois puits (2, 3, 4).

Tableau n° 14

n° de puits	Q m <sup>3</sup> /h	N.S en m	Δ en m	temps de pompage (h)
3	377	34,33	5,33	48
4	368	42,96	1,25	48
2	0		0,83	0

- Deuxième essai (remontée le 14-9-72)

On a arrêté les pompages des deux puits 3 et 4 pour mesurer la remontée sur les trois puits.

Tableau n° 15

n° de puits	N.D en m	Remontée en m	Durée d'essai (min)	N.S en m	Ecart de 2 niveaux
3	39,66	4,91	2850	34,75	0,42
4	44,21	0,98	2850	43,23	0,27
2		0,625			0,205

- Troisième essai le 16-9-72

Pompage sur le puits n° 3, pour connaître son influence sur les puits n° 2 et n° 4 et un puits situé dans les alluvions à 800 m du puits n° 3.

On a pompé pendant 24 heures et mesuré le rabattement.

Tableau n° 16

n° de puits	Q m <sup>3</sup> /h	Δ en m	T en (h)
3	378	-	24
2	0	0,32	0
4	0	0,18	0
puits d'alluvion	0	0	0

- Quatrième essai le 18-9-72

Influence du pompage dans le puits n° 4 sur le puits n° 2 et n° 3 et un puits dans les alluvions, situé à 450 m.

On a pompé pendant 15 heures au débit de 360 m<sup>3</sup>/h

Tableau n° 17

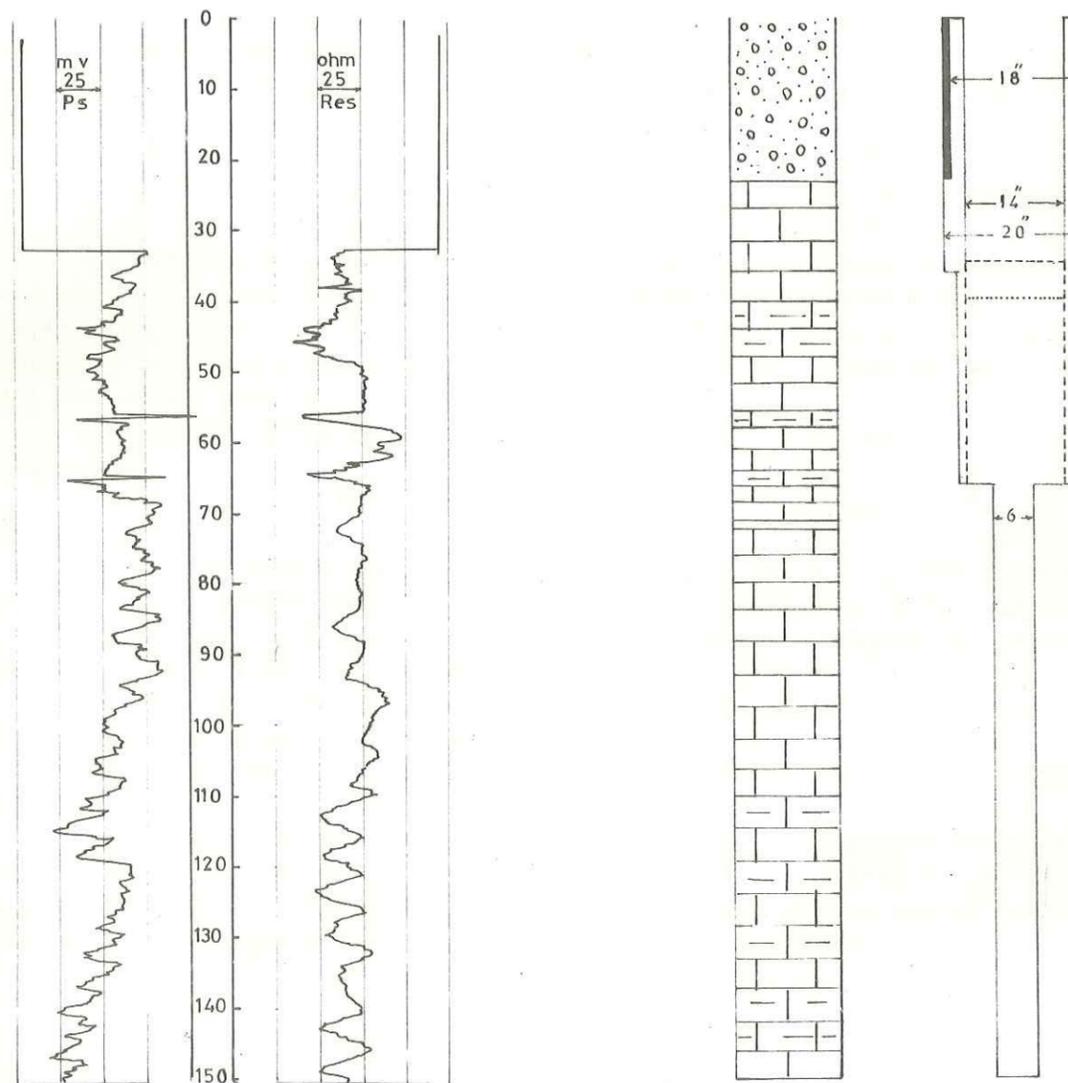
n° de puits	Q m <sup>3</sup> /h	Δ en m	T en (h)
4	360	-	15
3	0	0,11	0
2	0	0	0
puits d'alluvion	0	0,06	0

On a fait aussi des essais de rabattement par paliers pour les puits n° 3 et n° 4

Rabattement du puits n° 3

palier de pompage	débit m <sup>3</sup> /h	N.S (m)	Rabattement (m)	N.D (m)	$\frac{dQ}{d\Delta}$ m <sup>3</sup> /h/m	conductivité	durée de pompage (h)	R.P.M.
1re	177	34,750	1,250	36,000	141	580	4	950
2eme	327	"	3,250	38,000	100	590	3	1100
3 eme	391	"	4,490	39,240	87	600	3	1250
4eme	464	"	6,340	41,090	73	595	3	1450

PUITS NO 3



Rabatement du puits n° 4

Palier de pompage	Débit (m <sup>3</sup> /h)	N. S (m)	Rabatement (m)	N. D (m)	$\frac{dQ}{dH}$ m <sup>3</sup> /h/m	Conductivité	durée de pompage (h)	R.P.M.
1er	200	43.230	0.130	43.360	15.38	420	3	950
2 e	261	"	0.220	43.450	11.80	420	3	1100
3 e	318	"	0.320	43.550	9.93	430	3	1250
4 e	400	"	0.500	43.730	8.00	425	5,1/2	1450

4.1.4.3 - Mesures géophysiques

Les carottages électriques (P.S. et résistivité) font bien ressortir les deux cavités rencontrées à 65 et 80 mètres de profondeur qui se traduisent par des pics très importants mais les cavités rencontrées à 95 et à 145 mètres n'apparaissent pas sur les enregistrements. Il faut noter que l'horizon marneux rencontré à 57 mètres de profondeur donne un pic de résistivité comparable à celui des cavités (fig. 34).

4.1.4.4 - Résultats de pompage sur les puits de la bordure de l'anticlinal de Darak

Le résultat de l'essai de rabattement par paliers pour le puits n° 4 n'est pas satisfaisant, parce que le niveau statique avant le développement de l'ouvrage était de 43,20 m, c'est-à-dire que la remontée du niveau n'était pas complète. Si on compare le niveau atteint durant le pompage au niveau originel, on a un rabattement d'à peu près 1 mètre.

Les débits spécifiques obtenus dans l'essai de rabattement sont donc très imprécis.

Le rabattement et la remontée du niveau de l'eau dans le puits n° 4 sont lents et graduels.

Le rabattement dans le puits n° 3 est supérieur à celui des deux puits : n° 2 et n° 4, bien qu'ils soient situés dans les mêmes calcaires (montagne de Darak) et que la distance entre les puits n° 2 et n° 3 soit de 500 mètres et celle entre les puits n° 3 et n° 4 soit de 1000 mètres.

On peut donc penser qu'à l'emplacement du puits n° 3 il y a une fracture assez importante qui draine les calcaires.

Dans cette zone, il y a un problème intéressant concernant la qualité chimique des eaux.

Les eaux du puits n° 4 sont très bonnes puisque la conductivité est de 420 micromh $\Omega$ s et la teneur en Cl<sup>-</sup> d'environ 10 mg/l, mais les teneurs de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et Cl<sup>-</sup> augmentent vers le puits n° 2. On pense que ce phénomène est dû à l'altitude de ces puits, par rapport au niveau de la nappe des alluvions.

puits n° 2 = 1 587 m ; n° 3 = 1 589 m ; n° 4 = 1 598 m

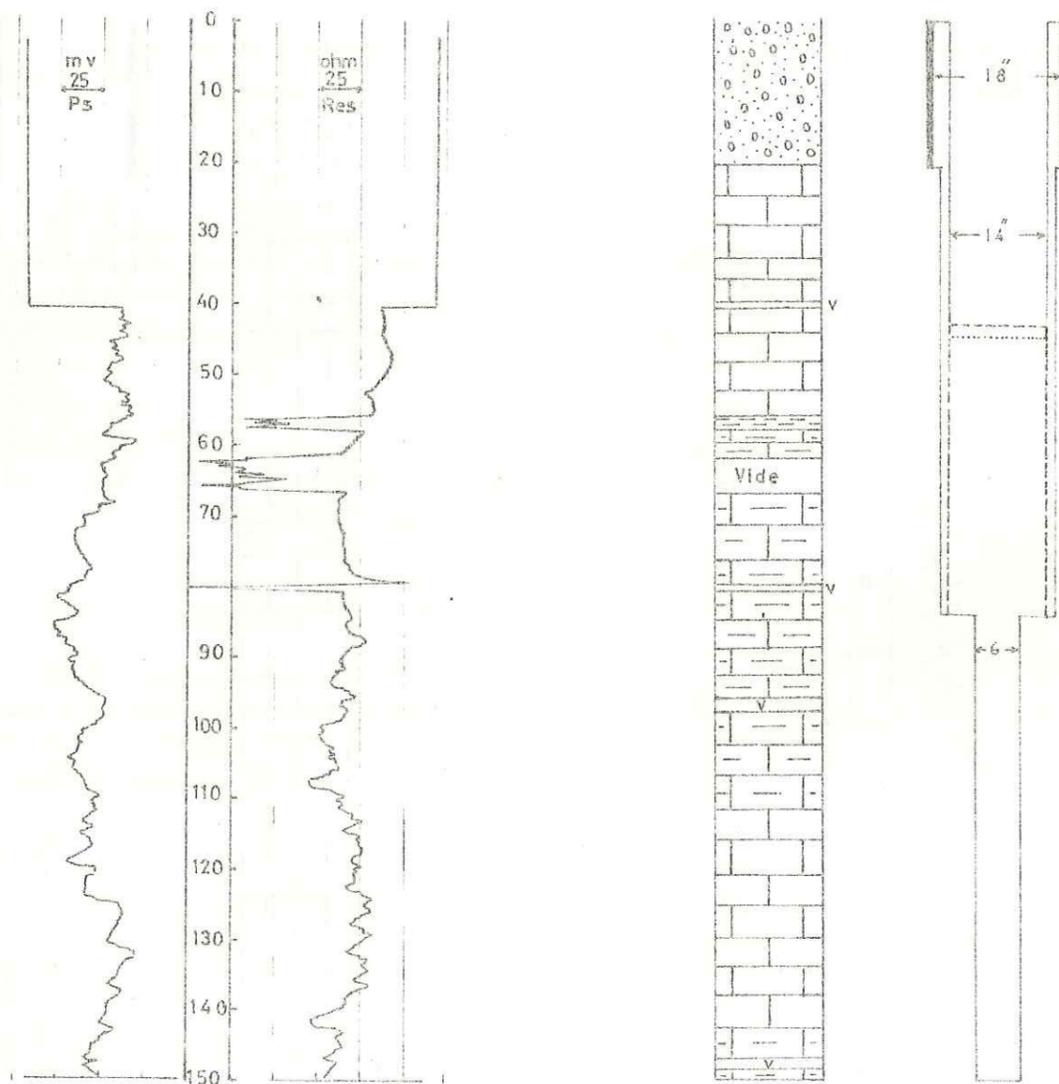
Le puits n° 4 n'est pas sous l'influence de la nappe contenue dans les alluvions, mais le puits n° 3 est un peu sous l'influence de l'eau des alluvions, et le puits n° 2 est entièrement sous l'influence de la nappe des alluvions. C'est en raison de l'existence des sédiments évaporitiques du Miocène que les eaux des alluvions, dans cette zone, sont sulfatées.

4.1.5. - Puits n° 5

Ce puits est situé au flanc S de l'anticlinal de Kaftarak, près du tombeau de Saadi, sur les calcaires éocènes.

Il a une profondeur de 150 mètres.

Puits No 4



Echelle 1:1000

Fig n° 34

4.1.5.1 - Les travaux de sondage

Le forage de ce puits s'est fait entre le 7-8-72 et le 22-8-72.

Diamètre du sondage : 40 m en 20" ; 46 m en 16" ; 64 m en 6".

Diamètre du tubage : 11,5 m en 18" et 53 m en 14" non crépiné ; 33 m en 14" crépiné.

Contact de l'eau : 51 m ; après le sondage, il arrive à 47,5 mètres.

La cote de ce puits est 1 535 m.

4.1.5.2 - Les essais de pompage

Résultat d'essai de nettoyage

Débit (m <sup>3</sup> /h)	N. S (m)	N. D (m)	Δ en m	Durée de pompage (h)
450	48	48,83	0,83	51

Après l'essai de rabattement, on fait un essai de remontée par paliers.

Essai de remontée par paliers pour le puits n° 5

durée de pompage	palier de pompage	Débit <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /h)	N. S (m)	rabattement (m)	N. D (m)	$\frac{dQ}{d\Delta}$ m <sup>3</sup> /h/m	conductivité	remontée	R.P.M.
51	essai de pompage	450	48,000	0,830	48,830	542	880	0	1500
3	1er	396	"	0,750	48,750	528	885	0,080	1300
3	2e	287	"	0,595	48,595	482	890	0,235	1100
2 1/2	3e	220	"	0,460	48,460	478	880	0,370	900
34	4e	0	"	0,050	48,050	-	-	0,780	--

Après la remontée du niveau à 48,05 m, on fait aussi un essai de rabattement et d'influence du pompage sur deux puits dans la nappe alluviale

Tableau n° 21

durée de pompage	Débit m <sup>3</sup> /h	N.S (m)	rabattement (m)	N.D (m)	$\frac{dQ}{d\Delta}$ m <sup>3</sup> /h/m	distance de puits alluvion
32	360	48,05	0,660	47,39	541	-
--	-	--	0,180	--	-	240 m
--	-	--	0,120	--	-	385 m

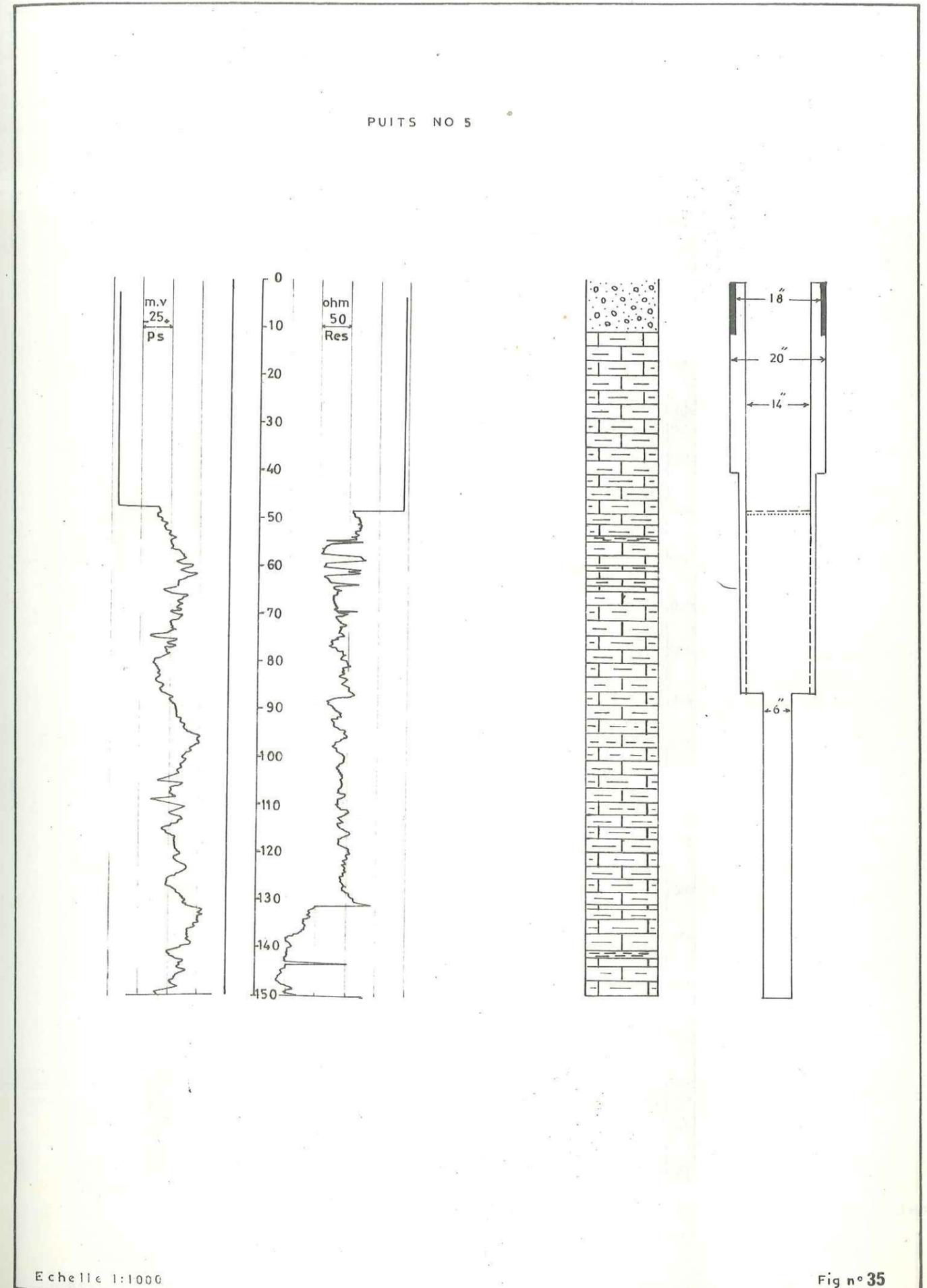
Dans cette zone comme dans l'autre zone, il y a une relation entre la nappe des calcaires et celle des alluvions, à moins qu'il n'y ait, localement, qu'une seule nappe.

4.1.5.3 - Mesures géophysiques

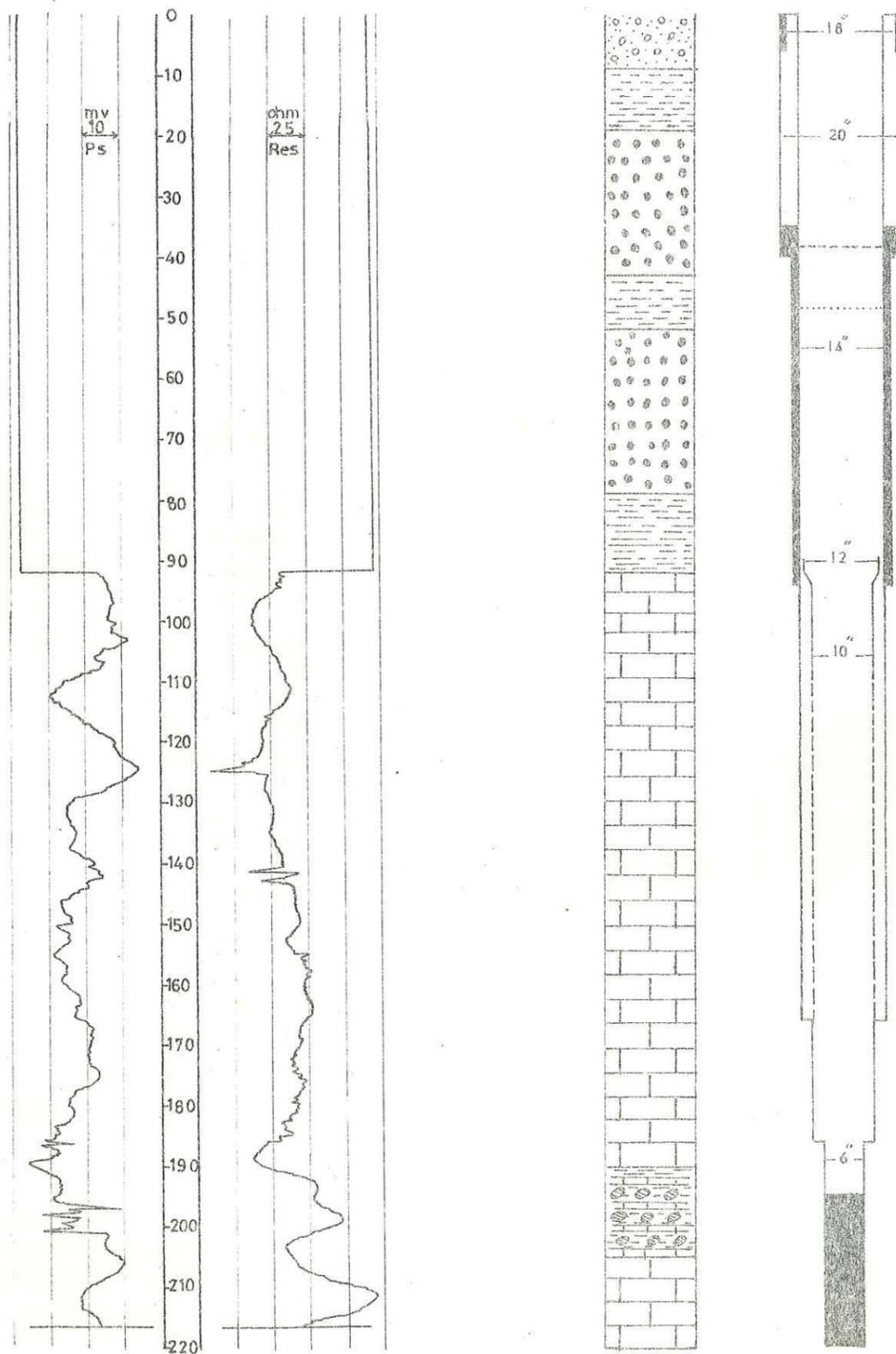
Les variations de la résistivité, observées entre 52 et 65 mètres, traduisent l'alternance de calcaires et de calcaires marneux, tandis que le brutal décalage des résistivités observées à partir de 130 mètres nous paraît dû ici à un changement net de la qualité chimique des eaux de la nappe, du fait d'une plus grande abondance des ions sulfates (fig. 35).

4.1.6. - Puits n° 6

Il est situé à l'Est de la ville de Sarvestan, au flanc sud de l'anticlinal de Khoda. La profondeur totale de ce puits était de 217 m, mais à cause de la qualité



PUITS NO 6



Echelle 1:1000

Fig n°36

chimique de l'eau on l'a rempli sur 22 mètres. La cote de ce puits est 1 592,9 m.

#### 4.1.6.1 - Les travaux de sondage

Le sondage de ce puits a commencé le 13-8-72. Après 18 mètres d'éboulis et de marnes on a trouvé un conglomérat siliceux, très dur. Jusqu'à 94 mètres on a eu une alternance de conglomérats et de marnes. Le contact de l'eau était à 52 m.

A cause de la mauvaise qualité chimique de l'eau, on a fait une cimentation jusqu'à 94 m, afin de réaliser l'isolement de la nappe supérieure. Après 94 m on est arrivé aux calcaires éocènes et l'eau est remontée jusqu'à 36,95 mètres.

On a continué le sondage jusqu'à 195 m, et à cette profondeur on est arrivé aux marnes calcaires avec silex (formation Satchun). On a poursuivi le sondage jusqu'à 217 m, puis colmaté les 22 m inférieurs du forage pour s'isoler des eaux de la nappe qui sont de mauvaise qualité dans la formation Satchun.

Diamètre du sondage : 40 m en 20" ; 54 m en 16" ; le reste en 14", 10", et 6"  
 Diamètre du tubage : 6 m en 18" et 94 m en 14" ; 16 m en 10" non crépiné ; 56 m en 10" crépiné. L'ouvrage du sondage a été terminé le 13-9-72.

#### 4.1.6.2 - Les essais de pompage

Le niveau de l'eau avant le pompage était 37,165 m, on a fait un essai de rabattement (après le nettoyage du puits) avec le débit de 400 m<sup>3</sup>/h et un rabattement de 10,435 m.

La conductivité de l'eau de pompage était 1 800 micromhos et sa teneur en Cl<sup>-</sup> de 75 mg/l

#### 4.1.6.3 - Mesures géophysiques

Les variations enregistrées de P. S. et de résistivité correspondent à 125 m et à 142 m à des zones de fracturation plus intenses des calcaires Djahrom et celles observées vers 200 mètres en polarisation spontanée marquent la puissance du conglomérat siliceux de la base de l'Eocène (fig. 36).

#### 4.1.7. - Puits n° 7

Il est situé au SE de Sarvestan et on pensait être sur les sédiments de la formation Asmari, mais à cause de l'existence d'une faille déterminant un graben, on était sur les sédiments évaporitiques du Miocène. Après 170 mètres de sondage, on a arrêté les travaux. La cote de ce puits est 1 527,517 mètres.

#### 4.1.7.1 - Mesures géophysiques

Les variations de P. S. et de résistivité les plus importantes sont ici directement déterminées par les variations de la composition chimique des eaux et des terrains encaissants, riches en sulfates et chlorures (fig. 37).

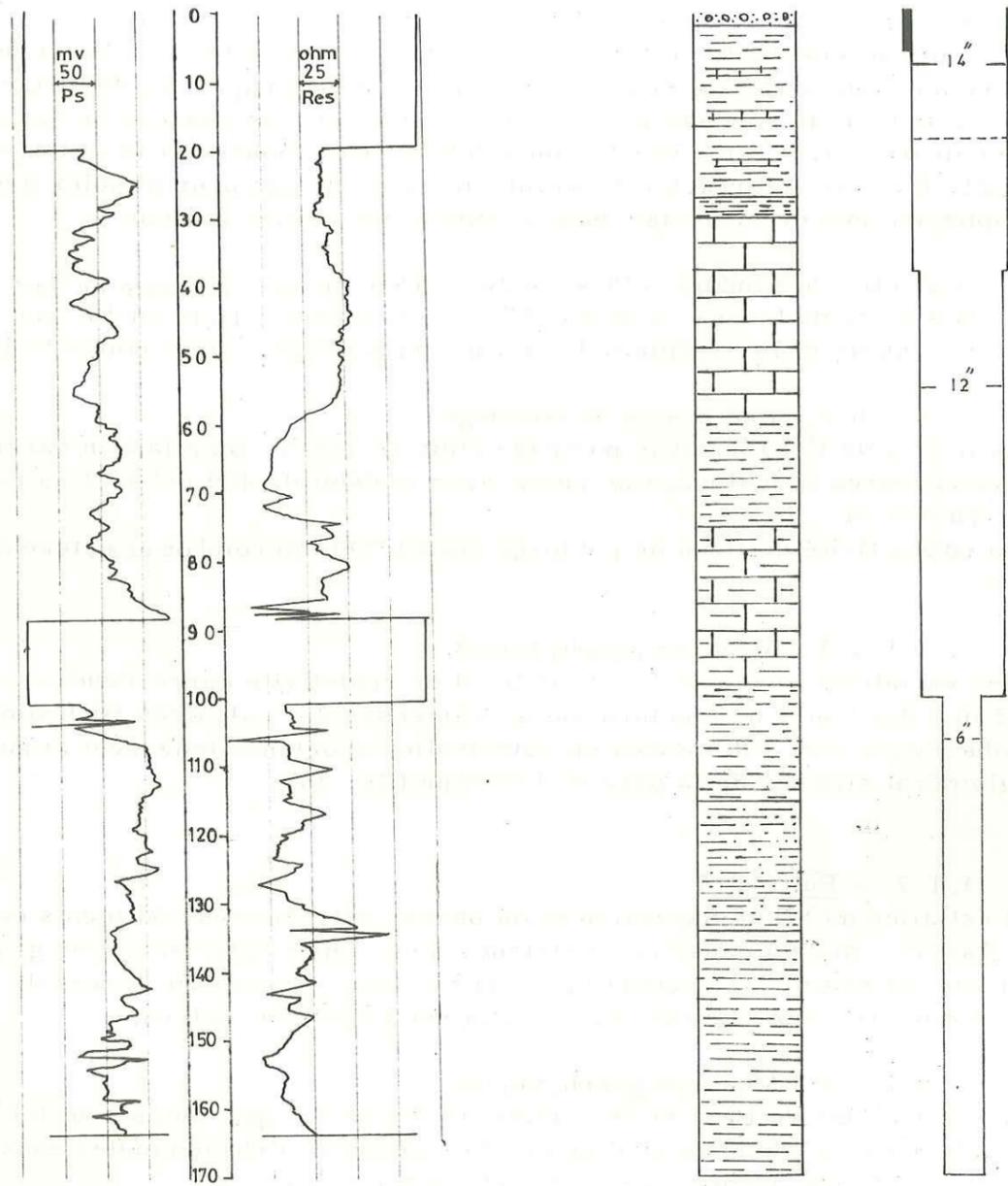
#### 4.1.8. - Puits n° 8

Ce puits est au flanc S de l'anticlinal de Ghareh, sur les calcaires de l'Oligo-Miocène (Asmari).

Les échantillons des calcaires de ce puits sont poreux, mais sans eau. On pense qu'une faille relativement importante a coupé la relation de ces calcaires avec la montagne (voir carte géologique).

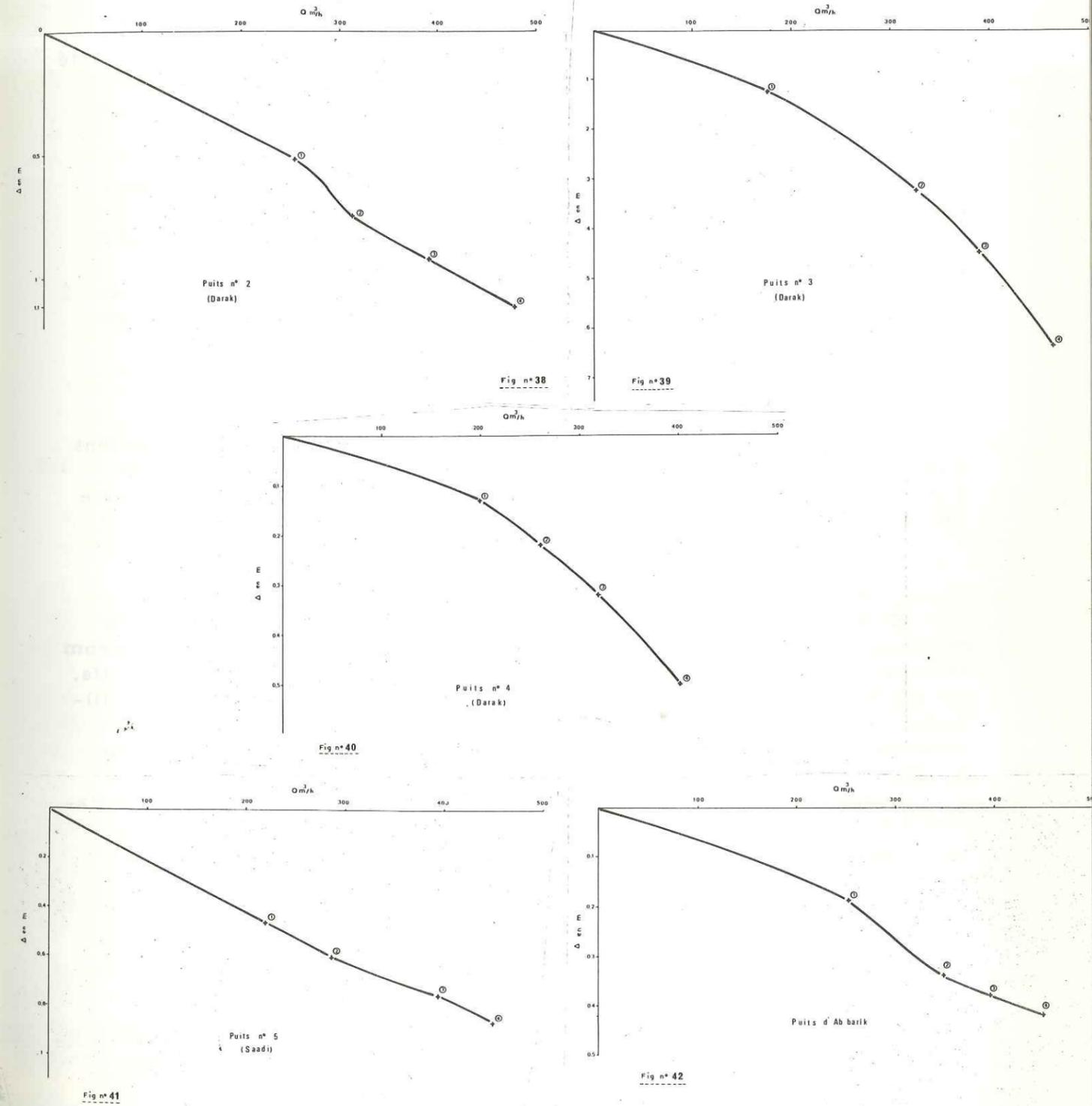
Cette faille joue un rôle de drainage et les alluvions de cette zone sont, elles, aussi pauvres en eau parce que la montagne de Ghareh, à cause de la faille, ne peut pas alimenter la nappe des alluvions.

PUITS NO 7



Echelle 1:1000

Fig n°37



On a fait le forage de ce puits jusqu'à 141 m, mais on n'a trouvé que très peu d'eau.

#### 4.1.9. - Puits n° 9

Ce puits, situé au pied de la montagne de Sabzpuchan, sur son flanc N, étant vraiment mal placé, car implanté sur les marnes du Miocène, on a arrêté le sondage au bout de 40 mètres.

#### 4.1.10. - Puits d'Ab barik

Il est situé sur les calcaires du Crétacé supérieur, au Nord de Chiraz (20 km), près de la raffinerie.

Les résultats des essais de pompage sur ce puits ont été tout à fait différents de ceux des puits qui sont près de la ville de Chiraz.

Le rabattement total de l'eau est obtenu après 30 secondes, à partir du début du pompage et ce rabattement remonte après trois minutes à partir de l'arrêt du pompage.

#### 4.1.10.1 - Mesures géophysiques

Les enregistrements de la polarisation spontanée et de la résistivité font apparaître à 75 et à 86 mètres des pics correspondant à des zones de forte fissuration dans les calcaires Tarbur, ainsi qu'une zone très perméable entre 180 m et le fond de l'ouvrage.

#### 4.1.11. - Conclusion

En raison de l'importance des ressources en eau rencontrées dans les divers puits réalisés à la périphérie des massifs de calcaires Asmari-Djahrom et à leur contact avec les plaines alluviales, on peut affirmer que ces massifs, qui reçoivent d'importantes quantités d'eau et qui ont un fort coefficient d'infiltration, du fait de leur fracturation, alimentent de véritables nappes qui imprègnent la base des massifs eux-mêmes, et surtout leur prolongement sous les plaines.

L'envoyage des structures anticlinales et la fracturation sont très favorables à la constitution de ces nappes dont nous allons étudier les caractères hydrodynamiques.



CHAPITRE 5

DETERMINATION DES CARACTERES HYDRODYNAMIQUES DES  
AQUIFERES KARSTIQUES DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU

5.1. - INTRODUCTION

Pour la détermination des divers paramètres hydrodynamiques des aquifères karstiques de la province du Fars, et en particulier du bassin versant du lac Moharlu, on a d'abord appliqué l'équation d'approximation logarithmique de C. Theis et C. Jacob, 1942 valable pour le régime d'écoulement non permanent à l'aide de plusieurs pompages d'essais dans les aquifères karstiques de la région.

Le problème de la détermination des paramètres hydrodynamiques par des méthodes classiques des pompages d'essais dans les aquifères karstiques, reste cependant toujours difficile à résoudre.

Nous avons ensuite appliqué les méthodes de E. Maillet et Tison pour la détermination des valeurs des coefficients de tarissement et de la capacité d'emmagasinement des aquifères karstiques de la région de Chiraz, grâce aux mesures effectuées pendant trois ans sur onze sources de cette région.

Nous avons utilisé par la suite la méthode de Mijatovic pour la détermination de la transmissivité T et du coefficient d'emmagasinement S qui combine l'équation d'approximation logarithmique de Theis et Jacob pour le régime d'écoulement non permanent et la formule de la courbe de tarissement de Maillet.

Enfin, nous avons essayé de déterminer la "perméabilité équivalente" des calcaires par des mesures statistiques des fissurations et des fracturations dans les différents massifs du bassin versant du lac Moharlu par application de la méthode de L. Kiraly.

Nous avons ainsi étudié six puits dans le bassin du Moharlu et sept puits de la région du Fars.

5.2. - CALCUL DE LA TRANSMISSIVITE (T)

N'ayant pas eu à notre disposition de piézomètres au voisinage des puits, dans les calcaires de cette région, nous avons calculé la transmissivité à partir des courbes de remontée, par la formule d'approximation logarithmique de Theis-Jacob.

$$\Delta = \frac{0,183 Q}{T} \log t/t'$$

T = transmissivité en m<sup>2</sup>/s

Q = débit en m<sup>3</sup>/s

t = le temps écoulé depuis le début du pompage

t' = le temps écoulé depuis l'arrêt

c = le coefficient angulaire de la droite caractéristique ou tgα

Il faut dire que cette formule n'est valable que pour les valeurs de t et t' assez grandes.

Pour calculer T, il faut porter les données du pompage avec en abscisse les logarithmes de t/t', et en ordonnées, pour un seul débit constant, les rabattements résiduels et pour plusieurs régimes de pompage les rabattements spécifiques résiduels Δ/Q.

La valeur de tgα ou c est donnée par l'accroissement du rabattement résiduel Δ dans un cycle logarithmique.

Dans ce cas, log t/t' est égal à 1 et donc nous avons :

$$\frac{0,183 Q}{T} = c = tg\alpha$$

$$\text{ou : } T = \frac{0,183 Q}{c}$$

L'étude de la courbe de remontée ne permet donc pas de définir le coefficient d'emmagasinement (S).

On a calculé la transmissivité également à partir de la droite rabattement - logarithme du temps pour chaque puits dans les calcaires de cette région, lors de la descente du niveau piézométrique pendant un essai de pompage.

5.3. - CALCUL DE T ET INTERPRETATION DES COURBES POUR CHAQUE  
PUITS

5.3.1. - Puits d'Ab barik

Il est situé à 20 km au Nord de Chiraz, au pied de la montagne Barfi, sur les calcaires de la formation Tarbur, Crétacé supérieur, en dehors du bassin du Moharlu.

Le débit de ce puits est intéressant. Pour 125 l/s avec un tube de 8", le rabattement était de 0,42 mètre.

La valeur de T dans ce forage est de 0,935 m<sup>2</sup>/s.

La forme de la courbe de remontée est très intéressante, car elle présente cinq paliers successifs. On peut dire que ces paliers proviennent de changements de faciès des calcaires du point de vue fissuration et porosité, comme le montrent les mesures géophysiques (fig. 44).

On peut ajouter aussi que le rabattement et la remontée totale se faisaient en quelques secondes au début du pompage et tout de suite après son arrêt, et qu'ensuite pour la courbe de rabattement on avait des oscillations du niveau de l'eau (fig. 43) qui peuvent être dues au changement du débit du pompage ou aux mesures. Mais de toute façon, en raison de la valeur de T et de l'apparition du rabattement total, dès le début du pompage, on peut dire que les calcaires de cette zone sont vraiment karstifiés, et on peut supposer que dans ces calcaires il y a des écoulements par des chenaux souterrains.

Calcul de T par la courbe de remontée pour ce puits :

$$T = \frac{0,183 Q}{c}$$

avec :  $Q = 368 \text{ m}^3/\text{h}$   $c = 0,02$

on a :  $T = 0,935 \text{ m}^2/\text{s}$

On obtient donc ici la même valeur de T que celle obtenue par la courbe de rabattement.

5.3.2. - Puits n° 2 (Darak)

Au cours des essais de rabattement de ce puits, on rencontre quatre étapes très nettes avec des valeurs différentes de T (fig. 47).

1° - 3 minutes au début de l'essai avec  $T = 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$   
 $c_1 = 0,035$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$

$T_1 = 0,183 \frac{Q}{c_2}$   
 $T_1 = 0,495 \text{ m}^2/\text{s}$

2° - Jusqu'à 60 minutes, on avait  $T = 0,14 \text{ m}^2/\text{s}$

avec :  $c_2 = 0,125$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $T_2 = 0,138 \text{ m}^2/\text{s}$

3° - Jusqu'à 10 heures, la valeur de T était de  $0,06 \text{ m}^2/\text{s}$

avec :  $c_3 = 0,29$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $T_3 = 0,0597 \text{ m}^2/\text{s}$

4° - Jusqu'à la fin du pompage on avait  $T = 0,028 \text{ m}^2/\text{s}$

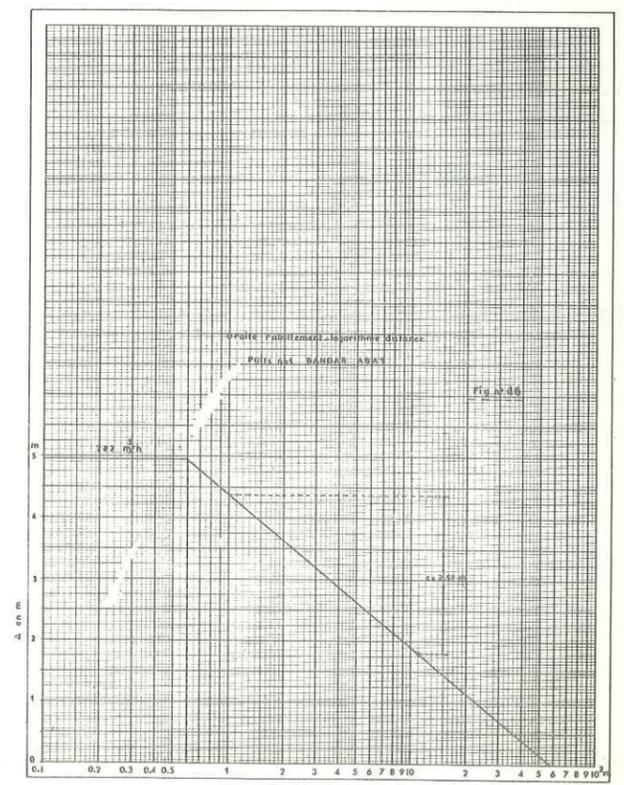
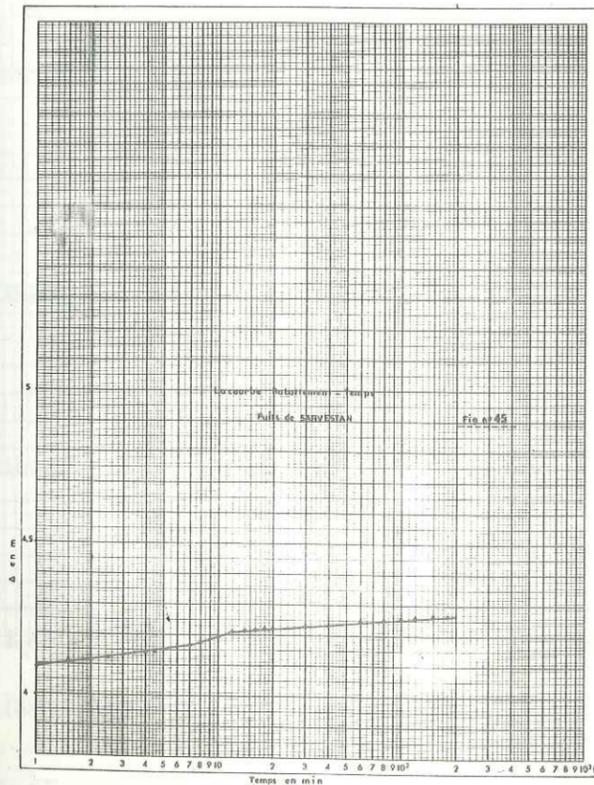
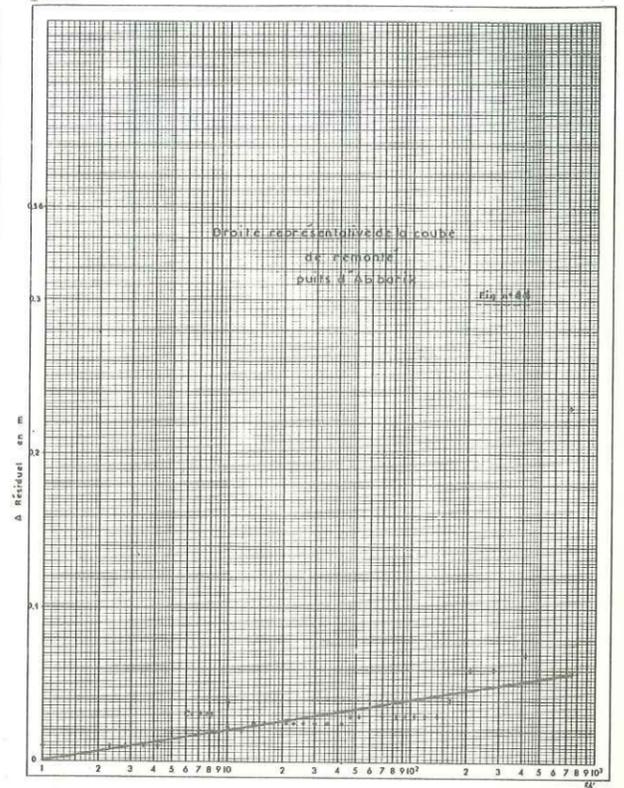
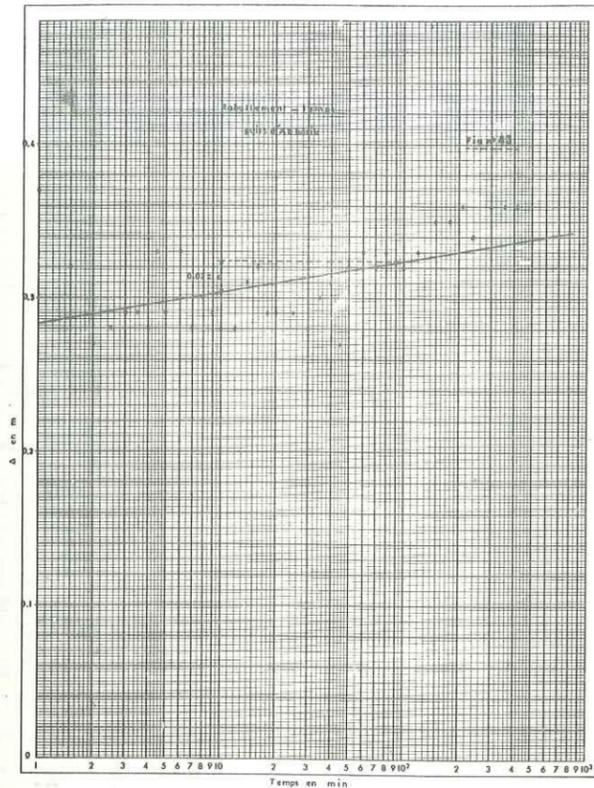
avec :  $c_4 = 0,62$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $T_4 = 0,0279 \text{ m}^2/\text{s}$

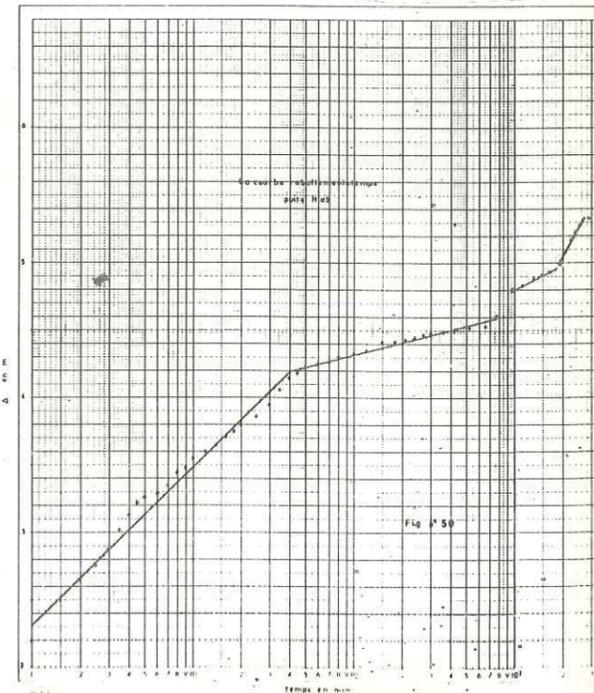
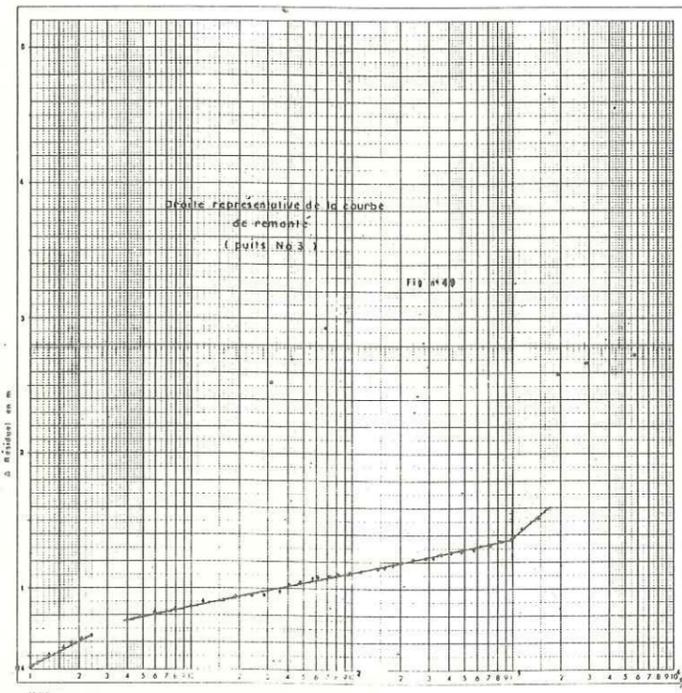
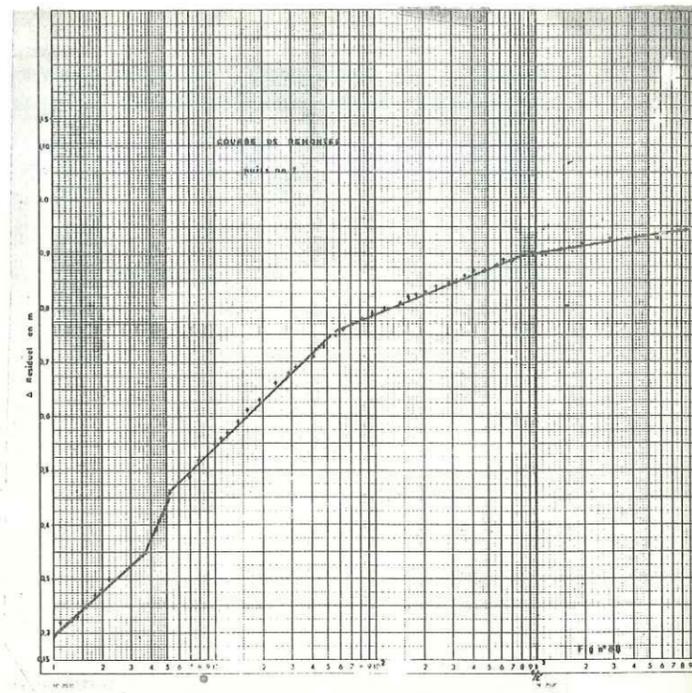
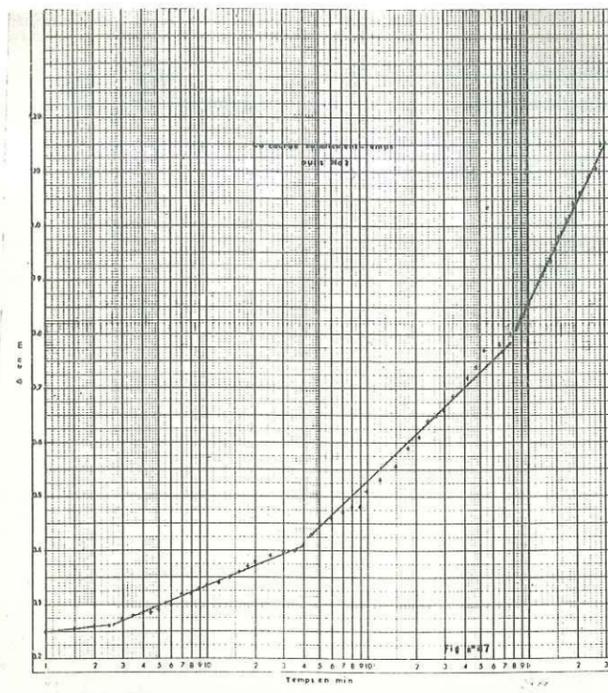
Pour la courbe de remontée, on avait aussi les quatre étapes ci-dessus, mais on rencontre une étape supplémentaire à la fin de la remontée avec une valeur de T comparable à celle de la troisième étape (fig. 48).

Les valeurs de T par la courbe de remontée sont :

Première étape avec :  $c_1 = 0,05$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $T = 0,183 \frac{Q}{c_2}$   
 $T_1 = 0,346 \text{ m}^2/\text{s}$

Deuxième étape avec :  $c_2 = 0,125$   $Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $T_2 = 0,138 \text{ m}^2/\text{s}$





Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,29$$

$$Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,0597 \text{ m}^2/\text{s}$$

Quatrième étape avec :

$$c_4 = 0,65$$

$$Q = 341 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_4 = 0,0266 \text{ m}^2/\text{s}$$

On peut dire que ces changements de T sont dus à la nature anisotrope de la zone aquifère qui alimente ce puits.

On sait en effet que la formation des calcaires Djahrom, dans cette zone est constituée de bandes de calcaires très différentes au point de vue lithologie et fissuration.

On peut encore ajouter qu'il y a des relations entre la nappe des calcaires et celle des alluvions. Le changement de la valeur de T est donc sous l'influence de cette relation avec les différences de puissance de ces nappes.

### 5. 3. 3. - Puits n° 3 (Darak)

Sur la courbe de remontée de ce puits on peut définir trois étapes, mais la configuration est inverse de celle du puits n° 2. Par exemple, la première étape pour le puits n° 2, correspondant à une transmissivité plus forte que celle de la deuxième étape, mais dans le puits n° 3 la transmissivité de la première étape est moins forte que celle de la deuxième, bien qu'il n'y ait que 500 m de distance entre les deux puits.

Les valeurs de T par la courbe de remontée sont (fig. 49) :

Première étape avec :

$$c_1 = 1,00$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T = 0,183 \frac{Q}{c}$$

$$T_1 = 0,0185 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,26$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,07 \text{ m}^2/\text{s}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,60$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,031 \text{ m}^2/\text{s}$$

Les valeurs de T par la courbe de rabattement sont (fig. 50) :

Première étape avec :

$$c = 1,16$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T = 0,016 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :  
 $c_2 = 0,30$

$$T_2 = 0,061 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

Troisième étape avec :  
 $c_3 = 0,64$

$$T_3 = 0,029 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

Quatrième étape avec :  
 $c_4 = 2,20$

$$T_4 = 0,0084 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$$

On peut dire que ce puits est alimenté par une cassure qui draine les couches de calcaires, et que l'influence de cette cassure est intervenue au bout de quatre minutes de pompage, et a continué son rôle jusqu'à 12 heures.

Après ce temps, le forage est alimenté uniquement par la nappe.

Entre la première étape et la deuxième étape, il y a un décalage qui est dû à cette cassure, et on peut distinguer ce décalage également sur la courbe de rabattement de ce puits.

5.3.4. - Puits n° 4 (Darak)

Pour ce puits, on a aussi quatre étapes avec des transmissivités différentes qui décroissent progressivement.

Le mode de décroissance de la valeur de T dans ce puits est comparable à celui observé sur le puits n° 2.

Les débit et rabattement des puits n° 2 et n° 4 sont aussi comparables.

Les valeurs de T par la courbe de remontée sont (fig. 51) :

Première étape avec :  
 $c_1 = 0,07$

$$T = 0,183 \frac{Q}{c_2}$$

$$T_1 = 0,257 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

Deuxième étape avec :  
 $c_2 = 0,13$

$$T_2 = 0,138 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

Troisième étape avec :  
 $c_3 = 0,34$

$$T_3 = 0,053 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

Quatrième étape avec :  
 $c_4 = 0,50$

$$T_4 = 0,036 \text{ m}^2/\text{s}$$

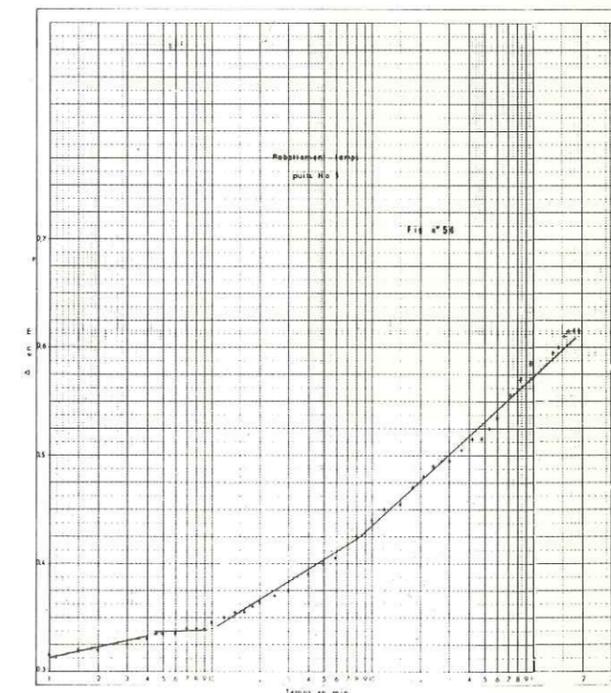
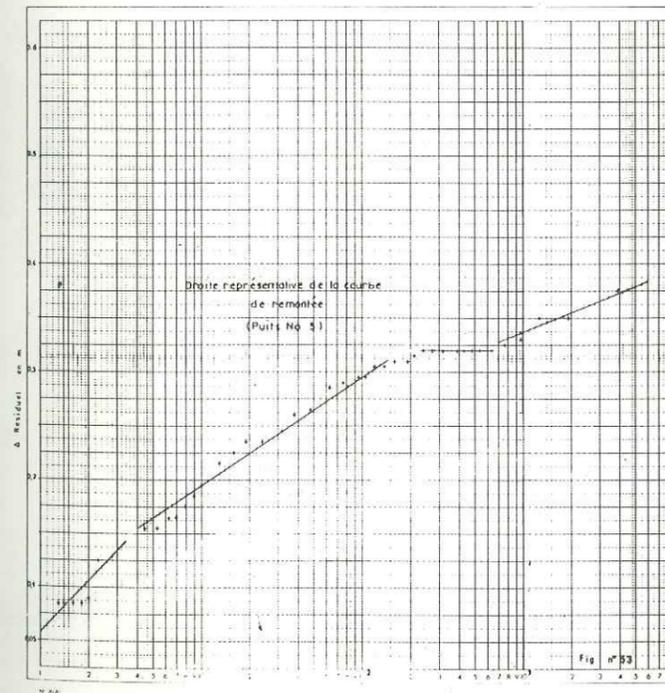
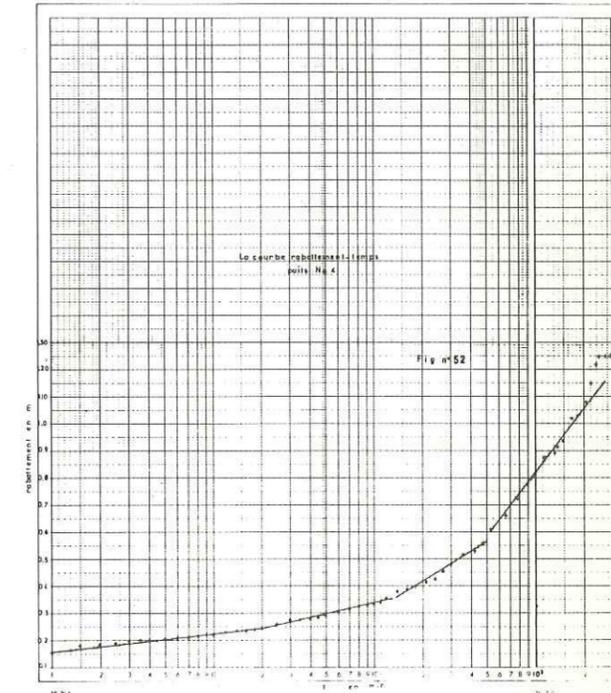
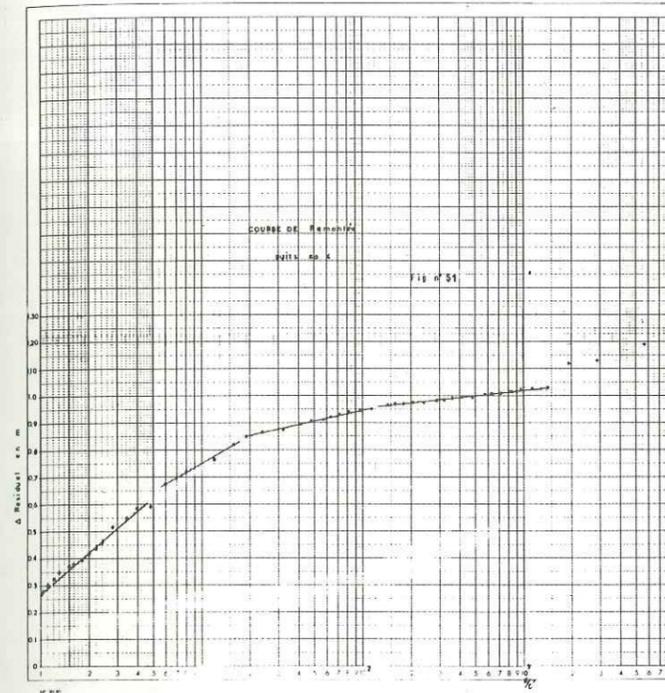
$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les valeurs de T par la courbe de rabattement sont (fig. 52) :

Première étape avec :  
 $c_1 = 0,07$

$$T_1 = 0,257 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$



Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,14$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,128 \text{ m}^2/\text{s}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,35$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,0514 \text{ m}^2/\text{s}$$

Quatrième étape avec :

$$c_4 = 0,78$$

$$Q = 354 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_4 = 0,023 \text{ m}^2/\text{s}$$

De toute façon, on peut dire que parce que les deux puits (n° 2 et n° 4) sont alimentés par les mêmes calcaires, les rythmes de rabattement et de remontée sont comparables, mais entre ces deux puits on trouve le puits n° 3 qui se comporte de façon très différente.

On peut penser sans doute que le puits n° 3 est sous l'influence d'une très grande cassure qui affecte cette zone.

L'allure des droites représentatives de la remontée et du rabattement est déterminée par les caractères lithologiques et la fissuration très hétérogènes des couches calcaires de cette montagne, sans oublier le rôle joué par la nappe des alluvions dans le changement de la valeur T dans ces puits.

### 5.3.5. - Puits n° 5 (Saadi)

Le rythme de rabattement et de remontée dans ce puits est analogue à celui des puits n° 2 et n° 4, mais on trouve un cas exceptionnel dans ce puits, car après trois minutes d'arrêt on a un palier pendant cinq minutes.

On peut calculer la distance de cette anomalie. En effet, pendant la période de stabilisation, tout se passe comme si un apport à l'aquifère égal au prélèvement effectué était fait simultanément au pompage, au niveau de l'anomalie. Celle-ci se trouve donc à une distance R égale à la moitié de la distance X à laquelle la formule de Theis nous indique que le rabattement est nul pendant cette période.

Pendant la durée du palier observé, on peut donc écrire :

$$\Delta H = 0$$

d'où :

$$\lg \frac{2,25 T t}{X^2 S} = 0 \quad \text{et} \quad 2,25 T t = r^2 S$$

Si l'on admet que S est de l'ordre de 6 % on aura :

$$X^2 = \frac{2,25 T t}{S}$$

$$X^2 = \frac{2,25 \times 0,31 \times 180}{0,06} = 2092 X \neq 46 \text{ m}$$

d'où :

$$R = \frac{X}{2} = \frac{46}{2} = 23 \text{ m}$$

On peut donc dire qu'à cette distance il y a une cavité ou une grande fissure pleine d'eau qui alimente le puits pendant ce palier, et il faut ajouter que pendant cette étape la valeur de T est très élevée de  $3,04 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Les valeurs de T par la courbe de remontée sont (fig. 53) :

Première étape avec :

$$T = 0,183 \frac{Q}{t}$$

avec

$$c_1 = 0,06$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,31 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape. Elle correspond au palier droit plus haut.

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,10$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,183 \text{ m}^2/\text{s}$$

Quatrième étape avec :

$$c_4 = 0,16 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_4 = 0,114$$

Les valeurs de T obtenues par la courbe du rabattement sont (fig. 54) :

Première étape avec :

$$c = 0,035$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,405 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

$$c = 0,006$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 3,04 \text{ m}^2/\text{s}$$

Troisième étape avec :

$$c = 0,09$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,202 \text{ m}^2/\text{s}$$

Quatrième étape avec :

$$c = 0,135$$

$$Q = 359 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_4 = 0,135 \text{ m}^2/\text{s}$$

Dans ce puits, les changements de la valeur de T sont aussi dus aux variations de faciès des calcaires et aux relations entre la nappe des calcaires et celle des alluvions.

Dans toutes nos interprétations, nous avons laissé de côté, comme cela est admis par de nombreux auteurs, les premiers tronçons des courbes représentatives qui correspondent, soit aux pertes de charge au niveau du puits, soit au remplissage du volume du puits lui-même.

### 5.3.6. - Puits n° 6 (Sarvestan)

Les valeurs de T obtenues par la courbe du rabattement sont (fig. 45) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,1$$

$$Q = 251 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,128 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,045$$

$$Q = 251 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,28$$

5.3.7. - Puits n°1 (Djahrom)

Situé au centre de la plaine de Djahrom, sur les calcaires de Guri de la formation de Michan (Miocène moyen).

Les valeurs de T obtenues par la courbe de remontée sont (fig. 55) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,22 \text{ m}$$

$$T_1 = 0,055 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 240 \text{ m}^3/\text{h}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,115$$

$$T_2 = 0,106 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 240 \text{ m}^3/\text{h}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,27 \text{ m}$$

$$T_3 = 0,045 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 240 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les valeurs de T par la courbe du rabattement avec (fig. 56) :

$$c = 0,13 \text{ m}$$

$$T = 0,094 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 240 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.3.8. - Puits n° 2 (Djahrom)

Les valeurs de T obtenues par la courbe du rabattement sont (fig. 58) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,02 \text{ m}$$

$$T_1 = 0,63 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 247 \text{ m}^3/\text{h}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,175 \text{ m}$$

$$T_2 = 0,072 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 247 \text{ m}^3/\text{h}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,46 \text{ m}$$

$$T_3 = 0,027 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 247 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les valeurs de T obtenues à partir de la courbe de remontée sont (fig. 57) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,32 \text{ m}$$

$$T_1 = 0,039 \text{ m}^2/\text{s}$$

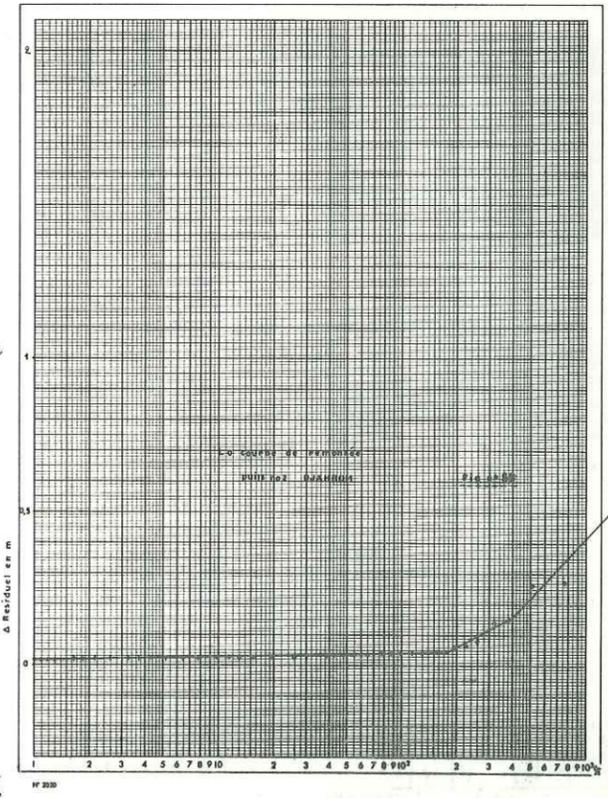
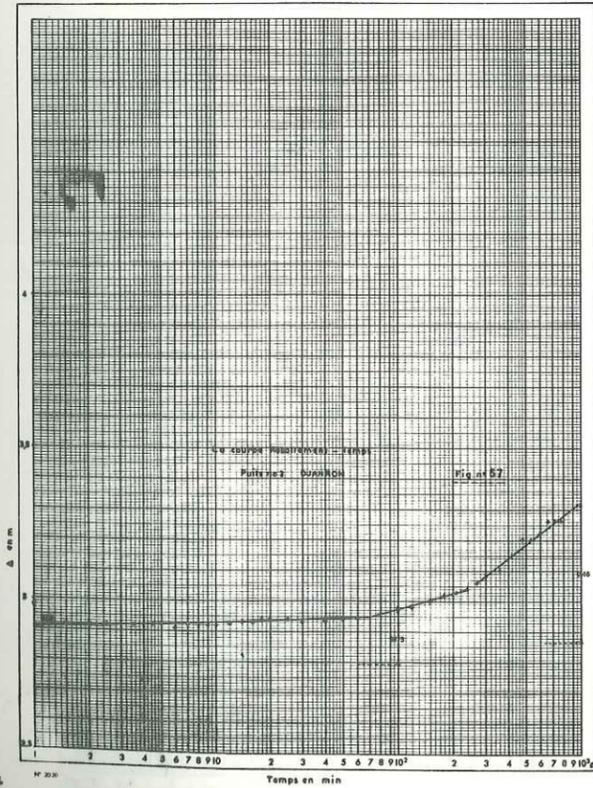
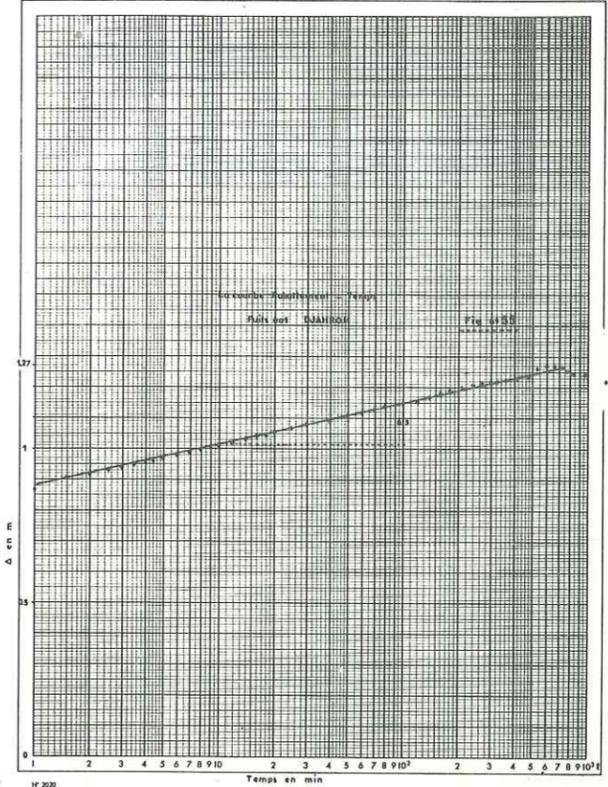
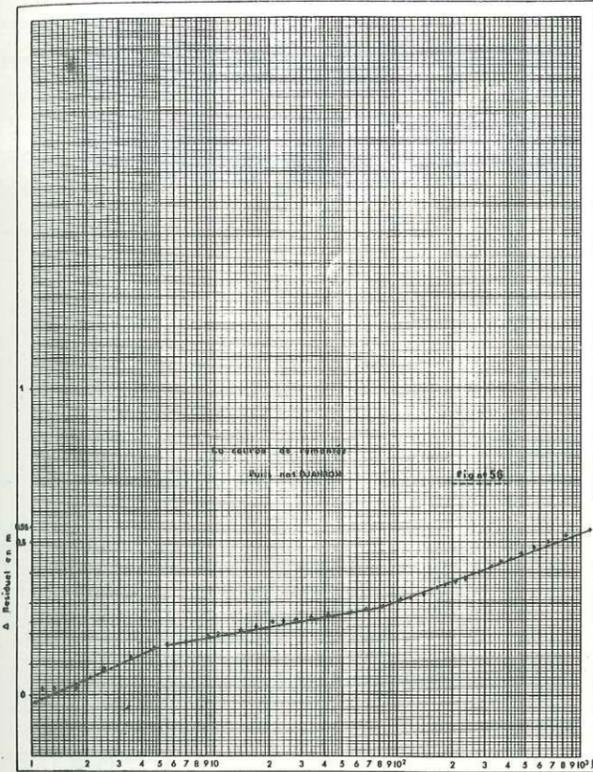
$$Q = 247 \text{ m}^3/\text{h}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,01$$

$$T_2 = 1,25 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Q = 247 \text{ m}^3/\text{h}$$



5.3.9. - Puits n° 3 (Lar)

La valeur de T obtenue à partir de la courbe du rabattement (fig. 58)

avec :

$$c = 0,03 \text{ m}$$

$$Q = 123 \text{ m}^3/\text{h}$$

est :

$$T = 0,21 \text{ m}^2/\text{s}$$

Les valeurs de T obtenues à partir de la courbe de remontée sont (fig. 59) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,28 \text{ m}$$

$$Q = 123 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,022 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,03$$

$$Q = 123 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,21 \text{ m}^2/\text{s}$$

5.3.10. - Puits n° 9 (Lar)

Les valeurs de T obtenues à partir de la courbe de remontée sont (fig. 61) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,17 \text{ m}$$

$$Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,035 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,31 \text{ m}$$

$$Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,019 \text{ m}^2/\text{s}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,085 \text{ m}$$

$$Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_3 = 0,07 \text{ m}^2/\text{s}$$

Les valeurs de T obtenues par la courbe du rabattement sont (fig. 62) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_1 = 0,12 \text{ m}^2/\text{s}$$

Deuxième étape avec :

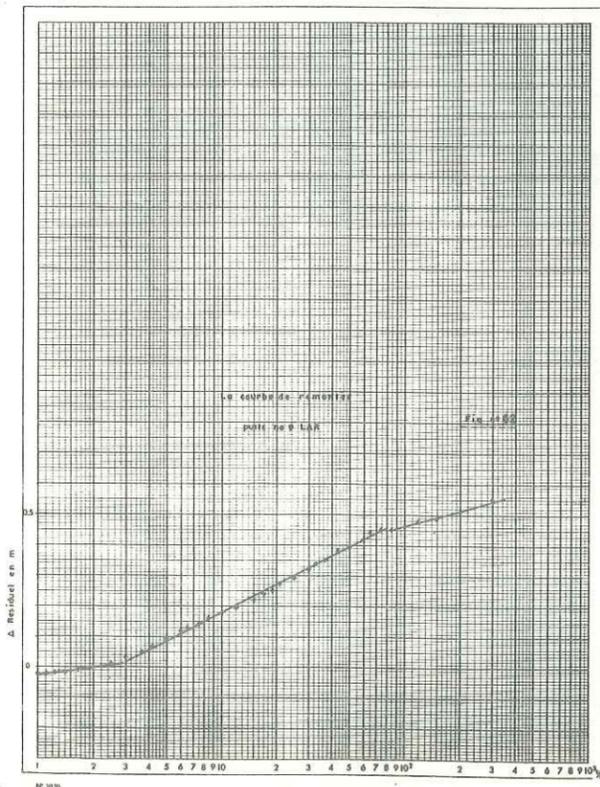
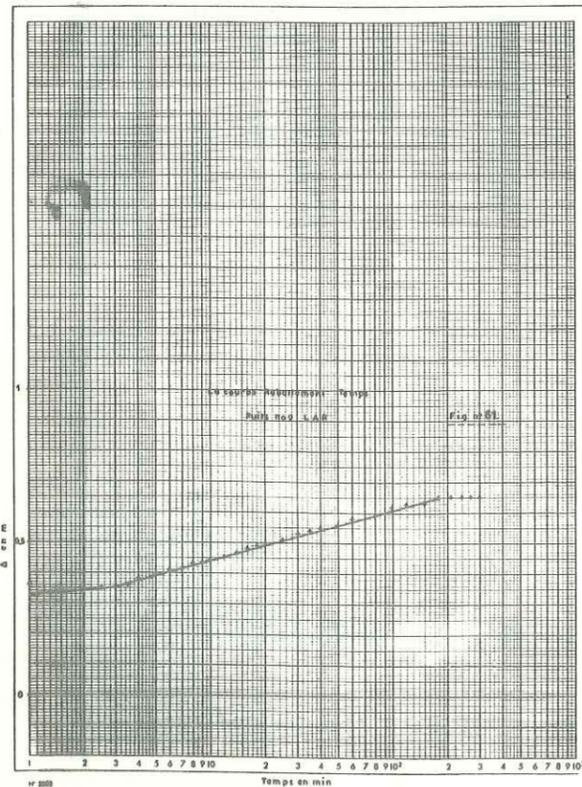
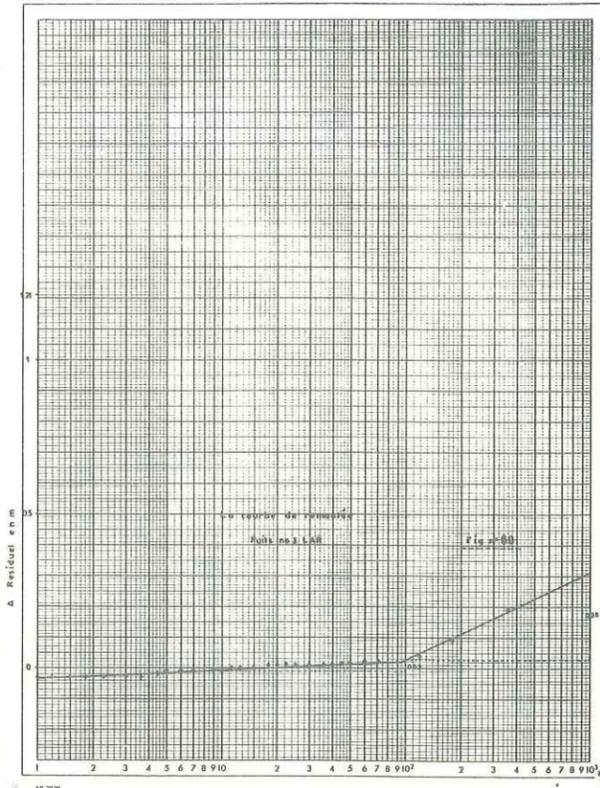
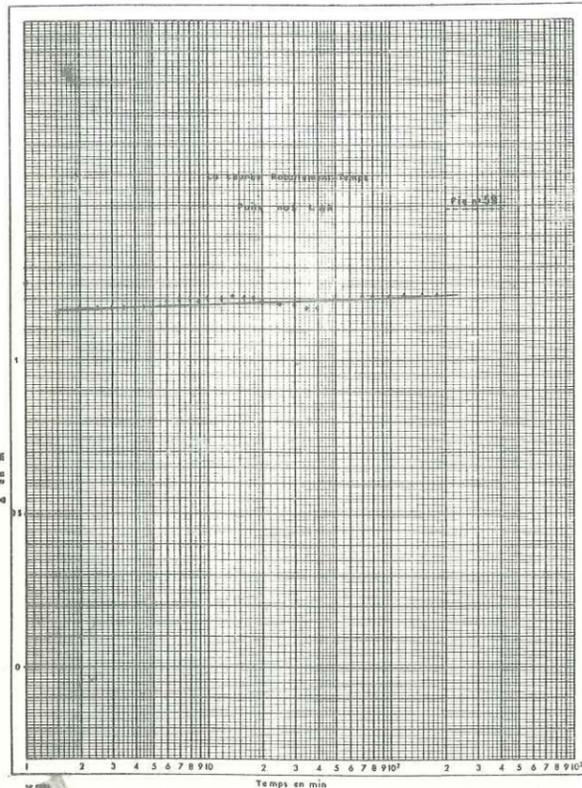
$$c_2 = 0,17 \text{ m}$$

$$Q = 118 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_2 = 0,035 \text{ m}^2/\text{s}$$

Dans les puits de Sarvestan, Djahrom et Lar, nous pensons également que les changements de valeur de T sont liés aux variations de faciès des calcaires et aux relations entre la nappe des calcaires et celle des alluvions.

Cette relation est constatée par l'influence du pompage des puits des calcaires sur les puits des alluvions à Djahrom et à Lar.



5.3.11. - Puits n° 1 Guenau (Bandar Abas)

Ce puits, situé dans les calcaires Asmari Djahrom ; au Sud de l'Iran permet une comparaison avec ceux de la région de Chiraz.

Au voisinage de ce puits, dans les calcaires, on avait un piézomètre à onze mètres du puits. Grâce à ce piézomètre nous avons calculé la transmissivité et le coefficient d'emménagement à partir des courbes de remontée et du rabattement, par la formule d'approximation logarithmique de Theis-Jacob.

$$\Delta = \frac{0,183 Q}{T} \lg \frac{2,25 T t}{x^2 S}$$

La valeur de T obtenue à partir de la courbe du rabattement est (fig. 64) :  
avec :

$$c = 0,77 \text{ m} \quad T = 0,019 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h}$$

La valeur de T obtenue à partir de la courbe de remontée est (fig. 63) :  
avec :

$$c = 0,49 \text{ m} \quad T = 0,029 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h}$$

Piézomètre

Nous avons calculé aussi les valeurs de T grâce à la courbe de remontée dans le piézomètre (fig. 65) :

Première étape avec :

$$c_1 = 0,42 \text{ m} \quad T_1 = 0,034 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h}$$

Deuxième étape avec :

$$c_2 = 0,72 \text{ m} \quad T_2 = 0,02 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h}$$

Troisième étape avec :

$$c_3 = 0,15 \text{ m} \quad T_3 = 0,095 \text{ m}^2/\text{s} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h}$$

Les valeurs de T et de S fournies par la courbe du rabattement sont (fig. 66) :  
avec :

$$c = 0,49 \text{ m} \quad Q = 282 \text{ m}^3/\text{h} \quad \Delta = 0,71 \text{ m} \quad X = 11 \text{ m}$$

$$T = \frac{0,183 Q}{c} \quad t = 1800 \text{ secondes}$$

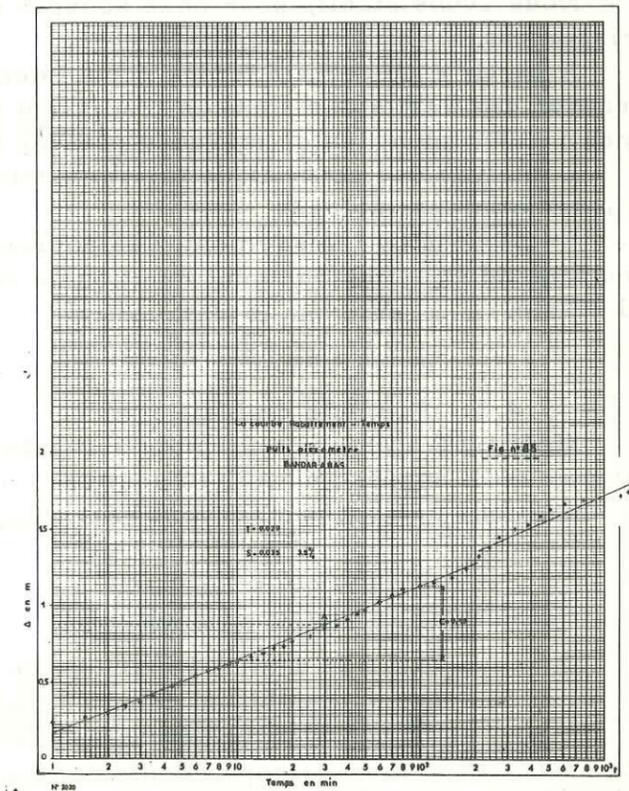
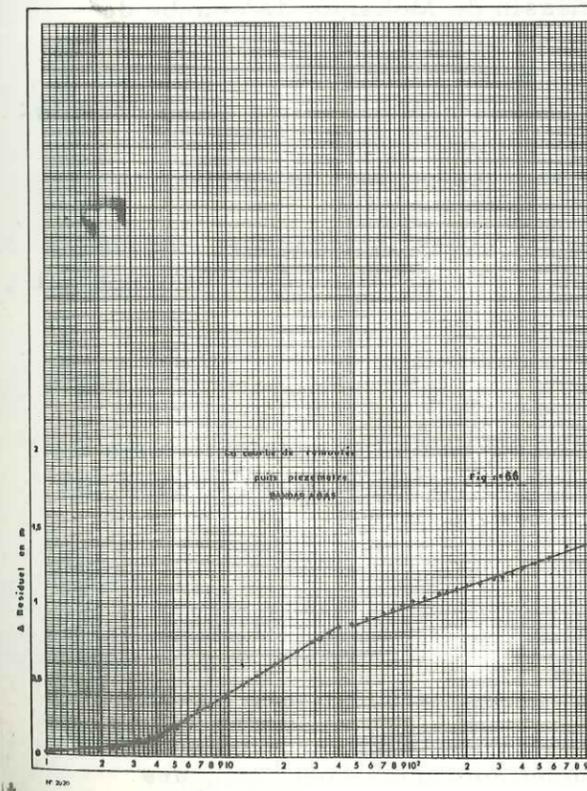
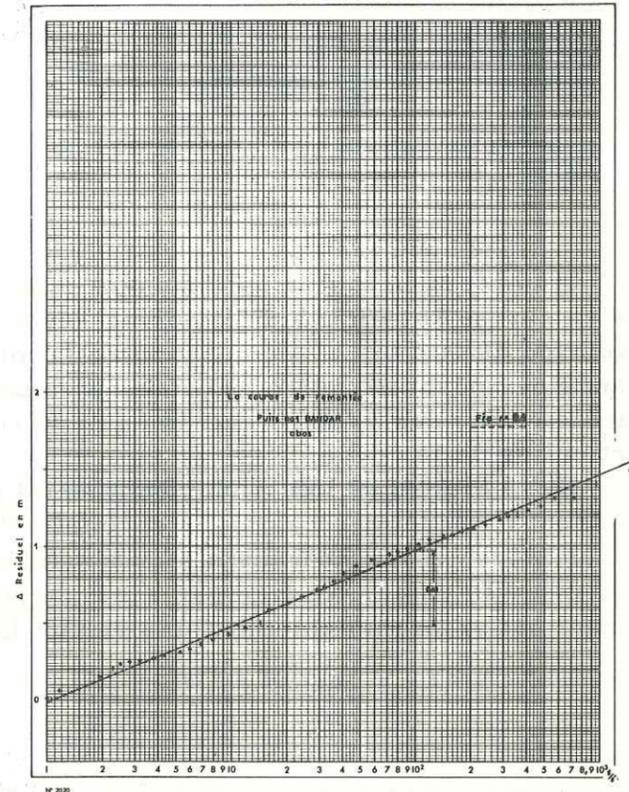
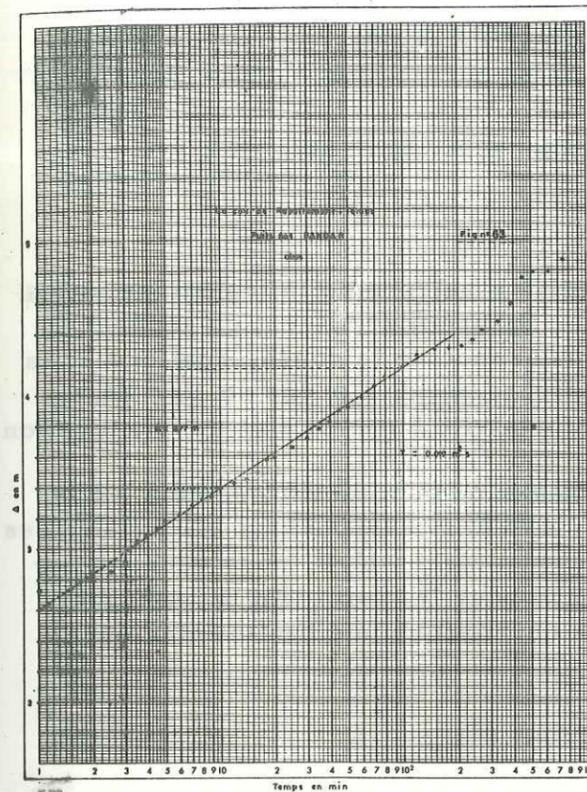
$$T = 0,029 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\Delta = c \lg \frac{2,25 T t}{x^2 S}$$

$$S = 0,035 \quad 3,5 \%$$

Puits n° 1 de Bandar Abas

Nous avons calculé aussi la valeur de la perméabilité à partir de la courbe



du rabattement - logarithme de la distance avec (fig. 46) :  
c = 2,57 m                      Q = 0,0783 m<sup>3</sup>/h

$$K = \frac{0,73 Q}{c}$$

$$K = 0,022 \text{ ou } 2,2 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

5.3.12 - Conclusion

Il ressort de toutes les mesures faites, que les valeurs de la transmissivité des calcaires karstiques de la formation Asmari-Djahrom se situent en général au voisinage de 0,2 m<sup>2</sup>/s, ce qui montre la forte puissance de la couche aquifère et sa grande perméabilité qui, nous l'avons vu par ailleurs est de l'ordre de 10<sup>-2</sup> m/s, mais il existe des valeurs extrêmes de la transmissivité dues à l'état de fracturation particulier de la roche.

Ces caractères liés à un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 3 à 4 % montrent l'intérêt des calcaires éocènes-oligocènes en ce qui concerne les ressources en eau. Si les valeurs de transmissivité paraissent peu discutables, nous verrons par contre que la valeur trouvée par essai de pompage pour le coefficient d'emmagasinement est vraisemblablement une valeur faible qui marque une limite inférieure.

5.4. - COURBES DE TARISSEMENT

Nous avons établi, pour onze sources du bassin du Moharlu, la courbe de tarissement.

A partir d'un certain temps écoulé depuis le début de la crue, les courbes de variation des débits des sources traduisent une décrue rapide, suivie d'une décroissance relativement lente, marquée par une faible pente.

L'analyse des courbes de tarissement des sources permet de calculer la capacité d'emmagasinement.

En période de tarissement, les sources ne reçoivent aucun apport extérieur, donc leur débit est uniquement fonction du volume d'eau accumulé dans la nappe qui l'alimente.

5.4.1 - Formule de Maillet

MAILLET a établi la formule suivante de la courbe de tarissement, mais il faut dire qu'il suppose un milieu aquifère homogène et isotrope. Il est évident que ces conditions ne sont pas souvent réalisées dans les calcaires.

$$q = q_0 e^{-\alpha t}$$
$$\text{d'où } \log Q_t = \log Q_0 - (\alpha \log e) t$$

- Q<sub>t</sub> = le débit à l'instant t en m<sup>3</sup>/s
- Q<sub>0</sub> = le débit au début du tarissement en m<sup>3</sup>/s
- t<sub>0</sub> = 2,718 la base des logarithmes népériens
- e = le temps écoulé depuis le début du tarissement en jours
- α = le coefficient du tarissement

en remplaçant lg e par sa valeur numérique 0,4343 :

$$\lg Q_t = \lg Q_0 - (0,4343 \alpha) t$$

Nous avons porté sur un graphique semi-logarithmique en ordonnées les débits en l/s et en abscisses les temps en jours pour chaque source de la région qui était sous contrôle mensuel et nous avons calculé les coefficients de tarissement α et la capacité d'emmagasinement W.

Nous avons calculé ainsi les valeurs α et W de onze sources de la région pour les années 1972-1974.

5.4.1.1 - Source de Barm-Delak (fig. 67)

1° / - Pour l'année 1972, avec Q<sub>0</sub> = 110 l/s      Q<sub>t</sub> = 60 l/s

$$t = 132 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0046$$
$$W_0 = 2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule du tarissement de cette source, pour l'année 1972 est :

$$Q_t = 0,11 \times e^{-0,0046 t}$$

2° / - Pour l'année 1973 on a deux périodes de tarissement.

A. - Premier tarissement avec Q<sub>0</sub> = 100 l/s      Q<sub>t</sub> = 70 l/s      t = 63 jours

d'où :

$$\alpha = 0,0057$$
$$W_0 = 1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule du tarissement est :

$$Q_t = 0,1 \times e^{-0,0057 t}$$

B. - Deuxième tarissement de l'année 1973

avec :

$$Q_0 = 90 \text{ l/s} \quad Q_t = 60 \quad t = 45 \text{ jours}$$

d'où : α = 0,009

$$W_0 = 9 \times 10^5 \text{ m}^3$$

La formule du tarissement est :

$$Q_t = 0,09 \times e^{-0,009 t}$$

3° / - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_0 = 75 \text{ l/s} \quad Q_t = 55 \text{ l/s} \quad t = 78 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,004$$
$$W_0 = 1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule du tarissement est :

$$Q_t = 0,075 \times e^{-0,0042 t}$$

Il faut signaler que la valeur du coefficient de tarissement pour la source de Barm-Delak est en moyenne de 0,0048 et la capacité d'emmagasinement au début du tarissement est de 1,7 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

La formule du tarissement de la source de Barm-Delak est donc en général :

$$Q_t = 0,095 \times e^{-0,0048 t}$$

5.4.1.2 - La source du Moharlu (fig. 67)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 145 \text{ l/s} \quad Q_t = 90 \text{ l/s} \quad t = 117 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,004$$

$$W_o = 3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 40 \text{ l/s} \quad Q_t = 28 \text{ l/s} \quad t = 132 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0034$$

$$W_o = 1 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 140 \text{ l/s} \quad Q_t = 70 \text{ l/s} \quad t = 93 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0074$$

$$W_o = 1,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

On peut dire que la formule du tarissement de la source du Moharlu est :

$$Q_t = 0,108 e^{-0,0049t}$$

En général, la valeur du coefficient de tarissement est de 0,0049 et la capacité d'emmagasinement, au début de la période de tarissement est de :

$$2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

5.4.1.3 - Source de Barm-Polbrendji (fig. 68)

1°/ - Pour l'année 1972

avec :

$$Q_o = 260 \text{ l/s} \quad Q_t = 175 \text{ l/s} \quad t = 135 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0029$$

$$W_o = 7,7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de tarissement est donc :

$$Q_t = 0,26 e^{-0,0029 t}$$

2°/ - Pour l'année 1973

avec :

$$Q_o = 250 \text{ l/s} \quad Q_t = 200 \text{ l/s} \quad t = 132 \text{ jours}$$

d'où :

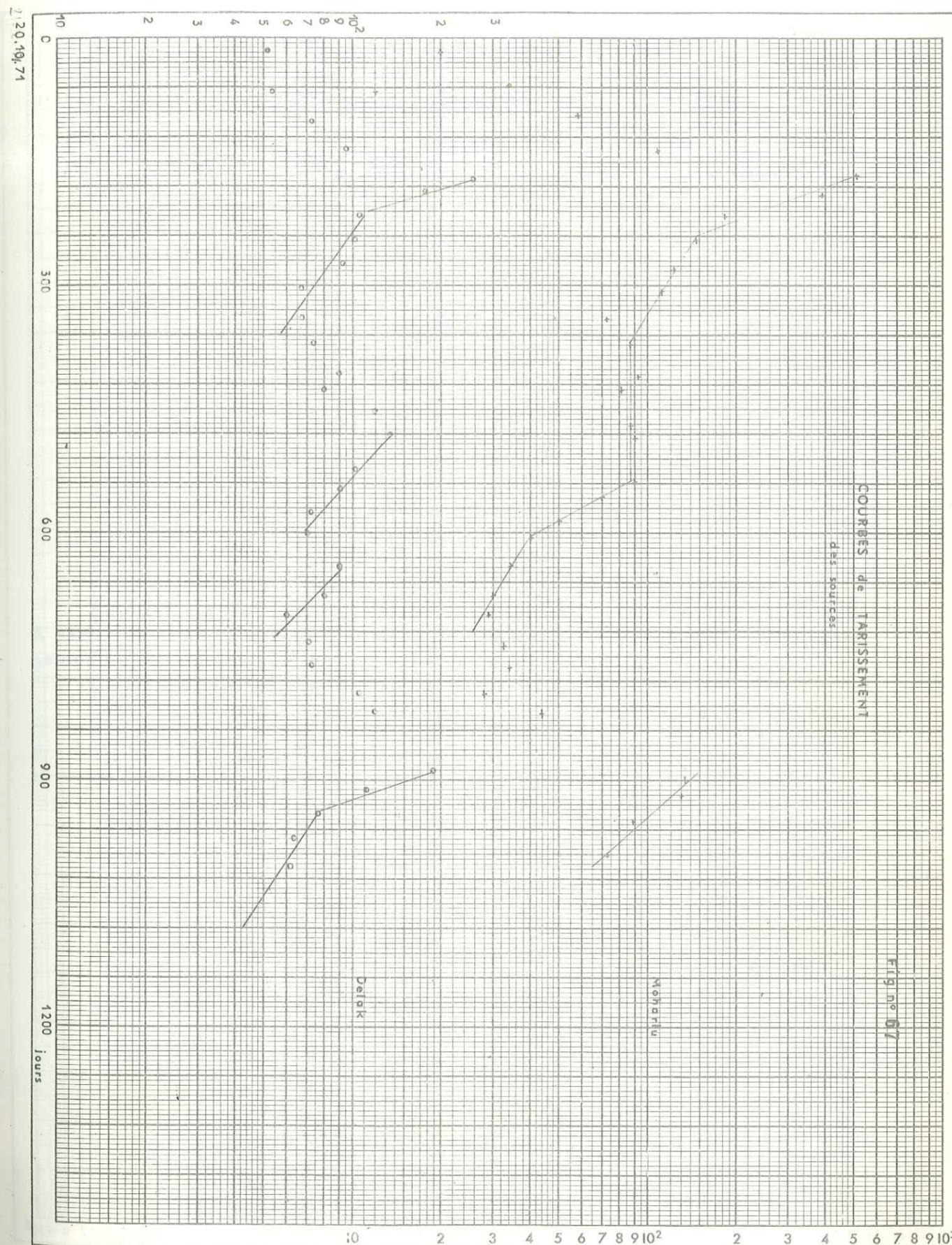
$$\alpha = 0,0017$$

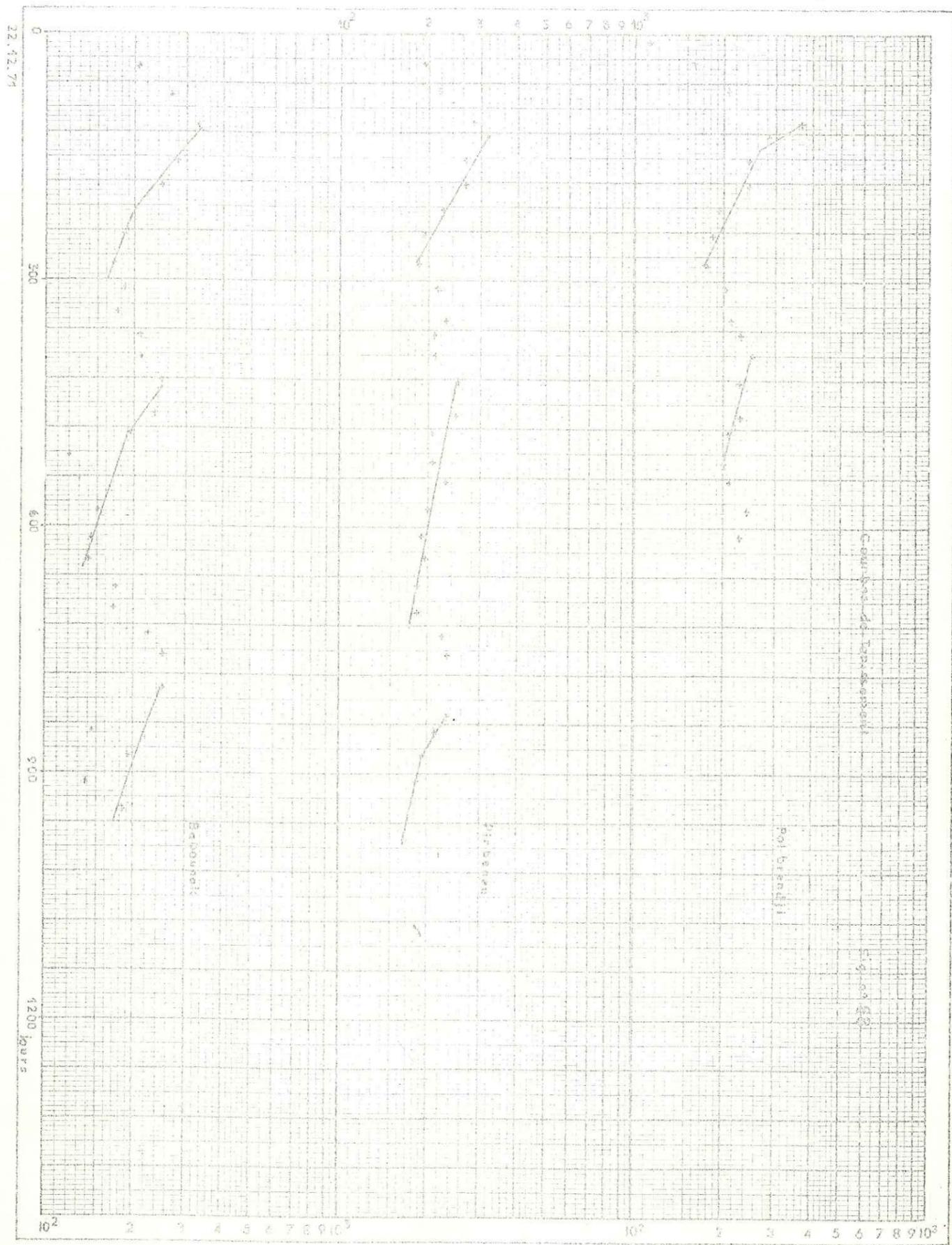
$$W_o = 12,7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

Donc la formule de tarissement est :

$$Q_t = 0,25 e^{-0,0017 t}$$

En tout cas, la valeur de  $\alpha$  pour cette source doit donc être de 0,0023 et la capacité d'emmagasinement de  $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ .





5.4.1.4 - Source de Pir-Benau (fig. 68)

1° / - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 240 \text{ l/s} \quad Q_t = 180 \text{ l/s} \quad t = 78 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0037$$

$$W_o = 5,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2° / - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 200 \text{ l/s} \quad Q_t = 180 \text{ l/s} \quad t = 90 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0012$$

$$W_o = 14 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3° / - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 190 \text{ l/s} \quad Q_t = 170 \text{ l/s} \quad t = 78 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0014$$

$$W_o = 12 \times 10^6 \text{ m}^3$$

En effet, on trouve que la valeur du coefficient de tarissement est de 0,0028. A partir de cette valeur avec un débit de 220 l/s on a une capacité d'emmagasinement d'environ  $11 \times 10^7 \text{ m}^3$  au début de la période de tarissement.

La formule du tarissement, pour la source de Pir-Benau est donc :

$$Q_t = 0,22 e^{-0,0021 t}$$

5.4.1.5 - Source de BarmBabounak (fig. 68)

1° / - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 200 \text{ l/s} \quad Q_t = 150 \text{ l/s} \quad t = 120 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0025$$

$$W_o = 7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2° / - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 190 \text{ l/s} \quad Q_t = 140 \text{ l/s} \quad t = 156 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,002$$

$$W_o = 8 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3° / - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 240 \text{ l/s} \quad Q_t = 180 \text{ l/s} \quad t = 120 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0024$$

$$W_o = 8,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

En finale, la formule de tarissement de Barm-Babounak est :

$$Q_t = 0,21 e^{-0,0023 t}$$

La valeur du coefficient de tarissement de cette source est de 0,0023 et la capacité d'emmagasinement est donc :

$$8 \times 10^6 \text{ m}^3$$

au début de la période de tarissement.

5.4.1.6 - Source de Barm-Babahadji (fig. 69)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 300 \text{ l/s} \quad Q_t = 240 \text{ l/s} \quad t = 60 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0037$$

$$W_o = 7 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 200 \text{ l/s} \quad Q_t = 140 \text{ l/s} \quad t = 93 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0038$$

$$W_o = 4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de tarissement de la source Babahadji est donc :

$$Q_t = 0,25 e^{-0,0037 t}$$

Le coefficient de tarissement de la source Babahadji est de 0,0037 et la capacité d'emmagasinement est de  $6 \times 10^6 \text{ m}^3$  au début de la période du tarissement.

5.4.1.7 - Source du Mourdi (fig. 70)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 55 \text{ l/s} \quad Q_t = 48 \text{ l/s} \quad t = 75 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0018$$

$$W_o = 2,6 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 50 \text{ l/s} \quad Q_t = 36 \text{ l/s} \quad t = 96 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,003$$

$$W_o = 1,2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 100 \text{ l/s} \quad Q_t = 70 \text{ l/s} \quad t = 102 \text{ jours}$$

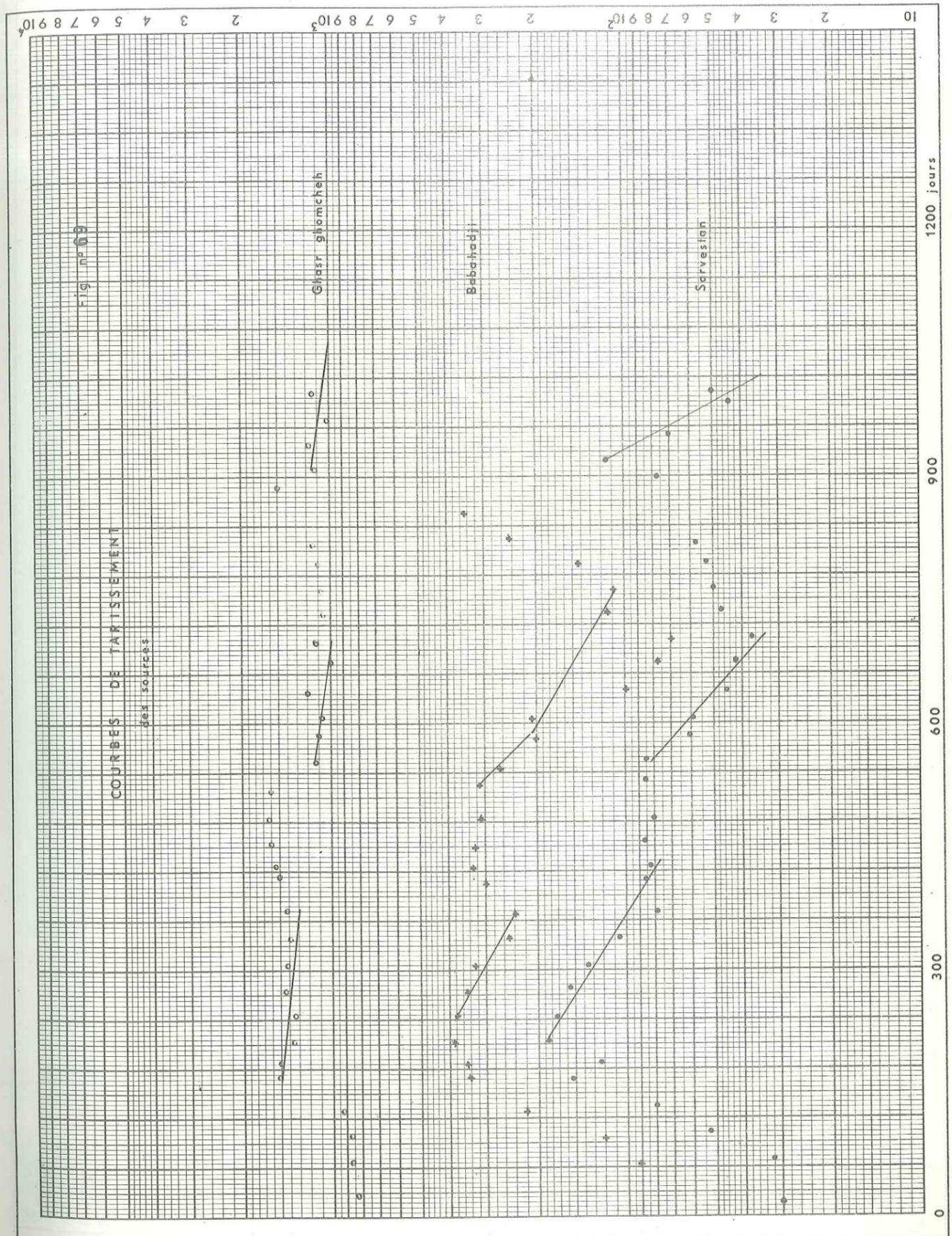
d'où :

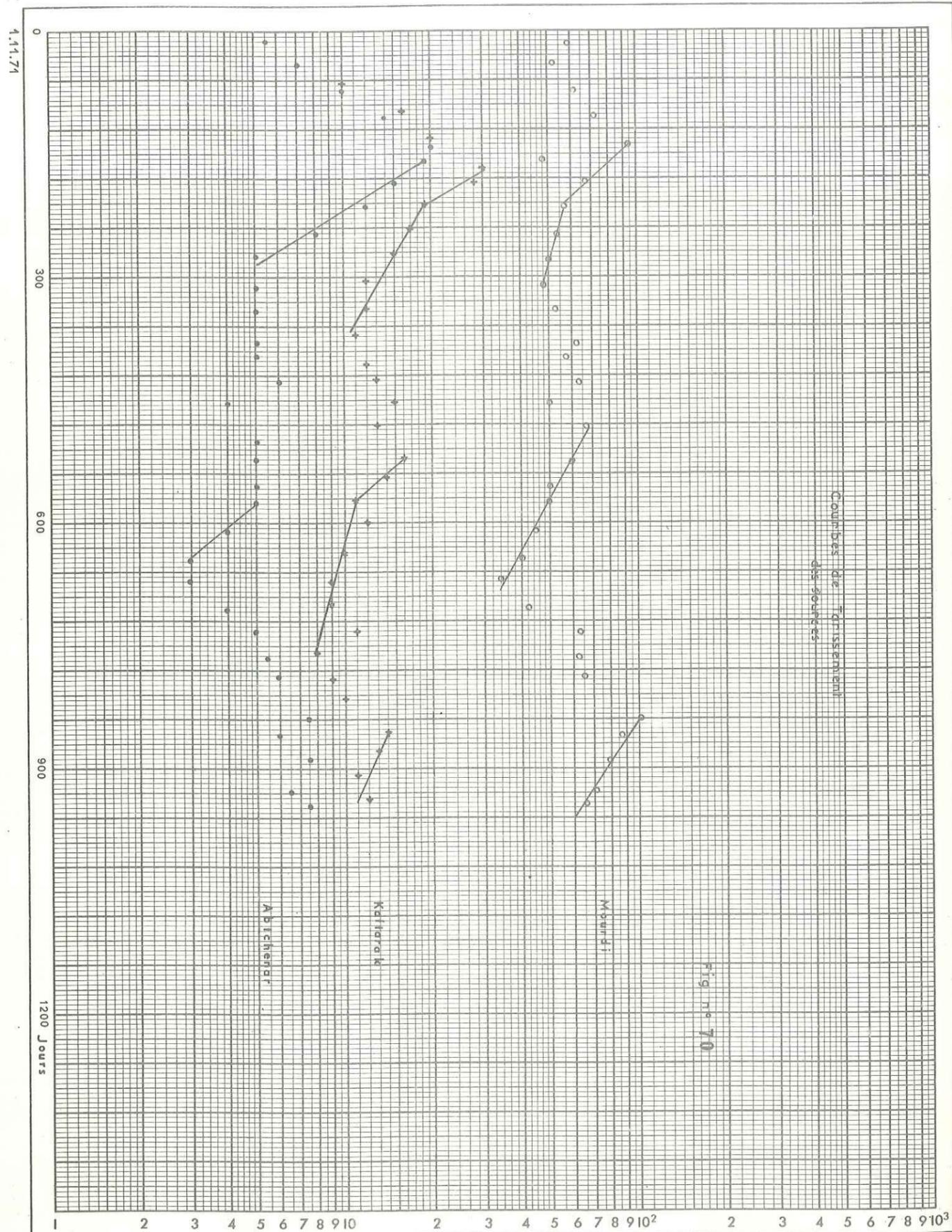
$$\alpha = 0,0035$$

$$W_o = 2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe du tarissement de la source de Mourdi est :

$$Q_t = 0,07 e^{-0,0029 t}$$





Le coefficient de tarissement est de 0,0029 pour la source de Mourdi et la capacité d'emmagasinement est de  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$  au début de la période du tarissement.

5.4.1.8 - Source de Kaftarak (fig. 70)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 17 \text{ l/s} \quad Q_t = 11 \text{ l/s} \quad t = 120 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0036$$

$$W_o = 4 \times 10^5 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 11 \text{ l/s} \quad Q_t = 8 \text{ l/s} \quad t = 180 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0018$$

$$W_o = 5 \times 10^5 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 14 \text{ l/s} \quad Q_t = 11 \text{ l/s} \quad t = 82 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0029$$

$$W_o = 4 \times 10^5 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement de la source de Kaftarak est donc :

$$Q_t = 0,014 e^{-0,0028 t}$$

Le coefficient de tarissement de la source de Kaftarak est de 0,0028 et la capacité d'emmagasinement est de  $4,5 \times 10^5 \text{ m}^3$  au début de la période de tarissement.

5.4.1.9 - Source d'Abtchenar (fig. 70)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 20 \text{ l/s} \quad Q_t = 5 \text{ l/s} \quad t = 138 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,01$$

$$W_o = 1,7 \times 10^5 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 5 \text{ l/s} \quad Q_t = 3 \text{ l/s} \quad t = 72 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,007$$

$$W_o = 6 \times 10^4 \text{ m}^3$$

Le coefficient de la courbe de tarissement de la source d'Abtchenar est de : 0,008 et la capacité d'emmagasinement est de  $10^5 \text{ m}^3$  au début de la période de tarissement.

5.4.1.10 - Source de Ghasr-ghomchek (fig. 69)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 1\ 500\ \text{l/s} \quad Q_t = 1\ 300\ \text{l/s} \quad t = 180\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0008$$

$$W_o = 162 \times 10^6$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 1\ 100\ \text{l/s} \quad Q_t = 1000\ \text{l/s} \quad t = 100\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,00094$$

$$W_o = 101 \times 10^6$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 1\ 100\ \text{l/s} \quad Q_t = 1000\ \text{l/s} \quad t = 100\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,00094$$

$$W_o = 101 \times 10^6$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = 1,23 e^{-0,00089t}$$

5.4.1.11 - Source de Sarvestan (fig. 69)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 150\ \text{l/s} \quad Q_t = 90\ \text{l/s} \quad t = 120\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0042$$

$$W_o = 3 \times 10^6\ \text{m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 80\ \text{l/s} \quad Q_t = 40\ \text{l/s} \quad t = 123\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0056$$

$$W = 1,2 \times 10^6\ \text{m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 100\ \text{l/s} \quad Q_t = 70\ \text{l/s} \quad t = 30\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,012$$

$$W = 7 \times 10^5$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = 0,11 e^{-0,0072t}$$

5.4.2. - Formule de Tison G.

b - On peut essayer d'appliquer à nos sources la formule de Tison qui est valable pour un milieu à écoulement turbulent.

La formule de G. TISON admet que les débits décroissent en fonction du temps comme l'inverse de leur racine carrée :

$$Q_t = \frac{Q_o}{(1+\alpha t)^2}$$

$$\sqrt{Q_t} = \frac{\sqrt{Q_o}}{1 + \alpha t}$$

Pour la représentation graphique nous portons, sur un diagramme arithmétique en abscisse les temps t en jours et en ordonnées l'inverse de la racine carrée des débits.

5.4.2.1 - Source de Babounak (fig. 71)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 278\ \text{l/s} \quad Q_t = 164\ \text{l/s} \quad t = 132\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0023$$

$$W_o = 10 \times 10^6\ \text{m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 244\ \text{l/s} \quad Q_t = 132\ \text{l/s} \quad t = 210\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0016$$

$$W_o = 13 \times 10^6\ \text{m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 280\ \text{l/s} \quad Q_t = 164\ \text{l/s} \quad t = 120\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0015$$

$$W_o = 13 \times 10^6\ \text{m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{0,256}{(1 + 0,0018 t)}$$

5.4.2.2 - Source de Pir-Benau (fig. 71)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 319\ \text{l/s} \quad Q_t = 156\ \text{l/s} \quad t = 180\ \text{jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0024$$

$$W_o = 13 \times 10^6\ \text{m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 244 \text{ l/s}$      $Q_t = 204 \text{ l/s}$      $t = 120 \text{ jours}$

d'où :  
 $\alpha = 0,00076$   
 $W_o = 28 \times 10^6 \text{ m}^3$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :  
 $Q_o = 216 \text{ l/s}$      $Q_t = 183 \text{ l/s}$      $t = 160 \text{ jours}$

d'où :  
 $\alpha = 0,0015$   
 $W_o = 12 \times 10^6 \text{ m}^3$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{0,260}{(1 + 0,0015 t)}$$

5.4.2.3 - Source de Pol-brendji (fig. 71)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 216 \text{ l/s}$      $Q_t = 164 \text{ l/s}$      $t = 120 \text{ jours}$

d'où :  
 $\alpha = 0,0012$   
 $W_o = 16 \times 10^6 \text{ m}^3$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 244 \text{ l/s}$      $Q_t = 204 \text{ l/s}$      $t = 102 \text{ jours}$

d'où :  
 $\alpha = 0,0009$   
 $W_o = 23 \times 10^6 \text{ m}^3$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

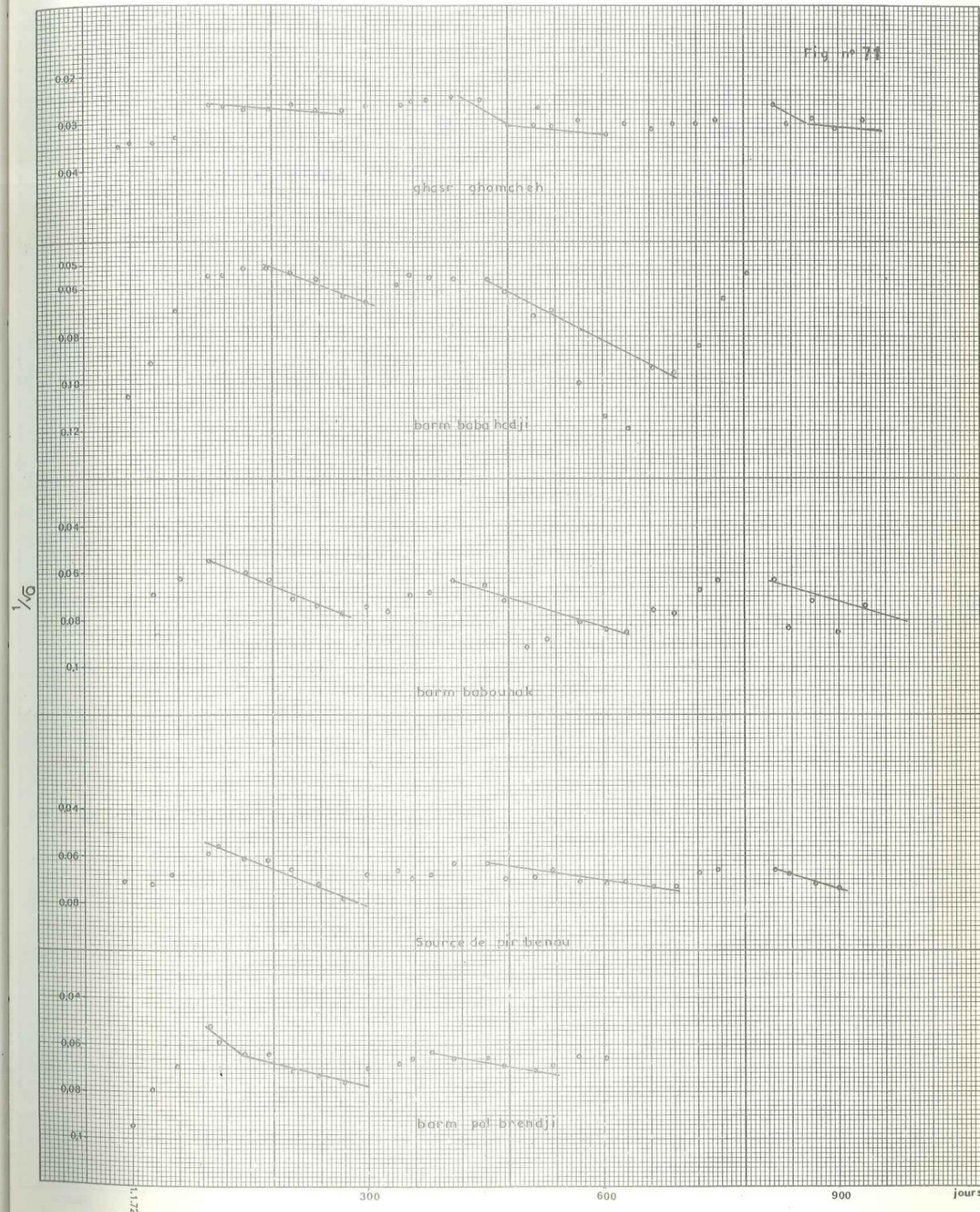
$$Q_t = \frac{0,23}{(1 + 0,001 t)}$$

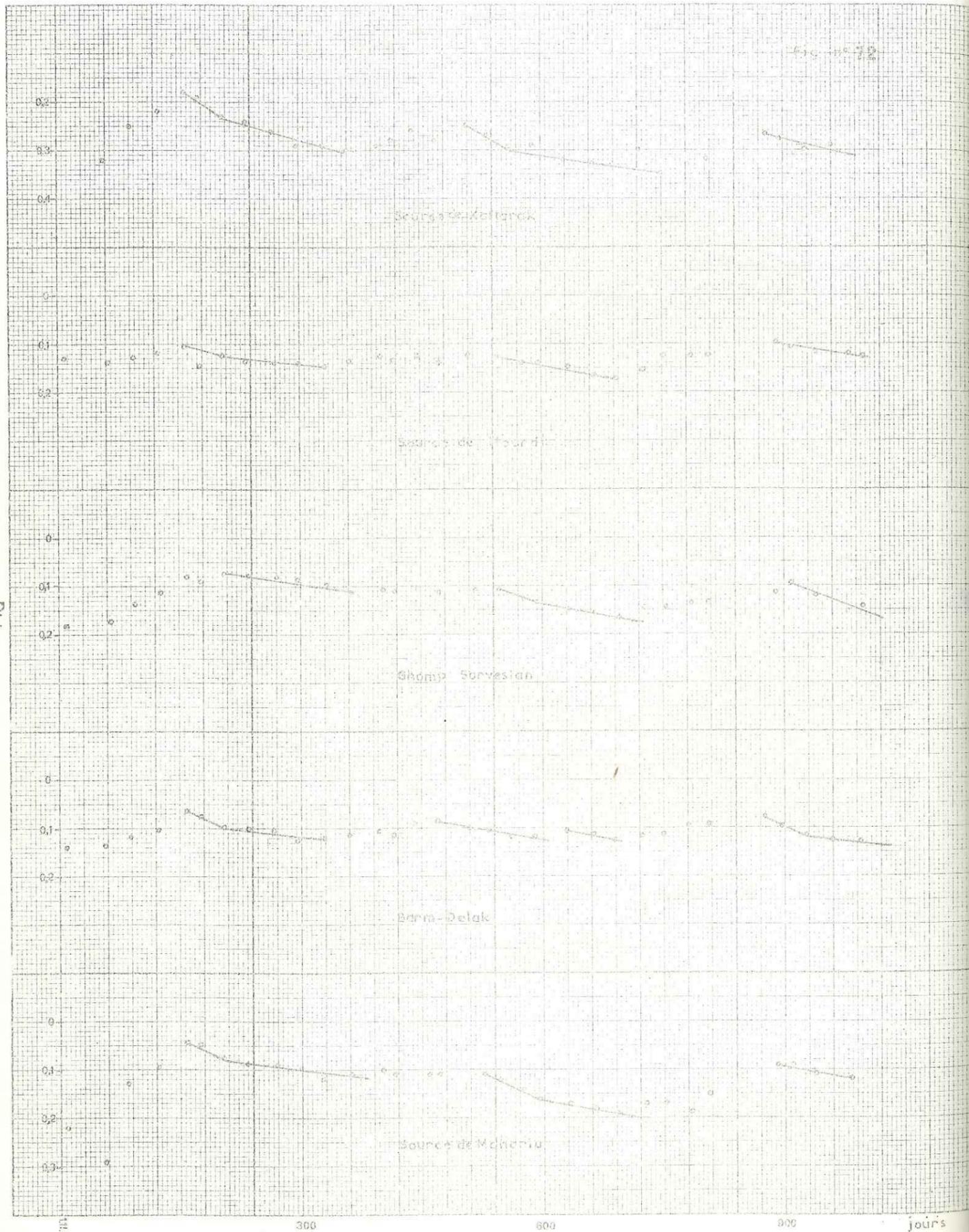
5.4.2.4 - Source du Moharlu (fig. 72)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 123 \text{ l/s}$      $Q_t = 100 \text{ l/s}$      $t = 54 \text{ jours}$

d'où :  
 $\alpha = 0,002$   
 $W_o = 5 \times 10^6 \text{ m}^3$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 35 \text{ l/s}$      $Q_t = 28 \text{ l/s}$      $t = 69 \text{ jours}$





d'où :

$$\alpha = 0,0017$$

$$W_o = 1,8 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 100 \text{ l/s} \quad Q_t = 83 \text{ l/s} \quad t = 33 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,003$$

$$W_o = 2,9 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{0,086}{(1 + 0,0022 t)}$$

5.4.2.5 - Source Delak (fig. 72)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 100 \text{ l/s} \quad Q_t = 69 \text{ l/s} \quad t = 105 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0019$$

$$W_o = 4,5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973, on a deux périodes de tarissement

a) - premier tarissement avec :

$$Q_o = 100 \text{ l/s} \quad Q_t = 69 \text{ l/s} \quad t = 72 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0028$$

$$W_o = 3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

b) - deuxième tarissement avec :

$$Q_o = 83 \text{ l/s} \quad Q_t = 69 \text{ l/s} \quad t = 80 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0031$$

$$W_o = 2,3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 69 \text{ l/s} \quad Q_t = 51 \text{ l/s} \quad t = 96 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0017$$

$$W_o = 3,5 \times 10^6$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{0,09}{(1 + 0,0021 t)}$$

5.4.2.6 - Source de Babahadji (fig. 71)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 400 \text{ l/s}$       $Q_t = 278 \text{ l/s}$       $t = 78 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0026$$
$$W_o = 13 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 297 \text{ l/s}$       $Q_t = 118 \text{ l/s}$       $t = 198 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0029$$
$$W_o = 9 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{0,35}{(1 + 0,0027 t)}$$

5.4.2.7 - Source d'Ab-Tchenar

avec :  
 $Q_o = 12 \text{ l/s}$       $Q_t = 5 \text{ l/s}$       $t = 90 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,006$$
$$W_o = 2 \times 10^5 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement est donc :

$$Q_t = \frac{0,12}{(1 + 0,006 t)}$$

5.4.2.8 - Source de Chomp Sarvestan (fig. 72)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 156 \text{ l/s}$       $Q_t = 83 \text{ l/s}$       $t = 120 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0031$$
$$W_o = 4,3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 51 \text{ l/s}$       $Q_t = 35 \text{ l/s}$       $t = 96 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0022$$
$$W_o = 2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :  
 $Q_o = 100 \text{ l/s}$       $Q_t = 35 \text{ l/s}$       $t = 110 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0064$$
$$W_o = 1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement est donc :

$$Q_t = \frac{0,102}{(1 + 0,0039 t)}$$

5.4.2.9 - Source de Mourdi (fig. 72)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 59 \text{ l/s}$       $Q_t = 44 \text{ l/s}$       $t = 72 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0021$$
$$W_o = 2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 59 \text{ l/s}$       $Q_t = 39 \text{ l/s}$       $t = 96 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0024$$
$$W_o = 2 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :  
 $Q_o = 100 \text{ l/s}$       $Q_t = 69 \text{ l/s}$       $t = 78 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0025$$
$$W_o = 3 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement est donc :

$$Q_t = \frac{0,073}{(1 + 0,0023 t)}$$

5.4.2.10 - Source de Ghasr-Ghomcheh (fig. 71)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :  
 $Q_o = 1480 \text{ l/s}$       $Q_t = 1275 \text{ l/s}$       $t = 135 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,00057$$
$$W_o = 224 \times 10^6 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :  
 $Q_o = 1040 \text{ l/s}$       $Q_t = 975 \text{ l/s}$       $t = 60 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0005$$
$$W_o = 179 \times 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :  
 $Q_o = 1100 \text{ l/s}$       $Q_t = 1040 \text{ l/s}$       $t = 42 \text{ jours}$

d'où :

$$\alpha = 0,0078$$

$$W_o = 123 \times 10^6 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement de cette source est donc :

$$Q_t = \frac{1,2}{(1 + 0,0061 t)}$$

5.4.2.11 - Source de Kaftarak (fig. 72)

1°/ - Pour l'année 1972 avec :

$$Q_o = 16 \text{ l/s} \quad Q_t = 11 \text{ l/s} \quad t = 105 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0019$$

$$W_o = 7 \times 10^5 \text{ m}^3$$

2°/ - Pour l'année 1973 avec :

$$Q_o = 10 \text{ l/s} \quad Q_t = 8,5 \text{ l/s} \quad t = 120 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0008$$

$$W_o = 10^6 \text{ m}^3$$

3°/ - Pour l'année 1974 avec :

$$Q_o = 14 \text{ l/s} \quad Q_t = 10 \text{ l/s} \quad t = 69 \text{ jours}$$

d'où :

$$\alpha = 0,0022$$

$$W_o = 5 \times 10^5 \text{ m}^3$$

La formule de la courbe de tarissement est donc :

$$Q_t = \frac{0,013}{1 + 0,0016 t}$$

5.4.3. - Conclusion

Le tableau n° 22 rassemble tous les résultats obtenus pour les valeurs des réserves au début du tarissement  $W_o$  pour les années 1972 - 1973 - 1974.

On constate, tout d'abord, que pour certaines sources, telles que Barm-Babounak, Barm-Babahadji ou Ghasr-Ghomchek, le coefficient  $\alpha$  obtenu par la formule de Maillet reste très constant au cours des trois années et le volume des réserves dynamiques est aussi constant.

Par contre, d'autres sources, telles que Pir-Benau, Mourdi ou Kaftarak montrent des fluctuations importantes d'une année à l'autre.

Ces fluctuations ne s'effectuant pas dans le même sens pour toutes les sources, le phénomène ne doit pas être lié à la pluviométrie mais paraît provenir de conditions géologiques différentes et en particulier de l'état de fissuration variable de chaque secteur, du voisinage plus ou moins grand des fractures importantes et peut-être aussi du voisinage des nappes d'alluvions.

Malgré tout, les volumes des réserves emmagasinés sont comparables d'une source à l'autre, sauf pour les sources de Kaftarak, Ab-tchenar ou Ghasr-ghomchek qui ont encore des réserves dynamiques plus importantes.

Tableau n° 22 - Comparaison des valeurs des coefficients de tarissement et des volumes des réserves des sources

Année	Source	1972		1973		1974							
		MAILLET		TISON		MAILLET		TISON					
		$\alpha$	$W_o$	$\alpha$	$W_o$	$\alpha$	$W_o$	$\alpha$	$W_o$				
	Barm-Delak	0,0046	2	0,0019	4,5	0,0057	1,5	0,0028	3	0,004	1,6	0,0017	3,5
	Moharlu	0,004	3	0,002	5	0,0037	1	0,0017	1,8	0,0074	1,6	0,003	2,9
	Barm-Pol Brendji	0,0029	7,7	0,0012	1,6	0,0017	12,7	0,0009	23	---	---	---	---
	Pir Benau	0,0037	5,6	0,0024	13	0,0012	14	0,00076	28	0,0014	12	0,0015	12
	Barm-Babounak	0,0025	7	0,0023	10	0,002	8	0,0016	13	0,0024	8,6	0,0015	13
	Barm-Babahadji	0,0037	7	0,0026	13	0,0038	4,5	0,0029	9	---	---	---	---
	Mourdi	0,0018	2,6	0,0021	2,4	0,0034	1,2	0,0024	2	0,0035	2,4	0,0025	3
	Kaftarak	0,0036	0,4	0,0019	0,7	0,0018	0,5	0,0008	1	0,0029	0,4	0,0022	0,5
	Ab-tchenar	0,01	0,17	0,006	0,2	0,007	0,06	---	---	---	---	---	---
	Sarvestan	0,0042	3	0,003	4,3	0,0056	1,2	0,0022	2	0,012	0,7	0,0064	1,4
	Ghasr-ghomchek	0,0008	1 62	0,00057	224	0,00094	100	0,0005	179	0,00094	100	0,00078	123

$W_o$  en  $10^6 \text{ m}^3$

Ces réserves traduisent l'importance du volume des vides dans les massifs et sont liés au coefficient d'emmagasinement.

On constate, par ailleurs, que les valeurs des réserves calculées par la méthode de Maillet, sont presque systématiquement égales à la moitié de celles calculées par la formule de Tison. Ce fait est à imputer à ce que malgré leur caractère fracturé et fissuré, les calcaires de la formation Asmari-Djahrom ne sont pas le siège d'un écoulement véritablement turbulent, mais se comportent plutôt dans leur ensemble comme un milieu poreux.

On peut enfin penser que les sources qui présentent les valeurs du coefficient de tarissement  $\alpha$  les plus fortes sont celles qui sont issues des massifs où les chenaux sont les plus développés dans les calcaires : Moharlu, Delak.

C'est d'ailleurs dans ces secteurs que l'on observe le mieux l'existence de tels chenaux.



Photo n° 13 - Source de Djuchak émergeant des calcaires fissurés et karstifiés Asmari-Djahrom -

## 5. 5. - DETERMINATION DE LA TRANSMISSIVITE T ET DU COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT S PAR LA COURBE DE TARISSEMENT

### 5. 5. 1 - Introduction

Les valeurs des paramètres T et S, obtenues à partir des pompages d'essais dans les puits et forages sur les calcaires, selon que ceux-ci sont placés ou non sur des points d'écoulement ou de drainage privilégiés, donnent souvent une image inexacte de la transmissivité et la porosité efficace, des parties des aquifères karstiques, qui sont intéressants dans la recherche des eaux souterraines.

Le tarissement des aquifères karstiques dans les conditions d'étiage offre des possibilités exceptionnellement favorables pour la détermination des paramètres T et S, grâce à la liaison fonctionnelle entre ces paramètres et la courbe de tarissement. Les paramètres T et S obtenus sont, par définition, plus valables que ceux calculés d'après les pompages d'essais.

Nous avons vu, précédemment que les valeurs de T obtenues par les pompages d'essais sur les puits des calcaires du bassin versant du Moharlu, varient dans un même puits en raison des variations de faciès des couches de calcaires dans la région et surtout de l'état de fissuration des couches traversées.

Pour cette raison, nous avons calculé les paramètres T et S par la méthode proposée par B. MIJATOVIC (1974) à la suite de travaux comparables à ceux de M. I. RORABAUGH (1966).

Cette méthode de l'évaluation des paramètres T et S se base sur l'analyse de la courbe de tarissement par l'application des fonctions exponentielles de type :  $Q_t = Q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$  (1) et sur l'analyse de l'évolution du niveau piézométrique des eaux souterraines karstiques, par l'application de l'équation d'approximation logarithmique de Theis et Jacob pour le régime d'écoulement permanent.

$$h = \frac{0.183 Q}{T} \times \lg \frac{2,25 t_0}{x^2 S} \quad (2)$$

### 5. 5. 2 - Calcul de la transmissivité (T)

Il est nécessaire, avant tout, par la courbe de tarissement de déterminer :

$\Delta r$ , l'indice d'emmagasinement exprimé en mm

et  $\Delta R$ , la variation des réserves dans la période considérée exprimée en mm.

Si on considère la vidange d'un aquifère karstique par les sources durant la période de déficit pluviométrique, donc au cours de la phase de tarissement, le quotient de ce volume par la superficie de l'aquifère-réservoir, représente la lame d'eau écoulee pendant le tarissement, et peut être défini comme l'indice d'emmagasinement.

D'après la courbe de tarissement, le volume d'eau emmagasiné à un instant t, au cours de l'étiage, exprimé en m<sup>3</sup> est défini par la formule :

$$V_t = \frac{Q_t}{\alpha} \quad \text{et pour } t = t_0$$

$$V_0 = \frac{Q_0 \times 86\,400}{\alpha}$$

L'indice d'emmagasinement sera donc :

pour  $t = t_0$

$$r_0 = \frac{V_0}{F} = \frac{Q_0 \cdot 86,4}{F \cdot \alpha}$$

F = surface du réservoir aquifère de la source calculé à partir de la carte du réseau hydrographique.

Pour  $t \neq t_0$

$$\Delta r_t = \frac{V_t}{F} = \frac{Q_t \cdot 86,4}{F \cdot \alpha}$$

Et la variation des réserves devient donc :

$$\Delta R = \Delta r_0 - \Delta r_t$$

Par analogie avec le pompage dans les ouvrages de captage des eaux souterraines, le débit de la source en période d'étiage, peut être considéré comme le pompage d'un débit variable, et les valeurs de  $\Delta R$  peuvent être considérées comme les rabattements successifs de la nappe karstique au cours d'un pompage en régime de non équilibre, ainsi on arrive à une fonction de la forme :

$$Y = a (\log b + \log x)$$

qui est représentée par l'équation d'approximation logarithmique (2).

La constante (a) est déterminée par :

$$a = \frac{0,183 Q}{T}$$

et les variables sont :

$$Y = \Delta R \text{ et } x = t$$

La droite représentative de cette fonction est obtenue en portant en abscisse les logarithmes du temps t, et en ordonnée les valeurs de  $\Delta R$ . Cette droite permet de calculer par l'application de la méthode des différences finies la constante a, donc la transmissivité (T).

La constante  $a = \frac{0,183 Q}{T}$  correspond au coefficient angulaire de la droite d'évolution ; c'est également la dérivée d'où :

$$\frac{0,183 Q}{T} = \frac{dy}{dx} = \frac{\delta \Delta R}{\delta (\lg t)}$$

La valeur de  $\frac{\delta \Delta R}{\delta (\lg t)}$  est donnée par l'accroissement du rabattement  $\Delta R$  dans un cycle logarithmique et nous avons :

$$C = \Delta R = \frac{0,183 Q}{T}$$

La valeur de T ainsi obtenue, il faudrait selon B. MIJATOVIC multiplier par un coefficient numérique (généralement 2) pour tenir compte de la totalité du cône de dépression, dans la zone de la source, mais cette façon d'opérer ne nous paraît pas convenable pour notre région en raison de la topographie.

Pour nos calculs, nous n'utiliserons pas ce coefficient correctif.

On montrera le calcul de la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement dans les exemples des courbes de tarissement des aquifères karstiques, des montagnes de Sabzpuchan, Ghareh et Kaftarak de la région de Chiraz.

### 5. 5. 2. 1 - La source de Pir-Benau

La source de Pir-Benau, au pied de la montagne de Sabzpuchan, constituée par des calcaires éocènes draine un aquifère d'une superficie de 26 km<sup>2</sup>. D'après les jaugeages du débit, on a établi la courbe de tarissement, nous arrivons à une valeur de 0,0037 pour le coefficient de tarissement.

Dans le tableau n° 24, on a donné les valeurs calculées des réserves dynamiques emmagasinées dans l'aquifère en période d'étiage, ainsi que les valeurs calculées des paramètres  $\Delta r$  et  $\Delta R$ . On a :

$$V_0 - V_{150} = 3146000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour la même période est :  $Q = 0,242 \text{ m}^3/\text{s}$   
D'après le tableau n° 24 et la figure n° 73 on aura donc :

$$T = \frac{0,183 \times 0,242}{0,132} = 0,34 \text{ m}^2/\text{s}$$

Dans la figure n° 73 pour  $\Delta R = 0$  on trouve  $t_0 = 1,9 \times 10^6 \text{ sec}$ .

Pour calculer S, on choisit l'implantation d'un piézomètre fictif à la limite de séparation entre le bassin versant de la source et le bassin versant voisin. Au ce point de rabattement doit être nul et on peut effectuer le calcul avec :

$$S = \frac{2,25 T t_0}{x^2}$$

Tableau n° 24

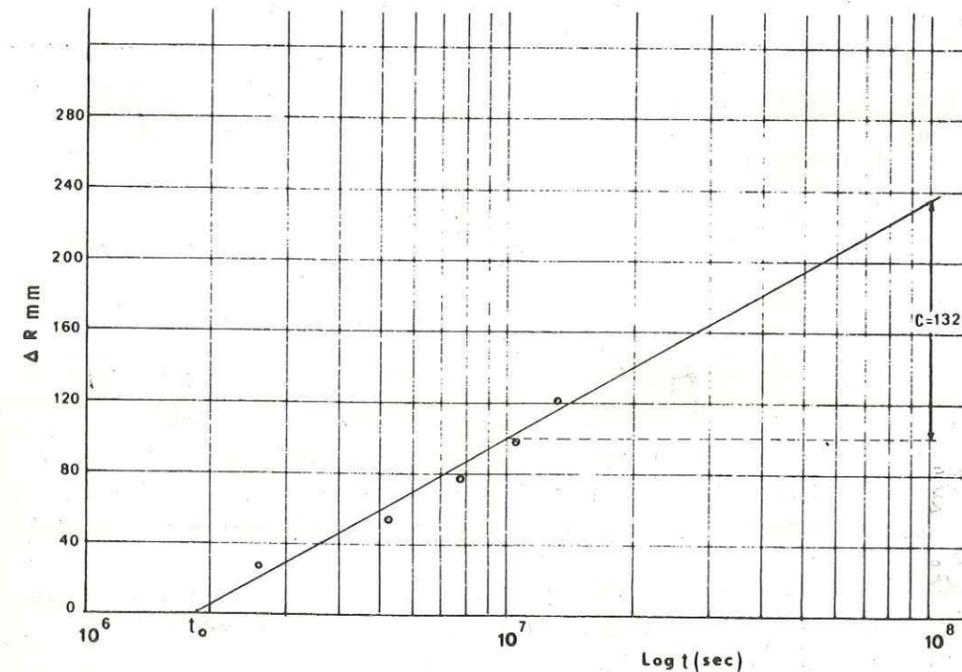
Q m <sup>3</sup> /s	Période à compter	Temps en sec.	Réserves dynamiques en m <sup>3</sup>	Indice d'emmagasinement	Variation des réserves en m
0.32	23 avril 72	0 0 0	7462000	287	0
0.29	après 30 jours	2 592 000	6760000	260	27
0.26	" 60 "	5 184 000	6084000	211	76
0.21	" 120 "	10 362 000	4914000	189	98

Le piézomètre fictif qui sert au calcul est placé à la distance de 4 km de la zone de la source de Pir-Benau qui correspond à la distance existant entre la source et la limite du bassin versant on a :

$$S = \frac{2,25 \times 0,34 \times 1,9 \times 10^6}{16 \times 10^6} = 0,085$$

$$S = 8,5 \%$$

Figure n° 73



5. 5. 2. 2 - Source de Barm-Polbrendji

La source de Barm-Polbrendji, au pied de la montagne Sabzpuhan, constituée par des calcaires éocènes avec une superficie d'alimentation de 25 km<sup>2</sup>. D'après les mesures de débit, on a établi la courbe de tarissement. Nous avons eu une valeur de 0,0029 pour le coefficient de tarissement.

Le tableau n° 25 donne les valeurs calculées des réserves dynamiques emmagasinées dans l'aquifère en période d'étiage, ainsi que les valeurs calculées des paramètres Δr et ΔR. On a :

$$V_0 - V_{129} = 2\,550\,000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour cette période est de 0,229 m<sup>3</sup>/s.

D'après le tableau n° 25 et la figure n° 74 on aura donc :

$$T = \frac{2,05183 \times 30,229}{250,132} = 0,32 \text{ m}^2/\text{s}$$

La figure n° 74 donne pour ΔR = 0, une valeur de 2 x 10<sup>6</sup> sec pour t. Le piézomètre fictif est encore placé à une distance de 5 km de la zone de la source de Pol-Brendji donc x = 5 000 m.

$$S = \frac{2,25 \times 0,32 \times 2 \times 10^6}{25 \times 10^6} = 0,057$$

$$S = 6 \%$$

Figure n° 74

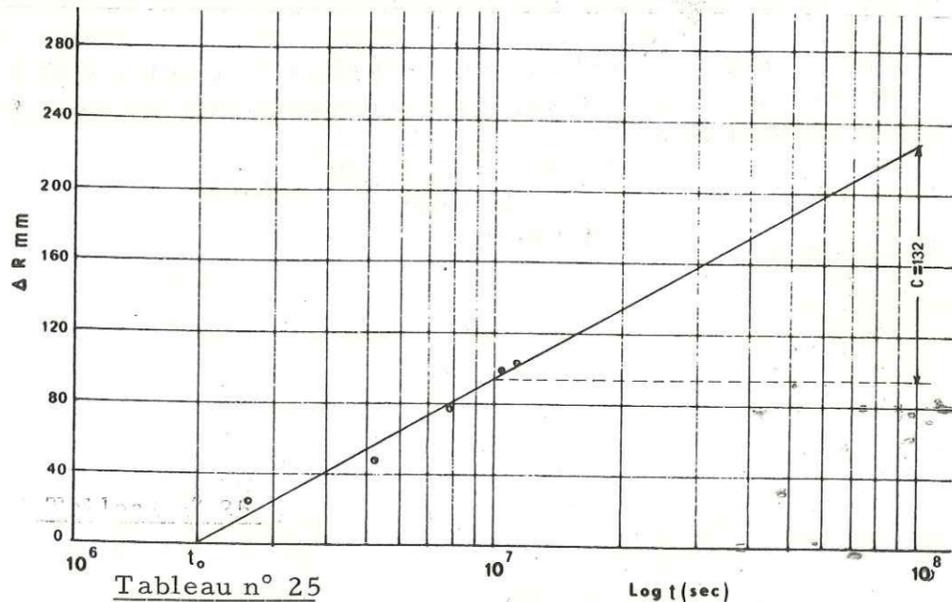


Tableau n° 25

Q m <sup>3</sup> /s	Période	Temps s	Réserves dynamiques m <sup>3</sup>	Δr mm	ΔR mm
0,258	22 mai 72	0	7 675 000	307	0
0,238	après 30 jours	2 592 000	7 100 000	284	23
0,218	" 60 jours	5 184 000	6 500 000	260	47
0,195	" 90 "	7 776 000	5 800 000	232	75
0,178	" 120 "	10 368 000	5 300 000	212	95
0,172	" 129 "	11 145 600	5 125 000	205	102

5. 5. 2. 3 - Source de Barm-Babahadji

La source de Barm-Babahadji, au pied de la montagne de Ghareh, constituée par les calcaires oligocènes (formation Asmari), a une surface d'alimentation de 28 km<sup>2</sup>.

D'après les mesures du débit, on a établi la courbe de tarissement, on y trouve, pour le coefficient de tarissement une valeur de 0,0037.

$$\alpha = 0,0037$$

Le tableau n° 26 donne les valeurs calculées des réserves emmagasinées dans l'aquifère en période d'étiage ainsi que les valeurs calculées des paramètres Δr et ΔR. On a :

$$V_0 - V_{120} = 3\,024\,000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour la même période est de 0,292 m<sup>3</sup>/s.

D'après le tableau n° 26 et la figure n° 75 on obtient donc :

$$T = \frac{0,183 \times 0,292}{0,128} = 0,42 \text{ m}^2/\text{s}$$

La figure n° 75 donne pour ΔR = 0 une valeur de 1,7 x 10<sup>6</sup>/s pour t. Le piézomètre fictif est placé à une distance de 5,5 km de la zone de la source de Babahadji, égale à celle existant entre la source et la limite du bassin versant donc : x = 5 500 m.

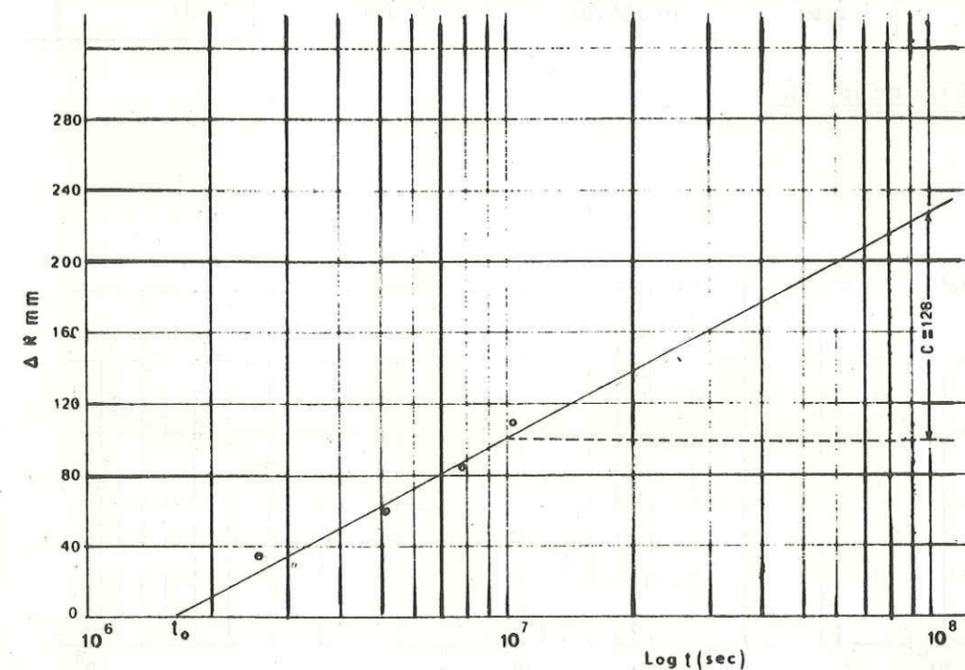
$$S = \frac{2,25 \times 0,42 \times 1,7 \times 10^6}{30 \times 10^6} = 0,054$$

$$S = 5,4 \%$$

Tableau n° 26

Période	Q m <sup>3</sup> /s	Temps en s	Réserves dynam. Réerves dynam m <sup>3</sup>	Δr mm	ΔR mm
21 juin 72	0,38		8 876 000	317	00
après 30 jours	0,34	2 592 000	7 952 000	284	33
" 60 "	0,31	5 184 000	7 252 000	259	58
" 90 "	0,28	7 776 000	6 552 000	234	83
" 120 "	0,250	10 368 000	5 852 000	209	108

Figure n° 75



5. 5. 2. 4 - La source du Moharlu

La source du Moharlu, au pied de la montagne de Ghareh, émerge des couches de calcaires marneux de la formation Gurpi. On suppose que la surface d'alimentation de cette source est de 20 km<sup>2</sup>. D'après les mesures du débit on a établi la courbe de tarissement. On y trouve, pour le coefficient de tarissement une valeur de 0,004.

Le tableau n° 27 donne les valeurs calculées des réserves emmagasinées dans l'aquifère, en période d'étiage ainsi que les valeurs calculées des paramètres  $\Delta r$  et  $\Delta R$ . On a :

$$V_0 - V_{120} = 1\,260\,000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour la période de 120 jours est de 0,122 m<sup>3</sup>/s.

D'après le tableau n° 27 et la figure n° 76 on aura donc :

$$T = \frac{0,183 \times 0,122}{0,076} = 0,29 \text{ m}^2/\text{s}$$

La figure n° 76 donne pour  $\Delta R = 0$  une valeur de  $1,6 \times 10^6$  sec pour  $t_0$ . Le piézomètre fictif est placé à une distance de 4,5 km de la zone de la source du Moharlu, donc  $x = 4\,500$  m.

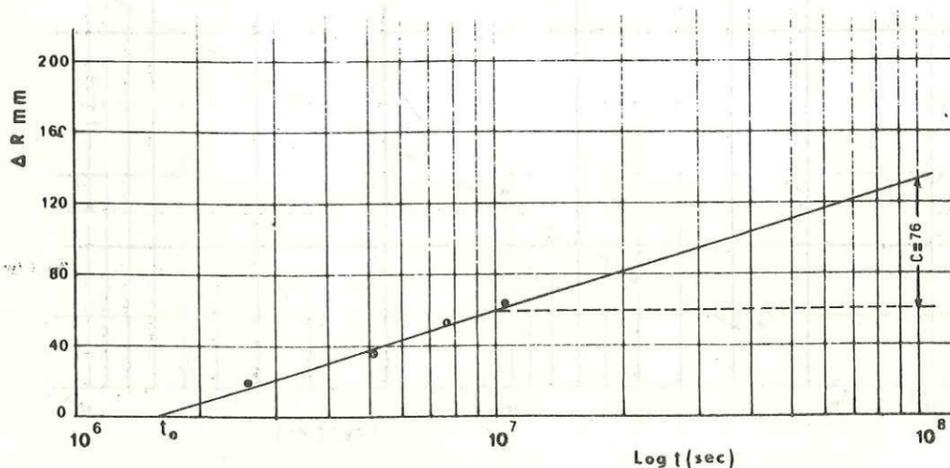
$$S = \frac{2,25 \times 0,29 \times 1,6 \times 10^6}{20 \times 10^6} = 0,052$$

$S = 5 \%$ .

Tableau n° 27

Période	Q m <sup>3</sup> /s	Temps en s	Réserves dynam. m <sup>3</sup>	$\Delta r$ mm	$\Delta R$ mm
22 juin 72	0.148	0	3 200 000	160	0
après 30 jours	0.13	2 592 000	2 800 000	140	20
" 60 "	0.115	5 184 000	2 480 000	124	36
" 90 "	0.101	7 776 000	2 180 000	109	51
" 120 "	0.09	10 368 000	1 940 000	97	63

Figure n° 76



5. 5. 2. 5 - Source de Barm-Delak

La source Barm-Delak, au pied de la montagne Kaftarak, est alimentée par 22 km<sup>2</sup> de calcaires oligocènes de la formation Asmari. On a établi la courbe de tarissement de cette source d'après les mesures des débits, on y trouve, pour le coefficient de tarissement ( $\alpha$ ) une valeur de 0,0046.

Dans le tableau n° 28 on a les valeurs calculées des réserves emmagasinées dans l'aquifère en période d'étiage, ainsi que les valeurs calculées des paramètres  $\Delta r$  et  $\Delta R$ . On a :

$$V_0 - V_{150} = 1\,012\,000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour la période de 150 jours est de 0,078 m<sup>3</sup>/s.

A partir du tableau n° 28 et de la figure n° 77, on aura donc :

$$T = \frac{0,183 \times 0,078}{0,052} = 0,27 \text{ m}^2/\text{s}$$

La figure n° 77 donne pour  $\Delta R = 0$  une valeur de  $1,8 \times 10^6$  sec pour  $t_0$ . Le piézomètre fictif est placé à une distance de 4,5 km de la zone de la source de Delak, donc  $x = 4\,500$  m.

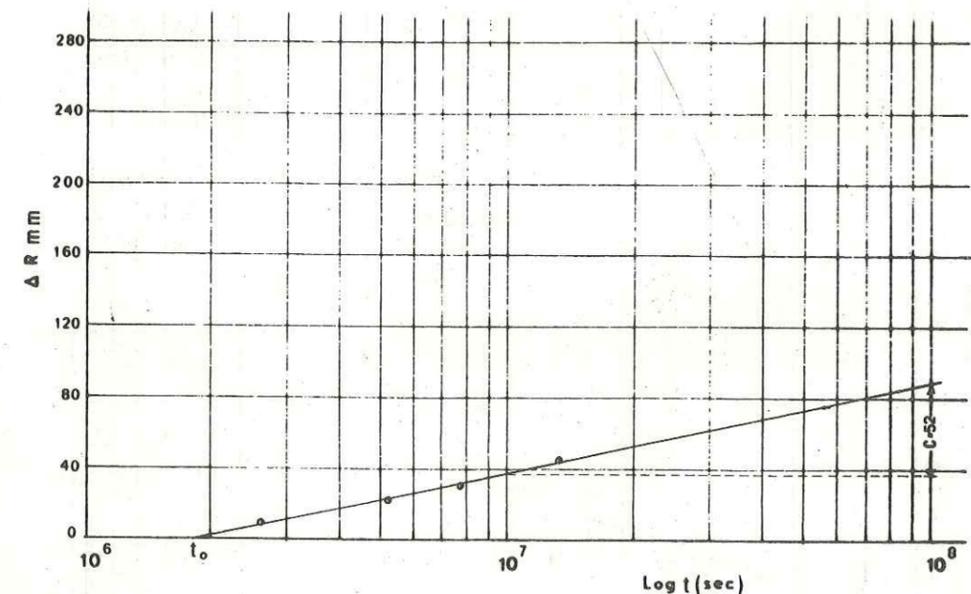
$$S = \frac{2,25 \times 0,27 \times 1,8 \times 10^6}{20 \times 10^6} = 0,055$$

$S = 5,5 \%$

Tableau n° 28

Période	Q m <sup>3</sup> /s	Temps en s	Réserve dynam. m <sup>3</sup>	$\Delta r$ mm	$\Delta R$ mm
21 mai 72	0.112	0	2 112 000	96	0
après 30 jours	0.098	2 592 000	1 848 000	84	12
" 60 "	0.085	5 184 000	1 606 000	73	23
" 90 "	0.075	7 776 000	1 408 000	64	32
" 120 "	0.065	10 368 000	1 232 000	56	40
" 150 "	0.058	12 960 000	1 100 000	50	46

Figure n° 77



5. 5. 2. 6 - Source de Barm-Babounak

La source de Barm-Babounak est au pied de la montagne de Kaftarak. D'après la carte topographique, on suppose que cette source draine un aquifère d'une superficie de 20 km<sup>2</sup>. A partir des jaugeages de débit, on a établi la courbe de tarissement, nous arrivons à une valeur de 0,0024 pour le coefficient de tarissement.

Dans le tableau n° 29 on a donné des valeurs calculées des réserves dynamiques emmagasinées dans l'aquifère, en période d'étiage, ainsi que les valeurs calculées des paramètres Δr et ΔR. On a :

$$V_0 - V_{90} = 1\,380\,000 \text{ m}^3$$

Le débit moyen pour 90 jours est de 0,177 m<sup>3</sup>/s. D'après le tableau n° 29 et de la figure n° 78 on aura donc :

$$T = \frac{0,183 \times 0,177}{0,09} = 0,36 \text{ m}^2/\text{s}$$

Pour la figure n° 78 pour ΔR = 0 on a de 1,4 x 10<sup>6</sup> sec pour t<sub>0</sub>. Le piézomètre fictif est placé à 4 km de la source, c'est-à-dire à la limite amont du bassin versant.

On a donc pour la valeur de (S) :

$$S = \frac{2,25 \times 0,36 \times 1,4 \times 10^6}{16 \times 10^6} = 0,07$$

S = 7 %

Tableau n° 29

Période	Q <sub>3</sub> m <sup>3</sup> /s	Temps en s	Réserve dynam. m <sup>3</sup>	Δr mm	ΔR mm
21 juin 72	0.2	0	7 200 000	360360	0
après 30 jours	0.185	2 592 000	6 660 000	333	27
" 60 "	0.174	5 184 000	6 260 000	313	47
" 90 "	0.162	7 776 000	5 820 000	291	69

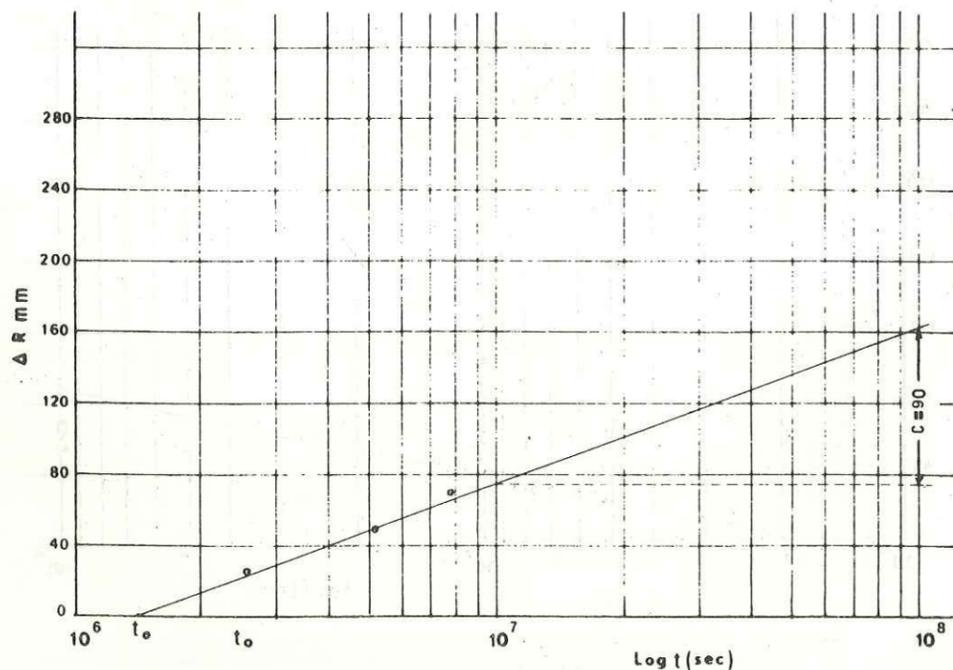


Fig n° 78

5. 5. 2. 7 - Conclusion

Tous les résultats obtenus par la méthode de Mijatovic nous amènent à une bonne concordance en ce qui concerne les valeurs du coefficient d'emmagasinement qui est compris entre 5 et 8,5 %, ce qui constitue une valeur assez élevée et permet donc d'expliquer les réserves importantes que l'on rencontre dans les massifs calcaires du bassin du Moharlu.

Ces valeurs sont nettement plus élevées que celles obtenues dans les essais de pompage, mais les conditions expérimentales paraissent plus favorables, car elles intéressent des volumes du massif beaucoup plus considérables. Une erreur pourrait provenir de la détermination de la limite de la zone amont du bassin versant, mais une bonne connaissance de la structure géologique de la région permet de restreindre ce risque.

En ce qui concerne les transmissivités, les valeurs obtenues sont beaucoup plus fortes que celles résultant des essais de pompage, bien que présentant des analogies quant à l'ordre de grandeur (tableau n° 30).

Là encore on voit apparaître les influences de la fissuration et de la fracturation que nous allons étudier pour préciser la "perméabilité équivalente" des calcaires de la formation Asmari-Djahrom.

DETERMINATION DE LA "PERMEABILITE EQUIVALENTE"

Pour l'estimation de la perméabilité, à partir de l'étude statistique de la fissuration, on a appliqué la méthode de L. Kiraly qui a étudié en 1969 l'anisotropie et l'hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés.

En connaissant les trois paramètres des principaux groupes de fissures : l'orientation  $\vec{n}$ , la fréquence f et l'ouverture d, et en se référant à la direction et au pendage des strates on peut calculer le tenseur de perméabilité équivalente par la formule suivante :

$$\bar{K} = \sum_i \bar{K}_i \text{ avec :}$$

$$\bar{K}_i = \frac{g}{12\nu} f_i d_i^3 \bar{A}_i$$

où :

g = accélération due à la gravité

ν = viscosité cinématique de l'eau

f<sub>i</sub> = fréquence du i<sup>ème</sup> groupe

$\bar{K}_i$  = tenseur de perméabilité du i<sup>ème</sup> groupe

$\bar{A}_i = (I - n_i \otimes n_i)$

I = matrice identité

d<sub>i</sub> = ouverture moyenne des fissures du i<sup>ème</sup> groupe

$n_i \otimes n_i$  = produit tensoriel de la normale au plan de fissure du i<sup>ème</sup> groupe par elle-même

Si (x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>) sont les composantes du vecteur normal n, on aura :

$$\vec{n} \otimes \vec{n} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 x_2 & x_1 x_3 \\ x_2 x_1 & x_2^2 & x_2 x_3 \\ x_3 x_1 & x_3 x_2 & x_3^2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{A} = (I - \vec{n} \otimes \vec{n}) = \begin{bmatrix} (1 - x_1^2) & -x_1 x_2 & -x_1 x_3 \\ -x_2 x_1 & (1 - x_2^2) & -x_2 x_3 \\ -x_3 x_1 & -x_3 x_2 & (1 - x_3^2) \end{bmatrix}$$

Les  $f_i$  et  $n_i$  sont estimées d'après les mesures de terrain ; les  $d_i$  sont estimées par hypothèse, car il faut signaler que l'ouverture des diaclases est difficilement mesurable. Dans le cas des divers massifs du bassin versant du Moharlu, on a pris pour valeur de  $d$  5 % de l'ouverture  $D$  qu'on a observé sur le terrain à la surface des affleurements.

Nous avons appliqué cette méthode d'estimation de la perméabilité pour neuf secteurs des différents massifs calcaires fissurés de la région de Chiraz.

5.6.1. - Premier exemple de Darak

Le pendage de la couche est de 25° vers le Nord, la direction des strates est de 140° N. Ici, on a quatre familles de fissures avec :

$$f_1 = 0,13 ; f_2 = 0,11 ; f_3 = 0,12 \text{ et } f_4 = 0,06 \text{ fissures par m}^2.$$

Les ouvertures apparentes en surface sont :

$$D_1 = 3,98 \text{ cm} ; D_2 = 5,04 \text{ cm} ; D_3 = 6,63 \text{ cm} ; D_4 = 4,9 \text{ cm}.$$

Nous adoptons donc pour le calcul les valeurs d'ouverture suivantes :

$$d_1 = 2 \text{ mm} ; d_2 = 2,5 \text{ mm} ; d_3 = 3 \text{ mm} ; d_4 = 2,5 \text{ mm et}$$

$$S_1 = 85^\circ ; S_2 = 120^\circ ; S_3 = 150^\circ ; S_4 = 25^\circ.$$

Il faut ajouter que, pour tous les exemples on a pris comme axe des  $x_0$  la direction du pendage, comme axe des  $Y_0$  la direction des strates et comme axe des  $z$  la normale aux strates.

Les fissures sont considérées comme perpendiculaires à la stratification.

Les composantes des normales aux plans de fissures, dans le plan  $x_0 Y_0$  sont dessinées sur la figure suivante.

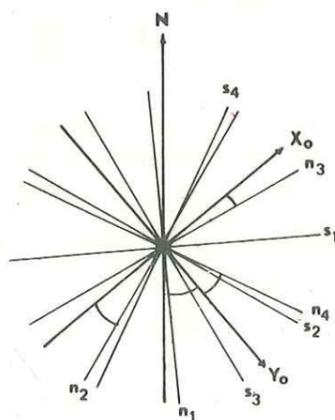


Fig 79

Les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices suivantes :  
 $n_1 = [-0,574, 0,819, 0]$  ;  $n_2 = [-0,94, 0,342, 0]$  ;  $n_3 = [0,985, 0,174, 0]$  ;  
 $n_4 = [0,423, 0,906, 0]$ .

On a pour tenseurs  $\bar{A}_i$  :

$$\bar{A}_1 = \begin{pmatrix} 0,67 & 0,47 & 0 \\ 0,47 & 0,33 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \bar{A}_2 = \begin{pmatrix} 0,12 & 0,32 & 0 \\ 0,32 & 0,88 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \bar{A}_3 = \begin{pmatrix} 0,03 & -0,17 & 0 \\ 0,17 & 0,97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \bar{A}_4 = \begin{pmatrix} 0,82 & -0,38 & 0 \\ -0,38 & 0,18 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On a pour tenseurs  $\bar{K}_i$  :

$$\bar{K}_1 = \begin{pmatrix} 0,54 & 0,38 & 0 \\ 0,38 & 0,26 & 0 \\ 0 & 0 & 0,8 \end{pmatrix} 10^{-3} \quad \bar{K}_2 = \begin{pmatrix} 0,15 & 0,41 & 0 \\ 0,41 & 1,14 & 0 \\ 0 & 0 & 1,3 \end{pmatrix} 10^{-3} \quad \bar{K}_3 = \begin{pmatrix} 0,08 & -0,44 & 0 \\ 0,44 & 2,52 & 0 \\ 0 & 0 & 2,6 \end{pmatrix} 10^{-3} \quad \bar{K}_4 = \begin{pmatrix} 0,57 & -0,27 & 0 \\ -0,27 & 0,12 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 \end{pmatrix} 10^{-3}$$

Donc on a :

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} 1,34 & 0,08 & 0 \\ 0,08 & 4,04 & 0 \\ 0 & 0 & 5,4 \end{pmatrix} 10^{-3} \text{ in/s.}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

Connaissant l'orientation des couches dans la base des coordonnées géographiques ordinaires, on calcule facilement la matrice de transition  $P$  et son inverse  $P^{-1}$ . Dans la base des coordonnées géographiques, le tenseur de perméabilité  $K$

$$\bar{K}_p = P^{-1} \bar{K} P.$$

Pour le premier exemple de la montagne de Darak, on a calculé la matrice  $\bar{K}_p$  parce qu'on avait un pendage relativement fort (25°).

Cette opération n'amène pas une grande différence même dans ce cas, aussi nous n'avons pas répété ce changement de base pour les autres secteurs étudiés :

5.6.1.1 - Changement de base pour le premier exemple de Darak

$P$  = matrice de changement de base

$P^{-1}$  = matrice

$$\bar{K} = P^{-1} \bar{K}_p P$$

D'une manière générale, pour un tel changement de base on a :

$$P = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Dans le cas qui nous intéresse ici, cela donne :

$$P = \begin{pmatrix} 0,906 & 0 & -0,423 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0,423 & 0 & 0,906 \end{pmatrix} \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} 0,906 & 0 & 0,423 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0,423 & 0 & 0,906 \end{pmatrix}$$

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} 1,34 & 0,08 & 0 \\ 0,08 & 4,04 & 0 \\ 0 & 0 & 5,4 \end{pmatrix} 10^{-3} \text{ d'où } \bar{K}_p = \begin{pmatrix} 1,21 & 0,07 & 0,57 \\ 0,07 & 4,04 & 0,03 \\ 2,28 & 0 & 4,89 \end{pmatrix} 10^{-3}$$

$$\text{et } P^{-1} \bar{K}_p P = \begin{pmatrix} 2,06 & 0,07 & 1,55 \\ 0,07 & 4,04 & 0,03 \\ 1,55 & -0,03 & 4,67 \end{pmatrix} 10^{-3}$$

5.6.2 - Deuxième exemple de Darak

Près du puits n° 2. La direction des strates est de 140°, le pendage des couches est de 25° vers le Nord.

Ici on a observé deux familles principales de fissures avec :

$$D_1 = 4 \text{ cm} \quad f_1 = 0,35 \quad f_2 = 0,35$$

et :

$$D_2 = 5 \text{ cm} \quad d_1 = 2 \text{ mm} \quad d_2 = 2 \text{ mm}$$

Ces fissures sont subverticales et de direction  $S_2 = 85^\circ$   $S_1 = 170^\circ$

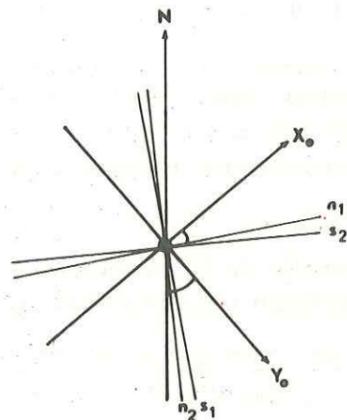


Figure n° 80

A partir de la figure n° 80, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.866, 0.5, 0] ; n_2 = [-0.574, 0.819, 0]$$

On a pour les tenseurs  $\bar{A}_i$  :

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.25 & -0.43 & 0 \\ -0.43 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.67 & 0.47 & 0 \\ 0.47 & 0.33 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

on a :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0.92 & 0.04 & 0 \\ 0.04 & 1.08 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

et :

$$\bar{K} = \frac{g}{12 \nu} f_i d_i^3 \bar{A}$$

avec :

$$f_i = 0.35 \text{ et } d_i = 0.002 \text{ m}$$

donc :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 1.8 & 0.08 & 0 \\ 0.08 & 2.2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} 10^{-3} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.3. - Troisième exemple de Darak

Direction des strates :  $140^\circ \text{ N}$

Pendage des couches :  $25^\circ$  vers le Nord.

On a considéré deux familles de fissures avec :

$$D_1 = 1,4 \text{ cm} \quad f_1 = 1.6 \text{ par m} \quad d_1 = 0.001 \text{ m} \quad S_1 = 0^\circ$$

$$D_2 = 4 \text{ cm} \quad f_2 = 0.15 \text{ " } \quad d_2 = 0.002 \text{ m} \quad S_2 = 90^\circ$$

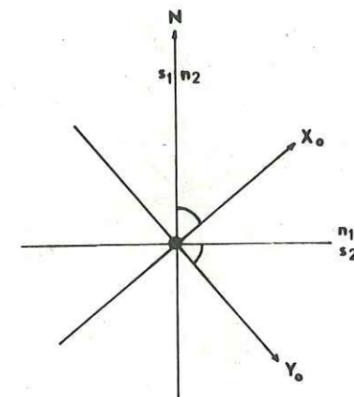


Figure n° 81

D'après la figure n° 81, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.766, 0.643, 0] ; n_2 = [0.643, -0.766, 0]$$

On a pour les tenseurs  $\bar{A}_i$

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.41 & -0.49 & 0 \\ -0.49 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.59 & 0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.41 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

puis :

$$\bar{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.53 & -0.64 & 0 \\ -0.64 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0 & 1.3 \end{bmatrix} 10^{-3} \quad \bar{K}_2 = \begin{bmatrix} 0.59 & 0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.41 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} 10^{-3} \text{ m/s}$$

donc on a :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 1.1 & -0.15 & 0 \\ 0.15 & 1.18 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3 \end{bmatrix} 10^{-3} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.4. - Exemple de Kaftarak

Direction des strates :  $110^\circ \text{ N}$

Pendage des couches :  $15^\circ$  vers le Sud.

On a distingué quatre familles de fissures avec :

$$f_1 = 0.16 ; f_2 = 0.32 ; f_3 = 0.37 ; f_4 = 0.12$$

$$S_1 = 15^\circ ; S_2 = 100^\circ ; S_3 = 50^\circ ; S_4 = 145^\circ$$

L'ouverture des fissures est 1 mm  $d_i = 0.001$  m

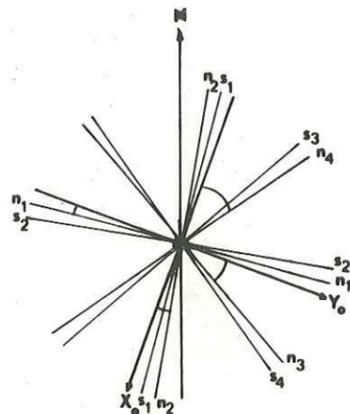


Figure n° 82

A partir de la figure n° 82, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.087, -0.996, 0] ; n_2 = [0.029, -0.174, 0] ; n_3 = [0.5, 0.866, 0]$$

$$n_4 = [0.819, 0.574, 0]$$

On a pour les tenseurs  $\bar{A}_i$

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.99 & 0.09 & 0 \\ 0.09 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.029 & -0.17 & 0 \\ -0.17 & 0.0097 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \bar{A}_3 = \begin{bmatrix} 0.75 & -0.43 & 0 \\ -0.43 & 0.25 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \bar{A}_4 = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.47 & 0 \\ 0.47 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Et par suite :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 3.2 & -0.9 & 0 \\ -0.9 & 3.2 & 0 \\ 0 & 0 & 6.4 \end{bmatrix} 10^{-3} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.5. - Premier exemple de Babakuhi

Direction des strates : 120° N

Pendage : 25° vers le Nord.

Ici, on a distingué trois familles de fissures avec :

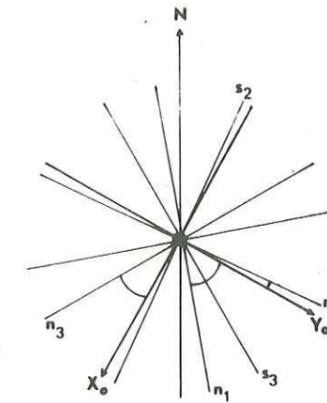
$$D_1 = 14 \text{ cm} ; D_2 = 6 \text{ cm} ; D_3 = 12,5 \text{ cm}$$

$$f_1 = 0.55 ; f_2 = 0.2 ; f_3 = 0.1 \text{ par m}$$

$$d_1 = 0.006 ; d_2 = 0.002 ; d_3 = 0.006 \text{ m}$$

$$S_1 = 80^\circ ; S_2 = 25^\circ ; S_3 = 150^\circ$$

Figure n° 83



A partir de la figure n° 83, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.766, 0.643, 0] ; n_2 = [-0.087, 0.996, 0] ; n_3 = [0.866, -0.5, 0]$$

On a, pour les tenseurs  $\bar{A}_i$

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} 0.41 & -0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} 0.99 & 0.09 & 0 \\ 0.09 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \bar{A}_3 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.43 & 0 \\ 0.43 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

et :

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 4.51 & -3.64 & 0 \\ -3.64 & 6.59 & 0 \\ 0 & 0 & 11.1 \end{bmatrix} 10^{-2} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.6. - Deuxième exemple de Babakuhi

Direction des strates : 120° N

Pendage : 25° vers le Nord.

On a distingué trois familles de fissures avec :

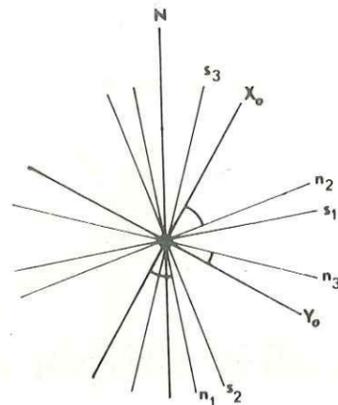
$$D_1 = 20 \text{ cm} ; D_2 = 9,6 \text{ cm} ; D_3 = 8,8 \text{ cm}$$

$$f_1 = 0.12 ; f_2 = 0.02 ; f_3 = 0.02 \text{ par m}$$

$$d_1 = 0.01 ; d_2 = 0.005 \text{ m} ; d_3 = 0.005 \text{ m}$$

$$S_1 = 80^\circ ; S_2 = 160^\circ ; S_3 = 15^\circ$$

Figure n° 84



A partir de la figure n° 84, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = |0.766, 0.643, 0|; n_2 = |0.766, 0.643, 0|; n_3 = |0.259, 0.966, 0|$$

On a pour les tenseurs  $\bar{A}_i$

$$\bar{A}_1 = \begin{vmatrix} 0.41 & 0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \bar{A}_2 = \begin{vmatrix} 0.41 & 0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \bar{A}_3 = \begin{vmatrix} 0.93 & -0.25 & 0 \\ -0.25 & 0.07 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

On a donc :

$$\bar{K} = \begin{vmatrix} 4.37 & 4.95 & 0 \\ 4.95 & 6.03 & 0 \\ 0 & 0 & 10.4 \end{vmatrix} 10^{-2} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.7. - Exemple de Sabzpuchan

Direction des strates : 150° N

Pendage : 25° vers le Nord

On a distingué deux familles de fissures avec :

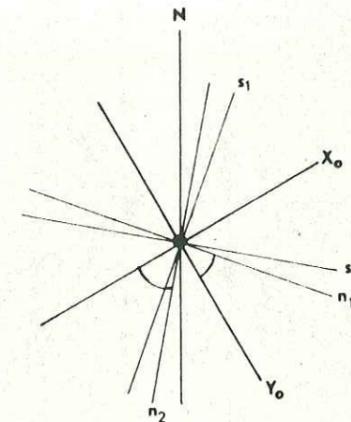
$$f_1 = 1.83 \quad f_2 = 0.17 \text{ par m}^2$$

$$D_1 = 4.8 \text{ cm} \quad D_2 = 2 \text{ cm}$$

$$d_1 = 2.5 \text{ mm} \quad d_2 = 1 \text{ mm}$$

$$S_1 = 20^\circ \quad S_2 = 100^\circ$$

Figure n° 85



A partir de la figure n° 85, les normales  $n_i$  sont représentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = |0.643, 0.766, 0|; n_2 = |-0.643, 0.766, 0|$$

On a pour les tenseurs  $\bar{A}_i$

$$\bar{A}_1 = \begin{vmatrix} 0.59 & -0.49 & 0 \\ -0.49 & 0.41 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \bar{A}_2 = \begin{vmatrix} 0.59 & 0.49 & 0 \\ 0.49 & 0.41 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

On a donc :

$$\bar{K} = \begin{vmatrix} 1.38 & -1.14 & 0 \\ 1.14 & 0.95 & 0 \\ 0 & 0 & 2.3 \end{vmatrix} 10^{-2} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{K}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.8. - Premier exemple de Ghasr-ghomcheh

Direction des strates : 120° N

Pendage des couches : 8° vers le Sud

Ici, on a distingué deux familles de fissures avec :

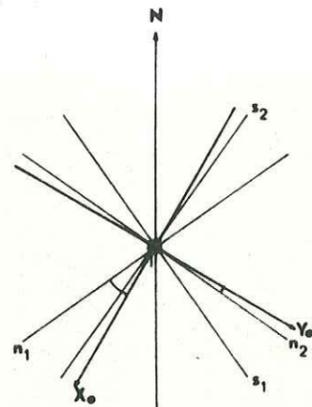
$$f_1 = 2 \quad f_2 = 0.2 \text{ par m}$$

$$d_1 = 0.002 \quad d_2 = 0.002 \text{ m}$$

$$D_1 = 3 \text{ cm} \quad D_2 = 4 \text{ cm}$$

$$S_1 = 145^\circ \quad S_2 = 35^\circ$$

Figure n° 86



A partir de la figure n° 86, les normales  $n_i$  sont présentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.906, -0.423, 0] ; n_2 = [0.087, 0.996, 0]$$

On a, pour tenseurs  $\bar{\bar{A}}_i$

$$\bar{\bar{A}}_1 = \begin{vmatrix} 0.18 & 0.38 & 0 \\ 0.38 & 0.82 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \bar{\bar{A}}_2 = \begin{vmatrix} 0.99 & -0.087 & 0 \\ -0.087 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

et :

$$\bar{\bar{K}} = \begin{vmatrix} 3.6 & 4.8 & 0 \\ 4.8 & 10.7 & 0 \\ 0 & 0 & 14.3 \end{vmatrix} 10^{-3} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{\bar{K}}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.9. - Deuxième exemple de Ghasr-ghomcheh

Direction des strates : 120° N

Pendage : 8° vers le Sud.

On a distingué trois familles de fissures avec :

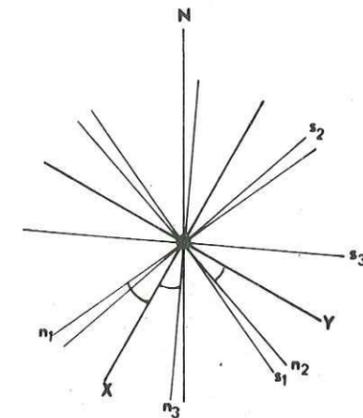
$$D_1 = 7.7 \text{ cm} \quad D_2 = 3.3 \text{ cm} \quad D_3 = 38.5 \text{ cm}$$

$$f_1 = 0.71 \quad f_2 = 0.19 \quad f_3 = 0.02$$

$$d_1 = 0.004 \quad d_2 = 0.002 \quad d_3 = 0.02 \text{ m}$$

$$S_1 = 145^\circ \quad S_2 = 50^\circ \quad S_3 = 95^\circ$$

Figure n° 87



A partir de la figure n° 87, les normales  $n_i$  sont présentées par les matrices colonnes suivantes :

$$n_1 = [0.906, -0.423, 0] ; n_2 = [0.342, 0.94, 0] ; n_3 = [0.906, 0.423, 0]$$

On a pour tenseurs  $\bar{\bar{A}}_i$

$$\bar{\bar{A}}_1 = \begin{vmatrix} 0.18 & 0.38 & 0 \\ 0.38 & 0.82 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad \bar{\bar{A}}_2 = \begin{vmatrix} 0.88 & -0.32 & 0 \\ -0.32 & 0.12 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \bar{\bar{A}}_3 = \begin{vmatrix} 0.18 & 0.38 & 0 \\ -0.38 & 0.82 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

On a donc :

$$\bar{\bar{K}} = \begin{vmatrix} 0.66 & 1.35 & 0 \\ 1.35 & 3.02 & 0 \\ 0 & 0 & 3.83 \end{vmatrix} 10^{-2} \text{ m/s}$$

La matrice  $\bar{\bar{K}}$  est le tenseur de perméabilité dans la base des couches.

5.6.10 - Conclusion

On peut donc estimer, d'après l'ensemble des résultats obtenus par cette méthode que la perméabilité verticale, c'est-à-dire celle qui affecte les diaclases et les fissures varie donc de :

0,23 à  $11 \times 10^{-2}$  m/s, tandis que la perméabilité selon les plans de stratification qui coïncident avec le pendage varie, elle, de 0,12 à  $5,5 \times 10^{-2}$  m/s.

Ceci montre que les joints de bancs sont assez fortement décollés et que l'eau peut y circuler aisément. La "perméabilité équivalente" de l'ensemble des calcaires peut donc être considérée comme comprise entre 0,15 et  $7,4 \times 10^{-2}$  m/s, cette dernière valeur correspond aux zones les plus fracturées et fissurées.

Il faut souligner que la méthode utilisée ici est contestable du fait de l'emploi obligatoire d'hypothèses de travail concernant en particulier l'ouverture des fissures en profondeur et ne doit pas être considérée comme absolument rigoureuse. Elle prend toutefois sa valeur lorsqu'elle permet, comme nous l'avons fait de comparer entre elles les diverses méthodes de calcul de la perméabilité.

Pour le calcul exposé ci-dessus, le facteur qui a de loin le plus d'importance dans les familles est l'ouverture des fissures  $d_i$ . Compte tenu des conditions géo-

Montagne	Essai de pompage				Méthode de tarissement			Méthode de fissuration	
	puits	T en m <sup>2</sup> /s	S en %	K en m/s	Source	T en m <sup>2</sup> /s	S en %	K en m/s	
Zarghan	Puits Abbarik	0.935	--	--	--	--	--	--	--
Kuh-Darak	n° 2	0.17	--	--	--	--	--	0.36 x 10 <sup>-2</sup>	
	n° 3	0.035	--	--	--	--	--	0.26 x 10 <sup>-2</sup>	
	n° 4	0.18	--	--	--	--	--	0.15 x 10 <sup>-2</sup>	
Kuh-Gharali	--	--	--	--	Baba hadji	0.42	5.4	--	--
	--	--	--	--	Moharlu	0.29	5.5	--	--
Kuh-Sabzpuhan	--	--	--	--	Pir-Benau	0.34	18.5	1.54 x 10 <sup>-2</sup>	
	--	--	--	--	Pol-brendji	0.32	16.5	--	--
Chiraz	n° 5	0.22	--	--	Delak	0.27	5.5	0.42 x 10 <sup>-2</sup>	
	BabaKuhi et Kaftarak	--	--	--	Babounak	0.36	0.7	--	--
Sarvestan	--	--	--	--	--	--	--	7.4 x 10 <sup>-2</sup>	
	n° 6	0.2	--	--	--	--	--	6.9 x 10 <sup>-2</sup>	
Djehrom	n° 1	0.08	--	--	--	--	--	--	--
	n° 2	0.4	--	--	--	--	--	--	--
Lar	n° 3	0.2	--	--	--	--	--	--	--
	n° 9	0.06	--	--	--	--	--	--	--
Bardar Abas	n° 1	0.025	--	22 x 10 <sup>-2</sup>	--	--	--	--	--
	Piezomètre	0.04	3.5	--	--	--	--	--	--
Chasr-ghomech	--	--	--	--	--	--	--	0.95 x 10 <sup>-2</sup>	
	--	--	--	--	--	--	--	2.5 x 10 <sup>-2</sup>	

Comparaison des caractéristiques hydrodynamiques des calcaires fissurés de la région de Chiraz déterminées par les diverses méthodes

logiques locales nous avons fait l'hypothèse que cette ouverture était de 5 % par rapport à celle qui a été mesurée en surface (D<sub>1</sub>). Avec cette valeur on constate que les résultats donnés par la méthode de Kiraly coïncident de façon assez satisfaisante avec ceux obtenus par les méthodes classiques (tableau n° 30).

Si le coefficient de 5 % peut paraître arbitraire, il comprend en fait au resserrement observé des fissures en profondeur. Le choix de ce coefficient doit être fait pour chaque massif en fonction de la lithologie et de la structure et sera donc variable d'une région à l'autre.

Il est certain en effet que les résultats obtenus par la méthode d'étude de la fissuration tiennent compte essentiellement des conditions géométriques locales mais ne peuvent pas rendre compte de l'état de rugosité des surfaces des fissures et des interbankes et des phénomènes de tension superficielle liés à la nature propre des minéraux constituant les sédiments.

### 5.7. - CONCLUSIONS GENERALES

L'emploi de toutes les méthodes d'études des caractères hydrodynamiques des aquifères karstiques du bassin versant du Moharlu nous amène à constater que, la perméabilité des calcaires Asmari-Djahrom, calculée par la méthode de L. KIRALY est comprise entre 7,4 x 10<sup>2</sup> et 0,15 x 10<sup>-2</sup> m/s, soit une valeur moyenne de 2,27 x 10<sup>-2</sup> m/s qui coïncide avec la valeur de K trouvée par la méthode de DUPUIT lors d'un essai de pompage. Il s'agit donc d'une perméabilité élevée.

La transmissivité des nappes contenues dans ces calcaires, calculée par les essais de pompage, se situe entre 0,025 m<sup>2</sup>/s et 0,935 m<sup>2</sup>/s, tandis que les valeurs obtenues par interprétation des courbes de tarissement sont comprises entre 0,27 m<sup>2</sup>/s et 0,42 m<sup>2</sup>/s.

Si les valeurs de transmissivité pour chaque massif ou les valeurs moyennes d'ensemble diffèrent d'un coefficient 3 selon la méthode employée, il n'en reste pas moins que l'ordre de grandeur des résultats obtenus est proche du mètre carré par seconde.

Cette valeur très élevée permet d'expliquer les forts débits observés ou disponibles dans les massifs calcaires de la région de Chiraz.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement qui varient suivant les lieux et les méthodes de calcul employées entre 3 et 8,5 % sont également des valeurs fortes qui confirment l'intérêt hydrogéologique des massifs calcaires dans le bassin du Moharlu et l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux qu'ils contiennent nous permettra de mieux comprendre la façon dont les eaux circulent ou sont stockées dans ces massifs.

## CHAPITRE 6

### ETUDE DES CARACTERES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DES SOURCES ET DES PUIITS D'EXPLORATION

---

Dans le bassin du Moharlu, on trouve environ 34 sources.

En raison des possibilités de mesures, on a contrôlé chaque mois, seulement 11 sources et chaque saison 8 sources, et on a été contraint de négliger les autres sources, à cause de la proximité du lac et des marécages entourant certaines émergences.

#### 6.1. - CARACTERES PHYSIQUES

Les paramètres physiques que l'on va étudier dans cette partie sont débit- température - conductivité - pH.

##### 6.1.1 - Débit

Les débits ont été mesurés, soit par le micromoulinet, soit par flotteur.

Au point de vue de la variabilité du débit (R) on peut diviser les sources du bassin du Moharlu en deux groupes :

##### 6.1.1.1 - Groupe 1 : les sources variables

Le coefficient de variabilité R (le rapport du débit maximum sur le débit minimum) pour les sources de ce groupe est le plus élevé. Il atteint :

$$R = \frac{1250}{25} = 50$$

On peut dire que la variabilité de ces sources est due à l'existence des galeries souterraines qui permettent le passage rapide et l'écoulement des eaux de précipitation.

Le débit maximum se situe au printemps (avril) et le débit minimum en automne (octobre). On a aussi un étiage en hiver, qui est dû au gel et à ce que les précipitations se font sous forme de neige.

Au mois d'avril, à cause de la température, il y a fonte des neiges et une crue de débit. Par exemple, pour la source Gurik, sur la montagne Ghalaf le débit est de 1250 l/s en avril.

##### 6.1.1.2 - Groupe 2 : les sources moyennement variables

Le coefficient de variabilité R pour les sources de ce groupe est compris entre 1.7 et 6.2.

La crue de ces sources se fait au printemps et la décrue se fait à l'automne.

Sur dix sources, qui étaient sous contrôle mensuel, on a eu un étiage d'hiver pour cinq sources et il n'y a pas eu d'étiage d'hiver pour les autres sources, par suite de l'absence de neige autour de ces sources.

6.1.1.3 - Relation entre le débit et les précipitations

Dans la région de Chiraz, les précipitations commencent à la fin de l'automne et continuent au début du printemps.

Pendant l'été on a rarement des précipitations.

On peut constater l'influence des précipitations après deux ou trois mois.

Dans la région de Chiraz, on a une autre relation entre le débit et la pluie. On constate une augmentation des débits avant le commencement de la pluie dans cette région.

On pense que ce phénomène est dû à l'arrêt des pompages dans les puits des alluvions et à la remontée du niveau de l'eau souterraine.

6.1.2. - Température

Dans cette région, nous ne possédons pas les températures moyennes aux différentes altitudes. C'est seulement pour la ville de Chiraz que l'on a une température moyenne d'environ 17°C, pour l'altitude de 1 500 m. Autour de cette altitude, on a quatorze sources. Si l'on compare les températures moyennes des sources et de l'air on constate qu'il y a une différence d'environ 4°C, correspondant à une température anormalement élevée des sources (fig. 88).

Pour cette raison, et dans la mesure où la loi de Daubrée s'applique en région semi-aride, on peut penser que les eaux des sources viennent de la profondeur des massifs calcaires qui forment reliefs autour de la plaine.

On sait en effet qu'à environ 20 m de profondeur on a une température à peu près égale à la température moyenne de l'air. Si les températures des eaux de source sont plus élevées que la température moyenne de l'air, c'est que l'origine de l'eau est relativement plus profonde.

Comme nous avons vu que les eaux s'infiltrent sur toute la surface de l'ensemble des reliefs calcaires, il est très vraisemblable que les réserves souterraines, tout en restant à une cote égale ou supérieure à celle de la plaine subissent l'influence du gradient géothermique qui règne au sein des massifs et qui est généralement de 1° par 30 mètres.

Compte tenu des températures probables sur les zones d'infiltration des divers massifs, on peut penser que la différence de 4 à 5° observée sur les diverses sources est due à ce que les réserves se trouvent à plus de 100 à 150 mètres de la surface du sol des pentes des bassins versants.

Ceci implique donc que les circulations aquifères dans les calcaires de la région de Chiraz sont relativement lentes et profondes, et que par conséquent la fissuration des roches se poursuit jusqu'à une profondeur assez importante.

6.1.3 - Conductivité

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité. On sait que l'eau pure est très résistante et par contre l'eau salée est très conductrice. Cette conductivité est due à la concentration des ions en solution.

La conductivité est exprimée en mhos par centimètre, mais la résistivité en ohms centimètre.

Dans le bassin du Moharlu l'étude de la conductivité de l'eau de source montre que :

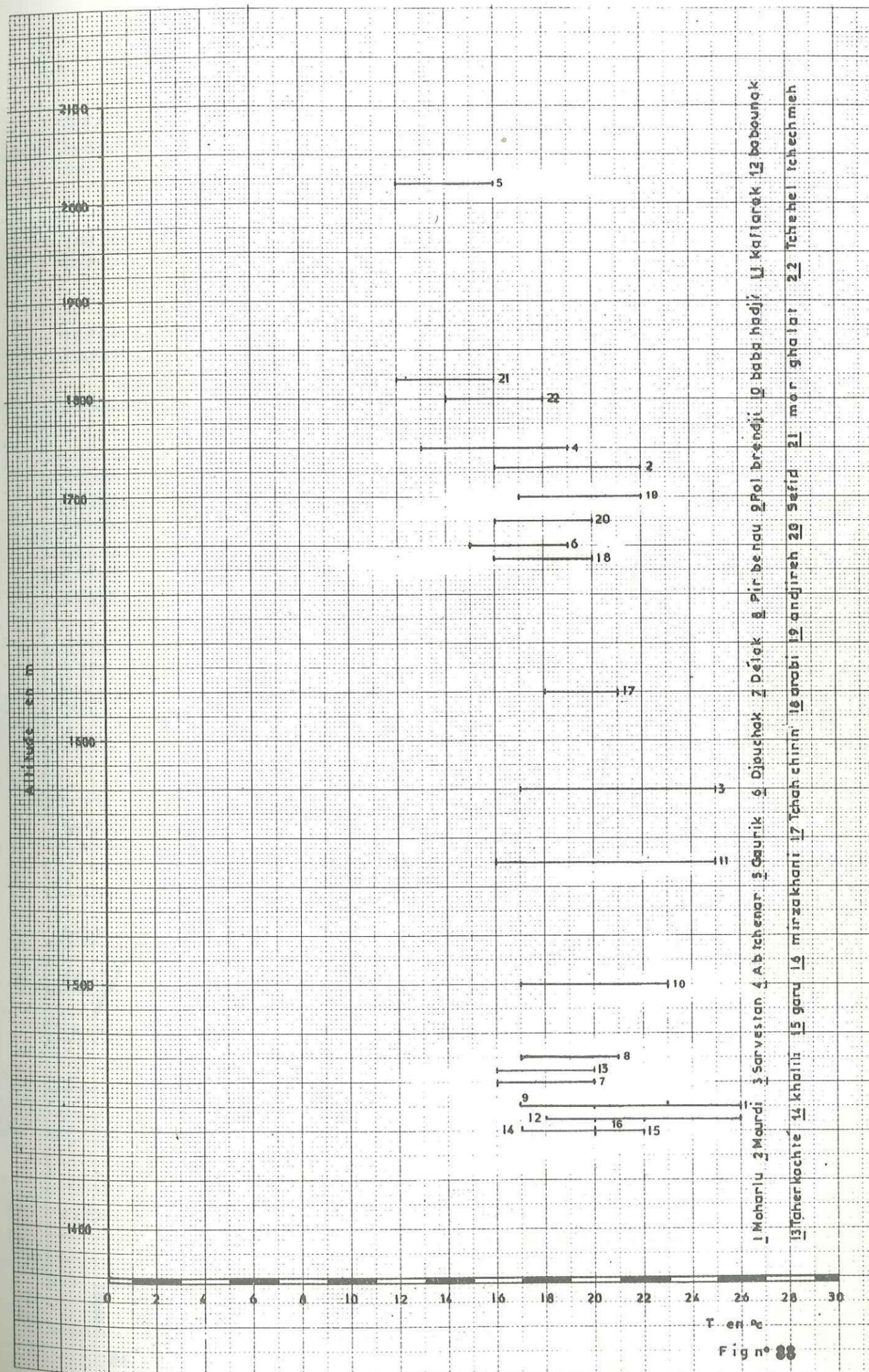


Fig n° 88

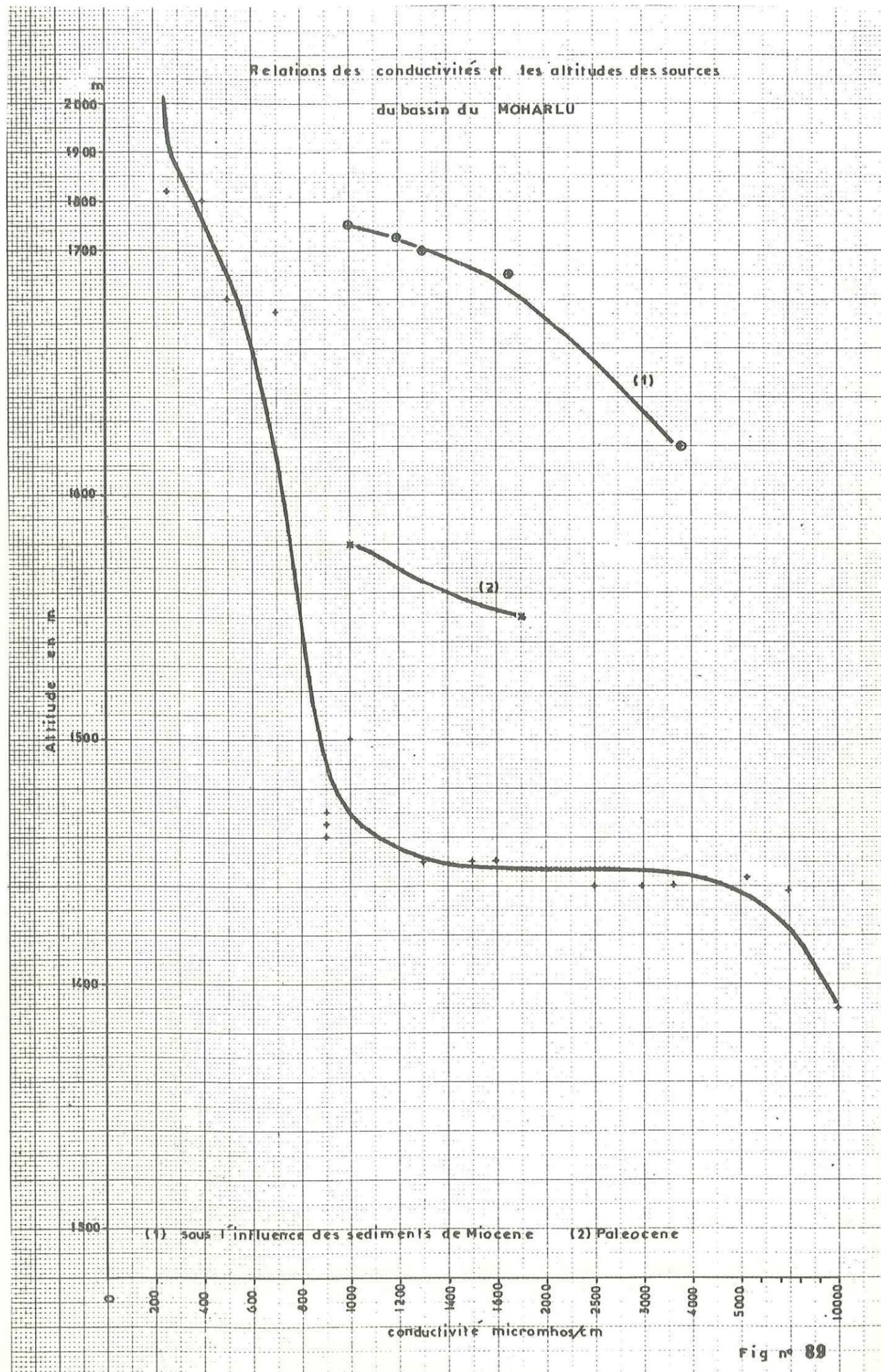


Fig n° 89

1° - Entre la conductivité et l'altitude d'émergence il y a une relation directe. En altitude élevée, on a une conductivité plus faible et à une altitude basse on observe une conductivité plus élevée. Cette élévation est due à la nappe des alluvions qui est en relation avec les calcaires et qui a une conductivité forte.

2° - Tant que l'on est proche de l'exutoire du bassin du Moharlu, on voit une augmentation de conductivité, à cause de la proximité de la zone d'évaporation située autour du lac.

3° - La troisième raison pour l'augmentation de la conductivité est la présence de sédiments évaporitiques paléocènes (Satchun) et miocènes (groupe du Fars) qui sont constitués de marnes et de gypses.

Dans la courbe de relation entre l'altitude et la conductivité, on voit que cette anomalie est due à l'influence de la formation évaporitique.

4° - On note qu'entre le débit de certaines sources et la conductivité électrique il y a une relation directe. Ce phénomène est aussi dû à l'influence de la nappe des alluvions sur les sources des calcaires. A la saison des crues, le niveau de l'eau remonte et on a beaucoup plus de relations (on sait que les eaux de la nappe des alluvions, à cause de la proximité de la zone d'évaporation et des sédiments miocènes ou paléocènes ont une conductivité élevée dans certaines zones).

En effet, la conductivité des eaux des calcaires qui ne sont pas en relation avec ces facteurs d'augmentation est inférieure à 500 micro mhos/cm (exemple l'eau du puits n° 4), et la conductivité des eaux de sources qui sont sous l'influence des sédiments paléocènes et miocènes, se situe entre 500-2 500 micromhos/cm. Pour les sources proches de la zone d'évaporation et du lac du Moharlu, la conductivité se situe entre 2 000-12 000 micro mhos/cm.

#### 6.1.4. - pH

L'eau très pure a une très faible conductivité de -3 micro mhos à 18°. C'est qu'elle ne contient que très peu d'ions H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup>.

La loi d'action de masse donne  $\frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = \text{constante}$ .

Comme H<sup>+</sup> et OH<sup>-</sup> sont très petits par rapport à H<sub>2</sub>O, on a donc aussi très sensiblement  $[H^+][OH^-] = \text{constante}$ .

Dans l'eau pure à 25°  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$  par litre, d'où  $[H^+][OH^-] = 10^{-14}$ .

Le cologarithme ou l'inverse du logarithme de la concentration en ion H<sup>+</sup> est le pH.

Dans l'eau pure, il existe une molécule dissociée pour 10<sup>7</sup> molécules d'eau.

$$pH = \lg \frac{1}{10^7}$$

$$pH = 7$$

La dissociation de l'eau varie avec la température.

Le pH déterminé à une température standard de 25°C, décroît avec l'augmentation de température.

Autour de 25°C, le pH diminue de 0,01 par degré d'élévation de température.

T°C	pH
0	7,44
4	7,38
10	7,24
18	7,08
22	7,02
25	7
30	6,90
40	6,70
50	6,62
100	6,13

Le pH varie en fonction de la force ionique.  
milieu acide pH < 7  
milieu neutre pH = 7  
milieu basique 7 < pH < 14

Le pH des solutions naturelles (eaux souterraines et superficielles) est loin de couvrir toute l'échelle des valeurs comprises entre 0 et 14. Les exemples suivants montrent cependant que le pH des eaux naturelles varie dans de larges limites, suivant leur origine.

Eaux de sols alcalins	9 à 10
Eaux minérales sulfurées	8 à 10
Eaux de mer	7,85 à 8,35
Eaux fluviales	7
Eaux minérales bicarbonatées sodiques	6,3 à 6,4
Eaux de pluie	6
Eaux de marais, stagnantes	4
Eaux de condensation des fumerolles	1 à 2

Dans la région de Chiraz, les pH des eaux des sources et des puits se situent entre 6,4 et 8.

Aussi faut-il dire que les pH de plus de 85 % des échantillons sont entre 6,8 et 7,8, ce qui est normal pour les eaux des calcaires.

L'examen du tableau n° 30, où nous avons reporté, massif par massif les pH mesurés sur les eaux des différentes sources ainsi que les pH d'équilibre et les teneurs en CO<sub>2</sub> libre fait ressortir, qu'à l'exception des sources Khahili, liée à une ghanate, Delak, Gourouk Djuchak, Bardadj et les eaux des puits n° 3, 4, 5, 6, tous les pH sont au-dessus de 7, ce qui traduit une pauvreté en CO<sub>2</sub> très générale et que l'on peut imputer à l'absence de sol végétal sur les bassins de l'ensemble des sources.

Nulle part cependant les pH sont suffisamment élevés pour permettre l'existence de carbonates en solution.

Les pH relativement bas, observés sur les puits et certaines sources peuvent être dus au fait que le CO<sub>2</sub> dissous n'a pu encore se dégager, car les eaux sont encore éloignées de la surface, tandis que les sources à pH plus élevées correspondent à des circulations qui permettent le dégagement d'une partie du CO<sub>2</sub> libre contenu dans les eaux avant leur arrivée à l'émergence, visible.

Tableau n° 31

Valeurs du pH de la température et de la teneur en CO<sub>2</sub> libre des points d'eau du bassin versant du Moharlu

Kuh-Ghareh			Kuh-Ghar-Kuh-Ghase-ghomcheh			Kuh-Ahmadi			Siyah-Kuh										
pH	t°C	CO <sub>2</sub> libre	pH	t°C	CO <sub>2</sub> libre	pH	t°C	CO <sub>2</sub> libre	pH	t°C	CO <sub>2</sub> libre								
S. Barm-Chur n°2	7.2	46	S. Djuchak	6.8	19	85	P. n° 6	6.4	170	S. AB, Tchenar	7	18	36						
S. Moharlu	7.6	23				Gh. Borzou	7.6		14	P. n° 7	7.1		30						
S. Barm-Chur n° 1	7.7	15				Gh. Robat	7.7		7.7	S. Mowdi	7.3	19	18						
S. Baba hadji	8	20								S. Sarvestan	7.6	25	10						
Baba-Kuhi																			
Kuh-Kafarak																			
Kuh-Barmou																			
	pH	t°C	CO <sub>2</sub> libre																
P. n° 5	6.6		170	S. Taher Kocheh	7.2	16	42	Gh. chah-A Sgar	7		44	S. Gourouk	6.8	15	115	P. n° 4	6.8		60
Gh. Khahili	6.6	20	200	S. Djafar Khani	7.2	16	45	P. n° 9	7.1		34	S. Andjiri Besti	7.2		20	P. n° 3	6.9		60
Gh. Bardadj	6.8		75	S. Babounak	7.3	19	38	Gh. Chapour djani	7.3	20	29	S. Andjich Galat	7.5	19	11	P. n° 2	7.9		5
S. Delak	6.8	19	95	S. Kafarak	7.5	22	14	S. Som dol	7.4	20	20	S. Sefid	7.6	18	11				
S. Tchah Chirih	7		57	Gh. Ab-Khan	7.7		11	S. Bidi	7.6	20	12	S. Tchekhl Tchekmeh	7.7	16	8				
Gh. Rokn Abad	7.1		36	S. Garou	7.8	22	10	S. Pol-brendji	7.6	20	13	S. Mur	7.7	13	7.5				
S. Mirza Khani	7.1	22	50	Gh. Sied-H assan Kou(1)	7.8		11	S. Pir-Benau	7.9	20	6.5	Gh. Rahimi	7.7		9.7				
P. n° 1	7.2		47	Gh. Sied-H assan Boz(2)	7.8		12	Gh. Dajukhak	7.7						8				

Par ailleurs, les eaux à pH faible sont aussi celles qui montrent une faible minéralisation à l'exception des eaux de Ghalat et on pourrait en déduire que les eaux des massifs calcaires ayant un pH faible, celui-ci augmenterait au contact des eaux des nappes des alluvions plus minéralisées.

L'influence de l'exposition, c'est-à-dire en fait de la température des versants peut également être responsable de la différence de pH observée entre les sources situées sur les flancs nord et sud, les plus fortes teneurs en  $\text{CO}_2$  se rencontrant dans les sources situées sur les versants exposés au Sud, c'est-à-dire, ici, situés au Nord de la plaine de Chiraz.

En résumé, l'étude des pH nous permet de distinguer les eaux issues directement des massifs calcaires de celles qui en proviennent par un long cheminement ou dont la composition est influencée par les nappes alluviales des plaines. Ce fait est particulièrement frappant pour les puits de la montagne de Darak.

## 6.2. - CARACTERES CHIMIQUES

### 6.2.1 - Analyse chimique des eaux souterraines

Les principales données de l'analyse chimique des eaux souterraines sont :

- les éléments anions et cations,
- le résidu sec,
- le titre alcalimétrique,
- le degré hydrotimétrique, Dureté de l'eau.

#### 1. - Eléments chimiques

Les principaux éléments analysés sont :

cations :  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  ;  
anions :  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$

2. - On détermine aussi le résidu sec (Rs), le titre alcalimétrique et le degré hydrotimétrique ° dh.

Le résidu sec exprimé en mg/l, représente la totalité des sels dissous.

Le résidu sec est ainsi une donnée sur la minéralisation totale d'une eau, il est lié à la conductivité.

3. - Le titre alcalimétrique permet de connaître la teneur en carbonates, bicarbonates et hydrates alcalins contenus dans l'eau.

Ce titre est exprimé en milliéquivalent par litre, ou en degré français. Le degré français correspond à 10 mg de carbonate de calcium par litre.

4. - Le degré hydrotimétrique (°dh) indique la teneur globale de l'eau en sels de chaux et de magnésium. Il est exprimé en milligrammes par litre ou en degré français qui correspond à 0,2 milliéquivalent de  $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ .

### 6.2.2 - Classification du point de vue chimique

Durant le premier trimestre d'octobre 1972, nous avons prélevé 50 échantillons d'eau qui furent analysés dans les laboratoires de l'organisation des eaux du Fars.

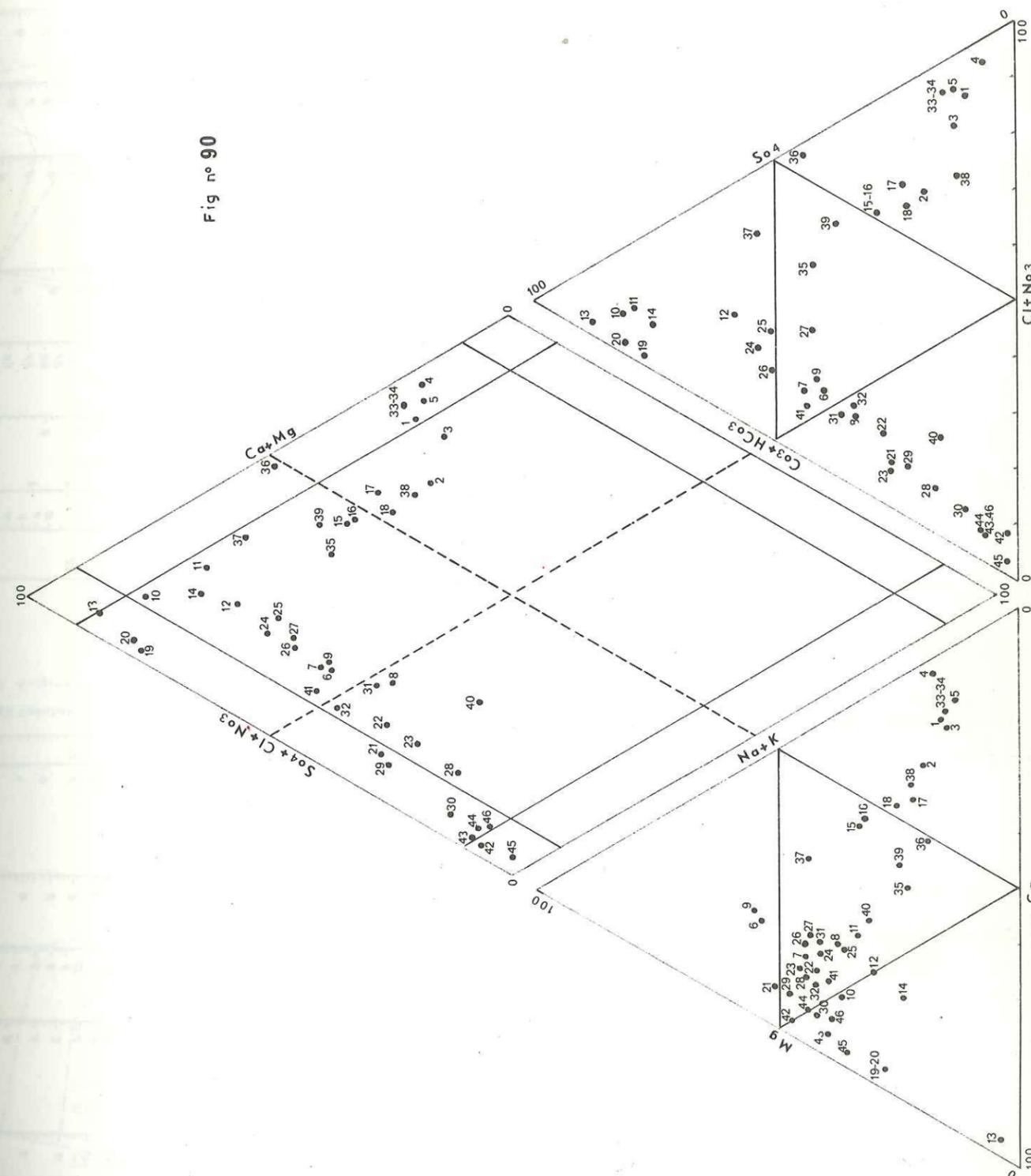


Fig n° 92

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

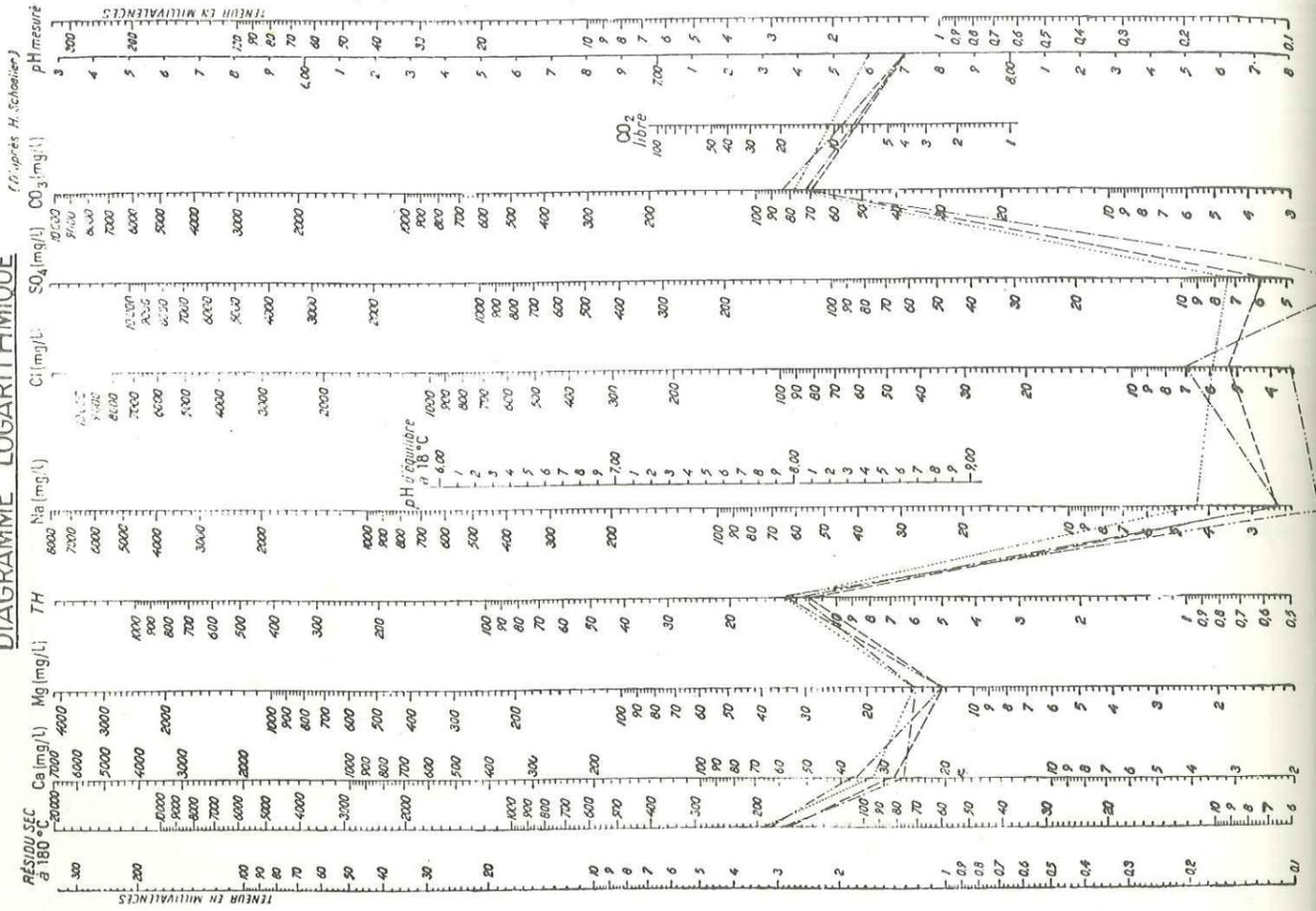
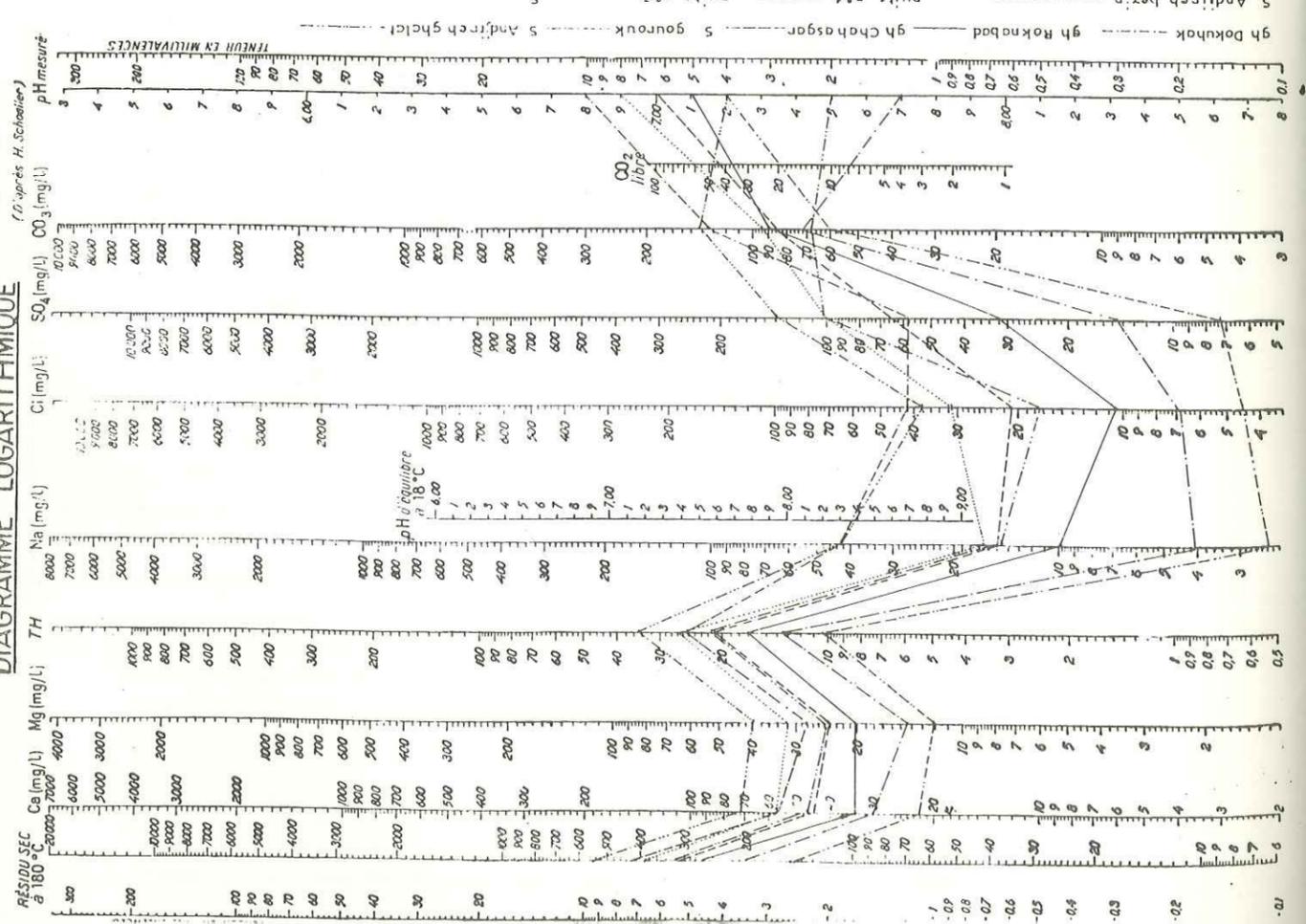


Fig n° 91

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE



Au point de vue de la quantité de  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $HCO_3^-$  et  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$  +  $K^+$ , nous avons divisé les eaux karstiques du bassin du Moharlu en plusieurs familles.

Les résultats d'analyses ont été regroupés d'une part sous forme de diagrammes de Schoeller-Berkaloff et d'autre part sur les diagrammes de Piper (fig. 90).

6.2.2.1 - Eaux bicarbonatées

Dans la région de Chiraz, on n'a pas trouvé d'eau bicarbonatée sodique.

6.2.2.1.1 - la famille bicarbonatée calcique

Caractères généraux

Les eaux de pluie chargées de gaz carbonique, en traversant les massifs calcaires se chargent rapidement en bicarbonates et éventuellement en carbonates de calcium ; par suite, si une eau a une concentration égale ou inférieure à la solubilité normale du carbonate de chaux, elle est normalement du type bicarbonaté calcique.

La concentration en  $(CO_3H)^2 Ca$  est assez constante et de 3 à 4 milli-équivalents par litre, dans la plupart des sources.

Le rapport  $r Mg / Ca$  est toujours inférieur à l'unité. Il est souvent inférieur à 0,5.

Les ions  $Cl^-$  et  $SO_4^{--}$  sont en petites quantités : généralement inférieures à 1 milliéquivalent et rarement supérieures à 2.

Le rapport  $r SO_4 / Cl$  est variable, mais il est en général inférieur à l'unité à l'amont, et supérieur vers l'aval des zones d'alimentation.

L'eau bicarbonatée calcique a une faible concentration en sels dissous. D'une façon générale, la concentration totale ne dépasse pas 500 mg/l.

Le groupe de Roknabad (fig. 91)

La formule de relation des ions est :

$$r CO_3 \gg r SO_4 \gg r Cl \text{ et } r Ca \gg r Mg \gg r Na + r K$$

Dans ce groupe on a distingué huit points d'eau.

Le rapport  $r SO_4 / Cl$  est généralement supérieur à l'unité. Il est de 0,42 pour la source d'Andjireh à Ghalat.

Le rapport de  $r Na / Ca$  est faible et généralement inférieur à 0,5, ce n'est que pour la source de Gourouk qu'il est de 0,62.

La valeur du résidu sec est comprise entre 150 et 400 mg/l, sauf pour le puits n° 1 où elle est un peu plus élevée (550 mg/l) par suite de la concentration en ions sulfates.

La valeur du degré hydrotimétrique ( $^{\circ}dh$ ) est comprise entre 10 et 27 degrés français.

Les points d'eau de ce groupe sont :

- les ghanates : Chah Asgar, Roknabad, Dokuhak ;
- les sources : Gourouk, Andjireh ghalat, Andjirehbesin ;
- les puits : n° 1 et n° 3.

Le groupe de Tchehel, Tchechmeh (fig. 92).

La combinaison ionique de ce groupe est :

$$r CO_3 \gg r Cl \gg r SO_4 \text{ et } r Ca \gg r Mg \gg r Na + r K$$

On a quatre points d'eau dans ce groupe.

Le rapport  $r \text{ Mg/Ca}$  est très inférieur à l'unité ; par exemple pour la ghanate de Rahimi, il est de 0,55.

Le rapport de  $r \text{ SO}_4/\text{Cl}$  est inférieur à l'unité.

Le rapport  $r \text{ Na/Ca}$  est très faible et compris entre 0,04 et 0,12.

La valeur du résidu sec se situe entre 160 et 190 mg/l. Les concentrations des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$  sont inférieures à 0,2 milliéquivalent.

La valeur de la dureté est comprise entre 12 et 14 degrés français.

Les points d'eau liés à ce groupe sont :

les sources : Tchehel Techehmeh, Mur ghalat, Sefid et la ghanate de Rahimi.

Il faut ajouter que ces points sont à l'amont de la région de Chiraz.

### 6.2.2.1.2 - La famille bicarbonatée magnésienne

Les caractères sont les suivants :

le rapport de  $r \text{ Mg/Ca}$  est compris entre 1,06 et 1,2 et le rapport de  $r \text{ SO}_4/\text{Cl}$  est compris entre 2,7 et 3,6 ; la valeur de  $r \text{ Na/Ca}$  est compris entre 0,15 et 0,53.

Dans cette famille, on trouve sept points d'eau que nous avons divisés en deux groupes :

#### a - le groupe de Djuchak (fig. 93)

La valeur du résidu sec de ce groupe est comprise entre 250 et 350 mg/l et la valeur de la dureté de l'eau est comprise entre 16 et 23° (degré français).

On peut dire que ces eaux sont purement d'origine calcaire. Les points d'eau de ce groupe sont : la source Djuchak, les ghanates de Robate et Bardadj et le puits n° 4.

#### b - le groupe de Delak (fig. 94)

Les concentrations en ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$  sont trois fois plus fortes que dans le groupe précédent (groupe de Djuchak), cette augmentation est due à la présence des sédiments évaporitiques paléocènes.

La valeur du résidu sec pour ce groupe est comprise entre 550 et 650 mg/l et la dureté des eaux entre 36 et 40° français.

Les points d'eau de ce groupe sont : les sources de Barm-Delak, Taher, Khochteh et le puits n° 5 qui sont au pied de l'anticlinal de Kaftarak.

### 6.2.2.2 - Eaux sulfatées

On peut affirmer, sans aucun doute, que les eaux sulfatées de la région de Chiraz, sont dues à la proximité des sédiments miocènes ou paléocènes.

#### 6.2.2.2.1 - La famille sulfatée calcique

Dans cette famille, nous avons distingué deux groupes :

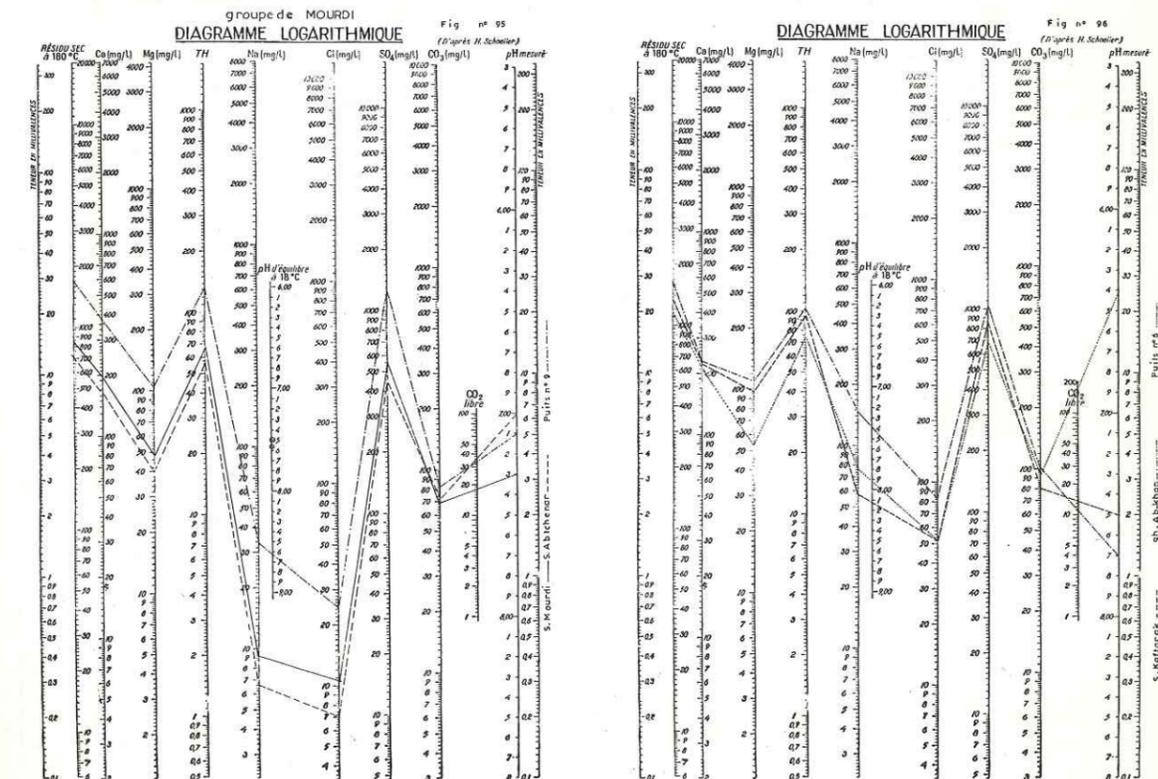
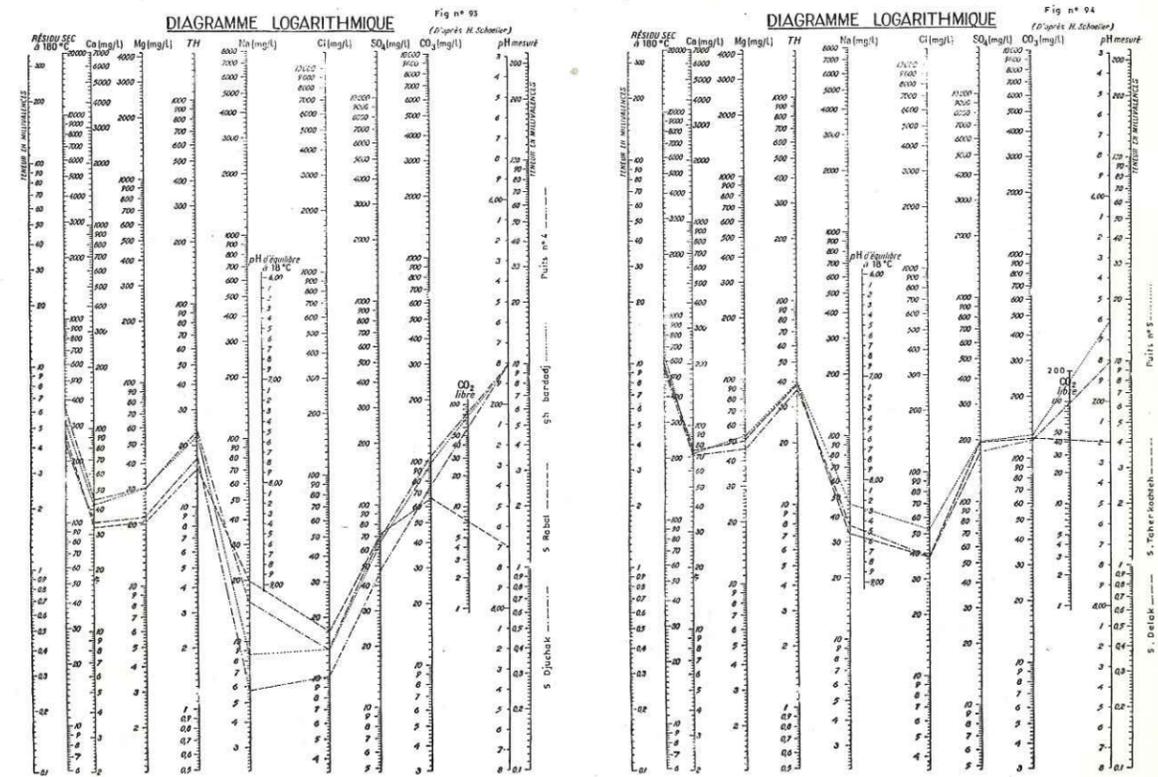
- groupe de Kaftarak,
- groupe de Sarvestan.

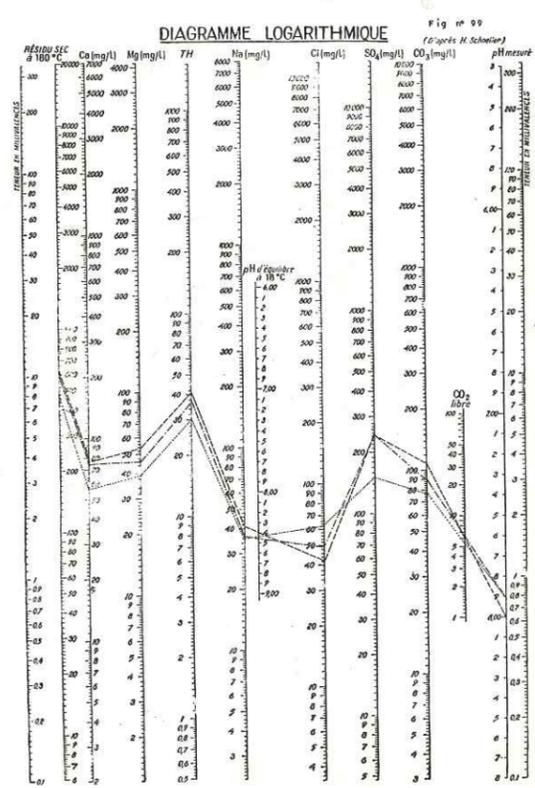
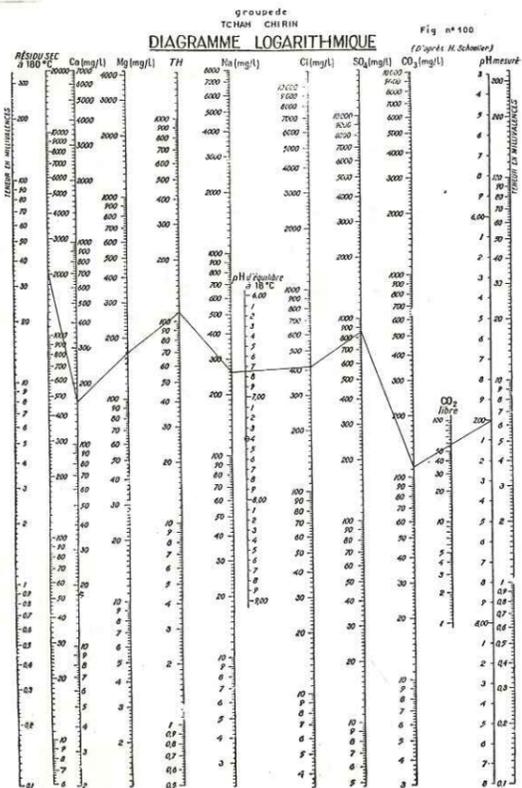
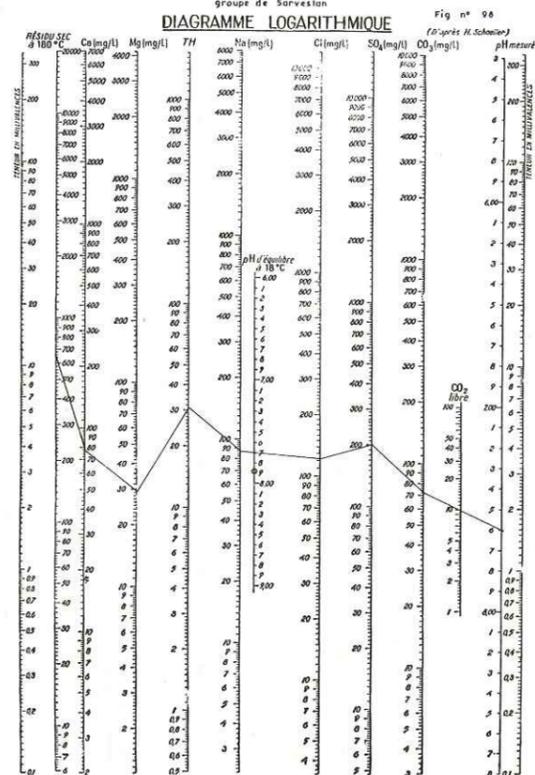
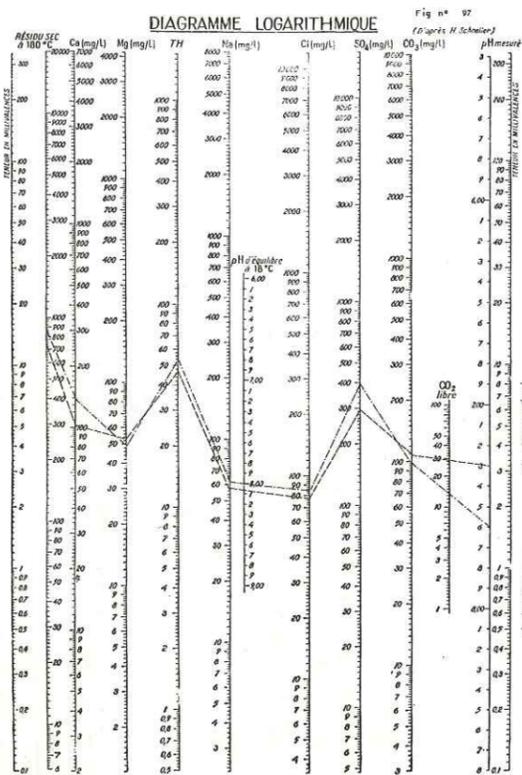
#### a - Groupe de Kaftarak

La formule de la relation ionique est :



Dans ce groupe, on a trouvé huit points d'eau qui ne sont pas comparables par les rapports  $r \text{ Mg/Ca}$ ,  $r \text{ SO}_4/\text{Cl}$  et  $r \text{ Na/Ca}$ , parce que ces eaux sont d'origines différentes.





En raison de cette anomalie, on a distingué quelques sous-groupes pour le groupe de Kaftarak.

1° / Sous-groupe de Mourdi (fig. 95)

Ici on trouve trois points d'eau = la source Abtchenar, Mourdi et le puits n° 9.

Le rapport de r Mg/Ca est inférieur à 0,5 et le rapport r SO<sub>4</sub>/Cl est très élevé : de 35 jusqu'à 45. Le rapport r Na/Ca est très petit et inférieur à 0,07. La valeur du résidu sec est comprise entre 730 et 850 mg/l, mais pour le puits n° 9 il est de 1 700 mg/l, en raison d'une teneur très élevée en sulfates provoquée par le contact avec les sédiments miocènes et paléocènes riches en sulfates, mais pauvres en chlorures.

Ces points ont une faible teneur en chlorures due à l'altitude élevée des émergences, qui élimine toute relation avec la zone d'évaporation.

2° / Sous-groupe d'Abkhan (fig. 96)

Dans ce sous-groupe, on a trouvé trois points d'eau. Le rapport r Mg/Ca est compris entre 0,42 et 0,8 ; le rapport de r SO<sub>4</sub>/Cl est plus faible que dans le groupe précédent ; il est compris entre 8,5 et 12 et le rapport de r Na/Ca est compris entre 0,22 et 0,55. La valeur du résidu sec est comprise entre 1 200 et 1 600 mg/l.

Les trois points de ce groupe sont assez comparables. Seule l'eau d'Abkhan est plus chargée en sodium que les autres. On trouve ici du sulfate de sodium dû à la présence des sédiments miocènes.

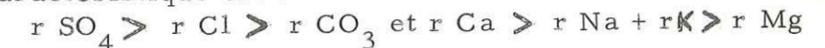
3° / Sous-groupe de Borzou (fig. 97)

Ici on trouve deux points d'eau : les ghanates, Chapourdjani et Borzou. La teneur en sulfate est plus faible que les autres. Le rapport de r Mg/Ca est compris entre 0,6 et 0,85 et le rapport de r SO<sub>4</sub>/Cl est compris entre 2,7 et 3,3. Le rapport de r Na/Ca est inférieur à 0,5. La valeur du résidu sec se situe entre 730 et 870 mg/l.

On peut trouver les eaux de ce groupe au pied des montagnes calcaires au contact avec les sédiments miocènes.

b - Le groupe de Ghomp-Sarvestan (fig. 98)

La formule caractéristique est :



On trouve ici des valeurs sensiblement égales pour r Ca et r Na + r K. On a donc une famille sulfatée calcique et sodique.

Le rapport de r Mg/Ca est de 0,63, le rapport de r SO<sub>4</sub>/Cl est de 1,12 et le rapport de r Na/Ca est de 0,98. Dans ce groupe, la valeur du résidu sec est de 650 mg/l et on y trouve seulement la source de Sarvestan

6.2.2.2.2 - La famille sulfatée magnésienne

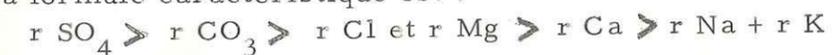
Dans cette famille nous avons trouvé quatre points d'eau, qui sont aussi au contact des sédiments évaporitiques du Miocène.

Ici on a distingué deux groupes :

le groupe de Pir-Benau et le groupe de Tchah-chirin.

a - Le groupe de Pir-Benau (fig. 99)

La formule caractéristique est :



Dans ce groupe, on a trouvé trois points d'eau : les sources de Pir-Benau, Babahadji et le puits n° 2. Le rapport de r Mg/Ca varie entre 1,03 et 1,15, celui de r SO<sub>4</sub>/Cl varie entre 1,7 et 4,16 et le rapport de r Na/Ca est compris entre 0,42 et 0,53. Ces trois points d'eau sont assez comparables, mais la teneur en sulfates de l'eau du puits n° 2 est plus faible que celle des autres points, la valeur du résidu sec varie entre 490 et 620 mg/l.

b - Le groupe de Tchah-chirin (fig. 100)

Dans ce groupe, on a seulement un point d'eau. Le rapport de r Mg/Ca est de 1,75 et le rapport de r SO<sub>4</sub>/Cl est de 1,5; le rapport de r Na/Ca est de 1,34. La valeur du résidu sec est de 2080 mg/l.

6.2.2.3 - Eaux chlorurées

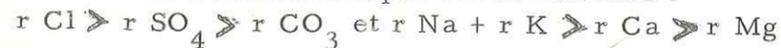
Les eaux de ce type sont sous l'influence de bassins d'évaporation ou du lac du Moharlu lui-même.

6.2.2.3.1 - La famille chlorurée sodique

Dans cette famille, on a trouvé trois groupes.

a - Le groupe du Moharlu

La formule de relation ionique est la suivante :



Dans ce groupe, on trouve trois points d'eau : les sources du Moharlu, Som Doldol et le puits n° 7. Mais ces points ne sont pas assez comparables, ce qui amène à diviser ce groupe en trois sous-groupes :

1 - le sous-groupe du Moharlu (fig. 101)

Les rapports des : r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca sont de 0,76, 0,86 et 1,3. On a distingué la source du Moharlu avec un résidu sec de 990 mg/l.

2 - Le sous-groupe de Som Doldol (fig. 102)

Les rapports de : r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Ca et r Na/Ca sont de 0,97, 0,38 et 2,4.

Dans ce groupe, on a seulement la source de Som Doldol. La valeur du résidu sec pour cette source est de 1040 mg/l.

3 - Le sous-groupe du puits n° 7 (fig. 103)

Les rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca sont de 0,62, 0,83 et 1,52.

Seul le puits n° 7 est lié à ce groupe. Le résidu sec de ce puits est très élevé (6750 mg/l).

b - Le groupe de Djafarkhani

La relation ionique est :



Dans ce groupe, on a trouvé neuf points d'eau.

En fonction des rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca, on peut diviser ce groupe en quatre sous-groupes :

1 - le sous-groupe de Djafarkhani (fig. 104)

Les rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca varient entre 1,1 et 1,39, 0,13 et 0,19, 5,04 et 7,3. Dans ce groupe, on trouve les sources : Barm-chur n° 1

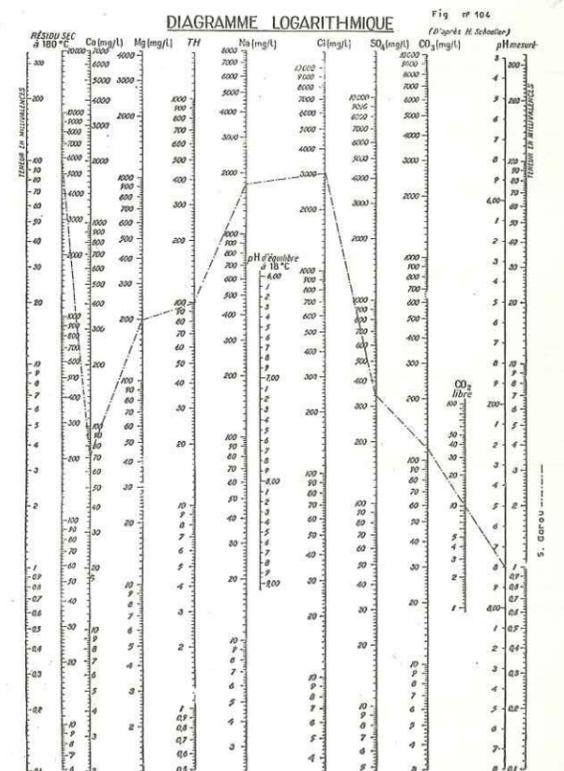
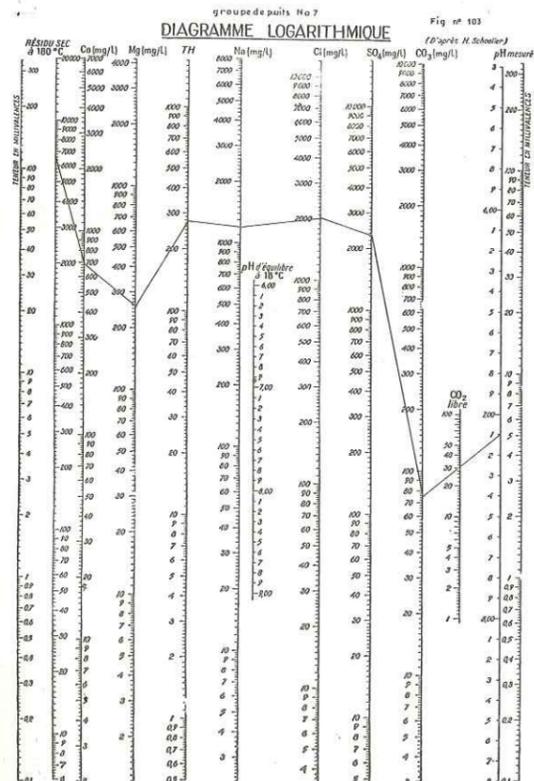
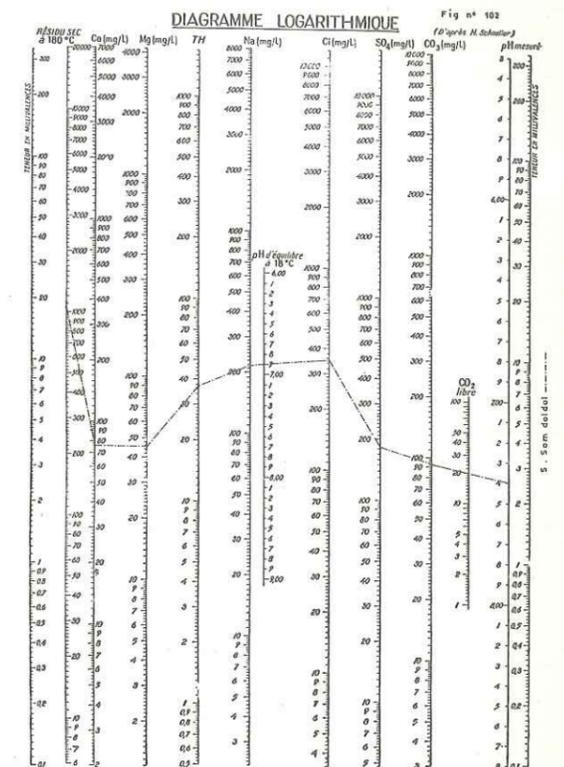
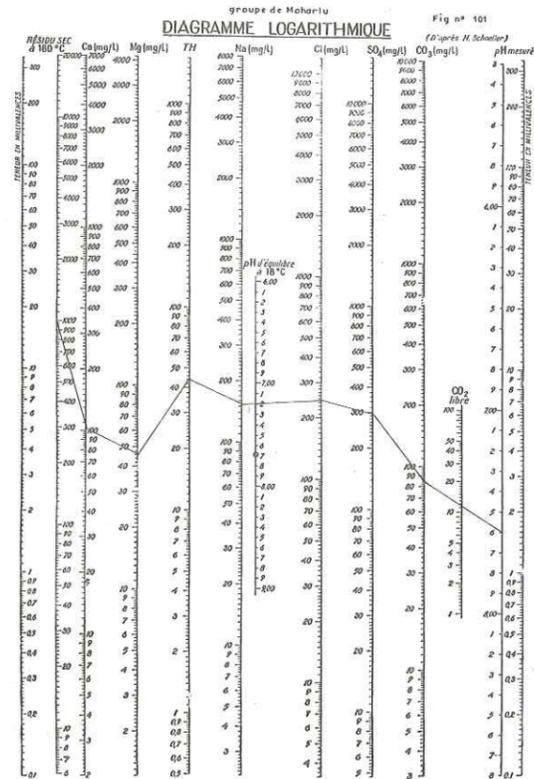


DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

Fig n° 107

(D'après H. Schoelier)

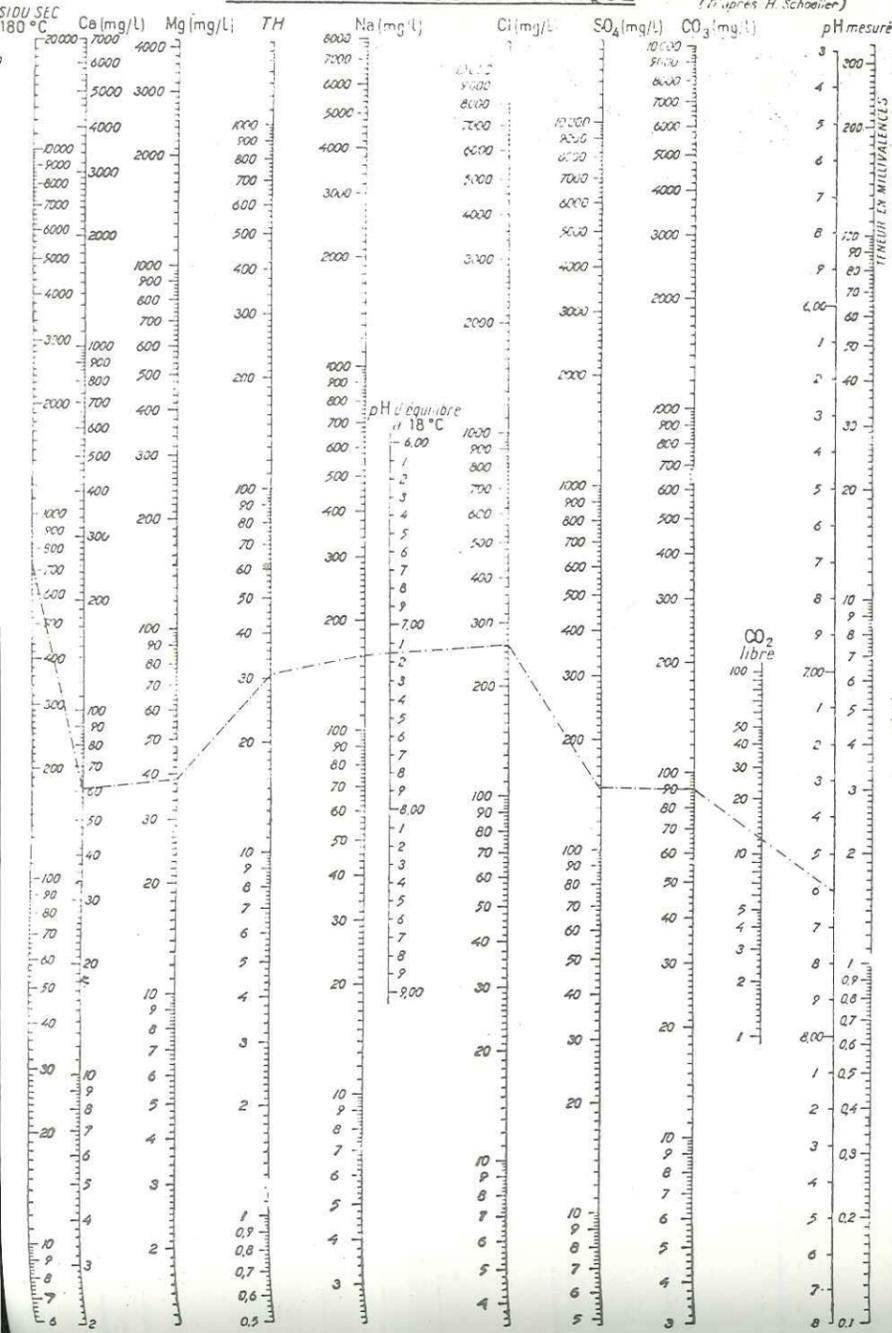


DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

Fig n° 108-109

(D'après H. Schoelier)

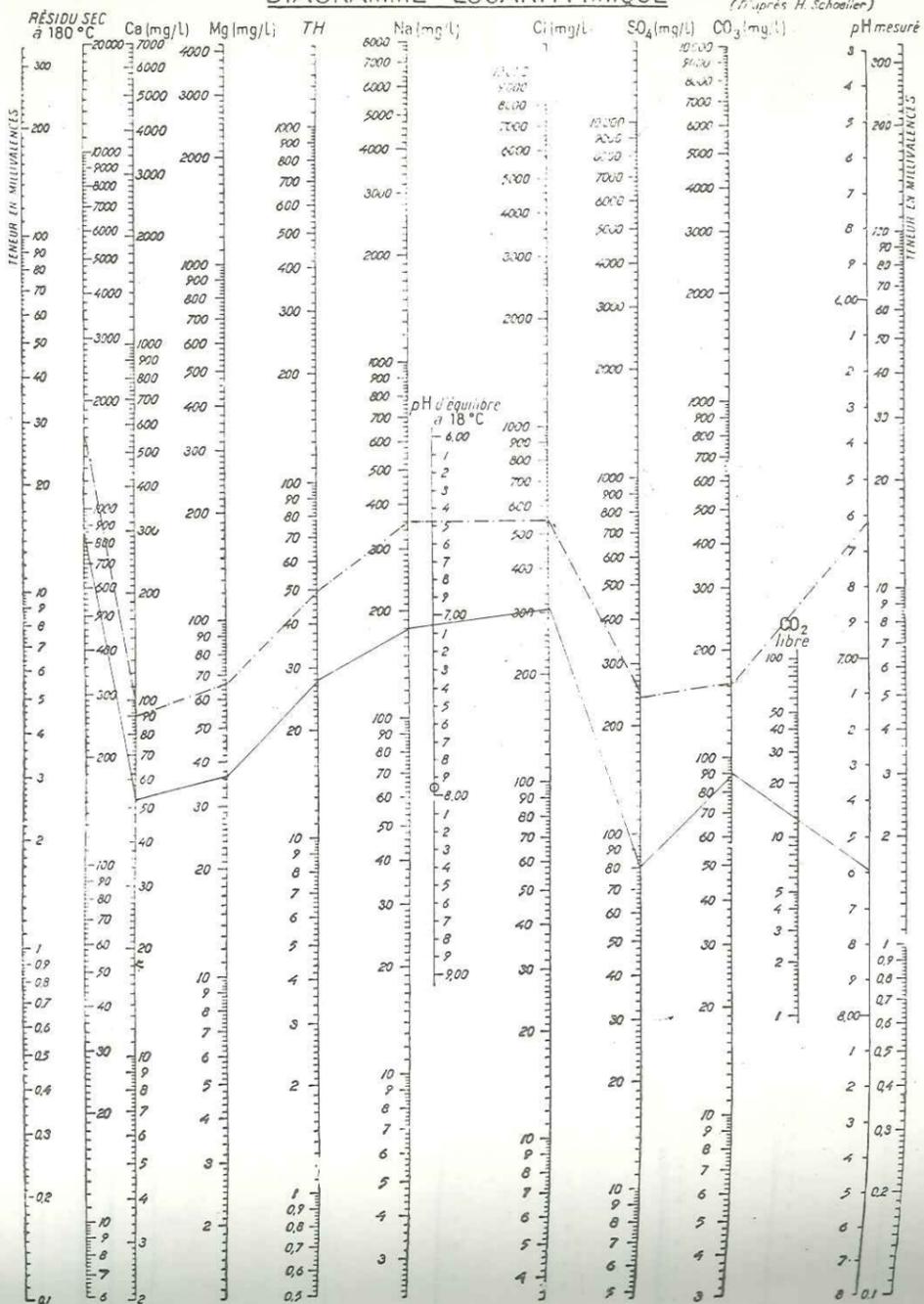


DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

Fig n° 106

(D'après H. Schoelier)

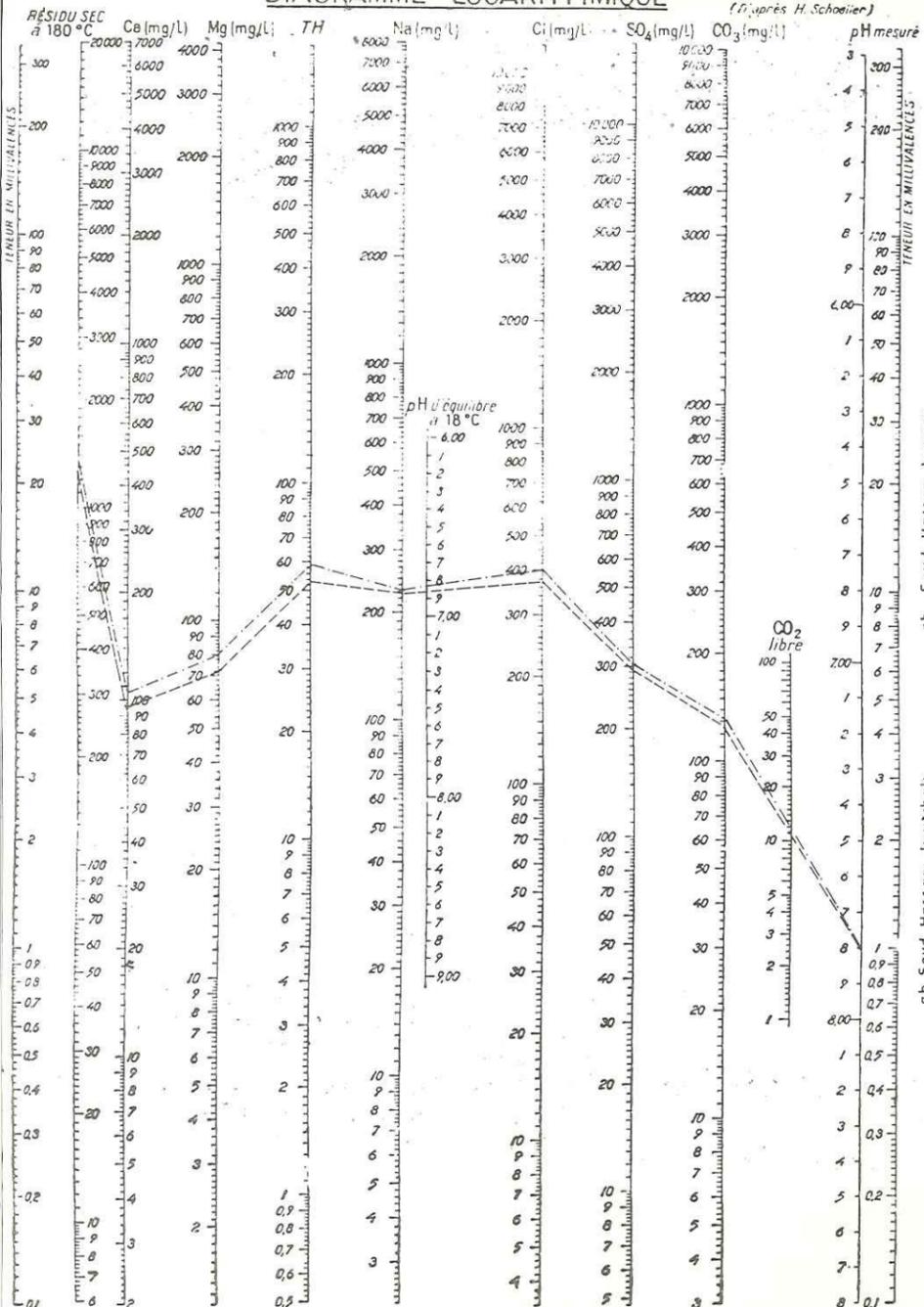
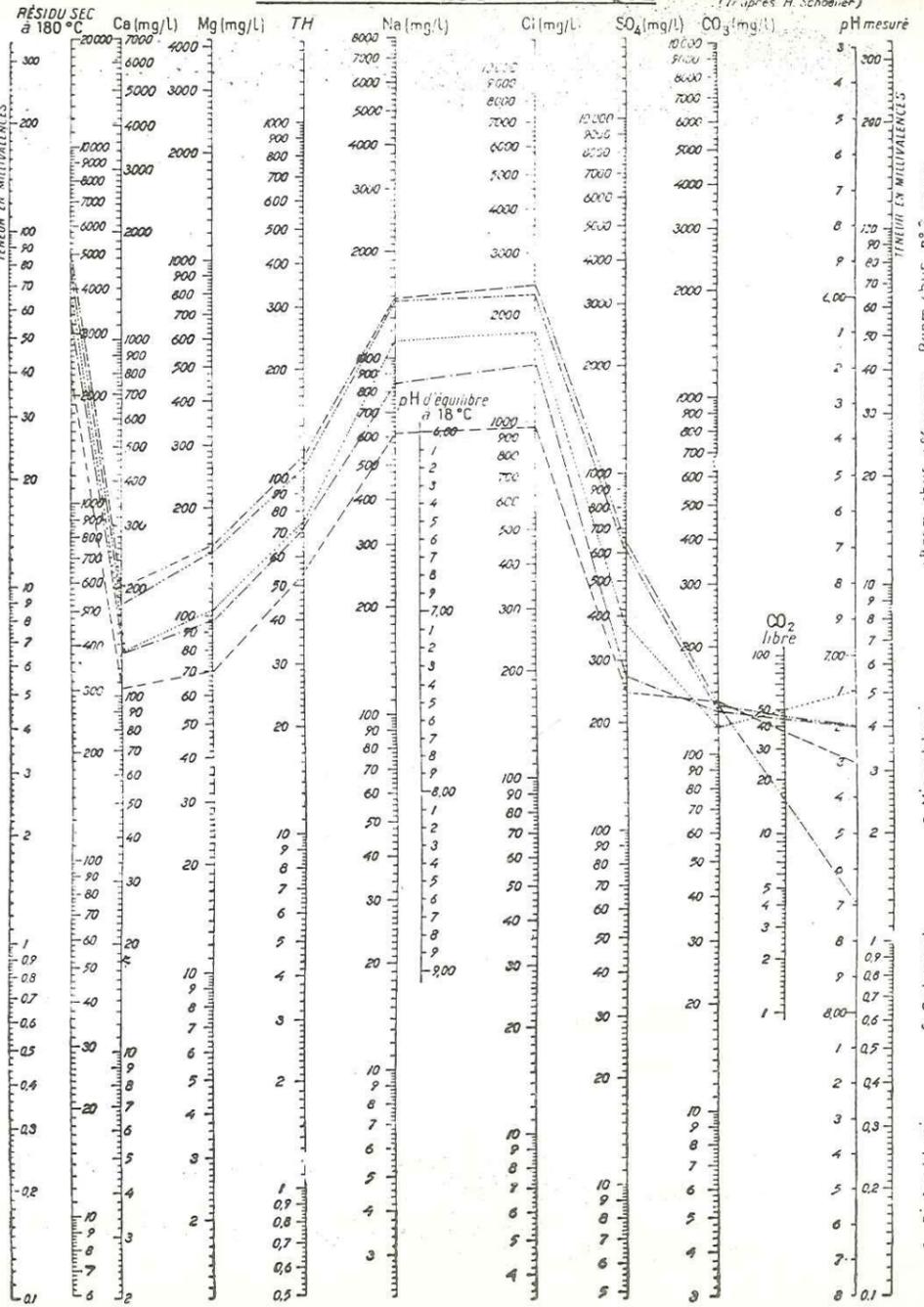


DIAGRAMME LOGARITHMIQUE

Fig n° 105

(D'après H. Schoelier)



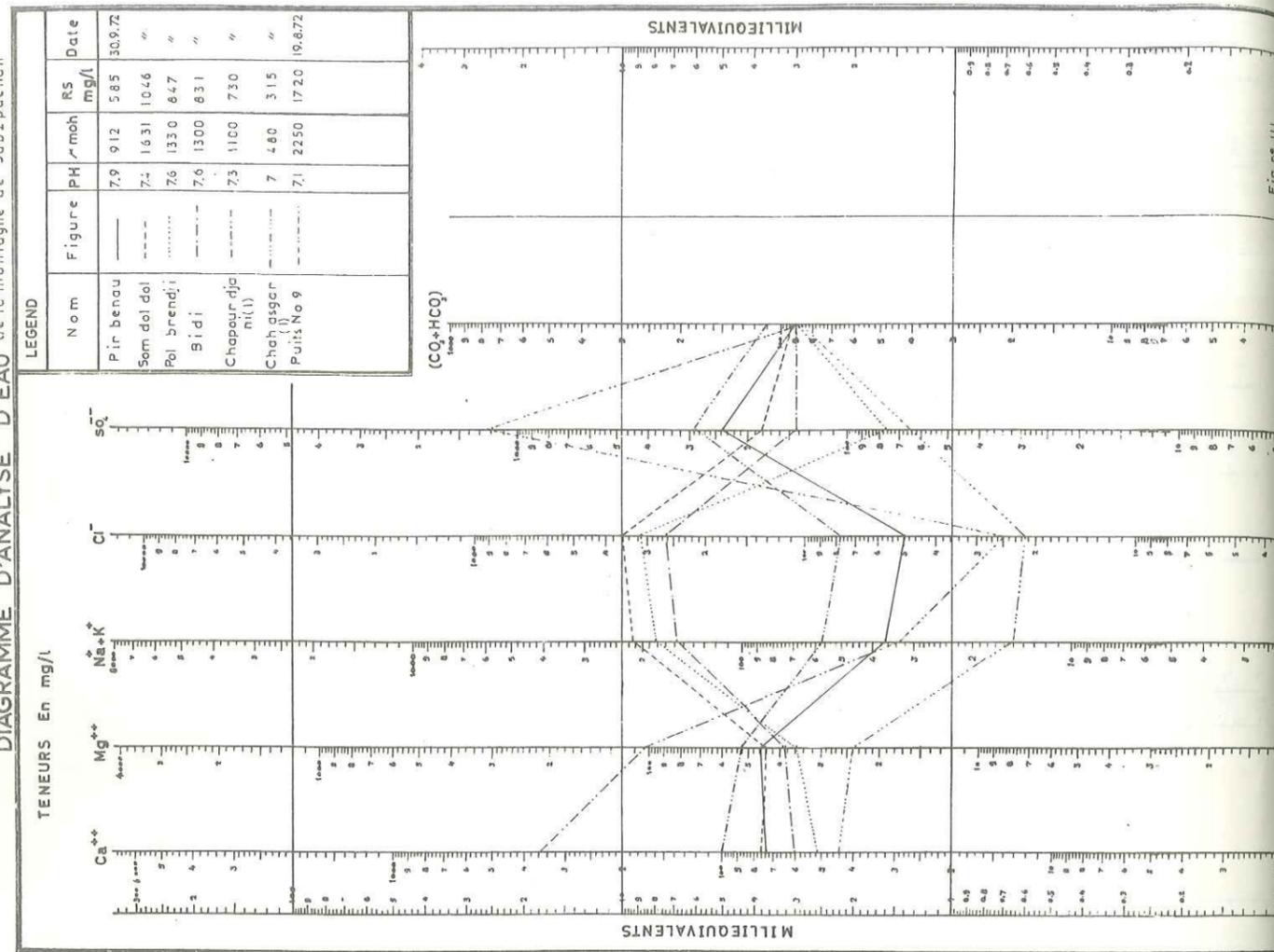


Fig. n° 111

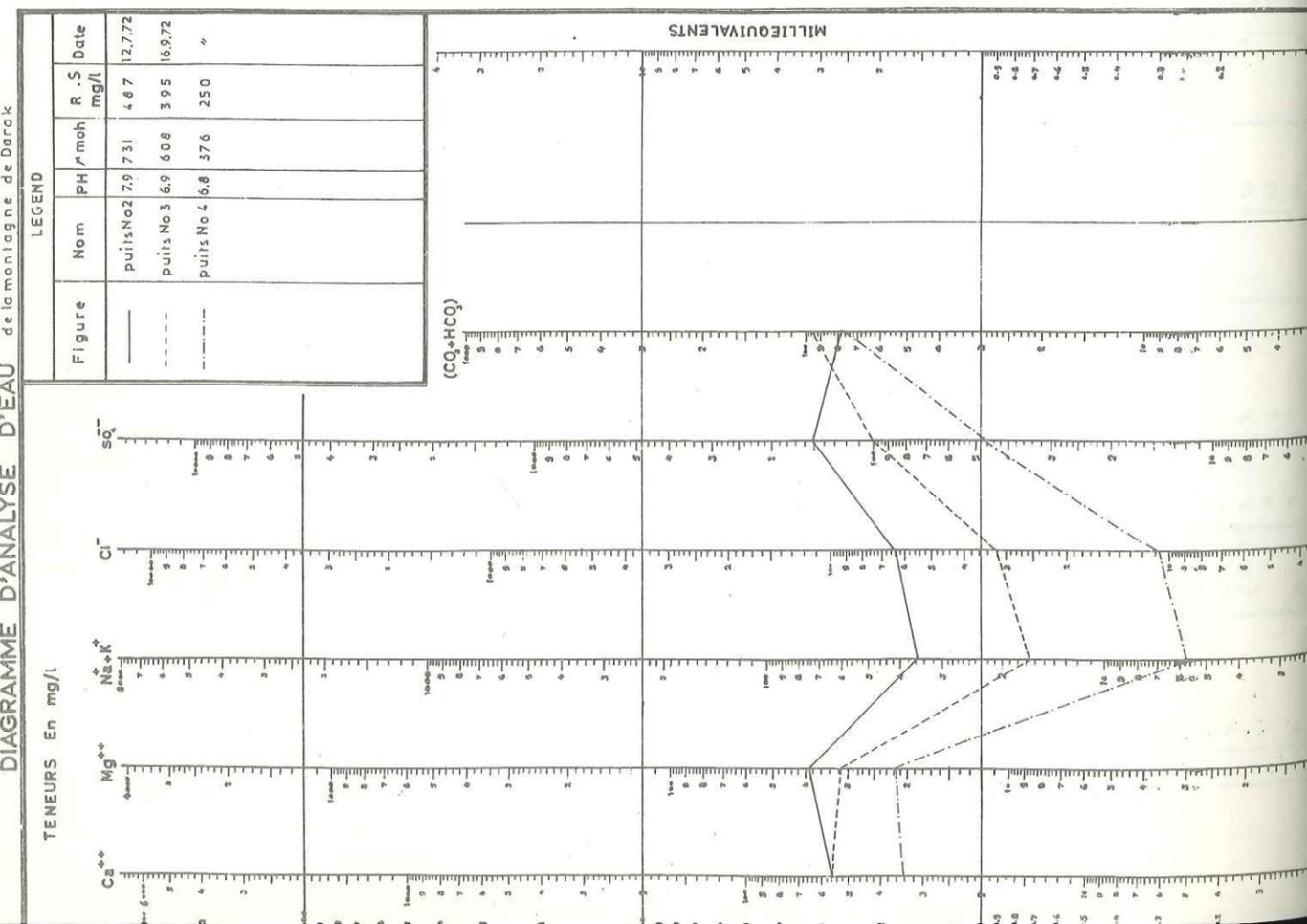


Fig. n° 110

et n° 2, Djafarkhani, Babounak et Mirzakhani. La teneur élevée en chlorure est liée à la présence du lac du Moharlu et de son bassin d'évaporation. Le résidu sec de ces sources est compris entre 2 300 et 5 200 mg/l.

2 - Le sous-groupe de Seyd Hassen (fig. 105)

Dans ce groupe, on a les ghanates Seyd Hassen (petite et grande).

Les rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca sont de 1,26, 0,56, 2. Les eaux de ce sous-groupe sont sous l'influence des sédiments miocènes et du bassin d'évaporation. La valeur du résidu sec est de 1 300 mg/l.

3 - Le sous-groupe de Garou (fig. 106)

Les rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca sont de 4,7, 0,08 et 21,4.

Dans ce groupe, on a placé seulement un point d'eau, le rapport de r Na/Ca est très élevé : 21,4. La valeur du résidu sec est de 5 800 mg/l.

4 - Le sous-groupe de Bidi (fig. 107)

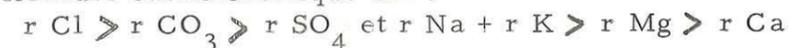
Les rapports de r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca sont de : 1,07, 0,4 et 2,3. La valeur du résidu sec est de 831 mg/l.

Ici, seule la source de Bidi a une teneur élevée en chlorure qui est liée au bassin d'évaporation de Ghareh-Bagh.

c - Le groupe de Pol-Brendji (fig. 108)

Dans ce groupe, nous avons trouvé deux points d'eau, qui sont liés aux bassins d'évaporation de Ghareh-Bagh et du lac du Moharlu.

La formule caractéristique est :



Les rapports r Mg/Ca, r SO<sub>4</sub>/Cl et r Na/Ca varient entre 1,15 et 1,2 ; 0,19 et 0,32 ; 3 et 3,4.

La valeur du résidu sec est comprise entre 850 et 1 600. Dans ce groupe, on a la source de Pol-Brendji et la ghanate de Khalili et on pourrait le diviser en deux sous-groupes : sous-groupe de Pol Brendji et sous-groupe de Khalili (fig. 109).

6.2.2.4 - Conclusion sur les différentes familles d'eau

Le diagramme de Piper (fig. 90) fait bien ressortir un groupement de tous les points représentatifs de la composition chimique de chaque eau dans la partie supérieure du losange et montre un passage quasi continu du groupe des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes vers des eaux chlorurées ou sulfatées qui traduit bien les phénomènes observés sur le terrain et qui sont liés aux influences relatives des diverses nappes.

6.2.3. - Relation entre la composition chimique des sources et des puits de chaque montagne de la région et la constitution géologique

6.2.3.1 - Kuh-Darak (fig. 110)

Dans cette montagne, on a seulement trois puits d'exploration et ces trois puits sont différents du point de vue chimique. Les puits n° 4 et n° 3 sont bicarbonatés, mais la teneur en SO<sub>4</sub><sup>-</sup> du puits n° 3 est plus forte que celle du puits

n° 4, à cause de neuf mètres de différence d'altitude entre ces puits, il existe des relations entre le puits n° 3 et la nappe des alluvions qui est riche en  $\text{SO}_4^{--}$  du fait de son contact avec les sédiments miocènes.

Le puits n° 2 est, lui, beaucoup plus sulfaté, du fait de relations plus importantes avec la nappe des alluvions. L'eau de ce puits est sulfatée magnésienne.

#### 6.2.3.2 - Kuh-Sabzpuchan (fig. 111)

Dans cette montagne, on a sept points d'eau (4 sources, 2 ghanates et 1 puits).

Au point de vue chimique, ils sont situés dans trois familles différentes, les types bicarbonaté, chloruré, sulfaté.

Le type bicarbonaté n'est pas sous l'influence d'autres éléments que les calcaires. Le type sulfaté est sous l'influence des sédiments miocènes, et on a le type chloruré, à cause de l'existence d'une zone d'évaporation (plaine de Ghareh-bagh).

#### 6.2.3.3 - Kuh-Ghareh (fig. 112)

Les sources de cette montagne sont situées dans des familles différentes. La source Baba hadji est sulfatée à cause de la proximité des sédiments miocènes et la source du Moharlu, ainsi que les autres sources que l'on trouve à la bordure du lac sont chlorurées, à cause du voisinage du lac Moharlu.

#### 6.2.3.4 - Siyah-Kuh (fig. 113)

Les sources et le puits de cette montagne sont liés aux familles sulfatées car la teneur en sulfates est due à la présence des sédiments paléocènes et miocènes.

On note que deux sources de cet anticlinal sont pauvres en  $\text{Cl}^-$  et que cette pauvreté est due à l'élévation d'altitude.

#### 6.2.3.5 - Kuh-Ahmadi (fig. 114)

Dans cette montagne, il n'y a pas de sources considérables ; on a seulement deux ghanates et un puits d'exploration. La ghanate de Robot est bicarbonatée et les autres sont sulfatées, à cause des sédiments (marnes et gypses) du Paléocène.

#### 6.2.3.6 - Kuh-Kaftarak et Bamu (fig. 115 - 116)

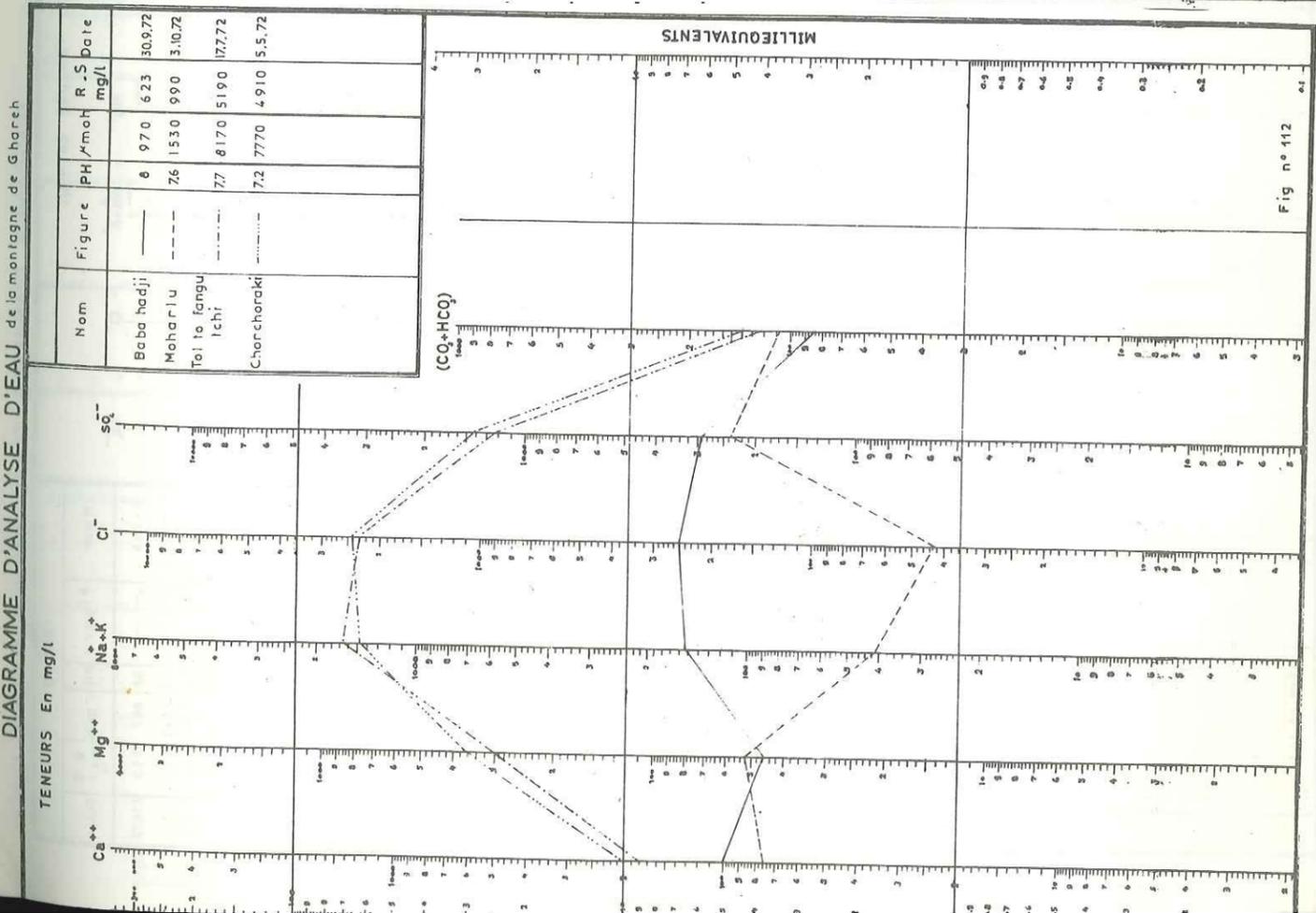
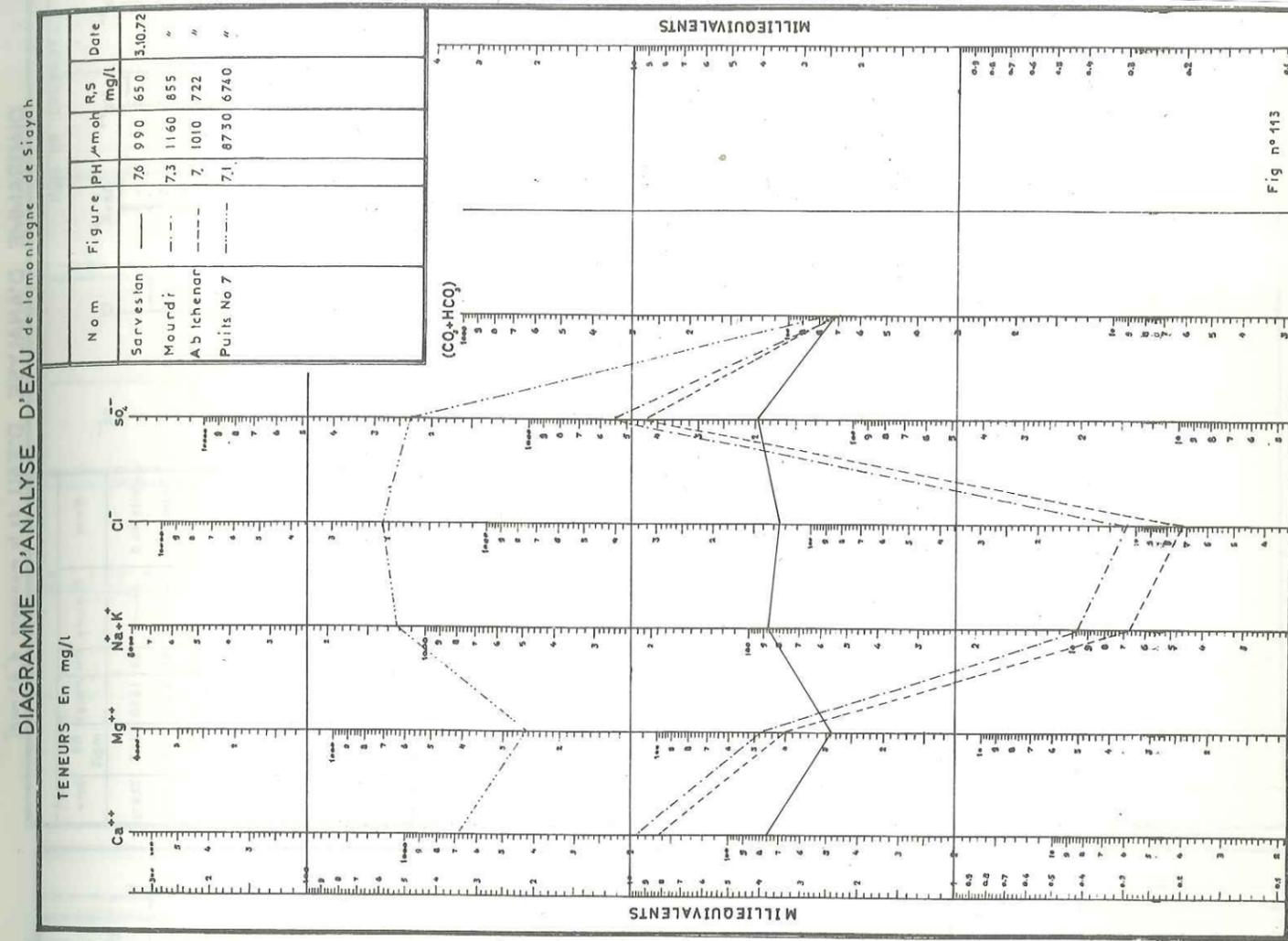
Dans ces montagnes, on trouve 16 points d'eau, on peut dire que dans l'anticlinal de Kaftarak, on a la collection de toutes les familles différentes que l'on trouve dans le bassin du Moharlu.

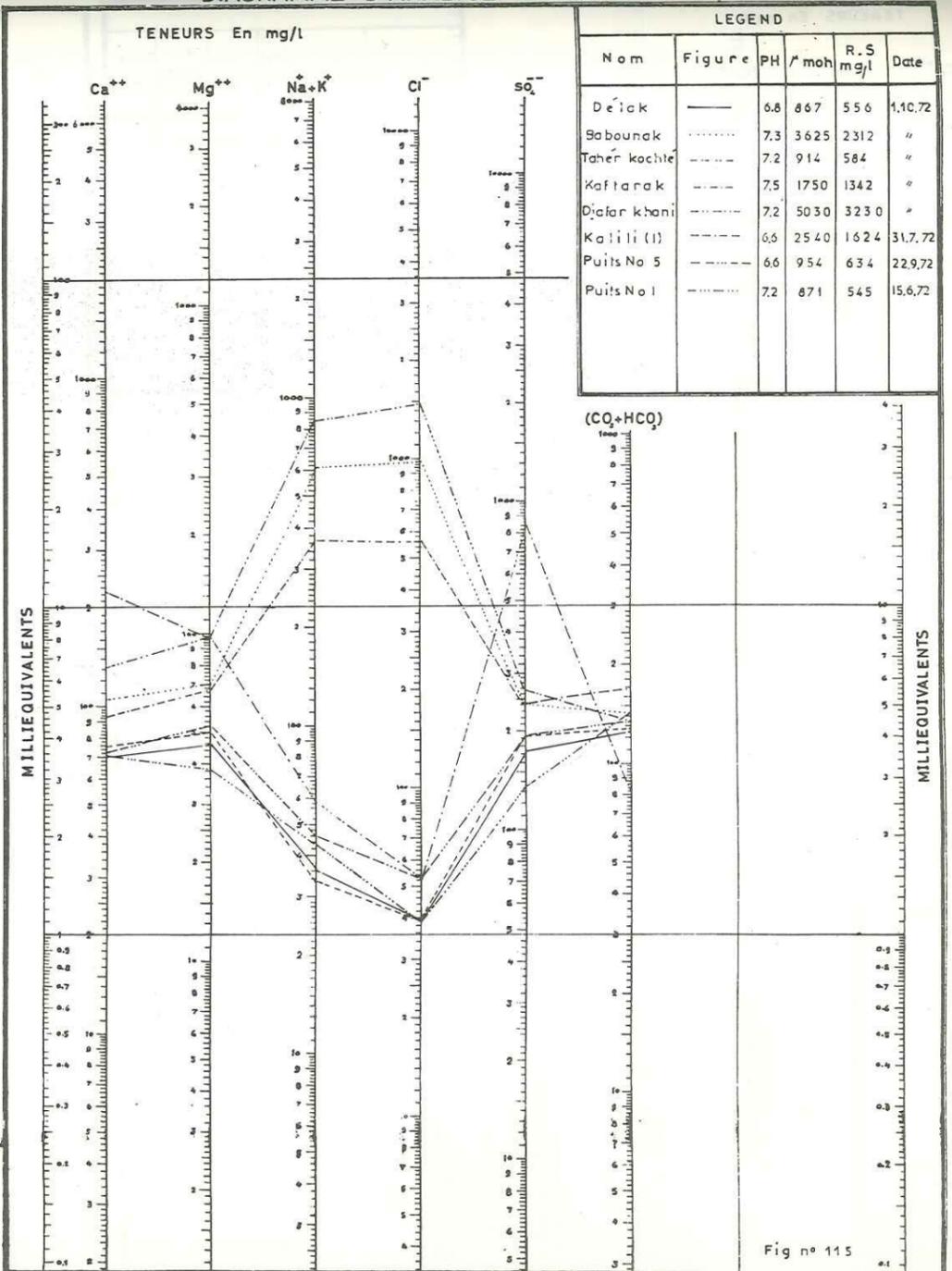
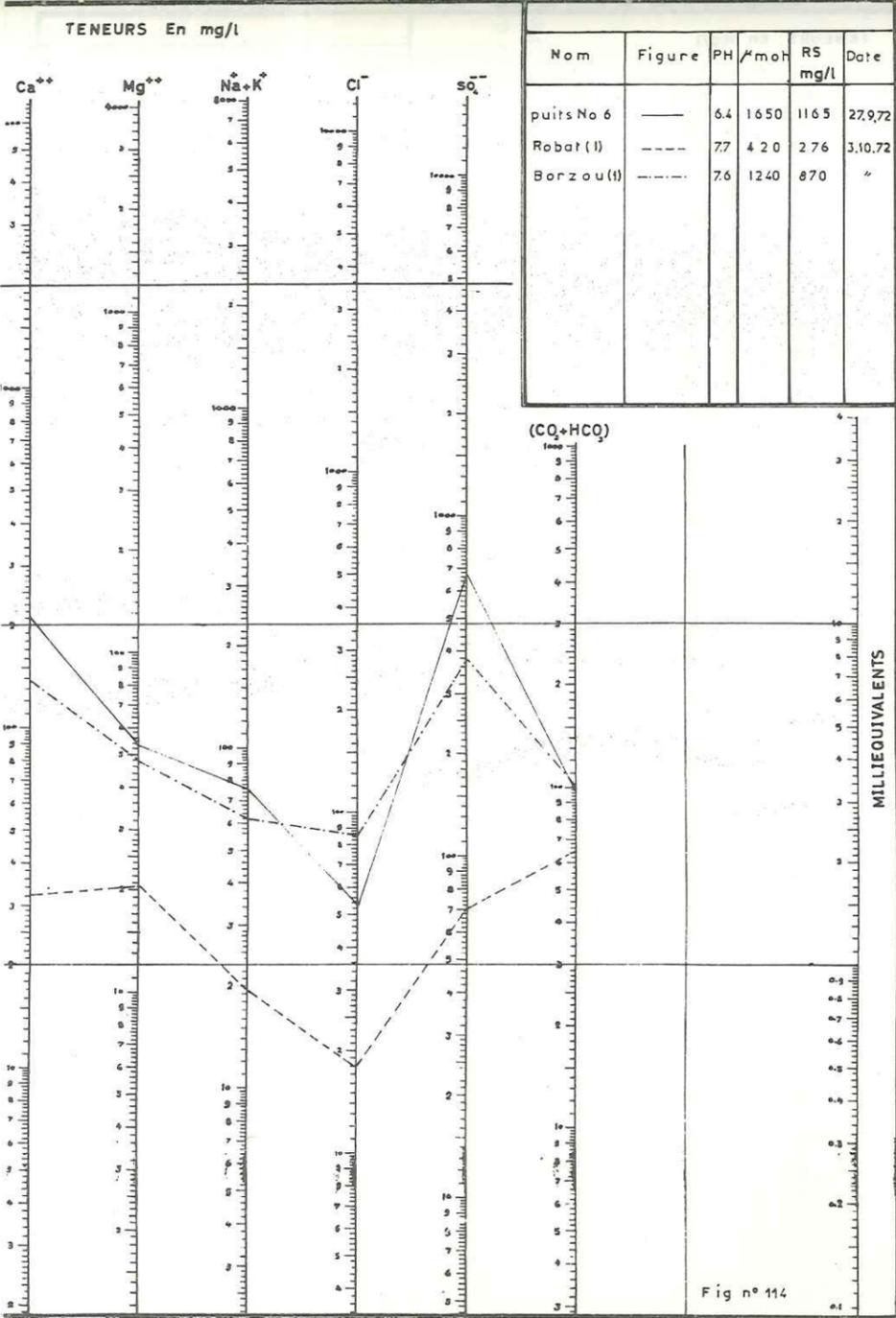
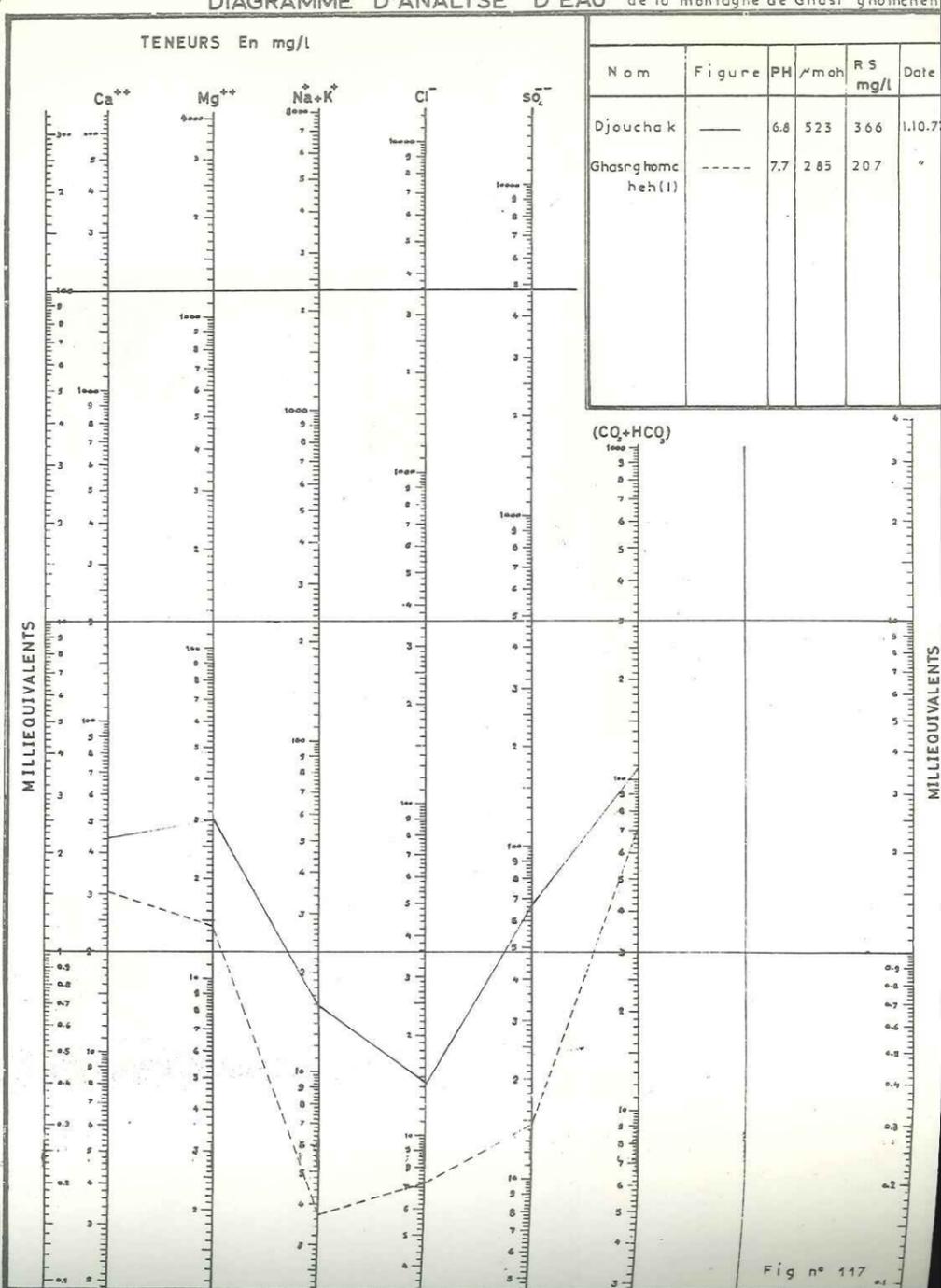
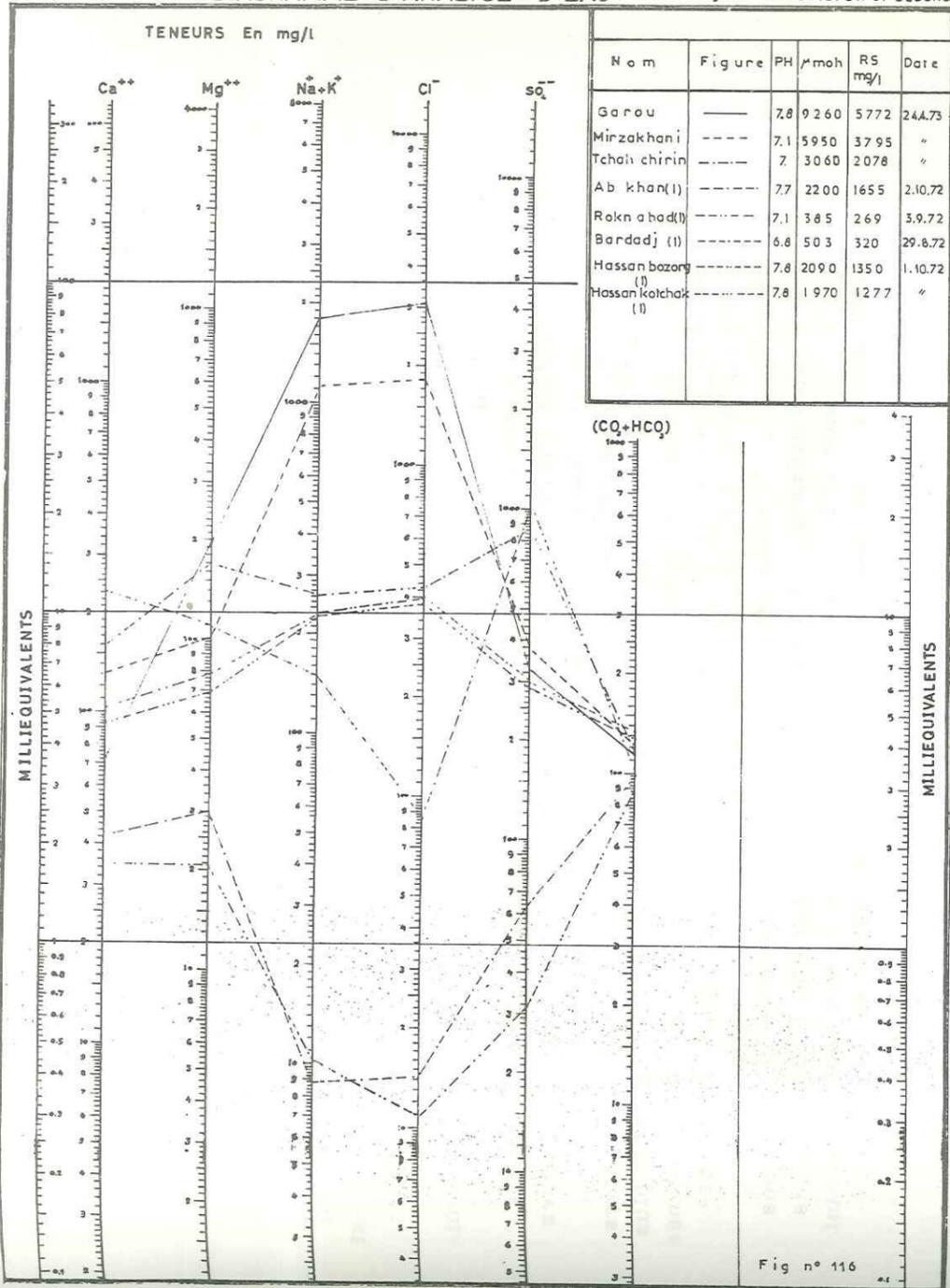
Le sulfate est dû aux sédiments paléocènes que l'on trouve au centre de cet anticlinal et aux sédiments miocènes de la bordure.

La teneur en  $\text{Cl}^-$  de quelques sources est due à la proximité de la zone d'évaporation et du lac Moharlu.

#### 6.2.3.7 - Kuh-Chasré-Ghomchek (fig. 117)

La qualité des eaux de cette montagne est bonne, on a seulement une teneur un peu élevée en sulfates due aux sédiments miocènes.





### 6. 3. - CONCLUSION

L'étude de la chimie des eaux montre que la composition des eaux des calcaires traduit une faible minéralisation due à une faible mise en solution qui peut provenir d'une certaine pauvreté des eaux d'infiltration en  $CO_2$ . Ce phénomène est classique dans les régions ou surtout les massifs calcaires dépourvus de végétation et même de sol.

La présence de magnésium en quantité notable confirme le caractère dolomitique des séries de Djahrom.

Les sulfates peu abondants dans les parties des massifs situées au-dessus du niveau des plaines de comblement sont en général liés au voisinage de couches de gypse et anhydrite miocènes et paléocènes.

Il convient de ce point de vue de distinguer très nettement les eaux sulfatées liées aux sédiments divers et les eaux chlorurées qui, elles, sont en relation plus ou moins directe avec les zones où se produit actuellement une évaporation intense qui amène la concentration des chlorures provenant des précipitations et du lessivage des zones superficielles des sols dans les plaines.

L'interférence entre les types d'eaux fondamentaux conduit à tous les types intermédiaires que nous avons signalé et ce sont les conditions hydrodynamiques locales qui régiront le plus souvent les équilibres entre les divers apports faisant évoluer les compositions chimiques dans l'espace, mais aussi dans le temps.

### 7e CHAPITRE

#### LES PLAINES ALLUVIALES DU BASSIN DU MOHARLU



Photo n° 14 - Plaine de Chiraz vue du sommet de l'anticlinal de Kaftarak -  
Au premier plan, surface structurale karstique des calcaires Asmari-Djahrom -

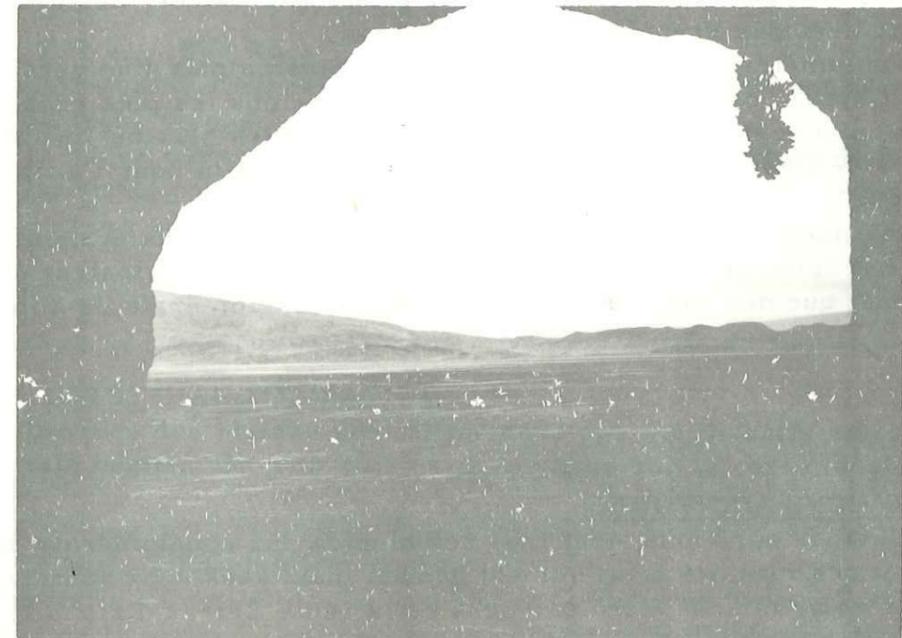


Photo n° 15 - Plaine de Chiraz vue depuis l'intérieur d'une cavité karstique  
sur le flanc sud de l'anticlinal de Kaftarak -

## CHAPITRE 7

### LES PLAINES ALLUVIALES DU BASSIN DU MOHARLU

#### 7.1. - INTRODUCTION

La plus grande partie des surfaces comprises entre les massifs calcaires correspond à des plaines de comblement où l'on rencontre de très importants remplissages alluviaux.

La surface totale de ces plaines de comblement est de 2 000 km<sup>2</sup> dans le bassin du Moharlu. La surface de la plaine de Chiraz est de 1 000 km<sup>2</sup>, celle de la plaine de Sarvestan est de 800 km<sup>2</sup> et celle de la plaine de Kavar, qui est liée au lac Moharlu est de 200 km<sup>2</sup>.

La puissance des matériaux alluvionnaires qui constituent le remplissage des diverses plaines est variable mais peut atteindre 200 mètres.

Les alluvions sont formées par des argiles, des sables, des graviers et des conglomérats avec des granulométries variables.

La granulométrie des alluvions devient de plus en plus fine vers le Sud Est de la plaine de Chiraz, près du lac Moharlu. Les alluvions les plus grossières sont au N-W de la plaine et on peut dire que les alluvions les plus perméables se rencontrent près de l'hôpital Namazi, où l'on trouve les puits pour l'alimentation de la ville de Chiraz.

Tous les matériaux, argiles, sables, graviers, cailloux et même gypses proviennent de l'érosion et de la décomposition des sédiments calcaires de l'Eocène, Oligocène ainsi que des marnes, gypses, grès et conglomérats du Miocène et du Pliocène.

#### 7.2. - ALLUVIONS ANCIENNES

Les alluvions anciennes sont très semblables aux conglomérats du Pliocène. Elles forment des massifs relativement grands mais sans eaux souterraines.

On peut observer ces alluvions près de la route Chiraz-Esfaham.

Ces formations ont été apportées par des torrents importants. Elles sont constituées par des conglomérats contenant des galets calcaires d'Asmari-Djahrom dans un ciment calcaire. On ne trouve, dans ces alluvions, aucun élément siliceux.

#### 7.3. - ALLUVIONS RECENTES

##### 7.3.1. - Les alluvions du lac Moharlu

Autrefois le lac Moharlu était plus vaste qu'aujourd'hui. Il recouvrait les plaines de Chiraz, de Sarvestan et de Kavar. Les alluvions fines, relativement homogènes et salées du Sud Est de la plaine de Chiraz et d'une grande partie de la plaine de Sarvestan montrent le développement du lac Moharlu aux époques anciennes.

##### 7.3.2. - Les alluvions des plaines

Elles sont constituées par les argiles, les graviers, les sables et les silts. En raison de leur granulométrie, les eaux superficielles s'infiltrent facilement.

Les sondages dans la terminaison de la plaine de Chiraz, près de Djafarahad et au centre de la plaine de Kavar montrent que ces alluvions sont formées par des alternances de sables grossiers et de limons fins - qui près du lac sont accompagnées par des gypses. La puissance de ces formations est variable. Elle peut atteindre 120 m, mais au voisinage du lac la puissance des limons augmente. Dans les parties sud et nord ouest de la plaine de Chiraz la puissance de ces limons n'est plus que de 10 à 15 mètres.

##### 7.3.3. - Les alluvions actuelles

On peut voir ces formations dans la rivière Khochk, au pied des massifs calcaires de Babakuhi et Kaftarak, et on peut aussi les distinguer dans la rivière de Nazarabad, près de la montagne Siyah à Sarvestan.

##### 7.3.4. - Bed Rock

Le substratum des nappes alluviales, dans cette région est formé par les marnes du Miocène (groupe du Fars).

Dans la partie ouest de la plaine de Chiraz, le substratum de la nappe alluviale est constitué par les conglomérats du Pliocène qui ont une puissance de 10-15 m. Sous ces sédiments, on a les marnes miocènes.

#### 7.4. - LES ZONES D'ALIMENTATION

Les alluvions des plaines sont alimentées par les massifs calcaires qui sont autour de cette région. On peut voir ce phénomène sur la carte isopièze.

##### 7.4.1. - La plaine de Chiraz

Les massifs calcaires de Sabzpuchan et le ravin de Tchenar Rahdar alimentent la partie sud de la plaine. Les montagnes calcaires de Babakuhi, Kaftarak, Darak et la rivière Khochk alimentent les parties nord et nord ouest de la plaine de Chiraz. Les plaines d'Akbarabad et Badjgah sont alimentées aussi par les massifs calcaires de Bamu. On peut voir beaucoup de puits superficiels au pied de ces montagnes avec des débits considérables.

L'existence de ces puits montre l'alimentation des alluvions par les calcaires.

L'écoulement souterrain se fait avec une pente analogue à la pente topographique, mais la vitesse de l'écoulement dans les cônes de déjection, les lits des rivières et l'ancien lit de la rivière Khochk (qui était au Sud de sa position actuelle) est très grande.

#### 7.4.2. - La plaine de Sarvestan

Les alluvions de cette région sont alimentées par les massifs calcaires qu'on trouve au SW et aussi au NE et aussi par les cônes de déjection.

Les écoulements souterrains se font de l'Est vers l'Ouest, en direction du lac Moharlu. On a aussi de petits écoulements du Nord et de l'Est vers le centre de la plaine.

#### 7.4.3. - La plaine de Kavar

Cette plaine est alimentée par les montagnes calcaires situées au Sud et par la rivière de Gharah-aghatch. Il faut ajouter que les massifs calcaires que l'on trouve au Nord de cette plaine ne jouent aucun rôle d'alimentation pour les alluvions de Kavar. Ce phénomène est clair sur la carte isopièze de cette région, d'autant plus que les quantités de sels dissous diminuent vers le centre de la plaine. Cette anomalie est due à l'existence d'une grande faille au pied de la montagne de Gharah, au Nord de la plaine de Kavar.

Il semble en effet que cette faille empêche l'écoulement des eaux du massif calcaire vers la plaine et les draine en direction du Nord Ouest où se situent les sources de Barm-Babahadji.

Les plaines de cette région sont remplies par des sédiments silteux d'origine lacustre ayant une faible perméabilité. On constate que les formations qui alimentent la nappe libre sont des alluvions déposées dans les lits des rivières et des torrents.

#### 7.5. - LES CONES DE DEJECTION

Le développement de ces formations est considérable. Les cônes sont constitués par des cailloutis, des graviers, des sables et plus rarement par des alternances d'argiles et de limons.

L'indice d'infiltration de ces formations est grand à l'amont et à l'aval à cause du remplissage des vides par les limons et les argiles. Il n'est pas intéressant.

#### 7.6. - LES PUIITS

Dans les plaines du bassin versant du lac du Moharlu, on trouve plus de 1 600 puits superficiels et profonds, avec un débit annuel de 245 millions de m<sup>3</sup>.

La distribution de ces puits est la suivante : la plaine de Chiraz compte environ 1 000 puits superficiels et profonds. Dans la plaine de Kavar, on ne trouve plus que 300 puits et un peu moins de 300 dans la plaine de Sarvestan.

#### 7.7. - LES GHANATES

Dans cette région, il y a à peu près 105 ghanates avec un débit de 90 millions de m<sup>3</sup> par an.

#### 7.8. - CHIMIE DES EAUX DES ALLUVIONS

##### 7.8.1. - La plaine de Chiraz

On trouve dans la partie nord, en raison de l'existence des massifs calcaires de Babakuhi et de la rivière Khochk des eaux de bonne qualité chimique. Il en est de même à l'Ouest, en bordure des montagnes de Darak et Ghasr-ghomcheh et au Sud, près de la montagne Sabzpuchan. Nous avons déjà montré que les écoulements des eaux souterraines de ces secteurs se font vers le lac Moharlu. Nous avons également montré, que lorsque l'on s'avance vers le centre de la plaine et le lac Moharlu, il y a une augmentation des sels dissous dans les eaux souterraines.

Il existe aussi une anomalie au point de vue chimique à la partie sud est de la plaine de Chiraz, en raison du voisinage de la rivière de Tchenar-Rahdar, qui passe sur les sédiments du Miocène, à côté de la route de Chiraz-Kazerun.

##### 7.8.2. - La plaine de Kavar

La ressource essentielle pour l'alimentation de la nappe de cette plaine est la rivière Gharah-aghatch, qui entre du côté sud et s'écoule à la partie est de la plaine de Kavar. En raison du passage de cette rivière et de la présence de sédiments grossiers, l'infiltration dans la partie est est plus forte que sur les autres côtés de cette plaine.

La plaine est aussi alimentée partiellement par les petits ravins et éboulis que l'on trouve au pied des montagnes des parties ouest et sud ouest.

Au centre de la plaine s'établit un bassin d'évaporation et les quantités de sels dissous sont très élevées.

##### 7.8.3. - La plaine de Sarvestan

Les ressources pour l'alimentation de cette plaine sont les ravins que l'on trouve au pied des montagnes. Les écoulements souterrains vont de l'Est vers l'Ouest.

L'infiltration est bonne dans la partie E de la plaine, en raison des alluvions grossières sédimentées dans les lits des torrents ainsi qu'au pied des montagnes Ahmadi au Nord et Guchtasb au Sud de la plaine de Sarvestan.

Dans une grande partie de cette plaine, jusqu'au lac Moharlu, le niveau des eaux est très proche de la surface ou même coïncide avec la surface du sol en raison de faibles perméabilités des alluvions très fines, d'origine lacustre qui recouvrent une très grande partie de cette plaine.

Pour la nappe souterraine de la ville de Chiraz, en raison de l'absence d'égouts et de l'influence des puits perdus, on a une courbe fermée sur la carte d'isoconductivité (plus de 2 000 micromhos/cm). Il faut ajouter aussi que chaque jour, pour le lessivage des appareils adoucisseurs, on utilise des eaux salées, qui entrent dans la nappe souterraine par l'intermédiaire de la rivière Khochk. On peut distinguer l'influence de ces eaux depuis la direction de l'avenue Zand, jusqu'au centre de la ville.

### 7.9. - EN RESUME

En résumé, on constate les faits suivants :

#### 7.9.1. - La plaine de Chiraz

Les parties de la nappe alluviale qui sont près des massifs calcaires sont bicarbonatées. Au voisinage des sédiments miocènes, en raison de l'existence des gypses, la nappe est sulfatée, et au centre de la plaine et autour du lac Moharlu, la nappe est chlorurée.

#### 7.9.2. - La plaine de Sarvestan

Les eaux de cette plaine ne sont pas bonnes; elles sont normalement sulfatées et au centre de la plaine elles sont chlorurées. On a seulement quelques points d'eau qui sont bicarbonatés, par exemple la ghanate de Robate, au pied de la montagne Ahmadi.

#### 7.9.3. - La plaine de Kavar

Ici aussi la plupart des eaux sont sulfatées. Ce n'est qu'au Sud, près de la montagne de Baghan que l'on a de l'eau bicarbonatée.

### 7.10. - LES RESULTATS DES ETUDES GEOPHYSIQUES

Des recherches par prospection électrique ont été faites dans le bassin du Moharlu et nous allons en résumer les résultats :

#### 7.10.1. - La plaine de Chiraz

On a une diminution des résistivités spécifiques des alluvions du Nord vers le Sud, en raison des variations de la granulométrie des sédiments et de l'augmentation des salinités des eaux et des terrains.

On peut distinguer ici trois zones :

1° - la partie nord de la plaine de Chiraz, qui est constituée par les alluvions grossières, et qui est très importante du point de vue hydrogéologique.

2° - La partie sud, qui est formée pour une grande partie de la plaine de Chiraz, qui est constituée par des alluvions fines et salines. Si l'on ne tient pas compte des parties voisines des massifs calcaires, ce secteur n'est pas important du point de vue hydrologique.

#### 3° - La partie intermédiaire

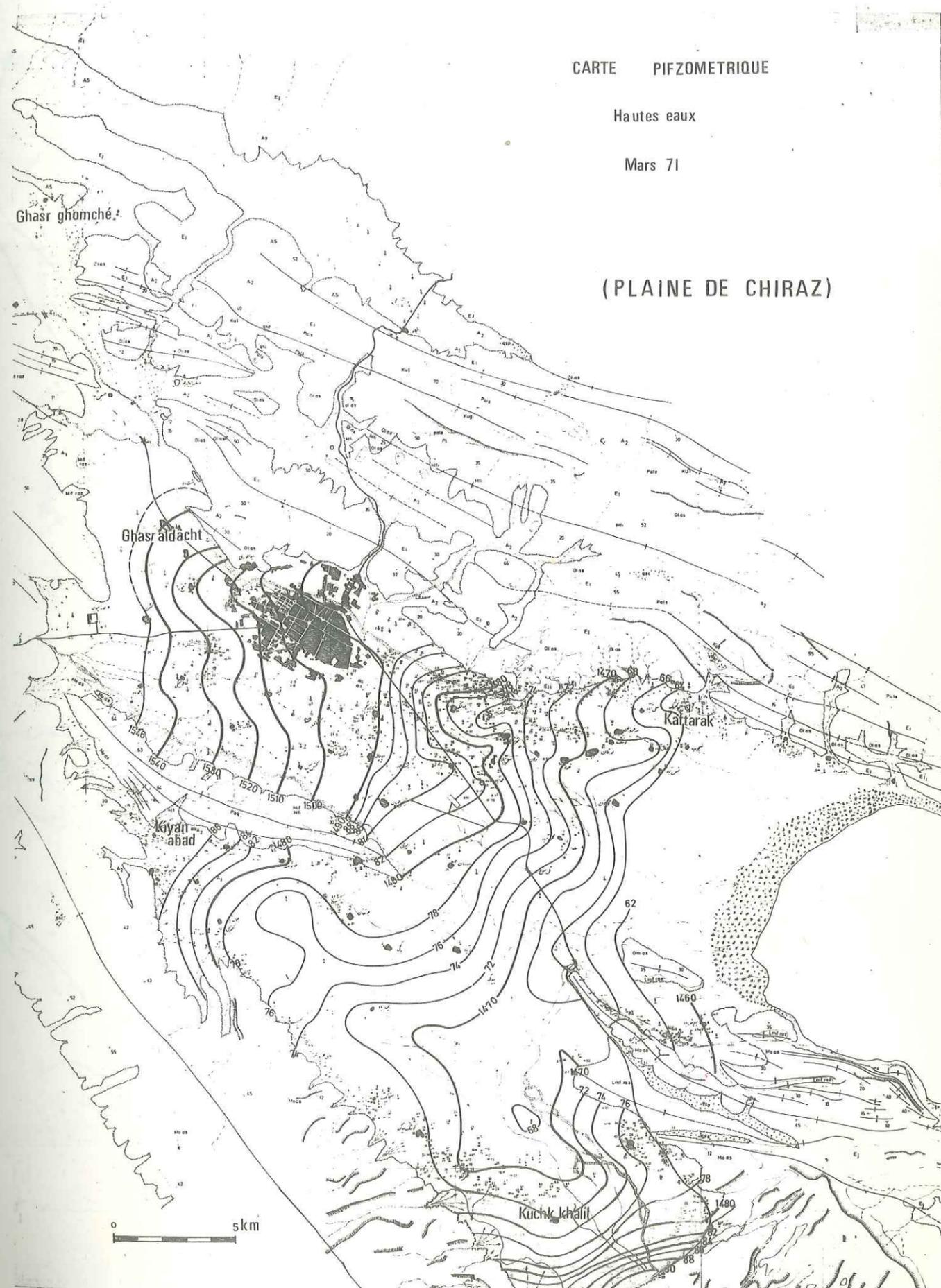
Dans la zone comprise entre les deux parties précédentes, on trouve tous les passages progressifs d'un type à l'autre, du fait de l'évolution conjointe des caractères de la sédimentation et de la composition des eaux souterraines.

CARTE PIZOMETRIQUE

Hautes eaux

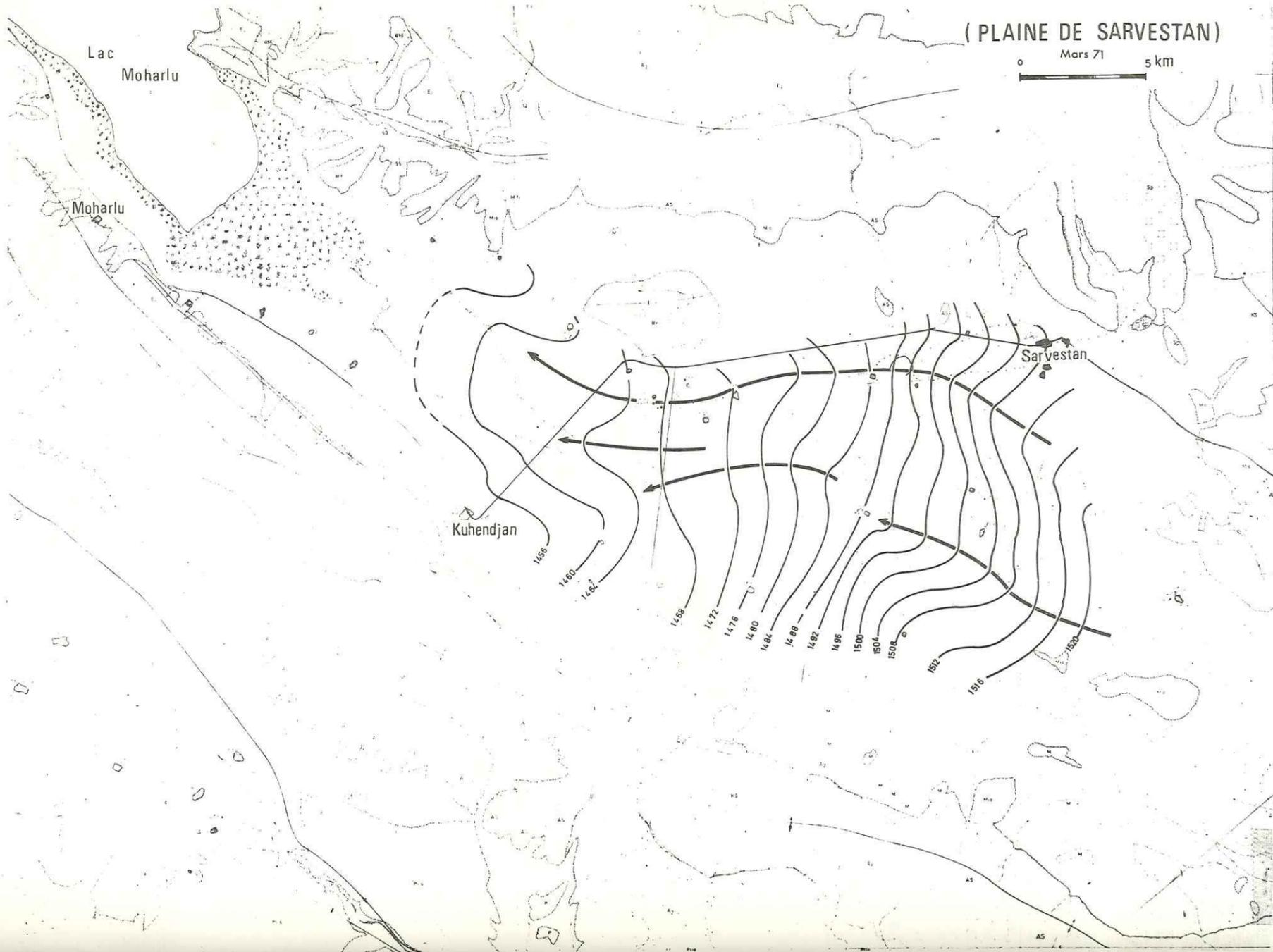
Mars 71

(PLAINE DE CHIRAZ)



( PLAINE DE SARVESTAN )

Mars 71 5 km



( PLAINE DE KAVAR )

Mars 71

2.5 km

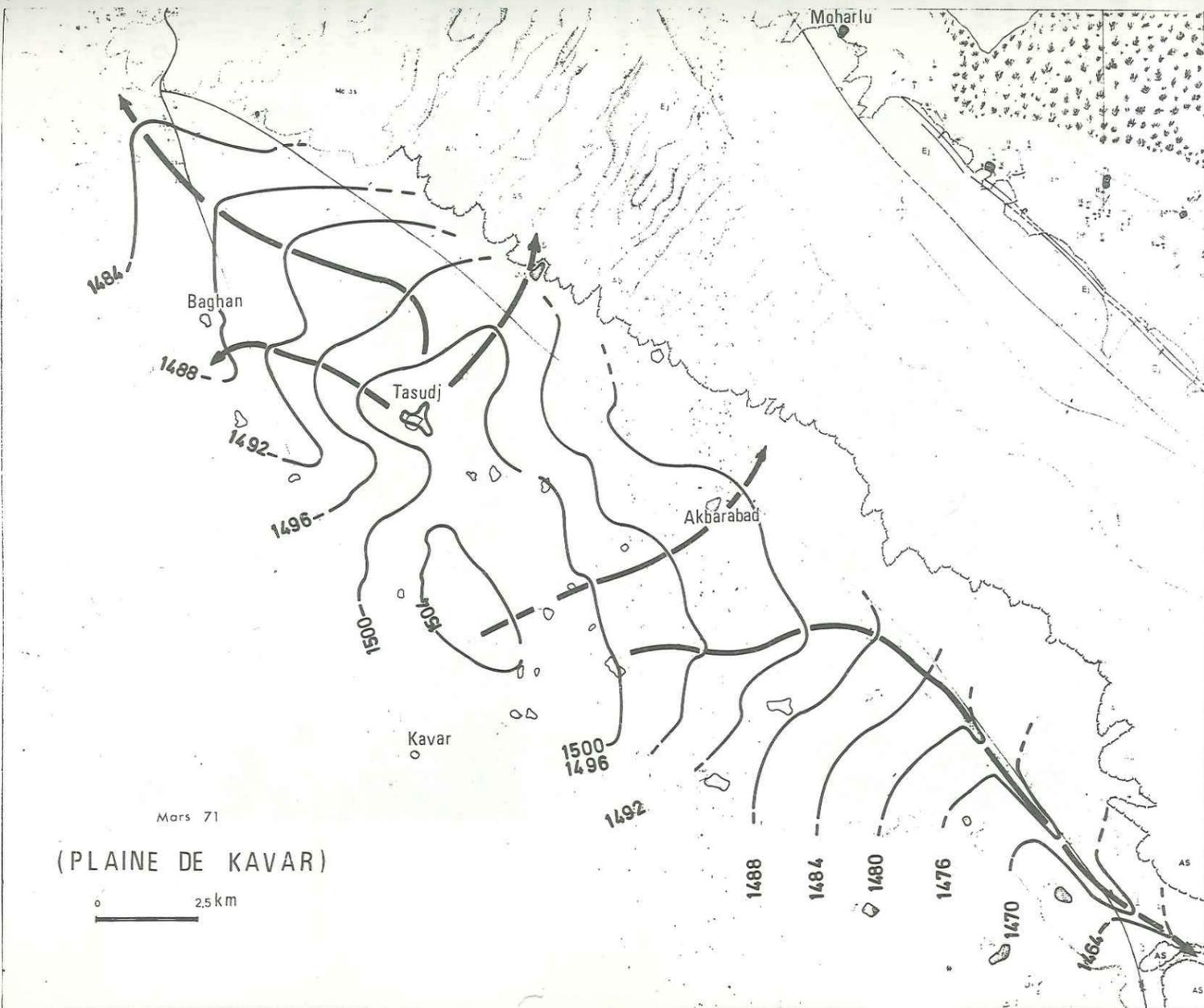




Photo n° 16 - Ennoyage de l'anticlinal de Saadi sous la plaine de Chiraz -



Photo n° 17 - Source de Barm-Babaunak en bordure de la plaine de Chiraz -

### Bed-Rock

Le substratum des alluvions de Chiraz au Nord et à côté des montagnes, est calcaire, mais au centre de la plaine, il est essentiellement constitué par les sédiments miocènes et miopliocènes.

La puissance des alluvions est variable. Lorsque le substratum est formé par les conglomérats, la détermination de la puissance des alluvions est difficile parce que les résistivités spécifiques des deux formations sont comparables.

En tout cas, on peut distinguer trois bassins profonds :

- un à l'Ouest de Ghasr-ghomchêh,
- l'autre à l'Ouest de la ville de Chiraz,
- et le troisième situé entre les villages Noorghan-Chamsabad et les montagnes du NE de la plaine de Chiraz.

#### 7.10.2. - La plaine de Kavar

Les résistivités diminuent vers le centre en raison de la granulométrie et de l'augmentation des teneurs en sels dissous.

Le substratum dans cette plaine est formé par les couches calcaires d'Asmari qui forment un synclinal N-NW-SE. L'axe de ce synclinal est au centre de la plaine de Kavar et cette dépression est remplie par les sédiments plus récents.

La profondeur des calcaires au centre de la plaine de Kavar est comprise entre 200 et 300 mètres.

Le "bed-rock" au centre de cette plaine est probablement constitué par les conglomérats pliocènes, tandis que sur les bordures il est constitué par les calcaires d'Asmari.

#### 7.10.3. - La plaine de Sarvestan

La résistivité spécifique du substratum de cette plaine est faible (de l'ordre de 15-20 ohms/m). La moitié nord et le centre de la plaine sont sous l'influence des eaux salées du lac Moharlu et cette zone n'est donc pas intéressante du point de vue hydrologique.

Le substratum des alluvions de Sarvestan, au pied des montagnes est calcaire, mais au centre de la plaine il est constitué par les conglomérats pliocènes. Le substratum calcaire dans la plaine de Sarvestan est très profond, parce que même dans les sondages électriques en ligne A B égale à 2 000 m on ne peut pas le distinguer sous le remplissage plus récent.

### 7.11. - LES SONDAGES DE RECONNAISSANCE

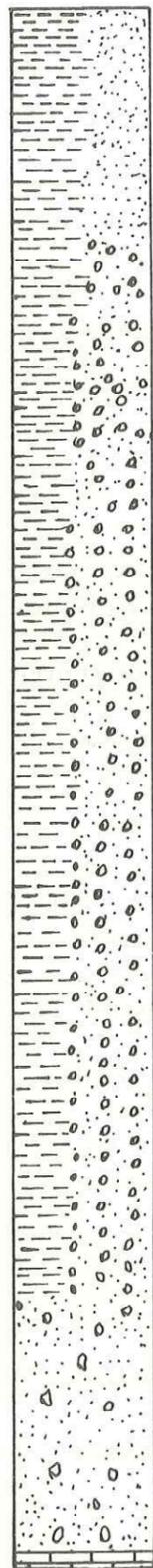
On a fait treize sondages de reconnaissance dans les plaines du bassin versant du lac Moharlu. La distribution de ces sondages est la suivante :

Dans la plaine de Chiraz : 8 sondages. Dans la plaine de Kavar : 3 sondages et 2 sondages pour la plaine de Sarvestan.

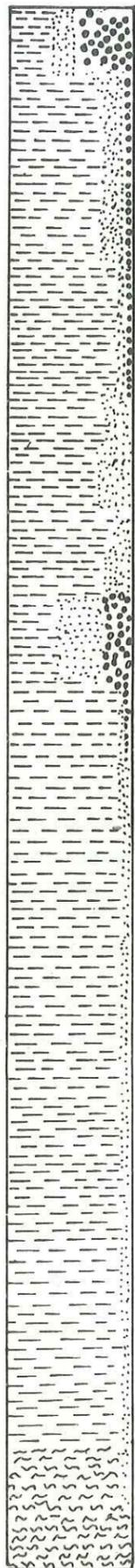
#### 7.11.1. - Etude des profils des sondages

Les sondages des plaines du bassin versant nous ont montré que le remplissage de la plaine est constitué par des argiles, silts avec sables et graviers, et on a, dans certaines zones, des couches sableuses alternant avec des graviers qui sont perméables comme dans le sondage de Ghebleh, au Sud de la ville, près de l'ancien aéroport.

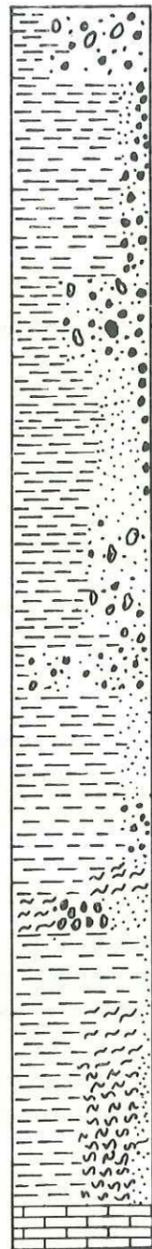
Coupes des forages dans le Quaternaire



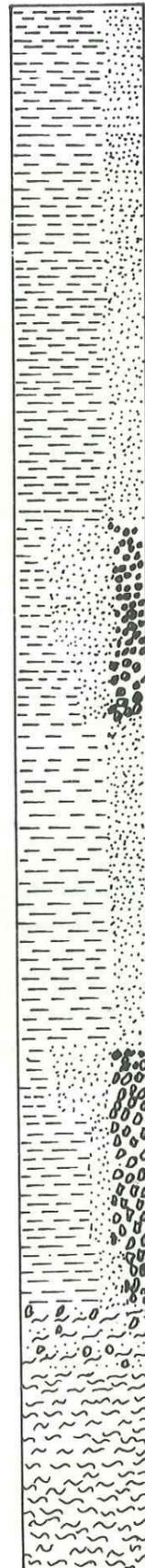
Kaftarak (Chiraz)



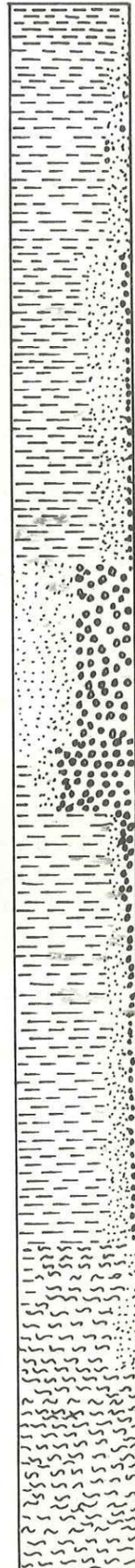
Kiyanabad (Gharabagh)



Baghan (Kavar)



Deh now (Sarvestan)



Sarvestan

A l'amont de la plaine de Chiraz, au pied des montagnes calcaires, on peut observer des éléments grossiers sur les coupes des sondages, comme celui de Ghasr-aldacht, au Nord Ouest de Chiraz et ceux de Kaftarak et Kuchk Khalil à l'Est et au Sud de la ville de Chiraz, au pied des montagnes Kaftarak et Ghareh.

On trouve aussi des cristaux de gypses jusqu'à 70 m dans les alluvions du centre de la plaine de Chiraz. Ces éléments sont bien visibles sur les coupes du puits de Djafarbad.

Les débits de ces sondages sont variables à cause de la nature des remplissages et des zones d'alimentation. Lorsque nous sommes près des montagnes, les débits augmentent comme c'est le cas pour le puits de Kaftarak, qui a un débit de 235 m<sup>3</sup>/h, pour un rabattement de 23,5 m.

Les résultats du pompage d'essai nous ont montré qu'à la périphérie de la plaine de Chiraz on a une nappe d'eau douce, et, qu'au SE de la plaine la nappe est très salée, à cause de l'existence du bassin d'évaporation qui est bien marqué sur la carte isopièze de la région. Il faut ajouter aussi que près de l'aéroport et au bord du lac Moharlu, la nappe superficielle jusqu'à 70 m, est plus salée que la nappe profonde.

A cause de l'exploitation intense de la nappe de la plaine de Guchnegan, on a observé l'avancée de la nappe salée du lac Moharlu vers la plaine.

7.12. - AGE DU REMPLISSAGE

Comme toutes les grandes plaines de comblement qui sont si caractéristiques de l'Iran, et que l'on désigne dans la littérature sous le nom de playas, les remblaiements des cuvettes du bassin du Moharlu posent un problème de datation.

On n'a jamais trouvé, à notre connaissance, d'éléments fossiles, tels que des bois ou des coquilles permettant une datation des formations rencontrées dans les plaines de Chiraz, de Sarvestan et de Kavar.

On sait que le Pliocène y est représenté par les cailloutis de la formation Baktyari. Tous les autres sédiments doivent donc être d'âge quaternaire.

Seules des considérations morphologiques et climatiques peuvent permettre de situer dans le temps les épisodes de sédimentation qui ont abouti au comblement actuel qui se caractérise par des pentes extrêmement faibles des cônes de déjection.

On peut alors penser que c'est pendant des périodes comparables au Würm en Europe ou peut-être mieux au "pluviaux africains" que se sont produits les apports dans les cuvettes fermées et sans exutoire vers la mer de cette partie du Zagros. Les réseaux hydrographiques devaient être un peu plus développés que les réseaux actuels et se déplacer constamment, ce qui a entraîné l'extrême hétérogénéité de la répartition des sédiments fins ou grossiers tant verticalement que latéralement.

Il faudrait découvrir des restes fossiles pour aller plus avant dans une datation précise des dépôts observés dans le bassin du Moharlu.

7.13. - CONCLUSIONS

L'examen des cartes isopièzes et d'égale conductivité des eaux ainsi que l'étude des mesures géophysiques et des coupes de sondage réalisées font apparaître : l'énorme épaisseur des matériaux de comblement dans les cuvettes du

bassin du Moharlu et leur très grande hétérogénéité de détail.

La sédimentation est cependant relativement fine et liée à des apports d'origine locale.

On n'a pas de gros galets ou de cailloutis récents et tous les éléments sont empruntés au bed rock des bordures du bassin.

Le phénomène de comblement qui a abouti à la formation des "playas" en bordure de massifs très découpés par l'érosion et sans couverture végétale doit être attribué à des périodes beaucoup plus humides que la période actuelle, qui se sont probablement échelonnées dans le temps depuis le Pliocène ; mais dont l'une des plus importante paraît se situer au Würm (D. B. KIRINSLEY, 1970).

Du point de vue hydrogéologique, la répartition des eaux dans les sédiments est beaucoup plus liée aux zones d'apport ou d'évaporation qu'à la répartition des sédiments eux-mêmes, sauf le cas des couches sulfatées du Miocène.

Il est toutefois difficile de faire la part des apports d'eaux anciens ou récents dans le remplissage alluvial, et seule l'étude isotopique de ces eaux peut amener à plus de précision dans ce domaine.

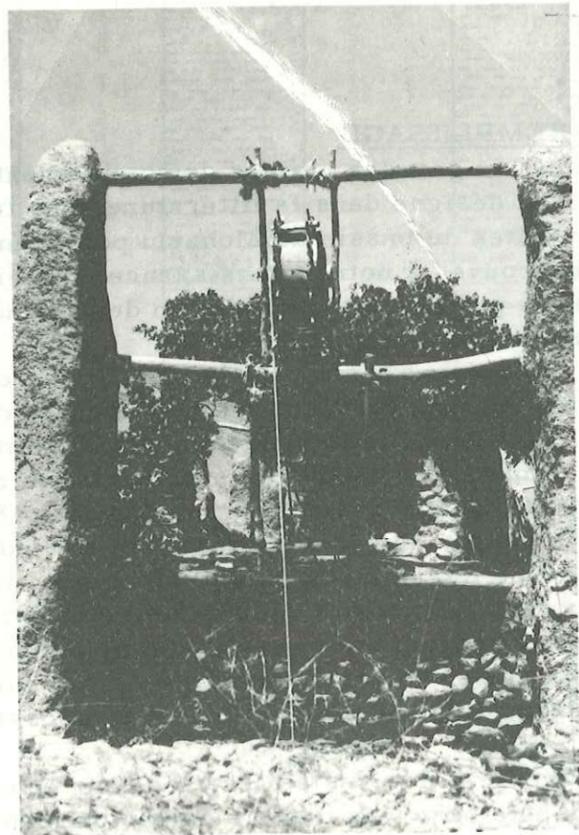


Photo n° 18 - Puits dans un cône de déjection à la bordure de la plaine de Charabagh -

## CHAPITRE 8

### PHENOMENES KARSTIQUES ET MODE DE CIRCULATION DES EAUX

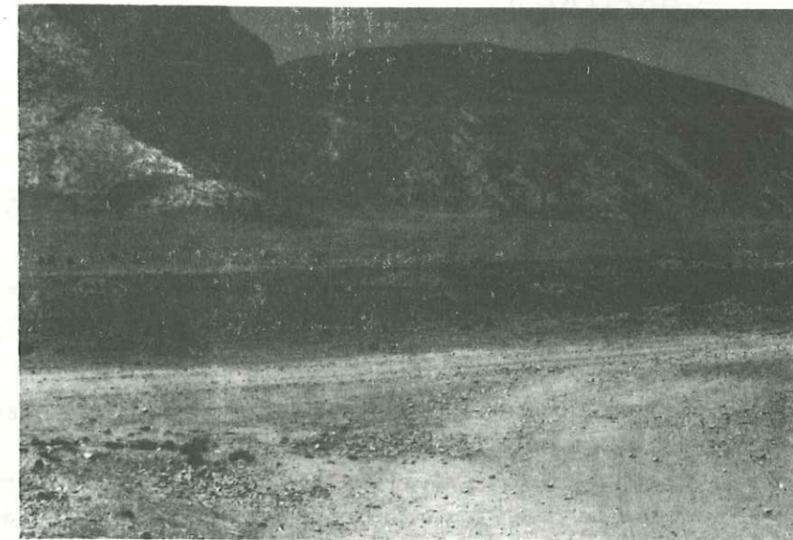


Photo n° 19 - Système de fractures sur la bordure de l'anticlinal de Sabzpuhan dans les calcaires Asmari-Djahrom -



Photo n° 20 - Cavités et chenaux karstiques dans les niveaux conglomératiques de la formation Asmari-Djahrom sur la bordure de la montagne de Kaftarak (Sarvestan) -

CHAPITRE 8

PHENOMENES KARSTIQUES ET MODE DE CIRCULATION DES EAUX

---

L'existence de phénomènes de karstification des calcaires Asmari-Djahrom, dans le bassin du Moharlu est indiscutable.

On observe des grottes et des galeries, très nombreuses, tant dans la montagne de Kaftarak que dans le massif de Sabzpuchan qui domine la source de Pir-Benau.

De nombreux chenaux servent d'émergences aux sources que nous avons décrites, mais s'observent également dans les falaises qui dominent les sources.

Tous les chenaux ou grottes que nous avons pu visiter présentent des pentes relativement faibles.

Nulle part sur les versants des différentes montagnes qui correspondent très souvent à des surfaces structurales, nous n'avons pu observer de scialets, de gouffres, de puits verticaux ou de zones d'effondrement comme on en rencontre généralement dans les massifs karstiques.

Ce n'est que dans la région de Delak que l'on constate l'existence en surface des orifices de petits conduits verticaux de quelques centimètres de diamètre. Il est extrêmement vraisemblable pourtant que la karstification des calcaires est très ancienne, mais la localisation des chenaux est, à notre avis une liaison avec la solubilité des différents horizons qui constituent la masse des calcaires Asmari-Djahrom, et plus spécialement de la teneur des bancs successifs en dolomie.

Si l'on admet que les bancs supérieurs de la formation Asmari sont assez fortement dolomitiques et surmontent une zone plus calcaire qui comporte, même à sa base, des niveaux conglomératiques reposant, à leur tour, sur un nouvel ensemble dolomitique, on comprend alors que les zones de dissolution se localisent plus particulièrement dans la formation calcaire et surtout à sa base, au niveau des conglomérats.

Les eaux s'infiltreraient par les fissures et fractures des niveaux dolomitiques supérieurs et circuleraient au niveau des assises calcaires, dans des chenaux qui serviraient de trop-plein à la nappe qui s'établit dans les zones fissurées de l'ensemble dolomitique inférieur.

On aurait donc une zone dolomitique d'infiltration, une zone calcaire de dissolution et circulation, et une zone inférieure dolomitique de stockage.

Les circulations actuelles dans les chenaux sont liées au niveau de base géographique déterminé, soit par le niveau du lac du Moharlu, soit par celui des nappes alluviales dans les plaines de comblement.

Ce niveau de base qui ne coïncide pas avec un véritable niveau de base géo-

logique a d'ailleurs évolué au cours des temps et a certainement été beaucoup plus bas que le niveau actuel au Quaternaire et même au Miocène, et au Pliocène.

L'existence de grandes cavités recoupées par les sondages des puits n° 3 et n° 4 à des profondeurs de l'ordre de 100 m est une preuve de la position assez basse du niveau de base des cavités, provenant de dissolution n'ayant pu se former que dans des zones de circulation, c'est-à-dire au-dessus de ce niveau de base.

Le creusement de cavités ne peut s'envisager dans des zones d'eaux mortes (immobiles) où la saturation est très vite atteinte.

On sait d'ailleurs que les remplissages des plaines du bassin du Moharlu datent, pour une bonne part, du Quaternaire et plus particulièrement du Würmien.

A cette époque déjà les eaux infiltrées dans les massifs calcaires et qui étaient certainement beaucoup plus abondantes qu'à l'heure actuelle, du fait des conditions climatiques, s'écoulaient par les réseaux karstiques recoupés par les sondages.

Au Pliocène, ces conditions devaient également exister sans que l'on puisse être très précis, mais l'abondance des conglomérats de cet âge montre que l'on devait avoir des cours d'eau très puissants dans la région et que, par conséquent, la karstification a dû être aussi intense.

On sait également que les plis anticlinaux et synclinaux de la région étudiée ont commencé à se former durant le Miocène et que la mer n'a plus subsisté que dans les gouttières synclinales au Miocène moyen et supérieur.

Son niveau constituant un niveau de base pour les circulations aquifères, la karstification a déjà pu commencer à cette époque dans les calcaires Asmari-Djahrom, d'autant plus que les conditions climatiques comparables à celles que l'on connaît sur la périphérie du bassin méditerranéen étaient très favorables.

En résumé, on peut donc dire que la karstification que l'on observe dans les massifs calcaires de la formation Asmari-Djahrom correspond à un phénomène très ancien dont l'évolution est liée aux fluctuations du niveau de base géographique, mais dont la localisation correspond à la répartition des zones de sédimentation dolomitique ou calcaire, tant verticalement qu'horizontalement.

Il semble en effet, comme l'a montré L. E. RICOU, que certains massifs, plus dolomitiques, tel que Sabzpuchan, ne présentent pas de zones karstifiées qui sont donc surtout localisées dans les niveaux calcaires qui correspondent, eux, à la reprise de la sédimentation marine dont le début est marqué par la présence de conglomérats et qui traduit une certaine discordance entre les formations Asmari et Djahrom.

Cette discordance liée à des déformations embryonnaires explique le déplacement des zones de sédimentation dolomitique entre l'Eocène et l'Oligocène.

On peut ajouter enfin que les déformations tectoniques paroxysmales de la fin du Miocène et du Pliocène, et spécialement les grandes fractures verticales qui bordent en particulier la plaine de Chiraz ont provoqué la remontée de certaines zones de circulation très au-dessus du niveau de la plaine, ce qui a provoqué leur assèchement et leur fossilisation.

Il faut signaler enfin que les conditions climatiques actuelles sont assez peu favorables au développement de la karstification qui reste tributaire des apports, certes très importants, par les fissures et fractures, mais pauvres en acide carbonique, du fait de l'absence totale de sols depuis extrêmement longtemps.

## 8.2. - AGE ET MODE DE CIRCULATION DES EAUX

### 8.2.1. - Principes

Pour étudier l'âge et le mode de circulation des eaux souterraines dans le bassin versant du Moharlu, nous avons été amené à employer les méthodes d'analyse isotopique et spécialement des études de teneurs en tritium et C14.

Il nous paraît intéressant de rappeler ici sommairement les principes de répartition de ces éléments dans les eaux.

### 8.2.2. - Le tritium

Le tritium,  $^3_1\text{H}$  est l'isotope radioactif de l'hydrogène. Sa période est de 12.26 ans. Les mesures sont généralement effectuées par comptage en scintillation liquide après enrichissement électrolytique. Les résultats sont exprimés en unité tritium (UT) ; une unité tritium correspond à un atome de  $^3_1\text{H}$  pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène.

Le tritium, comme le silicium 32 (T  $\approx$  500 ans) ou le carbone -14 (T  $\approx$  5600 ans) est un radioélément naturel produit par l'action de la composante neutronique du rayonnement cosmique sur les constituants gazeux de l'atmosphère. Compte tenu de l'activité au moment de la mesure et de la période de l'élément, il est possible d'obtenir des datations absolues. Cependant, depuis les essais thermonucléaires aériens, le carbone -14 et surtout le tritium doivent être considérés comme des isotopes artificiels : leur production naturelle étant actuellement masquée par la production artificielle. Quoiqu'il en soit, le tritium peut être utilisé comme élément traceur et dateur du cycle de l'eau.

La quantité totale de tritium naturel a été évaluée à 3,5 kg par LAL et PETERS (1962).

Le 31 octobre 1952, à Eniwetok dans le Pacifique, les américains en faisant exploser la première bombe thermonucléaire, ont introduit 5 kg de tritium dans l'atmosphère.

On peut mettre en évidence, six périodes.

#### 1° - Antérieure à novembre 1952

L'unique production de  $\text{H}^3$  est naturelle. Elle détermine une teneur de 15 UT environ dans les précipitations.

#### 2° - 1952 - 1958

Se produisent essentiellement des essais américains et russes. Les teneurs en tritium durant cette période atteignent quelques centaines d'UT.

#### 3° - Novembre 1958 à septembre 1961

Durant cette période, il y a arrêt des essais aériens. Les teneurs en tritium baissent jusqu'à atteindre une centaine d'UT.

#### 4° - Septembre 1961 à la fin de 1962

En un peu plus d'un an, environ les 3/4 du tritium thermonucléaire total sont produits à la suite des plus puissantes explosions thermonucléaires jamais enregistrées. Les teneurs dans les précipitations atteignent plusieurs milliers d'UT.

#### 5° - 1963 - 1966

Pratiquement pas d'essais aériens ; on constate une décroissance des teneurs en tritium.

#### 6° - A partir du 17 juin 1967

Cette date est celle du premier essai thermonucléaire aérien de la République Populaire de Chine. Depuis 1967, les essais de moyenne puissance (chinois et français) semblent maintenir une certaine production de tritium artificiel, mais les valeurs moyennes observées dans les précipitations vont en décroissant régulièrement et se situent au voisinage de 100 UT à la latitude de  $45^\circ$  en 1974.

Les teneurs en tritium dans les précipitations sont fonction (Ph. OLIVE, 1970) de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la latitude, l'altitude, la saison et la distance vis-à-vis des masses océaniques (effet de continentalité). Plus l'on se rapproche de l'équateur, plus, dans l'hémisphère nord les teneurs en tritium des précipitations, qu'il soit d'origine naturelle ou lié aux explosions atomiques, sont faibles. C'est la raison pour laquelle les teneurs à Téhéran sont plus élevées que celles de la région de Chiraz.

L'altitude semble aussi avoir une influence sur les teneurs moyennes en tritium des précipitations.

Plus l'altitude est élevée, plus la teneur en tritium paraît augmenter mais il faut ici tenir compte de l'altitude moyenne du bassin versant et non pas de la cote de l'émergence que l'on peut avoir à étudier.

C'est ainsi que des différences de cotes importantes entre émergences peuvent ne pas traduire ce phénomène si les bassins versant sont à des altitudes comparables.

Les variations de teneur en tritium des précipitations en un même lieu sont liées à des caractères saisonniers (jet stream) qui se manifestent par un pic estival qui atteint souvent trois fois la valeur de la moyenne pondérée des précipitations annuelles.

Dans notre région, ce phénomène n'a qu'une influence limitée en raison des très rares précipitations estivales.

Par contre, la régulation des teneurs en tritium par les masses océaniques provoque un abaissement des teneurs en tritium au voisinage des mers et des océans. Loin des océans, la teneur en tritium augmente (effet de continentalité).

Le bassin versant du Moharlu, qui n'est situé qu'à 200 km du golfe Persique, recevra donc en principe des précipitations plus pauvres en tritium que les régions situées à l'intérieur de l'Iran.

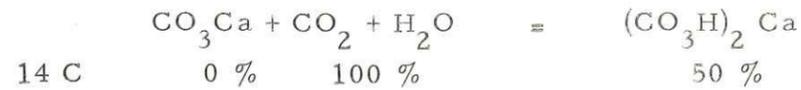
L'ensemble de ces conditions expliquerait que l'on puisse avoir des précipitations à assez faible teneur en tritium dans le bassin versant du Moharlu.

Peu de mesures ont été faites en Iran pour déterminer la teneur en tritium des précipitations. Grâce à l'A. I. E. A (Agence Internationale pour l'Energie Atomique à Vienne) nous avons pu disposer des résultats mesurés sur les plaines à Téhéran Mehrabad (tableau n° 33) qui nous permettront après extrapolation prudente à la région de Chiraz d'interpréter les résultats obtenus sur les eaux souterraines.

### 8.2.3. - Le C14

Comme le  $^{14}_6\text{C}$ , c'est un radioélément naturel produit dans l'atmosphère ; sa période est voisine de 5 600 ans. On suppose que la teneur en C14 du  $\text{CO}_2$  de l'air et ce qui y est directement associé (végétaux, humus du sol) était, avant les explosions thermonucléaires, égale à 100 %.

D'après la réaction classique suivante :



On voit que la teneur en 14 C du bicarbonate sera de 50 %, car il provient pour moitié de CO<sub>2</sub> atmosphérique dont la teneur en 14 C est de 100 %, et pour l'autre moitié du calcaire où la teneur est de 0 %, car il n'y subsiste plus de 14 C. En réalité, on trouve, pour les recharges actuelles, des valeurs proches de 85 %. Cette variation est due à des échanges isotopiques entre les bicarbonates (50 %) et le CO<sub>2</sub> de l'humus (100 %). En partant d'une teneur initiale de 85 % et, compte tenu de la décroissance, la teneur en 14 C des bicarbonates contenus dans l'eau permettra de déterminer l'âge de l'eau.

En l'absence de sol, l'activité de la flore bactérienne contenue dans les fissures et cavités des calcaires peut modifier la teneur normale des bicarbonates en 14 C par le dégagement de CO<sub>2</sub> biogénique et provoquer un effet comparable à celui dû au mélange avec le CO<sub>2</sub> de l'humus du sol.

On peut penser qu'il en est ainsi dans notre région où il n'y a aucun sol sur les montagnes calcaires depuis très longtemps.

Il peut, par contre, se produire aussi un vieillissement des eaux par attaque directe des calcaires par des acides libérés par d'autres bactéries, ce qui se traduit par l'apparition de bicarbonates très pauvres en C14.

Seule l'étude des teneurs en 13 C permettrait de trancher entre ces diverses hypothèses, mais l'étude des pH et du CO<sub>2</sub> libre dans les eaux peut être un guide dans l'interprétation des mesures.

#### 8.2.4. - Résultats de mesure et interprétation

Pour préciser nos connaissances sur le mode de circulation des eaux dans les massifs calcaires du bassin du Moharlu et leur interaction avec les eaux des plaines alluviales nous avons donc essayé d'interpréter les résultats des mesures des teneurs en C14 des eaux prélevées par SONNTAG en 1972, dans la région et nous avons prélevé nous-mêmes sept échantillons d'eau de puits ou de sources sur lesquels le Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble a effectué des mesures de teneur en tritium.

Tous ces résultats sont reportés sur le tableau n° 32 dans lequel figurent également les pH, teneurs en CO<sub>2</sub> libre, en chlorures, sulfates et bicarbonates ainsi que les débits et les altitudes.

La teneur en tritium observée sur les eaux de la source de Ghalat (44 UT) paraît correspondre à peu près à la valeur moyenne de la teneur en tritium des eaux de pluie, dans la région de Chiraz qui se trouve à la latitude de 30° N et à environ 200 km de la mer : ici le golfe Persique.

La source de Ghalat, située à une altitude plus élevée que la plaine de Chiraz se trouve aussi à une altitude supérieure à l'altitude moyenne des massifs calcaires qui forment les zones d'alimentation de la plupart des sources. Elle sort d'un massif de conglomérats Bakhtiyari, où comme nous l'avons signalé existent de nombreux chenaux et on peut penser que la valeur de 44 UT correspond à peu près à la valeur moyenne pondérée des précipitations dans la région. Il se pourrait, toutefois, que cette valeur moyenne pondérée soit un peu faible, car en 1974 des pluies de l'ordre de 40 mm se sont abattues sur la région en juillet à Chiraz et l'on sait qu'à cette période les teneurs en tritium des précipitations sont toujours élevées. C'est ainsi qu'à Téhéran, les pluies en juillet 1974 atteignent 209 UT. Ces précipitations estivales ont donc pu provoquer une augmentation de la teneur en tritium des eaux alimentant la source de Ghalat et si l'on considère

Points d'eau	Date de préle.	Tritium U.T.	Date de préle.	C <sub>14</sub> %	Date de préle.	pH	HCO <sub>3</sub> me/l	SO <sub>4</sub> me/l	Cl me/l	Altitude en m	Débit moyen en l/s	CO <sub>2</sub> libre
Source de Barm-delak	27.8.74	7 <sup>±</sup> 3	--	--	1.10.72	6.8	4.1	3.6	1.1	1485	100	95
Source de Djuchak	29.8.74	11 <sup>±</sup> 3	13.8.72	46,4 <sup>±</sup> 1,2	1.10.72	6.8	3.6	1.4	0.4	1680	500	85
Source de Fir-benau	26.8.74	12 <sup>±</sup> 4	10.8.72	25,6 <sup>±</sup> 0,6	30.9.72	7.9	3	5	1.4	1470	220	6.5
Source de Barm-babounak	28.8.74	13 <sup>±</sup> 4	11.8.72	46,2 <sup>±</sup> 1,1	1.10.72	7.3	4.7	5	27.5	1425	200	38
Source de Moharlu	28.8.74	28 <sup>±</sup> 3	--	--	3.10.72	7.6	2.8	6	7	1450	110	11
Source de Ghalat	29.8.74	44 <sup>±</sup> 3	--	--	29.11.72	6.8	4.5	1.2	1.2	2020	150	115
Puits n° 3	29.8.74	43	--	--	16.9.72	6.9	3.2	2.1	0.9	1589	--	60
Source de Pol-brendji	--	--	10.8.72	211 <sup>±</sup> 1,6	30.9.72	7.6	3	1.65	8.8	1450	220	13
ghante Barmio	--	--	13.8.72	41,2 <sup>±</sup> 1	29.5.72	6.8	3.4	1.8	0.4	---	--	--
Source de Malusdj an	--	---	13.8.72	75,7 <sup>±</sup> 1,9	3.9.72	8.5	3.4	2.1	0.5	1620	700	--
Source de Hossien Abad	---	---	13.8.72	41,8 <sup>±</sup> 1,3	3.9.72	7.3	3.4	0.4	0.4	1630	1500	--
Pluie de Téhéran	0.7.74	209 <sup>±</sup> 7	---	---	---	--	--	--	--	1100	--	--

Tableau n° 32 - Teneurs isotopiques en H<sub>3</sub> et C<sub>14</sub> des eaux des sources et principaux caractères chimiques -

Tableau n° 33

Teneurs en tritium et précipitations à Téhéran

Mois	1972		1973		1974	
	Précipitation en mm	Tritium UT	Précipitation en mm	Tritium UT	Précipitation en mm	Tritium UT
Janvier	39	62.2 ± 2.5	19	123.3 ± 4.9		52.3 ± 3.1
Février	34	85.3 ± 3.6	63	45.1 ± 1.9		64.9 ± 3.8
Mars	100	99.4 ± 4.4	6	58.6 ± 2.5		69.6 ± 6.2
Avril	-	85.2 ± 3.8	22	172.7 ± 3		175.5 ± 13.6
Mai	-	78 ± 7.2	1	-		
Juin	-	95.4 ± 4.4	-	-		
Juillet	-	-	-	-		209 ± 7
Août	5	132.5 ± 5.5	-	-		
Septembre	-	-	-	-		
Octobre	3	-	-	-		
Novembre	43	31 ± 1.3	8	29.1 ± 4.3		
Décembre	75	36.4 ± 1.5	19	45.6 ± 3.8		

le décalage nécessaire pour le passage du pic estival à l'émergence, nos mesures du 29 août pourraient correspondre à ce pic.

Quoi qu'il en soit, il apparaît cependant que toutes les autres sources ou puits présentent des teneurs en tritium plus basses que la moyenne pondérée annuelle des eaux de pluie.

Seule la source du Moharlu à 28 UT pourrait correspondre à la valeur moyenne annuelle pondérée des précipitations sur le bassin versant en 1974.

Toutes les autres eaux correspondraient donc à des eaux anciennes (antérieures à 1952) ou à des mélanges plus ou moins prononcés entre des eaux actuelles et des eaux anciennes.

Les eaux du puits n° 3 qui ne contiennent pratiquement pas de tritium peuvent être considérées comme des eaux anciennes. Prélevées à la profondeur de 50 mètres, on peut les considérer comme appartenant à des réserves stratifiées dans l'aquifère calcaire en dessous du niveau de la plaine alluviale, c'est-à-dire en fait comme des eaux mortes ou fossiles.

Toutes les autres sources sont des émergences à fort débit (de l'ordre de 200 l/s) qui apparaissent en bordure de la plaine.

Leurs teneurs en tritium s'échelonnent entre 7 et 13 UT, ce qui ne correspond pas à une différence significative étant donné la précision des mesures mais peut traduire un mélange plus ou moins intense entre eaux très récentes et eaux très anciennes.

On ne peut pas évoquer la possibilité de stockage d'eaux de pluies infiltrées entre 1952 et 1973 dans les calcaires, car malgré la décroissance radioactive du tritium, les teneurs en tritium des précipitations ont été trop fortes jusqu'à ces dernières années pour donner des eaux présentant des teneurs inférieures à 50 UT.

Comme les apports des versants sont très importants en débit, il faut admettre que ce sont des pluies de l'année 1974 qui viennent se mélanger au voisinage de la zone d'émergence avec les eaux anciennes stockées en dessous du niveau de la plaine soit dans les calcaires, soit dans les alluvions.

Il faut d'ailleurs noter que nos prélèvements faits en période d'étiage d'été traduisent la situation à ce moment et ne sont pas forcément représentatifs le reste de l'année.

Si la teneur en tritium des eaux des sources de la périphérie de la plaine est homogène, il n'en est pas de même de la teneur en C14.

Les sources de Pir-Benau et de Pol-Berendji, situées toutes les deux au pied de la montagne Sabzpuchan ont des teneurs en C14 comparables et comprises entre 20 et 26 %, tandis que les eaux de Djuchak située au NW de Chiraz et de Babounak située à l'Est de Chiraz ont des teneurs très proches de 46 %.

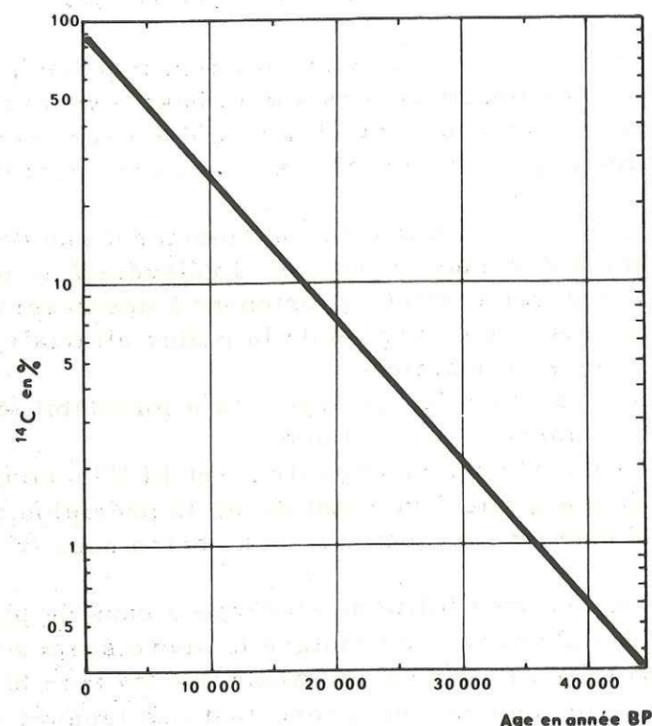
Cette différence entre les deux groupes de sources coïncide avec une différence nette également des valeurs de pH et des teneurs en CO<sub>2</sub> libre.

Les sources à basse valeur en C14 ont des pH forts et des teneurs en CO<sub>2</sub> libre faible.

Les sources Djuchak et Babounak ont, elles, des pH plus faibles et des teneurs plus élevées en CO<sub>2</sub> libre.

On peut penser que pour les sources de Pol-Berendji et Pir-Benau le CO<sub>2</sub> qui existait dans l'eau a dissous des bicarbonates par attaque des calcaires Asmari-Djahrom, ce qui a abaissé le pH de l'eau et l'a vieilli artificiellement par rapport aux autres sources.

Cette réaction sur la roche encaissante peut s'être produite assez près de l'émergence et être favorisée par la présence de ions Cl<sup>-</sup> ou SO<sub>4</sub><sup>-</sup> provenant de la nappe de la plaine alluviale qui se mêle à celle des calcaires au pied des versants montagneux.



Il reste à expliquer la valeur de 46 % relevée sur les autres sources et qui pourrait être celle des sources de Pir-Benau et de Pol-Brendji s'il n'y avait pas de réactions secondaires.

On peut signaler que la source de Malusdjan atteint, elle, 75 % en C14, c'est-à-dire une valeur actuelle comparable à celles admises en bien d'autres régions.

Les valeurs trouvées confirment donc la probabilité d'un mélange d'eaux actuelles et d'eaux anciennes, sans que l'on puisse préciser la proportion de ce mélange.

Nous pensons tout de même qu'il est possible de présenter un schéma rendant compte du fait que les eaux du versant calcaire s'écoulent relativement vite, mais avec des débits réguliers et importants et que c'est seulement au niveau de la plaine que se produit le mélange, soit que les chenaux principaux débouchent sous le niveau de la plaine, soit que les eaux de la nappe des alluvions légèrement en charge envahissent les calcaires sur leur bordure.

Circulant très lentement, ces eaux des alluvions sont des eaux anciennes comme les eaux stratifiées dans les calcaires, sous la plaine.

La répartition des zones d'eaux bicarbonatées, chlorurées et sulfatées et l'existence d'une couverture argileuse, au centre et à l'aval de la plaine, ainsi que les altitudes des diverses sources pourraient permettre de comprendre le mode d'écoulement des eaux qui doit tenir compte aussi de la présence de grandes failles à la bordure de la plaine de Chiraz.

### MODE DE CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES

Comme nous venons de le voir, les eaux tombées sur les massifs calcaires, s'infiltrent très rapidement du fait de la forte fracturation et circulent vite du fait de la perméabilité équivalente, ce qui se traduit par une transmissivité élevée.

On peut penser, que dans la partie des massifs calcaires située au-dessus de la plaine, les réserves souterraines se renouvellent lors d'un cycle assez court qui est peut-être de l'ordre de l'année ou au plus de deux à trois ans.

Dans la partie des assises calcaires de la formation Asmari-Djahrom, située en dessous du niveau de la plaine, il y a stratification des eaux, qui, très anciennes ne circulent pratiquement pas ou très lentement, soit dans les bancs calcaires, soit vers la nappe des alluvions. Cette nappe des alluvions qui présente un gradient extrêmement faible en direction du lac Moharlu et qui est contenue dans des formations à granulométrie fine circule elle-même extrêmement lentement, et, est partiellement en charge au centre, et à l'aval de la plaine. Elle est composée, pour sa plus grande partie, par des eaux anciennes, tout au moins en dessous de la frange superficielle. Il existe vraisemblablement aussi une stratification des eaux anciennes dans la masse du remplissage alluvial.

Cette nappe des alluvions est alimentée par les bords nord et sud de la plaine, c'est-à-dire les versants des montagnes Kaftarak et Sabzpuchan, mais aussi par l'amont de la plaine, c'est-à-dire sa partie ouest et nord ouest qui se trouve au pied des montagnes de Darak et Bamou.

Les précipitations sur la plaine elle-même, sans être totalement négligeables, paraissent ne pas participer à l'alimentation efficace de la nappe. L'évapotranspiration absorbe une grande part des précipitations, le coefficient d'infiltration étant beaucoup trop faible ici.

Ce sont donc les apports venant des massifs karstiques qui sont les plus importants, et toutes les eaux de la plaine leur sont liées, mais les réactions dues aux dissolutions des évaporites du Miocène ou aux zones d'évaporation modifient la composition des eaux et en masquent l'origine.

On constate cependant que l'influence des apports des versants calcaires se manifeste au pied du versant de Babakuhi et une partie du versant de la montagne Kaftarak par une zone d'eaux essentiellement bicarbonatées. Ici, le front salé des eaux des alluvions est repoussé par les apports d'eaux douces.

Sur le versant sud, au pied de Sabzpuchan par contre, les apports du versant calcaire paraissent insuffisants et le front sulfaté et chloruré des eaux de la plaine alluviale envahit l'aquifère calcaire.

Ceci est peut-être dû à une certaine charge de la nappe des alluvions, mais aussi à l'influence de la grande fracture qui longe le pied du versant et qui joue un rôle de drain. A l'extrémité E du versant de la montagne de Kaftarak, l'invasion des eaux chlorurées liées à la zone d'évaporation du lac Moharlu se fait sentir dans l'aquifère calcaire, à la faveur encore d'une grande faille jouant le rôle de drain.

Dans le massif de Gharah, au Sud Est de la plaine de Chiraz, on constate aussi les influences des eaux sulfatées ou chlorurées qui envahissent partiellement l'aquifère calcaire au niveau de la plaine, par suite de la situation de ce secteur à la partie aval de la plaine, ce qui se traduit par un refoulement des eaux douces sous l'avancée des eaux salées de la nappe de la plaine alluviale.

Ce sont donc en finale l'intensité des apports des versants et la nature géologique des contacts entre les massifs calcaires et le remplissage alluvial qui régissent les interactions entre les divers types d'eaux qui sont caractérisés

par des compositions chimiques différentes, mais aussi des âges différents.

Tel est le mode de circulation que nous sommes amenés à envisager pour le bassin versant du lac Moharlu, mais de nouvelles mesures isotopiques devraient permettre d'améliorer et de confirmer cette conception du modèle.

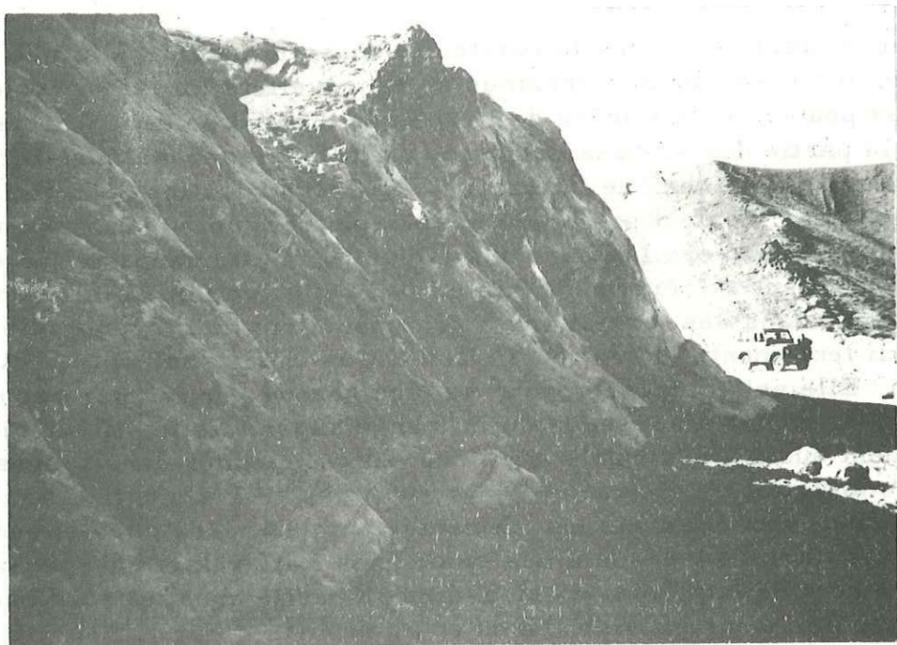


Photo n° 21 - Karstification des calcaires Asmari-Djahrom sur le flanc nord de l'anticlinal de Kaftarak au Nord de Saadi -

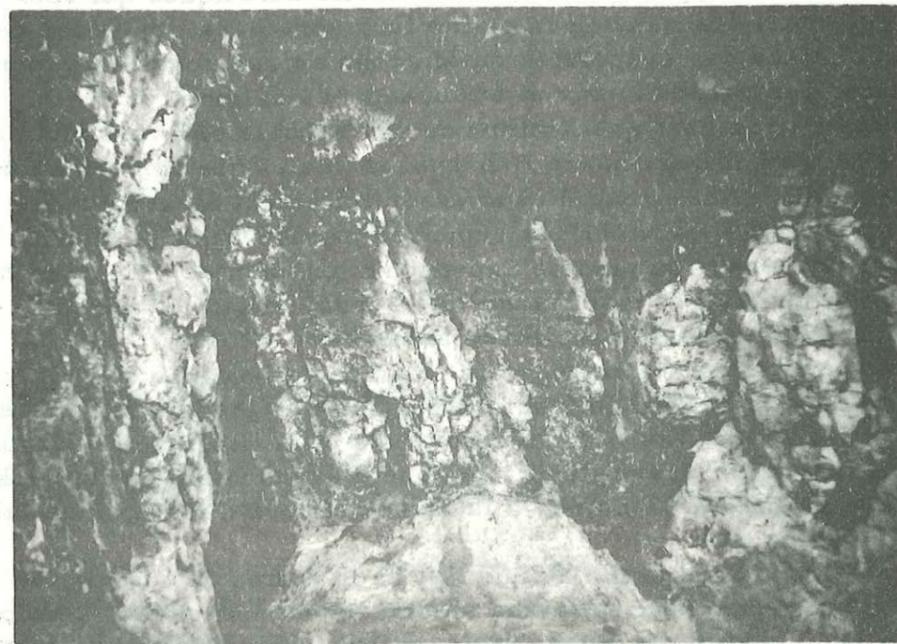
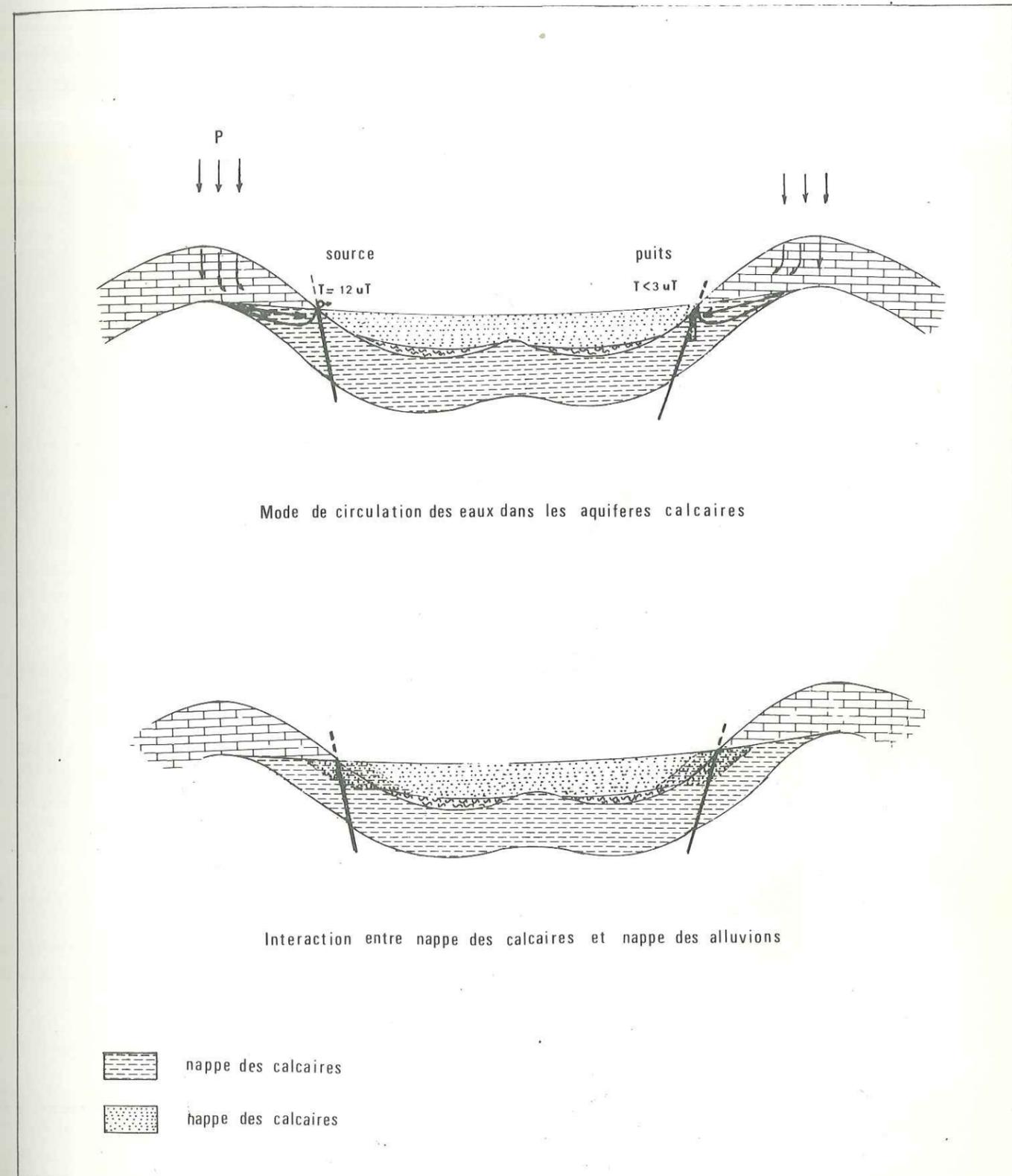


Photo n° 22 - Fissures et chenaux karstiques dans les calcaires Asmari-Djahrom près de la source Pol Brendji -



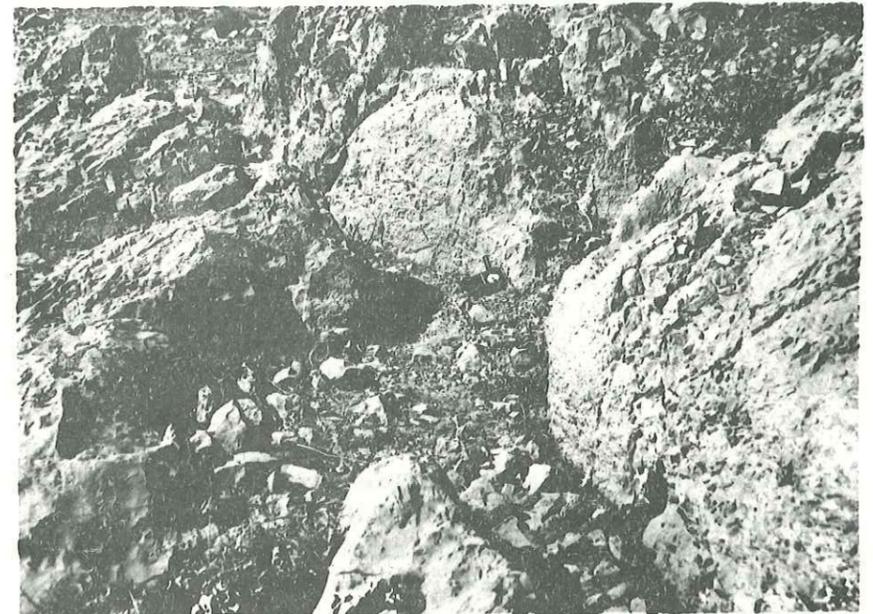


Photo n° 23 - Diaclases orthogonales ouvertes à la surface des calcaires Asmari-Djahrom sur le flanc sud de l'anticlinal de Ghasr-ghomcheh



Photo n° 24 - Essai de pompage sur le puits n° 5, près du village de Saadi -

CHAPITRE 9

RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS ET

CONCLUSIONS GENERALES

Situé au Sud de l'Iran, au milieu de la chaîne du Zagros, le bassin versant du Moharlu, dont l'altitude moyenne est de 1 640 mètres, avec une superficie de 4 250 kilomètres carrés, possède un climat semi-aride avec des températures pouvant atteindre +42°C en été et -14°C en hiver.

La température moyenne annuelle est de : 17°C.

Les précipitations moyennes annuelles sont de 344 mm sur l'ensemble des plaines et de 470 mm sur les versants montagneux, soit une moyenne pluviométrique annuelle sur l'ensemble des secteurs de 411 mm.

Le gradient pluviométrique est de 0,293 mm par mètre.

Les précipitations se produisent pour 97 % durant la saison froide (novembre - avril).

Les diverses méthodes de calcul et l'établissement du bilan conduisent à admettre que l'évapotranspiration réelle représente de 60 à 65 % des précipitations, que le ruissellement représente, lui, 10 à 15 % de ces précipitations et que l'infiltration sur l'ensemble du bassin représente, elle, de 20 à 30 % de la lame d'eau précipitée. En fait, le taux d'infiltration dans les plaines est d'environ 12.5 %, tandis qu'il atteint 23 % dans les massifs montagneux. L'infiltration dans les lits des cours d'eau est très importante et permet à une grande partie des eaux ruisselées sur les montagnes de rejoindre les réserves souterraines des plaines alluviales.

L'examen des photos de satellites, qui a permis de calculer le volume d'eau évaporée sur le lac Moharlu, à différentes époques s'est avéré un moyen efficace d'établissement du bilan hydrologique.

Du point de vue des données géologiques, notre étude basée sur une cartographie détaillée de l'ensemble du bassin versant du Moharlu, nous a permis de montrer que les formations primaires et secondaires ne jouent qu'un rôle très faible dans l'hydrogéologie de la région.

Ce sont essentiellement les formations tertiaires, et plus spécialement les calcaires de la formation Asmari-Djahrom qui s'étend du Paléocène au Miocène inférieur, qui constituent l'ossature de toutes les montagnes de la région et représentent, dans le bassin du Moharlu, le principal aquifère dont l'épaisseur peut atteindre 400 mètres, tandis qu'il affleure sur plus de 1 200 km<sup>2</sup>.

Les variations de faciès qui sont liées aux conditions paléogéographiques, lors de la sédimentation permettent d'expliquer la localisation des horizons conglomératiques ou dolomitiques.

Les évaporites jouent un rôle en hydrogéologie, car leur dissolution entraîne une modification considérable de la qualité des eaux superficielles et souterraines.

Ces évaporites sont représentés, d'une part dans les dômes de sel de Sarvestan, et d'autre part dans les cuvettes synclinales, sous les formations récentes.

L'âge originel cambrien ou infracambrien des évaporites des dômes de sel de Sarvestan a pu être confirmé par datation grâce au dosage du soufre 34 des gypses, qui a été réalisé par A. MARCE du Service des Isotopes du B. R. G. M. à Orléans. En effet, ces gypses présentent un  $\delta S_{34}$  de 28.6 qui correspond aux valeurs fournies par THODDE dans d'autres régions pour les gypses cambriens.

Il n'en reste pas moins que ces évaporites ont pu être lessivés, puis redéposés dans des cuvettes fermées après le Cambrien, sans que le rapport  $S_{34}/S_{32}$  originel se trouve modifié.

Il se pourrait donc que les dômes de sel proviennent du diapyrisme de masses d'évaporites accumulées dans des zones basses à des périodes plus récentes que le Cambrien, comme le suggère le contexte stratigraphique et tectonique de la zone d'affleurement.

Les évaporites du Miocène moyen et supérieur (formations Razak, Michan, Aghadjari du groupe du Fars) correspondent <sup>aux</sup> dépôts laissés par la mer lors de la régression consécutive aux mouvements miocènes dans la chaîne du Zagros.

Les sels dissous, dans les deux types d'évaporites, viennent se déposer à l'heure actuelle en bordure du lac Moharlu où ils constituent un nouveau gisement.

Une dernière formation joue un rôle hydrogéologique important, c'est la masse des conglomérats Bakhtiyari, d'âge pliocène qui est bien caractérisée par la présence de galets siliceux à côté des galets calcaires, ce qui permet de la distinguer des formations plus récentes. Son épaisseur, proche de 300 m et la solubilité de son ciment lui font jouer le rôle d'un aquifère important pour la régularisation du débit des sources situées au pied des massifs qu'elle constitue.

L'influence des phénomènes tectoniques qui ont provoqué la formation de grands anticlinaux simples ou déversés, typiques de la zone plissée du Zagros et de fractures, tant parallèles aux axes des plis que perpendiculaires à ceux-ci est fondamentale du point de vue hydrogéologique.

Ce sont ces déformations qui ont provoqué la fissuration intense des massifs calcaires et ont permis les infiltrations qui ont abouti à une certaine karstification de la formation Asmari-Djahrom et qui lui confèrent une "perméabilité" élevée.

Ces déformations s'échelonnent du Miocène à la fin du Pliocène ; puisque les conglomérats sont plissés et buttent par faille contre des formations miocènes.

En pratique, le bassin versant du Moharlu est formé par deux grandes zones anticlinales bordant au NE et au SW la plaine de Chiraz, mais qui sont affectées par de grands accidents obliques, d'une part au NW, et d'autre part au SE de cette plaine, ce qui permet d'expliquer la discontinuité qui est indubitable entre les montagnes de Darak, de Sabzpuchan, de Ghareh, d'une part et Babakuhi, Kaftarak et Ahmadi d'autre part. Cette structure qui amène à considérer le soubassement de la plaine de Chiraz comme une zone anticlinale effondrée, explique l'indépendance relative qui existe entre les massifs, du point de vue hydrogéologique.

L'étude de l'ensemble des sources du bassin du Moharlu, qui sont pour la plupart situées à la bordure des massifs montagneux, à peu près au niveau de la plaine alluviale, et qui sont toutes issues des calcaires Asmari-Djahrom, à l'exception des sources de Ghalat, montrent qu'elles ont toutes un fort débit unitaire, voisin de 200 l/s.

Leurs températures varient dans une plage de 4 à 5° au cours de l'année

mais leur température moyenne paraît plus élevée que celle fournie par la loi de Daubrée basée sur la température moyenne annuelle de l'air.

Ceci nous a amené à envisager un stockage relativement profond des eaux, mais l'observation d'anomalies du même type en Cyrénaïque (Lybie) (communication orale L. POTIE) peut amener à se demander si la loi de Daubrée est applicable en pays semi-aride, du fait du régime particulier des précipitations.

Les conductivités des eaux et leur composition chimique traduisent bien, elles aussi, les caractères des aquifères calcaires traversés dans la mesure où les apports des nappes alluviales ne viennent pas perturber les écoulements au niveau des émergences.

La liaison entre les précipitations et l'évolution des débits est caractéristique d'un écoulement relativement rapide dans les calcaires à la faveur des fissures et des chenaux.

La présence de fractures majeures sur lesquelles sont localisées les émergences impose une organisation plus hiérarchisée aux circulations dans ces fissures et chenaux.

L'influence des grandes fractures a pu être retrouvée et mise en évidence dans les forages qui ont été réalisés dans les calcaires de la formation Asmari Djahrom, et qui ont montré les très grandes possibilités de cet aquifère calcaire en dessous du niveau des plaines alluviales.

Les essais de pompage faits sur les forages, dans les calcaires, confirment par l'allure des courbes de descente et de remontée les particularités de l'aquifère dont les carottages géophysiques montrent l'hétérogénéité de détail.

Les débits spécifiques sur les divers forages sont voisins de 100 l/s/m de rabattement.

La présence de grosses fractures ou de cavernes provoque parfois des anomalies dans les essais de pompage comme dans le cas du puits n° 5 près de Saadi

Il faut souligner le cas particulier du puits Abibarik, situé lui, dans les calcaires du Crétacé supérieur et dont les caractéristiques sont absolument exceptionnelles, puisque l'on y observe un rabattement et une remontée quasi instantanés, avec un débit spécifique de 370 l/s/m de rabattement.

L'analyse détaillée des courbes réalisées lors des essais de pompage a permis de déterminer la transmissivité des calcaires d'Asmari-Djahrom qui est forte et voisine de 0,20 m<sup>2</sup>/s.

Le coefficient d'emmagasinement n'a pu être calculé que sur un seul puits, mais paraît voisin de 3,5 %.

Ces résultats importants étant relativement imprécis, nous avons complété l'étude des caractères hydrodynamiques des aquifères calcaires en établissant les courbes de tarissement des diverses sources.

Les résultats obtenus par la méthode de Maillet sont notablement différents de ceux obtenus par la méthode de Tison.

Les valeurs du coefficient de tarissement obtenues par la méthode de Maillet sont sensiblement deux fois plus fortes que celles obtenues par la méthode de Tison, ce qui conduit à des valeurs des réserves souterraines deux fois plus petites et il paraît difficile de choisir entre les valeurs trouvées, bien que la méthode de Maillet paraisse ici mieux adaptée, si l'on tient compte des débits annuels observés.

L'emploi de la méthode de Mijatovic, basée sur l'exploitation des résultats d'étude des courbes de tarissement, permet de trouver des valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement qui intéressent l'ensemble des massifs et non pas l'environnement immédiat des ouvrages de pompage.

Les valeurs ainsi obtenues sont plus fortes que celles obtenues par analyse des essais de pompage et nous paraissent les plus vraisemblables.

Si la méthode proposée par Mijatovic, qui est très proche de celle de

Rorabaugh est parfois discutée, elle paraît bien adaptée au problème posé sous réserve de la suppression du facteur correctif de Mijatovic, que nous avons effectué pour tenir compte des conditions locales. On obtient ainsi, pour les calcaires Asmari-Djahrom une transmissivité moyenne de 0,33 m<sup>2</sup>/s et un coefficient d'emmagasinement voisin de 5,6 %.

Ces valeurs fortes se trouvent coïncider de façon satisfaisante avec les données sur la "perméabilité équivalente" fournies par l'étude de la fissuration, selon la méthode mise au point par L. KIRALY.

Le calcul matriciel appliqué aux mesures de direction, de pendage, de densité et d'ouverture des fissures effectué sur 9 secteurs de mesure répartis dans les divers massifs calcaires, conduit à une valeur de la perméabilité verticale moyenne proche de 3,4 x 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s et à une valeur de la perméabilité horizontale moyenne proche de 1,7 x 10<sup>-2</sup> m/s.

Ces résultats expliquent bien les forts coefficients d'infiltration observés et confirment l'ordre de grandeur des transmissivités mesurées ou calculées.

Toutes les méthodes employées amènent donc à des résultats concordants qui confirment les grandes possibilités aquifères des calcaires de la formation Asmari-Djahrom.

Les caractères physicochimiques des eaux contenues dans cet aquifère sont déterminés par l'absence de sol sur les massifs calcaires, le caractère plus ou moins dolomitique des divers horizons de l'ensemble Asmari-Djahrom, mais surtout par les relations avec les eaux des nappes alluviales ou ayant lessivé les masses d'évaporites du Paléocène ou du Miocène. Les divers groupes d'eau que l'on peut distinguer sont liés à l'invasion ou non des eaux des nappes contenues dans les plaines de remblaiement dans l'aquifère calcaire selon que les conditions topographiques ou tectoniques telles que la présence de grandes fractures jouant le rôle de drains permettent ou non les apports d'un aquifère à l'autre.

C'est d'ailleurs l'étude rapide des plaines alluviales, de leur remblaiement et de leurs nappes, grâce aux forages et aux études géophysiques ainsi qu'aux cartes isopièzes qui permet de comprendre comment se font ces échanges et quel est le mode général d'écoulement des eaux dans le bassin versant du Moharlu.

Si les circulations paraissent rapides dans des massifs calcaires, elles paraissent très lentes dans le remblaiement alluvial, ce qui correspond à la fois à l'existence de phénomènes de type karstique dans les calcaires et à une différence d'âge très importante entre les deux types d'eaux.

La présence de cavités bien visibles dans certains secteurs et qui sont la preuve indubitable de l'existence de phénomènes karstiques apparaît étroitement liée, d'une part à la répartition des zones de sédimentation plus calcaires ou plus dolomitiques qui est, elle-même, liée comme nous l'avons vu à l'évolution paléogéographique de la région, ainsi qu'en atteste la présence de la répartition de niveaux conglomératiques, et d'autre part à l'intense fracturation qui a permis l'infiltration rapide d'eaux qui ont dû être beaucoup plus agressives que les eaux actuelles, lors de périodes où régnait un climat relativement plus tempéré que le climat actuel.

La karstification qui a permis le creusement de réseaux qui doivent aboutir presque à la base des cuvettes de remblaiement est également un élément favorable pour les échanges en profondeur entre les nappes des calcaires Asmari-Djahrom et les nappes des plaines alluviales.

Les interactions entre les deux types de nappes que nous avons pu mettre en évidence par l'étude des propriétés chimiques sont également bien démontrées par l'étude de la composition isotopique des eaux et spécialement par l'étude des teneurs en tritium et en carbone 14.

On constate de façon permanente l'influence des eaux des nappes alluviales

anciennes et à circulation très lente sur la nappe des calcaires Asmari-Djahrom à circulation rapide dans les massifs situés au-dessus des plaines et à circulation beaucoup moins rapide en dessous du niveau de ces plaines, bien qu'elle y reste peut-être moins lente que dans les matériaux qui remplissent les cuvettes de comblement.

Ces dernières, qui sont des bassins fermés présentent donc un mode de circulation bien différent de ce que l'on a l'habitude de voir dans les plaines d'accompagnement des grands fleuves dans d'autres régions.

### CONCLUSION

L'étude hydrogéologique du bassin versant du Moharlu, et plus spécialement des formations calcaires qui y occupent une si grande place, nous a donc permis d'apporter un certain nombre de précisions et de données nouvelles sur les problèmes encore peu étudiés dans les régions arides, sur de grandes surfaces.

Nous pensons avoir montré l'importance des ressources qui sont disponibles dans le bassin du Moharlu, dans les formations calcaires et l'intérêt de ces ressources, du fait de leur recharge annuelle importante malgré une pluviométrie limitée, grâce au très fort coefficient d'infiltration qui entraîne un fort rendement de chaque précipitation pour la réalimentation des réserves souterraines.

La qualité des eaux contenues dans les aquifères calcaires de la formation Asmari-Djahrom est également un des points les plus intéressants à souligner.

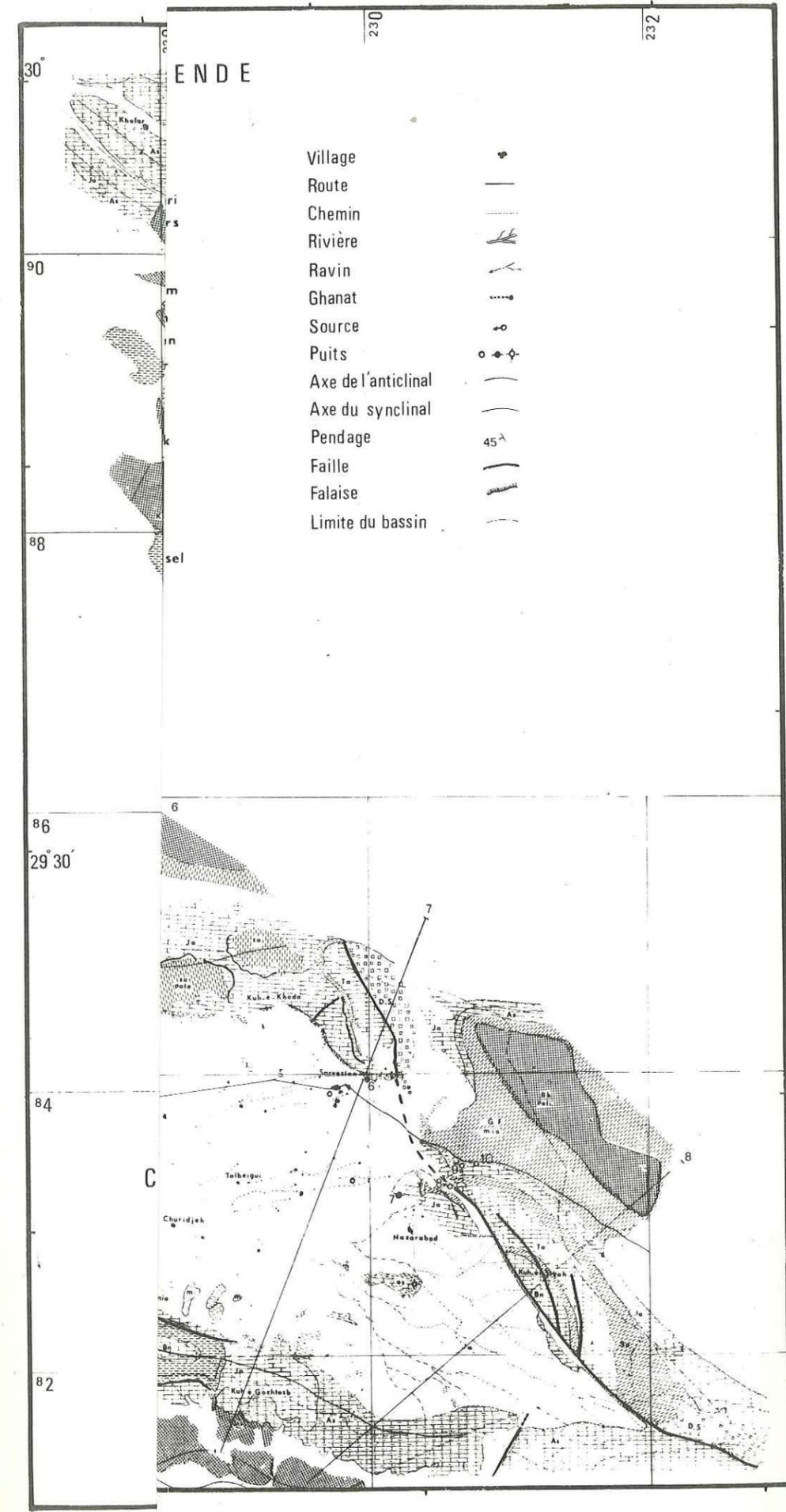
L'exploitation de ces ressources devra, cependant, se faire en tenant compte des interférences entre la nappe des calcaires et la nappe des alluvions de façon à ne pas perturber les équilibres existants et devra donc s'accompagner d'un contrôle constant des niveaux et les qualités des nappes exploitées.

Sur un plan plus général, l'étude hydrogéologique du bassin versant du Moharlu montre bien la nécessité de la coordination de toutes les méthodes et de toutes les données concernant la géologie, la climatologie, l'hydrologie, l'hydrodynamique, les propriétés physiques des roches et des eaux, la chimie des eaux souterraines et leur composition isotopique pour parvenir à une connaissance précise des problèmes posés dans une telle région.

Ce sont les données stratigraphiques (étayées au besoin par les mesures isotopiques pour la datation des niveaux d'évaporites de la base du Cambrien) tectoniques et surtout paléogéographiques qui permettent de comprendre la répartition des différents faciès et leur comportement hydrogéologique et en particulier l'origine et la localisation des phénomènes karstiques.

Ce sont ces mêmes données lithologiques et tectoniques qui déterminent les caractéristiques hydrodynamiques des nappes étudiées et par là les compositions chimiques et isotopiques des eaux qui nous ont permis de reconstituer leur mode de circulation et de déterminer leur âge.

La présente étude montre donc la nécessité absolue de mener toute étude hydrogéologique de façon globale et synthétique. Chacun des domaines étudiés est sous l'influence d'un grand nombre de facteurs interdépendants et si les conditions climatiques propres à cette région de l'Iran peuvent paraître déterminantes il apparaît que les conditions géologiques ne peuvent en être dissociées, si l'on veut parvenir à une connaissance de l'hydrogéologie présentant à la fois une cohérence scientifique et des possibilités d'utilisation pratique, l'exploitation des eaux souterraines constituant l'épreuve de vérité sur laquelle peut s'apprécier la valeur de toute étude hydrogéologique.





BIBLIOGRAPHIE

- BAKALOWICZ (M.), 1970. - Hydrodynamique karstique. Etude du bassin d'alimentation de la Manavat (Taurus occidental, Turquie). Thèse de 3e cycle, Paris.
- BAKALOWICZ (M.), OLIVE (Ph.), 1970. - Teneurs en tritium des eaux du karst du Taurus occidental et de Pisidie (Turquie) Schweizerische Zeitschrift für hydrologie, vol. 32, p. 475-480.
- BANKS (D.C.), 1972. - Essais in situ pour la détermination de la perméabilité du basalte. International society rock mechanics. Proceeding symposium Stuttgart.
- BERKALOFF (E.), 1970. - Interprétation des pompages d'essai. - Bull. B.R.G.M., (2), 111-1.
- BIZON (G.), BIZON (J.), RICOU (L.), 1972. - Etude stratigraphique et paléogéographique des formations tertiaires de la région de Neyriz (Fars interne, Zagros iranien), p. 369-405, revue I.F.P., vol. 27, n° 3.
- BONNET (M.), 1970. - Critique de la notion d'essais de puits, Bull. B.R.G.M., (2), 111-1.
- BURNOL (L.), 1968. - Geological survey of Iran, report n° 11.
- CADWELL (J.A.), 1972. - La détermination théorique du tenseur de perméabilité dans les roches jointives. International society mechanics Proceeding symposium - Stuttgart.
- CASTANY (G.), 1967. - Traité pratique des eaux souterraines, Dunod Paris.
- 1968. - Prospection et exploitation des eaux souterraines, Dunod, Paris.
- CASTILLO (E.), 1972. - Modèle mathématique pour l'écoulement bidimensionnel à travers les massifs fissurés. International society for rock mechanics Proceeding symposium Stuttgart.
- CHERNYSHEV (S.N.), 1972. - Estimation de la perméabilité des roches jointives en massif. International society for rock mechanics Proceeding symposium Stuttgart.
- CORNET (F.), FAIRHURST (C.), 1972. - Variations du volume poreux associé à la rupture des roches. International society for rock mechanics. Proceeding symposium Stuttgart.
- DAZY (J.), 1973. - Les analyses d'eau et leur interprétation. Université d'Alger (cours polycopiés).
- DILAGIO (E.), MYRVOLL (F.), 1972. - Essais in situ pour la détermination de la perméabilité à l'eau et à l'air dans les masses rocheuses situées au voisinage d'ouvertures souterraines. International society for rock mechanics. Proceeding symposium Stuttgart.
- DERRUAU (M.), 1967. - Précis de géomorphologie. Masson, Paris.
- DULUC (P.), 1973. - Etude hydrogéologique du bassin versant du petit Buech. Thèse de 3e cycle. Université, Grenoble.
- DEMASSIEUX (L.), 1970. - Tentative d'interprétation des essais de pompage. Bull. B.R.G.M., (2), 111-1
- EGHBALI (A.), 1967. - Hydrogéologie, Université de Téhéran. Pub. n° 1112-1
- 1967. - Hydrogéologie, Université de Téhéran, Pub. n° 1112-2
- ELBATTI (D.), 1974. - Hydrogéologie de la plaine d'Enfidaville. Thèse 3e cycle. Université Grenoble.
- Etude de la plaine de Chiraz, 1973. - Publication du département des eaux souterraines de l'Iran.
- ENGALENC, 1968. - Contribution à la géologie, géomorphologie, hydrogéologie de la région de Téhéran. Thèse d'Etat, Montpellier
- FORKASIEWICZ (J.), 1970. - Etablissement du programme des pompages d'essai. Bull. B.R.G.M., (2), 111-1
1970. - Guide bibliographique méthodique sur l'interprétation des données de pompages d'essai (évaluation des paramètres des aquifères). Bull. B.R.G.M., (2), 111-1
- FRANK (W.), TRAINER and FRANK (A.), WATKINS (J.R.), 1974. - Use of base Runoff Recession curves to determine areal transmissivities in the upper Potomac River basin. Jour research U.S. Geol survey, vol. 2, n° 1, p. 125-131.
- FRANCISS (F.O.), 1970. - Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. Thèse Docteur Ingénieur, Université de Grenoble.
- GEOLOGICAL maps, 1963. - 1 : 250 000 South West Iran.
- GEOLOGICAL maps, 1969. - 1 : 1000000 and section of South West Persia.
- GEOLOGICAL survey of Iran. Tectonic map of Iran - 1971. - Compiled by STOCKLIN and NABAVI 1 : 25 00 000
- GEOLOGICAL maps of Iran 1959. - 1 : 2500 000 N. I. O. C.

GRAPHIC well log de la montagne Sabzpuchan 1964.

INSTITUT d'hydrologie de Téhéran. Publication n° 18. Etude de la région de Chiraz. IRAN PANAHA A. (1968). - Geologie structural Uni, de Téhéran. Pub. n° 1184

JAMES (G.A.) and WYND (J.C.), 1965. - Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium Agreement Area Am. Assoc. Pet. Geologist, vol. 49, n° 12, p. 2182-2245.

KIRALY (L.), 1971. - Ground water Flow in Heterogeneous Anisotropic Fractured Media a simple Two-dimensional electric analog geological Institute. Centre d'hydrogéologie Neuchâtel Suisse. J. Hydrol, 12 p. 255-261.

KIRALY (L.), 1970. - L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. - Bull. Ver Schweiz Perrol. u. Ing, vol. 37, n° 91, S. 50-57.

KIRALY (L.), 1969. - Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés. Eclogae geol. Helv. 62, 8, 613-619

KIRALY (L.), 1969. - Statistical analysis of fractures (orientation and density). Geologische Rundschau 59, p. 125-151.

KIRALY (L.), MATHEY (B.), TRIPET (J.P.), 197. - Fissuration et orientation des cavités souterraines de la région de la grotte de Milandre (Jura - Tabulaires). Ins. geo. uni de Neuchâtel. Extrait du bulletin de la société neuchâteloise des Sciences naturelles, t. 94.

KIRALY (L.), 1968. - Eléments structuraux et alignement de phénomènes karstiques (région du gouffre du Petitpre de Saint livres Jura vaudois) bull. soc. Neuchatel Sciences naturelles, t. 91, p. 127-146.

KRINSLEY (D.), 1970. - A geomorphological and Paleoclimatological study of the playas of Iran. US Geological Survey

LAHNI (M.), 1971. - Hydrologie de la région de Chiraz. rapport n° 86, Département des eaux souterraines de l'Iran.

LASFARGUES (P.), 1957. - Prospection électrique par courants continus. Masson.

LEPRIOL (J.), 1974. - Etude hydrogéologique du bassin versant de la Bourbre. - Thèse 3e cycle. Univ. Grenoble.

LETIRONT (P.), BARON (G.), 1972. - Ecoulement dans les roches fissurées et contraintes effectives, application à la production d'hydrocarbures et à la fracturation hydraulique des réservoirs. Proceedings symposium Stuttgart, International society for rock mechanics.

LOUIS (C.), PERROT (M.), 1972. - Analyse tridimensionnelle des écoulements dans le massif de fondation du barrage de Grand Maison. International society for rock mechanics Proceedings symposium Stuttgart.

LUPARINI (V.), 1975. - Etude hydrogéologique du massif du Dévoluy (Hautes Alpes). Univ. Grenoble. Thèse 3e cycle

MAINI (Y.N.T.), NOORISHAD (J.), SHARP (J.C.), 1972. - Aspects pratiques et théoriques des mesures in situ des caractéristiques hydrauliques des roches fissurées. Proceedings symposium Stuttgart. International society for rock mechanics.

MICHEL (M.), 1971. - Hydrogéologie du bassin versant de Theys (Isère), Thèse 3e cycle. Univ. Grenoble.

MOTAMED (A.), 1967. - Sédimentologie. Univ. Téhéran. Pub. n° 1038.

MIJATOVIC (B.), 1974. - Détermination de la transmissivité et du coefficient d'emménagement par la courbe de tarissement dans les aquifères karstiques. Ass. Internationale des hydrogéologues, Congrès de Montpellier, p. 225-230.

Méthodes d'études et de recherches des nappes aquifères. Publication B.R.G.M., 1962.

OLIVE (Ph.), 1970. - Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau dans l'hémisphère nord par la méthode du tritium. Centre de recherches géodynamiques. Thonon.

OLIVE (Ph.), 1973. - Introduction à l'hydrogéologie isotopique. Centre de recherches géodynamiques, Univ., Paris.

Prospection géophysique de la plaine de Chiraz. Société A.B.K.A.V.

Publication du service de climatologie de l'Iran.

RICOU (L.E.), 1974. - L'étude géologique de la région de Neyriz (Zagros iranien) et l'évolution structurale des Zacarides. Thèse d'Etat. Univ. Paris Sud.

ROUX (P.), 1974. - Analyse des correspondances au service de l'hydrogéologie. Ass. Internationale des hydrogéologues, Congrès de Montpellier, France, p. 242-250.

RORABAUGH (M.I.), and SIMONS (W.D.), 1966. - Exploration of methods of relating ground water to surface water of the Columbia river basin second phase : U.S. Geol. Survey open-file rept, 62 p.

SAHABI (Y.), 1940. - Géologie générale. Pub. Univ. Téhéran

SAHABI (F.), 1972. - Géologie du Zagros. Mémoire of the Fac Eng. Téhéran, n° 22.

SARROT-REYNAULD (J.), 1964. - Hydrogéologie karstique dans le massif du Vercors. Association internationale des hydrogéologues, Mémoires, 5, réunion d'Athènes 1962, p. 321-329.

SCHOELLER (M.), 1962. - Les eaux souterraines. Masson, Paris.

SCHOELLER (M.), 1948. - Le régime hydrogéologique des calcaires éocènes du synclinal de Dyr al KEF (Tunisie). Soc. Geol. France, Bull. 5. V 18, p. 167-180.

SCHOELLER (H.), 1974. - Les conditions de circulation dans les calcaires, capacité dingestion, capacité d'infiltration Ass. Internationale des hydrogéologues . Montpellier. p. 251-252.

SCHOELLER (H.), 1967. - Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement) Internat. Assoc. Sci. hydrolog Pub. 73, p. 3-20.

SHARP (J.C.), MAINE (Y.N.T.), 1972. - Fundamental considerations on the hydraulic characteristics of joints in rock. International society for rock mechanics. Proceedings symposium Stuttgart.

SEYED Emami (K.), 1971. - Triassic in Iran Memoires of the Fac engin de Teheran, n° 18.

SEYED Emami (K.), 1972. - Upper cretaceous in Iran Memoires of the Fac engin de Teheran, n° 22.

SNOW (D.T.), 1969. - Anisotropie permeability of fractured media Water resources research, vol. 5, n° 6, p. 1273-1289.

STEPANOV (D.), 1968. - Synoptic table of stratigraphy of Iran. Geological survey of Iran.

STOECKLIN (J.), 1960. - Areview of the structural history and tectonics of Iran. Geotektonika n° 1.

STOECKLIN (J.), 1961. - Lagoonal formations and salt domes in East Iran Petroleum inst. Bull. n° 3, p. 29-40.

STOECKLIN (J.), 1968. - Salt deposits of the middle East. Geological Society of America special. paper 88, p. 157-181.

STOECKLIN (J.), RUTTNER (A.), NABAVI (M.), 1964. - New data ont the lower paleozoic and Pre-Cambrian of North Iran. Geo Survey Iran report n° 1.

TEHRANI (Kh.), 1971. - Stratigraphie de l'Est et du Sud Est de l'Iran. Memoires of the Fac. Inga de Teheran, n° 18 - 19

THEILE (O.), ALAVI (M.), ASSEFI (R.), 1968. - Explanatory text of the Golpaygan quadrangle map 1 : 250 000, n° E7. Geo Survey of Iran.

TRON (L.), MARCE (A.), OLIVE (Ph.), SARROT-REYNAULD (J.), JAMIER (D.), 1975. - Apports des analyses isotopiques à l'étude d'un bassin expérimental : le bassin de Saint-Genis (Hautes-Alpes). 400 e Congrès Sociétés Savantes - Paris.

UNGEMACH (P.), ROGNON (Ph.), 1970. - Remarques concernant l'exploitation des séquences cycliques de pompage. Bull. B.R.GM. (2), 111-1

VINTER (J.), 1973. - Etude hydrogéologique du synclinal d'Aurans-Méaudre, massif du Vercors. Thèse 3e cycle. Univ. Grenoble

WITTKÉ (W.), RISSLER (P.), SEMPRICH (S.), 1972. - Phénomènes d'écoulement des roches fissurées à trois dimensions, stables et turbulents d'après un modèle discontinu et continu. International society for rock mechanics Proceedings symposium Stuttgart.

WOLTERS (R.), REINHARDT (M.), JAGER (B.), 1972. - Observations sur le caractère, l'arrangement et l'expansion d'ouvertures des fissures. International society for rock mechanics Proceeding symposium Stuttgart.

ZIAYAI (T.), SARABI (F.), 1967. - Géologie générale. Univ. de Teheran. Pub. n° 1106

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
AVANT PROPOS .....	1
INTRODUCTION .....	3
1. - BUT ET METHODES DE L'ETUDE	
2. - CADRE GEOGRAPHIQUE	
2.1 - Situation géographique	
2.2 - Habitants et surface de la région	
2.3 - Agriculture	
3. - INDUSTRIE	
CHAPITRE 1 - <u>HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT DU LAC MOHARLU</u> .....	7
1.1 - <u>Météorologie</u>	
1.1.1 - Situation géographique des stations	
1.1.2 - Répartition altitudinale du bassin versant	
1.1.3 - Climatologie	
1.1.4 - Précipitations	
Détermination de la lame d'eau précipitée	
1) - Méthode de Thiessen	
2) - Moyenne arithmétique	
3) - Carte des isohyètes	
4) - Gradient altimétrique de précipitation	
Neige	
1.1.5 - Température	
Les gelées	
1.1.6 - Evaporation	
1.1.7 - Evapotranspiration .....	20
a - Méthode de Turc	
b - Méthode de Coutagne	
c - Méthode de Thornthwaite	
d - Deuxième formule de Turc	
e - Calcul de l'E, par le bilan hydrologique	
1.1.8 - Conclusion .....	24
1.2 - Réseau hydrographique	
1.2.1 - Les rivières saisonnières	
a - Rivière Khochk	
b - " Tchenar-Rhadar	
c - " Nasar-abad	
1.2.2 - Le lac du Moharlu	
1.3 - Le bilan hydrologique	
1.3.1 - Bilan hydrologique de la plaine	
1.3.2 - Bilan hydrologique du bassin versant	
a - Ruissellement	
b - Infiltration	
c - Evapotranspiration	
d - Conclusion	
1.4 - Conclusion générale .....	30

2.1. - INTRODUCTION	
2.2. - STRATIGRAPHIE	
2.2.1 - Infracambrien	
2.2.2 - Ere secondaire ..... 34	
2.2.2.1 - Trias	
2.2.2.2 - Jurassique	
a - Lias	
b - Dogger et Malm - Formation Surmeh	
2.2.2.3 - Crétacé	
2.2.2.3.1 - Conditions de sédimentation	
2.2.2.3.2 - Crétacé inférieur	
Formation Fhliyan	
Formation Gadvan	
Formation Dariyan	
2.2.2.3.3 - Crétacé moyen	
Formation Kazdomi	
Formation Sarvak	
2.2.2.3.4 - Crétacé supérieur	
Formation Gurpi	
" Tarbur	
2.2.3 - Ere Tertiaire ..... 39	
2.2.3.1 - Condition de sédimentation	
2.2.3.2 - Paléocène	
Formation Satchun	
2.2.3.3 - Eocène	
Formation Djahrom	
" Pabdeh	
2.2.3.4 - Oligocène début Miocène	
Formation Asmari	
2.2.3.5 - Miocène	
Groupe du Fars	
Formation Razak	
" Aghadjari	
2.2.3.6 - Pliocène	
Formation Bakhtiyari	
2.2.4 - Ere Quaternaire ..... 44	
2.2.4.1 - Alluvions anciennes	
2.2.4.2 - " récentes	
2.2.4.3 - Cônes de déjection et éboulis	
2.3. - TECTONIQUE ..... 45	
2.3.1 - Structure générale du Sud de l'Iran	
2.3.2 - Classification de la zone du Zagros	
1) - La zone plissée du Zagros	
2) La zone de chevauchement du Zagros	
2.3.3 - Tectonique du bassin versant du Moharlu	
2.3.3.1 - Paléogéographie ..... 47	
2.3.3.2 - Plis de la région	
Anticlinal inverse de Ghareh et Gochtasb	
" de Siyah-Kuh	
" d'Ahmadi et de Khoda	
" Sorkhan, Kaftarak, Bamu, Baba Kuh et Beiza	
" Darak	
" Sabzpuchan	
Synclinaux perchés	
2.4. - CONCLUSIONS GENERALES ..... 52	

CHAPITRE III - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE DES MASSIFS CALCAIRES ET DES SOURCES DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU ..... 53	
3.1. - LES FORMATIONS DES DIFFERENTES ERES GEOLOGIQUES	
3.1.1 - Ere Secondaire	
a - Formations Sarvak et Ilam	
b - " Gurpi	
c - " Tarbur	
3.1.2 - Ere Tertiaire	
a - Formation Satchun	
b - " Asmari Djahrom	
- calcaires Djahrom	
- calcaires Asmari	
c - Les sédiments miocènes	
d - " pliocènes	
3.2. - HYDROGEOLOGIE DES AFFLEUREMENTS CALCAIRES ET DESCRIPTION DES SOURCES	
3.2.1 - Anticlinal de Darak ..... 57	
3.2.2 - " de Sabzpuchan ..... 58	
3.2.2.1 - Hydrogéologie et géologie	
3.2.2.2 - Les sources	
a - Source de Pir-Benau	
b - " Pol-Brendji	
c - Les autres sources	
3.2.2.3 - Conclusions	
3.2.3 - Anticlinal de Ghareh ..... 63	
3.2.3.1 - Hydrogéologie et géologie	
3.2.3.2 - Les sources	
a - Barm-Babahadji	
b - Source de Moharlu	
c - Les autres sources	
3.2.3.3 - Conclusions	
3.2.4 - Anticlinal Kaftarak et Baba-Kuhi ..... 65	
3.2.4.1 - Hydrogéologie et géologie	
3.2.4.2 - Les sources	
a - Source Delak	
b - " Djafarkhani (Barm)	
c - " Kaftarak	
d - " Babounak (Barm)	
c - Les autres sources	
3.2.4.3 - Conclusions	
3.2.5 - Les montagnes Barm et Beiza ..... 72	
a - Source Sarab Hossein abad	
b - " Gareh-djiveh	
c - " Malusdjan	
3.2.6 - La montagne Ghasr-ghomcheh ..... 72	
Source de Djuchak	
3.2.7 - Kuh-Ahmadi et Khodu ..... 74	
a - Chanate de Borzu	
b - " de Robate	
c - Puits n° 6	
3.2.8 - Siyah-Kuh ..... 76	
a - Source de Mourdi	
b - " de Sarvestan (ghomp)	
c - " d'Ab tchenar	
d - Conclusions	
3.2.9 - Kuh-Galat ..... 80	
3.3. - CONCLUSION ..... 80	

	<u>Pages</u>
<u>CHAPITRE IV - LES SONDAGES D'EXPLORATION SUR LES CALCAIRES DU BASSIN VERSANT ET LES ESSAIS DE POMPAGE</u> .....	81
4.1. - LES FORAGES SUR LES CALCAIRES .....	83
4.1.1 - Puits n° 1 (universitaire de Chiraz)	
4.1.1.1 - Ouvrages de sondage	
4.1.1.2 - Les essais de pompage	
4.1.1.3 - Mesures géophysiques	
4.1.2 - Puits n° 2 (Darak) .....	85
4.1.2.1 - Les travaux de sondage	
4.1.2.2 - Les essais de pompage, développement et nettoyage	
Essai de remontée	
" de rabattement par palier	
4.1.2.3 - Mesures géophysiques	
4.1.3 - Puits n° 3 (Darak) .....	87
4.1.3.1 - Les travaux de sondage	
4.1.3.2 - Les essais de pompage	
4.1.3.3 - Mesures géophysiques	
4.1.4 - Puits n° 4 (Darak)	
4.1.4.1 - Les travaux de sondage	
4.1.4.2 - Les essais de pompage	
Développement	
a - Les essais de pompage simultanés sur les puits n° 3 et n° 4 (Darak)	
- Premier essai (rabattement)	
- Deuxième essai (remontée)	
- Troisième essai	
- Quatrième essai	
4.1.4.3 - Mesures géophysiques	
4.1.4.4 - Résultats de pompage sur les puits de la bordure de l'anticlinal de Darak	
4.1.5 - Puits n° 5 (Saadi)	
4.1.5.1 - Les travaux de sondage .....	91
4.1.5.2 - Les essais de pompage	
4.1.5.3 - Mesures géophysiques	
4.1.6 - (Sarvestan) .....	93
4.1.6.1 - Les travaux de sondage	
4.1.6.2 - Les essais de pompage	
4.1.6.3 - Mesures géophysiques	
4.1.7 - Puits n° 7 (Nasarabad) .....	95
4.1.7.1 - Mesures géophysiques	
4.1.8 - Puits n° 8 (Arbadi)	
4.1.9 - Puits n° 9 (Sabzpuchan) .....	98
4.1.10 - Puits Ab barik .....	98
- Mesures géophysiques	
4.1.11 - Conclusion	

CHAPITRE V - DETERMINATION DES CARACTERES HYDRODYNAMIQUES DES AQUIFERES KARSTIQUES DU BASSIN VERSANT DU MOHARLU

5.1. - INTRODUCTION .....	100
5.2. - CALCUL DE LA TRANSMISSIVITE (T) .....	101
5.3. - CALCUL DE T ET INTERPRETATION DES COURBES POUR CHAQUE PUIITS	
5.3.1 - Puits d'Ab barik .....	101
5.3.2 - Puits n° 2 (Darak)	
5.3.3 - Puits n° 3 (Darak)	
5.3.4 - Puits n° 4 (Darak)	
5.3.5 - Puits n° 6 (Saadi)	
5.3.6 - Puits n° 6 (Sarvestan)	
5.3.7 - Puits n° 1 (Djahrom)	
5.3.8 - Puits n° 2 (Djahrom)	
5.3.9 - Puits n° 3 (Lar)	
5.3.10 - Puits n° 9 (Lar)	
5.3.11 - Puits n° 1 Guenau (Badar abas)	
- Piézomètre Guenau	
5.3.12 - Conclusion	

	<u>Pages</u>
5.4. - COURBES DE TARISSEMENT .....	116
5.4.1 - Formule de Maillet	
5.4.1.1 - Barm-Delak	
5.4.1.2 - Source du Moharlu	
5.4.1.3 - Barm Pol Brendji	
5.4.1.4 - Source Fir Benau	
5.4.1.5 - Barm Babounak	
5.4.1.6 - Barm Babahadji	
5.4.1.7 - Source du Mourdi	
5.4.1.8 - Source de Kaftarak	
5.4.1.9 - Source d'Abtchenar	
5.4.1.10 - Source de Ghasr-ghomcheh	
5.4.1.11 - Source de Sarvestan	
5.4.2 - Formule de Tison	
5.4.2.1 - Source de Barm-Babounak	
5.4.2.2 - Source de Pir Benau	
5.4.2.3 - Source de Barm Pol Brendji	
5.4.2.4 - Source de Moharlu	
5.4.2.5 - Source de Barm Delak	
5.4.2.6 - Source de Babahadji	
5.4.2.7 - Source d'Abtchenar	
5.4.2.8 - Source de Sarvestan (Ghomp)	
5.4.2.9 - Source de Moharlu	
5.4.2.10 - Source de Ghasr-ghomcheh	
5.4.2.11 - Source de Kaftarak	
5.4.3 - Conclusion .....	134
5.5. - DETERMINATION DE LA TRANSMISSIVITE (T) ET DU COEFFICIENT D'EMMACASINEMENT PAR LA COURBE DE TARISSEMENT .....	137
5.5.1 - Introduction	
5.5.2 - Calcul de la transmissivité (T)	
5.5.2.1 - La source de Fir Benau	
5.5.2.2 - Barm-Pol Brendji	
5.5.2.3 - Barm-Babahadji	
5.5.2.4 - Source du Moharlu	
5.5.2.5 - Barm-Delak	
5.5.2.6 - Barm-Babounak	
5.5.2.7 - Conclusion .....	145
5.6. - DETERMINATION DE LA "PERMEABILITE EQUIVALENTE" .....	145
5.6.1 - Premier exemple de Darak	
5.6.1.1 - Changement de base	
5.6.2 - Deuxième exemple de Darak	
5.6.3 - Troisième exemple de Darak	
5.6.4 - Exemple de Kaftarak	
5.6.5 - Premier exemple de Babakuhi	
5.6.6 - Deuxième exemple de Babakuhi	
5.6.7 - Exemple de Sabzpuchan	
5.6.8 - Premier exemple de Ghasr-ghomcheh	
5.6.9 - Deuxième exemple de Ghasr-ghomcheh	
5.6.10 - Conclusion .....	155
5.7. - CONCLUSIONS GENERALES .....	157

6.1. - CARACTERES PHYSIQUES .....	
6.1.1 - Débit .....	
6.1.1.1 - Les sources variables .....	
6.1.1.2 - Les sources moyennement variables .....	
6.1.1.3 - Relation entre le débit et les précipitations .....	
6.1.2 - Température .....	
6.1.3 - Conductivité .....	
6.1.4 - pH .....	
6.2. - CARACTERES CHIMIQUES .....	
6.2.1 - Analyse chimique des eaux souterraines .....	
1° - éléments chimiques .....	
2° - résidu sec .....	
3° - le titre alcalimétrique .....	
4° - le degré hydrotimétrique .....	
6.2.2 - Classification du point de vue chimique .....	
6.2.2.1 - Eaux bicarbonatées .....	
6.2.2.1.1 - La famille bicarbonatée calcique .....	
a - caractères généraux .....	
b - groupe de Roknabad .....	
c - " de Tchehl - Tchekmeh .....	
6.2.2.1.2 - La famille bicarbonatée magnésienne .....	
a - groupe de Dychak .....	
b - groupe de Delak .....	
6.2.2.2 - Eaux sulfatées .....	
6.2.2.2.1 - La famille sulfatée calcique .....	
a - groupe de Kaftarak .....	
b - " de Chomp-Sarvestan .....	
6.2.2.2.2 - La famille sulfatée magnésienne .....	
a - groupe de Fir-Benau .....	
b - " de Tchah-Chirin .....	
6.2.2.3 - Eaux chlorurées .....	
6.2.2.3.1 - La famille chlorurée sodique .....	
a - groupe du Moharlu .....	
1 - Sous-groupe de Moharlu .....	
2 - " Som dol dol .....	
3 - " du puits n° 7 .....	
b - groupe de Djafarkhani .....	
1 - sous-groupe de Djafarkhani .....	
2 - " de Seid Hassen .....	
3 - " de Garou .....	
4 - sous-groupe de Bidi .....	
c - groupe de Pol-Bendji .....	
6.2.3 - Relation entre la composition chimique des sources et des puits de chaque montage de la région et la constitution géologique .....	
6.2.3.1 - Kuh-Darak .....	
6.2.3.2 - Kuh-Sabzpuhan .....	
6.2.3.3 - Kuh-Chareh .....	
6.2.3.4 - Siyah-Kuh .....	
6.2.3.5 - Kuh-Ahmadi .....	
6.2.3.6 - Kuh-Kaftarak et Samu .....	
6.2.3.7 - Kuh-Chas-ghomcheh .....	
6.3. - CONCLUSION .....	

7.1. - INTRODUCTION .....	
7.2. - ALLUVIONS ANCIENNES .....	186
7.3. - ALLUVIONS RECENTES .....	187
7.3.1 - Les alluvions du lac Moharlu .....	
7.3.2 - " des plaines .....	
7.3.3 - " actuelles .....	
7.3.4 - Bed Rock .....	
7.4. - LES ZONES D'ALIMENTATION .....	
7.4.1 - La plaine de Chiraz .....	
7.4.2 - La plaine de Sarvestan .....	
7.4.3 - La plaine de Kavar .....	
7.5. - LES CONES DE DEJECTION .....	
7.6. - LES PUIITS .....	
7.7. - LES GHANATES .....	
7.8. - CHIMIE DES EAUX DES ALLUVIONS .....	189
7.8.1 - La plaine de Chiraz .....	
7.8.2 - " " Kavar .....	
7.8.3 - La plaine de Sarvestan .....	
7.9. - EN RESUME .....	190
7.9.1 - La plaine de Chiraz .....	
7.9.2 - " " Sarvestan .....	
7.9.3 - " " Kavar .....	
7.10. - LES RESULTATS DES ETUDES GEOPHYSIQUES .....	
7.10.1 - La plaine de Chiraz .....	
7.10.2 - " " Kavar .....	
7.10.3 - " " Sarvestan .....	
7.11. - LES SONDAGES DE RECONNAISSANCE .....	
7.11.1 - Etude des profils des sondages .....	
7.12. - AGE DU REMPLISSAGE .....	
7.13. - CONCLUSIONS .....	193

8.1. - LES PHENOMENES KARSTIQUES .....	196
8.2. - L'AGE ET LE MODE DE CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES .....	198
8.2.1 - Principes .....	
8.2.2 - Le tritium .....	
8.2.3 - Le C <sub>14</sub> .....	
8.2.4 - Résultats de mesure et interprétation .....	200

9.1. - RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS .....	207
9.2. - CONCLUSIONS GENERALES .....	212

LISTE DES FIGURES

Figures

Pages

PREMIER CHAPITRE

1	Situation du bassin versant du lac Moharlu dans le cadre de l'Iran	6
2	Courbe hypsométrique du bassin versant	9
3	Variations des précipitations à l'aéroport de Chiraz de 1950 à 1974	11
4	Précipitations et pourcentages moyens mesurés de la période 1950 - 1974 à la station de l'aéroport de Chiraz en mm	12
5	Précipitations et pourcentages moyens saisonniers de la période 1950-1974	13
6	Carte isohyète de la région	14
7	Droite du gradient altimétrique de précipitation	17
8	Températures mensuelles de la période 1950-1972	18
9	Températures mensuelles de l'année 1972	21
11	Bilan annuel moyen (station de l'aéroport de Chiraz)	28
10	Superficies du lac Moharlu en 1972 et 1973	27
12	Bilan annuel de l'ensemble de la région	31

DEUXIEME CHAPITRE

13	Schéma du dôme de sel de Sarvestan	32
14	Coupe géologique de la montagne de Sabzpuchan	35
15	Colonne géologique de la région de Chiraz	36
16	Carte structurale du Zagros	47
17	Coupes géologiques de la partie NE de la région	48
18	" " " centrale de la région	50
19	" " " SW de la région	51

TROISIEME CHAPITRE

20	Comparaison des conductivités, températures, précipitations et débits de la source Pir Benau	61
21	" " " " " de la source Pol Brendji	62
22	" " " " " de la source de Babahadji	65
23	" " " " " du Moharlu	66
24	" " " " " de Barm Delak	70
25	" " " " " de Babounak	71
26	" " " " " de Barm-e-	72
27	Kaftarak	72
27	Comparaison des conductivités, températures, précipitations et débits de la source de Ghasr-e-ghomcheh	75
28	Comparaisons des conductivités, températures, précipitations et débits de la source de Murdi	76
29	" " " " " de Sarvestan	78
30	" " " " " d'Ab Tchenar	79

QUATRIEME CHAPITRE

31	Comparaison du carottage électrique: avec la coupe lithologique du puits n° 1	85
32	" " " " " " n° 2	86
33	" " " " " " n° 3	89
34	" " " " " " n° 4	90
35	" " " " " " n° 5	93
36	" " " " " " n° 6	94
37	" " " " " " n° 7	96
38	Courbes de pompage par paliers du puits n° 2	97
39	" " " " " n° 3	97
40	" " " " " n° 4	97
41	" " " " " n° 5	97
42	Ab barik	97

CINQUIEME CHAPITRE

43	Courbe -log temps du puits d'Ab barik	103
44	" " Rem - log t/t " "	103
47	" " " " " " " "	103

Figures

Pages

52	Courbe Rem - log t/t' du puits n° 4 Darak	107
53	" " - log temps " n° 5 Saadi	107
54	" " Rem - log t/t' " " "	107
45	" " - log temps " Sarvestan	103
55	" " " " " n° 1 Djahrom	111
56	" " Rem - log t/t' " " "	111
57	" " - log temps " n° 2 " "	111
58	" " Rem - log t/t' " " "	111
59	" " - log temps " n° 3 Lar	112
60	" " Rem - log t/t' " " "	112
61	" " - log temps " n° 9 " "	112
62	" " Rem - log t/t' " " "	112
63	" " - log temps " n° 1 Bandar Abas	115
64	" " Rem - log t/t' " " "	115
65	" " - log temps " Piézomètre Bandar Abas	115
66	" " Rem - log t/t' " " "	115
46	" " - log x " n° 1 " "	103
67	" " de tarissement par la méthode de Maillet	119
68	" " " " " " " "	120
69	" " " " " " " "	123
70	" " " " " " " "	124
71	" " " " " " Tison	129
72	" " " " " " " "	130
73	" " " " " " " "	139
74	Droite R - temps de la source de Pir Benau	140
75	" " " " " de Pol Brendji	141
76	" " " " " de Babahadji	142
77	" " " " " de Moharlu	143
78	" " " " " Delak	144
79	" " " " " Babounak	146
80	Projection des groupes de fissures de la zone de Darak	148
81	" " " " " " " "	149
82	" " " " " " " "	150
83	" " " " " " de Kaftarak	151
84	" " " " " " Babakuhi	152
85	" " " " " " " "	153
86	" " " " " " Sabzpuchan	154
87	" " " " " " Ghasr-ghomcheh	155
88	" " " " " " " "	155
88	SIXIEME CHAPITRE	
89	Températures des eaux des sources en fonction de l'altitude	161
90	Relation entre les conductivités des eaux des sources et l'altitude	162
91	Diagramme de Piper	167
92	" " de Schoeller du groupe de Roknabad	168
93	" " " " " de Tchehel-Tchechmeh	168
94	" " " " " de Djuchak	171
95	" " " " " de Delak	171
96	" " " " " de Mourdi	171
97	" " " " " d'Abkhan	171
98	" " " " " de Borzou	172
99	" " " " " de Sarvestan	172
100	" " " " " de Pir Benau	172
101	" " " " " Tchah Chirin	172
102	" " " " " de Moharlu	175
103	" " " " " de Som dol dol	175
104	" " " " " Puits n° 7	175
105	" " " " " Djafarkhani	175
106	" " " " " Sied Hassen	176
107	" " " " " Garou	176
108	" " " " " Bidi	177
109	" " " " " Pol Brendji	177
110	" " " " " Khalili	177
111	" " " " " de la montagne de Darak	178
	" " " " " de Sabzpuchan	178

112	Diagramme de Schoeller de la montagne de Chareh .....	181
113	" " " Siyah .....	181
114	" " " Ahmadi .....	182
115	" " " Kaftarak et Bamu .....	182
116	" " " " " .....	183
117	" " " Chasr-e-ghomcheh .....	183
118	Droite donnant l'âge de l'eau en fonction du pourcentage en $C_{14}$ .....	192

## LISTE DES TABLEAUX

1	Répartition altitudinale du bassin versant du lac Moharlu .....	8
2	Précipitations mensuelles de la période 1950-1974 .....	9
3	" et pourcentages saisonniers de la période 1950-1974 .....	10
4	" moyenne et coefficient pluviométrique .....	10
5	Volume des précipitations par tranche d'altitude .....	16
6	Température de la période 1950-1972 .....	18
7	" minimale et maximale absolu de la région .....	18
8	Valeurs de l'humidité relative .....	18
9	" de l'E <sub>p</sub> mensuelle par la deuxième formule de Turc .....	23
10	Bilan hydrologique du bassin versant par la méthode de Thornthwaite .....	25
11	Volume d'eau évaporé du lac Moharlu .....	26
11 (1)	Coloration des formations .....	53
12	Résultats du pompage des puits calcaires .....	82
13	Rabattement du puits n° 2 (Darak) .....	84
14	" des puits n° 2, n° 3, n° 4 (Darak) .....	88
15	Remontée des puits n° 1, n° 2, n° 4 (Darak) .....	88
16	Influence du pompage du puits n° 3 sur les autres puits .....	88
17	" " " n° 4 " " " .....	88
18	Rabattement du puits n° 3 (Darak) .....	88
19	" " n° 4 " .....	92
20	Essai de remontée par paliers, puits n° 5 (Saadi) .....	92
21	" de rabattement puits n° 5 (Saadi) .....	92
22	Comparaison des valeurs des coefficients de tarissement .....	135
24	Valeurs des réserves dynamiques emmagasinées des aquifères de Pir Benau .....	139
25	" " " " " de Pol Benau .....	140
26	" " " " " de Babahadjj .....	141
27	" " " " " du Moharlu .....	142
28	" " " " " Delak .....	143
29	" " " " " Babounak .....	144
30	Comparaison des valeurs des T, S, K par différentes méthodes .....	156
31	" " des pH et des teneurs en $CO_2$ libre .....	165
32	" " des teneurs en tritium, $C_{14}$ , $HCO_3$ , $SO_4$ , Cl .....	201
33	Teneurs en tritium et précipitations à Téhéran .....	202

## LISTE DES CARTES HORS TEXTE

Carte géologique de la région  
 Carte isopièze de la plaine de Chiraz  
 " " " " de Sarvestan  
 " " " " de Kavar

