

UNIVERSITE D'ORSAY/PARIS XI.
Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique.
DEA d'hydrologie, hydrogéologie: Géochimie et géostatistique.
Filière : Hydrochimie et hydrologie isotopique.

IRD
Unité GP623 - UR2
Programme HYDROMED
(Tunisie)

**GEOCHIMIE ISOTOPIQUE DES RELATIONS
HYDROLOGIQUES ENTRE LAC DE RETENUE
ET AQUIFERE.
PETIT BARRAGE COLLINAIRE DE KAMECH,
TUNISIE.**

Mémoire rédigé sous la direction de Messieurs Olivier GRUNBERGER et Jean-Luc MICHELOT.

**Présenté et soutenu par Déborah GAY,
A la session de juin 1999.**

Ce mémoire de DEA est le résultat d'un stage effectué en collaboration entre le laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique de l'université d'Orsay, et l'IRD. Ce stage a donné lieu à une mission de terrain de 4 semaines en Tunisie.

Ce travail n'aurait pu se concrétiser sans l'encadrement bienveillant d'Olivier Grunberger et Jean-Luc Michelot à qui je tiens à exprimer ma gratitude.

Durant mon séjour en Tunisie, j'ai été guidée et conseillée par Jean Albergel et Jean-Pierre Montoroi à qui je tiens également à exprimer ma reconnaissance.

Mes remerciements vont aussi à Roger Calvez et Insaf Mekki, pour m'avoir accompagnée sur le terrain, à Annick Filly et Sandra Van-Exter pour leur précieux conseils lors de la réalisation des analyses isotopiques, ainsi qu'à l'ensemble des membres du laboratoire d'hydrologie d'Orsay et en particulier à Laurent Dever et Christelle Marlin.

SOMMAIRE

<i>liste des tableaux et figures.</i>	5
INTRODUCTION.	7
CHAPITRE I: CONTEXTE GENERAL.	9
A PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.	9
1) Situation géographique et relief .	9
2) Climatologie de la région :	9
3) Géologie.	10
4) Pédologie.	11
5) Occupation des sols.	12
6) Irrigation.	12
B PRESENTATION DU BASSIN VERSANT.	13
1) Le bassin versant (cf. carte en annexe).	13
2) La retenue et son barrage.	13
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE.	15
A LES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE.	15
1) Etude des précipitations.	15
2) Evaporation.	17
3) Variation du volume du lac.	18
4) Ruissellement.	19
5) Infiltration et apport souterrain.	19
B Les données chimiques et isotopiques.	20
1) Echantillonnage et travail de terrain.	20
2) Les analyses chimiques.	21
3) Les analyses isotopiques.	23
a) Les teneurs isotopiques des précipitations.	24
b) Les teneurs isotopiques des eaux du bassin de Kamech.	25
4) Modèles de fonctionnement du lac.	27
a) Le modèle des chlorures.	27
b) Le modèle en $\delta^{18}\text{O}$.	28
Chapitre III : Résultats et interprétations.	32
A Résultats.	32
1) Teneurs chimiques.	32
a) Teneurs observées.	32
b) Processus en cause.	35
2) Les teneurs isotopiques.	38
a) Teneurs observées.	38
b) Processus en cause.	42

B ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU BASSIN VERSANT.	44
1) Partie amont.	44
2) Le lac.	46
3) L'aval.	50
CONCLUSION.	53
ANNEXES	55

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.

Tableau 1: Températures (°C) moyennes mensuelles à Tunis (J.F. GRIFFITHS 1972)	10
Tableau 2: humidité relative mensuelle de la région Kélibia (données MNT S. LASSOUED 1982).	10
Tableau 3 :Caractéristiques du bassin versant (CES-Orstom 1997).	13
Tableau 4 :Caractéristiques de la retenue (CES- Orstom 1997).	14
Figure 1: Précipitations annuelles (mm par an).	16
Figure 2: Précipitations moyennes mensuelles (mm par mois).	16
Tableau 5: Evaporation moyenne mensuelle (mm/mois) .	17
Figure 3: Volume moyen du lac au pas de temps mensuel.	18
Figure 5 : Diagramme ^2H vs ^{18}O des précipitations moyennes mensuelles.	24
Figure 6 : la droite d'évaporation.	26
Figure 7: Composition isotopique d'une eau évaporée en fonction de la fraction d'eau restante pour différentes humidités relatives (FRISTZ and FONTES (1980)).	30
Tableau 6: moyennes des teneurs chimiques des eaux du lac.	32
Tableau 7: moyennes des teneurs chimiques des eaux des puits.	33
Tableau 8: moyennes des teneurs chimiques des eaux de source.	34
Tableau 9: Moyennes des teneurs chimiques des eaux du Talweg.	34
Tableau 10: teneurs chimiques des eaux de pluie (meq/l).	35
Figure 8 : diagramme Na^+/Cl^- (meq/l).	36
Figure 9: diagramme des ions SO_4^{2-} vs Ca^{2+} (meq/l).	36
Tableau 11 : teneurs isotopiques des eaux du lac.	38
Figure 10 : diagramme ^2H vs ^{18}O pour les eaux de surface.	39
Tableau 12: teneurs isotopiques des eaux de talweg.	40
Tableau 13: teneurs isotopiques moyenne des eaux de puits.	40
Tableau 14: teneurs isotopiques moyenne des eaux de sources.	41
Figure 11 : diagramme ^2H vs ^{18}O des eaux souterraines.	41
Figure 12 : diagramme ^2H vs ^{18}O des eaux amonts.	44
Figure 13 : modélisation du Cl.	47
Figure 14 : modélisation de la teneur en ^{18}O .	48
Figure 15 : diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en aval.	50
Figure 16 :profil en long isotopique.	51

INTRODUCTION.

L'étude que nous nous proposons de faire concerne le petit lac collinaire de Kamech. Cette retenue a été construite en 1991 dans le cadre du programme «Aménagement des terres en pente, mobilisation des ressources en eau, entretien et sauvegarde des aménagements », entrepris par l'état tunisien et qui prévoit la construction d'un millier de barrages à l'horizon de l'an 2000.

Ce vaste chantier s'inscrit dans une politique générale de conservation des eaux et des sols, dont les objectifs sont de réduire les pertes en terres agricoles (estimées à 10 milles ha par an), de réduire l'envasement des grands barrages situés en aval (25.10^3m^3 actuellement) et d'augmenter la recharge des nappes. Les lacs collinaires représentent également de nouvelles ressources locales en eau dans des zones où les conditions naturelles sont souvent défavorables. Les retenues peuvent alors satisfaire des besoins domestiques et l'irrigation d'appoint de petits périmètres (RAHAINGOMANANA N., 1998)

Dans le cadre de la convention «conservation des eaux et des sols » entre la direction de la conservation des eaux et des sols et l'IRD ex ORSTOM, un programme de recherche est mené selon trois thèmes complémentaires : la conservation des eaux, la conservation des sols, et l'agro-socio-économie. Il s'agit, entre autres objectifs, de procéder à une évaluation des modifications des régimes hydriques induites par la présence d'un lac collinaire et à l'analyse des conséquences de ces aménagements sur le déroulement des activités agricoles et de la vie sociale de la micro-région. (Selmi, Talineau, 1994).

L'objectif de notre étude est de comprendre la nature des relations hydrologiques des eaux de notre bassin, à l'aide de traceurs naturels chimiques et isotopiques. La retenue de Kamech fait l'objet d'un suivi hydrologique depuis trois ans, qui soulève deux problèmes : d'une part un terme de clôture du bilan hydrologique négatif, nous amène à supposer l'existence d'une infiltration. D'autre part un modèle hydrologique bâti sur le ruissellement à la surface du bassin fonctionne mal ; on simule un écoulement inférieur à l'écoulement réel. Ce qui nous

permet de supposer l'existence d'un autre apport. Nous sommes alors à même de nous poser plusieurs questions :

- La retenue est-elle maintenue par un aquifère régional ?
- Le bassin hydrogéologique est-il plus grand que le bassin hydrologique ?
- S'il y a une fuite, qu'elle est son importance ? Alimente-t-elle un aquifère en aval ?

Nous tenterons donc d'apporter des réponses à ces questions, pour cela nous aborderons en premier lieu une description du contexte général, en présentant la zone d'étude et le bassin versant. La démarche qui suivra consistera à exposer les données disponibles et les outils utilisés ; à savoir les termes du bilan hydrologique, les données chimiques et isotopiques, ainsi que le petit modèle de simulation du fonctionnement du lac. Ensuite, la corrélation des résultats obtenus nous permettra de faire des hypothèses sur le mode de fonctionnement du bassin.

CHAPITRE I : CONTEXTE GENERAL.

Dans ce chapitre consacré au contexte général, nous aborderons en premier lieu la zone d'étude dans ses aspects géographique, géologique et climatique. Puis, nous nous attacherons plus particulièrement à notre bassin versant.

A PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.

1) Situation géographique et relief.

Le bassin versant de la retenue de Kamech se situe au nord-est de la Tunisie, dans la péninsule du Cap Bon, qui sépare le golfe de Tunis au nord-est, du golfe d'Hammamet au sud-est.

La péninsule du Cap Bon se trouve dans le prolongement de l'Atlas mais est isolée des massifs montagneux intérieurs par la plaine de Grombalia. Elle présente une arête centrale montagneuse (le Djebel Sidi Abd-er-Rahmane) orientée SW-NE, légèrement décentrée vers l'ouest. Le flanc oriental descend vers la mer en pente douce et le littoral est formé d'anciennes plages, de dunes et de lagunes. Le versant Ouest est au contraire abrupt et la côte plus découpée, est soit rocheuse soit envahie par des dunes. Au nord-est, une vaste dépression s'étend entre le massif du Djebel Abd-er-Rahmane et Cap Bon : la plaine d'El Haouaria, occupée par un ensemble dunaire et une zone inondée (Bortoli, Gounot).

2) Climatologie de la région :

Le climat est de type méditerranéen humide. Les précipitations annuelles varient entre 400 et 800 mm/an. La pluviométrie maximale est enregistrée en décembre/janvier. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 14° C. Les températures moyennes mensuelles enregistrées à Tunis sont reportées dans le tableau n°1. La période pluvieuse coïncide avec la période froide.

Tableau 1: Températures (°C) moyennes mensuelles à Tunis (J.F. GRIFFITHS 1972)

Station	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Tunis	7,6	7,8	9,4	11,9	13,5	17,3	19,1	20,2	19,3	16	12,5	8,7

Tableau 2: Humidité relative mensuelle de la région Kélibia (données MNT S. LASSOUED 1982).

Station	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Kélibia	76.7	78.3	78.7	76.3	76.3	71.7	71.5	73.8	76.3	76.8	77.7	77.7

Le climat dans cette région est influencé par la dépression venant du nord-ouest, la dépression saharienne et la topographie. En hiver, les cyclones qui traversent l'Europe apportent des masses d'air froid engendrant de grosses pluies et des coups de vent. Au printemps, la région est affectée par la même dépression mais en raison des plus faibles variations de température entre la mer et le continent, il n'y a que de petites pluies (à l'exception des zones de relief). En été, une période de calme et de relative chaleur prédomine.

Au sud, l'abri que forme l'Atlas permet la présence de la dépression saharienne. Les cyclones se forment surtout au printemps et en octobre. Leur effet principal est d'agir sur les vents et les températures au printemps (J.F. Griffiths 1972).

3) Géologie.

Au Cap Bon, la formation affleurante, la plus ancienne, est datée de l'Eocène moyen supérieur. Elle est constituée d'une alternance de marne calcaire sur une épaisseur de 800m.

L'Oligocène est épais de 750m à 900m. On peut le diviser en deux ensembles : - des sables et des marnes à la base - puis des sables et grès qui présentent la particularité d'avoir une granulométrie augmentant vers le sommet, ce qui souligne l'aspect régressif de cet ensemble. (Jauzein 1967). Le Miocène, lui, est transgressif. Sa base repose sensiblement en concordance sur l'Oligocène. Le Burdigalien est

constitué d'une barre calcaire plus ou moins siliceuse très dure sur une épaisseur de 10-30m. Le Vindobonien débute par 900m de marnes à huîtres avec grès et intercalations de marnes gypseuses. Puis sur 400-500m, on trouve une alternance de grès tendres, de lits de marnes et bancs de lignite. Enfin sur 1200 à 1300m, la formation est constituée de marnes gypseuses avec de rares bancs gréseux. (Castany 1951). Le bassin versant de Kamech se situe dans une zone d'affleurement du Vindobonien. La fin du cycle miocène est marquée par une émergence générale qui annonce la formation des chaînes actuelles. C'est le début de la grande phase orogénique qui se poursuivra jusqu'à la fin du quaternaire ancien.

La série décrite ci-dessus s'organise de la façon suivante :

Le Djebel Sidi-Abd-er-Rahmane est un brachy-anticlinal dissymétrique crevé. En son cœur apparaissent l'Eocène moyen supérieur et l'Oligocène. La barre calcaire burdigalienne apparaît en relief cernant la boutonnière.

Autour s'étalent en synclinal, les formations du miocène. Le long des côtes, le miocène est recouvert par des sédiments pliocènes et quaternaires. A la pointe de Korbous, on retrouve la même série anticlinale qu'au Djebel Sidi-Abd-er-Rahmane. L'extrémité du Cap-Bon constitue également un anticlinal dont les couches les plus anciennes relèvent de l'Oligocène. Il est séparé de l'anticlinal du Djebel Sidi-Abd-er-Rahmane par la plaine quaternaire d'El Haouaria.(Bouvier, 1977).

4) Pédologie.

Le Cap-Bon présente des sols assez variés (Vertisols, sols salins, sols isohumiques, sols calcimorphes etc...), que l'on peut classer en deux grandes catégories : Les sols évolués et les sols d'apports. Les sols évolués ont pour origine la roche mère sous-jacente, tandis que les sols d'apports sont liés à l'érosion favorisée par la dégradation du couvert végétal (déboisement, surpâturage).

Les sols du bassin versant de Kamech sont en majorité des sols calcimagnésiques, bruns calcaires vertiques, tronqués ou hydromorphes. Ils occupent 57% de la superficie totale du bassin. Les vertisols qui ont une grande capacité de

rétenion en eau occupent 2% du bassin, les sols minéraux bruts en occupent 18% et les sols peu évolués 21%.(Mekki 1999).

5) Occupation des sols.

La végétation naturelle n'existe plus dans le petit bassin de Kamech, à l'exception des quelques hectares qui subsistent à l'aval des fronts de barres gréseuses. Sur les 268 ha du bassin, 3.7 ha sont occupés par le lac ; sur le reste, les différents types de cultures se répartissent de la façon suivante : 73 ha de parcours permanent, 20 ha de parcours ligneux, 13 ha d'arboriculture et 171 ha divisés entre les cultures annuelles tels que les céréales, légumineuses, cultures maraichères et fourrages qui sont variables d'une année à l'autre.(Mekki 1999).

6) Irrigation.

Dans la péninsule du Cap-Bon, l'irrigation est une pratique bien maîtrisée. Elle s'est développée autour des puits. Le niveau capté au Cap-Bon peut atteindre 50m. Certains ouvrages sont équipés d'un forage en fond de puits, dans le but d'atteindre un deuxième niveau de nappe captive. Les puits alimentent aujourd'hui près de 60% des 40.10³ hectares irrigués.

Avec l'installation des lacs collinaires le pays a vu de nouvelles techniques d'irrigations se développer. Autour d'un lac collinaire, le choix de la surface à cultiver, du type de culture et du moment d'irrigation, est dépendant de la disponibilité en eau du lac. Sur le bassin versant de Kamech, environ 6 ha sont irrigués à partir du lac.

B PRESENTATION DU BASSIN VERSANT.

1) Le bassin versant (cf. carte en annexe).

La retenue de Kamech a un petit bassin versant, puisque sa surface n'est que de 2,45 km². Il est relativement étalé pour sa taille ($I_c = 1,30$). L'oued lui-même est encaissé, le bassin présente alors des pentes fortes. Le dénivelé est de 108 m, avec une altitude maximale de 203m et minimale de 95m.

Tableau 3 :Caractéristiques du bassin versant (CES-Orstom 1997).

Surface	ha	245,5
Périmètre	km	7,25
Indice de compacité		1,3
longueur du rectangle équivalent	km	2,72
largeur du rectangle équivalent	km	0,9
Altitude maximale	m	203
Altitude minimale	m	95
Indice de pente	m/km	40
Dénivelée	m	108

2) La retenue et son barrage.

L'élément principal d'un lac collinaire est un petit barrage en terre compactée dont l'amont est recouvert d'un parement de pierre et l'aval protégé par des arbustes de fixation. A Kamech, la digue est haute de 10 mètres et longue de 125 m. La retenue contenait un volume au déversement de 142560 m³ lors de sa construction en 1991. Ce volume diminue au fur et à mesure de l'envasement. La durée de vie de l'ouvrage est d'ailleurs estimée à 38 ans (soit une perte de 15,43 m³/an/ha). Il existe un

évacuateur de crues, c'est un déversoir en béton de type triangulaire qui se situe à une altitude de 8,70 mètres. Enfin, une conduite souterraine munie d'une vanne, traverse la digue. Elle permet la vidange du lac ou des prélèvements éventuels.

Tableau 4 :Caractéristiques de la retenue (CES- Orstom 1997).

Année de construction		1991
Latitude Nord		36°52'18"
Longitude Est		10°32'03"
Volume au déversement (Vi)	m ³	142560
Surface au déversement (Si)	ha	4,466
Hauteur de la digue	m	10
Longueur de la digue	m	125
Nature du déversoir		béton triangulaire
Hauteur du déversoir	m	8,71
Largeur du déversoir	m	8,85
Diamètre de la conduite	mm	300

Dans ce chapitre de présentation générale nous avons vu que le bassin versant étudié se situe sur la péninsule du Cap-Bon, le climat est de type méditerranéen humide. La géologie présente une alternance de marnes gypseuses et de grès. Les sols du bassin de Kamech sont en majorité calcimagnésiques. La végétation naturelle n'existe quasiment plus. La création de la retenue à permis le développement d'une nouvelle irrigation, 6 ha du bassin sont irrigués à partir du lac.

A présent que nous avons une meilleure idée des caractéristiques de notre zone d'étude nous allons pouvoir établir une analyse hydrologique et géochimique.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE.

Dans cette partie, nous présenterons les différents types de données dont nous disposons ainsi que les outils utilisés.

A LES TERMES DU BILAN HYDROLOGIQUE.

Dans cette partie, nous allons étudier les différents éléments constituant les termes du bilan hydrique. Ce bilan peut se résumer par l'équation suivante :

$$\Delta V = (V_r + V_p + V_{esc} + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u).$$

avec :

ΔV : variation de stock dans la retenue,

V_r : apports en provenance du ruissellement des versants,

V_{esc} : apports souterrains,

V_p : apports des précipitations tombant directement sur la retenue,

V_f : apports dus à la fonte des neiges,

V_{ev} : volume d'eau évaporé,

V_d : volume déversé,

V_{vi} : volume sortant par la vanne de vidange,

V_i : pertes par infiltration,

V_u : volume d'eau prélevé pour divers usages (essentiellement l'irrigation).

1) Etude des précipitations.

Les données disponibles proviennent des annuaires hydrologiques des lacs collinaires (1994-1998) D/CES-IRD. Ce sont des valeurs de pluviométrie originale en l'état enregistrées par un pluviomètre de type Cédipe V4, situé en milieu de digue.

Nous disposons de données journalières sur une période de 5 ans (mars 1994 à août 1999). A partir de ces données, il a été effectué deux types de graphiques : les histogrammes des précipitations annuelles (cf. fig.1), ainsi que les courbes de

précipitations moyennes mensuelles (cf. fig.2), bien que 5 ans de données soit une période un peu courte pour établir des moyennes significatives.

Figure 1: Précipitations annuelles (mm par an).

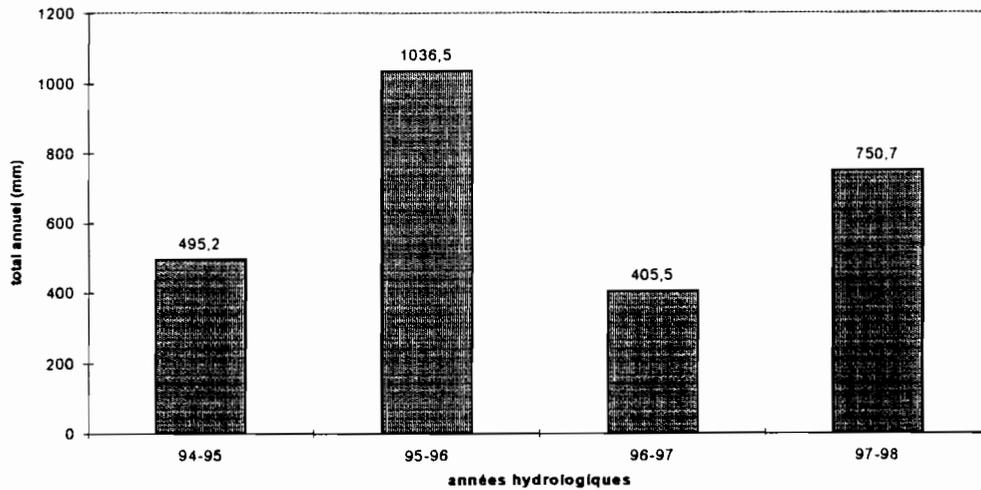
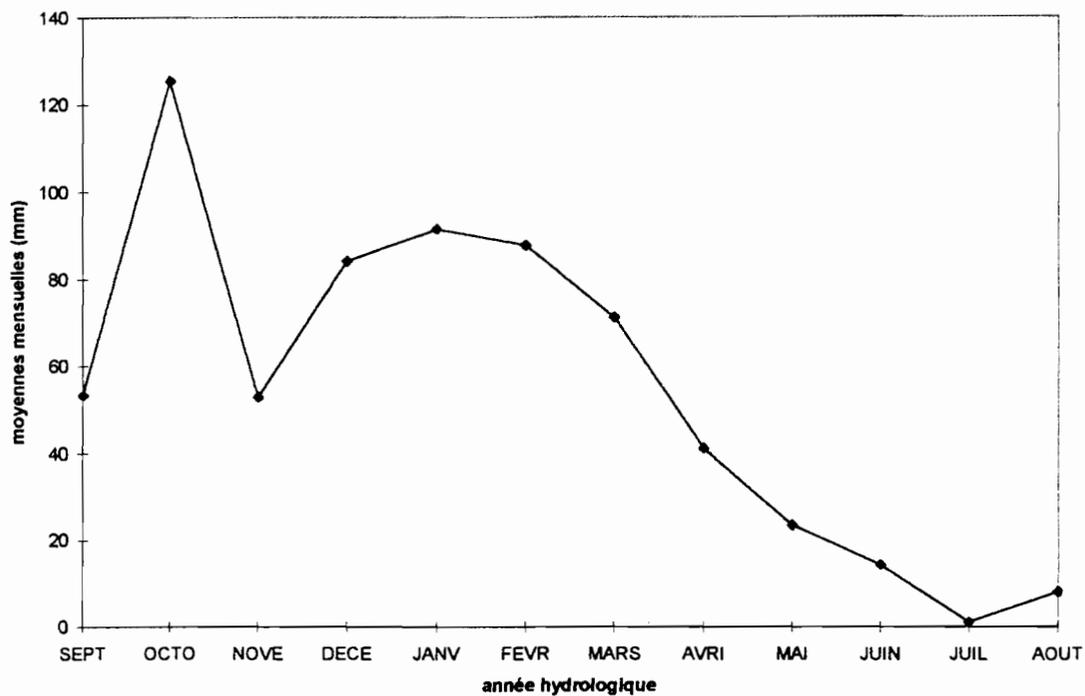


Figure 2: Précipitations moyennes mensuelles (mm par mois).



Notons que l'on a choisi de travailler en année hydrologique, c'est-à-dire du mois de septembre de l'année n - 1 au mois d'août de l'année n. Ainsi, l'année hydrologique 1995 commence en septembre 1994.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 672 mm. On remarque une variation importante d'une année à l'autre.

Le bassin présente un régime pluviométrique avec deux périodes distinctes ; une saison humide et une saison sèche , plus courte, mais bien marquée de juin à août.

Les 4 ans de données dont nous disposons sont une chronique un peu courte pour effectuer des moyennes mensuelles. C'est ce qui explique la valeur particulièrement élevée du mois d'octobre (128 mm/mois). L'année 1997 présente en effet un mois d'octobre particulièrement pluvieux.

2) Evaporation.

Dans les annuaires hydrologiques des lacs collinaires D/CES-IRD, sont disponibles des valeurs d'évaporation journalière (en mm) sur la période sept. 1995 - août 1999, elles sont obtenues à l'aide d'un bac à évaporation installé à proximité du lac.

Tableau 5: Evaporation moyenne mensuelle (mm/mois).

Jan	Fév.	mars	avril	mai	juin	Juill.	août	sept	Oct.	Nov.	Déc.
54.4	65.2	99.5	105.3	145.3	198.3	238.8	168.5	145.9	96.4	69.8	54.37

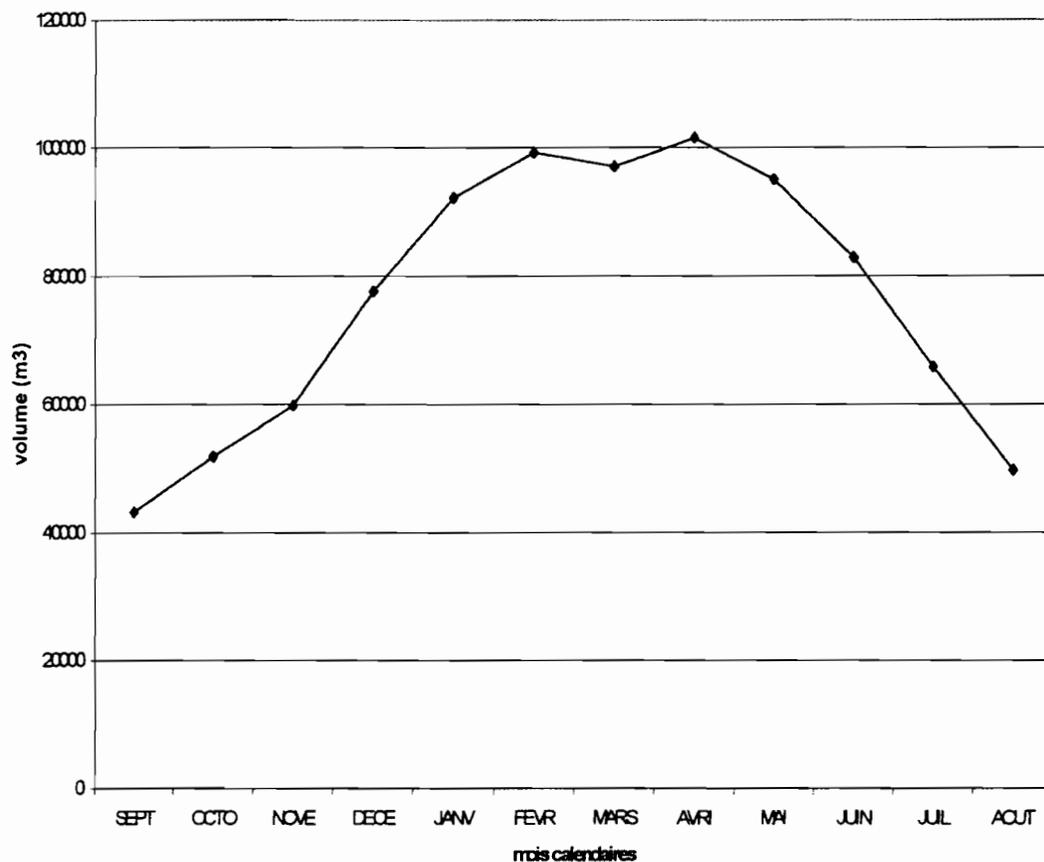
Le total annuel varie entre 1200 et 1500 mm/an. Au niveau journalier , l'évaporation est comprise entre 0 et 12 mm/jour.

L'évaporation représente une perte importante dans le bilan hydrologique du lac. Sur l'année, elle représente plus du double du volume apporté par la pluie directe.

3) Variation du volume du lac.

Sur la période étudiée, le lac n'a jamais été à sec. Les moyennes mensuelles des volumes journaliers (m^3) présentent une période de basses eaux (août, septembre, octobre), décalées d'un mois par rapport aux pluviométries les plus faibles.

Figure 3: Volume moyen du lac au pas de temps mensuel.



Durant la période étudiée le volume du lac est à son minimum ($1230 m^3$) le 3 septembre 1997. Il est au plus haut le 28 février 1996 ; le volume maximal étant contrôlé par la cote au déversement.

4) Ruissellement.

Le ruissellement direct des eaux de pluies sur les versants constitue l'apport le plus important à la retenue. Ce n'est pas une valeur mesurée directement, il est estimé en faisant l'hypothèse que pendant la durée de la crue concomitante à l'averse, les apports souterrains deviennent négligeables, il en va de même pour le volume évaporé, les pertes par infiltration, ainsi que le volume d'eau prélevé pour divers usages. Le volume de vidange est nul puisque la consigne demande à l'opérateur de n'ouvrir les vannes qu'après la crue.

Donc pendant les quelques heures que dure la crue, l'équation de bilan peut se simplifier de la façon suivante : $V_r = \Delta V - V_p + V_d$. On en déduit donc le volume ruisselé.

5) Infiltration et apport souterrain.

Par clôture du bilan, on détermine, au niveau journalier, le terme $V_{es} + V_f - V_u - V_i$. On constate alors qu'il est généralement négatif même les mois d'hiver, donc V_u , le volume d'eau prélevé dans le lac pour irrigation, n'est sûrement pas le facteur dominant. V_f , le volume apporté par la fonte des neiges, reste négligeable bien qu'il ait neigé cet hiver à Kamech.

Les deux facteurs principaux du terme de clôture sont donc le volume infiltré et le volume d'apport souterrain. Le fait que ce bilan soit négatif suggère une perte par infiltration dominante, ce qui n'exclut pas pour autant un apport souterrain qui resterait néanmoins inférieur à l'infiltration. L'étude des chroniques journalières des précipitations, évaporation et variation de volume du lac, fournit des indices qui vont dans ce sens :

- entre le 16 mars 96 et le 10 avril 96, par exemple, alors que la dernière pluie significative date du 10 mars, on observe une augmentation du niveau du lac, pourtant il s'évapore plus qu'il ne pleut. Il y aurait donc un écoulement souterrain retardé qui serait de l'ordre d'un mois. Ceci expliquerait qu'au niveau des moyennes

mensuelles on observe un décalage d'un mois entre les pluviométries les plus faibles et la période de basse eau du lac.

B LES DONNEES CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES.

1) Echantillonnage et travail de terrain.

Les prélèvements d'eaux pour analyses chimiques ont été effectués du 15 mars au 10 avril 1999, dans le bassin versant de Kamech. Les points de prélèvements sont localisés sur la carte du bassin versant, et les données chimiques sont reportées dans les tableaux en annexe. Les échantillons ont été prélevés dans le lac, les eaux de surface aux abords directs de la retenue et dans les puits. Les mesures de pH, conductivité et oxygène dissout, ont été systématiquement faites sur le terrain pour tous les prélèvements sur l'eau non filtrée. Les appareils utilisés sont de marque WTW (LF 330 pour le conductimètre, pH 340 pour le pH-mètre et OXY 330 pour l'oxymètre). Chaque appareil possédant une sonde de température intégrée à l'électrode. Les mesures sont compensées automatiquement en température à 25°C.

Le TAC a également été mesuré sur eau non filtrée. On titre 30 ml d'eau par une solution d'HCl N/10 en présence de méthyl-orange. Le virage au rouge correspond à la neutralisation des bicarbonates à pH 4,3.

250 ml d'eau sont filtrés à 0,2µm, dont 200ml servira pour l'analyse des ions majeurs et 2 × 8 ml pour l'analyse des isotopes stables de l'eau.

En tout, 43 échantillons ont été prélevés :

- 27 échantillons d'eau de surface :

2 dans la retenue qui était à son niveau maximal (KL7 et KL14),

3 dans l'Oued aval, assimilé à la fuite du lac (KS8 à KS10),

3 dans l'Oued amont principal, KS30 à la source, KS18 à mi-parcours et KS13 juste avant le lac ,

5 dans les sources du versant amont, rive gauche (KS32 - KS24 - KS26 - KS20 - KS28).

13 dans les ravines de versants amont, KS12 - KS15 à KS17 - KS19 - KS29 - KS27 -KS25 -KS21 àKS23 -KS33 -KS31.

1 au niveau du radier en aval du lac (KR39).

- 16 échantillons d'eau de nappe prélevés dans 15 puits et 1 forage :

3 puits dans la partie amont du bassin versant (KP2, KP42 et KP43),

5 en aval de la retenue (KP3 à KP6 et KP11),

7 puits (KP34 à KP38, KP40 et KP41) et un forage (KF1) en dehors du bassin versant.

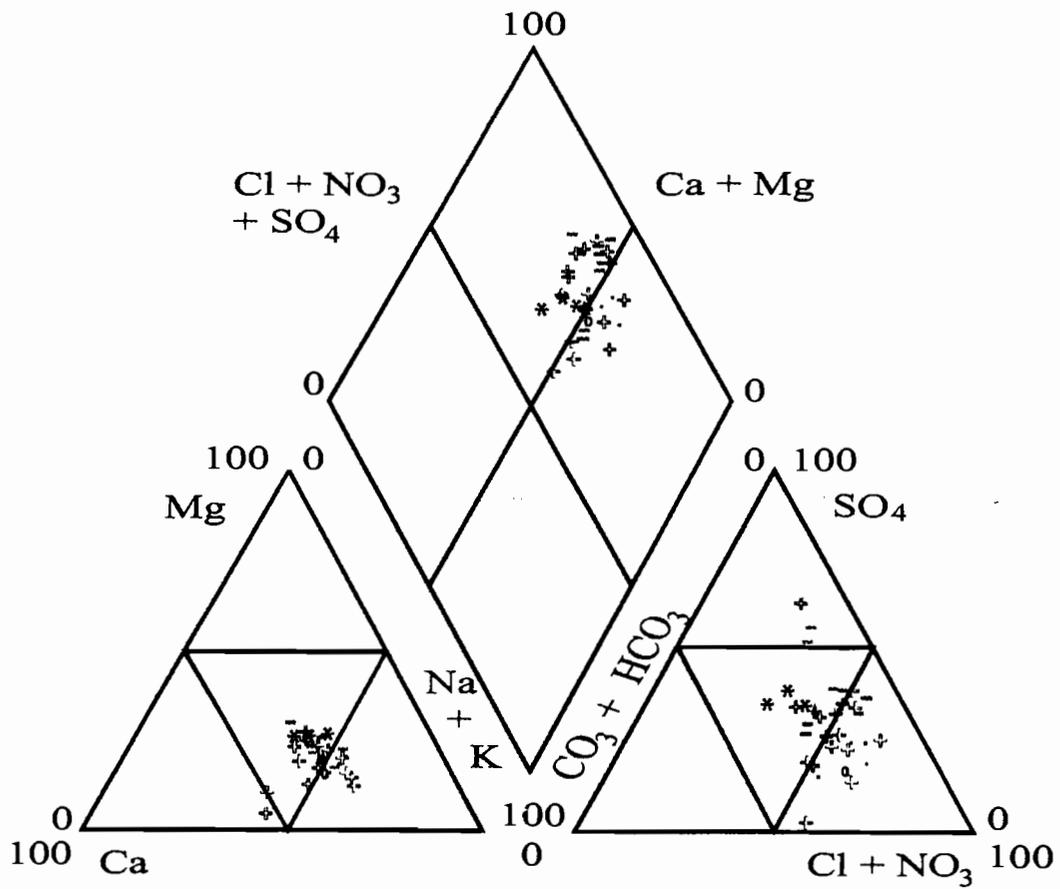
Nous disposons également de deux échantillons prélevés en août 1998 (KL7-98 a été prélevé dans le lac et KP11-98 dans le puits en aval de la retenue) ; ainsi qu'un échantillon d'eau de pluie prélevé dans une citerne en ciment. Toutes ces données sont reportées dans le tableau en annexe.

2) Les analyses chimiques.

Ces analyses ont été effectuées sur échantillons filtrés, à l'aide d'un spectromètre de terrain de type DR/2010 HACH, sauf pour les ions calcium, magnésium et chlorure qui ont été mesurés par titrage. Certains échantillons dont les bilans ioniques étaient mauvais, ont été refaits à l'IRD-Bondy, en chromatographie ionique.

Les résultats de ces analyses sont reportés en annexe.

Figure 4: le diagramme de piper.



- ← Puits
- ▲ Lac
- ◻ Forage
- Ecoulement de surface
- * Ecoulement aval
- Sources

a) Le diagramme de Piper :

Il permet d'établir une classification qualitative des eaux et peut mettre en évidence des faciès et des zonalités hydrochimiques. En outre, il permet la comparaison globale d'un grand nombre d'analyses ponctuelles.

Sur la figure n°4 sont reportés les points représentatifs des teneurs ioniques de nos 43 échantillons. On remarque que la plupart des eaux sont sulfatées, chlorurées, sodiques et potassiques. On ne distingue pas de changement de faciès entre les eaux de nappe et les eaux de surface. Dans le triangle des cations, la plupart des points s'alignent sur une droite correspondant à un rapport $Ca/Mg = 1$. Ce rapport permet de supposer que les eaux du bassin sont à saturation vis à vis de la calcite et de la magnésite. C'est ce que confirment les indices de saturation.

b) Les indices de saturation :

A l'aide du programme informatique Wateq, nous avons calculé les indices de saturation vis à vis de certains minéraux. Ce programme, basé sur la loi d'action de masse, permet le calcul des équilibres entre les espèces minérales et les ions présents dans la solution en fonction de la température, du pH et des gaz dissous.

Les eaux du bassin sont à saturation vis à vis des minéraux calciques et magnésiens, soit carbonatés (Calcite, Dolomite, Magnésite), soit siliceux (Diopside, sépiolite, Talc, Trémolite). La plupart des eaux sont également à saturation vis à vis du quartz.

Les analyses chimiques des eaux du bassin de Kamech, nous ont permis de déterminer un faciès, ce qui nous permettra de discuter sur l'origine de la minéralisation.

3) Les analyses isotopiques.

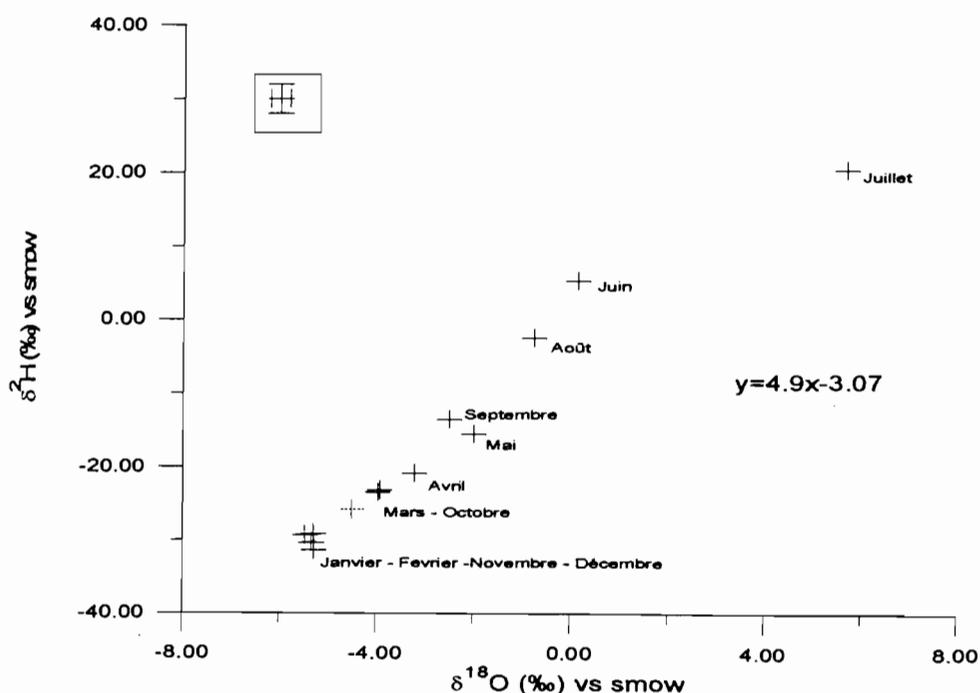
Ces dernières ont été effectuées à Orsay sur un spectromètre de masse. Le principe de l'analyse pour l'oxygène 18 est une équilibration à 25°C entre un CO_2 de

composition isotopique connue et l'échantillon d'eau. Le CO₂ équilibré sera passé au spectromètre à double collecteur, en le comparant au CO₂ étalon de travail, lui-même calibré par rapport à l'étalon de référence snow. La reproductibilité des analyses peut-être estimée à plus ou moins 0,2‰.

Les principes de l'analyse en Deutérium est une réduction de l'eau sur le zinc à 500°C, l'hydrogène dégagé sera passé au spectromètre. L'erreur sur la mesure est de l'ordre de plus ou moins 2‰.

a) Les teneurs isotopiques des précipitations.

Figure 5 : Diagramme ²H vs ¹⁸O des précipitations moyennes mensuelles.



La droite des eaux météoriques régionales a pour équation : $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 12,5$. Elle est établie pour un fractionnement isotopique à l'équilibre, c'est-à-dire une humidité relative de l'air égale à 100%. L'excès en Deutérium de +12,5 traduit un mélange dans les précipitations entre les condensations de vapeur d'origine océanique (+10) et méditerranéenne (+22).

Nous disposons de données mesurées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à Tunis. Ce sont des teneurs en oxygène 18 et deutérium des précipitations mensuelles sur la période 1967 - 1995.

Compte tenu de la faible distance (50 km « à vol d'oiseau ») qui sépare cette station de la zone étudiée et des pluviométries comparables, on fait l'hypothèse que les teneurs isotopiques des précipitations du bassin de Kamech sont voisines de celles mesurées à Tunis. Ainsi, nous avons calculé des moyennes mensuelles des teneurs isotopiques, pondérées par la hauteur des précipitations.

Les teneurs moyennes mensuelles pondérées en ^{18}O et ^2H ont été mises en relation sur la figure 5. Les points se répartissent selon une droite de régression d'équation :

$$\delta^2\text{H} = 4.9 * \delta^{18}\text{O} - 3.7 \quad \text{avec } R^2 = 0.95$$

La pente obtenue est une pente d'évaporation qui résulte d'un fractionnement isotopique hors équilibre. Les teneurs isotopiques les plus élevées correspondent aux mois les plus chauds et également les plus secs. Les valeurs de l'humidité relative moyenne de l'air à ce moment de l'année sont plus faibles (cf. tableau 2). L'enrichissement observé est dû à l'évaporation lors de la chute des gouttes d'eau dans l'atmosphère.

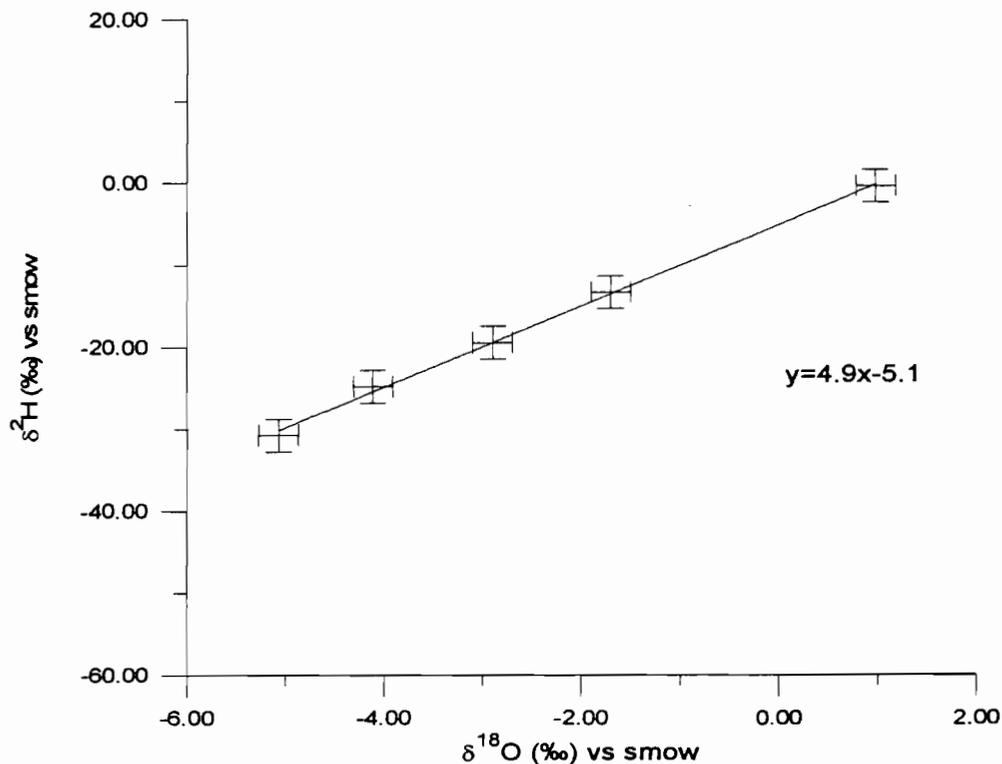
Pour la période 1967 - 1995, la teneur moyenne annuelle pondérée en ^{18}O des pluies est de -4.5‰ vs smow, et de -25.85‰ vs smow pour le deutérium.

b) Les teneurs isotopiques des eaux du bassin de Kamech.

Trente-neuf analyses ont été réalisées en oxygène 18 et deutérium : les deux échantillons du lac, 17 échantillons d'eau de surface, 15 échantillons d'eau souterraine, 2 échantillons datant d'août 98 (l'eau du lac, et le puits en aval), ainsi que 3 échantillons prélevés à trois jours d'intervalle dans une bassine contenant de l'eau du lac (E23 - E24 - E25).

La droite d'évaporation :

Figure 6 : La droite d'évaporation.



Les trois points E23, E24 et E25 nous permettent d'établir la droite d'évaporation ; en effet, dans un graphique Deutérium versus oxygène 18, ils se répartissent parfaitement le long d'une droite d'équation $\delta\text{D} = 5 \delta^{18}\text{O} - 5$, dans le prolongement du point représentatif de l'eau du lac au mois de mars. La pente de 5 est caractéristique d'un phénomène de fractionnement dû à l'évaporation. Ce qui est remarquable, c'est que le point représentatif de Août 98 se situe également sur cette droite vers les teneurs isotopiques les plus élevées. Ceci suggère des conditions d'évaporations relativement proches d'une saison à l'autre, les humidités relatives de l'air sont similaires.

On remarque d'ores et déjà, que les teneurs isotopiques moyennes des précipitations mensuelles évoluent au cours de l'année selon une droite de même pente que la droite d'évaporation.

4) Modèles de fonctionnement du lac.

La corrélation des données géochimiques et hydrologiques, nous permettent de simuler l'évolution des chlorures et de l'oxygène 18 au cours de l'année.

a) Le modèle des chlorures.

Pour établir ce modèle, nous disposons des chroniques journalières de volume du lac, des précipitations, ruissellement, évaporation et déversements éventuels.

A un jour n donné la teneur en chlore peut se calculer comme suit :

$$\text{Teneur en chlore } (n) = \{ (\text{Volume lac}_{n-1} \times \text{teneur}_{n-1}) + (\text{Volume pluie directe} \times \text{teneur pluie})_n + (\text{Volume ruissellement} \times \text{teneur ruissellement})_n + (-\text{Volume déversé} \times \text{teneur déversement})_n + (\text{Volume bilan} \times \text{teneur bilan}) \} / (\text{Volume lac})_n.$$

$$\text{Avec } V \text{ bilan} = V \text{ lac}_n - (V \text{ lac}_{n-1} + V \text{ pluie}_{n-1} + V \text{ ruiss}_{n-1} - V \text{ évap}_{n-1} - V \text{ dév}_{n-1}).$$

Ce terme de bilan correspond à la somme de l'infiltration et des apports souterrains.

Le plus souvent, ce terme de bilan est négatif. Dans ce cas, les pertes par infiltrations sont dominantes sur les apports souterrains. On attribue alors à ce terme la teneur en Cl du lac de la veille. Au cas où le bilan est positif, l'apport souterrain étant dominant, on lui affecte la teneur mesurée dans le talveg en amont du lac.

La teneur de la pluie est considérée comme constante au cours de l'année, elle est de 18mg/l. La concentration en chlore associée au ruissellement reste à être déterminée. Nous savons qu'elle est supérieure à la pluie et inférieure à la teneur du talveg en amont (467mg/l).

Au cours du mois de janvier 1999, le lac déverse plusieurs fois, suite à des pluies importantes. L'eau perdue dans ce cas, est un mélange entre l'eau du lac de la

veille, la pluie et le ruissellement du jour. La teneur en chlore associée à cette perte est donc :

$$\{ (V_{\text{lac}_{n-1}} \times \text{teneur}_{n-1}) + (V_{\text{pluie}} \times \text{teneur pluie})_n + (V_{\text{ruiss}} \times \text{teneur ruiss.})_n \} / \Sigma V.$$

L'évaporation est prise en compte dans l'équation. En effet, la différence de volume entre le dénominateur et le numérateur correspond au volume évaporé.

En simulant ainsi l'évolution du chlore dans le lac, en faisant l'hypothèse d'un écoulement souterrain qui aurait la teneur du talweg, on retrouve bien la valeur mesurée le 19 mars, en partant d'août 98.

Notre chronique allant du mois d'août au mois de mai, nous ne pouvons pas savoir si l'effet de l'évaporation est bien simulé, c'est pourquoi nous avons ajouté à la suite, la chronique des mois de juin à août 1998.

b) Le modèle en $\delta^{18}\text{O}$.

Le principe est globalement le même que pour le chlore. On travaille en rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ plutôt qu'en δ pour n'avoir que des signes positifs. La valeur de référence utilisée est $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ smow : $2,0052 \cdot 10^{-3} \pm 0,45$ (BAERTSHI, 1976).

Le rapport initial (en août 1998) est de $2,007 \cdot 10^{-3}$. Ce rapport est calculé selon la formule suivante : δ (éch./étalon) = $[(R \text{ éch.}/R \text{ étalon}) - 1] \times 10^3$,

$$D'où R \text{ échantillon} = [\delta \text{ (éch./étalon)} \times 10^3 + 1] \times R \text{ étalon.}$$

Le rapport isotopique de l'eau du lac au jour n se calcule de la façon suivante :

$$\begin{aligned} (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ lac})_n = & \{ (\text{Volume lac} \times ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ lac})_{n-1} + (\text{Volume apports} \times ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ apports})_n \\ & + (- \text{Volume déversé} \times ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ déversement})_n - \text{évaporation} + \\ & (\text{Volume bilan} \times ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ bilan}) \} / (\text{Volume lac})_n. \end{aligned}$$

$$\text{Avec évaporation} = (- \text{volume évaporé})_n \times (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ lac})_{n-1} / \alpha_n$$

Les différents termes de la somme algébrique étant l'eau du lac, les apports (pluie et ruissellement), l'évaporation, le déversement et le terme de clôture de bilan correspondant aux apports souterrains et à l'infiltration.

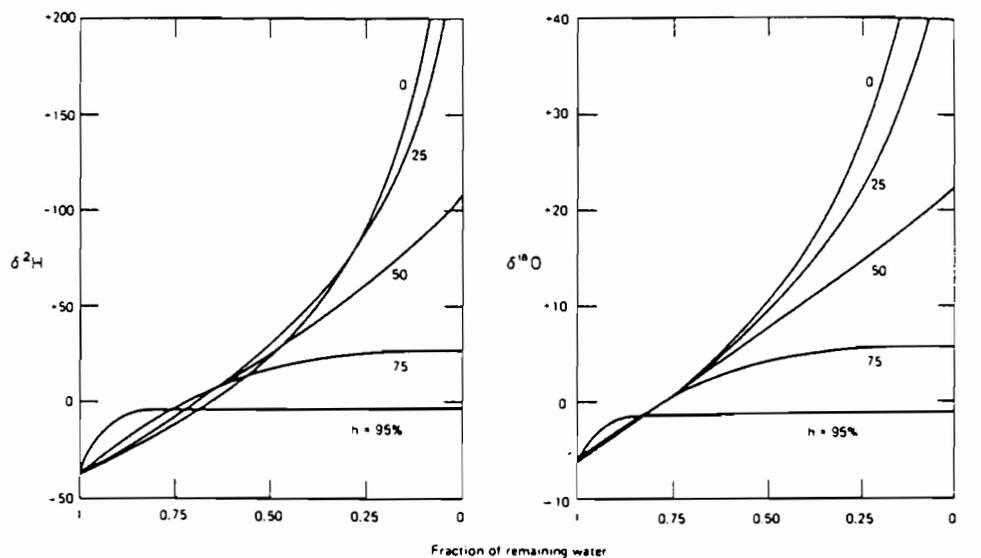
Le rapport isotopique associé à la pluie et au ruissellement est calculé pour chaque mois à partir des $\delta^{18}\text{O}$ vs snow moyens mensuels (données AIEA). Comme pour les chlorures, le rapport associé au déversement est une moyenne pondérée par les volumes des teneurs du lac et des apports du jour.

Quand le terme de ce bilan est essentiellement dominé par les pertes par infiltrations (terme négatif), alors, on lui attribue le rapport isotopique du lac. L'infiltration n'est pas fractionnante. Si le terme est positif, on fait l'hypothèse d'un écoulement retardé d'un mois. On lui attribue la teneur de la pluie du mois précédent.

Le terme le plus complexe à simuler est l'évaporation. En effet, celle-ci est fractionnante. La vapeur qui se forme au-dessus du lac est appauvrie en isotope lourd. Le lac se trouve alors enrichi en oxygène 18. Le fractionnement isotopique lié à l'évaporation va être fonction essentiellement, de la température et de l'humidité relative de l'air.

Ce dernier facteur est négligeable tant que le volume évaporé ne dépasse pas 20% du volume du lac (cf. fig.7), ce qui est le cas ici. De plus, on a vu lors de la construction de la droite d'évaporation, qu'il semble que l'humidité relative de l'air varie peu au cours de l'année sur notre lac. On utilise alors le facteur de fractionnement α entre la phase liquide et la phase vapeur, qui est uniquement thermodépendant.

Figure 7: Composition isotopique d'une eau évaporée en fonction de la fraction d'eau restante pour différentes humidités relatives (FRISTZ and FONTES (1980)).



Le facteur de fractionnement α est calculé selon l'équation suivante :

$$10^3 \ln \alpha(^{18}\text{O}) = 2,644 - 3,206 T^{-1} 10^3 + 1,534 T^2 10^6 \quad (\text{d'après Fristz et Fontes-1980}),$$

où T est la température en Kelvin.

Pour le calcul de α nous disposons de données de températures moyennes mensuelles.

Pour le calcul de α nous disposons de données de températures moyennes mensuelles.

De ce coefficient α , nous déduisons le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de la phase vapeur :

$$R_{\text{vap}} = R_{\text{liq}} / \alpha_{\text{liq/vap}}.$$

Le modèle fonctionne ainsi, mais il pourrait être amélioré :

- en prenant en compte l'humidité,
- en faisant des hypothèses sur les volumes, d'eau infiltrée et d'apport souterrain.

Dans ce chapitre, nous avons donc vu que l'étude des différents termes du bilan hydrique montre un bilan (apports souterrains - pertes), le plus souvent négatif. Ceci

n'exclue pas un apport souterrain. Plusieurs indices suggèrent d'ailleurs que cet apport soit un écoulement retardé de l'ordre d'un mois sur la dernière pluie.

Les résultats des analyses chimiques nous permettent de déterminer un faciès (pour la plupart des eaux du bassin, il est sulfaté, chloruré, sodique et potassique), ainsi que de discuter sur l'origine de la minéralisation.

Les analyses isotopiques nous permettent d'établir une droite d'évaporation qui malheureusement présente la même pente que la droite d'évolution des teneurs isotopiques des moyennes mensuelles des précipitations.

La corrélation des données géochimiques et hydrologiques nous a permis d'établir un modèle de fonctionnement du lac.

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.

Dans cette partie nous aborderons dans un premier temps les résultats des analyses chimiques et isotopiques dans leur globalité; nous en déduirons un fonctionnement possible du bassin versant.

A RESULTATS.

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques sont regroupés selon le mode de prélèvement des eaux : eau de lac, eaux de source, eau de puits et eau du talweg. Cela nous amènera à discuter sur des différences ou ressemblances éventuelles.

1) Teneurs chimiques.

On présentera ici les résultats de nos analyses de façon synthétique. Puis nous verrons les différents processus responsables de la minéralisation.

a) Teneurs observées.

L'eau du lac :

Tableau 6: moyennes des teneurs chimiques des eaux du lac.

<i>Echantillon</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>K</i>	<i>Na</i>	<i>HCO3</i>	<i>F-</i>	<i>Cl</i>	<i>NO3</i>	<i>SO4</i>	<i>SiO2</i>	<i>Cond</i>	<i>pH</i>
	<i>Meq/l</i>	<i>mg/l</i>	<i>µS/cm</i>									
KL7	3,40	2,43	0,16	5,33	5,67	0,03	4,11	0,02	1,56	3,5	980	8,98
KL14	3,21	2,19	0,13	5,19	2,39	0,03	4,11	0,00	3,31	3,3	1001	8,92
Moyenne	3,31	2,31	0,14	5,26	4,03	0,03	4,11	0,01	2,44	3,4	990,5	8,95

Les eaux du lac sont les eaux les moins chargées du bassin. Les ions dominants sont les chlorures et le sodium. Le lac est faiblement chargé en sulfates. Il présente une pression partielle de CO₂ de 10^{-3,9}. L'eau du lac est donc à l'équilibre avec l'atmosphère. Les indices de saturation montrent que les eaux du lac sont saturées vis à vis de l'Aragonite, de la calcite, de la dolomite et de la magnésite. Il est sous-saturé en silice et en gypse.

Les eaux souterraines :

Tableau 7: moyennes des teneurs chimiques des eaux des puits.

	Ca Meq/ l	Mg Meq/l	K Meq/l	Na Meq/l	HCO ₃ Meq/l	F- Meq/l	Cl Meq/l	NO ₃ Meq/l	SO ₄ Meq/l	SiO ₂ (mg/l)	cond (µS/cm)	pH
Moyenne	10,2	5,65	1,24	14,09	5,64	0,03	14,33	1,04	9,45	8,8	2953,	7,50
Minimum	4,6	0,10	0,07	6,33	1,66	0,01	6,76	0,03	0,52	1,0	1343	6,87
Maximum	23,9	13,23	8,89	22,03	8,90	0,06	30,60	8,22	28,65	19,1	5910	8,33

On distinguera les eaux de puits et les eaux de sources.

Les eaux de puits sont les eaux les plus chargées. La teneur en SiO₂ est significativement supérieure aux autres eaux. Le faciès est chloruré, sodique et sulfaté, calcique. C'est parmi ces eaux que se trouve le maximum de teneurs en ions nitrates. Les puits présentent une pression partielle de CO₂ de 10^{-2,1} atm en moyenne. Cette PCO₂ élevée correspond à un équilibre avec le CO₂ gaz du sol (cf.p.96) on considère alors que l'on est en système ouvert sur le CO₂ gaz du sol.

Les eaux souterraines sont saturées vis-à-vis de la calcite, elles sont sous-saturées en gypse et en silice.

Tableau 8: moyennes des teneurs chimiques des eaux de source.

	<i>Ca</i> <i>Meq/l</i>	<i>Mg</i> <i>Meq/l</i>	<i>K</i> <i>Meq/l</i>	<i>Na</i> <i>Meq/l</i>	<i>HCO3</i> <i>Meq/l</i>	<i>F-</i> <i>Meq/l</i>	<i>Cl</i> <i>Meq/l</i>	<i>NO3</i> <i>Meq/l</i>	<i>SO4</i> <i>Meq/l</i>	<i>SiO2</i> <i>(mg/l)</i>	<i>cond</i> <i>(μS/cm)</i>	<i>pH</i>
Moyenne	8,15	6,20	0,19	14,23	5,36	0,04	13,03	0,23	8,29	9,05	2359	8,14
Minimum	5,25	2,25	0,09	7,95	4,23	0,03	7,81	0,00	2,33	6,4	1482	7,4
Maximum	12,31	10,88	0,30	23,67	6,69	0,05	22,37	0,72	18,75	11,0	2980	8,69

Les eaux de source présentent une conductivité moyenne plus faible que les puits. La pression partielle de CO₂ de 10^(-3,05) atm est intermédiaire entre la PCO₂ du sol et celle de l'atmosphère. On notera que les minimums de conductivités des deux groupes sont du même ordre de grandeur alors que les maxima sont disparates. Cette différence de minéralisation s'explique essentiellement par des maxima de teneurs plus importants en Calcium, Sulfates dans les puits, alors que les maxima des teneurs en Sodium sont homogènes.

Les eaux de Talweg :

Tableau 9: Moyennes des teneurs chimiques des eaux du Talweg.

	<i>Ca</i> <i>Meq/l</i>	<i>Mg</i> <i>Meq/l</i>	<i>K</i> <i>Meq/l</i>	<i>Na</i> <i>Meq/l</i>	<i>HCO3</i> <i>Meq/l</i>	<i>F-</i> <i>Meq/l</i>	<i>Cl</i> <i>Meq/l</i>	<i>NO3</i> <i>Meq/l</i>	<i>SO4</i> <i>Meq/l</i>	<i>SiO2</i> <i>mg/l</i>	<i>Cond</i> <i>μS/cm</i>	<i>pH</i>
Moyenne	9,73	7,72	0,22	13,43	5,63	0,04	12,54	0,10	12,61	6,06	2666	8,17
Minimum	3,60	3,44	0,12	6,00	3,17	0,03	4,51	0,00	4,17	3,4	1184	7,30
Maximum	12,81	10,82	0,30	18,54	8,50	0,05	25,41	0,42	22,92	19,1	3490	8,36

Les eaux des talwegs, comme les eaux de source, ont des PCO₂ intermédiaires entre le PCO₂ du sol et la PCO₂ atmosphérique de l'ordre de 10^{-2,9}atm.

Ces eaux sont à saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite, et de la magnésite. Elles sont sous-saturées en gypse et silice. Leur minéralisation peut être plus faible que le minima des sources et des puits, mais plus fortes que le maxima des sources. Elles peuvent donc être considérées comme un groupe mixte comportant un mélange d'eau superficielles de type lac , eau de source et eau de

puits. Même les eaux les plus déminéralisées n'atteignent jamais les faibles concentrations du lac.

Conclusions préliminaires :

L'étude des teneurs chimiques des eaux du bassin, selon le critère de répartition choisi (à savoir les eaux souterraines, les eaux de Talweg et les eaux du lac), montre que mis à part le lac, les eaux ne présentent pas de grandes différences de faciès. Cependant, malgré les fortes variations de teneurs à l'intérieur des groupes, les teneurs les plus fortes sont l'apanage des puits où le temps de contact plus long avec l'encaissant se traduit par une minéralisation liée au gypse plus marquée et des maxima de teneurs en silice.

b) Processus en cause.

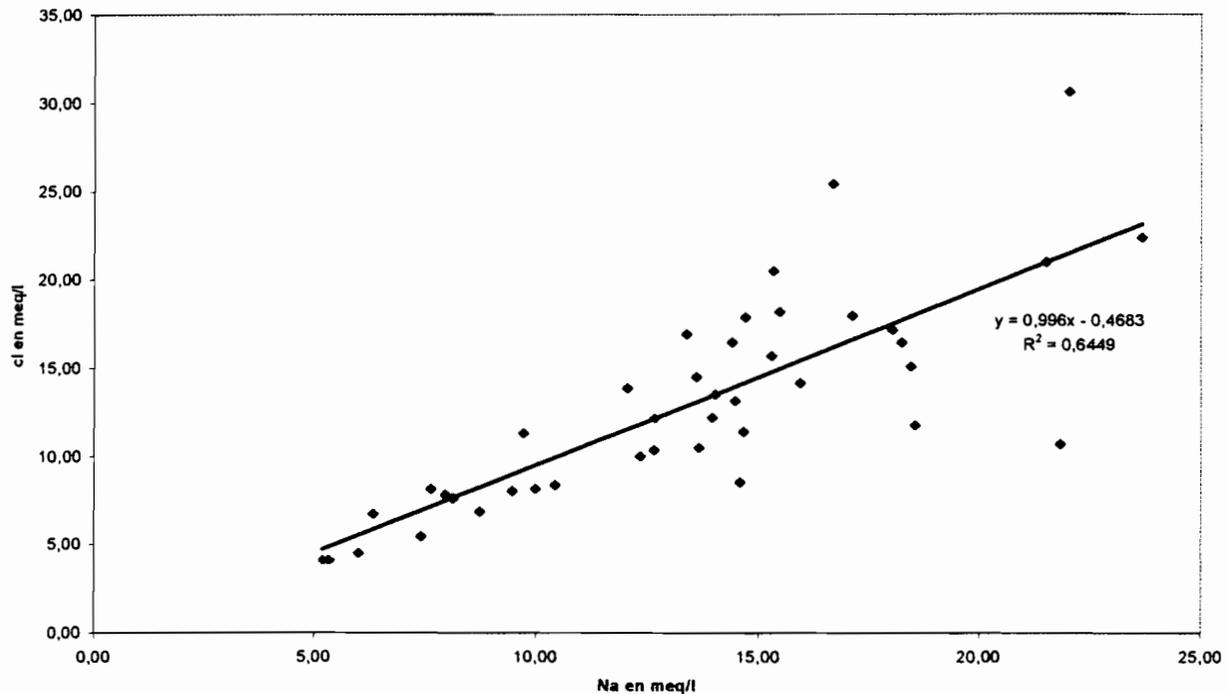
Dans cette partie, nous chercherons à déterminer l'origine de la minéralisation.

Apports météoriques.

Tableau 10: teneurs chimiques des eaux de pluie (meq/l).

<i>C (μS)</i>	<i>pH</i>	<i>HCO₃</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg²⁺</i>	<i>Cl</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>SO₄</i>
348	7,8	3	6,4	0,6	0,51	0,67	0,31	0

Figure 8 : diagramme Na⁺/Cl⁻ (meq/l).



La corrélation observée entre les teneurs en Na⁺ et Cl⁻ (dans les eaux du bassin) suggère que les deux ions ont la même origine. Ceci peut s'expliquer par un apport de NaCl soit par les aérosols d'origine marine soit par la présence de NaCl en petite quantité dans la roche.

Dissolution des sulfates.

Figure 9: diagramme des ions SO₄²⁻ vs Ca²⁺ (meq/l).

Le diagramme mettant en relation les teneurs en ions calcium et sulfate montre d'abord une corrélation entre les 2 ions autour d'une droite de pente 1 en meq/l. Il y aurait donc dissolution de gypse. Les ions Ca²⁺, ainsi libérés, vont permettre la précipitation de calcite, leur teneur va augmenter jusqu'à arriver à saturation vis-à-vis de la calcite. C'est pourquoi, à partir d'une certaine teneur en Ca, on observe un excès d'ions SO₄²⁻ en solution.

Equilibre des carbonates.

Dans un environnement calcaire, plus de 80 % des éléments dissous d'un lac sont déterminés par les équilibres des carbonates et la dissolution du calcaire (SIGG-STUMM-DEHRA-1994).

Toutes les eaux du bassin sont à saturation vis-à-vis de la calcite. De plus, pour toutes les eaux, on est en système ouvert sur le CO₂ de l'atmosphère et du sol pour les eaux, respectivement, de surfaces ou souterraines.

La solubilité de la calcite en système ouvert peut être expliquée en superposant les équilibres CO₂ (gaz) - eau et l'équilibre de solubilité de la calcite.

La solubilité du CaCO₃ (solide) est représentée par la réaction suivante :



La solubilité de la calcite dépend donc du pH et de la PCO₂.

Dans les sols, la PCO₂ est plus élevée que celle du CO₂ atmosphérique, de sorte qu'il en résulte également une augmentation de la solubilité de CaCO₃ (SIGG, STUMM et BEHRA, 1992).

Dissolution de la silice.

Les valeurs moyennes des eaux souterraines, eaux de surfaces ainsi que du lac sont reportées dans un diagramme mettant en relation la solubilité de la silice et le pH. Sur ce graphique, sont présentes les courbes d'équilibres de la silice amorphe, de la calcite et de l'alumine. (BLATT 1980) (cf. annexe).

Les eaux de notre bassin étant saturées en calcite, les points se trouvent sur la courbe d'équilibre du CaCO₃. Ceci nous permet d'en déduire la solubilité de la silice dans chacune de ces eaux.

Dans le lac, la solubilité de la silice est nulle ; elle est de 80ppm dans les eaux souterraines et de 30ppm dans les eaux de Talweg.

La teneur en silice des eaux n'est pas uniquement liée au pH, d'autres facteurs rentrent en compte tels que la température qui augmente la solubilité, ou encore la présence de carbonate et d'argile qui favorise la dissolution. Etant donné que la température varie peu d'une eau à l'autre, ce facteur est négligeable.

La silice en solution peut donc être un bon traceur d'origine, sachant que certaines variations pourront être expliquées par des teneurs en carbonate et argiles différents. De plus, les eaux de puits où le temps de contact avec l'encaissant est le plus long, sont les eaux qui présentent de fortes teneurs en silice. Il y a donc une corrélation entre la teneur en silice et le temps de résidence.

La minéralisation est donc acquise essentiellement par dissolution des minéraux contenus dans le sol comme la calcite, les sulfates, la silice et les minéraux silicatés. Une petite part de la minéralisation pourrait être dû à des apports météoriques.

2) Les teneurs isotopiques.

a) Teneurs observées.

Les eaux du lac.

Tableau 11 : teneurs isotopiques des eaux du lac.

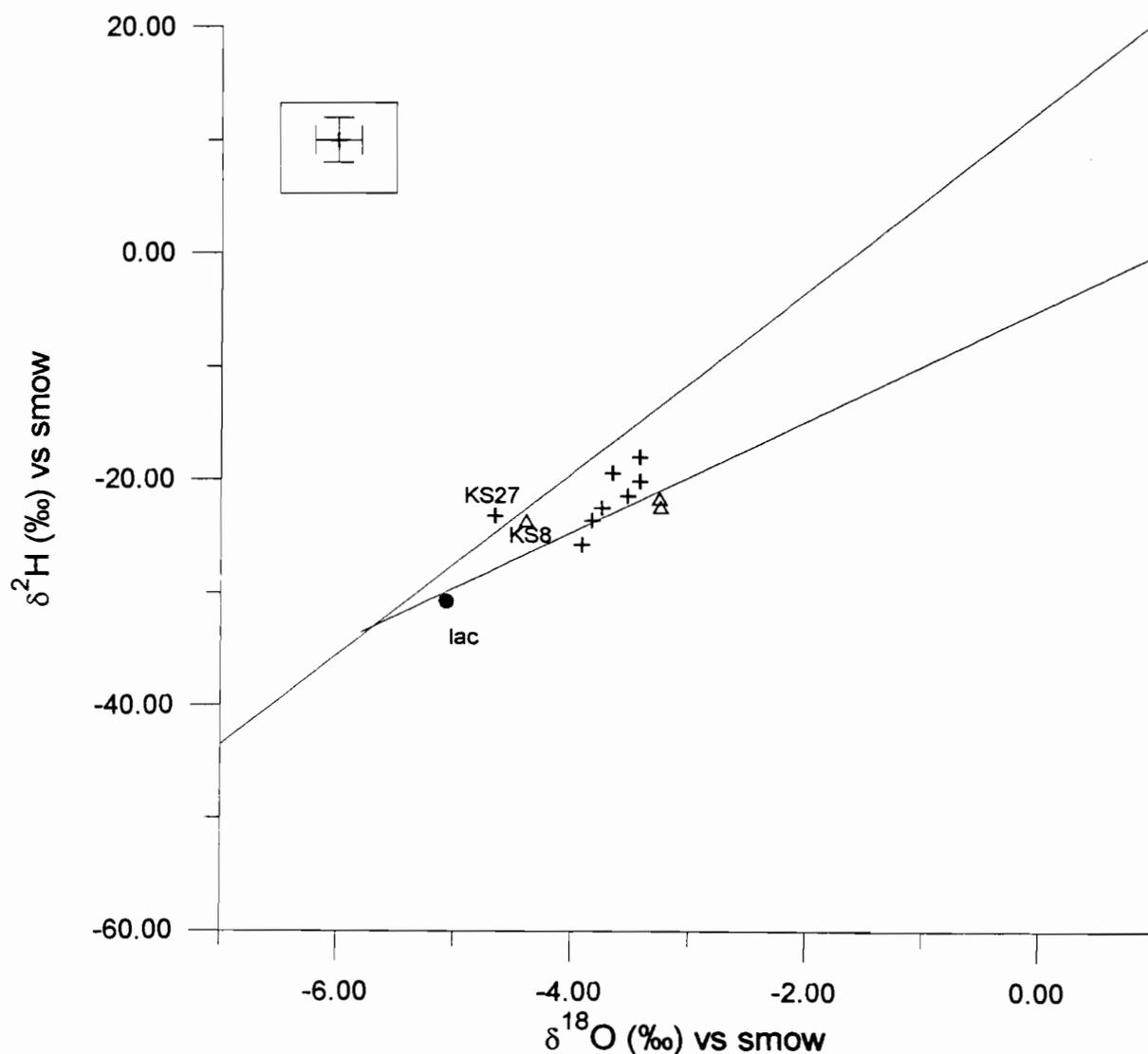
	$\delta^2\text{H}/\text{vs smow}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{vs smow}$
KL7	-30,78	-5,06
KL14-2	-31,76	-5,20
Moyenne	-31,27	-5,13

Dans le diagramme Oxygène 18-Deutérium (figure 10), les deux points représentatifs du lac se situent très bas sur la droite d'évaporation. L'eau du lac semble être la moins évaporée de toutes les eaux. En fait, elle est très proche des teneurs isotopiques de la pluie des mois d'hiver (décembre-janvier) ; mois pendant lesquels le lac s'est rempli.

Le $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates dissous dans le lac est de $-7,95\text{‰}$ vs PDB, ce qui fait un δCO_2 équilibrant de $-17,2\text{‰}$. On est loin du $\delta^{13}\text{C}$ atmosphérique (-8‰ vs PDB).

Figure 10 : diagramme ^2H vs ^{18}O pour les eaux de surface.

Eaux de surfaces



Les eaux de talweg.

Tableau 12: teneurs isotopiques des eaux de talweg.

	$\delta^2\text{H}/\text{vs smow}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{vs smow}$
Moyenne	-21,89	-3,64
Minimum	-25,78	-4,39
Maximum	-21,47	-3,53

Dans le diagramme Oxygène 18-Deutérium (figure 10), la plupart des eaux d'écoulement sont regroupées autour de la droite d'évaporation vers des teneurs plus élevées que les eaux souterraines (entre -4 et $-3^\circ/\infty$ vs smow en ^{18}O et entre $-21,5$ et $-25,8^\circ/\infty$ vs smow en deutérium). Elles sont proches des teneurs moyennes des précipitations du mois de mars. Elles sont justes un peu plus évaporées ou d'un mois différent.

Les analyses en $\delta^{13}\text{C}$ ont été réalisées sur les eaux du talweg principal, en amont et en aval du lac. En amont, le $\delta^{13}\text{C}$ est de $-10,4^\circ/\infty$ vs PDB, soit un δCO_2 équilibrant de $-19,7^\circ/\infty$ vs PDB. En aval, la teneur en ^{13}C diminue pour atteindre la valeur de $-13,5^\circ/\infty$ vs PDB ($\delta\text{CO}_2 \text{ eq} = -23,02^\circ/\infty$).

Les eaux souterraines.

Du point de vue isotopique, les eaux de puits et les eaux de sources, ne sont pas différentes.

Tableau 13: teneurs isotopiques moyenne des eaux de puits.

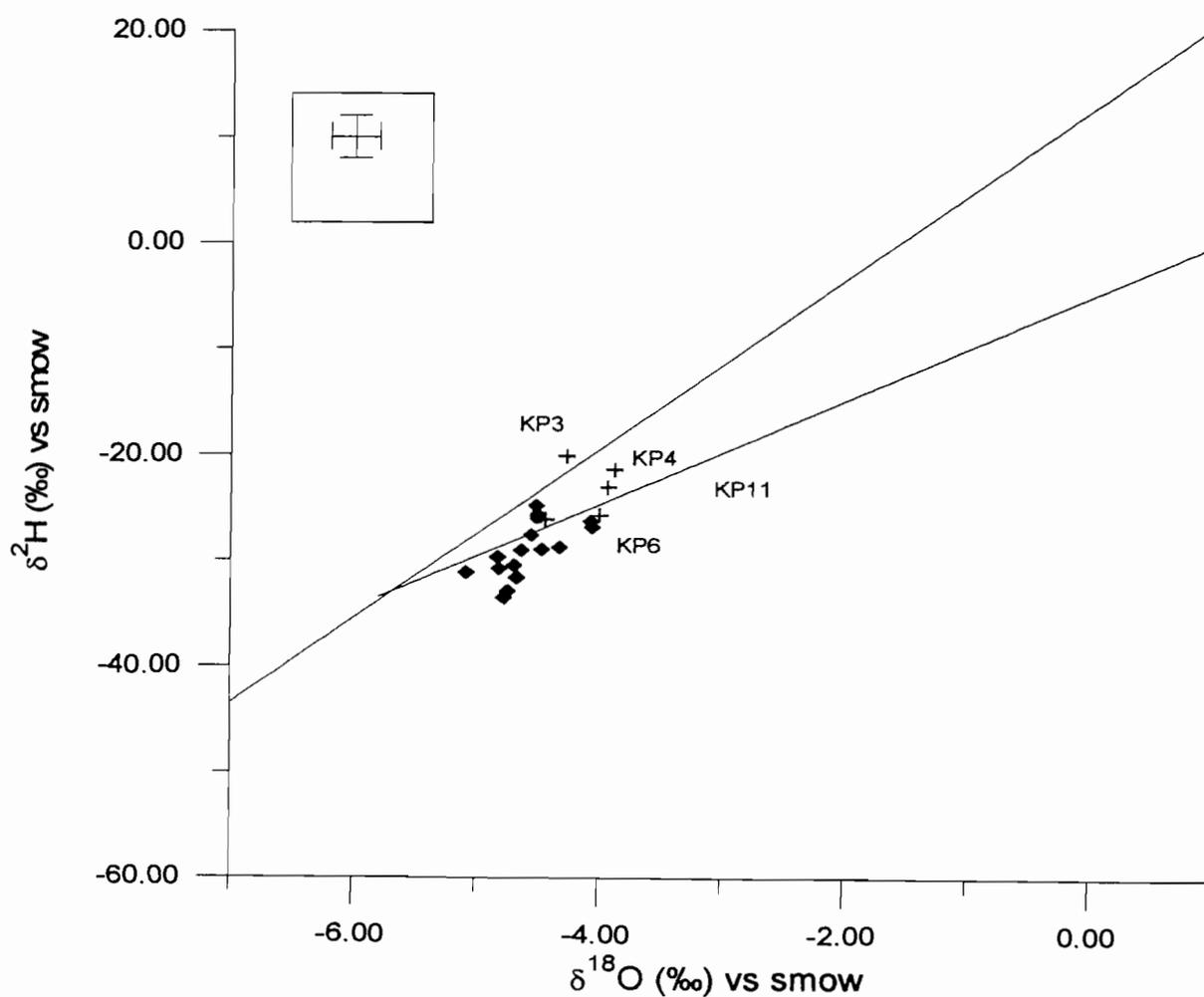
	$\delta^2\text{H}/\text{vs smow}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{vs smow}$
Moyenne	-27,39	-4,40
Minimum	-32,89	-5,08
Maximum	-20,10	-4,27

Tableau 14: teneurs isotopiques moyenne des eaux de sources.

	$\delta^2\text{H}/\text{vs}$ smow	$\delta^{18}\text{O}/\text{vs}$ smow
Moyenne	-25,75	-4,42
Minimum	-29,65	-4,83
Maximum	-19,16	-3,69

Figure 11 : diagramme ^2H vs ^{18}O des eaux souterraines.

Eaux souterraines



Dans le diagramme Oxygène 18-Deutérium, Les points représentatifs, des eaux souterraines, se situent autour de la droite d'évaporation. Ils sont assez bien regroupés, entre -4 et -5‰ vs snow en ^{18}O et autour de -30‰ vs snow en deutérium. Si nous prenons en compte la marge d'erreur sur les mesures, nous pouvons considérer que les teneurs isotopiques des eaux souterraines sont comparables aux teneurs moyennes annuelles des précipitations.

Certains puits situés en aval du lac, font figure d'exception, les points KP3, KP4, KP11, présentent des teneurs isotopiques supérieures aux autres puits et sources.

Les teneurs maximales en ^2H et ^{18}O présentées dans le tableau des eaux de sources, correspondent au point KS32. Cette source située dans la barre de grès, a des teneurs isotopiques plus proches des eaux du talweg que des eaux souterraines.

b) Processus en cause.

Effet de l'évaporation et de variations saisonnières.

Les teneurs en ^{18}O et ^2H observées dans les eaux du bassin sont dues à plusieurs phénomènes :

- d'une part, l'effet de l'évaporation qui se traduit par un enrichissement en isotope lourd, selon une pente de 5 dans le diagramme Oxygène 18-Deutérium (cf. figure 6).

- d'autre part, certaines eaux sont liées aux teneurs isotopiques de la pluie. Les teneurs en ^{18}O et ^2H dans les précipitations moyennes mensuelles, varient au cours de l'année en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative (cf. figure 5). La droite traduisant la variation saisonnière des teneurs isotopiques de la pluie, dans le diagramme Oxygène 18-Deutérium présente également une pente de 5.

Ceci pose un problème car il devient alors impossible de distinguer une eau de pluie d'hiver qui se serait évaporée, d'une eau de pluie de printemps non

évaporée. Le seul point pour lequel on a une certitude est le lac. Il présente en effet les teneurs isotopiques les plus faibles. Il ne peut donc pas être évaporé, ses teneurs sont celles des précipitations des mois de décembre-janvier. L'effet de l'évaporation serait donc peu visible sur le lac entre les mois de janvier et mars. Pour les autres points situés plus haut sur la droite d'évaporation, il reste une ambiguïté.

L'origine des teneurs en ^{13}C .

La retenue est en équilibre avec la PCO_2 atmosphérique, pourtant le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 équilibrant est éloignée du $\delta^{13}\text{C}$ atmosphérique. Les $\delta^{13}\text{C}$ des carbonates dissous ne sont pas uniquement contrôlés par le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique. D'autres facteurs rentrent en ligne de compte, comme la dissolution de la calcite et la présence de micro-organismes alguaire qui apporteraient une petite part de $\delta^{13}\text{C}$ biogénique.

Le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 gaz du sol, dépend du type de couvert végétal. En effet, la photosynthèse est fractionnante, et le fractionnement est différent selon le type de photosynthèse.

La photosynthèse en C_3 est la plus courante en milieu tempéré, elle engendre un $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 gaz du sol à $-25^\circ/\text{‰}$ vs PDB. La photosynthèse en C_4 caractéristique de certaines graminées d'origine tropicales donne un $\delta^{13}\text{C}$ dans le sol à $-12^\circ/\text{‰}$. Un troisième type de photosynthèse mixte ($\text{C}_3 + \text{C}_4$) donne un $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 gaz du sol à $-17^\circ/\text{‰}$; ceci est caractéristique des plantes grasses adaptées aux régions sèches.

Si on considère une photosynthèse en C_3 , le $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 équilibrant des eaux souterraines et des eaux de talwegs, n'est pas très éloigné du $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 gaz du sol ($-25^\circ/\text{‰}$). Il semble que le $\delta^{13}\text{C}$ du CITD soit essentiellement contrôlé par le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 gaz du sol. Dans les eaux souterraines et les eaux de talweg, la teneur en ^{13}C est essentiellement contrôlée par le $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 gaz du sol.

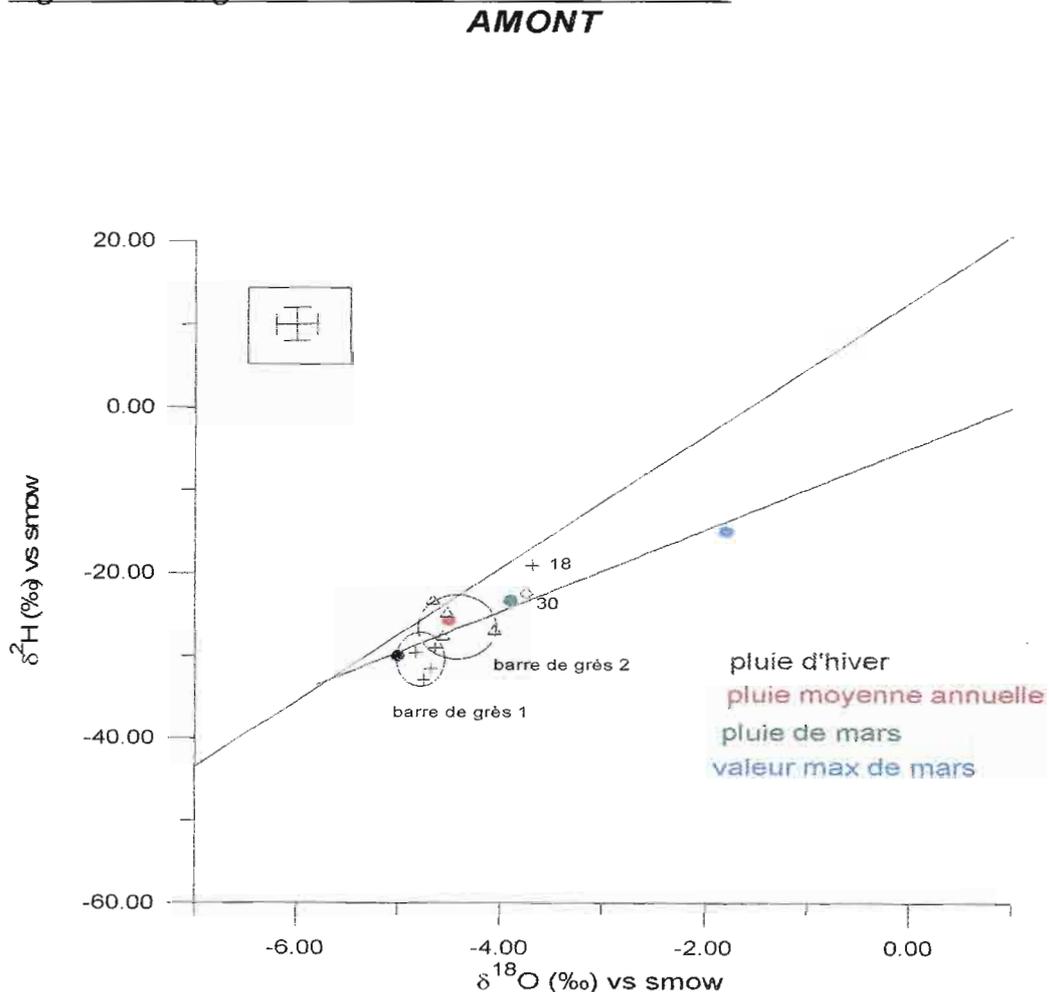
B ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU BASSIN VERSANT.

Pour l'analyse du fonctionnement du bassin versant, on découpera celui-ci en trois parties (amont, lac, aval). En effet, nous ne disposons pas du même type de données dans chacune des trois zones. Pour l'amont et l'aval l'analyse est uniquement spatiale alors que l'existence de chroniques hydrologiques a permis une étude temporelle de l'évolution des eaux du lac.

1) Partie amont.

L'échantillonnage a été réalisé dans le but d'avoir des informations sur l'aquifère sous-jacent. On a donc effectué des prélèvements dans les sources, les puits et les talwegs.

Figure 12 : diagramme ^2H vs ^{18}O des eaux amonts.



En amont du lac, nous distinguons plusieurs groupes d'eau : les puits amont KP42 et KP43 ainsi que les sources (KS24, KS26 et KS32) situées dans la barre de grès la plus haute, marquant la limite du bassin, présentent des teneurs fortes en silice (11mg/l de SiO₂). Cela suggère un temps de contact long. Du point de vue isotopique, ces eaux sont proches de la teneur des précipitations des mois d'hiver. Seul le point KS32 présente des teneurs isotopiques étonnement élevées pour une eau de source. Mis à part ce dernier point, ces eaux semblent dater de quelques mois.

Les sources de la deuxième barre de grès, en aval de la première (KS30-KS28-KS27-KS25-KS20) présentent des teneurs isotopiques légèrement plus élevées que les eaux précédentes. On peut alors faire deux hypothèses :

- Ces eaux peuvent être un mélange avec une eau de pluie du mois de mars, infiltrée latéralement et qui ressortirait au niveau de la barre de grès.
- Ces teneurs isotopiques résultent d'une évaporation.

Mais ce groupe d'eau présente également des teneurs en silice plus faible (7-8 mg/l), ce qui nous permet de conclure à un mélange. En effet, dans le cas d'une évaporation, la teneur en silice n'aurait pas diminué.

L'eau du talweg en amont du lac (KS18-KS13) peut-être interprétée, d'un point de vue chimique, comme un mélange entre trois pôles : une eau souterraine de type puits ($C=3000 \mu S/cm$, $SiO_2=9 \text{ mg/l}$), une eau de type source déjà un peu diluée et une eau de ruissellement récent, lié à la pluie du mois de mars.

D'un point de vue isotopique, on ne retrouve pas ces trois pôles de mélange si on attribue au ruissellement la teneur moyenne du mois de mars (cf. fig.12). Mais si on considère la valeur maximum des teneurs isotopiques des pluies du mois de mars, alors on peut faire l'hypothèse d'un mélange de nos trois pôles. Ceci sous-entend que cette année, les teneurs isotopiques des pluies au mois de mars sont plutôt supérieur à la moyenne.

Donc dans cette partie amont, on voit, par rapport aux problèmes posés au départ, qu'il existe un apport souterrain au niveau du talweg. De plus, les teneurs fortes en silice des eaux de sources au niveau des barres de grès permettent de supposer des temps de résidence plus long dans ces barres. On peut alors supposer

un écoulement nord-est / sud-ouest dans ces barres ; on aurait alors un bassin hydrogéologique supérieur au bassin versant hydrologique.

2) Le lac.

Les données hydrologiques nous permettent de dire que l'eau du lac, au mois de mars, résulte d'un mélange entre, les eaux de pluie des mois de décembre-janvier, les eaux évaporées de la saison sèche, les eaux de ruissellement liées aux dernières pluies du mois, les eaux d'un éventuel apport souterrain, ainsi que les eaux du talweg amont.

L'étude des teneurs en O18 et deutérium des eaux de surface et souterraines, nous permet de voir que la pluie de la dernière saison pluvieuse est le facteur qui prédomine dans ce mélange. En effet, c'est de ce pôle que les eaux du lac sont les plus proches. Ceci s'explique par le fait qu'aux mois de janvier et février, le lac subit une série de débordements liés à des pluies importantes qui engendre des crues. On peut alors considérer qu'à ce moment, l'eau du lac est entièrement renouvelée ; le pôle correspondant aux eaux évaporées de la saison sèche devient alors négligeable. Quant au volume d'eau du talweg amont, arrivant à la retenue, il est minime par rapport au volume de celle-ci. Le lac est donc essentiellement rempli par des eaux de ruissellement et des précipitations directes, l'eau n'a pas été en contact longtemps avec l'encaissement ; c'est pourquoi les teneurs en silice sont faibles. La chimie du lac montre clairement une dilution par l'eau de pluie.

Les hypothèses de mélanges concernant l'origine des eaux du lac, nous ont conduit à tenter d'établir un modèle de fonctionnement du lac. Ce dernier est basé sur le bilan hydrique du système lac, dont les différents termes ont été décrits dans la deuxième partie.

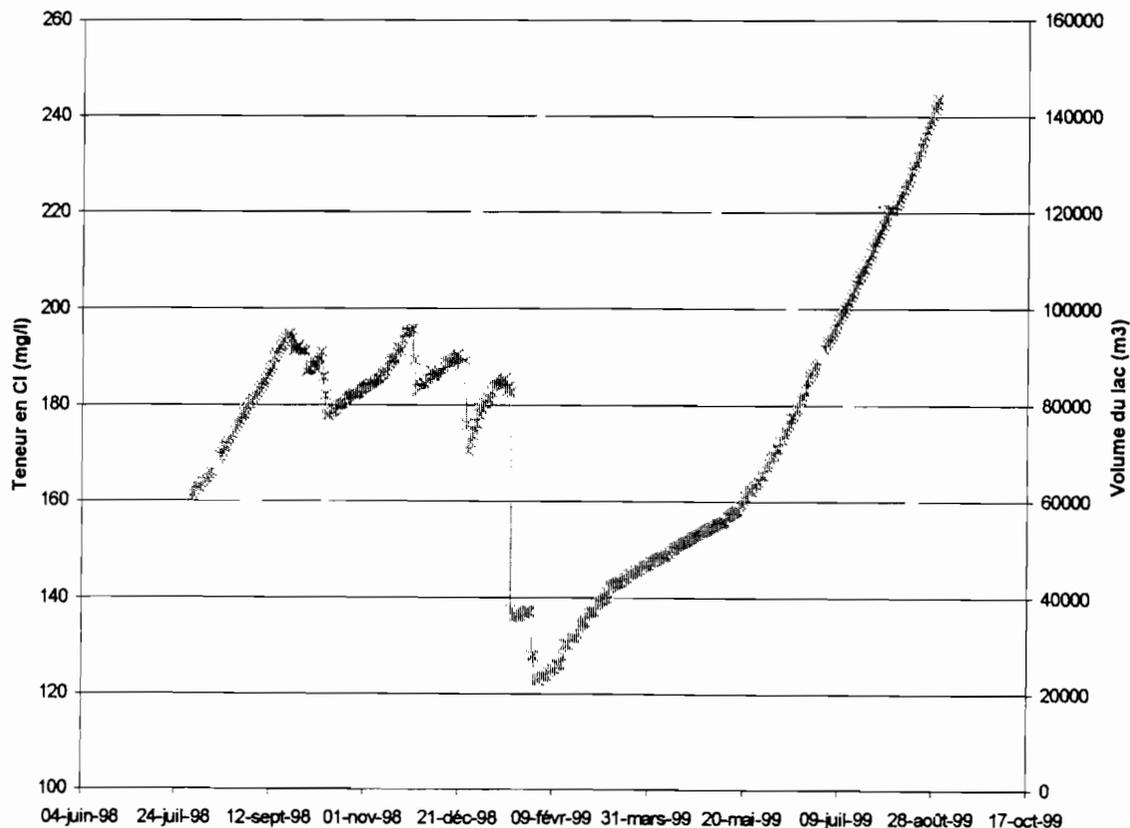
Un bilan hydrique se réfère nécessairement à un domaine délimité, un système hydrologique particulier et une durée précise. Dans le cas présent, nous sommes confrontés à un système hydrologique ouvert comportant des entrées et des sorties.

Les apports sont les précipitations directes, le ruissellement et les apports souterrains. Les pertes se traduisent par l'évaporation sur la surface du lac et l'infiltration ; le bilan de ces apports et pertes correspond à la variation de volume du lac. Nous travaillons au pas de temps journalier sur une chronique allant du 21 août 1998 au 19 mai 1999.

Nous établissons, à partir de ce bilan hydrologique, deux simulations ; l'une concernant les teneurs en Cl, l'autre les $\delta^{18}\text{O}$ vs smow. Le principe est d'attribuer une teneur de départ à l'eau du lac (pour cela, nous disposons d'un échantillon prélevé le 21 août 1998). A partir de ce volume, ayant une certaine teneur, on simule l'évolution de la teneur en Cl et ^{18}O du lac, en attribuant à chacune des entrées et sorties des teneurs associées (cf. chapitre II 4) modèle).

Modèle du Cl :

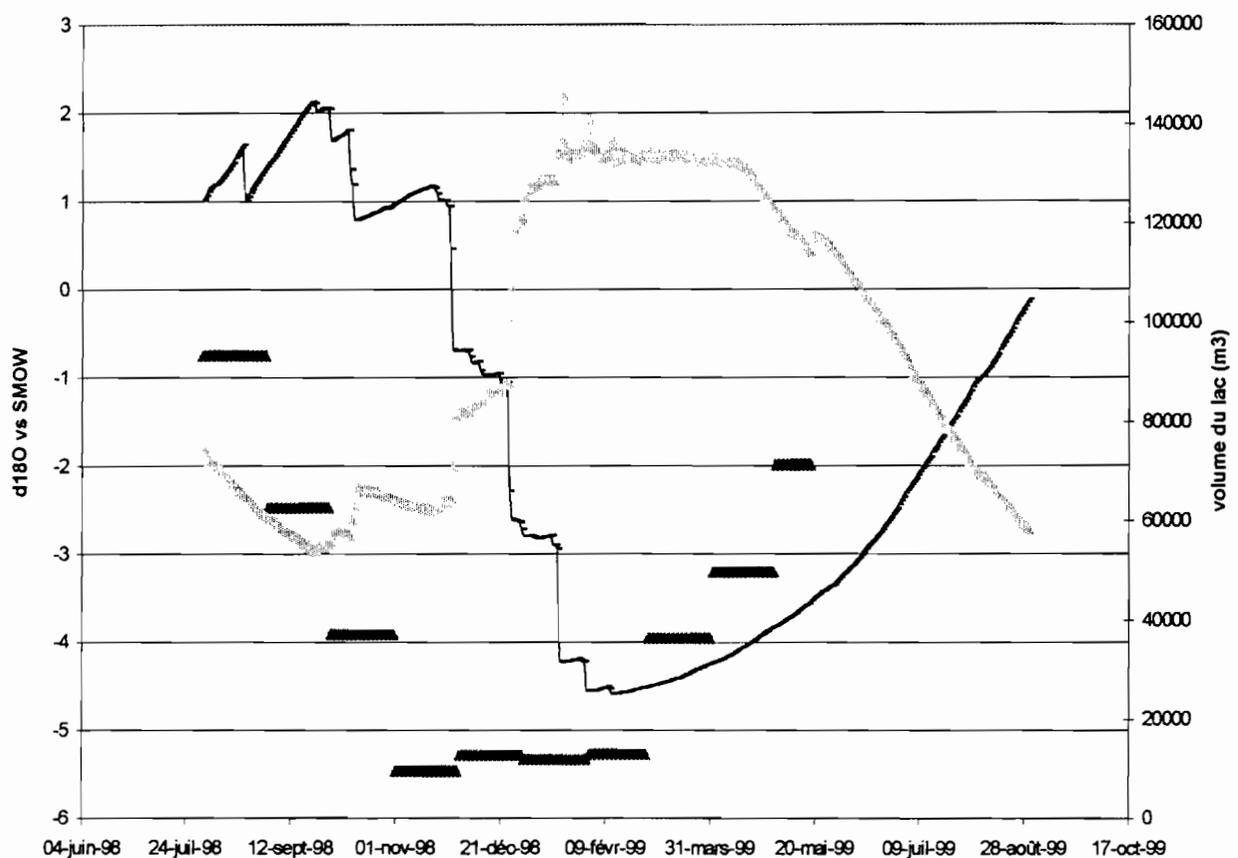
Figure 13 : modélisation du Cl.



En simulant l'évolution de la teneur en chlore au cours du temps selon le modèle décrit au chapitre II, à partir de la teneur du 21 août 98 (160mg/l), et en faisant l'hypothèse d'un écoulement souterrain ayant la teneur du talweg, on retrouve bien la valeur mesurée le 19 mars 99 (145mg/l). Donc, le phénomène de dilution par l'eau de pluie est bien simulé. Par contre, si on suppose nos teneurs de mars et août comme reproductibles, l'évaporation est moins bien simulée puisqu'on se retrouve au mois d'août suivant à une teneur en Cl de 245 mg/l.

Simulation des teneurs en oxygène 18 :

Figure 14 : modélisation de la teneur en ^{18}O .



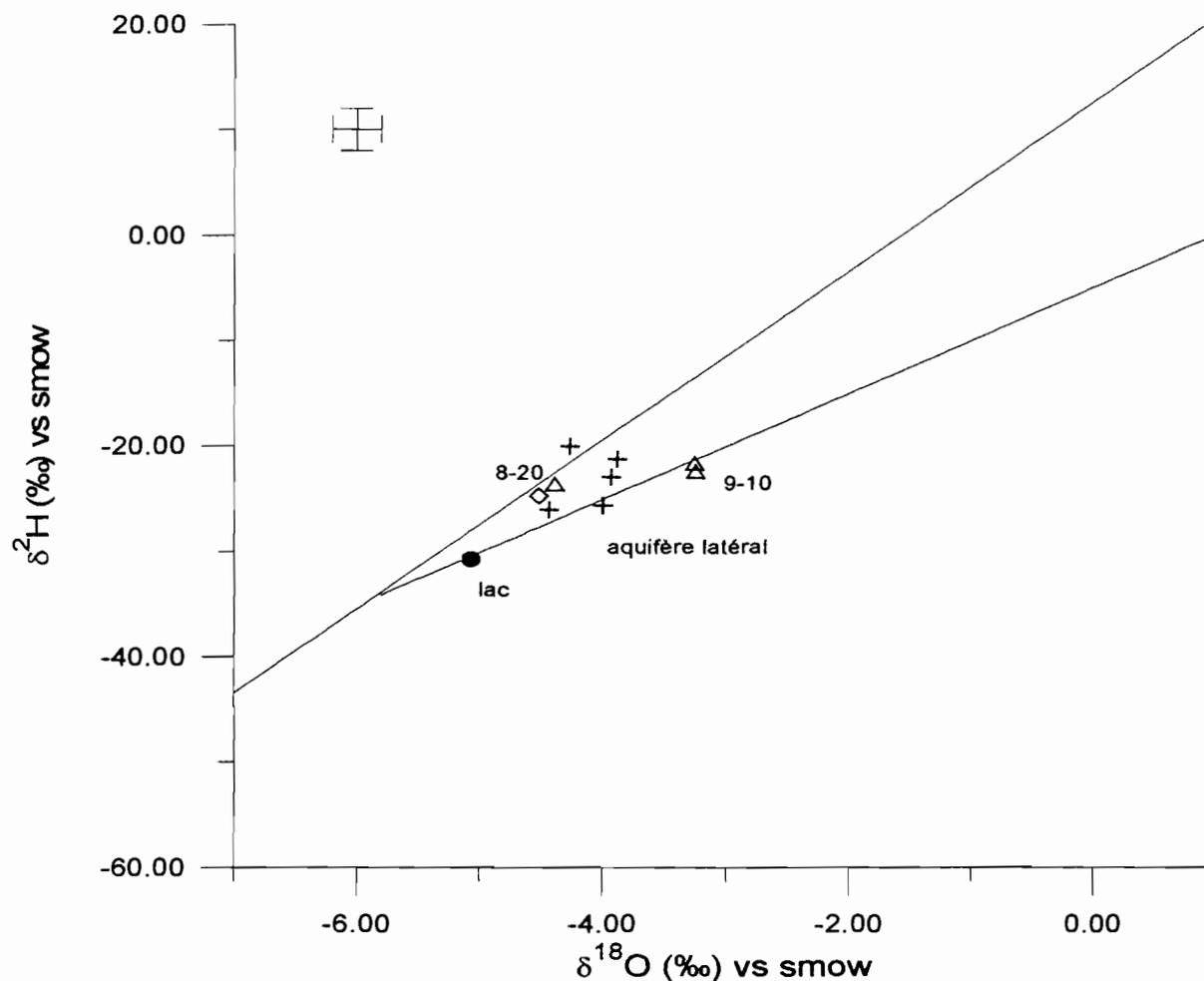
Sur le graphique sont reportées les teneurs en ^{18}O du lac et de la pluie (points non reliés), ainsi que le volume du lac. En partant d'une teneur de $0,98\text{‰}$ dans la retenue en août 1998, on arrive à une teneur de $-4,3\text{‰}$ vs smow en mars 1999, en

faisant l'hypothèse que l'écoulement souterrain (terme de bilan positif) est un écoulement retardé d'un mois (cf. chap. II). Ceci est légèrement plus élevé que la valeur mesurée ($\delta^{18}\text{O} = -5,05\text{‰}$ vs smow). Les chutes importantes des teneurs en ^{18}O dans le lac correspondent à des crues dans la retenue. Comme pour le chlore, la dilution est mieux simulée que l'évaporation. Quand il y a déversement durant les mois d'hiver, l'eau du lac est alors essentiellement de l'eau de pluie, cette dernière impose sa signature isotopique. Les modèles en chlore et ^{18}O confirment donc l'hypothèse selon la quelle les eaux du lac sont renouvelées à chaque saison pluvieuse.

Pour conclure sur le fonctionnement du lac, on a vu que au moment de l'échantillonnage, le facteur dominant est la pluie de décembre-janvier. Cependant l'étude des simulations en Cl et ^{18}O , nous permettent de voir que l'hypothèse d'un écoulement souterrain provenant du talweg fonctionne. De plus cet apport souterrain serait un écoulement retardé directement lié à la pluie du mois précédent, il n'est donc pas permanent. On peut alors considérer que la retenue n'est pas maintenue par un aquifère régionale.

3) L'aval.

Figure 15 : diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ en aval.



On a cherché à connaître l'influence du lac sur la partie aval.

Dans les eaux qui s'écoulent en aval du lac, les teneurs isotopiques remontent rapidement (on passe de $\delta^{18}\text{O} = -4,3\text{‰}$ vs snow juste sous le barrage, dans l'écoulement suintant de la digue).

On aurait plutôt attendu des eaux comparables à celles du lac. Il semblerait que l'eau de la fuite du lac se mélange avec une autre eau. D'après les teneurs en ^{18}O et Deutérium, on aurait pu imaginer un mélange avec une eau de ruissellement, mais les teneurs en ^{13}C excluent cette hypothèse car les eaux avales présentent les $\delta^{13}\text{C}$ les plus faibles. Ils ne sont pas intermédiaires entre les eaux du lac et une eau de type ruissellement comme dans le talweg amont. En fait, le pôle de mélange semble être

une eau souterraine, il pourrait s'agir d'un aquifère latéral (mis en évidence par la lignée de puits KP3, KP4, KP5, KP6 et KP11). Les teneurs en silice de ces puits sont de l'ordre de 9,5mg/l. Les teneurs des eaux du talweg aval ($\text{SiO}_2=6\text{mg/l}$) sont bien intermédiaires entre l'eau du lac et l'eau de cet aquifère latéral.

Donc la fuite observée en aval du lac semble être superficielle, elle n'alimente pas un aquifère en aval. Au contraire, un aquifère latéral alimenterait en partie cet écoulement de surface.

Figure 16 : profil en long isotopique.

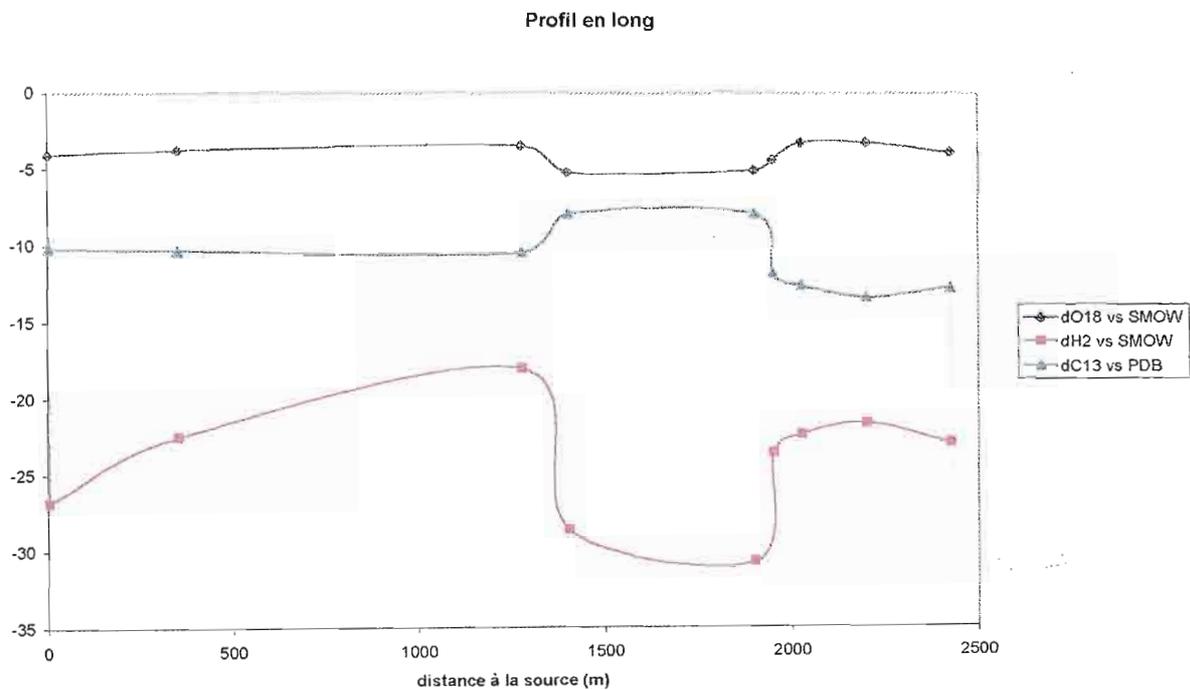
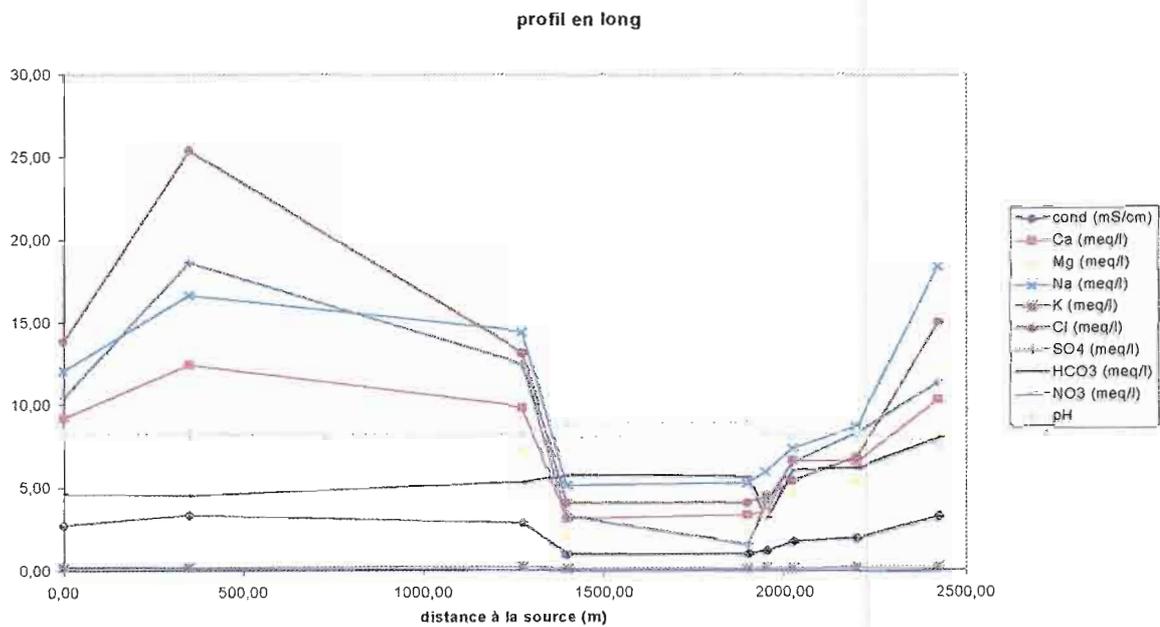


Figure 17 : profil en long chimique.



La corrélation des différentes informations chimiques et isotopiques nous a permis d'essayer de comprendre le fonctionnement du bassin de Kamech, où la composition des eaux résulte de mélanges plus ou moins complexes entre les différents types d'apports. Les profils en long chimiques et isotopiques nous permettent de résumer les observations faites : Dans le talweg amont, un apport souterrain maintient des teneurs chimiques assez élevées malgré l'apport du ruissellement (qui explique la légère augmentation en ^{18}O et ^2H). Dans le lac, on observe l'effet de la dilution par l'eau de pluie des mois d'hiver. En aval, on voit l'effet de l'apport d'un aquifère latéral.

CONCLUSIONS.

Les méthodes géochimiques et isotopiques appliquées à l'étude du bassin versant de Kamech nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce bassin.

Les analyses chimiques permettent de dire que les eaux du bassin présentent un faciès sulfaté, chloruré, sodique et potassique. La minéralisation est acquise essentiellement par dissolution de minéraux contenus dans le sol. Les fortes teneurs en silice semblent liées aux eaux de puits où les temps de contact sont plus longs. Nous nous sommes servis de cette relation pour utiliser la silice comme indicateur de temps de résidence.

Les analyses isotopiques nous permettent de discuter de l'origine des eaux, le problème principal rencontré a été le recouvrement entre la droite d'évaporation et la série des teneurs mensuelles des précipitations.

La corrélation des données chimiques et isotopiques nous a permis de faire des hypothèses sur un fonctionnement spatial (amont-aval) du bassin. Ces hypothèses sont essentiellement basées sur le problème des temps de résidence et le problème des mélanges.

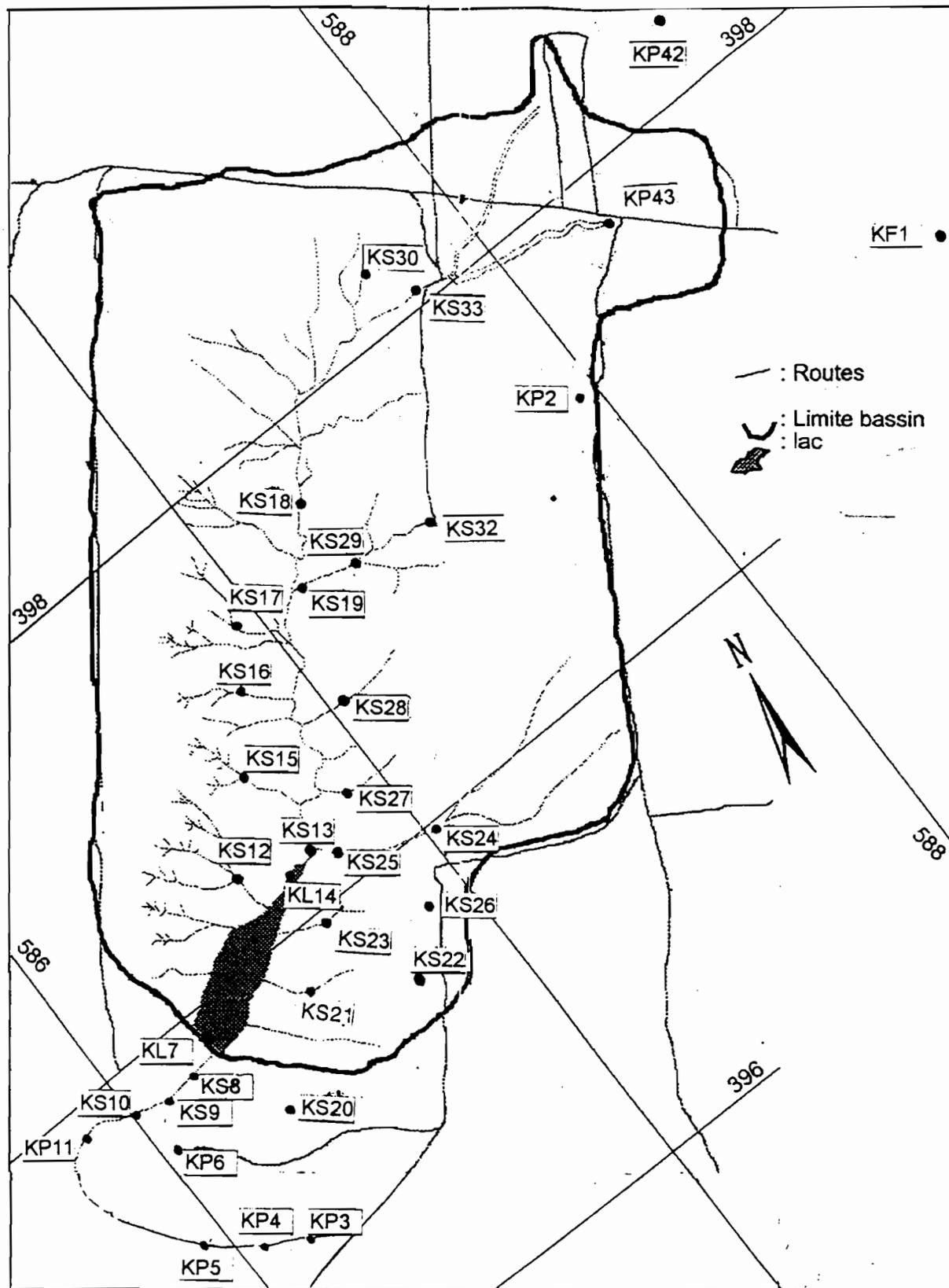
L'introduction de chroniques hydrologiques longues a rendu possible une simulation de l'évolution temporelle de la retenue d'un point de vue chimique (Cl) et isotopique (^{18}O) ; et ceci avec seulement deux points (août 98 et mars 99).

Par rapport aux problèmes posés au départ, on a vu que la retenue n'est pas maintenue par un aquifère régional, il y a effectivement un apport souterrain dans le talweg amont mais celui-ci correspond à un écoulement retardé lié à la pluie du mois précédent.

La fuite avale semble superficielle, elle n'alimente pas un aquifère (comme c'est le cas pour d'autre lac collinaire). En faite, c'est cet écoulement de surface qui serait alimenté par un aquifère latéral.

Evidemment, une série temporelle d'analyse permettrait de caler la simulation de façon plus précise. Le modèle fonctionne sur notre bassin, mais pour pouvoir être généralisé, il pourrait être amélioré en prenant en compte l'humidité relative de l'air dans la simulation de l'évaporation. De plus, complexifier les modèles utilisés (en chlore et oxygène 18), permettrait sans doute de parvenir à une estimation réelle des apports retardés et des pertes.

ANNEXES



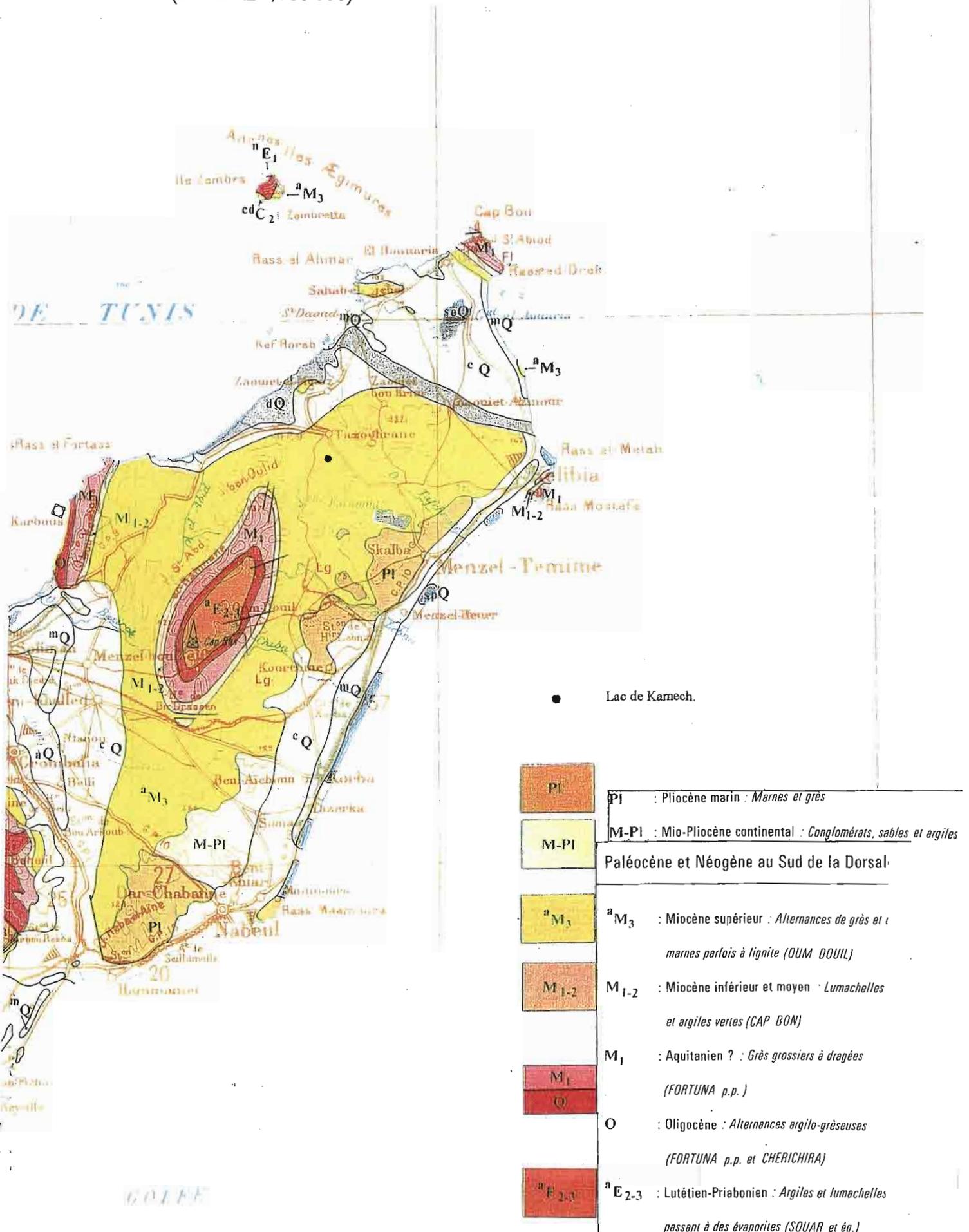
Bassin versant de Kamech
réseau hydrographique et infrastructures

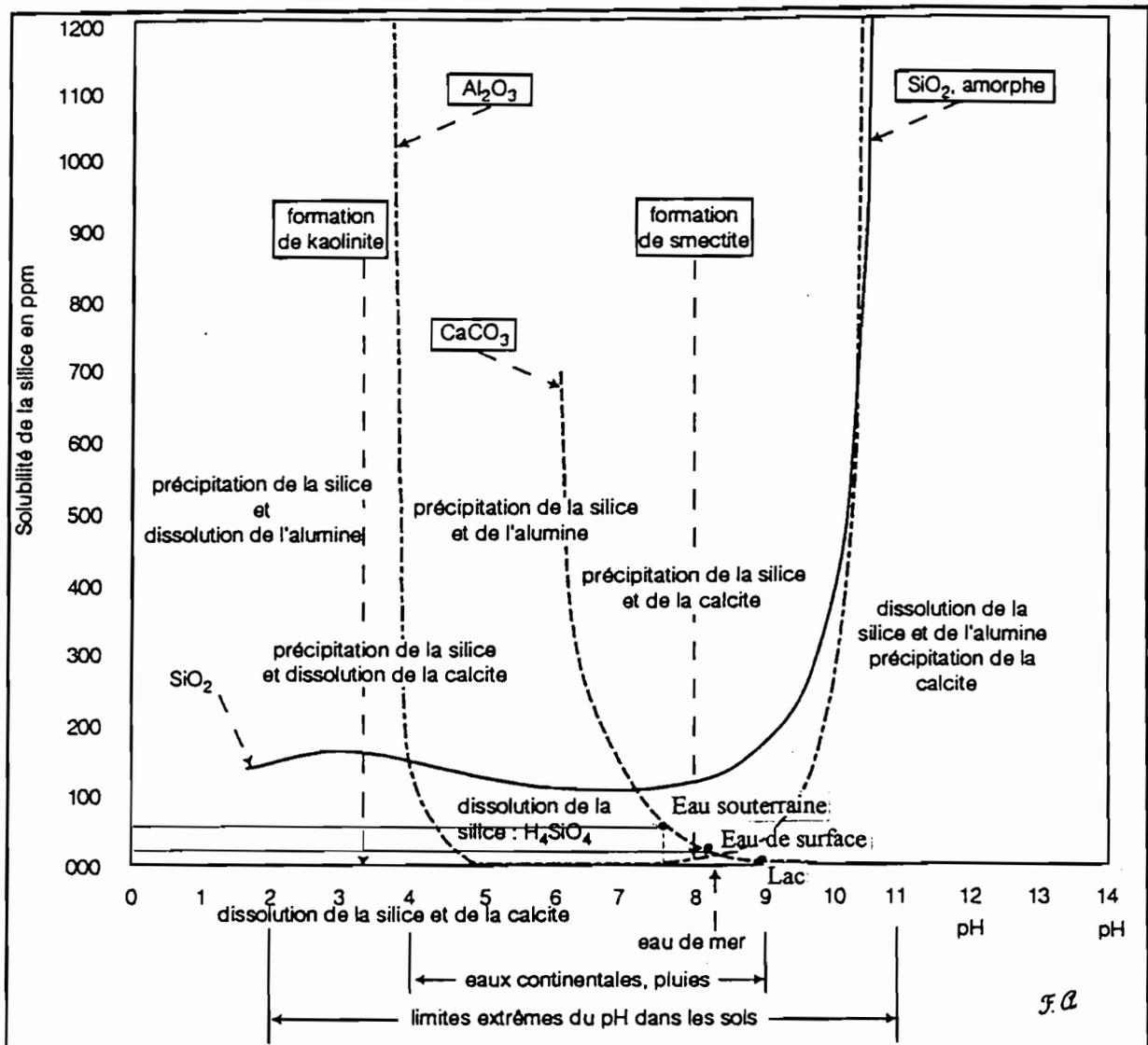
0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 Km

Fond de carte d'après MEKKI (1999)

CARTE GEOLOGIQUE DE LA REGION DU CAP-BON

(ECHELLE 1/500 000)





Solubilités de SiO_2 amorphe, de CaCO_3 et d' Al_2O_3 , en parties pour million, dans l'eau à 25°C, en fonction du pH (d'après Alexander *et al.*, 1954, Krauskopf, 1956, et Blatt *et al.*, 1980, alumine d'après Thiel, 1927).

TABLEAU CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE PUIITS
DU BV DE KAMECH (MESURES SUR ECHANTILLONS NON FILTRES).

a) Les eaux de surface (lac + oued + source).

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
18/03/99	Lac (digue)	KL7	-1.0	0.980	8.98	13.3	89	-	152.5	2.5
19/03/99	Lac (amont)	KL14	-1.0	1.001	8.92	12.6	101	105	142.3	2.3
21/03/98	Lac (digue)	KL7- 98	-1.0	1.080	8.2	-	-	-158.9	-	-

Aval retenue

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
18/03/99	Oued	KS8	0.0	1.184	8.26	13.0	112	11.6	213.5	3.5
18/03/99	Oued	KS9	0.0	1.738	8.18	11.8	95	10.0	406.7	6.7
18/03/99	Oued	KS10	0.0	1.962	8.42	10.4	105	11.1	416.8	6.8

Amont retenue

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
19/03/99	Source	KS12	0.0	3.420	8.17	10.8	90	9.8	378.2	6.2
19/03/99	Oued	KS13	0.0	2.880	8.30	13.4	118	12.4	341.6	5.6
19/03/99	Oued laire	KS15	0.0	2.280	7.30	15.4	50	4.9	406.7	6.7
19/03/99	Oued laire	KS16	0.0	2.100	8.18	15.3	126	12.3	298.9	4.9
19/03/99	Oued	KS17	0.0	3.490	8.17	12.3	92	9.6	370.1	6.1

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
19/03/99	Oued	KS18	0.0	3.370	8.26	14.2	124	12.2	305.0	5.0
19/03/99	Oued Ilair	KS19	0.0	3.300	8.24	13.7	95	9.3	313.1	5.1
22/03/99	Source	KS20	0.0	2.600	7.40	14.9	37	3.8	500.2	8.2
22/03/99	Oued Ilair	KS21	0.0	3.790	7.22	15.2	47	4.6	-	-
22/03/99	Source	KS22	0.0	3.680	7.69	14.8	69	6.9	366.0	6.0
22/03/99	Oued Ilair	KS23	0.0	2.410	8.18	19.5	98	8.9	504.32	8.3
22/03/99	Source	KS24	0.0	2.200	8.35	15.7	90	8.9	260.3	4.3
22/03/99	Oued Ilair	KS25	0.0	2.200	7.83	16.3	73	7.2	431.1	7.1
22/03/99	Source	KS26	0.0	1.482	8.27	17.0	81	7.7	317.2	5.2
23/03/99	Source	KS27	0.0	2.980	7.40	13.2	54	5.6	366.0	6.0
23/03/99	Oued Ilair	KS28	0.0	2.760	8.30	11.8	81	8.7	416.8	6.8
23/03/99	Oued Ilair	KS29	0.0	3.380	8.15	13.3	104	10.7	357.9	5.9
23/03/99	Source	KS30	0.0	2.730	8.31	13.6	85	8.8	264.3	4.3
23/03/99	Oued Ilair	KS31	0.0	1.945	8.30	13.5	101	10.5	-	-
23/03/99	Source	KS32	0.0	2.560	8.69	12.3	97	10.3	288.7	4.7
24/03/99	Oued Ilair	KS33	0.0	3.050	8.21	12.3	95	10.0	294.8	4.8
25/03/99		KS39	0.0	3.190	8.13	16.5	111	10.8	319.2	5.2

b) Les eaux de nappe.

Aval retenue

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
18/03/99	Puits	KP3	-1.0	1.803	7.49	13.1	49	5.0	386.3	6.3
18/03/99	Puits	KP4	-1.0	3.080	7.89	12.5	52	-	359.9	5.9
18/03/99	Puits	KP5	-1.0	3.320	7.04	12.3	58	5.9	528.7	8.7
18/03/99	Puits	KP6	-1.0	5.910	7.58	12.1	65	6.6	427.0	7.0
18/03/99	Puits	KP11	-1.0	3.280	7.65	9.7	42	4.8	518.5	8.5

Amont retenue

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
18/03/99	Puits	KP2	-1.0	2.470	7.57	14.7	52	5.0	300.9	4.9
04/04/99	Puits	KP42	-1.0	1.808	7.58	14.2	47	4.7	284.7	4.7
04/04/99	Puits	KP43	-1.0	2.400	7.41	14.6	57	5.7	345.7	5.7

En dehors du BV

Date	Puits / forage	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC	
							(%)	mg.l ⁻¹	(mg L ⁻¹)	(mmol _e L ⁻¹)
18/03/99	Forage	KF1	0.0	2.970	6.87	17.2	36	3.3	549.0	9.0
24/03/99	Puits	KP34	-1.0	1.813	7.30	16.8	76	7.4	237.9	3.9
24/03/99	Puits	KP35	-1.0	1.343	7.70	14.2	90	9.8	335.5	5.5
24/03/99	Puits	KP36	-1.0	3.850	7.33	15.9	29	2.9	524.6	8.6
24/03/99	Puits	KP37	-1.0	1.877	7.49	15.4	78	7.8	343.6	5.6
24/03/99	Puits	KP38	-1.0	2.960	8.3	13.7	98	10.2	244.0	4.0
25/03/99	Puits	KP40	-1.0	3.430	7.63	14.2	90	9.1	315.2	5.2
25/03/99	Puits	KP41	-1.0	3.240	7.26	14.8	49	4.9	315.2	5.2

COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DU BASSIN DE KAMECH EN
MEQ/L.

Echan tillon	Ca	Mg	K	Na	HCO3	F-	Cl	NO3	SO4
K1	9,91	4,36	0,14	15,32	1,66	0,02	20,51	0,32	5,68
KP2	6,41	4,45	0,18	14,01	5,07	0,04	13,52	0,21	5,73
KP3	4,60	3,44	0,15	9,45	6,00	0,05	8,03	0,60	3,65
KP4	12,21	8,30	0,52	13,60	5,53	0,03	14,51	0,03	10,42
KP5	10,81	10,52	0,69	14,40	8,00	0,03	16,48	0,84	8,33
KP6	23,87	13,23	6,61	22,03	6,14	0,03	30,60	8,22	16,59
KL7	3,40	2,43	0,16	5,33	5,67	0,03	4,11	0,02	1,56
KS8	3,60	3,44	0,20	6,00	3,17	0,03	4,51	0,03	4,17
KS9	6,69	4,84	0,12	7,41	6,41	0,03	5,45	0,00	6,56
KS10	6,61	5,46	0,24	8,72	6,20	0,04	6,87	0,02	8,33
KP11	10,41	8,30	0,28	18,46	8,00	0,03	15,07	0,14	11,46
KS12	12,01	8,70	0,29	18,02	5,83	0,04	17,18	0,09	13,02
KS13	9,91	7,44	0,26	14,47	5,33	0,03	13,18	0,04	12,50
KL14	3,21	2,19	0,13	5,19	2,39	0,03	4,11	0,00	3,31
KS15	8,51	7,18	0,22	9,71	6,30	0,04	11,32	0,07	6,25
KS16	7,55	5,95	0,14	10,41	5,52	0,03	8,37	0,14	7,79
KS17	12,81	10,82	0,20	18,54	6,17	0,05	11,77	0,24	22,92
KS18	12,43	8,48	0,19	16,67	4,51	0,03	25,41	0,14	18,66
KS19	12,01	9,41	0,22	18,23	5,17	0,04	16,48	0,17	14,06
KS20	7,07	6,40	0,17	14,65	6,69	0,03	11,40	0,20	7,68
KS22	10,51	8,50	0,24	23,67	5,87	0,05	22,37	0,26	9,38
KS23	8,71	6,78	0,15	14,58	8,50	0,05	8,51	0,01	10,42
KS24	6,86	4,91	0,16	13,94	4,23	0,04	12,23	0,26	5,73
KS25	7,88	4,72	0,09	13,65	6,27	0,04	10,50	0,00	7,33
KS26	5,25	2,25	0,10	7,95	4,46	0,05	7,81	0,72	2,33
KS27	12,31	10,88	0,26	12,64	6,23	0,05	10,37	0,02	18,75

KS28	10,12	9,89	0,23	12,32	5,98	0,05	10,01	0,00	15,32
KS29	12,63	9,21	0,19	17,11	5,07	0,05	17,96	0,42	15,25
KS30	9,21	8,09	0,21	12,04	4,63	0,04	13,86	0,20	10,42
KS32	6,11	3,84	0,30	15,28	4,53	0,05	15,69	0,17	4,69
KS33	11,31	8,30	0,28	13,36	4,83	0,04	16,93	0,16	10,94
KP34	9,21	2,02	0,07	7,63	4,00	0,02	8,17	2,38	2,60
KP35	6,51	0,10	0,55	6,33	5,07	0,01	6,76	0,13	0,52
KP36	10,21	5,26	8,89	15,47	8,90	0,02	18,17	0,21	10,42
KP37	10,21	1,21	0,22	8,13	5,83	0,01	7,61	0,29	7,29
KP38	9,31	7,59	0,34	14,68	4,00	0,04	17,89	0,14	14,58
KR39	11,01	9,86	0,30	15,93	5,50	0,05	14,17	0,00	22,92
KP40	9,61	6,07	0,19	21,50	5,27	0,06	20,99	0,31	14,58
KP41	14,01	8,30	0,17	21,82	5,37	0,06	10,70	0,12	28,65
KP42	6,23	3,36	0,20	9,98	5,71	0,05	8,14	0,99	3,45
KP43	10,01	3,84	0,61	12,65	5,67	0,04	12,18	1,70	7,29

TENEURS ISOTOPIQUES DES EAUX DU BASSIN.

Echantillon	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{vs smow}$
KL7	-30,8	-5,1
KS8	-23,6	-4,4
KS9	-22,4	-3,2
KS10	-21,7	-3,3
KP11	-23,0	-3,9
KS12	-25,8	-3,9
KS13	-18,0	-3,4
KS17	-19,5	-3,7
KS18	-22,5	-3,7
KS19	-20,2	-3,4
KS24	-29,0	-4,6
KS25	-27,6	-4,6
KS27	-23,2	-4,7
KS29	-23,6	-3,8
KS30	-26,8	-4,1
KS32	-19,2	-3,7
KP34	-30,4	-4,7
KP35	-26,3	-4,1
KP38	-21,7	-3,7
KR39	-21,5	-3,5
KP41	-28,7	-4,3
E23	-24,9	-4,1
E25	-13,3	-1,7
KP3	-20,1	-4,3
KP4	-21,4	-3,9
KP5	-26,1	-4,4
KP6	-25,7	-4,0
KP36	-31,1	-5,1
KP37	-30,8	-4,8
KP40	-28,9	-4,5
KS20	-24,8	-4,5
KS26	-29,7	-4,8
KP42	-31,6	-4,7
KP43	-32,9	-4,7
K1-98	-0,5	1,0
K3-98	-23,0	-2,7
E24	-19,5	-2,9
KL14	-31,8	-5,2
KF1	-32,2	-5,0

BIBLIOGRAPHIE

BEN OSMAN L. (1991): L'eau en Tunisie, in "Guide de l'eau -Tunisie", Fondation de l'eau, 3ème éd.,19-30.

BORTOLI L., GOUNOT M., JACQUINET : Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale. Annales de l'INRAT vol.42 fasc.1.

BOUVIER H. (1977) : Géologie de l'extrême nord tunisien.

BRGM (1967): Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouest. Rapport BRGM.DAK.

CAMUS H.,GUIGUEN N., BEN YOUNES M. (1995): Lacs collinaires en zone semi-aride, programme de recherche hydrologique, D/CES-ORSTOM, Tunis, 28p.

CARMOUZE J. P. : La Régulation hydrogéochimique du lac Tchad – ORSTOM.

CASTANY G. (1951): Etude géologique de l'Atlas Tunisien oriental - Thèse sc. Paris; Ann. Mines et Géol., Tunisie, 8, 632p.

CES-ORSTOM (1996): Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995, Tunis, 140p.

CES-ORSTOM (1997): Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1996-1997, Tunis, 200p.

CLARK I., FRISTZ P. (1997) : Environmental Isotopes in hydrogeology.

CRAIG M. (1961): Isotopic variations in météoric water - Sciences, 133, p1702-1703.

CROMPTON T.R. (1992) : Comprehensive water analysis – vol1 :Natural waters.

DJELLOULI A., KALLAL Z. (1972): Eléments d'hydrologie tunisienne. Ministère de l'Agriculture, Dir.- Ress.- Eau-sol, Division Thermalisme, 60p.

EL AMAMI S. (1984): Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie, CRGR, Tunis 68p.

ENNABLI N. (1995): L'irrigation en Tunisie, INAT, Tunis, 469p.

FETTER C.W. (1994) : Applied hydrogéology 3 édition.

FONTES J.C., FRISTZ P. (1986): Handbook of environmental isotope geochemistry. Volume II.

GAC J.Y. : Géochimie du bassin du lac Tchad – ORSTOM.

GRIFFITHS J.F. (1972) : World survey of climatology (vol.10).

GUIGUEN N., BEN YOUNES M., (1994): Suivi des lacs collinaires, D/CES-ORSTOM, Tunis, 32p.

HACHEMI M., (1982): Contribution à l'étude hydrogéologique du plateau du Sra Quartane (Tunisie)- Thèse 3 cycle, Univ Montpellier, 96p.

HANZA M. (1983) : Carte des ressources en eau souterraine de la Tunisie : ARE Kairouan.

JRIBI L. (1997) : Contribution à la mise en évidence de l'alimentation de la nappe du Complexe Terminal à partir de la chaîne de Mélaoui-Gafsa. Mémoire de DEA Fac des Sc. De Tunis, 89p.

KASSAB A., SETHOM H. (1980) : Géographie de la Tunisie : Le pays et les hommes.

LANGMUIR D. (1997) : Aqueous environmental geochemistry, 600p.

LARAQUE A. (1991): Comportement hydrochimique des açudes du Nordeste brésilien; Evolution et prévision pour un usage en irrigation. Thèse de doctorat en Hydrologie, USTL, 324p.

LASSOUED S. (1982) : Hydrologie et géochimie isotopique de la plaine d'El Haouaria (Tunisie septentrionale). Thèse de doctorat en géologie appliquée, Université d'Orsay 163p.

MICHELOT JC., BENTLEY H.W., BRISSAUD L., ELMORE D. et FONTES JC., (1984): Progress in environmental isotope studies (³⁶Cl, ³⁴S, ¹⁸O) at the Stripa site - In "Isotope hydrology 1983", proc. symp IAEA, Vienna, p207-229.

NORDSTROM D.K., MUNOZ J.L. (1994): Geochemical Thermodynamics, 2ème Ed., Blackwell Scientific Publications.

PERENNES J.J. (1993): L'eau et les hommes au Maghreb, Ed. Karthala, 646p.

RAHAINGOMANANA N. (1998) : Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Thèse Doctorat Univ. Montpellier I, 308 p.

SELMI S., TALINEAU J.C. (1994): Des lacs collinaires pour un développement durable en Tunisie. Les Cah. Rech. Dev., 37, 33-46.

SEREQ (1973) : Agence Canadienne de Développement International. Programme de Kairouan : projet principal.

SETHOM H., KASSAB A. (1981) : Les régions géographiques de la Tunisie.

SIGG L., STUMM W., BEHRA P. (1992): Chimie des milieux aquatiques, Ed Masson, 391p.

TALINEAU J.C., SELMI S., ALAYA K. (1994): Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. Sécheresse, 5, 251-256.

YOUSFI M. (1984) : Etude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride : Béni Abbès (Algérie). Thèse Univ. Paris Sud, Orsay. 229p.

ZEBIDI H. (1965): Etude hydrologique du massif calcaire du Visour- Rapport préliminaire, BIRH52, Tunis, 13p.

ZEBIDI H. et ALAYA H. (1969), Etude hydrogéologique préliminaire, BIRH61, Tunis, 10p.

ZOUARI K. (1983) : Etude isotopique et géochimique de l'infiltration naturelle en zone non saturée sous climat semi-aride, Sud tunisien. Thèse, Univ. Paris Sud, Orsay. 133p.