

IRD
Mission de Tunis
BP 434
1004 EL MENZAH 1

DCES
Ministère de l'Agriculture
30 Rue Alain Savary
1002 TUNIS

INRGREF
Rue Hédi Karray
BP 10
2080 ARIANA

**CARACTERISATION CHIMIQUE ET ISOTOPIQUE
DES EAUX ET DES FORMATIONS SUPERFICIELLES
DU BASSIN VERSANT DU LAC COLLINAIRE
D'EL GOUAZINE (Tunisie centrale)**

Rapport scientifique de la campagne de mesures 1998



J.P. MONTOROI ⁽¹⁾, O. GRUNBERGER ⁽¹⁾, S. NASRI ⁽²⁾

(1) IRD-Bondy

(2) INRGREF-Tunis

Photographie de la couverture (J.P. Montoroi) :
Puits du bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale)



SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. CADRE DE L'ETUDE	5
1.1. Cadre régional	5
1.2. Objectifs de l'étude	7
2. CARACTÉRISTIQUES DU SITE D'EL GOUAZINE	8
2.1. Caractéristiques hydrologiques du lac collinaire.....	8
2.2. Formations superficielles du bassin versant	18
2.3. Occupation des sols	23
3. MÉTHODES D'ÉTUDE	27
3.1. Méthodes de terrain	27
3.2. Méthodes de laboratoire	32
4. CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX DE LACS COLLINAIRES	36
4.1. Caractéristiques chimiques mesurées sur le terrain.....	36
4.2. Analyses chimiques	36
5. CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX DU BASSIN VERSANT D'EL GOUAZINE	38
5.1. Caractéristiques chimiques mesurées sur le terrain	38
5.2. Analyses chimiques	43
5.3. Caractéristiques isotopiques	51
6. OBSERVATIONS PEDOLOGIQUES DES DEPÔTS ALLUVIAUX	55
6.1. Description morphologique	55
6.2. Organisation spatiale	55
6.3. Piézométrie de la nappe alluviale	55
7. ESTIMATION DES PERTES PAR INFILTRATION	60
7.1. Tracage chimique en phase évaporatoire	60
7.2. Evolution temporelle	62
8. MODELISATION DE L'ECOULEMENT SOUTERRAIN	64
8.1. Simulation hydrologique	64
8.2. Simulation isotopique	66
9. CARACTERISATION DES ROCHES, DES SOLS ET DES SEDIMENTS DU BASSIN VERSANT D'EL GOUAZINE	71
9.1. Caractérisation minéralogique	71
9.2. Caractérisation chimique	77
9.3. Granulométrie	81

10. INTERACTION EAUX-SOLS-ROCHES	83
10.1. Dissolution des minéraux	83
10.2. Modèle d'organisation des formations superficielles et des aquifères	83
CONCLUSION	86
BIBLIOGRAPHIE	87
ANNEXES	91

INTRODUCTION

Les objectifs du programme national "*Lacs collinaires de Tunisie*" ont été exposés dans plusieurs publications récentes (SELMI et TALINEAU, 1994 ; TALINEAU et al., 1994 ; MAT-MEATT-SERST-ORSTOM, 1994 ; SELMI, 1996 ; ALBERGEL et REJEB 1997 ; SELMI et TALINEAU, 1997).

Ce programme est destiné d'une part à contrôler les eaux de ruissellement pour éviter l'envasement des grands barrages hydrauliques et d'autre part à fixer les populations rurales autour de ces points d'eau. Globalement, ce programme s'inscrit dans une stratégie d'aménagement plus vaste visant à la maîtrise des eaux de surface (construction de grands barrages, de barrages collinaires, d'ouvrages d'épandage et de lacs collinaires) et à la gestion des sols de pente (construction de banquettes anti-érosives).

La construction de très nombreux lacs collinaires en Tunisie centrale au cours de l'actuelle décennie soulève plusieurs questions pour les sociétés et l'environnement (TALINEAU et al., 1994 ; SELMI, 1996). L'une d'entre-elles concerne les risques d'envasement des retenues et leur impact sur la recharge des aquifères. Une réponse pourra être apportée par l'étude du mode d'alimentation en eau et en matières (solides et/ou dissoutes) de ces retenues et, par voie de conséquence, de la structure des formations sédimentaires complexes dans lesquelles cheminent les écoulements.

1. CADRE DE L'ETUDE

1.1. Cadre régional

Le programme de construction des aménagements de lacs collinaires est ambitieux, 1000 lacs à l'horizon 2000-2005, et fait appel à des financements nationaux et internationaux. Environ 450 ouvrages ont été construits à ce jour.

Depuis 1993, vingt-sept d'entre eux sont sous surveillance hydrologique dans le cadre de la convention CES-ORSTOM (financement de l'Union Européenne DG VIII) et du FIDA (Fond International de Développement Agricole). Ces lacs sont situés dans les paysages montagneux de la Dorsale tunisienne entre les isohyètes 250 et 500 mm (**figure 1**).

La DCES (Direction de la Conservation des Eaux et des Sols) mène avec l'IRD (ex ORSTOM) une étude globale de ces aménagements qui porte sur le suivi hydrologique de 30 lacs tunisiens (CES/ORSTOM, 1996, 1997a, 1997b, 1999 et 2000 ; ALBERGEL et al., 1999), l'impact social auprès des populations (SELMI, 1996) et la qualité biogéochimique de l'eau des retenues (RAHAINGOMANANA, 1998).

Depuis 1997, l'Union Européenne apporte également son concours financier au programme régional de recherche HYDROMED (financement UE INCO DG XII). Aux côtés de la Tunisie, participent plusieurs autres pays d'Afrique du Nord et du Proche-Orient (Maroc, Liban, Syrie). Institutionnellement, la Tunisie est représentée par l'INRGREF (Institut National de Recherche en Génie Rural et en Eaux et Forêts, ex CRGR Centre de Recherche du Génie Rural). L'objectif est d'étudier plus spécifiquement le fonctionnement hydrologique des bassins versants de 5 sites pilotes parmi les 27 lacs collinaires sous surveillance hydrologique (**figure 1**). Ce programme, intitulé "*Les lacs collinaires dans la zone semi-aride du pourtour méditerranéen*", est prévu jusqu'en 2000-2001.

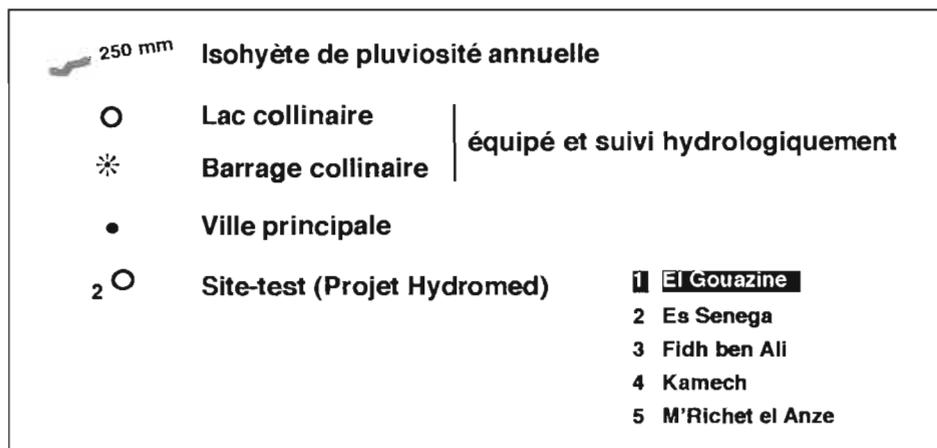
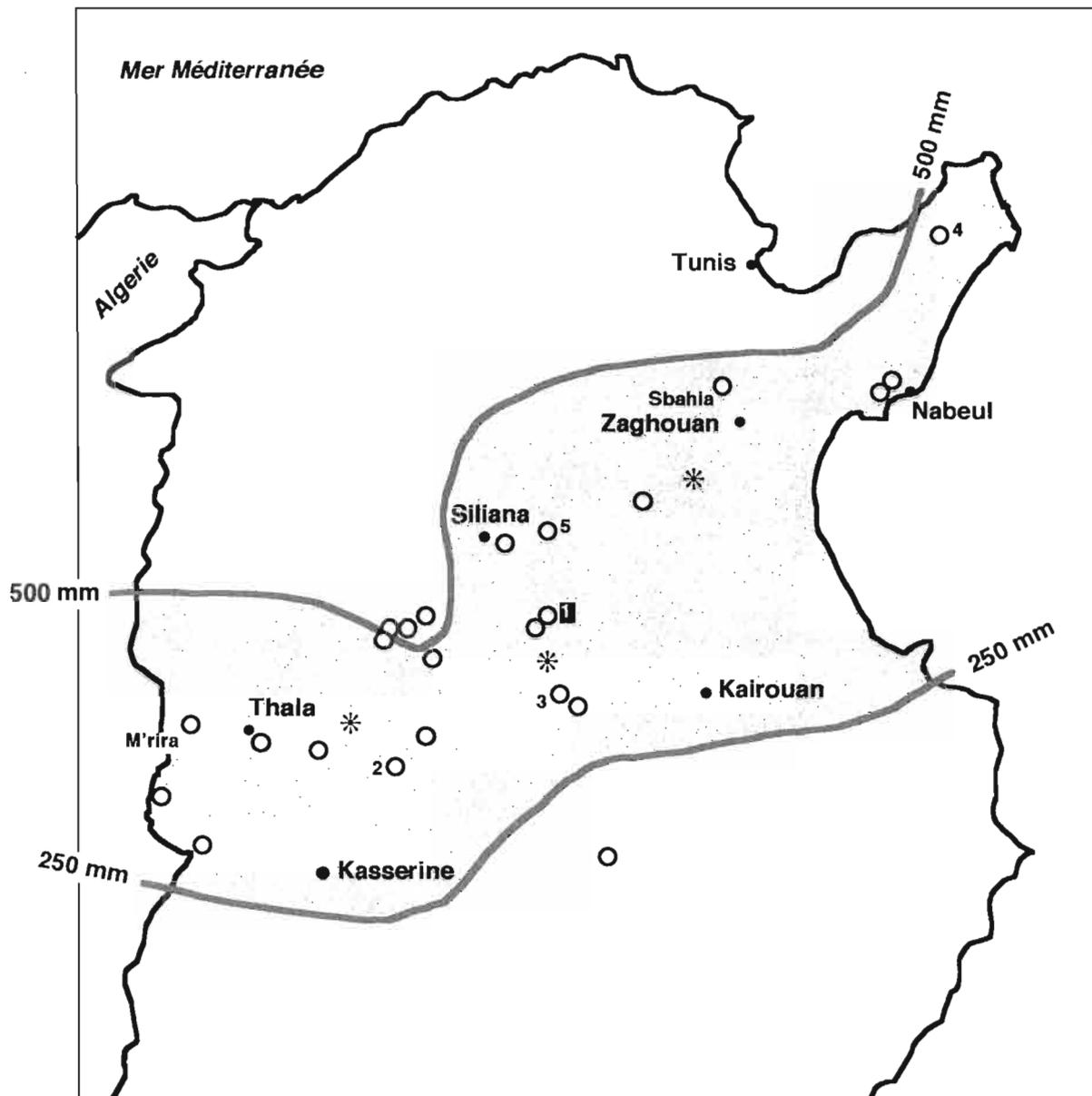


Figure 1
Localisation des lacs collinaires tunisiens et du site d'étude d'El Gouazine

1.2. Objectifs de l'étude

La mission de terrain, qui s'est déroulée du 11 au 25 mai 1998, s'inscrit dans la thématique sur l'étude du fonctionnement géochimique du bassin versant de lacs collinaires. Elle s'est focalisée principalement sur le bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine, qui est un des 5 sites pilotes retenus dans le programme HYDROMED (**figure 1**).

En termes hydrologiques, le bilan de la retenue, suivi depuis 1993, pose problème : pour les 4 années hydrologiques (septembre à août) comprises entre 1994 et 1998, le bilan est négatif, sa valeur variant de $-102\,902\text{ m}^3$ en 1994-1995 ; $-273\,435\text{ m}^3$ en 1995-1996 ; $-76\,599\text{ m}^3$ en 1996-1997 ; $-47\,522\text{ m}^3$ en 1997-1998 ; $-130\,917\text{ m}^3$ en 1998-1999 (CES/ORSTOM, 1996, 1997a, 1997b, 1999 et 2000). Pour mémoire, le volume de la retenue au déversement est de $233\,370\text{ m}^3$. Ce déficit est interprété comme le résultat de fuites du lac de retenue au profit de l'aquifère alluvial. L'alimentation souterraine est attestée par une remontée générale de la piézométrie de cet aquifère.

En termes géochimiques, seules les eaux de la retenue ont été répertoriées dans le cadre d'une étude régionale qui visait à établir une typologie des eaux de lacs collinaires et à étudier leur évolution au cours d'un processus d'évaporation (RAHAINGOMANANA, 1998). Ces observations ont été obtenues au cours d'un suivi quasi-mensuel.

Aussi, les principaux objectifs de la mission ont été :

- Spatialiser l'information géochimique à une époque donnée de l'année (après les pluies hivernales) et à l'échelle du système bassin versant-retendue (eaux d'écoulement, de retenue et souterraine).

- Identifier des traceurs géochimiques (majeurs, isotopes, éléments traces) pour comprendre les modes de circulation des eaux dans les formations superficielles.

- In fine, modéliser les changements de faciès chimique (eau d'écoulement- eau de retenue en amont et eau de retenue-eau souterraines en aval) en prenant en compte les interactions eaux-sols-roches.

La mission a été possible grâce à l'appui financier du programme 623 "Petits barrages en milieu semi-aride : gestion intégrée d'une ressource multi-usages" de l'IRD, dont le responsable est J. ALBERGEL.

Au cours de cette mission, une tournée de 7 autres lacs collinaires (Fidh Ben Naceur, Fidh Ali, Kamech, Sbahia, M'Richet el Anze, M'rira, Essenega) a été effectuée durant 2 jours et demi (**figure 1**).

Par ailleurs, la mission a donné l'occasion à un étudiant de 2^{ème} année à l'INA Paris Grignon, Charles PERNIN, d'effectuer une partie de son stage en entreprise. Ce stage de 2 mois (avril et mai 1998) a débuté, à l'ORSTOM-Bondy, par une étude bibliographique sur "l'étude du fonctionnement hydrologique et géochimique des petits réservoirs artificiels" (PERNIN, 1998a). C. PERNIN a ensuite participé aux travaux de terrain (MONTOROI et al., 1998) et a pris des contacts avec les chercheurs de l'ORSTOM en Tunisie pour une poursuite de son stage en juillet et en août. Ce nouveau stage a eu une finalité agronomique, l'objectif étant l'étude de la gestion agricole des eaux de la retenue collinaire de Kamech, situé dans la presqu'île du Cap Bon (PERNIN, 1998b).

Les principaux résultats scientifiques de ce rapport ont été présentés à l'occasion de plusieurs réunions scientifiques internationales, qui se sont tenues :

- à Lund (Suède), communication orale publiée (MONTOROI et al., 1999) ;
- à Essen (Allemagne), poster (MONTOROI et al., 1999) ;
- à Hammamet (Tunisie), communication orale avec résumé court (GRUNBERGER et al., 1999);
- à Barcelone (Espagne), communication orale avec résumé étendu (MONTOROI et al., 1999).
- au Cap (Afrique du Sud), communication orale avec résumé court et poster (MONTOROI et GRUNBERGER, 2000).

2. CARACTÉRISTIQUES DU SITE D'EL GOUAZINE

Le lac d'El Gouazine est situé entre Ain Jelloula et Ksar Lamsa à environ 50 km au nord-ouest de Kairouan (route MC 46) et à 110 km au sud-ouest de Tunis. Les coordonnées géographiques de la digue sont 35° 55' N et 9°45' E (carte topographique n° LIV de Djebel Serdj) et les coordonnées rectangulaires sont 289.5 N et 481.8 E, l'origine étant prise à Carthage (**figure 2**).

La région d'El Gouazine est caractérisée par un climat méditerranéen avec un été chaud et sec, un hiver frais et pluvieux et des pluies très variables en automne et au printemps. La pluviosité moyenne annuelle est de 395 mm à Ousseltia durant la période 1962-1989 (BOCQUET, 1993). La température moyenne annuelle de l'air est de 19,1 °C avec un minimum de 10,4 °C en janvier et un maximum de 28,6 °C en août (BOCQUET, 1993). L'évapotranspiration potentielle est très supérieure aux précipitations et est d'environ 1680 mm à Kairouan durant la période 1964-1982 (KARRAY et FAKHFAKH, 1988).

Le bassin versant d'El Gouazine a une superficie d'environ 18,1 km² et est bordé par des collines orientées sud-ouest nord-est. L'altitude est comprise entre 575 m pour les plus hautes collines situées à l'extrême sud et 375 m au niveau de la retenue (**figure 2**). Avec une dénivelée de 200 m pour une longueur de 11 km, la pente moyenne de l'oued principal est d'environ 1,8% ou 18 m km⁻¹. Dans la partie supérieure des versants, la pente transversale est plus élevée et dépasse la valeur de 5%.

2.1. Caractéristiques hydrologiques du lac collinaire

Le lac collinaire d'El Gouazine a été mis en service en 1990. La digue de retenue a été construite sur l'oued Ali Salem qui reçoit les eaux des oueds El Gouazine et El Ajela (**figure 2**). En aval, les eaux s'écoulent vers l'oued Maarouf, affluent de l'oued Nebhana qui alimente la sebkha Kelbia dans la plaine de Kairouan. La **planche photographique I** présente une vue panoramique du lac asséché et de son aval cultivé sous irrigation. Les puits et les profils pédologiques indiqués sont localisés spatialement dans le chapitre 3 à la figure 7.

La digue a une longueur de 232 m, une largeur au sommet de 2,46 m et à la base de 56 m, et une hauteur de 10,63 m. Le volume maximal de la retenue est de 285.000 m³ correspondant à une cote limnimétrique de déversement de 8,28 m (GUIGUEN et BEN YOUNES, 1994). La surface maximale de la retenue est de 96 878 m², soit environ 9,6 ha qui correspondent à environ 0,5% de la surface totale du bassin versant.

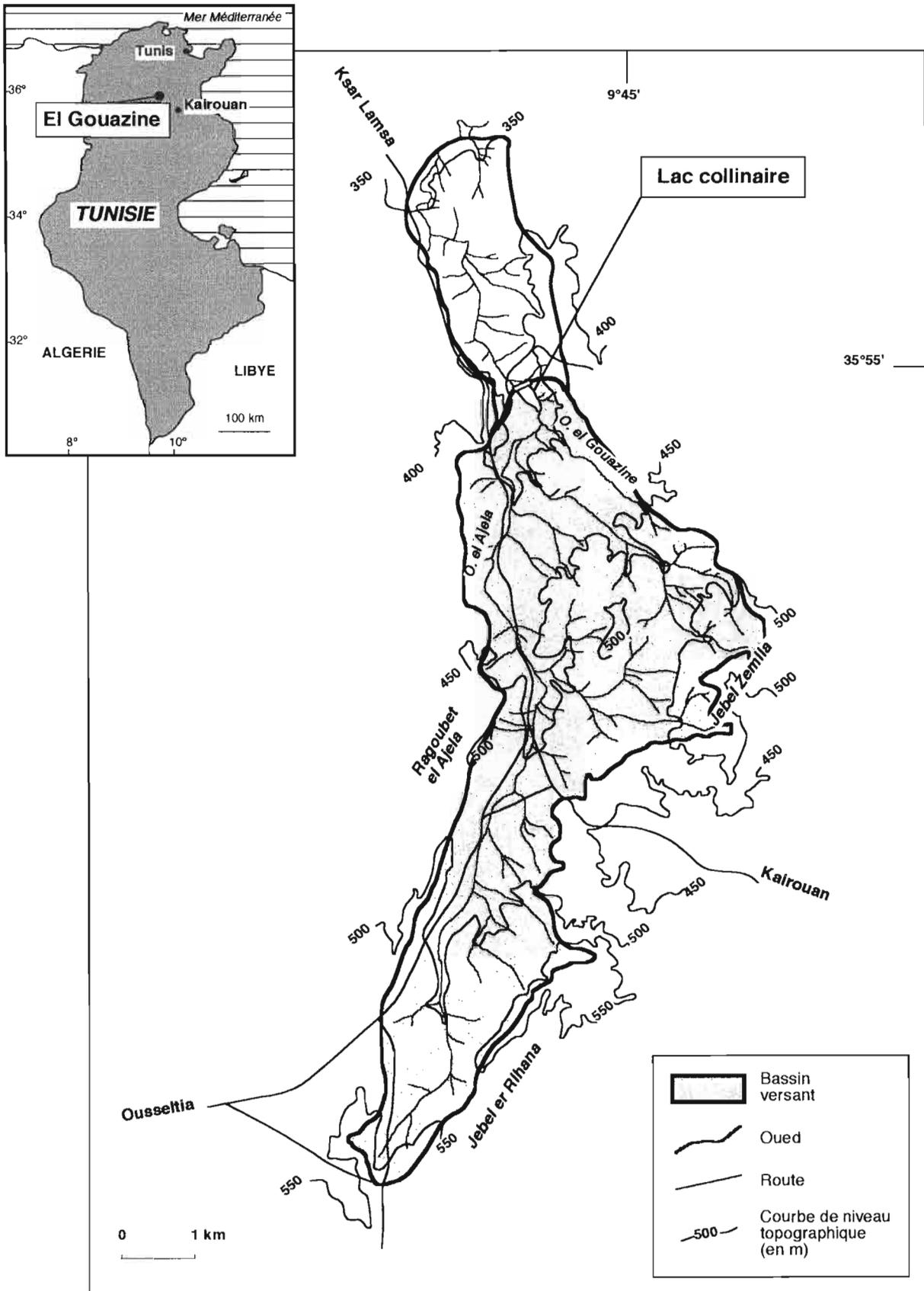
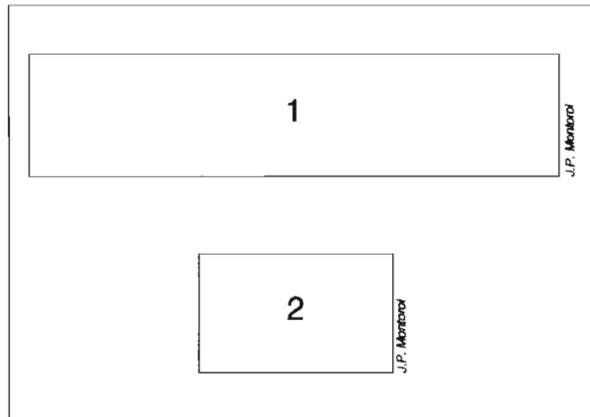


Figure 2
Le bassin versant d'El Gouazine

Planche photographique I

Site d'étude du lac collinaire d'El Gouazine



- 1 Vue panoramique (depuis le versant est, à l'aval de la digue)
d'une partie du bassin versant alimentant le lac et de la partie
aval du lac asséché
p1, ..., p6 emplacement des profils pédologiques
w1, w2 emplacement des puits servant à l'irrigation
- 2 Au niveau de la digue, le lac asséché et le versant est



Le lac d'El Gouazine est suivi hydrologiquement depuis le 12 octobre 1993. Il est équipé d'une échelle limnimétrique, d'une station limnimétrique automatique CHLOE et d'une station pluviométrique/pluviographique automatique OEDIPE. Les données sont télétransmises par un émetteur ARGOS à une station de réception directe sise dans les locaux de la CES à Tunis. Un bac d'évaporation (type COLORADO) a été installé, en avril 1995. L'ensemble de ces équipements est destiné à établir, sur plusieurs années, le bilan hydrologique du lac et à proposer un modèle de gestion optimale de la ressource en eau (GUIGUEN et BEN YOUNES, 1994 ; ALBERGEL et al., 1999).

Les données hydrologiques télétransmises sont archivées dans la base de données *Hydrom* et sont disponibles dans l'annuaire annuel des lacs collinaires tunisiens (CES/ORSTOM, 1996, 1997a, 1997b, 1999 et 2000).

2.1.1. Pluviosité

La pluviométrie mensuelle et annuelle à El Gouazine est donnée dans le **tableau I**, de 1994 à 1998. Sur cette période, la pluviosité annuelle moyenne est de 338,7 mm (GUIGUEN et BEN YOUNES, 1994; CES/ORSTOM, 1996, 1997a, 1997b, 1999 et 2000). Le mois de septembre est le plus pluvieux tandis que le mois d'août est le plus sec.

Tableau I
Pluviométrie mensuelle et annuelle au lac d'El Gouazine

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
	(mm)												(mm)
1994	3,5	6,5	0,0	16,5	5,0	5,5	1,0	0,0	88,5	61,0	23,5	2,5	213,5
1995	8,0	0,0	9,0	21,5	3,0	50,0	2,0	29,5	98,0	30,7	65,4	73,1	390,2
1996	57,5	83,0	42,5	15,0	48,5	41,5	0,0	20,5	66,5	14,0	0,5	15,5	405,0
1997	35,0	12,5	8,0	41,5	4,0	7,0	0,0	48,0	136,5	72,0	37,5	12,5	414,5
1998	24,5	20,5	23,0	18,0	7,5	21,5	0,0	13,5	92,5	29,5	13,0	6,9	270,4
1999	167,0	3,5	39,5	19,0	14,5	9,5	3,5	10,0	-	-	-	-	-
Moyenne ⁽¹⁾	25,7	24,5	16,5	22,5	13,6	25,1	0,6	22,3	96,4	41,4	28,0	22,1	338,7

⁽¹⁾ pour la période 1994-1998

2.1.2. Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle moyenne journalière (ETP) a été calculée avec la relation proposée par RIOU (1980), à partir des données de température maximum moyenne interannuelle obtenues à Ousseltia. La relation utilisée est celle établie pour Kairouan :

$$ETP_n = 0,31 T_* - b \quad \text{avec} \quad b = 7,1 - 0,1 \phi$$

$$T_* = (T_n^x + 2T_{n+1}^x)/3$$

où ETP_n est l'évapotranspiration potentielle moyenne journalière du mois de rang n, exprimée en mm j^{-1} ;

ϕ est la latitude en degrés et dixièmes : à Kairouan, $b = 3,53$;

T_n^x ($^{\circ}\text{C}$) est la température maximum moyenne interannuelle du mois de rang n.

Cette formule fournit des valeurs très proches de la formule de Penman sauf pour les stations situées en altitude. Les données de températures maximales mensuelles ont été obtenues pour Ousseltia auprès de l'Office National de la Météorologie à Tunis (PERNIN, 1998a). Seules 3 années (1993, 1994 et 1995) présentant des données complètes ont été prises en compte (**tableau II**). Les valeurs d'ETP varient entre $1,2 \text{ mm j}^{-1}$ en décembre et $7,5 \text{ mm j}^{-1}$ en juillet.

L'ETP mensuelle est obtenue en cumulant les valeurs d'ETP moyenne journalière. Pour la période 1993-1995, elle est minimale en décembre avec 36,0 mm et maximale en juillet avec 231,3 mm.

L'ETP annuelle est de 1460 mm, valeur largement supérieure à la pluviosité.

Tableau II
Température maximum mensuelle par année et évapotranspiration potentielle journalière, mensuelle et annuelle à Ousseltia

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
	(mm)												(mm)
1993													
T^x ($^{\circ}\text{C}$)	14,2	11,7	15,7	21,7	26,5	32,1	34,6	35,7	30,6	26,2	18,9	16,0	
1994													
T^x ($^{\circ}\text{C}$)	14,8	16,8	20,7	20,1	30,9	32,2	35,6	38,1	31,8	24,4	21,0	16,8	
1995													
T^x ($^{\circ}\text{C}$)	14,5	19,2	17,4	20,7	28,6	31,1	34,9	33,2	28,4	23,4	18,1	16,4	
T_n^x ($^{\circ}\text{C}$)	14,5	15,9	17,9	20,8	28,7	31,8	35,0	35,7	30,3	24,7	19,3	16,4	
T ($^{\circ}\text{C}$)	15,4	17,3	19,9	26,1	30,8	34,0	35,5	32,1	26,5	21,1	17,4	15,1	
ETP_n (mm j^{-1})	1,25	1,82	2,63	4,55	6,00	7,00	7,46	6,41	4,70	3,01	1,86	1,16	
ETP_n (mm)	38,9	50,9	81,5	136,4	186,1	209,9	231,3	198,7	140,9	93,4	55,7	36,0	1459,8

2.1.3. Evaporation en bac

Le **tableau III** présente les valeurs mensuelles et annuelles de l'évaporation d'une surface d'eau libre (bac carré d'1 m²) sur la période 1996-1998. Les valeurs mensuelles correspondent au cumul des valeurs journalières mesurées sur le terrain et les valeurs annuelles au cumul des valeurs mensuelles.

Pour la période 1996-1998, le taux moyen d'évaporation journalière est compris entre 1,8 mm j⁻¹ en janvier et 10,1 mm j⁻¹ en juillet. L'évaporation mensuelle varie de 55,4 mm à 314 mm. L'évaporation annuelle moyenne est de 1775 mm.

Durant les années hydrologiques 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998 et 1998-1999, l'évaporation totale est respectivement de 1429,3 ; 1988,6 ; 1884,3 et 1716 mm, soit une moyenne de 1754,6 mm.

Tableau III
Evaporation mensuelle et annuelle au lac d'El Gouazine

Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
	(mm)												
1995	-	-	-	-	-	-	-	-	156,9	121,2	122,9	61,3	-
1996	54,2	50,2	74,0	69,8	88,2	164,0	241,0	225,6	179,5	142,8	101,5	75,5	1466,3
1997	71,4	74,4	125,0	118,9	212,0	294,5	339,5	253,6	217,4	117,9	65,3	63,7	1953,6
1998	40,6	63,2	88,2	146,4	179,5	271,9	361,5	268,7	215,6	132,5	72,3	63,1	1903,5
1999	46,1	46,5	57,6	86,2	141,9	276,5	341,1	236,6	-	-	-	-	-
Moyenne ⁽¹⁾	55,4	62,6	95,7	111,7	159,9	243,5	314,0	249,3	204,2	131,1	79,7	67,4	1774,5
E (mm j ⁻¹)	1,79	2,24	3,09	3,72	5,16	8,12	10,13	8,04	6,81	4,23	2,66	2,18	

⁽¹⁾ pour la période 1996-1998

2.1.4. Capacité hydraulique du réservoir

Le **tableau IV** donne quelques caractéristiques hydrologiques de la retenue, tandis que la **figure 3** présente les variations du volume d'eau contenue dans la retenue pour la période 1993-1999.

Tableau IV
Caractéristiques hydrologiques de la retenue collinaire d'El Gouazine

Année hydrologique	Pluviométrie (mm)	Drpl	Dmax	Vmax (m ³)	Smax (m ²)	Hmax (m)	Dmin	V min (m ³)	Smin (m ²)	Hmin (m)	Dass
1993-1994	67,5 ⁽¹⁾	?	?	?	?	?	8/6/94	0	0	2,41	8/6/94
1994-1995	298,5	2/9/94	5/11/94	174 000	74100	7,56	31/7/95	40 000	27 000	4,82	-
1995-1996	575,7	1/8/95	23/9/95	249 000	102 000	8,42	8/9/96	67 600	43 000	6,04	-
1996-1997	252,5	9/9/96	10/9/96	100 000	55 300	6,69	8/7/97	0	0	3,12	8/7/97
1997-1998	387,0	18/8/97	22/9/97	46 400	34 100	5,48	15/5/98	0	0	3,02	15/5/98
1998-1999	408,4	24/9/98	21/1/99	137 000	67 000	7,29	-	-	-	-	-

Drpl : date de remplissage de la retenue

Dass : date d'assèchement de la retenue

Dmax, Vmax, Smax, Hmax : date, volume du réservoir d'eau, surface du plan d'eau et hauteur d'eau à la digue lorsque la retenue est à sa capacité maximale

Dmin, Vmin, Smin, Hmin : date, volume du réservoir d'eau, surface du plan d'eau et hauteur d'eau à la digue lorsque la retenue est à sa capacité minimale

⁽¹⁾ année incomplète

Au 7 juillet 1993, le volume total de la retenue était de 238 056 m³ avec un volume utile de 232 168 m³ (CAMUS et al., 1995a). Les eaux se sont régulièrement évaporées jusqu'au 7 juin 1994. A sec de juin à août, la retenue se remplit à nouveau le 2 septembre 1994. La pluviométrie partielle (du 22 septembre 1993 à 31 août 1994) a été de 67,5 mm pour 58 jours de pluie (CAMUS et al., 1995b).

La retenue s'est asséchée en 1994, 1997 et 1998 et a débordé au déversoir en septembre 1995. La période de remplissage de la retenue est variable et se produit en août-septembre.

La retenue a été entièrement remplie (volume maximum de 249 000 m³) au cours de l'année hydrologique excédentaire 1995-1996 (576 mm) et l'a été partiellement (volume maximum de 174 000 m³) durant l'année déficitaire 1994-1995 (299 mm). Depuis 1996, on remarquera le faible remplissage de la retenue qui a atteint un volume maximum de 100 000 m³ en 1996-1997, de 46 400 m³ en 1997-1998 et de 137 000 m³ en 1998-1999.

Cette diminution du volume de remplissage serait à relier avec l'accroissement spectaculaire des aménagements anti-érosifs mis en place sur l'ensemble du bassin versant de juillet 1996 à juillet 1997 (NASRI, 1999). Cependant, avec des pluviométries équivalentes en 1997-1998 et en 1998-1999, le remplissage de la retenue a été notablement différent. Celui-ci est non seulement lié à l'abondance des pluies, mais également à leur durée et aux conditions de remplissage de l'année précédente.

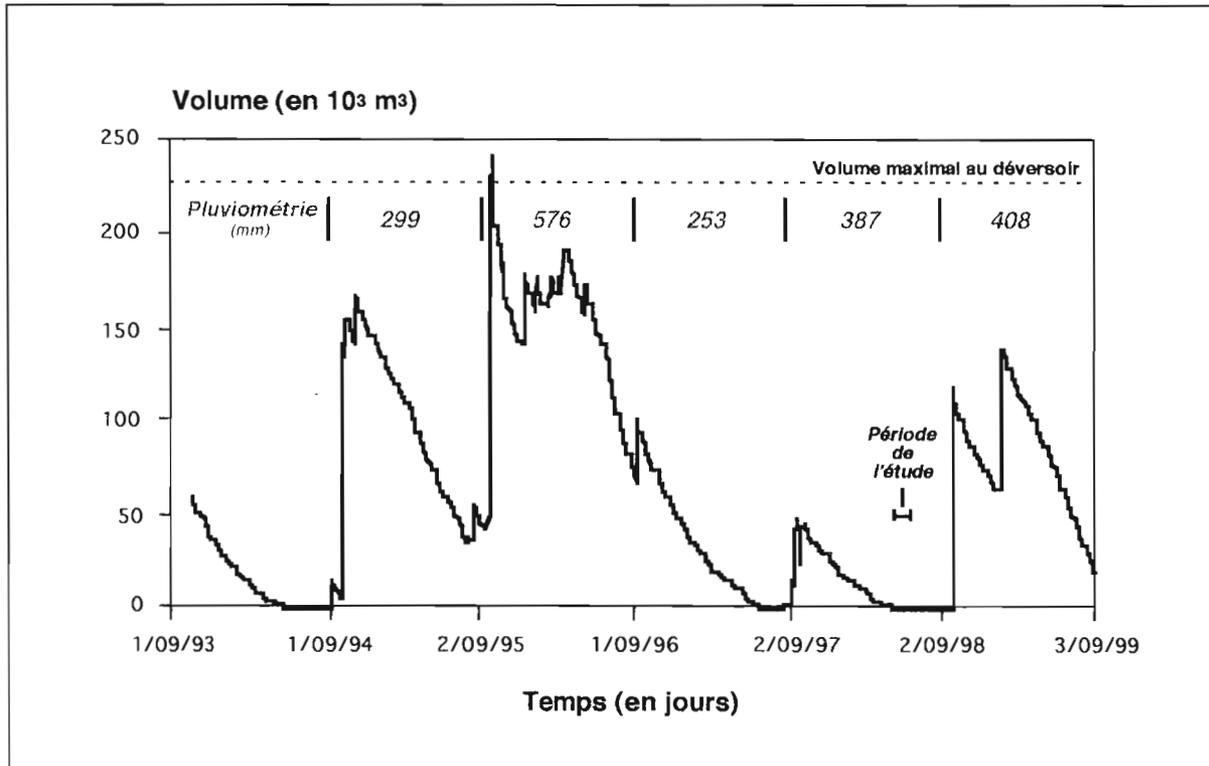


Figure 3

Variation journalière du volume d'eau dans le lac collinaire d'El Gouazine

2.1.5. Qualité chimique des eaux

D'un point de vue géochimique, seules les eaux de la retenue ont été étudiées au cours d'un suivi plurimensuel, de 1994 à 1996 (JOB et al., 1995 ; RAHAINGOMANANA, 1998). Au moment du remplissage de la retenue, l'eau a une conductivité électrique (CE) moyenne de $0,34 \text{ dS m}^{-1}$ qui correspond à une concentration en éléments dissous (CD) moyenne de $0,23 \text{ g L}^{-1}$. Le pH est de 7,81. Cette eau a un faciès chimique **bicarbonaté calcique "mixte"** (50% de bicarbonates, 30% de sulfates, 20% de chlorures ; 60% de calcium et 30% de sodium). Au cours des 2 années hydrologiques, les observations ont montré que la valeur maximale du facteur de concentration (Fc) est de 3,4. L'eau évolue alors vers un faciès **sulfaté-chloruré sodique** par précipitation de la calcite.

En phase évaporatoire simulée, le faciès initial évolue d'abord vers un faciès bicarbonaté magnésique (Fc = 2,5), puis vers un faciès sulfaté-chloruré sodique (Fc = 6,0) et enfin vers un faciès chloruré sodique (Fc = 11,7).

On observe, en août 1996, une diminution modérée de la teneur en oxygène dissout, de 100 à 80% entre 1,5 et 2,5 m de profondeur. Le phosphore total est inférieur à $0,1 \text{ mg L}^{-1}$.

D'après la classification tunisienne des eaux, l'eau de la retenue d'El Gouazine appartient à la classe 1 ($0 < \text{CD} < 1,5 \text{ g L}^{-1}$), c'est-à-dire qu'elle est apte à tous les usages (besoins domestiques, pastoralisme, irrigation...).

Quelques analyses sur les eaux de surface et de nappe situées à proximité de la retenue ont été réalisées au cours d'une mission en 1996 (BELLIER et al., 1998). Elles ont montré le fort contraste entre l'eau de la retenue et l'eau de la nappe alluviale située en aval, notamment en termes de concentration en éléments dissouts.

2.1.6. Envasement du réservoir

Des mesures d'envasement sont faites depuis 1993 pour évaluer les conditions de stockage des eaux de ruissellement dans la retenue (**tableau V**). Le volume d'envasement est estimé à 5 886 m³ au 18 février 1993 ce qui représente 2,5 % du volume global de la retenue. Ces faibles valeurs sont dues à la couverture végétale relativement permanente sur le bassin et à de faibles pentes.

Des travaux anti-érosifs de CES (cordons pierreux, diguettes en terre) ont été mis en place dans la partie moyenne et aval du bassin, sur environ 7,8% de sa surface (CAMUS et al., 1995a). Depuis juillet 1997, ils occupent environ 30% de la superficie du bassin versant (NASRI, 1999).

Tableau V
Caractéristiques d'envasement de la retenue collinaire d'El Gouazine

Période	mesure	Date	Vini	Vséd	Cu	Tenv	Tu	Si	n PET
			(m ³)		(%)		(ha)	(an)	(m ³ /ha/an)
1992-1993	6/7/93	233370	5420	227950	2,3	97,7	9,597	3	1,00
1993-1994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1994-1995	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1995-1996	13/6/96	233370	16810	216560	7,2	92,8	9,597	6	1,55
1996-1997	10/6/97	233370	16030	217340	6,9	93,1	9,597	7	1,27
1997-1998	28/5/98	237030	16030	221000	6,8	93,2	9,597	8	1,11

Vini : volume de la retenue au déversement

Si : surface de la retenue au déversement

Cu : capacité de la retenue utile = Vini - Vséd

Tu : taux d'eau disponible = 100 - Tenv

Vséd : volume de sédiment mesuré

n : nombre d'années depuis le début des mesures

Tenv : taux d'envasement = (Vséd / Vini) x 100

PET : perte en terre annuelle par hectare = Vséd / n

En faisant l'hypothèse que la moyenne de l'envasement sur la période est représentative du régime hydrologique, on estime **la durée de vie de la retenue** (comblement jusqu'à la cote du déversoir) comme étant **supérieure à 100 années**.

2.2. Formations superficielles du bassin versant

Le bassin versant est déjà assez bien connu d'un point de vue géologique, géophysique (ALBOUY et al., 1995 ; BELLIER et al., 1997 ; MARTIRE et ALBOUY, 1997 ; MONTOROI et al., 1997), pédologique (BRUNISSO, 1967?).

2.2.1. Formations géologiques et aquifères

Le bassin versant se situe sur la bordure est du synclinal d'Ousseltia dont l'axe est orienté sud-ouest nord-est et qui est caractérisé par un substrat marno-calcaire et gréseux (FOURNET, 1969).

Les mouvements tectoniques ont redressé les couches géologiques sur le versant est du bassin, le pendage étant vertical ou subvertical (CASTANY, 1951 ; JAUZEIN, 1967).

La partie sud-est du bassin est occupée par les formations éocène qui comprennent une formation à dominante carbonatée de marnes et de calcaire à nummulites (Yprésien ou lutétien inférieur) et une formation à dominante argileuse de marnes et de bancs calcaires à huîtres (lumachelles à Ostrea du lutétien supérieur). La partie nord-ouest est formée par la base des formations oligocène dont le faciès détritique est à dominance gréseuse (formation fortuna).

Comblé au quaternaire, le synclinal a été entaillé par les oueds qui charrient les produits de l'érosion et qui les déposent en alluvions grossiers. Des colluvions, constitués également de matériaux grossiers (graviers, cailloux...) ont recouverts de grandes surfaces et ont évolué pédologiquement (encroûtements calcaires).

Un aquifère régional s'écoule de la chaîne atlasienne vers les zones endoreïques (localement appelées sebkhas) de la plaine de Kairouan, situées à l'est (KARRY et FAKHFAKH, 1998). Dans le bassin d'El Gouazine, il s'agit plutôt d'une nappe phréatique superficielle dont la distribution spatiale est généralisée.

Dans le bassin versant d'El Gouazine, des affleurements de grès, de calcaire, de lumachelles (à huîtres et à gastéropodes) et de marnes ont été observés en plusieurs endroits (**figure 4** et **planche photographique II**).

2.2.2. Types de sol

La **figure 5** décrit les principaux sols rencontrés dans le bassin versant.

La majorité des sols est représentée par les sols calcimagnésiques carbonatés (CPCS, 1967) représentant 62,8% de la surface totale du bassin versant : ils comprennent les rendzines modales ou rendosols (AFES, 1995) pour 56,8%, et les sols bruns calcaires modaux ou calcosols (AFES, 1995) pour 6%.

Au niveau des affleurements géologiques, on a des sols minéraux bruts non climatiques bruts d'érosion carbonatés (CPCS, 1967) ou lithosols (AFES, 1995) couvrant 7,3% du bassin versant.

Sur les pentes, on observe des sols peu évolués non climatiques d'érosion régosoliques (CPCS, 1967) ou régosols d'érosion (AFES, 1995) occupant 8,4% du bassin versant.

Dans les thalwegs, des sols peu évolués non climatiques d'apport (CPCS, 1967) ou fluvisols (AFES, 1995) se sont développés : ils présentent un faciès modal (17,9% de la surface du bassin), hydromorphe (1,8%) ou vertique (1%).

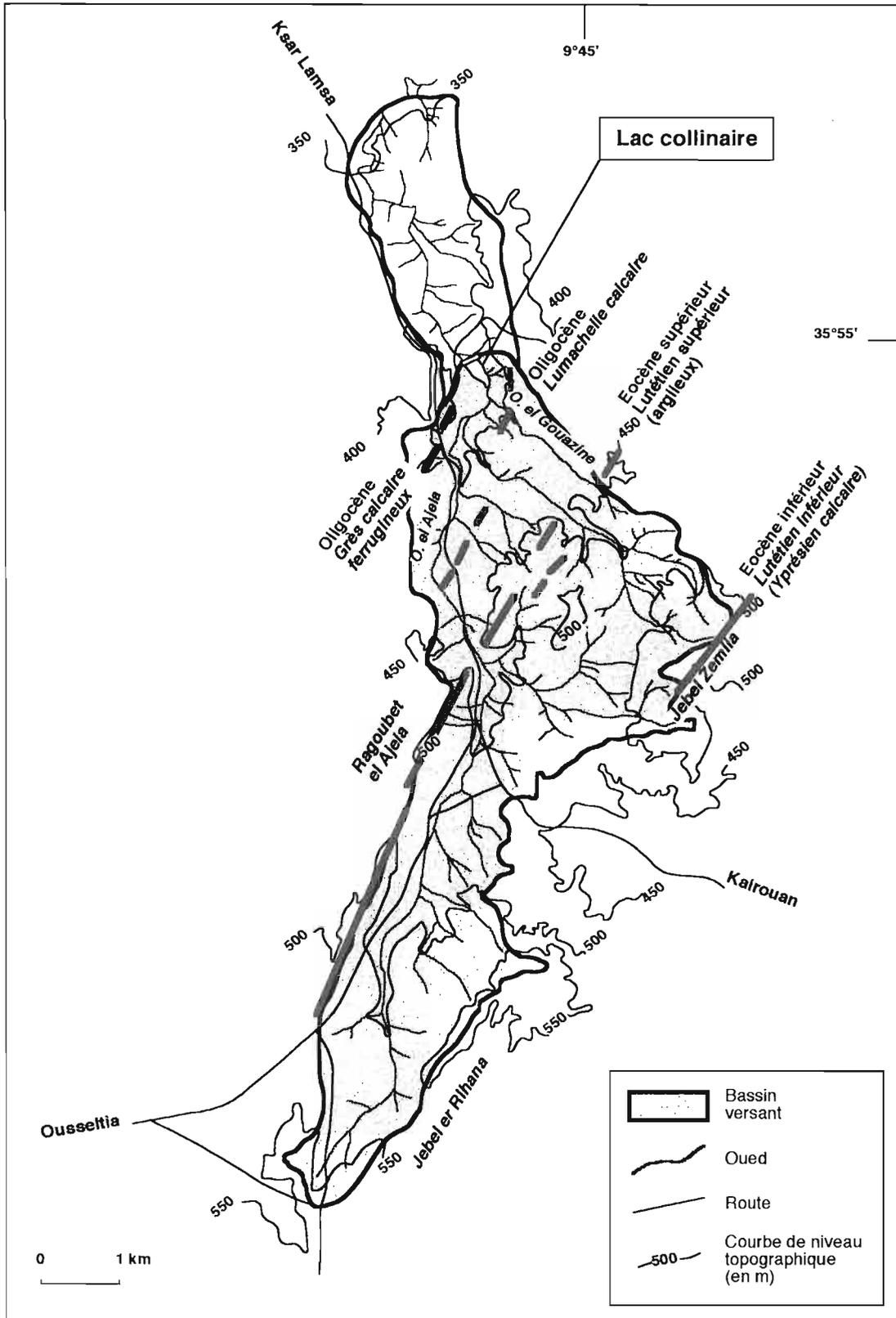
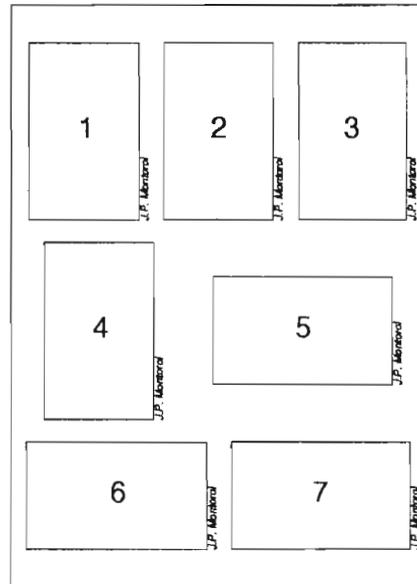


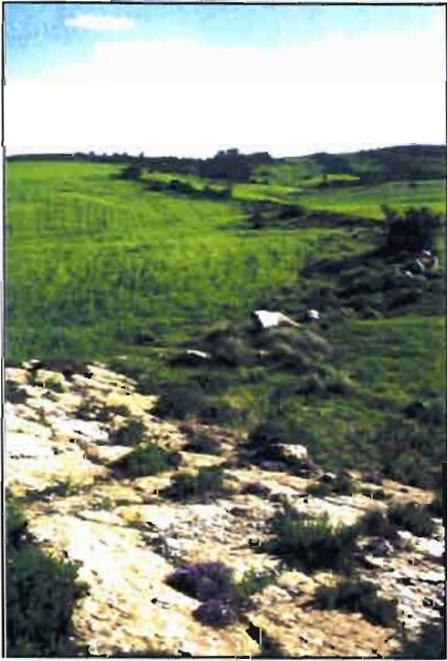
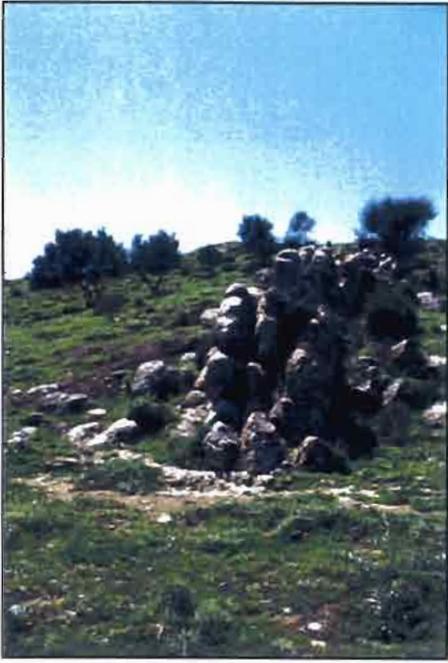
Figure 4
Affleurements géologiques du bassin versant d'El Gouazine

Planche photographique II

Formations superficielles



- 1 Affleurement subvertical de lumachelles à gastéropodes
- 2 Affleurement subvertical de lumachelles à huîtres
(près du site s3)
- 3 Affleurement subvertical de calcaire compact
(près du puits w4)
- 4 Affleurement subhorizontal de grès calcaire compact
(près du site s2)
- 5 Affleurement subhorizontal de calcaire compact
et de lumachelles occupé par des oliviers
(près du puits w10)
- 6 Affleurement subvertical de marnes gypseuses recouvertes
par des colluvions (versant est du lac, dans un lit d'oued)
- 7 Détail de l'interface colluvion-marne décrite en 6



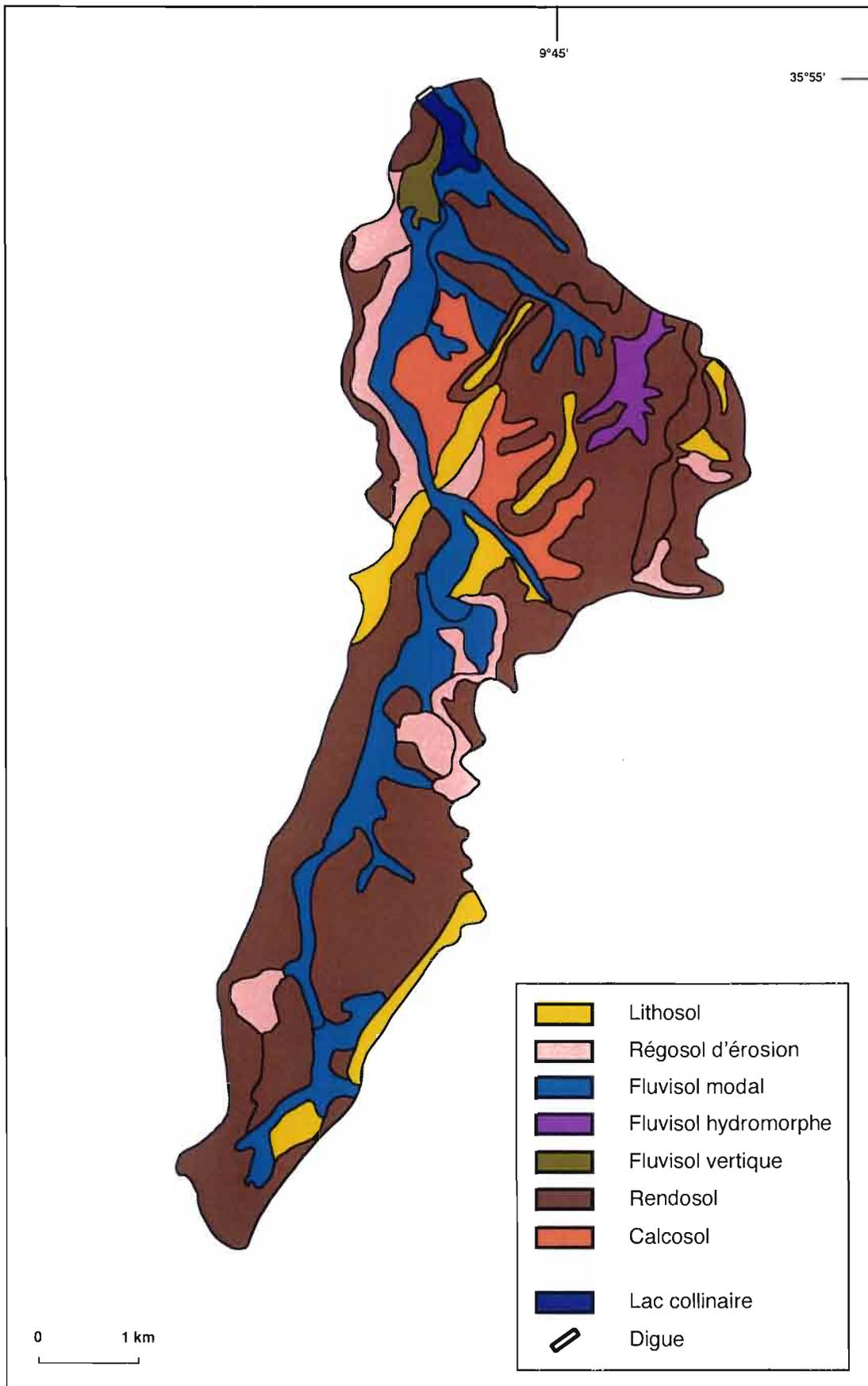


Figure 5
 Carte des sols du bassin versant d'El Gouazine
 (réalisée par P. ZANTE et T. MANSOURI, 1998)

2.3. Occupation des sols

La **planche photographique III** présente les différents modes d'occupation des sols dans le bassin versant d'El Gouazine.

Le bassin versant est scindé en deux zones principales (**figure 6**) : une zone incluant une forêt de pin d'Alep, une forêt dégradée claire et une garrigue à caroubier et à lentisque, et occupant environ 45% de la surface totale ; une zone occupée par les cultures (notamment les céréales et les oliviers) et les jachères couvrant environ 55% de la surface totale. Le **tableau VI** donne la superficie et l'importance relative de chaque mode d'occupation des sols.

En aval de la retenue, des périmètres irrigués se sont développés en utilisant les eaux de plusieurs puits alimentées par un aquifère alluvial devenu permanent depuis la mise en service du lac (PERNIN, 1998). Ils sont exploités pour le maraîchage (tomate, piment, concombre, melon) et l'arboriculture (amandier, olivier).

Les terres cultivées du bassin versant sont sensibles à l'érosion et contribuent par le ruissellement, notamment au début de la saison des pluies automnales, au remplissage de la retenue en eau et en sédiments.

De juillet 1996 à juillet 1997, de nombreux aménagements anti-érosifs (tabias) ont été construits mécaniquement par la DCES sur l'ensemble du bassin versant, soit une surface aménagée de 536,5 ha. Il s'agit de levées de terre ayant une longueur moyenne de 100 m, une hauteur d'1,5 m et une distance moyenne de 25 m entre elles sur un versant. Ces aménagements sont destinés à retenir les eaux de ruissellement et à favoriser leur infiltration dans les sols. Ils ont été installés principalement sur les terres déjà cultivées (sols bruns calcaires sur marnes), mais également sur les terres (sols calcaires encroûtés) et destinées à une future mise en culture.

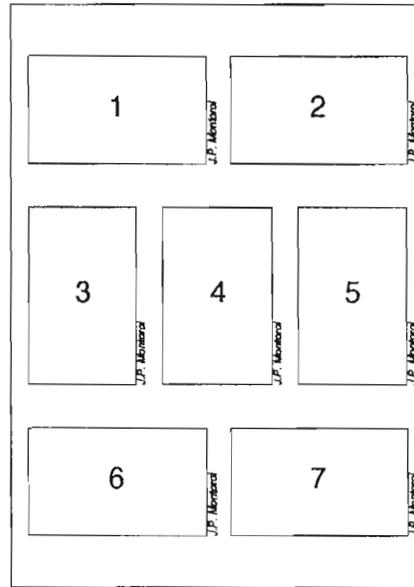
Cependant, ils semblent perturber le remplissage annuel du réservoir (NASRI, 1999). Il y a donc contradiction entre la volonté de maintenir les fonctions du lac collinaire et celle de préserver les sols contre l'érosion. Il faut donc rechercher la densité spatiale limite des aménagements anti-érosifs n'entraînant pas l'assèchement prématurée du réservoir. Des études sur le fonctionnement hydrodynamique de ces aménagements et leur influence sur l'alimentation de la retenue sont en cours (NASRI et ZANTE, 1999).

Tableau VI
Distribution spatiale de l'occupation des sols du bassin versant d'El Gouazine
(établie par ZANTE et MANSOURI, 1998)

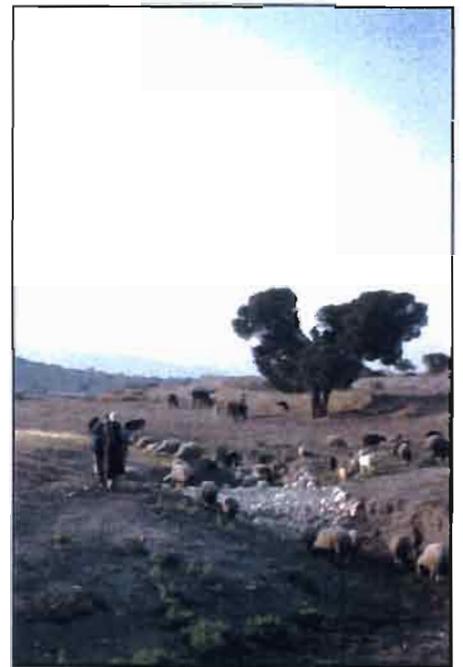
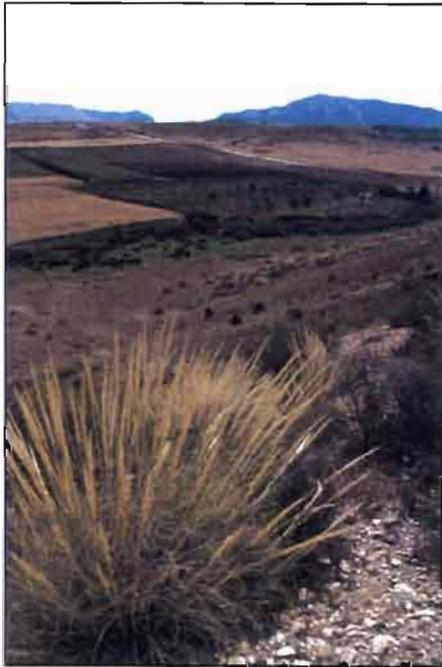
Mode d'occupation des sols	Superficie	Taux
	(ha)	(%)
Forêt dense (pin d'Alep)	166,5	9,2
Forêt dégradée claire	200,9	11,1
Alfa	193,7	10,7
Garrigue à parcours	322,2	17,8
Cultures jachères	724,0	40,0
Arboriculture	30,8	1,7
Arboriculture (oliviers + céréales)	85,1	4,7
Lit d'oued et lentisque	72,4	4,0
Lac collinaire (barrage et retenue)	14,4	0,8
Total	1810,0	100,0

Planche photographique III

Occupation des sols



- 1 Vue générale de l'occupation des sols en aval du lac collinaire
Au premier plan, végétation d'alfa en sommet de versant et,
au second plan, cultures irriguées dans le thalweg
- 2 Cultures pluviales (blé, orge) dans le bassin versant
A l'arrière-plan, quelques oliviers et caroubiers
- 3 Périmètres irrigués (arboriculture, maraîchages) en aval du lac
- 4 Forêt claire de pin d'Alep et strate herbacée composée d'alfa
- 5 Pastoralisme dans la partie amont du bassin versant
Noter le lit d'oued protégé contre l'érosion par un gabionnage
(empierrement de la ravine)
- 6 Banquette anti-érosive (tabia) élevée dans le bassin versant
sur sol brun calcaire
- 7 Banquette anti-érosive (tabia) élevée dans le bassin versant
sur encroûtement calcaire



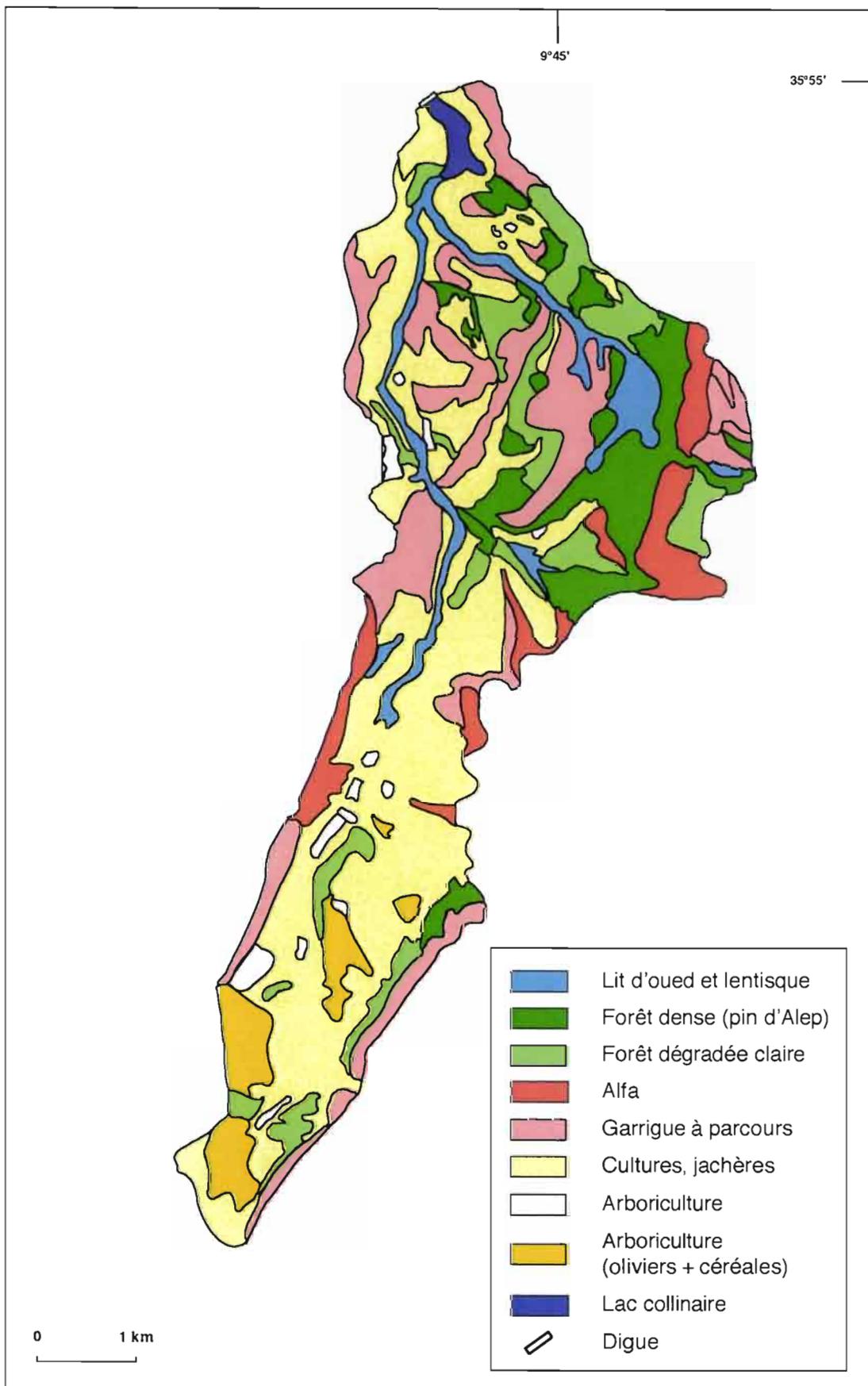


Figure 6
 Carte d'occupation des sols du bassin versant d'El Gouazine
 (réalisée par P. ZANTE et T. MANSOURI, 1998)

3. METHODES D'ETUDE

Au cours de la mission de terrain, deux types d'échantillonnage ont été réalisés :

- l'un est relatif à un ensemble de 6 lacs collinaires s'étendant du Cap-Bon à la frontière algéro-tunisienne (**figure 1**). Au cours de 3 journées de tournée (15, 19 et 20 mai 1998), seules les eaux de retenue ont été prélevées au niveau de la digue du barrage.

- l'autre concerne uniquement le site d'El Gouazine pour lequel des échantillons d'eaux (retenue et nappe), de sols, de sédiments et de roches ont été collectés, les 14, 16-18 et 21-23 mai 1998, à l'intérieur et aux alentours du bassin versant.

On rappellera que la retenue était presque asséchée au moment de la mission.

La **planche photographique IV** donne un aperçu des différents puits rencontrés dans le bassin versant d'El Gouazine et à proximité.

3.1. Méthodes de terrain

3.1.1. L'échantillonnage des eaux

❖ *Les lacs collinaires*

Un échantillon d'eau de la retenue a été collecté sur chacun des sites suivants : **Fidh Ali, Kamech, Sbahia, M'Richet el Anze, M'Rira** et **Es Senega**. Sur le site de M'Rira, un prélèvement supplémentaire a été fait dans l'écoulement aval qui est alimenté par l'aquifère alluvial.

Le prélèvement s'est fait à l'aide d'un tube télescopique en aluminium long de 3 m pour éviter les contaminations de bordure et portant à l'extrémité un flacon en plastique polyéthylène de 500 mL.

❖ *Le site d'El Gouazine*

La **figure 7** indique l'emplacement des échantillons d'eau collectés, qui comprennent :

- 4 échantillons d'eau de surface (**s1/1, s1/2, s2 et s3**), dont deux dans la retenue presque à sec (**s1 et s2**), ont été prélevés également avec la canne télescopique de 3 m.

- 17 prélèvements d'eau de nappe ont été réalisées dans 11 puits (**w1, w2, ..., w10, w11**) à l'aide d'une bouteille-préleveur de 1 L, que l'on a immergée à 1 m sous la surface et au fond de certains puits. La profondeur maximale atteinte depuis la surface varie de 3 m à 15 m. Lorsque 2 prélèvements ont été faits, l'indexation des échantillons est faite de la manière suivante, par exemple, **w7/1** pour la surface (- 1 m) et **w7/2** pour le fond.

- 15 prélèvements selon un profil vertical de 15 m ont été faits, tous les mètres, dans les puits aval (**w1**) le plus proche de la retenue. Il s'agit des échantillons **w1/1, w1/2, ..., w1/14, w1/15**.

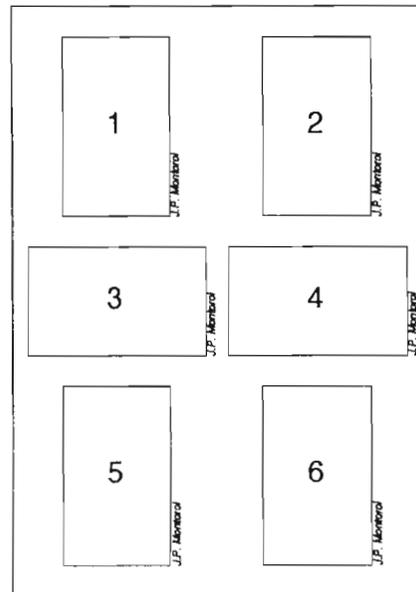
- 4 échantillons d'eau de nappe, située à faible profondeur, ont été prélevés dans 4 des 6 fosses pédologiques creusées en amont et en aval de la retenue :

. 2 prélèvements dans chacune des fosses **p4** et **p6** situées en amont de la retenue dans les sédiments de la retenue. L'échantillon **p4** ne correspond pas exactement à une nappe mais à une eau interstitielle exudant des sédiments.

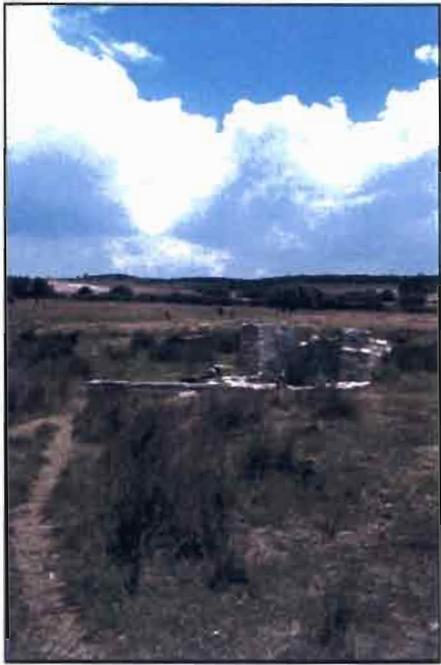
. 2 prélèvements dans chacune des fosses **p1** et **p2** situées en aval dans le lit tari de l'ancien oued.

Planche photographique IV

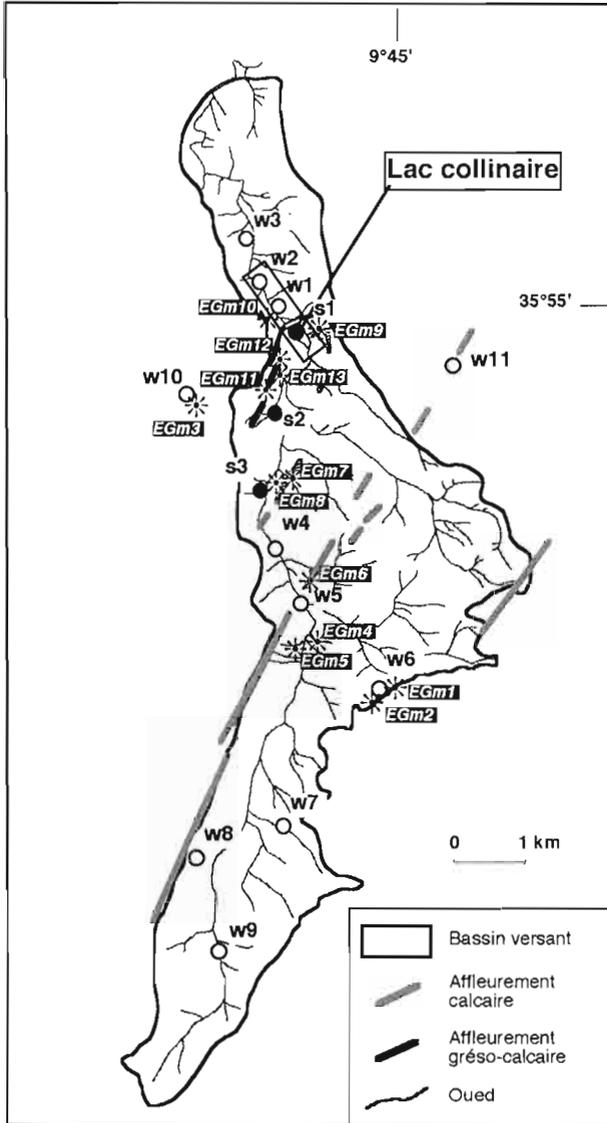
Sites de prélèvement des eaux de nappe



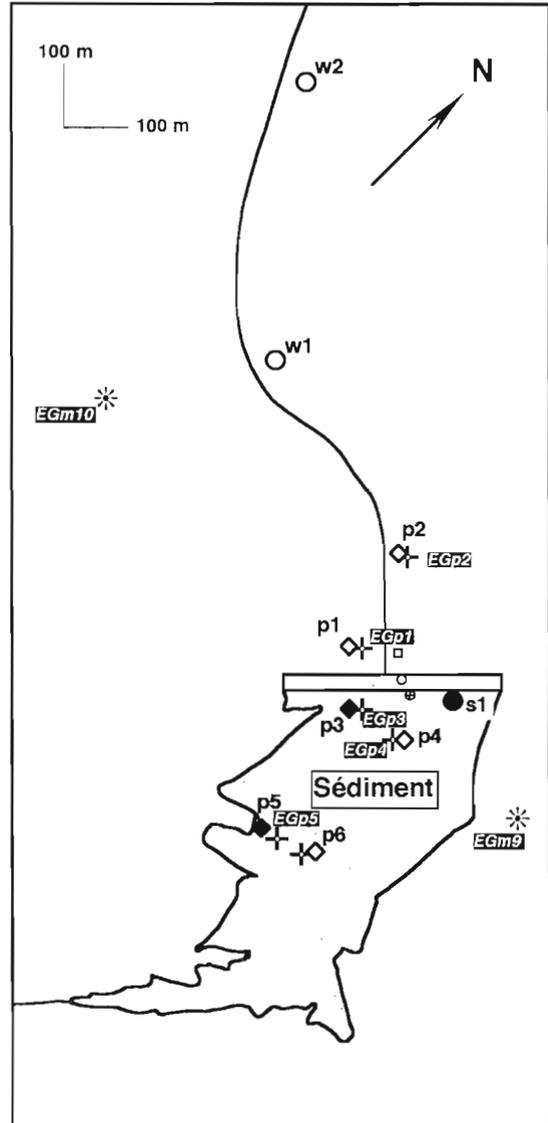
- 1 Puits w4 situé dans le lit de l'oued principal (partie moyenne du bassin versant) et creusé dans les marnes gypseuses
- 2 Puits w5 situé dans le lit de l'oued principal (partie moyenne du bassin versant) et creusé dans un affleurement calcaire subvertical
- 3 Puits w6 situé sur le sommet d'une colline (partie moyenne du bassin versant) et creusé dans des formations calcaires (encroûtement superficiel et roche sous-jacente)
- 4 Puits w7 situé en bordure d'un lit d'oued (partie amont du bassin versant) et creusé dans des dépôts alluviaux
- 5 Puits w1 situé dans le lit de l'oued principal (aval du lac-réservoir) et creusé dans les marnes gypseuses
Noter, dans la cabane, la pompe hydraulique servant à alimenter le réseau d'irrigation
- 6 Puits w10 situé en dehors du bassin versant et à proximité d'un affleurement calcaire subhorizontal



Echelle du bassin versant



Echelle du lac collinaire



<i>Eau de nappe</i>	<i>Eau de surface</i>	<i>Matériau</i>
w2 ○ puits	s3 ● oued + lac	EGm9* roche
p4 ◇ fosse		EGm5+ sol-sédiment

◆ Fosse sans eau de nappe
⊕ Echelle limnimétrique (niveau zéro de référence)
○ Borne topographique (10 m)
□ Vanne de vidange du lac
▭ Digue du barrage
— Lit d'oued
~ Niveau d'eau maximal

Figure 7
Localisation de l'échantillonnage spatialisé des eaux, des sols et des roches (bassin versant d'El Gouazine)

3.1.2. L'échantillonnage de sol, de sédiment et de roche

Des échantillons ont été prélevés à différents endroits du bassin versant d'El Gouazine au voisinage des lieux de prélèvements d'eau (**figure 7**) :

Treize roches ont été échantillonnées (6 marnes, 4 calcaires, 1 encroûtement calcaire et 2 grès calcaire) en différents lieux du bassin versant, parfois au voisinage de puits et de regards de nappe. Les échantillons sont libellés **EGm1, EGm2, ..., EGm12, EGm13**.

Sept prélèvements de sol et de sédiment ont été réalisés au voisinage de la retenue :

- *en aval de la retenue* :

- . 1 échantillon de sol dans chacun des 2 profils, **EGp1** (à 2,50 m de profondeur) et **EGp2** (à 2,00 m de profondeur) ;

- *en amont de la retenue* :

- . 3 échantillons de sédiment dans 2 profils situés en amont de la retenue, **EGp3** (à 60-75 cm et à 125-150 cm de profondeur) et **EGp4** (à 110-120 cm de profondeur) ;
- . 2 échantillons de sol dans la tranchée **EGp5** creusée en rive gauche de la retenue (à 20-30 cm et à 50-70 cm de profondeur).

Ces prélèvements sont destinés à être analysés au laboratoire pour connaître les caractéristiques chimiques (éléments majeurs et traces) et minéralogiques des phases minérales qui sont au contact des eaux percolant dans les différents compartiments structuraux du bassin versant.

3.1.3. Les mesures de terrain sur les eaux

❖ *Avant filtration des échantillons d'eau*

Pour chaque échantillon d'eau, les mesures de la conductivité électrique (CE à 25°C), du pH, de la température et de la teneur en oxygène dissout ont été réalisées au moment du prélèvement. Les appareils utilisés sont de marque WTW (LF 330 pour le conductivimètre, pH 340 pour le pH-mètre et OXY 330 pour l'oxymètre), chacun possédant une sonde de température intégrée à l'électrode. Les mesures de CE sont compensées automatiquement en température. La calibration des appareils est effectuée au début de chaque journée de mesure.

Un volume de 1,5 L (eau de nappe et eau de surface) ou d'1 L (profil vertical) est prélevé à chaque fois et est réparti comme suit :

- 250 mL pour filtration à 0,2 μm ;
- 50 mL pour la mesure du titre alcalimétrique complet (TAC ou alcalinité totale) : on titre la solution par de l'HCl 0,1 N en présence d'un indicateur coloré, le méthylorange. Le virage au rouge correspond à la neutralisation des bicarbonates à pH 4,3.
- environ 1 L (ou 0,7 L à chaque niveau du profil vertical) pour précipitation des carbonates et des sulfates de baryum en milieu basique. A pH 9, obtenu par ajout de soude N/10, on mélange l'échantillon avec du BaCl₂, la quantité ajoutée dépendant de la valeur du TAC mesurée préalablement. On laisse décanter le précipité obtenu, on siphonne le surnageant et on conserve la phase solide dans un flacon de 150 mL pour analyse ultérieure des isotopes ¹³C et ³⁴S au laboratoire.

❖ *Après filtration des échantillons d'eau*

La filtration a été réalisée à l'aide d'une unité Nalgene en polysulfone de 250 mL et de filtres en nitrate de cellulose (\varnothing 47 mm, porosité 0,2 μm). Seuls la CE, le pH et la température ont été mesurées pour chaque échantillon d'eau filtrée.

Sur le volume filtré, un échantillonnage spécifique a été effectué pour le laboratoire :

- prélèvement de 100 mL pour l'analyse des ions majeurs ;
- prélèvement de 2 x 8 mL pour l'analyse des isotopes stables de l'eau ;
 - conservation du filtre dans une boîte plastique "pétrislide" (\varnothing 47 mm) initialement tarée, pesée et analyse minéralogique éventuelle des dépôts filtrés ayant été au contact des eaux.

La **planche photographique V** montre quelques méthodes de prélèvement et de mesure mises en oeuvre sur le terrain d'El Gouazine.

3.2. Méthodes de laboratoire

Les analyses chimiques et minéralogiques ont été faites à l'IRD-Bondy sauf les analyses isotopiques effectuées à l'Université Paris XI-Orsay, dans le laboratoire de J.L. MICHELOT.

3.2.1. Analyse chimique des eaux

❖ *Les éléments majeurs (bilan ionique)*

Un bilan ionique a été réalisé par chromatographie ionique (DX120, Dionex) pour un total de 37 eaux filtrées sur le terrain, comprenant 7 eaux pour les lacs collinaires (6 eaux de surface et 1 eau de nappe) et 30 eaux pour le site d'El Gouazine (4 eaux de surface, 4 eaux de nappe prélevées dans les fosses, 17 eaux de nappe prélevées dans les puits et 5 eaux de nappe prélevées dans le puits w1 selon un profil vertical). Les cations dosés sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et NH_4^+ et les anions $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ (TAC), F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et HPO_4^- . La limite de détection est de $0,05 \text{ mg L}^{-1}$. La CE à 25°C et le pH ont été également mesurés.

L'élément Si a été dosé séparément par spectrométrie d'émission plasma (ICP-AES, Liberty 200, Varian), la limite de détection étant de 5 mg L^{-1} .

❖ *Les éléments isotopiques*

Parmi les eaux prélevées sur le site d'El Gouazine, 20 eaux sont l'objet d'une analyse isotopique des teneurs en ^{18}O et en ^2H (ou deutérium, D), ainsi que des teneurs en ^{13}C des carbonates précipités en milieu basique par du BaCl_2 en excès. Les analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre de masse IRMS en utilisant la méthode d'EPSTEIN-MAYEDA (1953) pour ^{18}O , la réduction par le Zn (COLEMAN et al., 1982) pour ^2H et l'attaque à l'acide orthophosphorique d'un précipité de BaCO_3 (Mc CREA, 1950) pour ^{13}C .

Les résultats des analyses isotopiques sont exprimés en unité δ (parts pour mille ou ‰) par rapport à un étalon standard international. Pour un élément isotopique i donné, l'unité δ est définie par la relation :

$$\delta_i = ((R_i^{\text{Ech}} - R_i^{\text{Std}}) / R_i^{\text{Std}}) 1000 = ((R_i^{\text{Ech}} / R_i^{\text{Std}}) - 1) 1000$$

où R_i^{Ech} est le rapport isotopique de l'échantillon c'est-à-dire le rapport entre la teneur en isotopes lourds et la teneur en isotopes légers ; R_i^{Std} est le rapport isotopique absolu de l'étalon standard international.

Les rapports isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène sont $R_{\text{O}} = ^{18}\text{O} / ^{16}\text{O}$ et $R_{\text{H}} = ^2\text{H} / \text{H}$. L'étalon standard est le V-SMOW (Vienna-Standard Mean Oceanic Water) avec pour rapports isotopiques absolus $R_{\text{O}}^{\text{SMOW}} = 2005,20 / 10^6$ (BAERTSCHI, 1976, in HOEFS, 1997) et $R_{\text{H}}^{\text{SMOW}} = 155,76 / 10^6$ (HAGEMANN et al., 1970, in HOEFS, 1997).

Pour le carbone, $R_{\text{C}} = ^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ et l'étalon standard est le V-PDB (calcite biogénique d'un rostre d'*americana Belemnitella*, provenant de la formation Pee Dee (Crétacé supérieur), Caroline du Nord, USA) avec pour rapport isotopique absolu $R_{\text{C}}^{\text{PDB}} = 11237,2 / 10^6$ (CRAIG, 1957, in HOEFS, 1997).

Les incertitudes analytiques sont de 0,2‰ pour ^{18}O et ^{13}C , et de 2‰ pour ^2H .

❖ Les éléments-traces

Cinq échantillons d'eaux représentatifs (s1/2, p4, w4 et w5) ont été analysés par ICP-MS (Varian Ultramass 700) pour une détermination systématique des éléments-traces (Zn, Co, Ba, Ni, Cu, Cr, Mn, Mo, Pd, Sc, Ti, U, V, Fe). Il s'agit en fait d'une analyse semi-quantitative car on ne calibre pas finement l'appareil pour chaque élément.

Selon les éléments, la limite de détection (LD) varie de 0,01 à 0,1 $\mu\text{g L}^{-1}$ ce qui correspond à une limite de quantification (LQ) variant de 0,06 à 0,6 $\mu\text{g L}^{-1}$ (avec $LQ = 5 LD$).

On rappelle qu'en solution, 1 ppm \approx 1 mg L^{-1} et 1 ppb \approx 1 $\mu\text{g L}^{-1}$.

3.2.2. Analyse chimique des sols, des sédiments et des roches

Après séchage à l'air, la moitié de chaque échantillon a été broyée (broyeur à mâchoires ou pilon dans un mortier en agate) et tamisée en deux fractions, l'une étant inférieure à 2 mm et l'autre inférieure à 200 μm . Pour les sols et les sédiments, la teneur et le pourcentage pondéral en éléments grossiers dont la taille est supérieure à 2 mm (refus) ont été mesurés.

La seconde moitié de chaque échantillon a été conservée pour des analyses complémentaires et pour référence.

Avec la fraction inférieure à 200 μm , on a effectué :

- une analyse minéralogique : les minéraux ont été déterminés par l'analyse diffractométrique des rayons X (RX) sur une poudre non orientée. Le diffractomètre Siemens D500 est équipé d'une anticathode au Cu (raie $K\alpha$), d'un compteur à scintillations et d'un passeur automatique d'échantillons. Les mesures sont effectuées sur le domaine $2\theta = 2$ à 70° . L'interprétation des diffractogrammes fait référence à la base de données PDF-ICDD.

Les minéraux argileux ont été caractérisés plus spécifiquement. La fraction argileuse est séparée par sédimentation après une mise en suspension par agitation en retournement dans de l'eau permutée et un séchage à l'air du dépôt. Pour chaque échantillon préparé, un diffractogramme RX a été réalisée à partir du dépôt orienté, du dépôt orienté et glycérolé et du dépôt orienté et chauffé à 490°C .

- des analyses chimiques :

. l'analyse totale des éléments majeurs (TiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO , CaO , Al_2O_3 , SiO_2) est effectuée par fusion LiBO_2 (métaborate de lithium) et celle de éléments-traces, tels que Zn, Co, Ba, Ni, Sr, Cu, et Cr par attaque acide (fluorhydrique HF, perchlorique HClO_4 et chlorhydrique HCl). Le dosage se fait par ICP-AES (Liberty 200, Varian). Le mode opératoire de ces 2 analyses est donné en **annexe A1**.

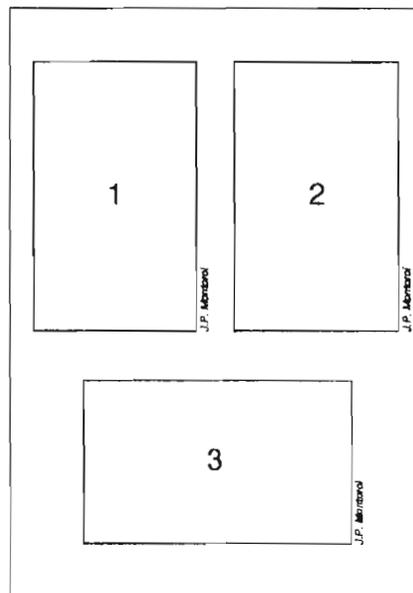
. le dosage de l'azote et du carbone total est réalisé par chromatographie gazeuse (analyseur élémentaire CHNS, EA1108 W, Fisons, Carlo Erba).

Avec la fraction inférieure à 2 mm, on a effectué une analyse granulométrique des matériaux argileux (marnes, sols et sédiments) à l'aide d'un microgranulomètre automatique Sedigraph (DELAUNE et al., 1991).

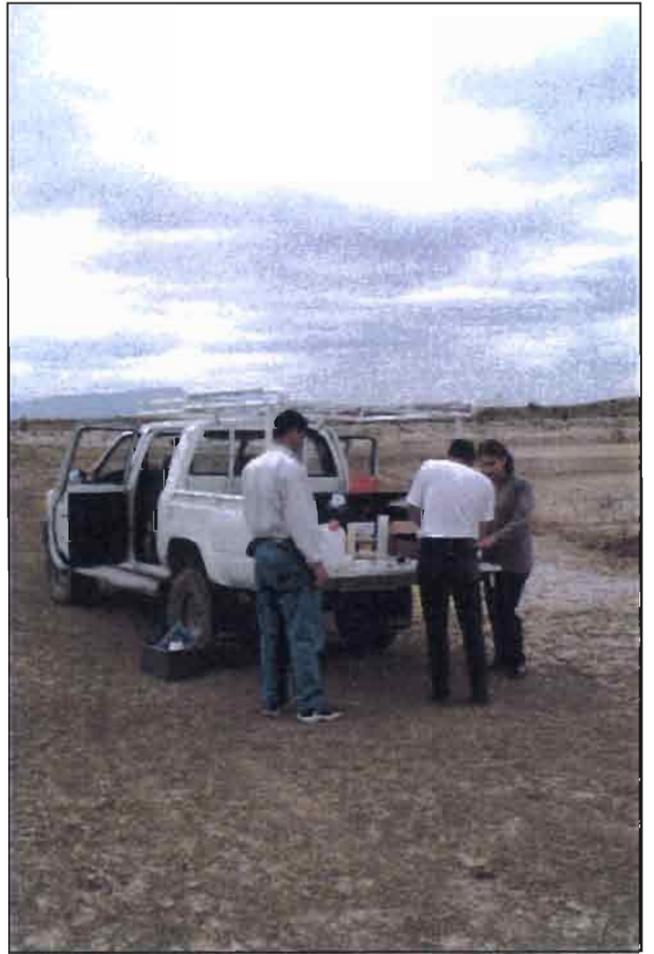
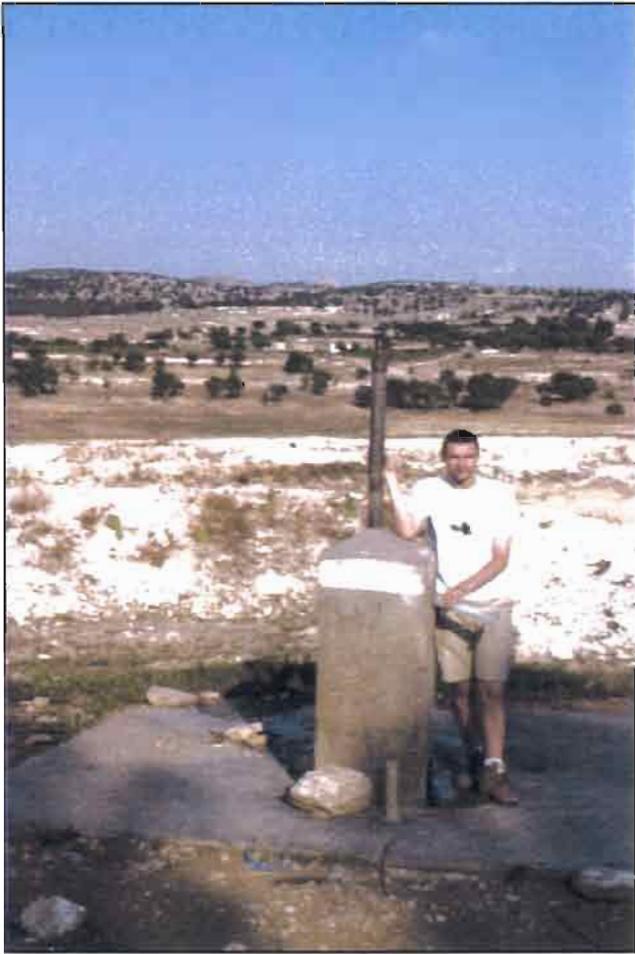
Remarque : on rappelle en **annexe A2** la classification des éléments chimiques de la croûte terrestre. MITCHELL (1964) a défini les éléments-traces comme étant les éléments présents à des teneurs moyennes inférieures à 1000 ppm ce qui équivaut à $0,1 \text{ g (100 g)}^{-1}$ ($1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{g g}^{-1} = 10^{-4} \text{ g (100 g)}^{-1}$). Ils sont nommés également éléments en traces ou oligo-éléments.

Planche photographique V

Mesures de terrain



- 1 Prélèvement d'eau à la fontaine w7 située à proximité d'un affleurement calcaire
- 2 Mesures sur le terrain de paramètres physico-chimiques (pH, CE, O₂, TAC)
- 3 Prélèvement d'eau de nappe (puits w9) à l'aide d'une bouteille en verre d'un litre



4. CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX DE LACS COLLINAIRES

4.1. Caractéristiques chimiques mesurées sur le terrain

Les caractéristiques chimiques des eaux de retenue sont relativement voisines (**tableau VII**), tous les lacs étant situés dans des formations géologiques datant de l'éocène.

Les eaux sont faiblement concentrées, les valeurs de CE étant comprises entre 0,3 dSm⁻¹ (M'Richet el Anze) et 1,5 dS m⁻¹ (Sbahia). Seul le lac de Fidh Ali est très concentré (CE = 5,5 dS m⁻¹), car les marnes du bassin versant sont riches en gypse. En aval de la retenue de M'Hrira, les eaux de l'oued sont beaucoup plus concentrées que celles de la retenue, ce qui suggère une alimentation par une nappe souterraine plutôt que par la retenue elle-même.

Le pH est alcalin avec des valeurs comprises entre 8,7 (Kamech) et 10,1-10,2 (El Gouazine et M'Richet el Anze). L'alcalinité varie entre 0,65 mmole_c L⁻¹ à Sbahia et 2 mmole_c L⁻¹ à Kamech et à El Gouazine.

Hormis le lac de Kamech, les eaux sont bien oxygénées, les valeurs variant de 105% ou 9,5 mg L⁻¹ (Sbahia) à 162% ou 12,3 mg L⁻¹ (El Gouazine).

Tableau VII
Caractéristiques chimiques des eaux de lacs collinaires en Tunisie centrale
(mesures sur échantillons non filtrés)

Date	Lac	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC (mmol _c L ⁻¹)	
					(mg L ⁻¹)	(%)		
14/05/98	El Gouazine	1	0,859	10,13	28,7	12,28	161,8	2
		2	0,878	9,93	29,2	9,05	122,8	1,9
15/05/98	Fidh Ali	5,510	9,73	27,5	9,50	132,0	1	
19/05/98	Kamech	0,891	8,70	21,4	8,30	92,2	2	
	Sbahia	1,531	9,43	23,0	9,45	105,0	0,65	
20/05/98	M'Richet el Anze	0,296	10,16	23,8	11,59	155,2	1,3	
	M'Hrira	1	0,368	9,92	19,8	9,53	114,5	0,75
		2 (aval)	8,210	9,39	20,8	10,77	124,6	2,50
	Es Senega	0,636	9,42	23,1	10,82	132,9	0,95	

CE_{25°C} conductivité électrique mesurée à 25°C

TAC titre alcalimétrique complet

4.2. Analyses chimiques

Les analyses chimiques sont données en **annexe A3**.

Les faciès chimiques, présentés dans le diagramme de Piper (**figure 8**) à partir des données du **tableau VIII**, montrent une grande diversité, depuis un faciès sulfaté-calcique (El Gouazine et M'Hrira) au faciès chloruré-sodique (Kamech et Sbahia) en passant par des faciès intermédiaires (Es Senega, Fidh Ali et M'Richet el Anze). Pour le lac de M'Hrira, le faciès cationique des eaux de la retenue et de l'oued aval est respectivement calcique et sodique, tandis que le faciès anionique est sulfaté dans les deux cas.

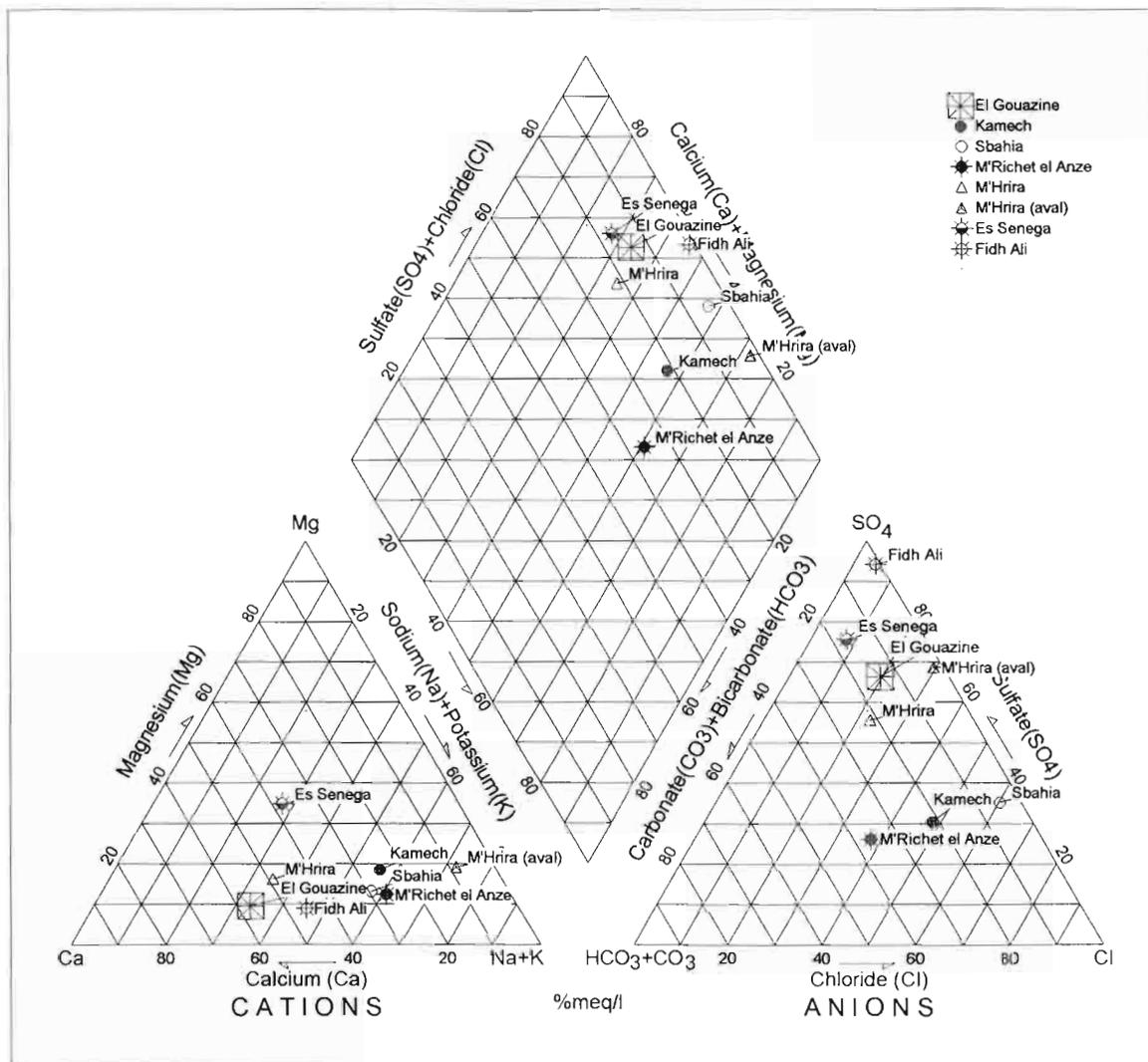


Figure 8

Diagramme de Piper relatif aux eaux de lacs collinaires en Tunisie centrale
(les valeurs ioniques sont données en pourcentage de milliéquivalents par litre)

Tableau VIII
Faciès chimiques des eaux de lacs collinaires en Tunisie centrale

Lac	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Faciès
	(%)				(%)			
El Gouazine 1	57,1	9,5	30,2	3,2	66,3	19,7	14,0	Sulfaté/calcique
2	59,8	8,6	29,2	2,4	63,0	16,7	20,3	Sulfaté/calcique
Fidh Ali	45,5	8,9	44,9	0,7	94,2	4,8	1,0	Sulfaté/calcisodique
Kamech	25,0	18,5	55,2	1,3	30,3	48,2	21,5	Chloruré/sodique
Sbahia	29,5	13,2	57,0	0,3	35,1	60,3	4,6	Chloruré/sodique
M'Richet el Anze	26,8	12,4	60,0	0,8	26,2	37,8	36,0	Mixte/sodique
M'Hrira 1	49,1	16,3	34,0	0,6	55,7	22,7	21,6	Sulfaté/calcique
2 (aval)	8,5	19,2	72,2	0,1	68,7	29,4	1,9	Sulfaté/sodique
Es Senega	37,7	34,8	26,4	1,1	75,6	7,8	16,6	Sulfaté/mixte

Il semblerait qu'il y ait quelques divergences entre les faciès observés au cours de cette mission et ceux rapportées par RAHAINGOMANANA (1998). L'auteur a défini 3 groupes géochimiques sur la base des faciès chimiques des eaux diluées de 24 lacs (période de remplissage) : *les eaux sulfatées calciques ou sulfatées mixtes ; les eaux bicarbonatées calciques et les eaux chlorurées sodiques.*

Les lacs Es Senega et Fidh Ali du premier groupe et le lac Kamech du troisième groupe ont bien le même faciès. Cependant, les 4 autres lacs, appartenant au second groupe, présentent des faciès sulfatés calciques (El Gouazine, M'Hrira), chlorurés sodiques (Sbahia) ou mixtes sodiques (M'Richet el Anze). Le processus évaporatoire lié à la période d'étiage peut expliquer l'évolution du faciès bicarbonaté calcique vers l'un de ces 3 faciès, soit par la précipitation de la calcite, soit par des apports de nature différente des eaux de remplissage.

5. CARACTERISATION CHIMIQUE DES EAUX DU BASSIN VERSANT D'EL GOUAZINE

5.1. Caractéristiques chimiques mesurées sur le terrain

Les caractéristiques chimiques des eaux de surface et de nappe sont données dans les **tableaux IXa** et **IXb**, tandis que les **figures 9** et **10** les représentent spatialement à l'échelle du bassin versant et du lac collinaire.

Les eaux de la retenue sont très basiques (pH ≈ 10), peu concentrées (CE ≈ 0,9 dS m⁻¹), bien oxygénées (> 120% ; entre 9 et 12 mg L⁻¹) et faiblement bicarbonatées (TAC < 2). Ces caractéristiques chimiques sont conformes aux données obtenues par RAHAINGOMANANA (1998) pour d'autres lacs situés dans le même environnement géologique.

En revanche, les eaux de nappe sont voisines de la neutralité, relativement concentrées (2 < CE < 8,5 dS m⁻¹), peu oxygénées (< 80% ; entre 3 et 8 mg L⁻¹) et fortement bicarbonatées (4 < TAC < 11). La nappe est moins concentrée en aval du barrage suggérant qu'un écoulement souterrain est dilué par les eaux de la retenue.

Tableau IXa
Caractéristiques chimiques des eaux de surface du bassin versant d'El Gouazine
(mesures sur échantillons filtrés (F) et non filtrés (NF))

Date	Lieu	Ech.	Prof. (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC (mmol _c L ⁻¹)	
							(mg L ⁻¹)	(%)		
14/05/98	Lac	s1/1	-0,1	0,859	10,13	28,7	12,28	161,8	2,00	(NF)
			-0,1	0,901	9,76	27,2	-	-	1,22	(F)
14/05/98	Lac (vanne)	s1/2	-0,1	0,878	9,93	29,2	9,05	122,8	1,90	(NF)
			-0,1	0,862	10,00	24,3	-	-	1,12	(F)
14/05/98	Marais (bord de route)	s2	-0,2	2,845	6,88	20,2	3,85	43,8	1,72	(NF)
			-0,2	2,840	7,23	25,6	-	-	1,90	(F)
14/05/98	Oued (amont route)	s3	-0,2	7,665	7,03	22,5	7,55	93,9	10,15	(NF)
			-0,2	7,700	7,43	23,0	-	-	9,20	(F)

CE_{25°C} conductivité électrique mesurée à 25 °C

TAC titre alcalimétrique complet

Tableau IXb
Caractéristiques chimiques des eaux de nappe du bassin versant d'El Gouazine
(mesures sur échantillons non filtrés)

Date	Puits (w) ou fosse (p)		Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC (mmol _c L ⁻¹)	Prof. ⁽²⁾ (m)
								(mg L ⁻¹)	(%)		
Aval retenue											
17/05/98	w1	Oued	w1	- 1,0	2,240	7,00	18,7	2,95	36,0	6,2	-3,30
21/05/98	w2	Oued	w2/1	- 1,0	2,130	7,04	17,8	2,94	33,3	6,3	-2,70
			w2/2	- 2,5	2,130	7,08	17,3	2,54	27,4	6,6	
21/05/98	w3	Oued	w3/1	- 1,0	2,990	7,10	17,7	4,57	42,9	6,8	-1,70
			w3/2	- 2,3	2,990	7,11	17,7	4,18	45,5	7,1	
21/05/98	p1	Base digue	p1	-	1,888	7,38	18,7	3,87	43,4	4,0	-2,50
21/05/98	p2	Oued	p2	-	2,720	7,05	17,2	3,73	41,2	6,2	-1,85
Dans le bassin versant											
16/05/98	w4	Oued	w4	- 1,0 - 4,0	8,300 -	7,02 -	17,0 -	6,45 -	66,5 -	10,7 -	-2,70
16/05/98	w5	Barre calcaire	w5	- 1,0 - 4,5	2,240 -	6,98 -	20,0 -	3,80 -	42,5 -	6,2 -	-1,45
16/05/98	w6	El Aafou	w6	- 1,0	1,212	7,34	16,1	2,60	26,7	4,5	-8,40
23/05/98	w7	Souk	w7/1	- 1,0	3,240	7,13	19,3	7,48	84,8	5,3	?
			w7/2	- 5,5	3,250	7,10	18,1	6,92	78,1	5,0	
16/05/98	w8	Fontaine	w8	- 1,0	0,753	7,61	21,7	8,75	108,0	3,7	-
21/05/98	w9	Tête BV	w9/1	- 1,0	3,230	7,26	17,1	5,56	62,1	6,9	-3,15
			w9/2	- 8,3	3,230	7,30	17,2	7,54	83,2	6,0	
23/05/98	p4	Sédiment	p4	-	2,020	7,72	25,6	5,28	70,2	5,2	-2,00
22/05/98	p6	Sédiment	p6	-	4,910	6,85	16,8	1,26	14,8	8,4	-2,30
En dehors du bassin versant											
17/05/98	w10	Bou Haleb	w10	- 1,0	4,180	7,23	18,4	5,51	65,7	5,6	-3,35
22/05/98	w11	Larbi	w11/1	- 1,0	0,833	7,26	17,0	3,30	37,2	6,5	-4,00
			w11/2	- 4,0	0,835	7,25	16,8	3,74	39,8	5,7	

CE_{25°C} conductivité électrique mesurée à 25 °C

TAC titre alcalimétrique complet

⁽¹⁾ profondeur du prélèvement par rapport
au niveau de la nappe⁽²⁾ niveau de la nappe par rapport
à la surface du sol

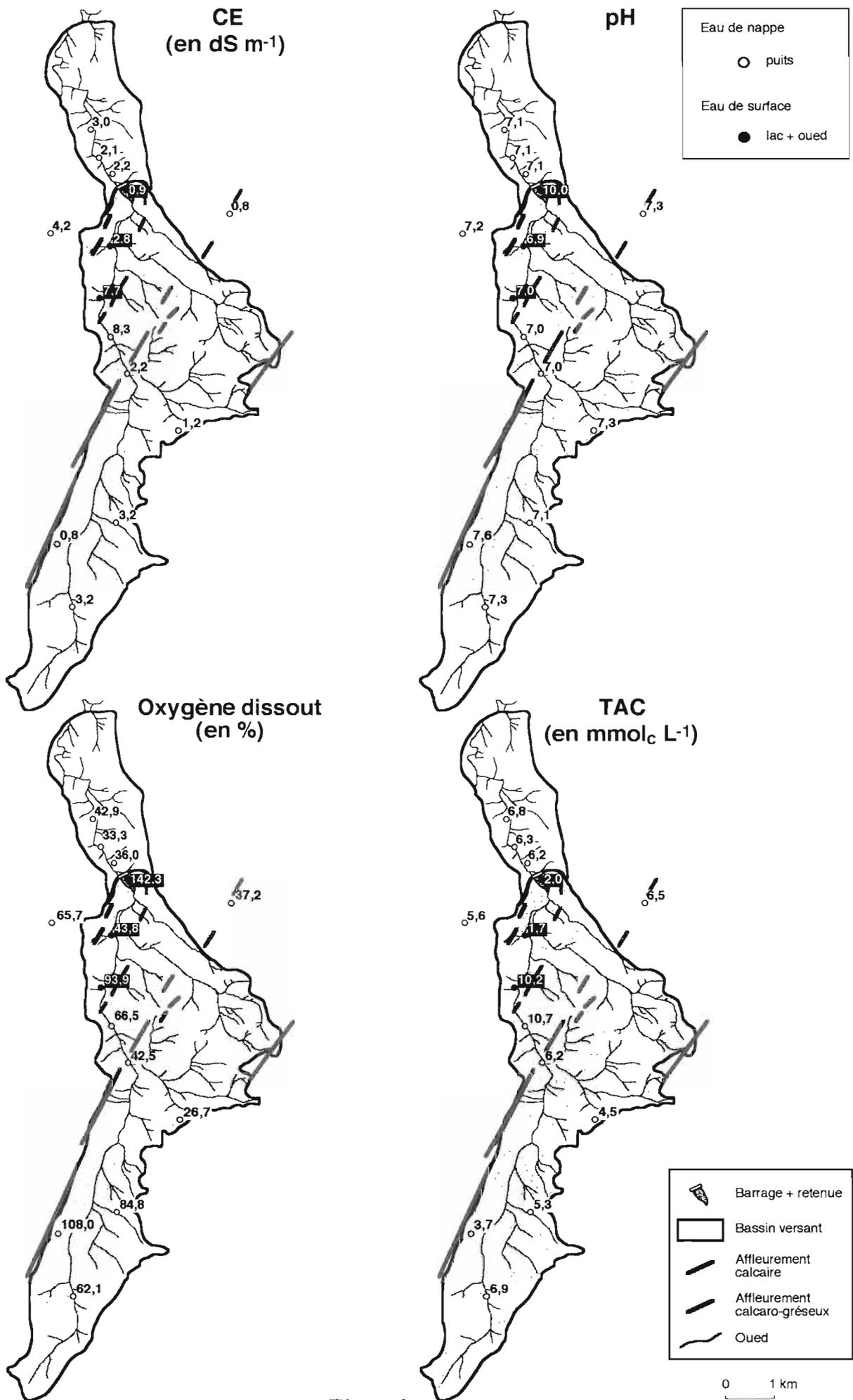


Figure 9
 Caractéristiques chimiques des eaux de surface et de nappe
 à l'échelle du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)

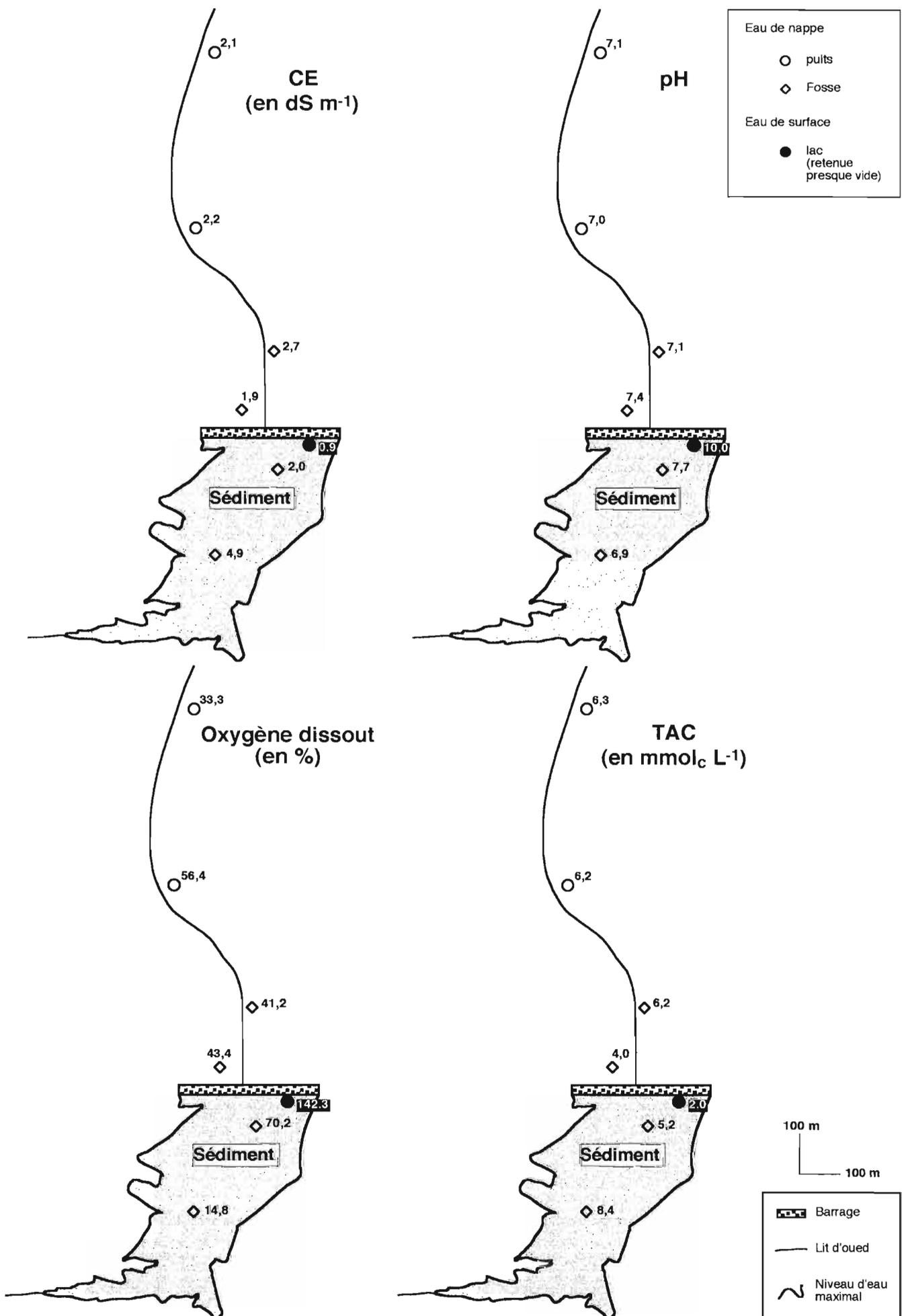


Figure 10
 Caractéristiques chimiques des eaux de surface et de nappe
 à l'échelle du lac collinaire d'El Gouazine (mai 1998)

Les mesures réalisées dans le puits w1, le long d'un profil vertical de 15 m, ne montrent pas de variations significatives. On remarque seulement une très faible augmentation de la CE à 25°C et du pH entre la surface et la profondeur de 5 m, les valeurs restant constantes au delà et jusqu'à 15 m de profondeur. Le TAC ne varie pratiquement pas et est compris entre 5 et 6 mmol_c L⁻¹ aux erreurs expérimentales près (**tableau X**).

Tableau X
Caractéristiques chimiques des eaux du puits w1 en fonction de la profondeur
(mesures sur échantillons non filtrés)

Date	Ech.	Prof. ⁽¹⁾ (m)	CE _{25°C} (dS m ⁻¹)	pH	T (°C)	O ₂ dissout		TAC (mmol _c L ⁻¹)
						(mg L ⁻¹)	(%)	
<i>Aval retenue (oued)</i>								
05/98	w1/1	- 1,0	2,220	7,06	19,4	4,40	56,4	5,2
	w1/2	-2,0	2,320	6,99	18,4	3,45	40,0	5,8
	w1/3	-3,0	2,380	7,02	18,3	3,92	46,8	5,6
	w1/4	-4,0	2,410	7,06	18,0	4,86	55,6	5,5
	w1/5	-5,0	2,450	7,10	18,0	4,43	48,7	5,8
	w1/6	-6,0	2,450	7,10	18,1	4,14	47,5	5,7
	w1/7	-7,0	2,450	7,11	17,8	4,60	54,0	5,7
	w1/8	-8,0	2,450	7,10	18,1	4,76	53,5	5,6
	w1/9	-9,0	2,450	7,15	17,9	5,57	61,9	6,2
	w1/10	-10,0	2,450	7,17	17,7	6,33	70,4	6,0
	w1/11	-11,0	2,450	7,15	17,5	6,04	69,5	5,8
	w1/12	-12,0	2,460	7,15	17,6	6,10	70,0	6,0
	w1/13	-13,0	2,450	7,16	17,6	6,94	78,6	5,2
	w1/14	-14,0	2,450	7,15	17,8	7,64	84,4	5,8
	w1/15	- 15,0	2,450	7,15	17,8	7,15	80,3	6,2

CE_{25°C} conductivité électrique mesurée à 25 °C

⁽¹⁾ profondeur du prélèvement par rapport
au niveau de la nappe

TAC titre alcalimétrique complet

Niveau de la nappe par rapport
à la surface du sol = -3,30 m

5.2. Analyses chimiques

5.2.1. Bilan ionique

Les analyses chimiques des eaux filtrées sont données en **annexes A4a et A4b**. Les **tableaux XIa et XIb** donnent les faciès cationique et anionique, exprimés en pourcentage de milliéquivalents par litre, des eaux de surface et de nappe.

Ces faciès sont représentés soit sous forme de diagramme de Piper (**figure 10**), soit spatialement à l'échelle du bassin versant (**figures 12a et 12b**) et du lac collinaire (**figures 13a et 13b**).

Les concentrations en K^+ étant très inférieures à celles en Na^+ , notamment pour les eaux de nappe des puits et des fosses ($K^+ < 0,8\%$), la somme ($Na^+ + K^+$), prise en compte dans le diagramme de Piper, pourra être considérée comme équivalente à Na^+ .

◆ Eau de nappe :

A l'intérieur et en dehors du bassin versant, le faciès cationique est dans l'ensemble calcique avec un taux de Ca^{2+} compris entre 30 et 40%, sauf pour les eaux très calciques situées au niveau des affleurements calcaires (w6, w8 et w11) et présentant des valeurs comprises entre 50 et 65%. Les eaux sont moins magnésiennes au niveau de ces affleurements calcaires (w5, w6, w8 et w11), avec un taux de Mg^{2+} compris entre 10 et 20%, alors qu'ailleurs, ce taux varie entre 20 et 30%. Le taux de Na^+ est généralement compris entre 20 et 40%.

Pour quelques eaux situées en tête (w9) ou en dehors (vers l'aval) du bassin versant (w10), le faciès cationique est plutôt sodique, avec un taux compris entre 45 et 50%.

Les eaux au contact des sédiments de la retenue sont calciques ($Ca^{2+} \approx 47,5\%$ et $Na^+ = 32,5\%$) ou calcisodiques ($Ca^{2+} \approx 44\%$ et $Na^+ \approx 38\%$).

Le faciès anionique est relativement plus contrasté. Les eaux peuvent être chlorurées (w4, w5, w7 et w9 avec $45\% < Cl^- < 70\%$), sulfatées (w10 avec $SO_4^{2-} \approx 60\%$) ou bicarbonatées (w6, w8 et w11 avec $45\% < HCO_3^- < 70\%$).

Dans les sédiments du réservoir, les eaux sont sulfatées ($SO_4^{2-} = 55\%$) ou sulfatées chlorurées ($SO_4^{2-} \approx 46\%$ et $Cl^- \approx 41\%$).

En aval de la retenue, le faciès chimique est sulfaté-calcique (w1 et w2 avec $SO_4^{2-} \approx 50-55\%$, $Ca^{2+} \approx 40-45\%$ et $Na^+ \approx 30-35\%$) et devient sulfaté-sodique plus en aval (w3 avec $SO_4^{2-} \approx 50\%$, $Ca^{2+} \approx 30\%$ et $Na^+ \approx 45-50\%$), les taux de Cl^- et de Mg^{2+} ne variant quasiment pas. En w1, l'eau conserve son faciès sulfaté-calcique à plus de 10 m de profondeur.

On distingue donc 3 faciès chimiques : en amont du bassin, un faciès bicarbonaté calcique aux niveau des affleurements calcaires associé à un faciès chloruré sodique ou mixte entre ces affleurements ; au niveau de la retenue, un faciès sulfaté calcique devenant plus en aval sulfaté sodique.

◆ Eau de surface :

L'eau du lac (s1) est **sulfatée-calcique** ($Ca^{2+} = 57\%$, $SO_4^{2-} = 66\%$). En s2, l'eau est retenue temporairement par la route et présente un faciès chimique encore plus sulfaté-calcique que celui du lac ($Ca^{2+} = 85\%$, $SO_4^{2-} = 95\%$).

L'eau de l'oued amont (s3) a un faciès chimique similaire à celui de la nappe w4, avec un faciès cationique mixte et un faciès anionique plus sulfaté ($SO_4^{2-} \approx 50\%$), moins chloruré ($Cl^- \approx 40\%$) et aussi faiblement bicarbonaté ($HCO_3^- \approx 10\%$).

Tableau XIa
Faciès chimiques des eaux de surface du bassin versant d'El Gouazine

Lieu	Ech.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Faciès
		(%)				(%)			
Lac	s1/1	57,1	9,5	30,2	3,2	66,4	19,7	14,0	Sulfaté/calcique idem
	s1/2	59,8	8,6	29,2	2,4	63,0	16,7	20,3	
Marais (bord de route)	s2	85,2	5,9	8,2	0,7	94,7	0,0	5,3	Sulfaté/calcique
Oued (amont route)	s3	34,0	29,3	36,6	0,1	47,8	43,2	9,0	Sulf. chlorurée/mixte

Tableau XIb
Faciès chimiques des eaux de nappe du bassin versant d'El Gouazine

Lieu	Ech.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Faciès
		(%)				(%)			
Aval retenue									
Oued	w1	42,7	23,3	33,7	0,3	51,8	23,9	24,4	Sulfaté/calcique idem idem idem idem idem
	w1/1	39,3	24,8	35,7	0,2	58,7	24,2	17,1	
	w1/4	39,2	25,3	35,3	0,2	52,4	28,2	19,4	
	w1/7	38,4	25,4	36,0	0,2	54,4	26,2	19,4	
	w1/10	38,4	25,3	36,1	0,2	54,0	25,8	20,1	
	w1/13	38,2	25,4	36,2	0,2	55,6	26,5	17,9	
Oued	w2/1	42,9	24,6	32,2	0,3	52,6	18,7	28,7	Sulfaté/calcique idem
	w2/2	47,3	22,3	30,2	0,2	53,2	18,2	28,6	
Oued	w3/1	29,4	23,1	47,3	0,2	52,1	26,3	21,7	Sulfaté/sodique idem
	w3/2	38,2	20,8	40,9	0,1	48,3	32,1	19,6	
Base digue	p1	43,4	18,7	37,5	0,5	37,0	33,1	29,8	Mixte/calcisodique
Oued	p2	51,6	21,2	27,1	0,1	43,9	40,4	15,7	Sulf. chloruré/calcique
Dans le bassin versant									
Oued	w4	36,0	28,9	34,9	0,2	38,5	52,6	8,9	Chloruré/mixte
Barre calcaire	w5	39,9	18,7	41,4	0,0	26,7	45,5	27,8	Chloruré/sodicalcique
El Aafou	w6	49,9	15,1	34,6	0,4	17,6	37,2	45,2	Bicarbonaté/calcique
Souk	w7/1	37,2	24,6	38,0	0,2	16,7	67,1	16,2	Chloruré/mixte idem
	w7/2	37,0	24,8	38,1	0,1	16,9	67,7	15,5	
Fontaine	w8	50,5	16,7	32,1	0,7	21,0	27,3	51,6	Bicarbonaté/calcique
Tête BV	w9/1	31,3	21,5	47,1	0,1	22,4	57,9	19,6	Chloruré/sodique idem
	w9/2	30,3	26,2	43,3	0,2	27,3	54,3	18,4	
Sédiment	p4	44,2	17,4	37,6	0,8	55,0	22,5	22,6	Sulfaté/calcisodique
Sédiment	p6	47,5	20,1	32,2	0,2	45,6	41,4	13,0	Sulf. chloruré/calcique
En dehors du bassin versant									
Bou Haleb	w10	30,9	22,5	46,3	0,3	61,4	24,5	14,1	Sulfaté/sodique
Larbi	w11/1	64,4	13,9	21,4	0,3	10,8	17,7	71,4	Bicarbonaté/calcique idem
	w11/2	63,3	14,4	22,0	0,3	11,9	19,5	68,6	

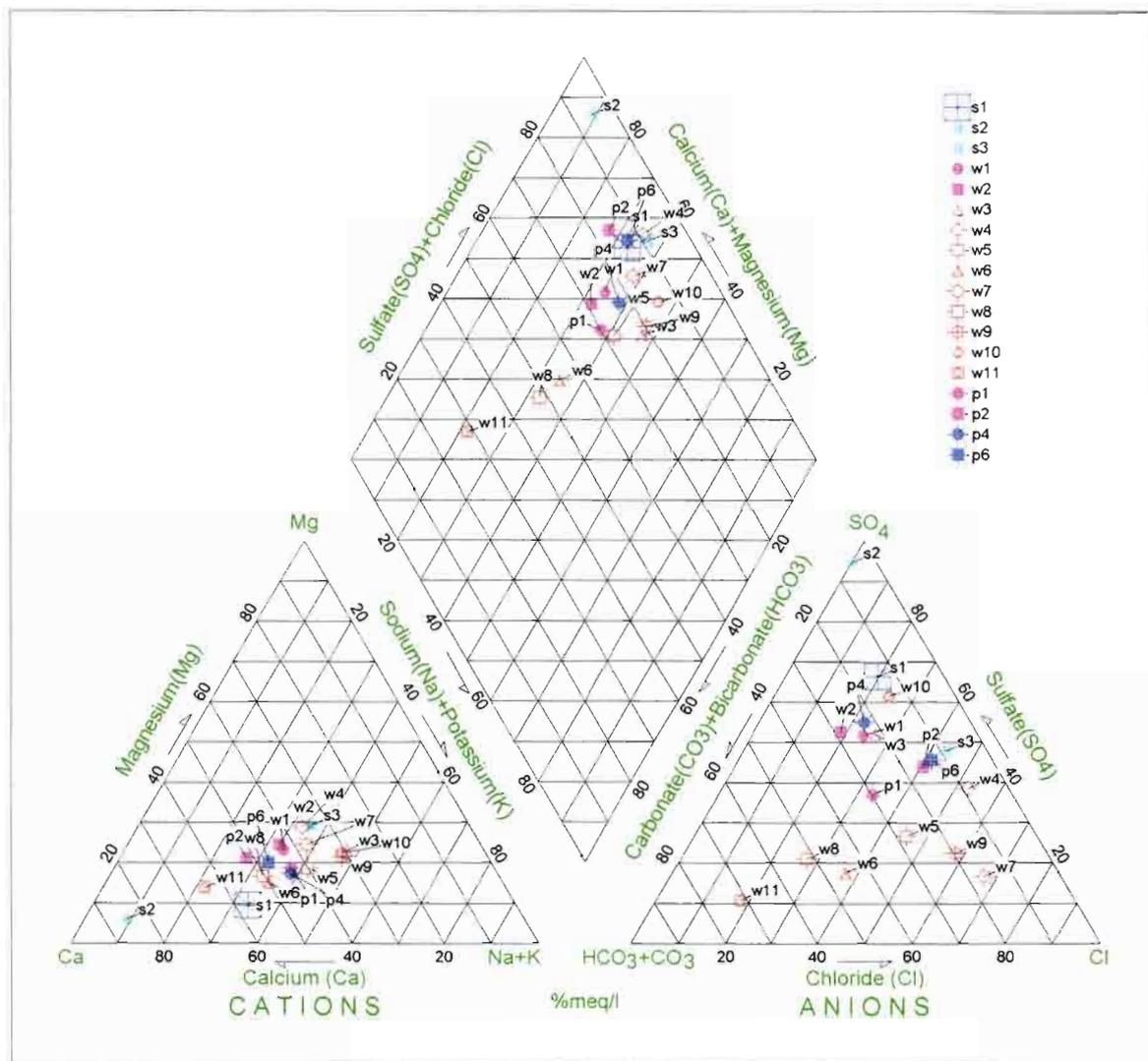


Figure 11

Diagramme de Piper relatif aux eaux de surface et de nappe du bassin versant d'El Gouazine
(les valeurs ioniques sont données en pourcentage de milliéquivalents par litre)

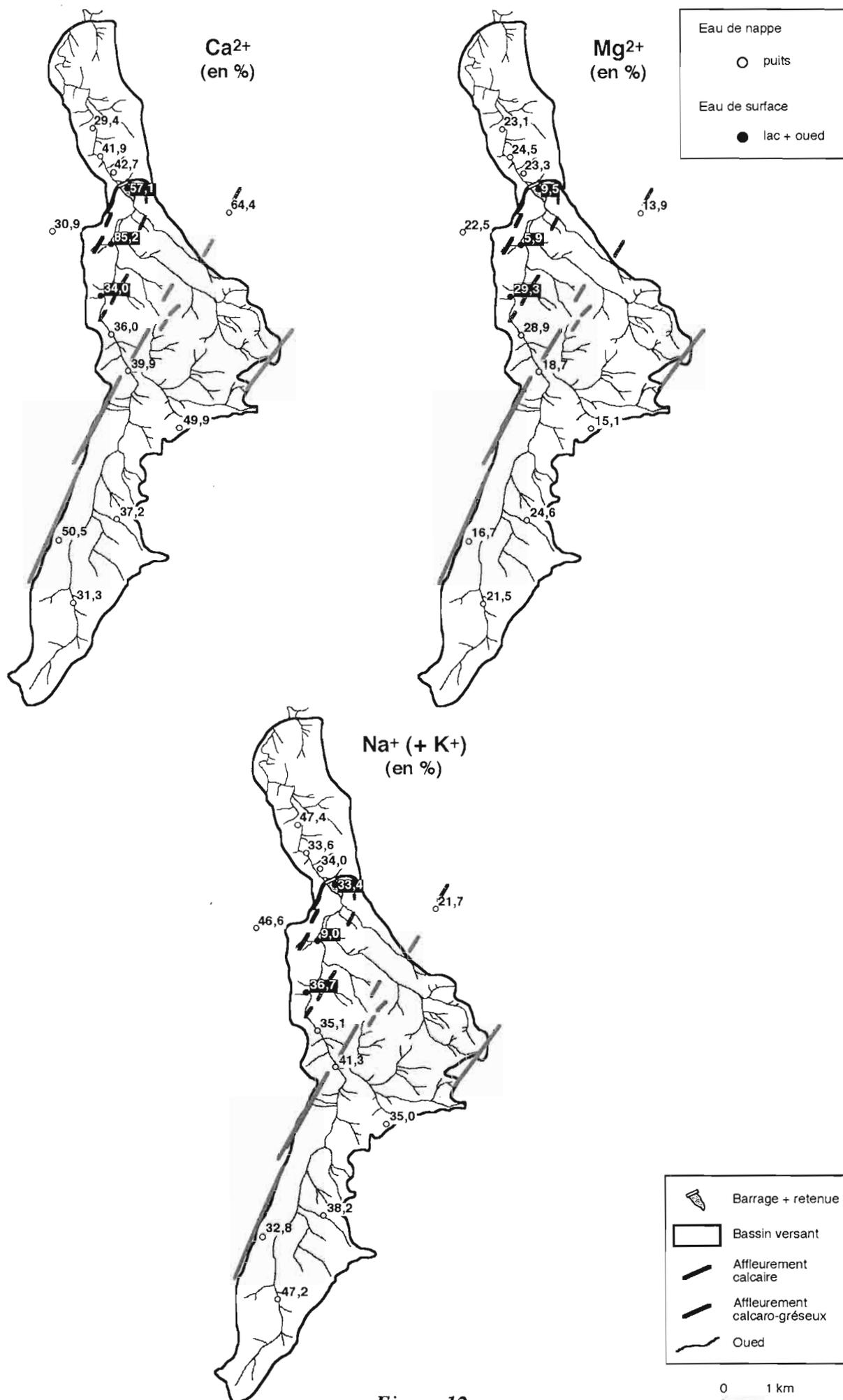


Figure 12a
Faciès cationique des eaux de surface et de nappe
à l'échelle du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)

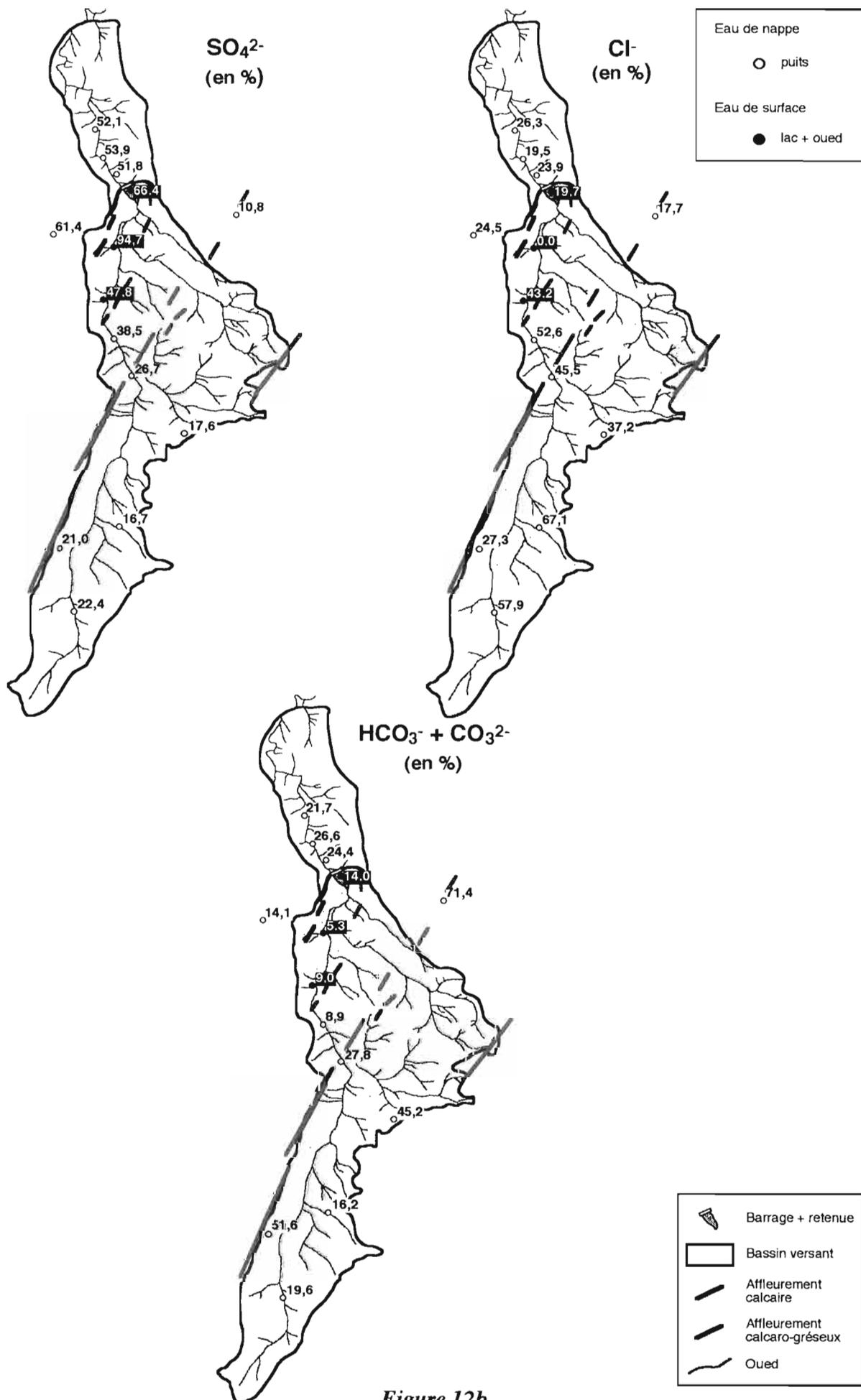
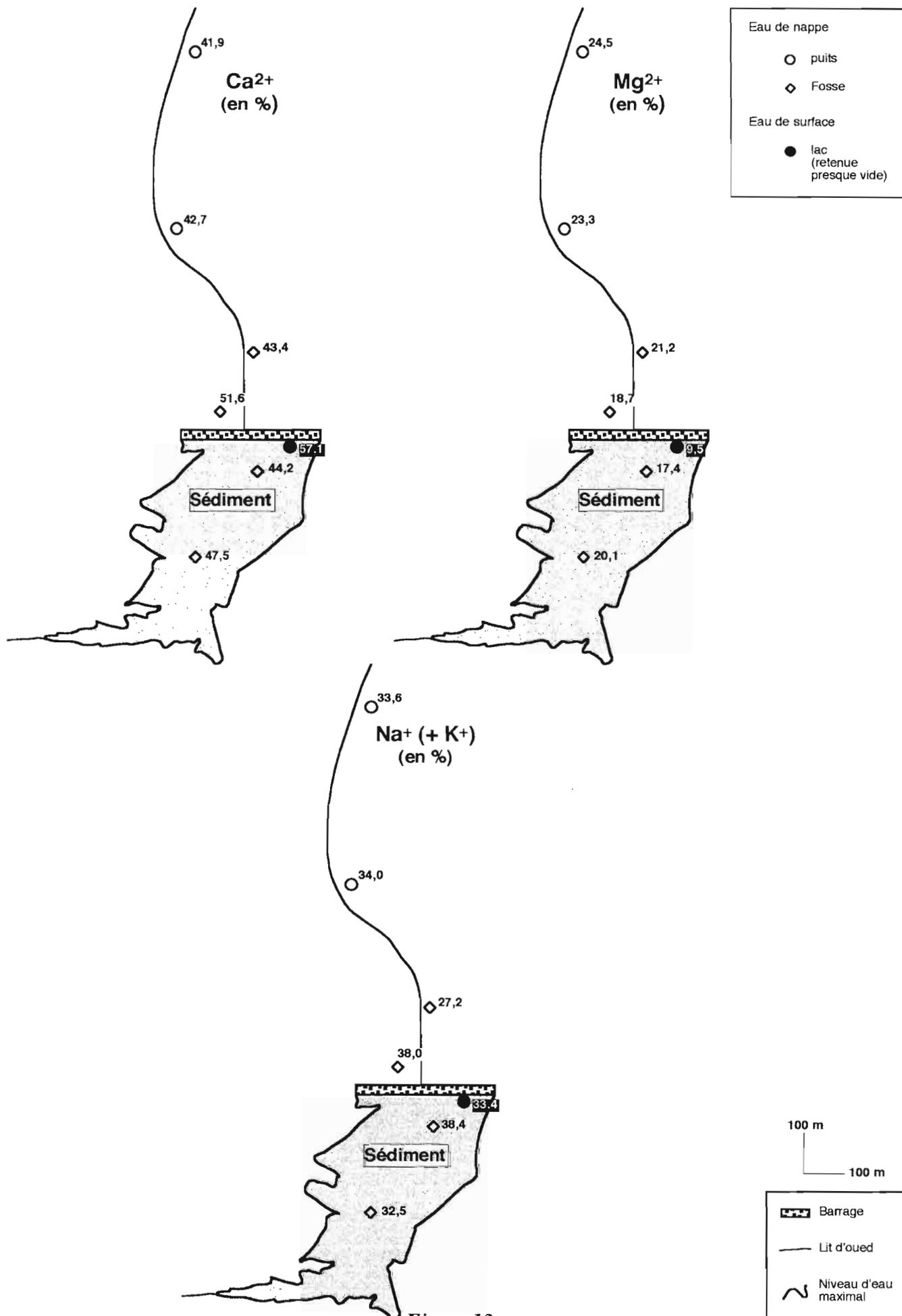
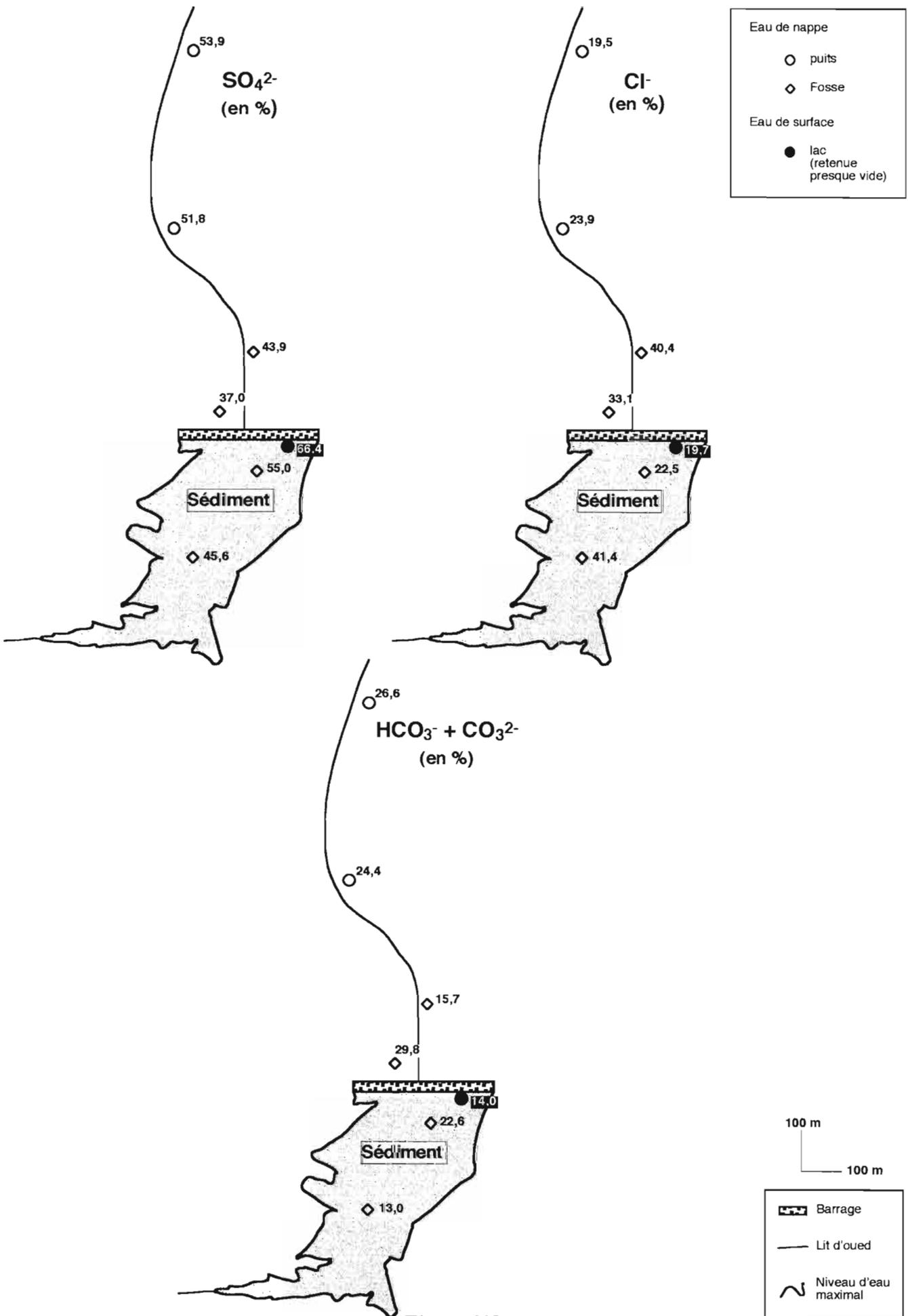


Figure 12b
Faciès anionique des eaux de surface et de nappe
à l'échelle du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)





5.2.2. Les éléments-traces

Le **tableau XII** présente les résultats obtenus. Ils sont donnés à titre indicatif car les analyses ont été effectuées sur des échantillons d'eau non acidifiée comme cela est normalement requis pour la détermination des éléments-traces.

Il s'agit donc d'une analyse semi-quantitative permettant de détecter les éléments dominants, mais en gardant à l'esprit que la non acidification des échantillons et les délais d'analyse au laboratoire font que les éléments-traces présents en solution peuvent avoir été piégés dans d'éventuelles précipitation minérale.

L'élément dominant est le baryum (Ba), mais des éléments comme le strontium (Sr), n'ont pas été dosés.

Tableau XII
Teneurs en éléments-traces (en ppm) des eaux de surface et de nappe
du bassin versant d'El Gouazine

Ech.	Zn	Co	Ba	Ni	Cu	Cr	Mn	Mo	Pd	Sc	Ti	U	V	Fe
<i>Eaux de surface</i>														
s1/2	3	-	75	3	-	10	-	-	-	-	3	1	3	>500
<i>Eaux de nappe</i>														
p4	-	-	95	13	1	20	35	8	-	-	8	9	6	>500
w4	-	1	46	26	2	15	18	1	4	1	23	12	3	>1500
w5	-	-	90	2	-	18	-	2	-	1	5	5	11	>500

5.3. Caractéristiques isotopiques

Les teneurs isotopiques des eaux de surface et des aquifères du bassin versant sont données dans le **tableau XIII**.

Tableau XIII
Composition isotopique des eaux de surface et de nappe du bassin versant d'El Gouazine

Lieu	Ech.	¹⁸ O	² H	¹³ C
		(‰)		
Eau de surface				
Lac	s1/1	10,9	45,4	-11,4
Marais (bord de route)	s2	1,9	5,3	-19,7
Oued (amont route)	s3	-4,5	-24,3	-13,6
Eau de nappe (puits)				
Aval 1	(-1 m) w1/1	-2,1	-13,2	-14,6
Aval 2	(-1 m) w2/1	-2,0	-13,0	-14,0
	(-2 m) w2/2	-1,6	-13,3	-14,8
Aval 3	(-1 m) w3/1	-2,6	-15,1	-13,4
	(-2 m) w3/2	-1,9	-10,7	-
Marnes	(-1 m) w4	-4,1	-25,5	-
Barre calcaire	(-1 m) w5	-5,3	-31,1	-13,5
El Aafou	(-1 m) w6	-5,4	-28,9	-10,5
Souk	(-5,5 m) w7/2	-4,7	-32,0	-
Fontaine	w8	-5,2	-33,9	-10,0
Tête BV	(-8,3 m) w9/2	-4,4	-23,5	-
Bou Haleb	(-1 m) w10	-4,2	-28,0	-
Larbi	(-4 m) w11/2	-5,3	-31,7	-
Eau de nappe (fosse)				
Fosse 1 aval	(-2,5 m) p1	-1,3	-9,1	-15,5
Fosse 2 aval	(-2 m) p2	-2,2	-15,5	-14,9
Fosse 6 amont	p4	-1,1	-7,7	-
Fosse 3 amont	p6	-3,6	-22,1	-

Le **tableau XIII** montre que les teneurs isotopiques des aquifères se répartissent entre -5,5 et -4,5 ‰ vs SMOW en ¹⁸O et entre -30 et -35 ‰ vs SMOW en ²H. Elles sont conformes aux résultats de KARRAY et FAKHFAKH (1998) pour l'aquifère de Kairouan, s'écartant peu de la droite météorique mondiale ou droite de CRAIG (1961), exprimée par la relation : $^2\text{H} = 8 \text{ } ^{18}\text{O} + 10$. Les eaux de l'aquifère alluvial en aval de la retenue ainsi que les eaux stagnantes du fond de retenue montrent des teneurs enrichies.

L'évolution des teneurs dans l'espace montre qu'en s'éloignant de l'ouvrage vers l'aval les teneurs s'appauvrissent sensiblement (**figures 14** et **15**). Les fuites de la retenue alimentent un bulbe d'eaux évaporées qui va en s'atténuant vers l'aval, du fait que les premières eaux de fuite sont peu évaporées et que les fuites sont dispersées.

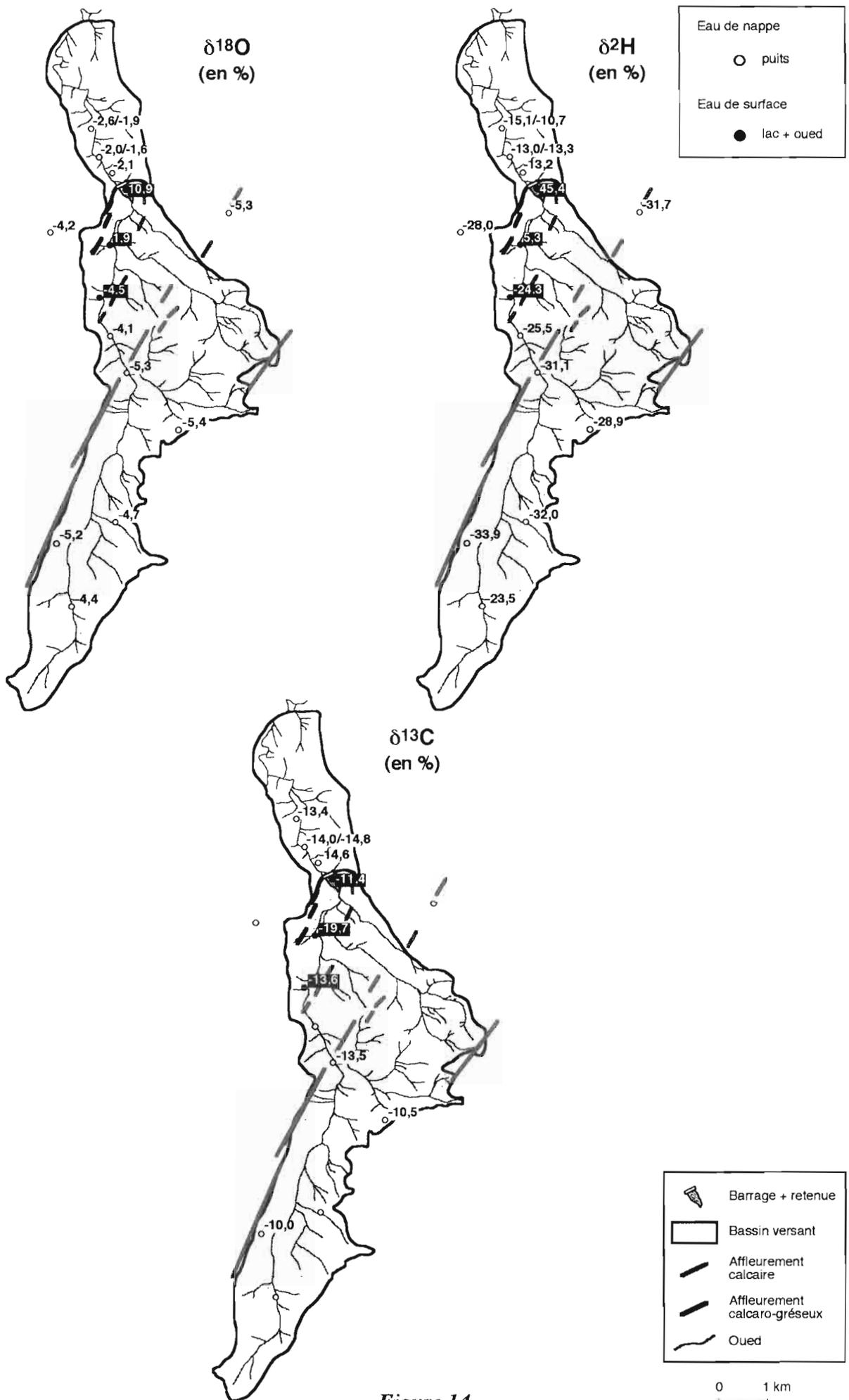


Figure 14
Caractéristiques isotopiques des eaux de surface et de nappe
à l'échelle du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)

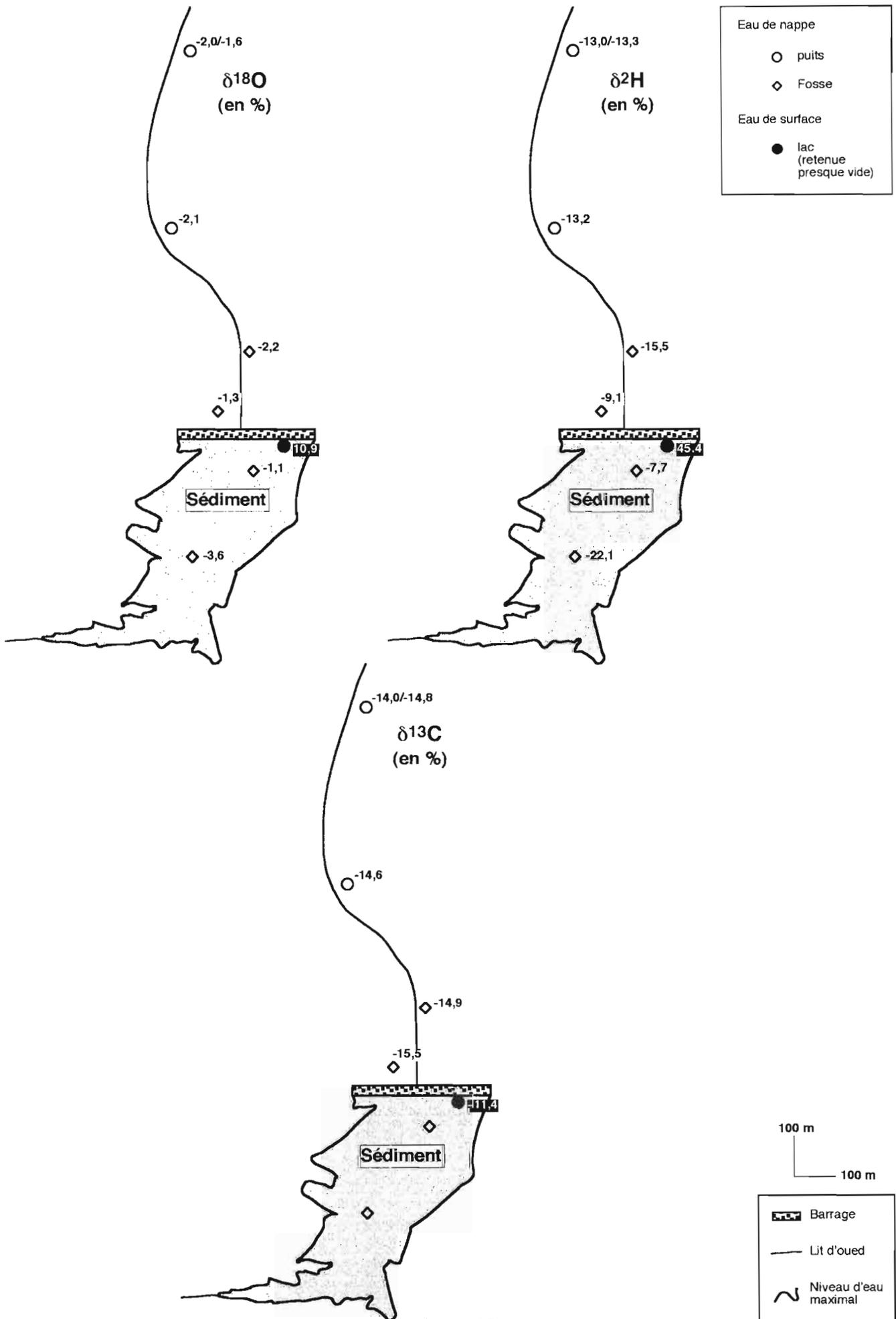


Figure 15

Caractéristiques isotopiques des eaux de surface et de nappe à l'échelle du lac collinaire d'El Gouazine (mai 1998)

Les teneurs en ^{18}O et en ^2H des eaux de surface sont disposées selon une droite d'évaporation dont l'équation est : $^2\text{H} = 4,4 \text{ }^{18}\text{O} - 3,2$ (**figure 16**). Cette disposition suggère une évaporation sans échange mais avec des termes cinétiques correspondant à une humidité relative de l'ordre de 40% à 25 °C. L'enrichissement maximal est atteint pour les eaux d'une flaqué subsistante au fond de la retenue (+10,9 ‰ vs SMOW en ^{18}O , +45,4 ‰ vs SMOW en ^2H) alors que la teneur de l'eau contenue dans les sédiments de la retenue est de -1,1 ‰ vs SMOW en ^{18}O et -7,7 ‰ vs SMOW en ^2H .

Les teneurs en ^{13}C des précipités sont comprises entre -19,7 et -10,0 ‰ vs PDB (**tableau XIII ; figures 14 et 15**). Elles reproduisent grossièrement le schéma des teneurs en ^{18}O pour les eaux évaporées de l'aquifère de l'aval de la retenue. Un pôle de teneurs appauvries caractérise les carbonates issues d'un contact avec le CO_2 dégagé par les sédiments lacustres.

Les conditions sont donc favorables à la construction d'un modèle d'évaporation et de mélange basé sur les chroniques journalières de hauteur d'eau et d'évaporation au bac précédant la période d'échantillonnage. Ce modèle permettra de tester plusieurs hypothèses de fonctionnement de la retenue et de ses relations avec l'aquifère alluvial.

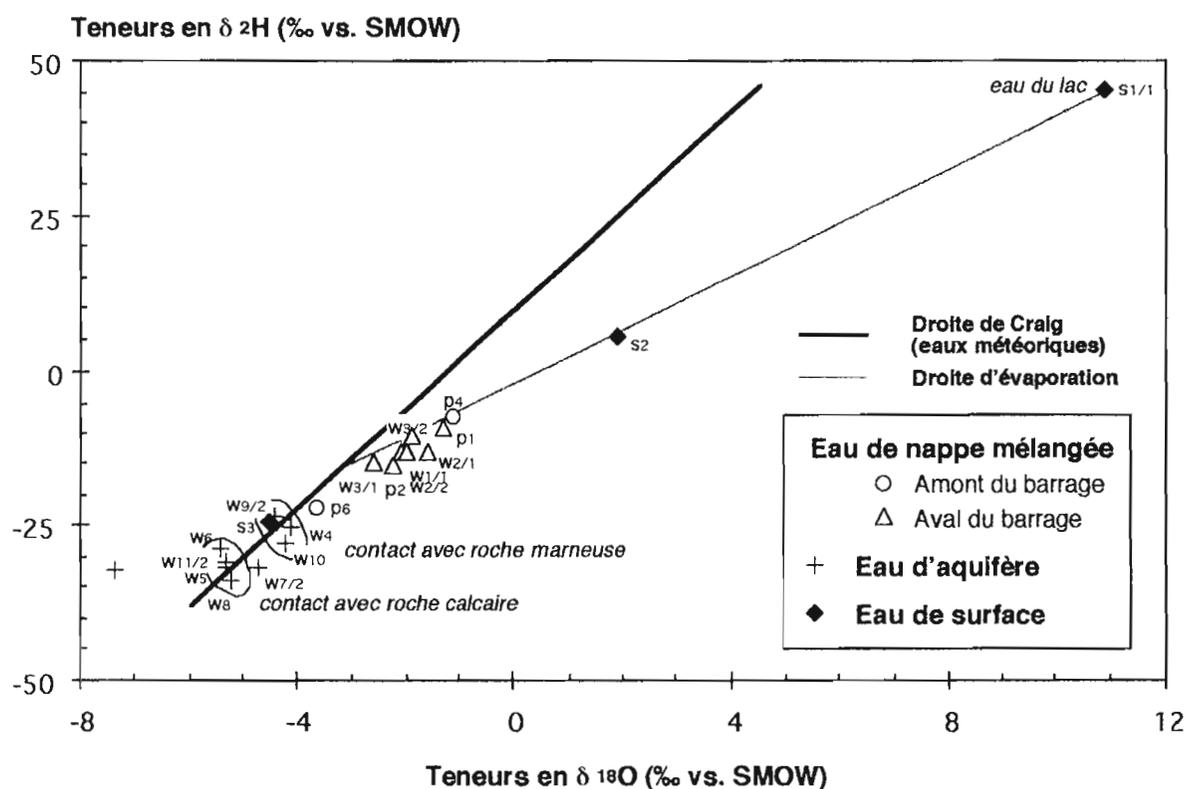


Figure 16
Relation entre les teneurs en $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des différentes eaux du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)

6. OBSERVATIONS PEDOLOGIQUES DES DEPÔTS ALLUVIAUX

6.1. Description morphologique

La description sommaire des profils pédologiques (p1 à p6) sont données en **annexe A5**.

Les sédiments de la retenue sont constitués par des alternance de lits à texture fine (argile grise présentant des taches noires de réduction de la matière organique et du fer) et à texture grossière (sables à graviers). Ils reposent sur l'ancien lit graveleux et caillouteux de l'oued. Les niveaux grossiers sont propices à des écoulements latéraux souterrains.

L'épaisseur des sédiments est d'environ 3 m à la fosse p4 confirmant les mesures réalisées par sondage dans les eaux du lac (CES/ORSTOM, 1996a, 1996b and 1997). Dans le niveau graveleux et caillouteux, le niveau de la nappe est à une profondeur d'environ 2m pour la fosse p6, 2,5 m pour la fosse p4, 1,85 m pour la fosse p1 et ? m pour la fosse p2.

Les fosses p1, p3 et la tranchée p5 montrent la présence d'un niveau sableux qui semble être en continuité.

La **planche photographique VI** montre les profils pédologiques p5 et p6.

6.2. Organisation spatiale

La **figure 17** présente une interprétation schématique de la disposition des formations superficielles observées sur le terrain. L'oued a entaillé les formations marneuses en charriant et en déposant ses alluvions grossiers.

Comme indiqué par les deux transects situés en amont du barrage, on trouve le niveau sableux en rive gauche du lac reposant sur le niveau graveleux et caillouteux. Concernant le transect situé le plus amont, le niveau sableux a environ 1,5 m d'épaisseur, la base étant à la cote topographique de 5 m. Pour le transect le plus large, ce niveau, dont l'épaisseur est d'1 m, est localisé dans les sédiments du lac. Les versants sont recouverts par des colluvions grossiers et calcaires qui sont plus ou moins encroûtés au sommet.

Les observations précédentes montrent que la forte perméabilité du niveau sableux explique en partie les fortes pertes en eau du lac par infiltration, notamment lorsque le niveau d'eau s'élève au-dessus de la cote 4 m.

6.3. Piézométrie de la nappe alluviale

Les mesures piézométriques réalisées dans les puits (w1 et w2) et les fosses (p1, p2, p4 et p6) définissent un gradient hydraulique depuis l'amont vers l'aval d'environ 0,01 m m⁻¹ (**Figure 18**).

Il semble qu'une nappe circule vers l'aval sous et à l'intérieur des sédiments du lac confirmant les conclusions faites par l'analyse chimique des eaux.

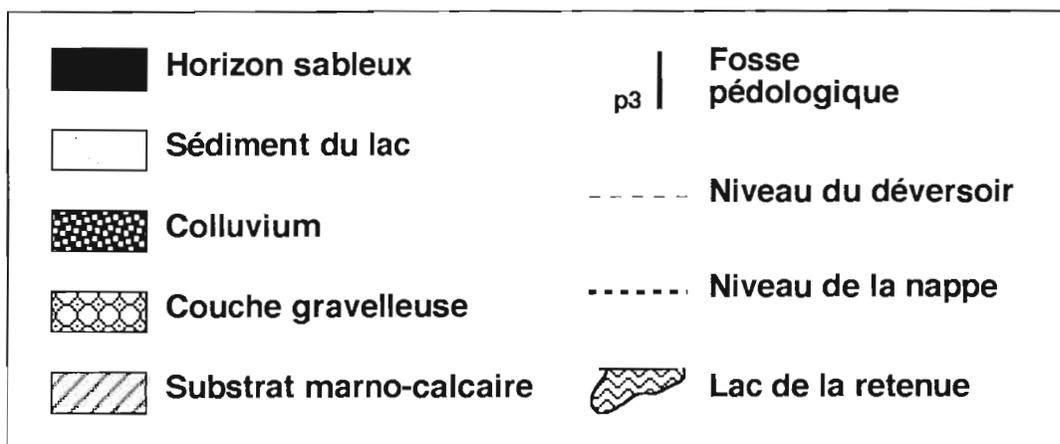
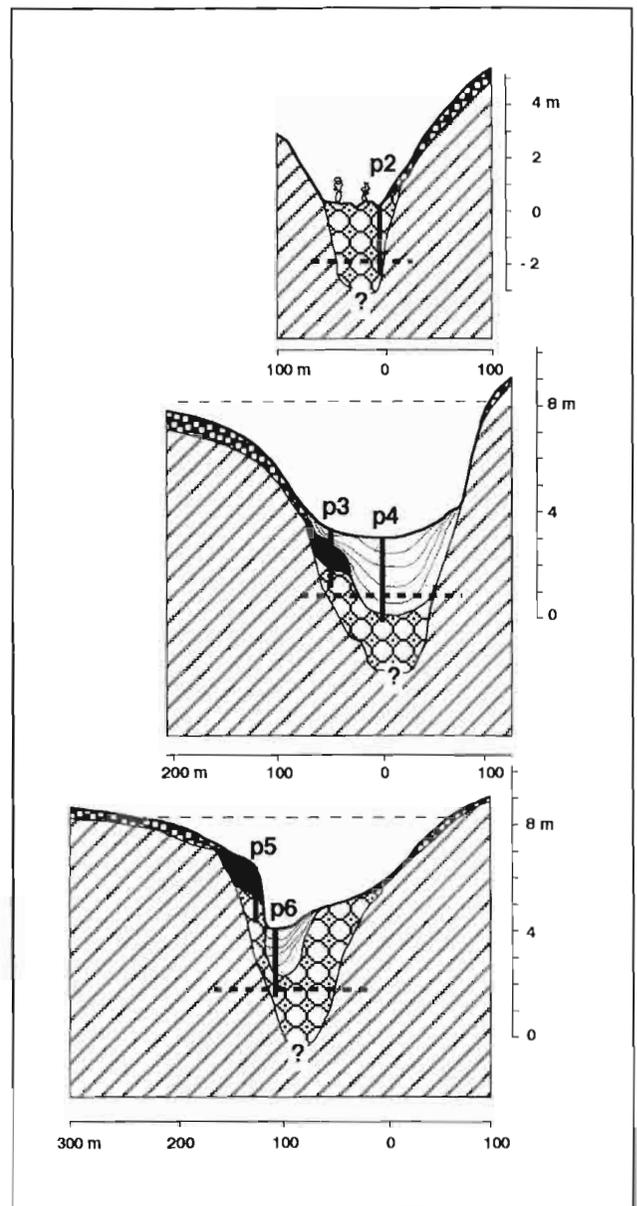
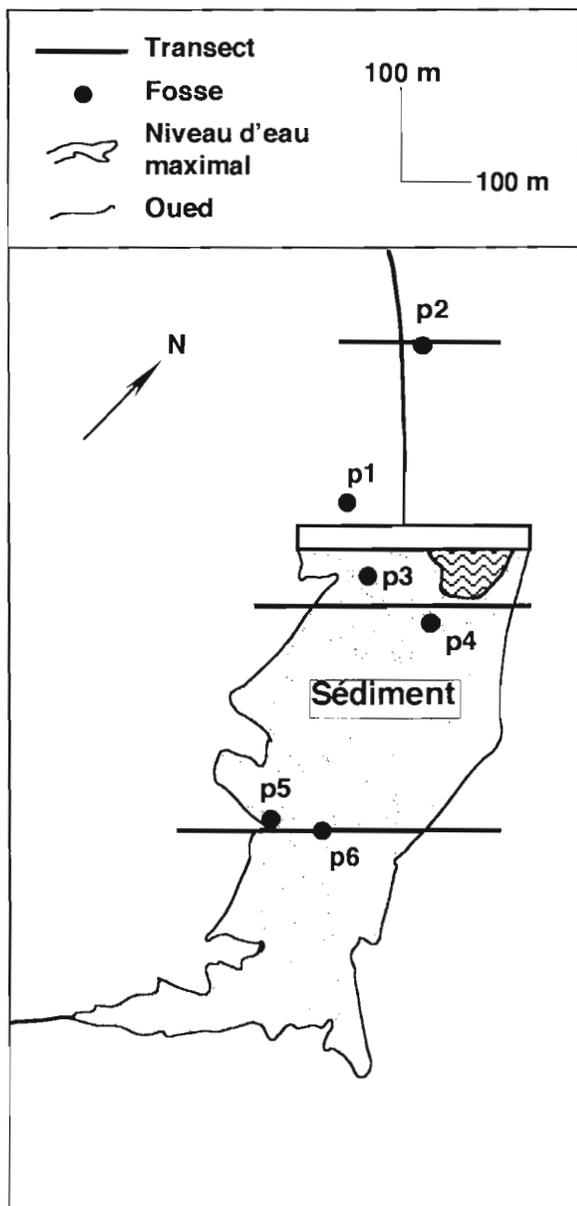


Figure 17
 Organisation spatiale des dépôts du lac collinaire d'El Gouazine (mai 1998)

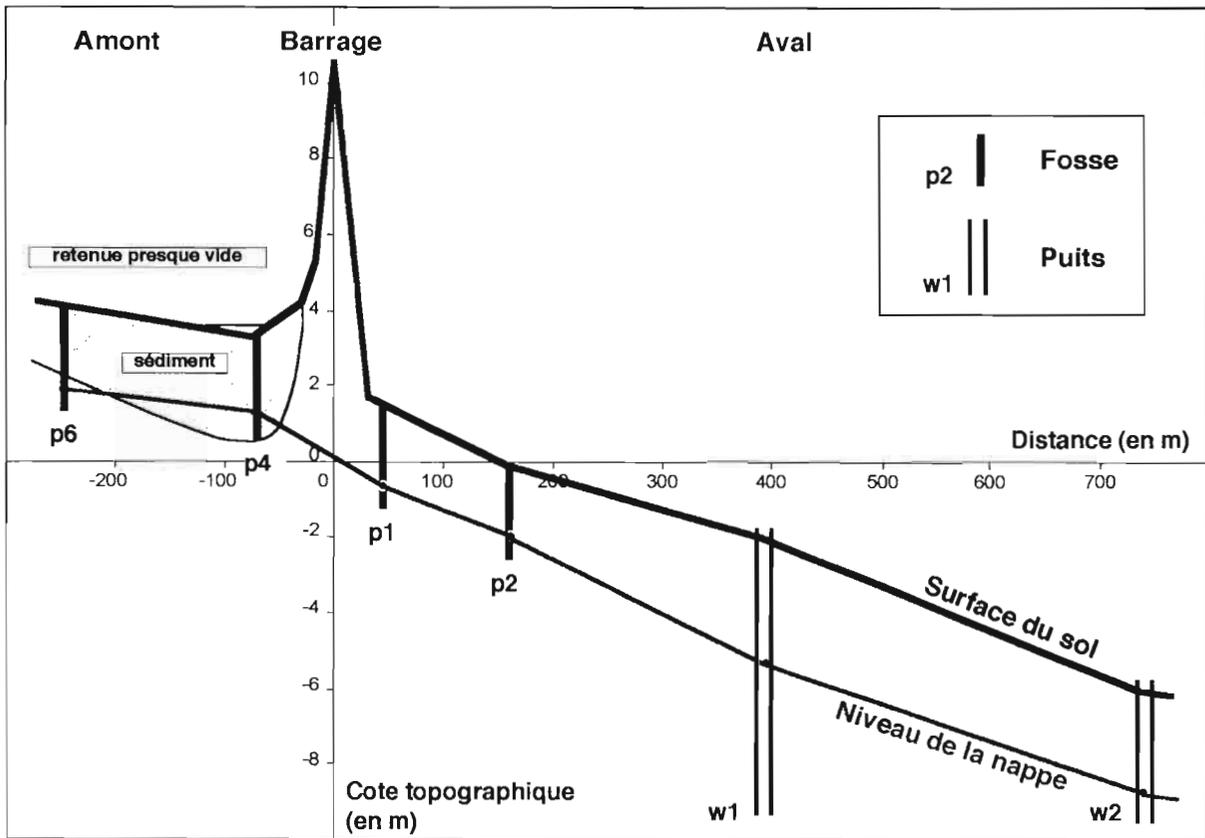
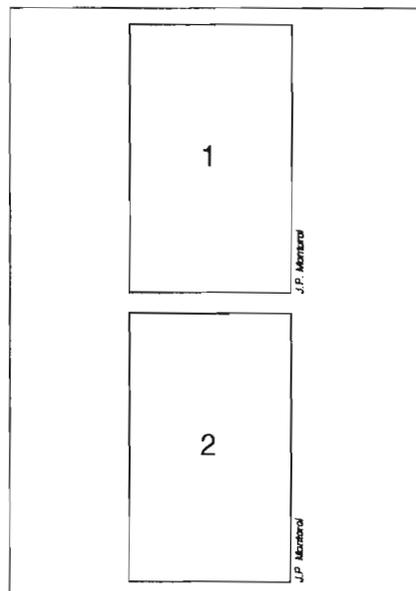


Figure 18

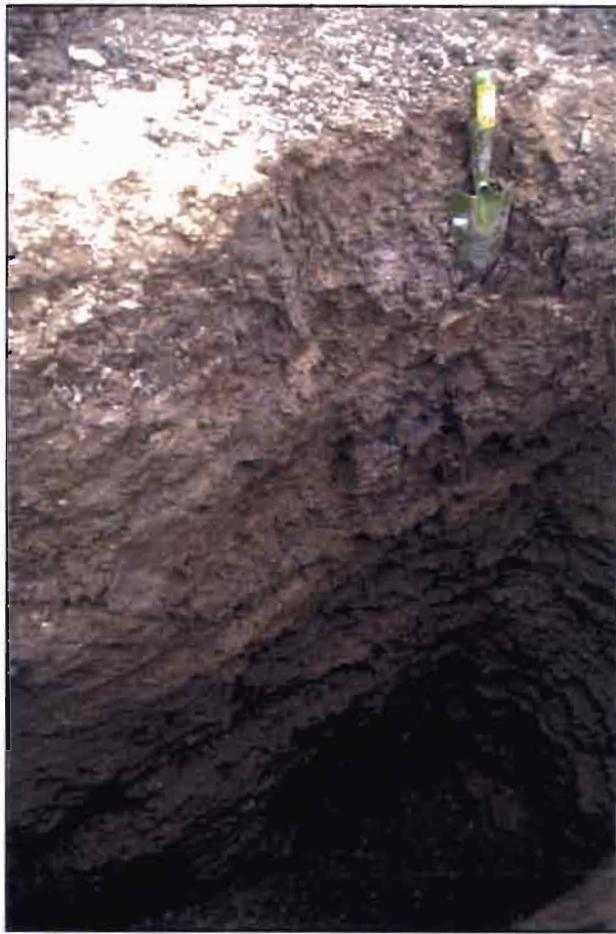
Niveau piézométrique de la nappe en amont et en aval du barrage d'El Gouazine (en mai 1998)

Planche photographique VI

Observations pédologiques



- 1 Sédiments du lac (profil p6) montrant l'alternance de dépôts fins et grossiers
- 2 Profil pédologique (p5) de la terrasse est bordant le lac et montrant un niveau sablo-argileux (Hsa) sombre (humifère), qui contribue à l'infiltration de l'eau de la retenue



7. ESTIMATION DES PERTES PAR INFILTRATION

7.1. Tracage chimique en phase évaporatoire

Durant **une phase évaporatoire** donnée, on considère l'évolution temporelle du volume du lac (V) et la concentration d'un élément conservatif comme l'ion chlorure (Cl^-). On compare le facteur de réduction volumique F_v et le facteur de concentration F_c calculé entre un instant donné initial (i) et un instant donné final (f) par les relations :

$$F_v = V_i / V_f \text{ et } F_c = Cl^-_f / Cl^-_i.$$

Si les deux facteurs sont égaux, il n'y a pas d'infiltration ou le flux d'eau souterraine entrant compense le flux d'eau souterraine sortant. Par contre, le lac perd de l'eau si $F_c > F_v$ (flux sortant) et est alimenté en eau si $F_c < F_v$ (flux entrant).

En supposant, pour les deux derniers cas, qu'il n'y a pas d'infiltration durant la période considérée, on peut calculer :

- une concentration théorique selon la relation $Cl^-_{th} = F_v Cl^-_i$
- un volume théorique selon la relation $V_{th} = V_i / F_c$.

L'écart entre le volume mesuré V_{th} et le volume théorique V_i donne une estimation du bilan hydrique souterrain. Une valeur négative correspond à un volume d'eau sortant du lac tandis qu'une valeur positive est liée à un volume d'eau entrant dans lac.

Cette méthode est appliquée aux données obtenues en 1994 et 1995 pour lesquelles 5 mesures simultanées du volume du lac et de la concentration en chlorures des eaux du lac sont disponibles (**figure 19**, d'après RAHAINGOMANANA, 1998).

Le **tableau XIV** montre que le lac n'infiltré pas ou est alimenté en eau souterraine de décembre 1994 à avril 1995 tandis qu'il perd 7068,7 m³ d'eau d'avril à juin 1995. Cette perte correspond à une infiltration journalière de 126,2 m³.

Cependant, les volumes calculés ne représentent pas exactement les flux d'eau souterraine car une quantité non négligeable d'eau de pluie est tombée durant les 4 périodes considérées. Au cours des 3 premières périodes, les précipitations varient de 9 à 14,5 mm tandis elles s'élèvent à 57,3 mm pour la dernière.

Il s'ensuit que le flux d'eau pluvial entrant dans le lac provoque une diminution de la concentration en Cl^-_f par dilution durant la période considérée. Aussi, le facteur de concentration calculé F_c a été sous-estimé tandis que le volume théorique calculé V_{th} et l'écart $V_{th} - V_i$ ont été surestimés.

En prenant en compte cette approximation, on peut seulement affirmer que, d'avril à juin 1995, le lac a un taux d'infiltration journalier d'au moins 126 m³.

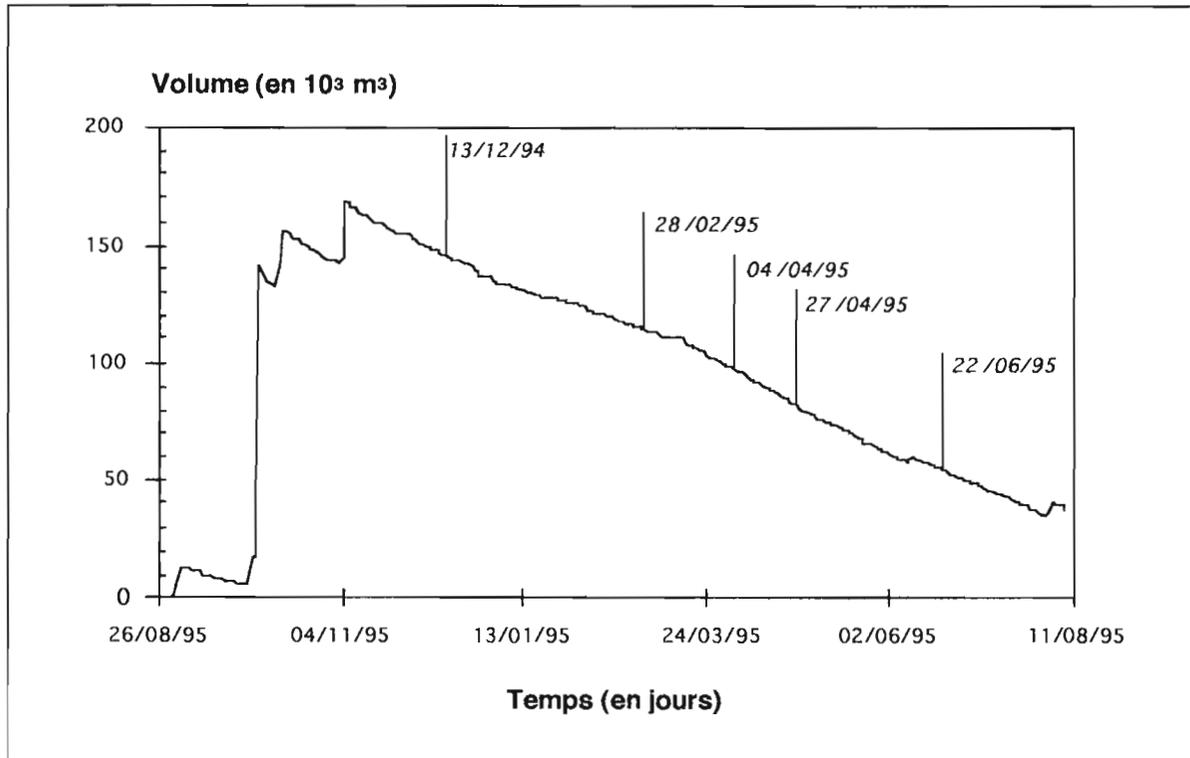


Figure 19
Variation journalière du volume d'eau dans le lac collinaire d'El Gouazine durant l'année hydrologique 1994-1995

Table XIV
Taux d'infiltration des eaux du lac d'El Gouazine pendant la période 1994-1995

Periode	V_i	V_f	Cl_i	Cl_f	F_v	F_c	Cl_{th}	V_{th}	$V_{th}-V_i$	N	Taux ($m^3 j^{-1}$)
	(m^3)		(mmol _c L ⁻¹)				(mmol _c L ⁻¹)	(m^3)	(j)		
13/12/94 28/02/95	146000	114000	0,91	1,10	1,28	1,21	1,17	121047,3	7047,3	77	91,5
28/02/95 04/04/95	114000	96500	1,10	1,30	1,18	1,18	1,30	96461,5	-38,5	35	-1,1
04/04/95 27/04/95	96500	81600	1,30	1,32	1,18	1,02	1,54	95037,9	13437,9	23	584,3
27/04/95 22/06/95	81600	53900	1,32	2,30	1,51	1,74	2,00	46831,3	-7068,7	56	-126,2

7.2. Evolution temporelle

Les données relatives au niveau de l'eau dans la retenue sont enregistrées automatiquement lorsqu'une variation de plus d'1 cm se produit dans la retenue. Elles sont transformées en volume selon une relation établie spécifiquement pour le lac d'El Gouazine.

Comme les données enregistrées sont nombreuses, seules celles obtenues à 8 heures du matin sont retenues pour le traitement. La moyenne mobile sur 6 jours consécutifs est ensuite calculée pour une série de 130 jours à compter du 1/1/1997.

Les variations de volume observées entre deux instants donnés correspondent soit à un flux hydrique entrant si la variation est positive, soit à un flux hydrique sortant si la variation est négative. Prenant en compte les volumes d'eaux évaporée, précipitée et ruisselée, qui ont été effectivement mesurés, nous pouvons estimer les volumes d'eau souterraine entrant et sortant. pour une période de temps donnée, il s'agit plus précisément d'un flux hydrique net correspondant à la différence entre les pertes de la retenue par infiltration et les apports souterrains. Les valeurs obtenues sont comparées journalièrement aux niveaux d'eau de la retenue effectivement observés (**figure 20**).

On remarque un changement brutal à la cote 4,5 m dans le bilan hydrique de la nappe. Au-dessus de cette cote, le taux d'infiltration est compris entre 200 et 300 m³ par jour. En dessous de la cote 4,5 m, le taux est compris entre 50 et 150 m³ par jour. Pour les niveaux bas de la retenue, on peut également avoir soit aucune d'infiltration (valeur nulles), soit un faible apport d'eau (valeurs positives).

Il est particulièrement intéressant de noter que le changement observé dans l'infiltration journalière correspond pratiquement à la position de la couche sableuse précédemment décrite.

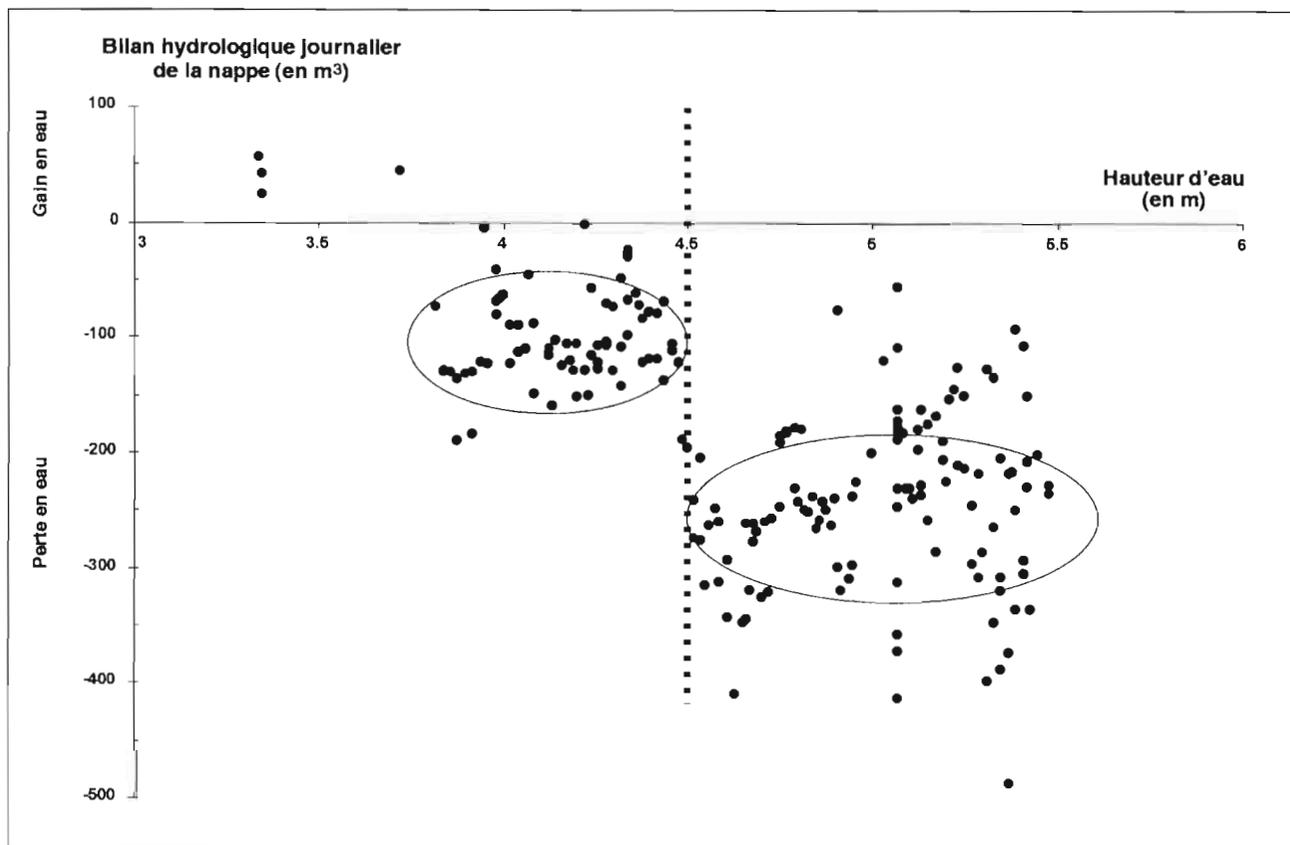


Figure 20
 Perte d'eau par infiltration dans le lac collinaire d'El Gouazine
 (période d'évaporation, 130 jours depuis le 1/1/1997)

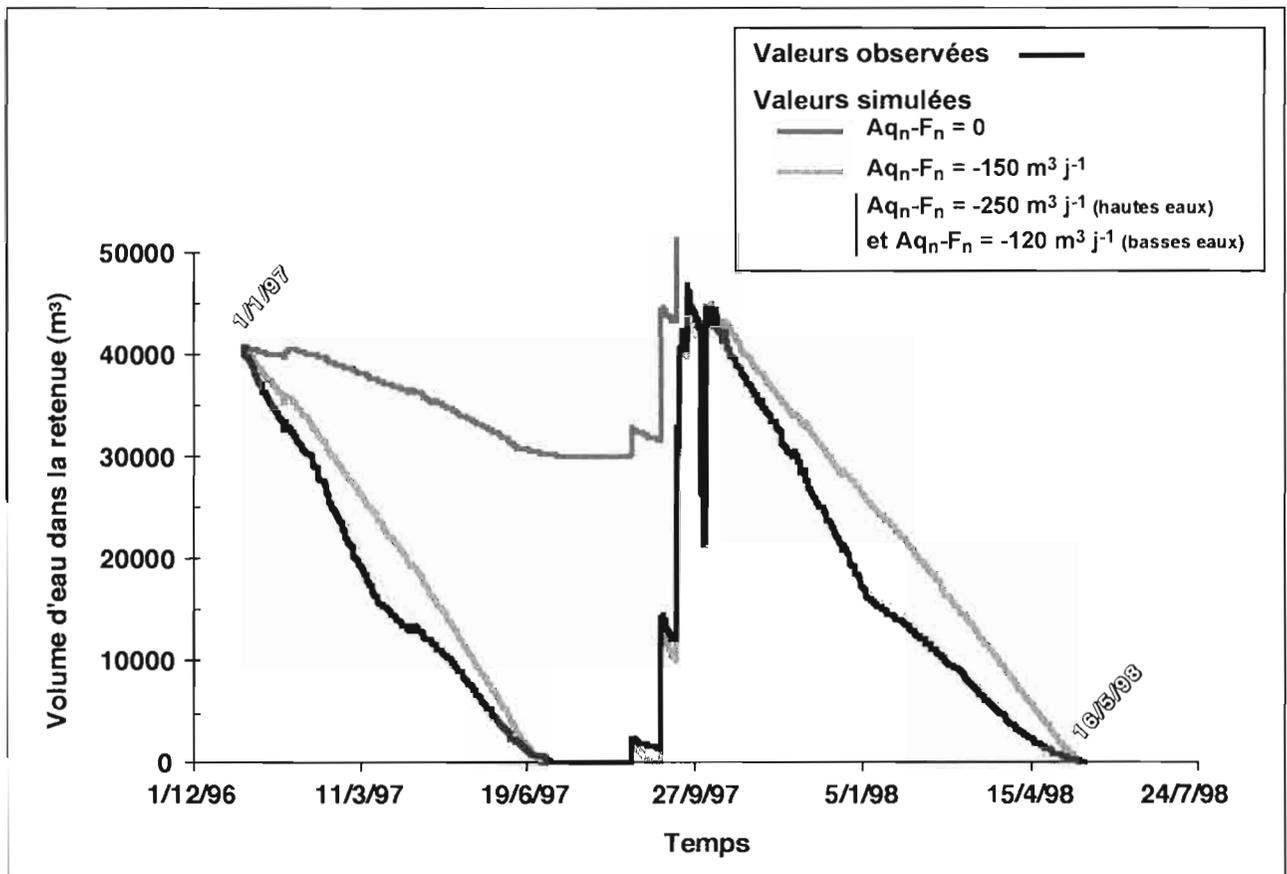


Figure 21

Simulation de l'évolution temporelle du volume d'eau dans le lac collinaire d'El Gouazine (pour un jour donné n , le terme $Aq_n - F_n$ représente le bilan volumique des eaux souterraines, avec Aq_n pour les apports et F_n pour les pertes par infiltration)

8.2. Simulation isotopique

Le bilan isotopique des eaux de la retenue est établi de la manière suivante :

$$R_{n+1} = [(V_n - F_n) R_n + P_n R_{p_n} + Aq_n R_{a_n} - E_n \alpha_n] / [V_{n+1}]$$

avec :

au jour n+1, R_{n+1} rapport isotopique de l'eau de la retenue et V_{n+1} volume de la retenue

au jour n, R_n rapport isotopique de l'eau de la retenue et V_n volume de la retenue

F_n volume des pertes par infiltration (ou fuites)

P_n volume des apports par les pluies et le ruissellement dans la retenue

Aq_n volume des apports souterrains

E_n volume des pertes par évaporation

R_{p_n} , R_{a_n} rapports isotopiques de l'eau de pluie et de la nappe alimentant la retenue

α_n fractionnement isotopique au cours de l'évaporation de l'eau de la retenue

❖ Pour un élément isotopique i donné, le rapport isotopique R_i est utilisé à la place de la valeur δ_i (‰ vs SMOW) par souci de clarté dans le signe des termes du bilan. La conversion s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$R_i = ((\delta_i / 1000) + 1) R_i^{SMOW}$$

Pour l'eau de pluie et la nappe alimentant la retenue, les valeurs de R_{p_n} , R_{a_n} en ^{18}O sont considérées équivalentes et égales à $1997,18 / 10^6$, soit $-4,0$ ‰ vs SMOW.

❖ Pour un élément isotopique donné i, le facteur de fractionnement isotopique (α_i^{*l-v}) lors d'un changement de phase (en l'occurrence, liquide \rightarrow vapeur pour l'eau) est défini, lorsque l'équilibre est atteint, par le rapport :

$$\alpha_i^{*l-v} = R_i^l / R_i^v = (1000 + \delta_i^l) / (1000 + \delta_i^v)$$

où R_i^l est le rapport isotopique de la phase liquide et R_i^v celui de la phase vapeur.

Pour calculer le terme α_i^{*l-v} , qui est généralement proche de 1, on préférera utiliser la notion de facteur d'enrichissement isotopique à l'équilibre (ϵ_i^{*l-v}), défini par la relation (BARNES et ALLISON, 1983) :

$$\epsilon_i^{*l-v} = (\alpha_i^{*l-v} - 1) 1000 = (\delta_i^l - \delta_i^v) / (1 + 10^{-3} \delta_i^v)$$

où ϵ_i^{*l-v} est exprimé en parts pour mille ou unités ‰ et, avec comme approximation, $\epsilon_i^{*l-v} \approx (\delta_i^l - \delta_i^v) \approx -\epsilon_i^{*v-l}$

❖ En réalité, l'enrichissement total de la phase liquide ϵ_i^{l-v} en isotope i est égal à la somme de l'enrichissement à l'équilibre ϵ_i^{*l-v} et de l'enrichissement cinétique $\Delta\epsilon_i^{l-v}$ (dû aux faibles différences entre les taux avec lesquels les différentes espèces isotopiques diffusent dans l'atmosphère à partir d'une surface évaporante), soit l'expression :

$$\epsilon_i^{l-v} = \epsilon_i^{*l-v} + \Delta\epsilon_i^{l-v} \quad (2)$$

où ϵ_i^{*l-v} , fonction de la température T (exprimée en °K) est donné par l'expression :
 $\epsilon_i^{*l-v} = 2,64 - 3,206 \cdot 10^3 / T + 1,53 \cdot 10^6 / T^2$ (BOTTINGA et CRAIG, 1969).
 La température considérée pour la simulation est de 25°C ou 298,15°K.

et $\Delta\epsilon_i^{l-v} = \eta_i (1 - h_a) = ((\sigma_i^v)^m - 1) (1 - h_a)$
 η_i est l'excès du rapport de diffusion en phase vapeur de l'isotope i : il mesure la différence relative dans la capacité des molécules d'une espèce i à s'échapper de la surface évaporante, comparé à des molécules d'eau pure ;
 σ_i^v est le rapport de diffusion en phase vapeur de l'isotope i : $\sigma_{18}^v = 1,0285$ pour ^{18}O et $\sigma_2^v = 1,0251$ pour ^2H , ces valeurs étant considérées comme constantes dans le domaine de température 5 - 80°C (MERLIVAT, 1978) ;
 m est le facteur de turbulence au-dessus de la surface évaporatoire : $m = 0,67$ pour les eaux de surface libres (BRUTSAERT, 1975) ;
 h_a est l'humidité relative de l'atmosphère libre considérée comme constante et égale à 0,2. La pente de la droite régionale d'évaporation, qui est égale à 4,1, a été utilisée pour calculer l'humidité relative moyenne produisant le facteur de fractionnement.

Pour un jour donné n , l'enrichissement total ϵ_n de la phase liquide en isotopes de l'eau (^{18}O et/ou ^2H) est calculé par l'équation (2) et le facteur de fractionnement isotopique α_n , au cours de l'évaporation de l'eau de la retenue, est donné par la relation :

$$\alpha_n = \epsilon_n / 1000 + 1$$

❖ Comme pour la simulation hydrologique, les termes P_n (apports superficiels) et E_n (évaporation) sont supposés connus d'après la chronique observée et les autres prélèvements dans la retenue, notamment domestiques et agricoles, sont négligeables.

Entre 2 jours donnés, l'évolution temporelle de la teneur en ^{18}O , exprimée en unité δ (‰), de la retenue est simulée en estimant les termes F_n et Aq_n de manière à ce que leur différence ($Aq_n - F_n$) soit en concordance avec les résultats de la modélisation hydrologique.

En faisant varier ces deux termes, plusieurs scénarii ont été testés et comparés aux valeurs isotopiques observées (**figure 22**) :

- *Scénario 1* : $Aq_n = 0$ et $F_n = 250 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (hautes eaux) et $120 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (basses eaux). Il n'y a pas d'apports depuis l'aquifère.
- *Scénario 2* : $Aq_n = 25 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ et $F_n = 275 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (hautes eaux) et $145 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (basses eaux).
- *Scénario 3* : $Aq_n = 50 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ et $F_n = 300 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (hautes eaux) et $170 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (basses eaux).
- *Scénario 4* : $Aq_n = 100 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ et $F_n = 350 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (hautes eaux) et $220 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (basses eaux).

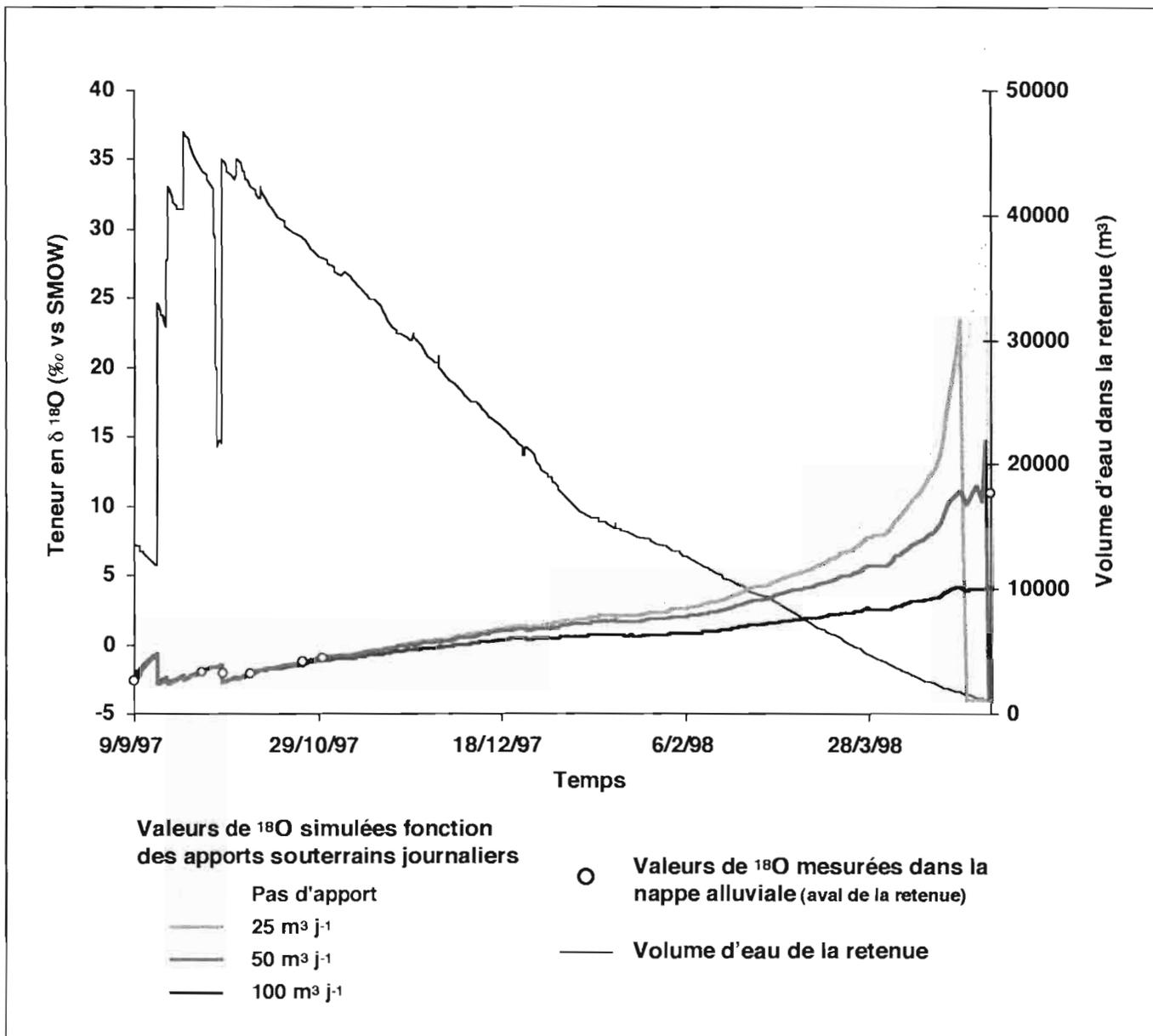


Figure 22
Simulation de l'évolution temporelle de la teneur en ^{18}O dans le lac collinaire d'El Gouazine en considérant plusieurs valeurs d'apports souterrains journaliers

Le scénario 3 est celui qui permet de relier la teneur isotopique initialement choisie (teneur des eaux souterraines d'origine pluviale, à savoir $\delta^{18}\text{O} = -4,0\text{‰}$) à la teneur observée dans les flaques restantes au fond de la retenue ($\delta^{18}\text{O} = 10,9\text{‰}$). C'est le scénario que nous estimons le plus probable.

❖ Au vu de l'importance de la fuite réelle de la retenue que le modèle de mélange de la retenue nous impose, l'essentiel des eaux de l'aquifère en aval semble issu de ces fuites. Les teneurs en ^{18}O observées en aval dans les puits sont donc repositionnées sur la courbe d'évolution des teneurs du scénario choisi (**figure 23**).

Bien que ce « positionnement » ne puisse pas être univoque, notamment pour les teneurs des trois points les plus éloignés, il permet d'estimer un temps de transit si les dates sont attribuées avec cohérence. Les différences de temps entre la chronique des teneurs de la retenue permettent le calcul de la vitesse d'infiltration par écoulement souterrain, lorsqu'elles sont rapportées à la distance, et du volume d'eau écoulé depuis la retenue (**tableau XV**).

Tableau XV
Pertes par infiltration du lac collinaire d'El Gouazine en automne 1997

Date estimée	D_r (m)	N_j (j)	v_{es} (m j^{-1})	V_{es} (m^3)
30/10/97	0	-	-	-
25/10/97	36	5	7,20	1500
11/10/97	156	14	8,57	4200
03/10/97	393	8	29,63	2400
27/09/97	738	6	57,50	1800
09/09/97	1600	18	47,89	4750
Total	1600	51	31,37	14650

D_r distance à la retenue

N_j nombre de jours

v_{es} , V_{es} vitesse et volume de l'écoulement souterrain

Le rapport volume / distance (V_{es} / D_r) permet le calcul d'une section moyenne de $36,625 \text{ m}^2$.

Une application simple de la loi de Darcy, avec un perméabilité de $0,01 \text{ m s}^{-1}$ (réaliste avec l'interprétation des pompages au niveau du puits w1) et un gradient de $0,01 \text{ m m}^{-1}$, donne une estimation des débits de l'ordre de $316,44 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$, ce qui est compatible avec les hypothèses de départ.

En conséquence, les pertes de la retenue estimée par le scénario retenu, soit $Aq_n = 50 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ et $F_n = 300 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (hautes eaux) ou $170 \text{ m}^3 \text{ j}^{-1}$ (basses eaux), les teneurs isotopiques observées dans les puits et leur correspondance avec les teneurs simulées dans la retenue, le gradient et la perméabilité supposés de l'aquifère constituent un ensemble cohérent de données qu'il est difficile réfuter sans mettre en cause l'ensemble de l'édifice.

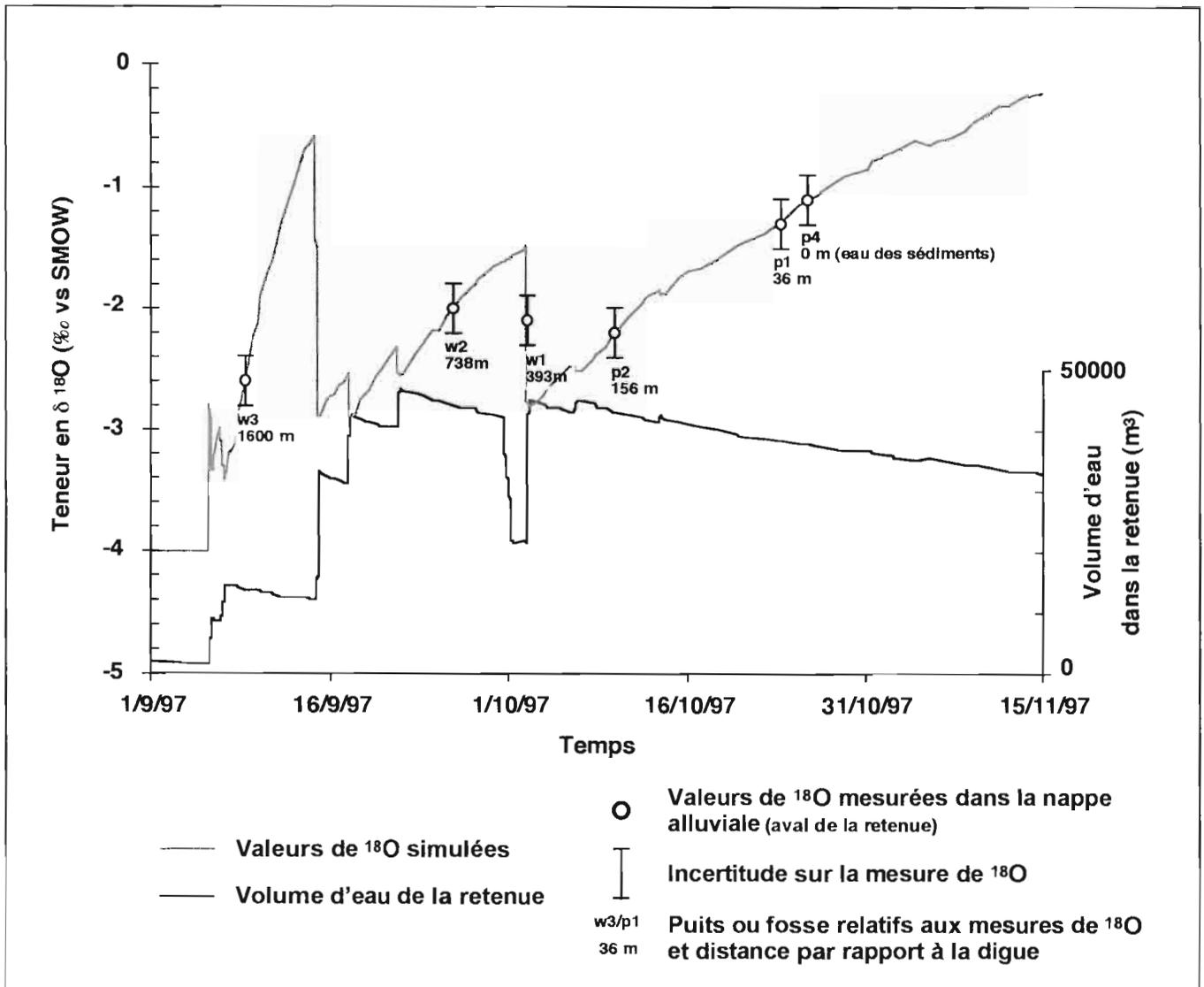


Figure 23

Evolution temporelle de la teneur en ^{18}O simulée et du volume d'eau mesuré dans le lac collinaire d'El Gouazine avec la reconstitution des valeurs en ^{18}O de la nappe alluviale

9. CARACTERISATION DES ROCHES, DES SOLS ET DES SEDIMENTS DU BASSIN VERSANT D'EL GOUAZINE

9.1. Caractérisation minéralogique

9.1.1. Affleurements géologiques

Les **figures 24a** et **24b** présentent les diffractogrammes RX des principaux matériaux géologiques prélevés et le **tableau XVIa** donne sous une forme synthétique l'interprétation qualitative de ces diffractogrammes.

Parmi les roches étudiées, on distingue 3 grands types de roches : des roches calcaires (EGm1, EGm2, EGm7, EGm3, EGm6, EGm11), des roches argileuses (EGm4, EGm5, EGm9, EGm8, EGm10, EGm12), et une roche gréseuse (EGm13).

Les roches calcaires comprennent 2 sous-groupes : les calcaires « sensu stricto » (EGm3, EGm6 et EGm11) contenant exclusivement de la calcite et les calcaires gréseux (EGm1 et EGm7) contenant du quartz en faible abondance associé à de la calcite. L'échantillon EGm2 ne correspond pas à un niveau géologique mais à un encroûtement calcaire formé au cours de la pédogénèse.

Tableau XVIa
Détermination minéralogique qualitative des matériaux géologiques
du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Quartz	Calcite	Gypse	Feldspath	Smectite	Kaolinite	Illite
Calcaires							
EGm1	XX	XXX	-	-	-	-	-
EGm2	XX	XXX	-	-	X	X	-
EGm7	XX	XXX	-	-	X	X	-
EGm3	X	XXX	-	-	-	-	-
EGm6	X	XXX	-	-	-	-	-
EGm11	X	XXX	-	-	X	X	-
Marnes							
EGm4	XXX	XXX	-	-	XXX	XX	-
EGm5	XXX	XXX	X	-	XXX	XX	-
Marnes gypseuses							
EGm9	XXX	XXX	XXX	-	XX	XXX	-
EGm10	XXX	XXX	XXX	-	XX	XXX	?
Argiles gypseuses							
EGm8	XXX	-	XX	X	XXX	XX	?
EGm12	XXX	-	XXX	-	XX	XXX	?
Grès							
EGm13	XXX	-	-	XXX	-	-	-

XXX : forte présence XX : faible présence X : traces - : absence ? : à confirmer

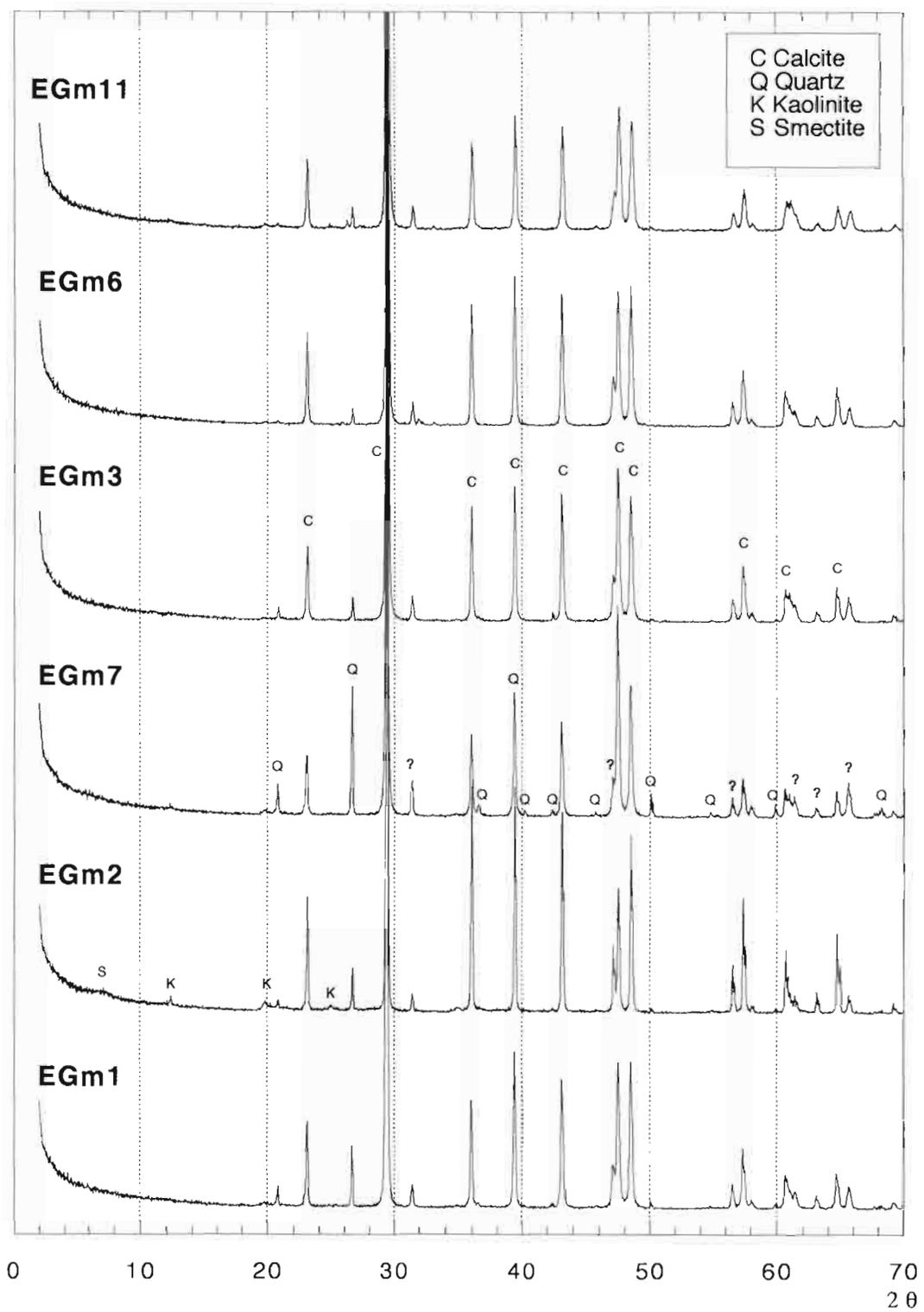


Figure 24a
 Diffractogrammes RX des roches calcaires du bassin versant d'El Gouazine

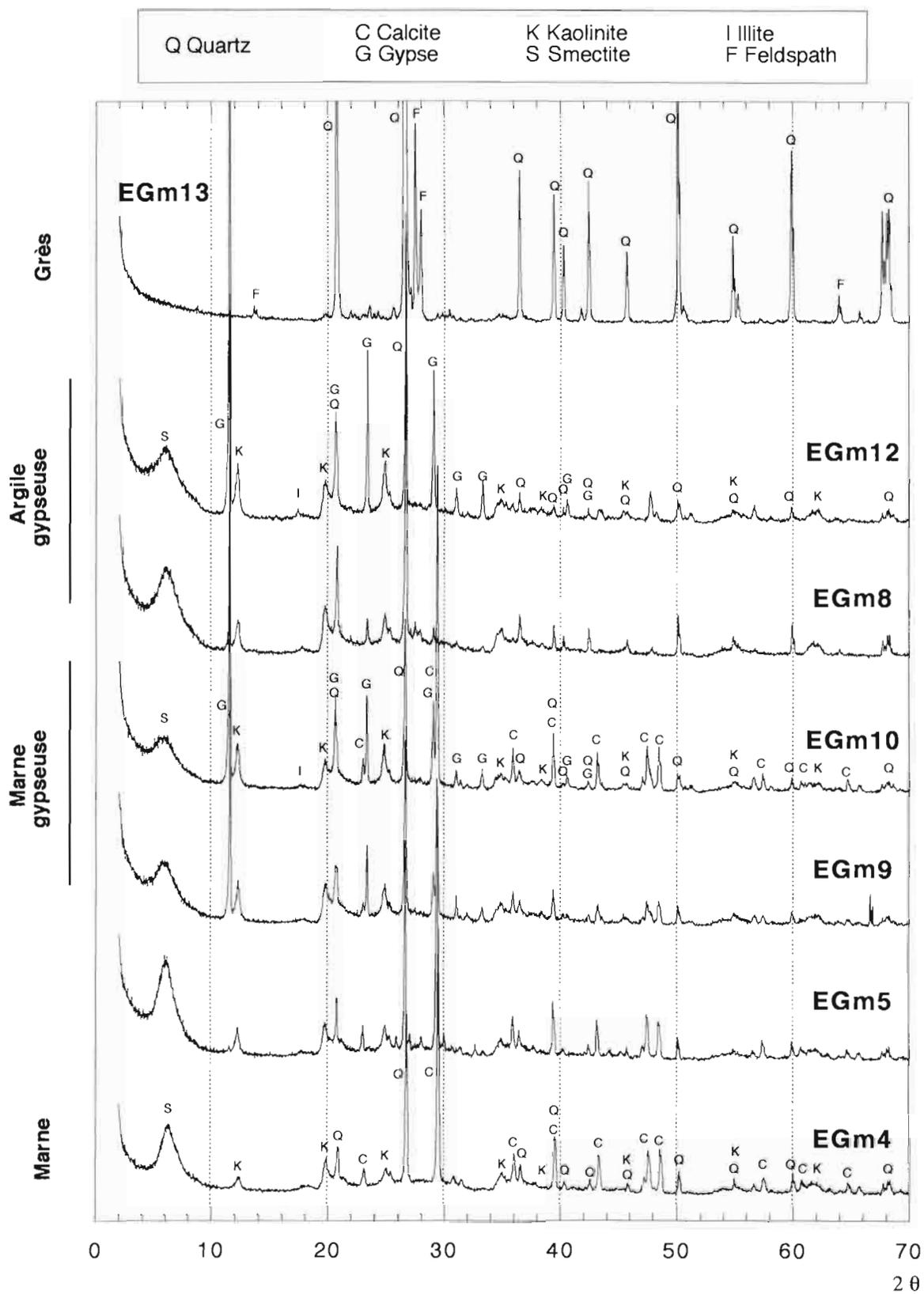


Figure 24b

Diffractogrammes RX des roches argileuses et gréseuses du bassin versant d'El Gouazine

Les roches argileuses appartiennent à 3 sous-groupes : les marnes (EGm4 et EGm5), les marnes gypseuses (EGm9 et EGm10) et les argiles gypseuses (EGm8 et EGm12). Toutes ces roches contiennent du quartz en quantité mieux exprimée que pour les roches calcaires. On note un peu de gypse dans l'échantillon EGm5.

On constate que les principaux minéraux argileux sont la smectite et la kaolinite, certains échantillons contenant également de l'illite. Dans la même région, FOURNET (1969) a caractérisé les minéraux smectitiques comme étant une montmorillonite calcique ou sodique et a montré la présence d'illite dans les formations marneuses.

La roche gréseuse (EGm13) n'est constituée que de quartz avec la présence nette de feldspath, notamment l'anorthoclase qui est un aluminosilicate potassique et sodique.

9.1.2. Matériaux pédologiques et sédimentologiques

Les diffractogrammes RX des échantillons de sol et de sédiment sont données dans les figures 25a et 25b et leur interprétation synthétisée dans le **tableau XVIIb**.

Hormis le gypse, on retrouve les mêmes minéraux que pour les roches calcaires et les marnes. On notera la présence systématique de feldspath en quantité relativement faible.

Les refus EGp2r et EGp3r contiennent essentiellement de la calcite et du quartz, tandis que le refus EGp4r semble plus argileux. L'échantillon EGp4 est également plus riche en minéraux argileux.

Tableau XVIIb
Détermination minéralogique qualitative des matériaux pédologiques et sédimentaires du lac collinaire d'El Gouazine

Echantillon	Quartz	Calcite	Gypse	Feldspath	Smectite	Kaolinite	Illite
Sols							
EGp1 2,50	XXX	XXX	-	XX	XX	XX	-
EGp2 2,00	XXX	XXX	-	X	XX	XX	-
EGp2r	XXX	XXX	-	X	X	X	-
EGp5 20-30	XXX	XX	-	XX	-	X	-
EGp5 50-70	XXX	X	-	XX	-	X	-
Sédiments							
EGp3 60-75	XXX	X	-	XX	-	X	-
EGp3 125-150	XXX	XXX	-	X	XX	XX	-
EGp3r	XXX	XXX	-	-	-	-	-
EGp4 110-120	XXX	XXX	-	X	XX	XX	-
EGp4r	XXX	XXX	-	-	X	X	-

XXX : forte présence XX : faible présence X : traces - : absence

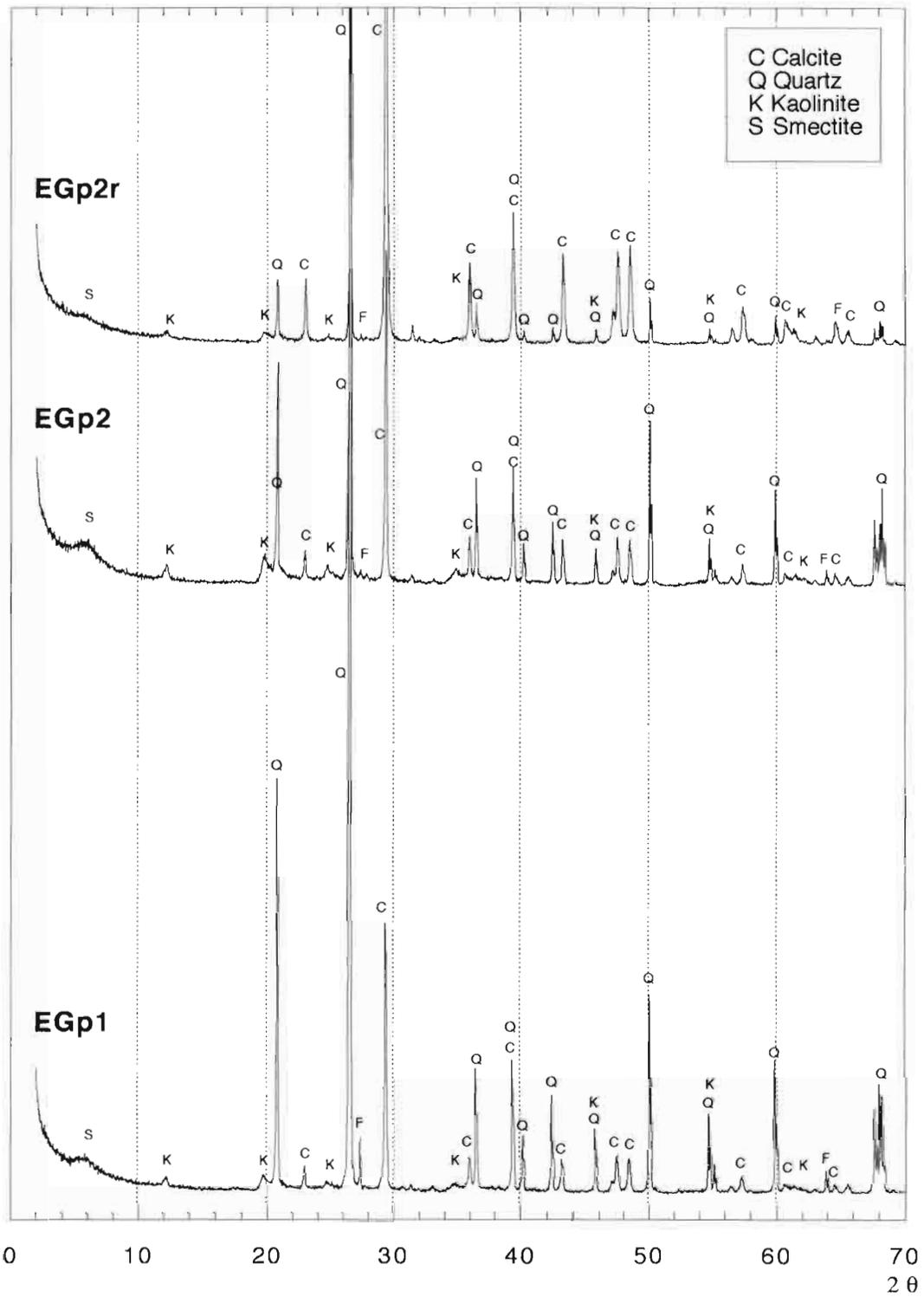


Figure 25a
 Diffractogrammes RX des sols en aval de la retenue d'El Gouazine

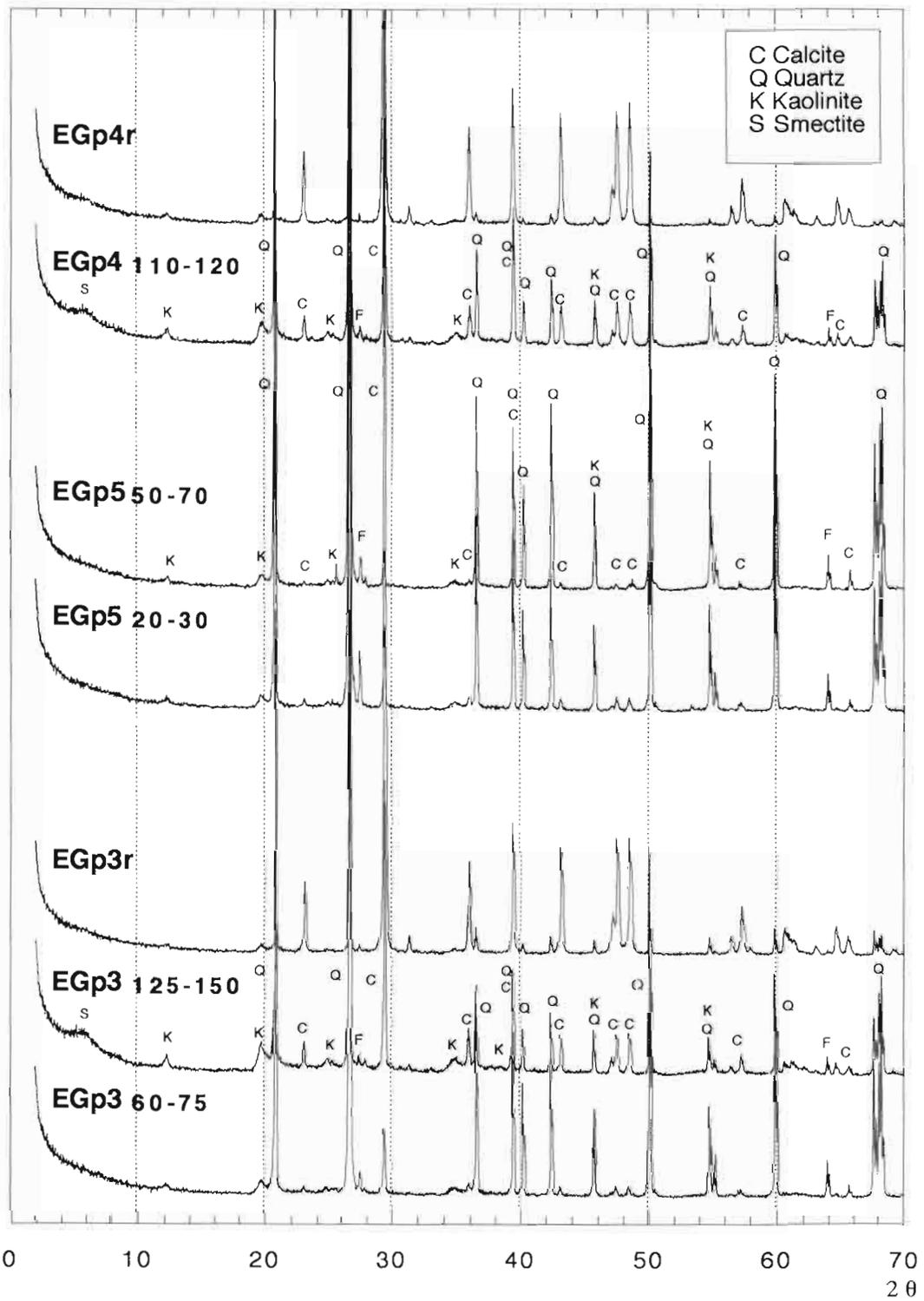


Figure 25b
 Diffractogrammes RX des sédiments de la retenue d'El Gouazine

9.2. Caractérisation chimique

9.2.1. Eléments majeurs

Les teneurs en éléments majeurs, exprimées en termes d'oxyde, sont présentées dans le **tableau XVIIa** pour les matériaux géologiques et dans le **tableau XVIIb** pour les matériaux pédologiques et sédimentaires.

Tableau XVIIa
Teneurs en éléments majeurs (en g 100g⁻¹) des matériaux géologiques
du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Σ
Calcaires													
EGm1	6,76	1,86	0,10	1,38	<0,01	<0,01	0,44	50,08	0,07	<0,03	0,52	39,22	100,4
EGm2	8,62	3,32	0,15	0,98	<0,01	<0,01	0,58	45,55	0,01	<0,03	1,40	38,29	98,9
EGm7	10,28	1,55	0,10	1,21	0,05	<0,01	0,27	49,12	0,11	<0,03	0,51	38,50	101,7
EGm3	2,83	0,59	0,05	0,87	<0,01	<0,01	0,34	53,62	0,10	<0,03	0,20	42,12	100,7
EGm6	2,99	0,65	0,05	0,25	<0,01	<0,01	0,62	54,46	<0,03	<0,03	0,25	42,44	101,7
EGm11	5,06	1,56	0,07	1,69	0,09	0,04	0,56	51,27	0,05	<0,03	0,32	41,15	101,9
Marnes													
EGm4	41,99	13,51	0,56	5,23	0,78	<0,01	3,43	9,98	0,04	<0,03	5,50	17,09	98,1
EGm5	40,80	14,06	0,52	5,69	0,62	0,12	3,26	10,91	0,02	<0,03	6,45	15,75	98,2
Marnes gypseuses													
EGm9	42,46	15,25	0,63	6,76	0,74	<0,01	1,40	10,02	0,04	0,13	6,08	14,66	98,2
EGm10	37,10	13,27	0,61	5,72	0,71	<0,01	1,05	12,62	0,10	<0,03	5,89	16,79	93,9
Argiles gypseuses													
EGm8	54,66	16,19	0,85	7,07	0,92	0,25	2,10	1,76	0,06	<0,03	5,92	9,39	99,2
EGm12	42,36	15,93	0,76	5,37	1,42	0,04	1,42	6,23	0,01	<0,03	5,46	13,92	92,9
Grès													
EGm13	89,53	3,78	0,22	1,93	1,10	0,35	0,10	0,41	0,05	<0,03	0,37	1,44	99,3

H₂O⁺ : Perte en eau à 110°CH₂O⁻ : Perte en eau à 1100°C

Tableau XVIIb
Teneurs en éléments majeurs (en g 100g⁻¹) des matériaux pédologiques et sédimentaires
du lac collinaire d'El Gouazine

Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Σ
Sols													
EGp1 2,50	69,00	4,51	0,27	2,61	<0,01	<0,01	0,53	10,37	0,03	<0,03	1,32	10,40	99,0
EGp2 2,00	58,21	8,02	0,41	3,66	0,41	<0,01	0,88	10,07	0,03	<0,03	2,83	13,67	98,2
EGp5 20-30	81,73	3,45	0,22	1,63	0,12	<0,01	0,35	2,58	0,01	<0,03	6,01	4,80	100,9
EGp5 50-70	87,81	3,07	0,20	1,61	<0,01	<0,01	0,28	1,09	0,01	<0,03	1,07	3,20	98,3
Sédiments													
EGp3 60-75	85,43	3,64	0,24	1,79	<0,01	<0,01	0,34	2,26	0,02	<0,03	1,24	4,47	99,4
EGp3 125-150	58,94	7,65	0,39	3,50	0,77	<0,01	1,05	9,25	0,03	<0,03	3,01	13,49	98,1
EGp4 110-120	62,95	6,48	0,35	3,06	0,51	<0,01	0,82	10,26	0,03	<0,03	2,29	12,67	99,4

Les résultats de l'analyse chimique confirment ceux de l'analyse minéralogique.

Bien que riche en CaO (plus de 50 g 100g⁻¹), avec de la calcite contenant une très faible quantité de MgO, les roches calcaires contiennent également de la silice (SiO₂) en quantité variable (2,8 à 10,3 g 100g⁻¹).

Dans le grès, la silice est naturellement l'oxyde dominant, avec environ 90 g 100g⁻¹, et de faibles quantités d'Al₂O₃ (3,8 g 100g⁻¹) et de K₂O (1,1 g 100g⁻¹) correspondent à de l'illite. La roche n'est pas carbonatée.

Les marnes et les argiles gypseuses (argilite ?) contiennent une grande quantité de SiO₂ (37,1 à 55 g 100g⁻¹) provenant du quartz et des minéraux argileux. De ces derniers, on trouve également 13,3 à 16,2 g 100g⁻¹ d'Al₂O₃, 5,2 à 7,1 g 100g⁻¹ de Fe₂O₃ et des quantités variables de cations, notamment CaO et MgO. La teneur en TiO₂ est plus élevée que dans le calcaire. Les argiles gypseuses ont une faible teneur en CaO (1,8 à 6,2 g 100g⁻¹), le Ca provenant du gypse. Pour les marnes, la teneur est nettement plus élevée (10 à 12,6 g 100g⁻¹), le Ca étant apporté par la calcite. Cependant, pour les marnes gypseuses, le Ca peut provenir à la fois de la calcite et du gypse.

L'horizon 60-75 cm du profil p3 et le profil p5 sont aussi riches en silice que le grès, mais la présence en faible quantité de minéraux argileux conduit à surestimer la contribution du quartz à cette richesse. Ils sont pauvres en carbonates. Les autres échantillons de sols et de sédiments s'apparentent aux marnes et aux argiles gypseuses, mais avec des teneurs en SiO₂ plus élevées (58,9 à 69 g 100g⁻¹), des teneurs en Al₂O₃ et en Fe₂O₃ plus faibles et des teneurs en CaO équivalentes.

9.2.2. Eléments-traces

Les résultats analytiques obtenus sur le site d'El Gouazine sont donnés dans le **tableau XVIIIa** pour les matériaux géologiques et dans le **tableau XVIIIb** pour les matériaux pédologiques et sédimentaires. En comparant ces résultats aux teneurs communément rencontrées dans la littérature (**tableau XIX**), on constate que, dans l'ensemble, ils sont bien représentatifs.

Le strontium est l'élément-trace qui domine dans tous les échantillons. La teneur est particulièrement élevée dans les roches calcaires (400 à 950 ppm) et faible dans le grès (100 ppm). La concentration en Sr atteint la valeur de 10800 ppm dans EGm5, cette valeur ayant été confirmée par des mesures répétitives.

Tableau XIX
Teneurs en éléments-traces (en ppm) dans les roches sédimentaires
(d'après KABATA-PENDIAS et PENDIAS, 1984)

Elément	Groupe	Calcaires	Sédiments argileux	Grès
Zn	Iib	10-25	80-120	15-30
Co	VIII	0,1-3	14-20	0,3-10
Ba	Ila	50-200	500-800	100-320
Ni	VIII	7-20	40-90	5-20
Sr	Ila	450-600	300-450	20-140
Cu	Ib	2-10	40-60	5-30
Cr	Vib	5-16	80-120	20-40

Tableau XVIIIa
Teneurs en éléments-traces (en ppm) des matériaux géologiques
du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Zn	Co	Ba	Ni	Sr	Cu	Cr
Calcaires							
EGm1	21,2	2,0	41,0	9,3	945,5	4,4	45,3
EGm2	10,8	2,3	48,9	7,9	444,7	6,8	76,8
EGm7	36,9	2,3	144,0	14,0	424,2	2,1	19,1
EGm3	7,9	1,2	44,2	3,0	398,7	7,7	32,6
EGm6	24,3	0,5	20,9	7,7	972,5	5,6	36,1
EGm11	23,1	1,6	15,4	3,6	535,2	5,6	20,1
Marnes							
EGm4	83,6	14,2	206,3	30,4	460,9	10,3	128,0
EGm5	81,6	13,3	273,0	28,9	10802,0	11,9	133,0
Marnes gypseuses							
EGm9	112,7	17,4	104,5	36,0	744,0	12,4	116,6
EGm10	71,6	14,9	95,2	22,9	256,1	8,1	72,6
Argiles gypseuses							
EGm8	98,1	21,7	187,6	30,8	214,1	9,4	116,8
EGm12	65,5	12,4	108,7	18,1	347,6	18,9	112,3
Grès							
EGm13	59,7	7,8	303,8	14,9	104,3	8,9	25,3

Tableau XVIIIb
Teneurs en éléments-traces (en ppm) des matériaux pédologiques et sédimentaires
du lac collinaire d'El Gouazine

Echantillon	Zn	Co	Ba	Ni	Sr	Cu	Cr
Sols							
EGp1 2,50	37,3	6,2	149,4	11,8	260,4	4,7	44,6
EGp2 2,00	52,5	9,5	152,2	17,6	301,0	6,9	62,5
EGp5 20-30	26,9	5,1	107,5	9,6	89,8	7,9	30,9
EGp5 50-70	26,7	4,2	99,0	7,2	69,4	7,1	25,8
Sédiments							
EGp3 60-75	28,1	5,4	111,5	10,9	82,2	7,5	30,9
EGp3 125-150	56,1	8,8	181,3	19,0	276,1	15,6	66,7
EGp4 110-120	43,7	8,0	148,7	15,2	255,5	7,5	46,5

9.2.3. Teneur en carbone et en carbonates

Les dosages de carbone dans les échantillons argileux de roches, de sols et de sédiments sont donnés dans les **tableaux XX**. La teneur en matière organique étant négligeable, on en déduit la teneur en carbonate total.

Pour les marnes gypseuses, cette information permettra de calculer la teneur en Ca provenant de la calcite et celle du gypse.

Tableau XX
Teneurs en carbone et en carbonates des matériaux argileux
du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	C	
	CO ₃	
	g 100g ⁻¹	
Marnes		
EGm4	2,08	10,4
EGm5	0,87	4,3
Marnes gypseuses		
EGm9	0,81	4,0
EGm10	0,85	4,2
Argiles gypseuses		
EGm8	0,08	0,4
EGm12	0,16	0,8
Sols		
EGp1 2,50	0,42	2,1
EGp2 2,00	0,67	3,3
EGp5 20-30	0,83	4,1
EGp5 50-70	0,70	3,5
Sédiments		
EGp3 60-75	0,94	4,7
EGp3 125-150	1,25	6,2
EGp4 110-120	0,84	4,2

9.3. Granulométrie

Rappel du protocole expérimental :

Les échantillons prélevés sur le terrain ont été séchés à l'air, puis broyés et tamisés à 2 mm. Le pourcentage de refus (particules > 2 mm) a été mesuré (**tableau XXI**) et la granulométrie de la fraction inférieure à 2 mm a été déterminée avec et sans décarbonatation.

Granulométrie sans décarbonatation :

Après destruction de la matière organique et dispersion par agitation avec de l'hexamétophosphate, l'échantillon a été tamisé sous l'eau sur tamis de 50 µm. La fraction sableuse, séchée, a été tamisée sur une colonne de tamis et la fraction fine a été analysée au microgranulomètre automatique Sedigraph.

Granulométrie avec décarbonatation :

Chacune de ces deux fractions a ensuite été attaquée à HCl 1/10 à température modérée (40° environ). Après élimination des produits d'attaque, les sables ont été passés sur un tamis de 50 µm. La fraction fine a été ajoutée à la fraction fine obtenue au premier tamisage pour passage au Sedigraph. Cette fraction, elle-même décarbonatée a été à nouveau analysée au microgranulomètre.

Les résultats sont présentés dans le **tableau XXIIa** pour les échantillons non décarbonatés et le **tableau XXIIb** pour les échantillons décarbonatés. Les valeurs ont été rapportées à 100g 100g⁻¹ de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm. En considérant la teneur en eau résiduelle, les valeurs brutes des échantillons non décarbonatés sont données en **annexe A6**.

Tableau XXI

Refus des matériaux pédologiques et sédimentaires du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Masse totale	Masse du refus	Masse du passant à 2 mm	Refus total
		g		g 100g ⁻¹
Sols				
EGp1 2,50	1564,00	119,25	1444,75	7,6
EGp2 2,00	1181,94	52,31	1129,63	4,4
EGp5 20-30	1329,89	27,53	1302,36	2,1
EGp5 50-70	1212,28	0,27	1212,01	0,02
Sédiments				
EGp3 60-75	1581,39	4,71	1576,68	0,3
EGp3 125-150	1144,68	42,20	1102,48	3,7
EGp4 110-120	1658,58	41,30	1617,28	2,5

Le refus est très faible (< 2 g 100g⁻¹) dans les échantillons EGp5 et Egp3 60-75 correspondant aux matériaux les plus sableux. En revanche, il est compris entre 3,7 g 100g⁻¹ (EGp3 125-150) et 7,6 g 100g⁻¹ (EGp1) dans les sols et les sédiments plus argileux.

Les données granulométriques montrent que tous les échantillons sont argileux, à l'exception du profil p5 et de l'horizon 60-75 cm du profil p3 qui sont sableux. Ceci confirme les observations de terrain.

Tableau XXIIa
Granulométrie *sans décarbonatation* (en g 100g⁻¹)
des matériaux argileux du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Argile <2 µm	Limon fin <20 µm	Limon grossier <50 µm	Sable fin <200 µm	Sable grossier <2000 µm	Total
Marnes						
EGm4	31,1	30,4	3,2	10,6	24,7	100,0
EGm5	30,9	24,0	2,9	16,1	26,1	100,0
Marnes gypseuses						
EGm9	37,7	14,6	3,9	11,5	32,2	100,0
EGm10	19,9	28,9	7,3	25,2	18,7	100,0
Argiles gypseuses						
EGm8	31,6	32,4	7,9	17,9	10,2	100,0
EGm12	42,8	35,4	4,1	2,9	14,7	100,0
Sols						
EGp1 2,50	20,4	8,3	1,5	23,2	46,5	100,0
EGp2 2,00	31,1	24,5	4,2	24,5	15,7	100,0
EGp5 20-30	17,0	4,1	1,6	45,8	31,6	100,0
EGp5 50-70	16,8	2,2	0,8	35,3	45,0	100,0
Sédiments						
EGp3 60-75	16,5	4,7	1,1	35,0	42,8	100,0
EGp3 125-150	38,4	20,8	3,8	23,4	13,6	100,0
EGp4 110-120	28,5	17,5	4,0	30,6	19,4	100,0

Tableau XXIIb
Granulométrie *avec décarbonatation* (en g 100g⁻¹)
des matériaux argileux du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Argile <2 µm	Limon fin <20 µm	Limon grossier <50 µm	Sable fin <200 µm	Sable grossier <2000 µm	Total
Marnes						
EGm4	22,5	42,2	3,4	16,6	15,3	100,0
EGm5	8,5	43,9	7,8	19,8	20,0	100,0
Marnes gypseuses						
EGm9	46,3	13,0	1,2	14,7	24,8	100,0
EGm10	45,5	7,3	1,1	27,0	19,2	100,0
Argiles gypseuses						
EGm8	35,2	31,5	6,6	16,2	10,5	100,0
EGm12	69,5	11,6	1,7	2,6	14,6	100,0
Sols						
EGp1 2,50	20,3	9,6	2,6	26,2	41,4	100,0
EGp2 2,00	20,0	24,0	13,1	24,9	18,0	100,0
EGp5 20-30	14,3	3,7	1,0	48,5	32,6	100,0
EGp5 50-70	7,4	5,9	2,8	36,0	47,9	100,0
Sédiments						
EGp3 60-75	11,9	5,2	2,1	38,5	42,4	100,0
EGp3 125-150	18,4	28,9	11,1	25,9	15,9	100,0
EGp4 110-120	20,7	19,8	4,5	33,9	21,1	100,0

10. INTERACTION EAUX-SOLS-ROCHES

10.1. Dissolution des minéraux

L'abondance des roches carbonatées dans le bassin versant et l'altération rapide des minéraux carbonatés par les eaux météoriques suggèrent que la dissolution de ces minéraux apporte des quantités significatives de Ca et de Mg au réservoir. La réaction de dissolution la plus commune pour la calcite est la dissolution simple (DREVER, 1988) donnant un rapport molaire $1/2 \text{ Ca} : \text{HCO}_3$ équivalent à 1:1.

La **figure 26a** montre que seules les eaux w6, w8 et w11, situées au niveau des affleurements calcaires, tombent soit sur ou juste au-dessus de la droite 1:1. Toutes les autres eaux souterraines et les eaux de surface sont au-dessus de la ligne, ce qui indique une autre source de Ca par dissolution de gypse et/ou d'argile.

Dans les argiles et les marnes, la dissolution du gypse est la source de sulfate et de calcium additionnel dans les eaux. Le graphique Ca versus SO_4 (**figure 26b**) montre que la plupart des eaux souterraines tombent au-dessus de la ligne 1:1, indiquant une autre source de Ca comme cela a été montré précédemment. Les puits aval et w10 tombent bien au-dessous de la ligne suggérant la formation potentielle d'argile. Seules l'eau du réservoir (s1), l'eau de surface s2 et l'eau de nappe w4 proviennent de la dissolution du gypse.

Si Na provient seulement de la dissolution de minéraux évaporitiques, alors Na doit équilibrer Cl. Le graphique Na versus Cl (figure 26c 6) illustre que Na est en excès pour tous les puits aval et le puits w10. Une source potentielle de Na en excès est la dissolution de feldspath comme celui trouvé dans l'échantillon de grès (EGm13). Na équilibre Cl pour les eaux souterraines w5, w6, w8 et w11, et pour l'eau du réservoir (s1). Na fait défaut par rapport à Cl dans les puits w4, w7 et w9, probablement à cause de la formation d'argile.

10.2. Modèle d'organisation des formations superficielles et des aquifères

Les faciès chimiques des eaux souterraines sont présentés sur une coupe longitudinale du bassin versant passant par l'oued principal (**figure27**).

La forte baisse de la conductivité électrique (CE) au niveau des affleurements calcaires montre que l'aquifère alluvial est alimenté par de l'eau souterraine peu profonde, stockée dans ces aquifères calcaires. En raison de la forte porosité du calcaire, cette roche aquifère peut accumuler un grand volume d'eau et être rapidement rechargée ou déchargée. Le lac collinaire a le même effet sur la CE de l'eau souterraine que les affleurements calcaires.

En retour, la nappe alluviale est fortement concentrée, lorsqu'elle s'écoule dans les matériaux argileux contenant des quantités variables de minéraux facilement solubles, comme le gypse, et étant moins perméables.

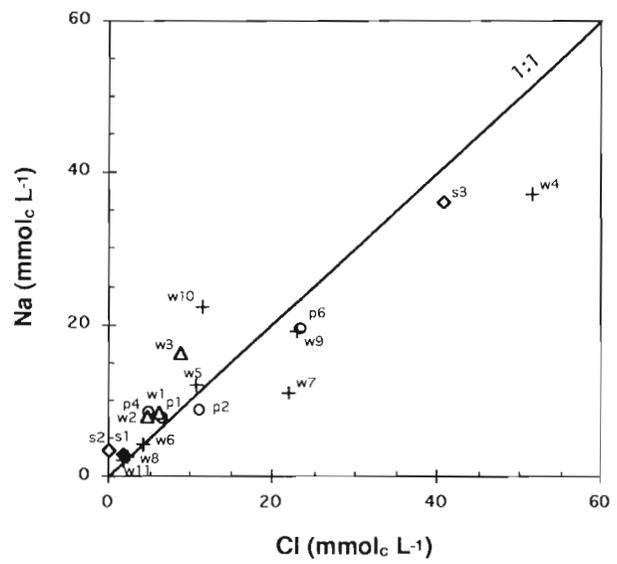
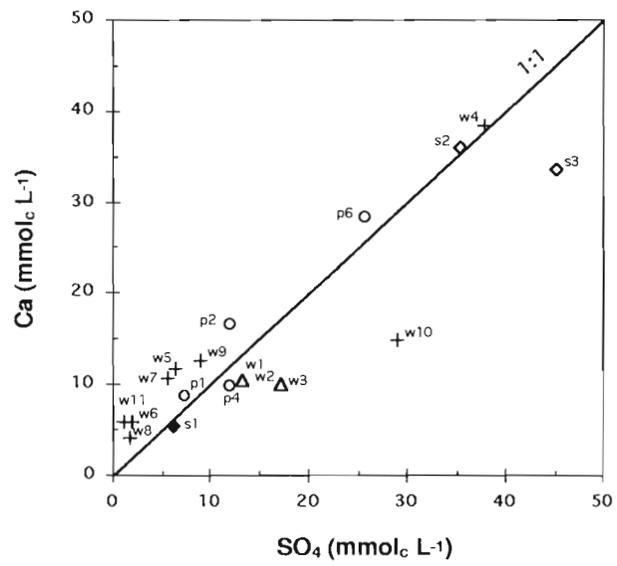
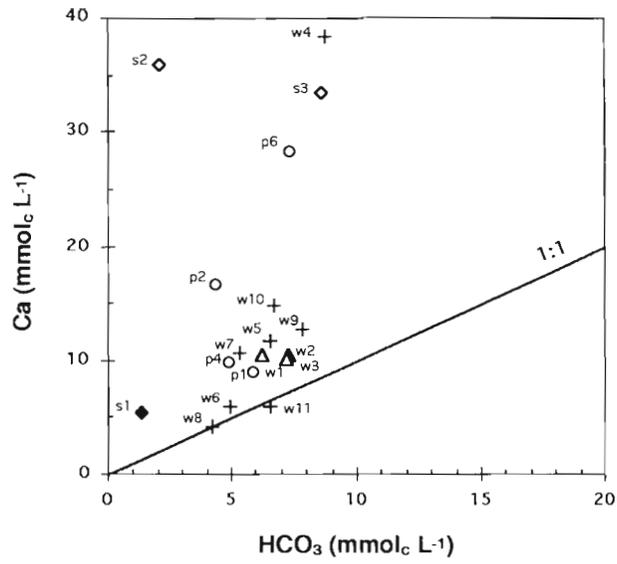


Figure 26
Dissolution de la calcite (a), du gypse (b) et de l'halite (c)
par les eaux du bassin versant d'El Gouazine (mai 1998)

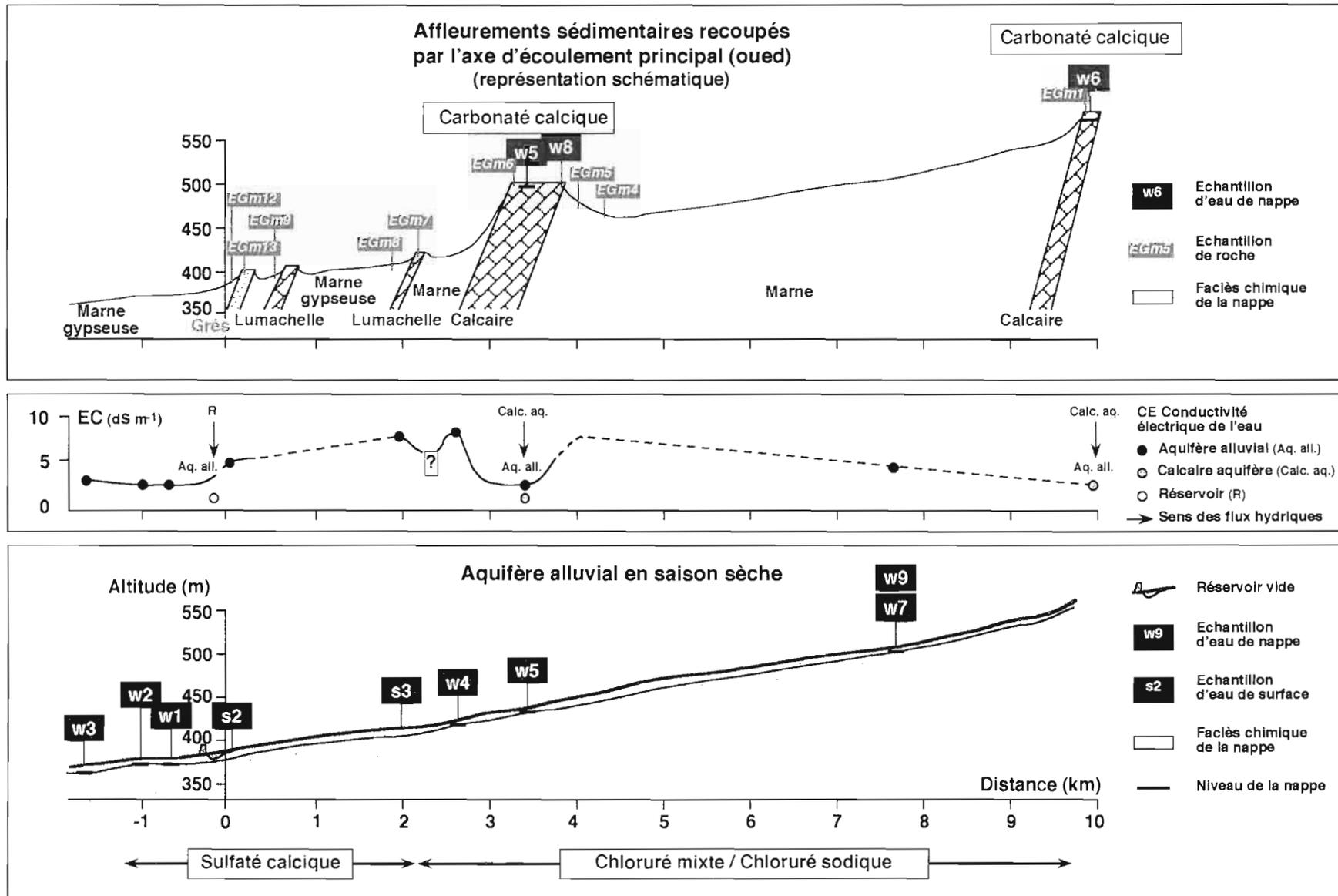


Figure 27
Relation entre les caractéristiques chimiques de la nappe alluviale (mai 1998)
et les structures géologiques du bassin versant d'El Gouazine

CONCLUSION

Les objectifs de l'étude correspondent bien à la thématique affichée par le programme HYDROMED et la convention avec la DCES. Cependant, la retenue étant quasiment asséchée au moment de cette mission, il n'a pas été possible de bien caractériser les eaux de surface. Les mesures de CE montrent qu'il n'y a pratiquement pas de concentration des eaux du lac en fin de phase évaporatoire ce qui indiquerait une perte par infiltration d'eau peu évaporée. Le bilan hydrologique annuel le montre globalement, sans quantifier ces pertes. La présente étude a mis en oeuvre plusieurs approches pour réaliser cette quantification et trouver une cause à ces pertes.

La caractérisation chimique des eaux d'un bassin sédimentaire pendant la période sèche montre que :

- les 3 types d'eau souterraine peu profonde (bicarbonaté calcique, chloruré sodique, sulfaté calcique) sont d'origine météorique, infiltrent le sol et le substrat géologique, et sont fortement liés à la lithologie par dissolution et/ou par formation de minéraux ;
- l'eau souterraine météorique et l'eau du réservoir évaporée se mélangent.

Plusieurs traitements de données préexistantes (tracage chimique en phase évaporatoire ou suivi temporel des variations du volume de la retenue) montrent que le réservoir perd de l'eau par infiltration, cette perte variant au cours du temps lorsque le niveau d'eau franchit la cote 4,5 m : au dessus de cette cote, l'infiltration journalière varie entre 200 et 300 m³, tandis qu'en dessous, elle est comprise entre 50 et 150 m³. Les modélisations hydrologique et isotopique, réalisées à partir des données de la mission, affinent l'estimation en montrant que les apports souterrains sont de 50 m³ j⁻¹ et les pertes en eaux de la retenue sont de 300 m³ j⁻¹ en hautes eaux (cote > 4,5 m) ou de 170 m³ j⁻¹ en basses eaux (cote < 4,5 m).

Des observations pédologiques, réalisées au voisinage et dans les sédiments du réservoir, expliquent les pertes par infiltration et leurs variations dans le temps. La recharge de l'aquifère alluvial en aval du réservoir est due à un niveau sableux hydrauliquement conducteur. Ce niveau est formé par l'altération d'un affleurement gréseux qui, depuis la rive gauche amont jusqu'à la digue, traverse les sédiments du réservoir. Sa cote topographique est en accord avec la cote-seuil estimée par le calcul.

A l'échelle du bassin versant, les relations entre les eaux souterraines et les structures géologiques ont été esquissées. Les caractérisations chimique et minéralogique des formations superficielles du bassin versant définissent 5 roche-mères : calcaire, marne, marne gypseuse, argile gypseuse et grès (contenant un feldspath potassique et sodique). Les aquifères calcaires alimentent la nappe alluviale et la diluent, cet effet étant également produit par le réservoir. En revanche, les matériaux argileux riches en minéraux solubles concentrent la nappe alluviale.

Ces résultats seront comparés à ceux acquis lors d'une mission du même type, réalisée en mars 1999 durant la phase de remplissage de la retenue (période hivernale). Ils permettront de mieux affiner les modélisations et de conforter les hypothèses émises sur le fonctionnement hydrochimique du bassin versant.

Par ailleurs, des opérations futures devront être menées pour mieux connaître les caractéristiques géométriques de l'aquifère alluvial, notamment par l'apport de la géophysique (imagerie 2D par panneaux électriques). Les approches mises en oeuvre dans cette étude pourront être appliquées à d'autres réservoirs infiltrants.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J., REJEB M., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes-Rendus Acad. Agric. Fr.*, 83, 2: 77-88.
- ALBERGEL J., NASRI S., BOUFAROUA M., 1999. Small dams' water balance: experimental conditions, data processing, and modeling. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden)*". ORSTOM/HYDROMED-SAREC-NFR-Lund University, Lund, Report 3222: 45-58.
- ALBOUY Y., BELLIER G., JOB J.O., MONTOROI J.P., ARFAOUI M., GAALOUL N., GASMI M., GUIGUEN N., KHALIFA F., LAMY V., LARVY DELARIVIÈRE J., MILLOT G., 1995. Application des méthodes géophysiques à l'étude des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Bondy, 50 p. et annexes.
- BAERTSCHI P., 1976. Absolute ^{18}O content of standard mean ocean water. *Earth Planet Sci. Lett.*, 31 : 341-344.
- BARNES C.J., ALLISON G.B., 1983. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils. 1. Theory. *J. Hydrol.*, 60 : 141-156.
- BELLIER G., GAALOUL N., JOB J.O., MONTOROI J.P., ZANTE P., 1997. Interprétation pédologique d'une prospection électromagnétique et électrique dans le bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale). In Y. ALBOUY, J.P. MONTOROI, A. TABBAGH et N. ZERBIB : "*Colloque GEOFCAN, Géophysique des Formations Superficielles, Abstracts et résumés étendus, Bondy, 11-12 septembre 1997*", ORSTOM, Bondy, 17-22.
- BOCQUET V., 1993. Etude du lac collinaire d'El Gouazine. Bilan hydrologique. Impact socio-économique. Rapport scientifique. Multigr., ENSAR-ORSTOM, Tunis, 52 p.
- BOTTINGA Y., CRAIG H., 1969. Oxygen isotope fractionation between CO_2 and water, and the isotopic composition of marine atmosphere. *Earth Planet Sci. Lett.*, 5 : 285-295.
- BOURRELIER P.-H., BERTHELIN J., 1998. Contamination des sols par les éléments en traces : les risques et leur gestion. Rapport Académie des Sciences, 42, Lavoisier, Paris, 440 p.
- BRUNISSO J.G., 1967. Etude pédologique du périmètre de l'oued Maarouf. Multigr., Dir. Sols, Tunis, EP 333. (*Carte pédologique et d'aptitudes en sec au 1/50.000*).
- BRUTSAERT W., 1975. A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level. *Water Resour. Res.*, 11 : 543-550.
- CAMUS H., GUIGUEN N., BEN YOUNES M., 1995a. Note sur l'envasement de lacs collinaires en zone semi-aride tunisienne. Multigr., ORSTOM/CES, Tunis, 16 p. et annexes.
- CAMUS H., GUIGUEN N., BEN YOUNES M., 1995b. Lacs collinaires en zone semi-aride. Programme de recherche hydrologique. Convention CES-ORSTOM 1994-1996. Avancement des travaux au 31 janvier 1995. Résultats et analyse de l'année 1993-1994. Multigr., ORSTOM/CES, Tunis, 27 p. et annexes.
- CASTANY G., 1951. Etude géologique de l'Atlas tunisien oriental. Thèse d'Etat, Besançon, 632 p.
- CES/ORSTOM, 1996. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Multigr., Tunis, 140 p.
- CES/ORSTOM, 1997a. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Multigr., Tunis, 184 p.
- CES/ORSTOM, 1997b. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1996-1997. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Multigr., Tunis, 200 p.

- CES/ORSTOM, 1999. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1997-1998. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Multigr., Tunis, 208 p.
- CES/ORSTOM, 2000. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1998-1999. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Multigr., Tunis, 204 p.
- COLEMAN M.L., SHEPERD T.J., ROUSSE T.E., MOORE G.R., 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analyt. Chem.*, 54 : 993-995.
- CPCS, 1967. Classification des sols. Commission de pédologie et de cartographie des sols. Multigr., ENSA, Grignon, 87 p.
- CRAIG H., 1957. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12 : 133-149.
- CRAIG H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133 : 1702-1703.
- DELAUNE M., REIFFSTECK M., FELLER C., 1991. L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre "Sedigraph 5000 ET". Comparaison avec la méthode "pipette Robinson". Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 26 : 183-189.
- DREVER J.I., 1988. The geochemistry of natural waters. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey.
- EPSTEIN S., MAYEDA T., 1953. Variation of oxygen-18 content of waters from natural sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4 : 213-224.
- FOURNET A., 1969. Etude pédologique de la dorsale tunisienne. transversale Kebir-Bargou-Serdj-Ousseltia. Mém. DESS, Univ. Paris, multigr., Paris, 121 p. et annexes
- GONI J., LELEU M., 1980. Traces (Eléments en). *Encyclopedia Universalis*, 224-226.
- GRUNBERGER O., MONTOROI J.P., ALBERGEL J., 1999. Evaluation par bilan isotopique de la recharge d'un aquifère induite par le fonctionnement d'une retenue collinaire. Premiers résultats sur le site d'El Gouazine (Tunisie centrale). In K. ZOUARI : "*Colloque international, Apport de la géochimie isotopique dans le cycle de l'eau, Hammamet (Tunisie), 6-8 avril 1999*". Volume des abstracts, ENIS, Sfax, 52-53.
- GUIGUEN N., BEN YOUNES M., 1994. Suivi des lacs collinaires. Programme hydrologique. Avancement des travaux au 31 janvier 1994 dans le cadre de la convention ORSTOM/CES. Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/ CES, Tunis, 31 p. + annexes.
- HAGEMANN R., NIEF G., ROTH E., 1970. Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. *Tellus*, 22 : 712-715.
- HOEFS J., 1997. Stable isotope geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, 201 p.
- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H., 1984. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 315 p.
- KARRAY I., FAKHFAKH N., 1998. Contribution à l'évaluation des ressources en eau du système aquifère de la plaine de Kairouan par les méthodes hydrochimiques et isotopiques (bassin d'oued Zéroud). Mémoire fin études, Univ. Sud/ENIS, Sfax, 123 p.
- JAUZEIN A., 1967. Contribution à l'étude géologique des confins de la dorsale tunisienne (Tunisie septentrionale). Annales Mines et Géologie, Tunis, 22, 475 p.
- JOB J.O., RAHAINGOMANANA N., BAHRI A., 1995. Qualité des eaux des lacs collinaires en Tunisie. Rapport scientifique. Multigr., ORSTOM/CRGR, Tunis, 25 p.
- MARTIRE O., ALBOUY Y., 1997. Etude du site d'El Gouazine (Tunisie centrale) par méthodes EM 31 et EM 38. In Y. ALBOUY, J.P. MONTOROI, A. TABBAGH ET N. ZERBIB : "*Colloque GEOFCAN, Géophysique des Formations Superficielles, Abstracts et résumés étendus, Bondy, 11-12 septembre 1997*", ORSTOM, Bondy, 49-52.

- MAT-MEATT-SERST-ORSTOM, 1994. Restauration, réhabilitation des terres dégradées des zones arides et semi-arides. Tunisie, du 14 au 19 novembre 1994. Guide d'excursion, Tunis, 48 p.
- Mc CREA J.M., 1950. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, 18: 849-857.
- MERLIVAT L., 1978. Molecular diffusivities of $H_2^{16}O$, $HD^{16}O$ and $H_2^{18}O$ in gases. *J. Chem. Phys.*, 69 : 2864-2871.
- MITCHELL R.L., 1964. Trace elements in soils. In F.E. BEAR (Ed.) : *Chemistry of the soil* (2nd Edit.). Reinhold Publ. Co. New York, Chapman and Hall Ltd, London, Chap. 8, 320-368.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. In C. BURGERS and M. FEY : "*5th International Symposium on Environmental Geochemistry, Abstracts, 24/29 April 2000, Cape Town, South Africa*", University of Cape Town, p. 18.
- MONTOROI J.P., BELLIER G., LARVY DELARIVIERE J., 1997. Détermination de la relation résistivité électrique - teneur en eau au laboratoire. Application aux sols de Tunisie centrale. In Y. ALBOUY, J.P. MONTOROI, A. TABBAGH et N. ZERBIB : "*Colloque GEOFCAN, Géophysique des Formations Superficielles, Abstracts et résumés étendus, Bondy, 11-12 septembre 1997*", ORSTOM, Bondy, 153-159.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999a. Alluvial aquifer recharge of a small hill reservoir in central Tunisia. Poster présenté à "*Conference to launch the 5th Framework Programme of the European Commission*", 25-26 February 1999, Essen (Germany), HYDROMED-INRGREF-IRD.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999b. Geochemical groundwater-soil interactions in a small reservoir catchment of Central Tunisia. Preliminary results. In J. BECH (Ed.) "*Soils with Mediterranean Type of Climate. 6th International Meeting, Barcelona (Spain), 4-9 July 1999. Extended abstracts*". Universitat de Barcelona, 123-125.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999c. Water chemistry of a small reservoir catchment in central Tunisia. Preliminary results of water-soil-rock interactions. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden)*". ORSTOM/HYDROMED-SAREC-NFR-Lund University, Lund, Report 3222: 107-121.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., PERNIN C., 1998. Rapport de mission en Tunisie (11 au 25 mai 1998). Multigr., ORSTOM, Bondy, 8 p.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., GAY D., REYES V., 1999. Rapport de mission en Tunisie (15 mars au 10 avril 1999). Multigr., ORSTOM, Bondy, 19 p.
- NASRI S., 1999. Groundwater recharge and modeling in an experimental catchment. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden)*". ORSTOM/HYDROMED-SAREC-NFR-Lund University, Lund, Report 3222: 257-273.
- NASRI S., ZANTE P., 1999. The use of TDR for wetness measurements in soil erosion and conservation practices in small watersheds. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden)*". ORSTOM/HYDROMED-SAREC-NFR-Lund University, Lund, Report 3222: 165-189.
- PERNIN C., 1998a. Géochimie des lacs collinaires : étude bibliographique et mission de terrain en Tunisie (avril-mai 1998). Rapport de stage. Multigr., INA-PG/ORSTOM, Bondy, 31 p.
- PERNIN C., 1998b. Règles de gestion de l'eau d'irrigation des lacs collinaires tunisiens. Rapport de stage. Multigr., INA-PG/ORSTOM, Bondy, 14 p + annexes.

- RAHAINGOMANANA N., 1998. Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Thèse Doctorat Univ. Montpellier I , multigr., 311 p.
- RIOU C., 1980. Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. *Cah. ORSTOM, série Hydrol.*, 17, 2, 129-137.
- AFES, 1995. Référentiel pédologique. Coll. Techniques et Pratiques, INRA, Paris, 332 p.
- SELMi S., 1996. Interventions de l'Etat en milieu rural et réaction des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Thèse Doctorat ENSA, multigr., Montpellier, 400 p.
- SELMi S., TALINEAU J.C., 1994. Des lacs collinaires pour un développement durable en Tunisie semi-aride. *Les Cah. de la Rech. Dév.*, 37, 33-46.
- SELMi S., TALINEAU J.C., 1997. Diversité et problématique de la gestion collective des lacs collinaires tunisiens. In J.M. Gastellu, J.Y. Marchal : "*La ruralité dans les pays du Sud à la fin du XX^{ème} siècle*", Coll. et Sémin., ORSTOM, Paris, 455-470.
- TALINEAU J.C., SELMi S., ALAYA K., 1994. Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Sécheresse*, 4, 5 : 251-256.

Annexes

ANNEXE A1

**Attaque acide des sols, roches et sédiments
pour le dosage des éléments en traces
(Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Ti, Mn, Mo, Y, Sc, terres rares...)**

❖ *Réactifs concentrés R.P. Normapur :*

- acide fluorhydrique (HF) ;
- acide perchlorique (HClO₄) ;
- acide chlorhydrique (HCl).

❖ *Mode opératoire :*

- peser, sur une balance au 1/10 mg, 0,5 g d'échantillon broyé, à 200 µm au module 24, dans une capsule en platine ou en téflon ;
- mouiller avec quelques gouttes d'eau bi-échangée (1 ou 2 mL) en agitant de façon à imprégner tout l'échantillon ;
- ajouter 10 mL d'HF concentré et 5 mL d'HClO₄ concentré ;
- laisser en contact à froid pendant 1 nuit en couvrant les échantillons avec une plaque en téflon ;
- chauffer doucement (environ à 40-50°C) sur une plaque chauffante jusqu'à apparition de fumées blanches (début de l'évaporation d'HClO₄) ;
- ajouter 5 mL d'HF concentré et chauffer à une température plus élevée ;
- aller à sec jusqu'à cessation des fumées blanches ;
- reprendre par 10 mL d'HCl environ au 1/2 en volume ;
- aller à sec doucement sans calciner le résidu ;
- reprendre par 5 mL d'HCl exactement au 1/2 en volume ;
- ajouter de l'eau bi-échangée bouillante ;
- transvaser quantitativement dans une fiole jaugée de 50 mL ;
- jauger à froid avec de l'eau bi-échangée.

❖ *Milieu final HCl 5%.*

Dosage par spectrométrie en émission plasma.

**Fusion LiBO_2
pour le dosage des éléments majeurs
dans les sols, roches et sédiments**

❖ *Réactifs :*

- métaborate de lithium (LiBO_2) ;
- acide chlorhydrique (HCl R.P. Normapur à 2% en volume).

❖ *Mode opératoire :*

Dans des creusets en graphite :

- peser 0,5 g de LiBO_2 sur trébuchet et 0,06 g d'échantillon sur une balance au 1/10 mg (échantillon préalablement broyé à 200 μm au module 24) ;
- mélanger intimement avec une spatule ;
- mettre dans un four HF et faire fondre à 1000-1100°C ;
- verser rapidement la perle obtenue dans un bécher en téflon de 250 mL contenant un barreau aimanté en téflon et 100 mL d'HCl à 2% en volume ;
- agiter la solution jusqu'à dissolution complète (environ 15 à 20 mn), puis transvaser quantitativement dans une fiole jaugée de 200 mL, le bécher étant rincé avec de l'eau bi-échangée ;
- compléter la fiole à 200 mL avec de l'eau bi-échangée.

❖ *Milieu final HCl à 1% et LiBO_2 à 0,25%.*

Dosage par spectrométrie en émission plasma.

Remarque :

- . Si des morceaux de perle sont restés collés aux parois du creuset, les détacher à l'aide d'une spatule lorsque celui-ci est refroidi, et les ajouter dans le bécher correspondant.
- . La solution doit être stabilisée pendant 2 jours ;
- . SiO_2 et Al_2O_3 doivent être dosés en priorité.

ANNEXE A2

Classification des éléments chimiques de la croûte terrestre (d'après GONI et LELEU, 1980 dans BOURRELIER et BERTHELIN, 1998)

Groupe	Eléments	Teneur moyenne		Abondance ⁽¹⁾		
		(ppm)		(%)		
I	1 O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg	1000 <		98,59	99,388	
	2 Ti, H, P, Mn			0,798		
II	1 F, S, Sr, Ba, C, Cl, Cr, Zr, Rb, V	110 << 700		0,318	0,3725	
	2 Ni, Zn, N, Ce, Cu, Y, Li, Nd, Nb, Co, La, Pb, Ga, Th	10 << 80		1 << 1000		0,048
	3 22 dont As	1 << 7		0,0065		
III	22 dont Hg, Cd et Se	< 1		0,2395	0,2395	
Total	80				100	

Groupe I = Eléments majeurs

Groupe II et III = Eléments-traces

1 ppm = 1 µg g⁻¹ = 10⁻⁴ g (100 g)⁻¹

⁽¹⁾ pourcentage massique

ANNEXE A3

Analyses chimiques des lacs tunisiens

Echantillon	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺	Bal. +/-	SAR	C	I	r ₁	r ₂
	mmol _e L ⁻¹										mmol _e L ⁻¹		%		mmol _e L ⁻¹	mol L ⁻¹		
Fidh Ali	45,4	8,89	44,7	0,66	0,90	4,36	86,0	0,07			91,3	99,6	9	8,6	95,5	0,166	18,1	0,031
Kamech	2,59	1,91	5,71	0,14	2,09	4,70	2,95	0,03	0,0283		9,8	10,4	6	3,8	10,1	0,014	11,3	0,016
Sbahia	5,75	2,56	11,09	0,06	0,82	10,9	6,33	0,03			18,0	19,5	8	5,4	18,8	0,026	12,8	0,018
M'richet	0,81	0,38	1,83	0,03	0,97	1,02	0,71	0,09	0,0045	0,04	2,8	3,0	7	2,4	2,94	0,004	10,3	0,014
M'rira2	1,89	0,63	1,31	0,02	0,78	0,82	2,01	0,05	0,0037		3,7	3,9	5	1,2	3,76	0,006	10,4	0,017
M'rira2 aquifère	11,3	25,5	95,9	0,19	2,31	35,2	82,1	0,37	0,0843	0,16	120,2	132,9	10	22,4	126,6	0,186	16,3	0,024
Essenega	2,70	2,49	1,89	0,07	1,09	0,52	5,00	0,04		0,01	6,7	7,2	7	1,2	6,91	0,012	10,7	0,019
El Gouazine	5,45	0,91	2,88	0,30	1,28	1,81	6,10	0,07			9,3	9,5	3	1,6	9,39	0,016	11,0	0,018

Echantillon	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Si	Si(OH) ₄ ⁰	CD	r ₃	pH	CE
	mg L ⁻²										mg L ⁻²		g L ⁻²			dS m ⁻¹
Fidh Ali	908,9	108,1	1028,1	25,7	55,1	154,6	4130,0	1,37		<0,05	1,71	5,86	6,41	1,22	6,59	5,280
Kamech	51,9	23,3	131,4	5,30	127,6	166,6	141,7	0,55	2,26	<0,05	0,77	2,64	0,65	0,73	5,92	0,889
Sbahia	115,1	31,2	255,0	2,35	50,1	384,9	304,0	0,64	<0,05	<0,05	<0,6	<2,05	1,14	0,78	5,59	1,470
M'richet	16,3	4,59	42,0	0,99	59,3	36,2	33,9	1,74	0,36	2,21	<0,6	<2,05	0,20	0,69	5,64	0,285
M'rira2	37,9	7,63	30,2	0,95	47,5	29,0	96,3	0,98	0,30	<0,05	<0,6	<2,05	0,25	0,70	5,53	0,360
M'rira2 aquifère	226,8	310,1	2205,5	7,26	141,2	1247,0	3944,8	7,08	6,74	10,19	<0,6	<2,05	8,11	1,04	6,59	7,780
Essenega	54,1	30,3	43,4	2,92	66,7	18,3	240,1	0,72	<0,05	0,64	<0,6	<2,05	0,46	0,71	5,73	0,643
El Gouazine	109,1	11,0	66,2	11,7	78,3	64,1	292,8	1,26	<0,05	<0,05	2,01	6,86	0,64	0,75	6,97	0,857

C concentration ionique totale, $C = (\Sigma^- + \Sigma^+) / 2$ avec Σ^- somme des anions et Σ^+ somme des cations

I force ionique, $I = 1/2 \Sigma m_i z_i^2$ où m_i est la concentration de l'ion i de valence z_i

CD charge minérale dissoute totale, $CD = \Sigma m_i$ où m_i est la concentration de l'espèce chargée ou neutre i

SAR sodium adsorption ratio, $SAR = Na^+ / ((Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2)^{0,5}$

$r_1 = C / CE$

$r_2 = I / CE$

$r_3 = CD / CE$

CE conductivité électrique

ANNEXE A4a

Analyses chimiques des eaux de surface du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺	Bal. +/-	SAR	C	I	r ₁	r ₂
		mmol _e L ⁻¹											mmol _e L ⁻¹		%	mmol _e L ⁻¹	mol L ⁻¹		
Lac	s1/1	5,45	0,91	2,88	0,30	1,28	1,81	6,10	0,07			9,3	9,5	3	1,6	9,4	0,016	0,7	0,018
Lac (vanne)	s1/2	5,37	0,77	2,62	0,22	1,87	1,54	5,81	0,07			9,3	9,0	-3	1,5	9,1	0,015	0,8	0,019
Marais (bord de route)	s2	36,1	2,48	3,48	0,31	1,98	0,02	35,4	0,04		0,01	37,4	42,3	12	0,8	39,9	0,077	1,0	0,028
Oued (amont route)	s3	33,6	28,9	36,1	0,09	8,53	40,8	45,1	0,08	0,0820	0,01	94,6	98,7	4	6,5	96,7	0,150	0,8	0,021

Echantillon		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Si	Si(OH) ₄ ⁰	CD	r ₃	pH	CE
		mg L ⁻²											mg L ⁻²		g L ⁻²		dS m ⁻¹
Lac	s1/1	109,1	11,0	66,2	11,7	78,3	64,1	292,8	1,26	<0,05	<0,05	2,01	6,86	0,64	0,75	6,97	0,857
Lac (vanne)	s1/2	107,6	9,3	60,3	8,50	114,3	54,6	278,9	1,27	<0,05	<0,05	1,59	5,45	0,64	0,80	8,26	0,804
Marais (bord de route)	s2	722,8	30,2	80,1	12,0	120,7	0,61	1698,3	0,85	<0,05	0,64	4,98	17,0	2,68	0,98	6,30	2,730
Oued (amont route)	s3	672,4	351,6	831,0	3,47	520,3	1445,7	2167,1	1,54	6,56	0,85	5,43	18,6	6,02	0,84	6,91	7,200

C concentration ionique totale, $C = (\Sigma^- + \Sigma^+) / 2$ avec Σ^- somme des anions et Σ^+ somme des cations

I force ionique, $I = 1/2 \sum m_i z_i^2$ où m_i est la concentration de l'ion i de valence z_i

CD charge minérale dissoute totale, $CD = \sum m_i$ où m_i est la concentration de l'espèce chargée ou neutre i

SAR sodium adsorption ratio, $SAR = Na^+ / ((Ca^{2+} + Mg^{2+}) / 2)^{0,5}$

$r_1 = C / CE$

$r_2 = I / CE$

$r_3 = CD / CE$

CE conductivité électrique

ANNEXE A4b

Analyses chimiques des eaux de nappe du bassin versant d'El Gouzine

Remarque : **en gras**, les valeurs de terrain

Echantillon		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Σ ⁻	Σ ⁺	Bal. +/-	SAR	C	I	r ₁	r ₂
		mmol _e L ⁻¹											mmol _e L ⁻¹		%	mmol _e L ⁻¹		mol L ⁻¹	
Aval retenue																			
Oued	w1	10,5	5,75	8,33	0,06	6,24	6,12	13,3	0,06	0,0163	0,015	25,7	24,7	-4	2,9	25,2	0,040	11,9	0,019
	w1/1	9,39	5,93	8,52	0,06	5,20	7,38	17,9	0,07	0,0113		30,6	23,9	-24	3,1	27,2	0,044	12,9	0,021
	w1/4	10,1	6,53	9,09	0,05	5,50	7,99	14,8	0,07	0,0134	0,012	28,4	25,8	-10	3,1	27,1	0,043	11,8	0,019
	w1/7	10,1	6,71	9,48	0,05	5,70	7,67	16,0	0,07	0,0182	0,015	29,4	26,4	-11	3,3	27,9	0,044	12,1	0,019
	w1/10	10,2	6,70	9,56	0,06	6,00	7,70	16,1	0,07	0,0181	0,016	29,9	26,5	-12	3,3	28,2	0,045	12,2	0,019
	w1/13	10,2	6,76	9,61	0,06	5,20	7,69	16,2	0,07	0,0187	0,016	29,2	26,6	-9	3,3	27,9	0,044	12,1	0,019
Oued	w2/1	10,5	5,99	7,85	0,05	7,23	4,72	13,3	0,06	0,009		25,3	24,4	-4	2,7	24,8	0,040	12,3	0,020
	w2/2	12,6	5,97	8,08	0,05	7,21	4,59	13,4	0,05	0,0075	0,009	25,3	26,7	6	2,6	26,0	0,042	12,8	0,021
Oued	w3/1	10,1	7,98	16,3	0,04	7,16	8,70	17,2	0,07	0,0169		33,2	34,5	4	5,4	33,8	0,051	11,9	0,018
	w3/2	15,6	8,46	16,7	0,05	7,35	12,1	18,1	0,07	0,0221	0,012	37,7	40,8	8	4,8	39,2	0,060	13,8	0,021
Base digue	p1	8,84	3,81	7,65	0,10	5,90	6,55	7,32	0,08	0,0227	0,09	20,0	20,4	2	3,0	20,2	0,030	11,2	0,017
Oued	p2	16,7	6,85	8,75	0,05	4,33	11,1	12,1	0,11	0,0273	0,066	27,8	32,3	15	2,6	30,1	0,048	13,2	0,021
Dans le bassin versant																			
Oued	w4	38,4	30,9	37,3	0,21	8,68	51,5	37,7	0,05	0,112	0,055	98,1	106,8	8	6,3	102,5	0,156	13,3	0,020
Barre calcaire	w5	11,7	5,49	12,1		6,50	10,6	6,23	0,03	0,0268	0,437	23,9	29,4	21	4,1	26,6	0,038	12,3	0,018
El Aafou	w6	5,93	1,79	4,11	0,05	4,94	4,07	1,92	0,09			11,0	11,9	8	2,1	11,4	0,016	11,4	0,016
Souk	w7/1	10,7	7,06	10,9	0,03	5,30	22,0	5,46	0,04	0,0584	0,949	33,8	28,7	-16	3,7	31,2	0,043	10,1	0,014
	w7/2	10,7	7,17	11,0	0,03	5,00	21,9	5,45	0,04	0,0609	0,957	33,4	28,9	-14	3,7	31,1	0,043	10,0	0,014
Fontaine	w8	4,19	1,39	2,67	0,06	4,16	2,20	1,69	0,03	0,0061	0,161	8,2	8,3	1	1,6	8,3	0,012	15,3	0,022
Tête BV	w9/1	12,7	8,75	19,1	0,04	7,79	23,0	8,91	0,06	0,0522	0,987	40,8	40,6	0	5,8	40,7	0,056	13,3	0,018
	w9/2	9,19	7,95	13,1	0,04	6,00	17,8	8,93	0,07	0,0556	1,535	34,3	30,3	-12	4,5	32,3	0,045	10,5	0,015
Sédiment	p4	9,78	3,85	8,31	0,18	4,92	4,89	12,0	0,03	0,0344	0,39	22,3	22,1	-1	3,2	22,2	0,035	11,7	0,018
Sédiment	p6	28,4	12,0	19,3	0,14	7,35	23,4	25,8	0,10	0,0411	0,124	56,8	59,8	5	4,3	58,3	0,091	12,5	0,020
En dehors du bassin versant																			
Bou Haleb	w10	14,8	10,8	22,2	0,15	6,66	11,5	28,9	0,05	0,0265	0,027	47,2	48,0	2	6,2	47,6	0,075	12,0	0,019
	w11/1	5,99	1,30	1,99	0,03	6,50	1,61	0,99			0,084	9,2	9,3	1	1,0	9,2	0,013	11,5	0,017
Larbi	w11/2	5,77	1,32	2,00	0,03	5,70	1,62	0,99			0,064	8,4	9,1	9	1,1	8,7	0,013	11,0	0,016

ANNEXE A4b (suite)

Analyses chimiques des eaux de nappe du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Si	Si(OH) ₄ ⁰	CD	r ₃	pH	CE
		mg L ⁻²											mg L ⁻²		g L ⁻²	dS m ⁻¹	
Aval retenue																	
Oued	w1	211,4	69,9	191,5	2,37	381,0	217,0	637,7	1,10	1,30	0,90	6,55	22,4	1,74	0,82	6,84	2,110
	w1/1	188,1	72,1	196,0	2,26	317,3	261,5	859,9	1,27	0,91	<0,05	6,44	22,0	1,92	0,91	6,72	2,110
	w1/4	202,7	79,4	208,9	1,77	335,6	283,1	712,8	1,39	1,07	0,76	6,27	21,5	1,85	0,81	6,75	2,290
	w1/7	202,7	81,6	218,0	2,13	347,8	271,9	766,4	1,29	1,45	0,92	5,67	19,4	1,91	0,83	6,16	2,310
	w1/10	203,7	81,5	219,9	2,27	366,1	272,9	772,7	1,27	1,45	1,01	5,83	19,9	1,94	0,84	6,66	2,320
	w1/13	203,5	82,2	220,9	2,27	317,3	272,7	776,6	1,29	1,49	0,99	6,04	20,7	1,90	0,82	6,63	2,310
Oued	w2/1	209,6	72,9	180,5	2,01	441,0	167,3	636,5	1,09	0,72	<0,05	6,63	22,7	1,73	0,86	7,08	2,020
	w2/2	253,4	72,6	185,8	2,00	440,0	162,6	644,4	0,95	0,60	0,55	6,70	22,9	1,79	0,88	7,12	2,030
Oued	w3/1	203,2	97,0	374,8	1,68	437,2	308,3	827,0	1,36	1,35	<0,05	7,00	24,0	2,28	0,80	7,12	2,840
	w3/2	311,9	102,9	383,5	2,00	448,5	427,8	870,8	1,42	1,77	0,74	7,03	24,0	2,58	0,91	7,32	2,840
Base digue	p1	177,2	46,4	175,8	3,72	360,1	232,4	351,5	1,43	1,81	5,61	8,24	28,2	1,38	0,77	6,99	1,799
Oued	p2	334,0	83,3	201,2	1,87	264,2	395,0	581,7	2,17	2,18	4,07	6,61	22,6	1,89	0,83	6,31	2,270
Dans le bassin versant																	
Oued	w4	769,6	375,8	856,9	8,37	529,4	1826,9	1811,5	1,00	8,95	3,38	7,88	27,0	6,22	0,81	6,96	7,690
Barre calcaire	w5	235,0	66,8	279,1		396,7	377,2	299,5	0,64	2,15	27,10	7,45	25,5	1,71	0,79	7,16	2,160
El Aafou	w6	118,8	21,8	94,5	1,99	301,5	144,2	92,2	1,67	<0,05	<0,05	6,53	22,3	0,80	0,80	6,38	1,003
Souk	w7/1	214,1	85,8	250,8	1,30	323,4	779,6	262,4	0,68	4,67	58,85	8,48	29,0	2,01	0,65	6,74	3,090
	w7/2	214,3	87,2	252,9	1,23	305,1	776,2	261,9	0,68	4,87	59,34	7,49	25,6	1,99	0,64	6,75	3,100
Fontaine	w8	83,9	16,8	61,3	2,33	253,6	77,9	81,3	0,58	0,49	10,0	6,73	23,0	0,61	1,13	6,52	0,542
Tête BV	w9/1	254,9	106,3	439,9	1,64	475,6	815,4	427,9	1,22	4,17	61,2	6,65	22,8	2,61	0,85	7,24	3,060
	w9/2	184,3	96,7	302,3	1,51	366,1	629,5	428,8	1,24	4,44	95,1	6,64	22,7	2,13	0,69	6,70	3,070
Sédiment	p4	196,0	46,8	191,2	7,04	300,1	173,5	575,6	0,64	2,75	24,2	1,93	6,62	1,52	0,80	6,60	1,900
Sédiment	p6	568,7	145,8	442,9	5,50	448,8	829,6	1239,5	1,97	3,29	7,70	6,24	21,4	3,72	0,80	6,92	4,660
En dehors du bassin versant																	
Bou Haleb	w10	297,2	131,2	511,1	6,03	406,3	408,3	1389,2	0,96	2,12	1,68	6,07	20,8	3,17	0,80	7,07	3,980
	w11/1	120,1	15,8	45,8	1,16	396,6	57,2	47,4	<0,05	<0,05	5,21	5,81	19,9	0,71	0,89	6,77	0,801
Larbi	w11/2	115,7	16,0	46,0	1,18	347,8	57,4	47,5	<0,05	<0,05	3,98	5,70	19,5	0,66	0,83	6,90	0,793

ANNEXE A5

Description pédologique sommaire des fosses

Fosse p1

Situation : Entre le lit de l'oued et le déversoir, en aval de la retenue (rive gauche ou ouest), à la base de la digue

Végétation : pelouse éparse, gros chardons, près d'une végétation hygrophile dans le lit de l'oued

Utilisation : parcours pour les troupeaux de moutons

Microrelief : aspect chahuté en surface, déblai du puits

Surface : quelques cailloux calcaires en surface

Date de la description : 21/5/1998

Plutôt qu'une fosse pédologique classique, il s'agit d'un puits creusé récemment. L'observation en profondeur est impossible sans reboucher accidentellement le puits. Les matériaux de déblai sont ocre et sablo-argileux. Ils sont similaires à ceux observés en amont de la retenue (connection sous la digue). **Prélèvement** à 250 cm.

Nappe d'eau à -2,50 m (**prélèvement**).

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

Fosse p2

Situation : lit de l'oued, en aval de la retenue

Végétation : pelouse éparse, gros chardons

Utilisation : parcours pour les troupeaux de moutons

Microrelief : très légèrement accidenté par l'érosion ravinante

Surface : cailloux calcaires en surface

Date de la description : 21/5/1998

- | | |
|--------------|--|
| 0-20 cm | Horizon très faiblement organique. Forte charge en graviers calcaires de taille variable. |
| 20-40/60 cm | Niveau argileux reposant sur un niveau sableux jaune, les deux horizons étant lités. |
| 40/60-100 cm | Très forte charge en cailloux calcaires de taille variable correspondant aux alluvions très grossiers de l'oued. |
| 100-110 cm | Horizon argileux, marron. A la base, passée sableuse en transition avec le niveau inférieur. |

- 110-140 cm Horizon foncé, organique, assez sec, présentant des prismes décimétriques à sous-structure polyédrique. Texture assez argileuse. A 130 cm, niveau brun clair présentant des racines oxydées.
- 140-180 cm Horizon frais. Texture argilo-sableux. Gravier calcaires centimétriques en abondance. Quelques cristaux ou débris de coquilles brillants. Niveau de marnes altérées.
- 180-220 cm Quelques taches ocre, le matériau devenant plus argileux et plus humide (**prélèvement** à 200 cm).

Nappe d'eau apparaissant à -2,10 m (**prélèvement** à -1,85 m).

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

Fosse p3

Situation : fond du lac, en amont de la retenue près de la digue, rive gauche ou ouest

Végétation : sédiments nus (assèchement de la retenue)

Utilisation : néant

Microrelief : fentes de retrait délimitant des structures primaires de taille décimétrique

Surface : pavés de taille décimétrique, formés par séchage et rétraction des matériaux argileux décantés au fond du lac

Date de la description : 22/5/1998

- 0-2 cm Petite passée sableuse à la base du dépôt argileux asséché en surface et formant des pavés structuraux.
- 2-20 cm Dépôts argileux, gris. Très forte porosité. Les pores sont tapissés d'oxyde de fer.
- 20-23 cm Petite passée à sables grossiers ocre.
- 23-60 cm Dépôts argileux, gris. Très forte porosité. Les pores sont tapissés d'oxyde de fer. Présence d'anciennes fentes de retrait remplies avec de petits agrégats polyédriques venant de l'ancienne surface (fond du lac).
- 60-61 cm Petite passée sableuse.
- 61-67 cm Passée argileuse.
- 67-73 cm Niveau ocre, sableux. Texture légèrement grumeleuse (**prélèvement** à 60-75 cm).
- 73-93 cm Horizon gris, argileux. Texture polyédrique fine. Taches rouille d'oxyde de fer de taille centimétrique.
- 93-120 cm Gravier de taille centimétrique, tous oxydés et friables, de couleur rouille. Gravier plus fins entre 110 et 120 cm.

120-170 cm Horizon gris ardoise, argilo-sableux, ne montrant pas d'aspect lité. Racines fines. Petits graviers de taille millimétrique. Légère structure polyédrique, les polyèdres donnant l'impression de noyaux d'argile plus foncés. Zone probable de mélange des particules (**prélèvement** à 125-150 cm).

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

Fosse p4

Situation : fond du lac, en amont de la retenue près de la digue et dans l'axe longitudinal

Végétation : sédiments nus (assèchement de la retenue)

Utilisation : néant

Microrelief : fentes de retrait délimitant des structures primatiques de taille centimétrique

Surface : mat algaire, desséché suite à l'évaporation de la retenue

Date de la description : 22/5/1998

- 0-10 cm Horizon formé des sédiments du lac bioturbés, subissant un début de rétraction. Très forte porosité tubulaire.
- 10-20 cm Dépôts argileux fins présentant une alternance de lits oxydés et de lits réduits. Aspect d'ensemble, marron et lamellaire.
- 20-35/45 cm Niveau sableux, orangé.
- 35/45-75 cm Horizon plus gris, sablo-argileux, plus hétérogène. Dans la partie inférieure, niveau plus rougeâtre (oxydes de fer), avec des traces de racines et une texture également sablo-argileuse.
- 75-125 cm Horizon de transition. Présence de quelques cailloux de taille centimétrique. Taches d'oxyde de fer dans un matériau grisâtre. Présence de petites racines (**prélèvement** à 110-120 cm).
- 125-150 cm Horizon plus foncé, probablement plus organique. Présence de cailloux de taille centimétrique. Texture plus argileuse. Ensemble assez rigide.
- > 150 cm Horizon graveleux et caillouteux, hétérogène sans granoclassement faisant songer à des colluvions.

Filets d'eau à -2,00 m (**prélèvement**), eau contenant 100 mg L⁻¹ de F²⁺
(mesure au papier Fe)

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

Fosse p5

Situation : en amont de la retenue, en bordure de la rive gauche ou ouest

Végétation : sol nu

Utilisation : néant

Microrelief : profil-tranchée dans la rive, pente douce vers le lac

Surface : graviers calcaires en surface

Date de la description : 22/5/1998

- 0-20 cm Horizon de surface très faiblement organique, correspondant à du colluvionnement. Texture sablo-argileuse.
- 20-110 cm Horizon organique noir, sablo-argileux (**prélèvement** à 20-30 cm), le matériau devenant plus clair en profondeur.
- Latéralement, en allant vers les sédiments du lac, le profil s'amincit, l'horizon noir laissant place, d'abord en surface puis en profondeur (biseau très net), à un horizon ocre beige clair, également sablo-argileux (**prélèvement** à 50-70 cm). Le profil se raccorde aux sédiments du lac en reposant sur un niveau graveleux et caillouteux correspondant aux alluvions grossiers de l'oued principal.

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

Fosse p6

Situation : fond du lac collinaire dans la partie amont et dans l'axe longitudinal

Végétation : sédiments nus (assèchement de la retenue)

Utilisation : néant

Microrelief : fentes de retrait délimitant des structures primaires de taille décimétrique

Surface : pellicules de décantation

Date de la description : 22/5/1998

- 0-60 cm Horizon argileux. Entre la surface et 35 cm, taches rouille, structure polyédrique, bonne porosité. Taches noires apparaissant entre 35 et 50 cm. Entre 50 et 60 cm, à nouveau taches rouille.
- 60-65 cm Horizon ocre, argilo-sableux. Polyèdres structuraux plus petits.
- 65-80 cm Taches rouille et noires entremêlées, plus petites que dans les horizons supérieurs.
- 80-120 cm Niveau graveleux et sableux, moins graveleux à partir de 85 cm.
- 120-230 cm Horizon humide, très argileux, très plastique. Présence de taches noires de taille centimétrique et de racines décomposées. Horizon reposant sur un niveau graveleux.

Nappe d'eau à -2,30 m (**prélèvement**), eau riche en fer car colorée après filtration.

Vive effervescence généralisée dans tout le profil.

ANNEXE A6

Données brutes de granulométrie sans décarbonatation (en g 100g⁻¹) des matériaux argileux du bassin versant d'El Gouazine

Echantillon	Argile <2 µm	Limon fin <20 µm	Limon grossier <50 µm	Sable fin <200 µm	Sable grossier <2000 µm	Total	Humidité			Humidité moyenne	Total
Marnes											
EGm4	29,94	29,31	3,12	10,23	23,76	96,4	5,54	5,54	5,61	5,6	101,9
EGm5	29,96	23,24	2,80	15,66	25,33	97,0	5,00	5,17	5,25	5,1	102,1
Marnes gypseuses											
EGm9	36,59	13,07	2,61	10,67	29,90	92,8	9,09	9,43	9,67	9,4	102,2
EGm10	18,44	27,40	6,85	23,66	17,56	93,9	8,56	9,06	9,14	8,9	102,8
Argiles gypseuses											
EGm8	30,56	31,26	7,64	17,30	9,83	96,6	5,61	5,83	5,96	5,8	102,4
EGm12	39,74	32,10	4,59	2,70	13,63	92,8	11,81	12,04	12,18	12,0	104,8
Sols											
EGp1 2,50	20,16	8,21	1,49	22,93	45,90	98,7	1,91	1,94	-	1,9	100,6
EGp2 2,00	30,51	24,05	4,11	23,96	15,36	98,0	2,83	2,89	-	2,9	100,9
EGp5 20-30	16,75	4,02	1,56	45,07	31,07	98,5	1,37	1,33	-	1,4	99,8
EGp5 50-70	16,63	2,15	0,78	34,96	44,63	99,2	0,83	0,84	-	0,8	100,0
Sédiments											
EGp3 60-75	16,43	4,66	1,11	34,93	42,73	99,9	0,64	0,69	-	0,7	100,5
EGp3 125-150	37,80	20,45	3,72	23,07	13,40	98,4	2,01	2,12	-	2,1	100,5
EGp4 110-120	28,27	17,36	3,97	30,33	19,26	99,2	0,86	0,95	-	0,9	100,1