



المدرسة القومية للمهندسين بتونس
école nationale d'ingénieurs de tunis

IRD
Institut de recherche
pour le développement

**MÉMOIRE DE DIPLÔME
D'ÉTUDES APPROFONDIES**

LABORATOIRE D'HYDRAULIQUE

Option : Modélisation en Hydraulique et Environnement

Présenté par :
KINGUMBI Ahmadi

**Thème : BILAN ET MODELISATION DE LA RETENUE DU
BARRAGE D'EL HAOUAREB**

Soutenu le 26 Octobre 1999 devant le Jury composé de :

M. Khalifa MAALEL

Président

Mme Zoubeida BERGAOUI

M. Mustapha BESBES

M. Jacques BOURGES

M. Amour HORCHANI

Examineurs

Invités

Avant propos

Ce mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), élaboré à l'ENIT, a pour thème : « Bilan et modélisation de la retenue du barrage d'El Haouareb ». Il a été fait dans le cadre du projet Mergusie mis au point en collaboration de quatre institutions (la DGRE, l'ENIT, l'INAT et l'IRD) et dont l'objectif est l'usage intégré de l'eau sur le bassin versant de Merguellil.

Avant d'exposer nos résultats, nous aimerions d'abord rendre un grand hommage à tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à sa réalisation. Nous pensons particulièrement à :

- ◇ Monsieur Khalifa Maalel, Directeur de l'ENIT et à travers lui tout le corps professoral qui nous a suivi durant toute la formation.
- ◇ Monsieur Jacques Claude, Directeur de l'IRD en Tunisie, pour nous avoir accepté dans son organisme et mis à notre disposition le matériel nécessaire.
- ◇ Ce travail a été fait sous l'encadrement scientifique de M. Moustapha Besbes Professeur à l'ENIT et M. Jacques Bourges Directeur de recherche à l'IRD. Nous tenons à leur remercier particulièrement pour la qualité de l'encadrement apporté.
- ◇ Monsieur Ridha Mohammed Kallel, Chef du projet Mergusie, ainsi qu'à tous les participants aux réunions dudit projet pour d'énormes remarques et conseils prodigués.
- ◇ Toute l'équipe de l'IRD Tunisie qui a su nous intégrer dans son environnement et nous a permis par conséquent de bien travailler. Nous pensons particulièrement à P. Le Goulven, P. Garetta, R. Calvez. Nous pensons aussi aux stagiaires à l'IRD avec lesquels on a passé de très bons moments.
- ◇ Tout le personnel du CRDA de Kairouan pour la qualité d'informations mises à notre disposition. Nous pensons particulièrement à Béchir Chadly, A. Guessara, M. Ayachi, A. Jelliti, et R. Kefi.
- ◇ Abdel Fatah Ben Salem et tout le personnel du barrage d'El Haouareb qui m'ont offert beaucoup d'hospitalité durant mes séjours sur le terrain.
- ◇ Mes remerciements à M. Ahmed Mamou, Directeur des eaux souterraines, pour ses précieux conseils et ses qualités humaines. Et à M Baba Sy pour sa grande contribution à la réalisation de ce travail.
- ◇ Toute la communauté ruandaise et burundaise en Tunisie avec laquelle twasangiyе akabisi n'agahiye, muzahora mu mutima wanjye.
- ◇ Enfin, je ne terminerais pas sans penser à ma famille qui, de loin, m'a toujours apporté le soutien nécessaire. Mon père Nsanzumuhire Mahmoud et ma mère Mukangwije Zainab. Mes frères Nzabonimpa J., Ndukiye Wellars, Habib Mahmud, Soulayman, Amoros, ma soeur Vumi et leur familles respectives. Sans oublier Juma Minani, Yaka et Dalida. C'est le plus merveilleux cadeau que le bon Dieu m'a donné.

Résumé

Bien que l'objectif premier du barrage d'El Haouareb situé sur l'oued Merguellil, soit la protection de la ville de Kairouan contre les inondations, d'autres objectifs non moins importants tels que l'irrigation et la recharge de la nappe de Kairouan lui ont été assignés. Le but de notre étude est de dresser un bilan de ce barrage, après dix années de fonctionnement, et d'en modéliser le fonctionnement de façon à apprécier le degré de satisfaction de chacun des objectifs prévus et d'évaluer l'impact de la mise en place de cet ouvrage sur les ressources en eau de surface et souterraines.

Le barrage d'El Haouareb se situe à l'interface de plusieurs systèmes hydrauliques superficiels et souterrains. Pour les eaux de surface, sa retenue constitue l'exutoire d'un bassin de près de 1200 km² drainé par l'oued Merguellil (Tunisie centrale) et par deux petits affluents qui se jettent directement dans le barrage. Quant aux eaux souterraines, la nappe d'Aïn Baïdha se trouvant à l'amont du barrage et la nappe aval de la plaine de Kairouan constituent les principaux aquifères en relation avec cette retenue. Pendant la construction de l'évacuateur de crues des écoulements souterrains ont fait leur apparition à la suite d'excavations dans les calcaires du Djebel El Haouareb. Leur débit ayant augmenté lors de la mise en eau de la retenue, l'exploitant a implanté un point de contrôle pour assurer le suivi des volumes ainsi prélevés.

Le bilan en eau de surface met en évidence deux termes inconnus : l'infiltration par le fond de la retenue et les apports des oueds au barrage. Pour contourner cette difficulté, nous avons calculé l'infiltration durant des périodes où les apports étaient négligeables ou nuls. Cette évaluation de l'infiltration est ensuite modélisée en fonction de la cote d'eau dans la retenue et ramène ainsi l'équation du bilan en eau de surface à une inconnue. Les apports journaliers au barrage, déduits du bilan, ont été ensuite validés par comparaison aux débits mesurés sur une station du Merguellil, Haffouz.

De ce bilan il ressort que les apports liquides à la retenue ont représenté 206 10⁶ m³ en 10 ans dont 63 % s'est infiltré, 25 % s'est évaporé, 6 % a été utilisé pour l'irrigation et 6 % a été lâché soit pour raison technique, soit pour alimenter la nappe de Kairouan.

Etant donné la proportion d'eau qui rejoint le système souterrain, nous nous sommes intéressés à sa destination. Une première approche du bilan en eau souterraine de ce système met en évidence des entrées constituées par les transferts depuis la nappe d'Aïn Baïdha et « l'exfiltration » de la retenue, et les sorties constituées par les percolations en profondeur vers la nappe de Kairouan et les émergences à l'aval de l'évacuateur de crues. En réalité même si les transferts entre Aïn Baïdha, El Haouareb et la plaine de Kairouan demeurent encore mal connus, au niveau quantitatif on peut considérer que le système souterrain d'El Haouareb constitue un sas de passage, sans capacité de stockage importante, entre les apports amonts, infiltration de la retenue (14.3 10⁶ m³/an) et transferts d'Aïn Baïdha (5.2 10⁶ m³/an), et les sorties aval, émergences (10.4 10⁶ m³/an) et percolations en profondeur (9.1 10⁶ m³/an).

Enfin, à partir d'une évaluation sommaire des volumes d'eau reçus depuis la mise en eau du barrage par la nappe de Kairouan limitée approximativement à la zone d'influence du Merguellil, on observe que la recharge effective de cette nappe représente plus de 70 % des volumes qui se sont infiltrés dans la retenue.

Sigles et abréviations

B.I.R.H. : Bureau d'Inventaire et des Recherches Hydrauliques

C.E.S. : Conservation des Eaux et des Sols

C.R.D.A. : Commissariat Régional au Développement Agricole

DEMIURGE : Didital Model In Urgency (c'est un ensemble de logiciels de production et de traitement des modèles numériques du terrain).

D.G.G.T.H. : Direction Générale des Grands Travaux Hydrauliques.

D.G.R.E. : Direction Générale des Ressources en Eau.

D.R.E. : Direction des Ressources en Eau.

DG/E.G.T.H. : Direction Générale d'Etudes et Grands Travaux Hydrauliques.

E.N.I.T. : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

F.A.O. : Food Agriculture Organisation (organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).

I.N.A.T. : Institut National Agronomique de Tunisie

I.R.D. : Institut de Recherche pour le Développement

Mergusie : Merguellil usage intégré de l'eau.

O.R.S.T.O.M. : Office de Recherche Scientifique et Technologique d'Outre Mer.

O.T.C. : Office de la Topographie et de la Cartographie.

Sommaire

Avant propos.....	i
Résumé.....	ii
Sigles et abréviations.....	iii
Sommaire.....	iv
Introduction générale	1
<hr/>	
Partie I : Cadre général de la zone d'étude	2
<hr/>	
Introduction.....	2
Chapitre I : Le bassin versant du Merguellil.....	4
1) <i>La situation du bassin versant</i>	4
2) <i>Le relief</i>	4
3) <i>Le climat</i>	6
4) <i>L'occupation des terres</i>	7
5) <i>L'hydrologie</i>	7
Introduction.....	7
a) La station hydrométrique de Skhira - Kef Labiodh.....	9
b) La station hydrométrique de Haffouz.....	10
c) La station hydrométrique de Sidi Boujdaria.....	10
d) Les crues exceptionnelles d'automne 1969.....	10
Conclusion.....	11
6) <i>L'érosion sur le bassin versant du Merguellil</i>	11
Chapitre II : Le barrage d'El Haouareb.....	12
1) <i>Les objectifs du barrage d'El Haouareb</i>	12
2) <i>Description géologique du site</i>	12
3) <i>Les ouvrages hydrauliques du barrage d'El Haouareb</i>	15
4) <i>Les caractéristiques physiques de la retenue</i>	15
5) <i>Les apports en sédiments à la retenue</i>	18
6) <i>L'étude des fuites ou infiltrations du barrage d'El Haouareb</i>	19
Conclusion.....	22

Partie II : Elaboration du bilan en eau de surface

23

Chapitre I : Position de l'équation du bilan en eau de surface.....	23
Introduction.....	23
1) Les éléments de bilan hydrologique d'une retenue.....	23
a) Les apports ou entrants d'une retenue.....	23
b) Les sortants d'une retenue.....	24
2) La position de l'équation de bilan de la retenue d'El Haouareb.....	25
Conclusion.....	26
Chapitre II : Mesure des éléments du bilan en eau de surface de la retenue d'El Haouareb.....	27
Introduction.....	27
1) Les apports des oueds au barrage.....	27
2) Les apports de la pluviométrie au barrage.....	29
3) Les sorties par l'évaporation.....	32
Introduction.....	32
a) La reconstitution des données manquantes.....	32
b) Le coefficient d'évaporation.....	34
c) Le calcul des volumes évaporés.....	36
4) Les sorties par les pompages.....	37
5) Les lâchers pour les vidanges de fond.....	38
6) Les lâchers pour l'alimentation de la nappe de la plaine de Kairouan.....	39
7) Les déversements par l'évacuateur des crues.....	40
8) L'infiltration sur le site de la retenue d'El Haouareb... ..	41
Conclusion.....	41
Chapitre III : L'étude de l'infiltration sur le site d'El Haouareb.....	42
Introduction.....	42
1) Les critères de détermination des périodes sans apports.....	42
2) La corrélation entre les stations de Haffouz et Sidi Boujdaria.....	43
3) Le modèle d'infiltration de la retenue d'El Haouareb.....	44
a) L'estimation de l'infiltration par la première méthode.....	45
b) L'estimation de l'infiltration par la deuxième méthode.....	48
4) Comparaison et critique des résultats.....	48
5) Prévision de l'infiltration à long terme.....	51
Conclusion.....	52

Chapitre IV : L'élaboration du bilan en eau de surface de la retenue d'El Haouareb.....	53
<i>Introduction.....</i>	<i>53</i>
<i>1) Détermination des apports au barrage d'El Haouareb.....</i>	<i>53</i>
<i>2) Bilan global du barrage d'El Haouareb.....</i>	<i>60</i>
<i>3) Bilan détaillé du barrage d'El Haouareb.....</i>	<i>62</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>68</i>
Partie III : Elaboration du bilan en eau souterraine	70
<hr/>	
<i>Introduction.....</i>	<i>70</i>
<i>1) Les aquifères en relation avec le système d'El Haouareb.....</i>	<i>70</i>
a) Le système aquifère du synclinal d'Aïn Baïdha.....	70
b) L'aquifère calcaire du Djebel El Haouareb.....	73
c) L'aquifère de la plaine de Kairouan.....	73
<i>2) L'analyse piézométrique des nappes de la zone d'El Haouareb.....</i>	<i>74</i>
a) la nappe amont d'Aïn Baïdha.....	74
b) La nappe des calcaires du Djebel El Haouareb.....	79
c) La nappe avale de la plaine de Kairouan.....	79
<i>3) L'étude des émergences à l'aval de l'évacuateur des crues.....</i>	<i>83</i>
a) Mesure et suivi des émergences.....	83
b) Modélisation des émergences.....	83
<i>4) Approche du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb.....</i>	<i>87</i>
a) L'équation du bilan en eau souterraine.....	87
b) Le bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb.....	88
<i>5) L'impact du barrage d'El Haouareb sur la nappe de Kairouan.....</i>	<i>92</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>99</i>
Conclusion générale	101
<hr/>	
Références bibliographiques.....	106
Liste des figures.....	109
Liste des tableaux et des annexes.....	110
Annexes.....	111

Introduction générale

Introduction générale

Le barrage d'El Haouareb est à la confluence de plusieurs systèmes hydrauliques. Il y a pour les eaux de surface l'oued Merguellil qui constitue l'affluent principal de la retenue, l'oued Hammam et l'oued Ben Zitoune. Les trois oueds se déversent directement dans le barrage sans aucun dispositif de contrôle d'apports. Quant aux eaux souterraines, la nappe d'Aïn Baïdha et la nappe de la plaine de Kairouan constituent les principaux aquifères en relation avec ce barrage.

Les travaux de construction du barrage d'El Haouareb ont démarré en 1986 pour se terminer en août 1989. Pendant la construction de son évacuateur des crues, la nappe a été mise à nu à la suite d'excavations des calcaires du Djebel El Haouareb. Pour la continuité des travaux, un pompage de 400 l/s a été mis en place afin d'assécher cette eau. A la mise en eau, le phénomène a doublé d'intensité et de très fortes pertes d'eau de la retenue ont été constatées. Ces importantes pertes d'eau ajoutées aux sécheresses successives ayant sévi sur la région sont à l'origine du non remplissage de la retenue du barrage d'El Haouareb qui n'a atteint à peine que la cote de 210 mètres, alors que sa cote de retenue normale est de 217 mètres.

Plusieurs mesures ont été faites pour essayer non seulement de quantifier les différents phénomènes mais aussi pour comprendre le fonctionnement de l'ensemble de ce système d'El Haouareb. C'est dans ce cadre, que s'inscrit l'étude qui nous a été confiée dont le thème est « bilan et modélisation de la retenue du barrage d'El Haouareb ».

Vu la complexité de l'étude, nous l'avons subdivisée en trois parties distinctes. Dans la première, nous essayerons de comprendre la problématique de la zone d'étude en décrivant le mieux possible son cadre physique ainsi que les différentes études y ayant été consacrées. Dans cette partie, nous commencerons par le bassin versant du Merguellil dont le barrage constitue le dernier exutoire avant la plaine de Kairouan, et on terminera par la description du site d'El Haouareb et du barrage lui-même.

La seconde partie sera consacrée au bilan en eau de surface de la retenue d'El Haouareb. Après avoir posé l'équation du bilan, nous passerons à la description des mesures de ses différents éléments qui ont été faites sur le barrage. Enfin nous terminerons par la modélisation de l'infiltration qui nous permettra d'officialier le bilan en eau de surface de la retenue d'El Haouareb.

Dans la troisième et dernière partie de cette étude nous traiterons du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb. Nous essayerons d'éclaircir la destination des eaux infiltrées de la retenue ainsi que celle des eaux provenant de la nappe d'Aïn Baïdha. Pour cela il nous faudra modéliser les émergences de l'aval de l'évacuateur des crues du barrage d'El Haouareb.

Partie I :

Cadre général de la zone d'étude

Partie I : Cadre général de la zone d'étude

Introduction

Le barrage d'El Haouareb est situé dans le gouvernorat de Kairouan, en Tunisie centrale. Il a été implanté, comme celui de Sidi Saad, essentiellement pour lutter contre les inondations dont étaient victimes les habitants de cette région. Inondations qui étaient causées par les principaux oueds de la Tunisie centrale : l'oued Zeroud, Nebhana, et l'oued Merguellil qui retiendra dans la suite l'ensemble de notre attention.

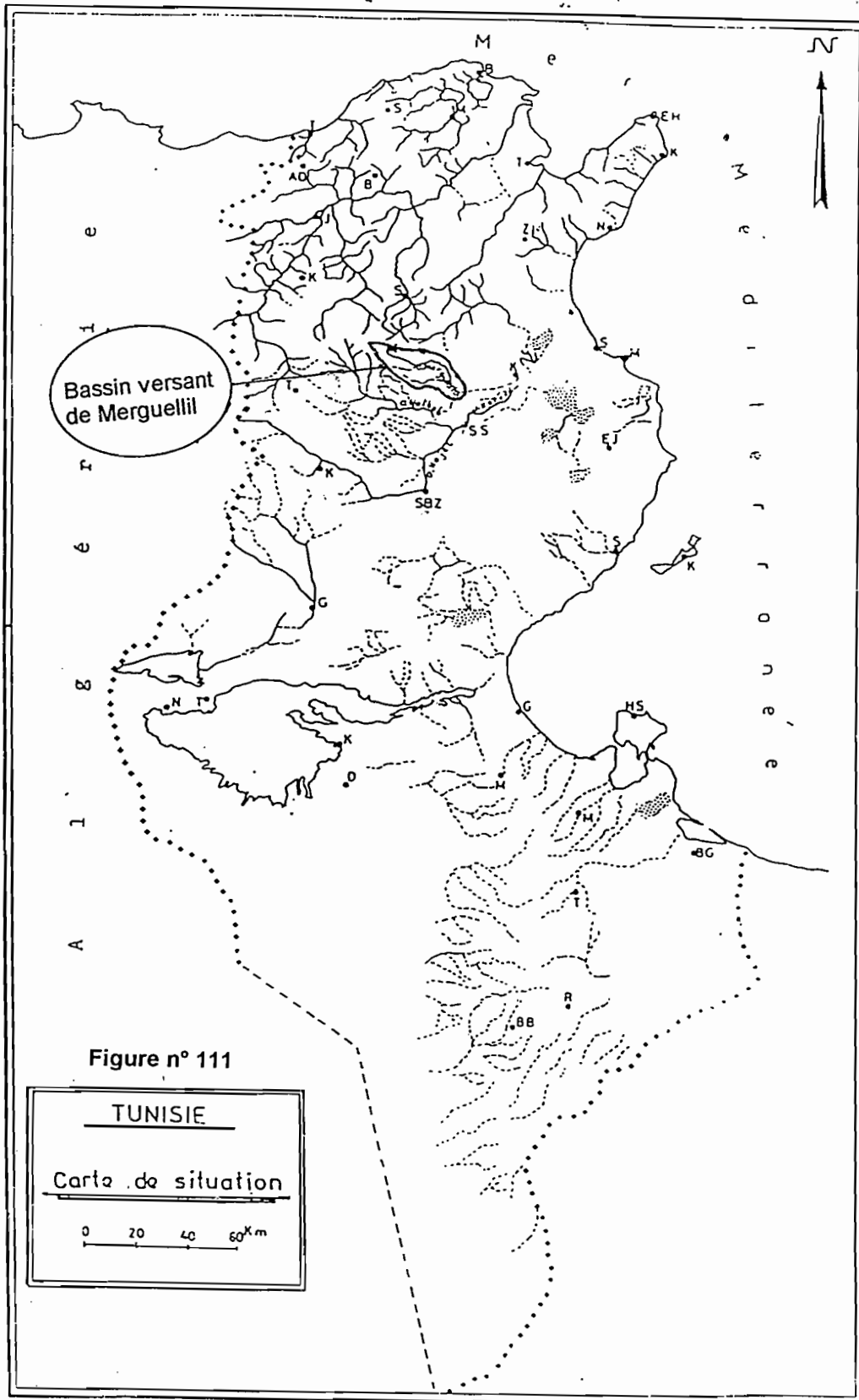
Le bassin versant de l'oued Merguellil limité au barrage d'El Haouareb est d'une superficie d'environ 1200 Km². Le cours d'eau principal qui draine ce bassin est l'oued Merguellil qui prend naissance dans les hauts plateaux de Makthar et dont l'exutoire est la plaine de Kairouan. Ses deux principaux affluents en rive droite, les oueds Zebbes et Morra, drainent le sud ouest du bassin.

Dans le premier chapitre de cette partie nous allons présenter, en six points, le bassin versant de l'oued Merguellil :

- * La localisation géographique du bassin versant de Merguellil.
- * Les principaux reliefs qui composent ce bassin pour comprendre sa morphologie.
- * Les différents types de climats qui règnent sur ce bassin en passant en revue les principaux éléments dont ils dépendent : la température, la pluviométrie, le vent, l'humidité de l'air et l'évaporation.
- * L'occupation des terres.
- * Un aperçu historique de l'hydrologie de l'oued Merguellil.
- * Et enfin un bref aperçu sur les types d'érosions sévissant sur ce bassin de Merguellil.

Nous verrons dans le deuxième chapitre, le barrage d'El Haouareb lui-même qui est l'exutoire de l'oued Merguellil, juste avant la plaine de Kairouan. Nous commencerons par exposer l'objectif recherché dans l'implantation de cet ouvrage. Ensuite nous présenterons une brève description de ses principaux éléments, les caractéristiques physiques de sa retenue, et la géologie de son site. Et enfin, nous passerons en revue quelques études ayant été faites sur les fuites du barrage d'El Haouareb ainsi que les apports en sédiments sur ce barrage depuis sa mise en eau.

Cet aperçu général sur le milieu physique du bassin versant de l'oued Merguellil et la présentation de quelques études qui ont été faites sur la région nous permettront de mieux comprendre la problématique de la zone d'étude.



Chapitre I : Le bassin versant de l'oued Merguellil

1) La situation du bassin versant de Merguellil

Le bassin versant de l'oued Merguellil est situé en Tunisie centrale (figure n° 111). Dans deux gouvernorats de la région : le gouvernorat de Siliana qui comporte la partie Nord-ouest du bassin et le gouvernorat de Kairouan couvrant près de 80 % de sa superficie (annexe n° 1).

Le bassin versant du Merguellil limité au barrage d'El Haouareb a une superficie d'environ 1200 Km², alors que l'ensemble du bassin aurait une superficie estimée à 1540 Km² (Direction CES, 1986). Il est limité au Nord par la retombée des Djebel Bellouta et Serdj, au Sud par le plateau d'El Ala, à l'Ouest par le Djebel Barbrou et le haut plateau de la Kesra, et à l'Est par la plaine de Kairouan qui constitue son exutoire naturel (annexe n° 1).

La partie du bassin concernée par cette étude est limitée à l'Est par le verrou d'El Haouareb fermé par une digue de 2 km qui s'appuie sur les Djebel Aïn Ghorab et El Haouareb (annexe n° 1). Géographiquement cette zone est comprise entre 35° 27' et 35° 52' de latitude Nord et entre 9° 9' et 9° 46' de longitude Est (O.T.C., 1993).

2) Le relief du bassin versant de l'oued Merguellil

Le relief de ce bassin est caractérisé par deux principaux éléments, les Djebel, et les plateaux. Parmi les formations montagneuses du bassin du Merguellil on distingue le Djebel Ousseltia au nord-est du bassin, le Djebel Barbrou à l'Ouest, le Djebel Trozza au Sud et les Djebels Touila, Hallouf et El Haouareb au sud-est du bassin. Les plateaux dans ce bassin versant sont au nombre de deux, il y a d'une part le haut plateau de la Kesra occupant le Nord-Ouest du bassin, et la plateau d'El Ala qui constitue sa limite Sud d'autre part (annexe n° 1).

Les caractéristiques morphologiques du bassin versant de Merguellil ont été déterminées à la DGRE (Kallel et al., 1975). Elles indiquent que le bassin est d'une forme plus ou moins allongée dont l'indice de compacité est égal à 1.37. D'une dénivelée spécifique de 333 m, le bassin versant de Merguellil est classé parmi les bassins à relief fort.

La courbe hypsométrique du bassin versant de Merguellil (Kingumbi, 1997) traduit un relief assez ancien, travaillé par l'érosion, et l'influence très faible des reliefs amont (figure n° 112).

A partir du modèle numérique de terrain type DEMIURGE d'un pas égal à 130 mètres (Kingumbi, 1997), il a été mis en évidence qu'il y a prédominance de pentes faibles sur le bassin versant du Merguellil, avec plus de 75 % de sa superficie qui a une pente inférieure à 5 degrés (figure n° 113).

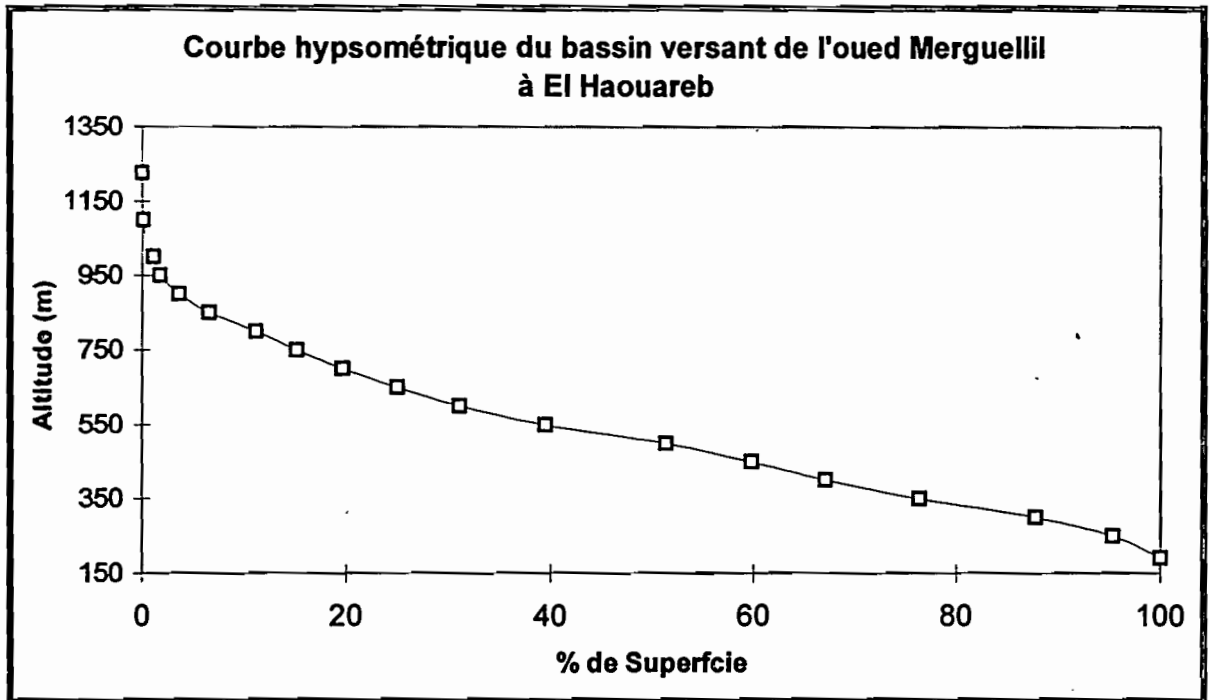


Figure n° 112 : La courbe hypsométrique du bassin versant de Merguellil (Kingumbi, 1997)

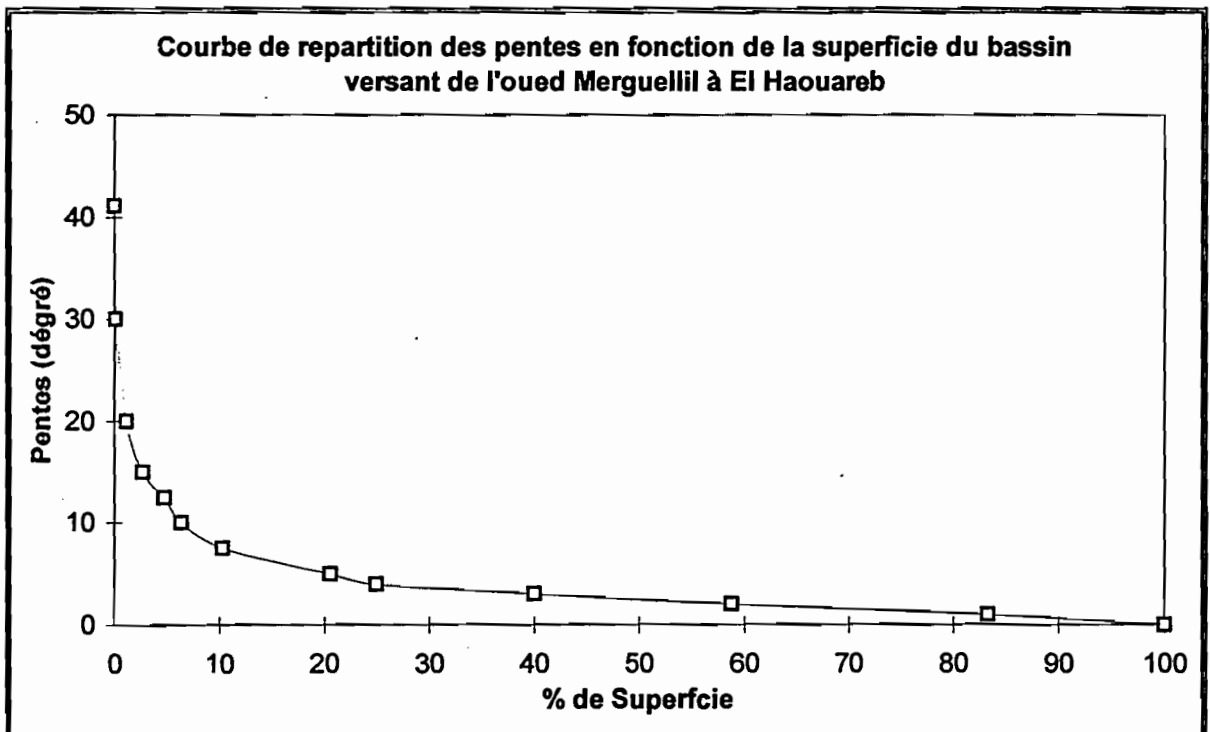


Figure n° 113 : La courbe des pentes du bassin versant de Merguellil (Kingumbi, 1997)

3) Le climat du bassin versant de l'oued Merguellil

L'amont du bassin versant de Merguellil est caractérisé par un climat semi-aride inférieur et supérieur à hiver frais, alors que le reste du bassin connaît un climat semi-aride supérieur à hivers tempéré, excepté les Djebels Trozza et Ousseltia qui se classent dans l'étage climatique semi-aride inférieur à hivers tempéré du fait de leur altitude (Direction CES, 1986).

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de l'oued Merguellil limité à El Haouareb a été évaluée à 382 mm (Ayadi, 1986). Sa répartition annuelle fait ressortir deux maximums pendant les mois d'Octobre et Mars. De plus, il a été constaté que la pluviométrie augmente de l'aval vers l'amont en fonction de l'altitude, avec un gradient pluviométrique d'environ 20 mm / 100 m d'altitude (annexe n° 2).

Partant des données de trois stations (Makthar, Sbiba, Ouslatia) encadrant le bassin, il a été constaté que les températures décroissent avec l'altitude sur le bassin versant de Merguellil (Bouzaiane & Lafforgue, 1986). Le mois le plus froid de l'année correspond au mois de Janvier avec des valeurs mensuelles minimales inférieures à 5 °C, tandis que juillet constitue le mois le plus chaud de l'année avec une valeur moyenne mensuelle maximale égale à 33.7 °C (Kingumbi, 1997).

L'humidité relative moyenne mensuelle de la région oscille entre 70 % et 55 % pendant la saison froide et entre 40 % et 55 % pendant la saison chaude. Le climat se trouve donc moyennement sec de Septembre à Avril et très sec de Mai à Août (Bouzaiane & Lafforgue, 1986).

Les vitesses moyennes des vents sont plus élevées à Kairouan (station météorologique située à une trentaine de km à l'aval d'El Haouareb) avec la plus grande valeur égale à 3.9 m/s au mois de Mars. Les directions prédominantes sont celles de Nord-Ouest, de Nord, de Nord-Nord-Ouest (fréquentes en hiver), de Nord-Est et de Sud (fréquentes en été). Le tableau n°111 donne la fréquence des vents en fonction de leur vitesse à la station de Kairouan. Il en sort que la fréquence des vents faibles est relativement élevée, alors que les vents violents, supérieurs à 50 Km/h se manifestent rarement. Tandis que le vent « *Jebbali* » souffle en hiver à partir des hautes terres algériennes et donne des températures glaciales, le « *Sirocco* », vent chaud et sec d'origine saharienne, peut se manifester à partir du mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre, accompagné souvent de sable (Bouzaiane & Lafforgue, 1986).

Tableau n° 111 : Fréquence des vents en fonction de la vitesse (Bouzaiane & Lafforgue, 1986)

Vent	Calme	Faible	Moyen	Fort	Violent
Vitesse (m/s)	0 à 2	2 à 5	5 à 9	9 à 15	≥ 15
Fréquence (%)	30.9	38.7	26.1	4.1	0.2

L'évaporation dépend essentiellement de la température, mais aussi du vent et de l'humidité atmosphérique par des relations plus complexes. Ainsi, l'évaporation est maximale en été dans les zones les plus basses, elle est minimale en hiver dans les zones d'altitude aux températures plus fraîches. Le total annuel évaporé au Piche varie entre 1336 mm enregistrés à Sbiba et 2071 mm à Kairouan (Bouzaiane & Lafforgue, 1986). Alors que le total annuel évaporé au bac est en moyenne de 2056 mm à Fidh Ben Naceur et de 1609 mm à Chebika.

4) L'occupation des terres du bassin versant de l'oued Merguellil

Quatre éléments principaux constituent l'occupation des terres du bassin versant de Merguellil (Kingumbi, 1997) : la forêt, les parcours, les cultures annuelles et l'arboriculture. Les plans d'eau ne constituent qu'une infime partie du bassin représentant 1% de sa superficie.

La forêt se rencontre à l'amont de ce bassin sur le plateau de la Kesra (Nord-Ouest) et sur le Djebel Ousseltia (Nord-Est). Elle occupe à peu près 19 % de la superficie totale du bassin versant de Merguellil.

L'arboriculture est recensée principalement dans la zone environnant le plateau d'El Ala et vers la partie sud-est du bassin. Son occupation a été estimée égale à 23 % de la superficie.

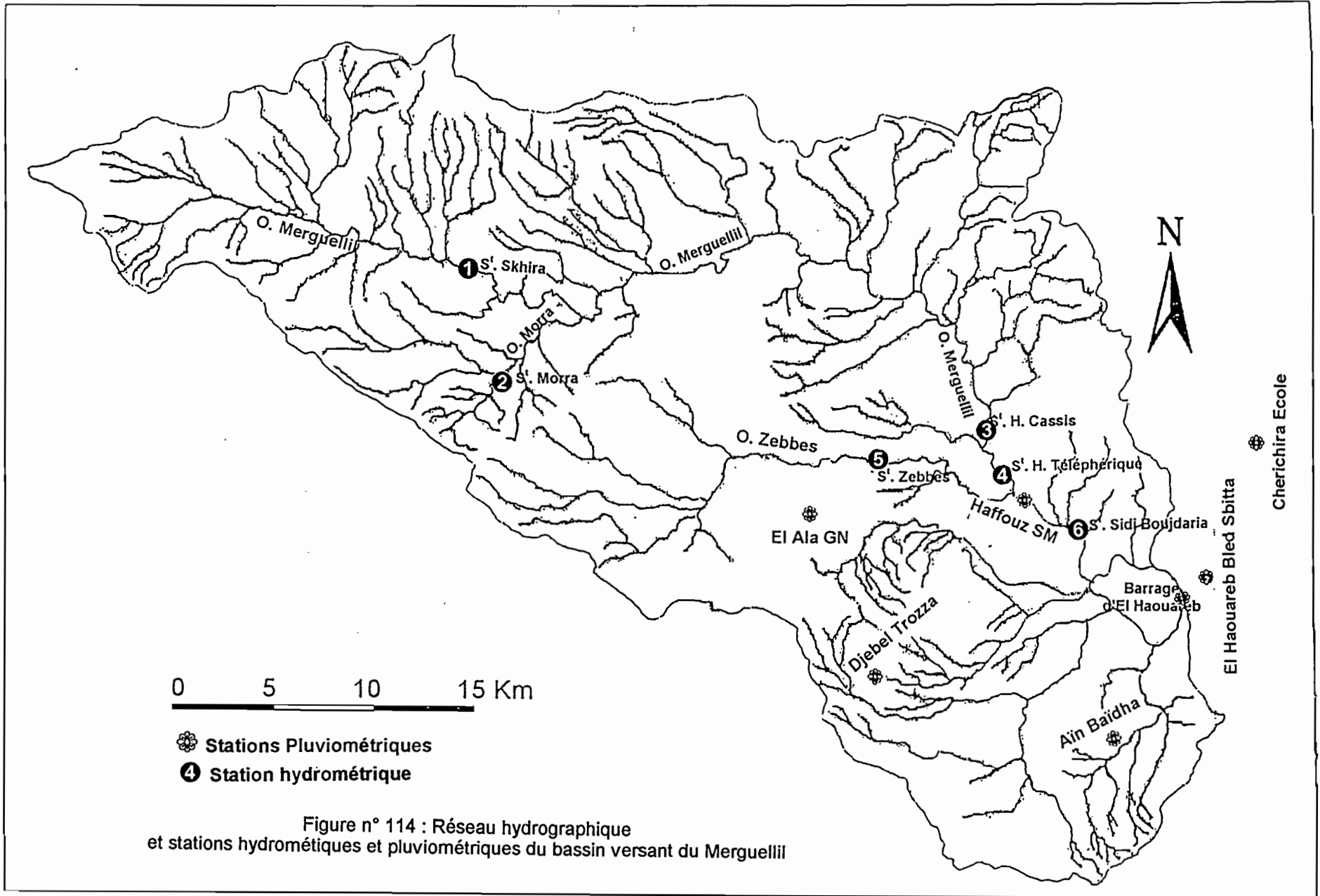
Les parcours se rencontrent dans la partie centrale du bassin ainsi que dans les environs du Djebel Trozza. Leur occupation est estimée à 28 % de la superficie totale du bassin versant de Merguellil.

Les cultures annuelles se rencontrent dans la partie Nord du bassin longeant la RN12 entre la forêt de Kesra et le Djebel Ousseltia, à la sortie de la forêt en allant vers Makthar, et dans le bassin du grand Morra. Elles sont estimées à 29 % d'occupations du bassin de Merguellil.

5) L'hydrologie du bassin versant de l'oued Merguellil

Introduction

Le cours d'eau principal qui draine ce bassin versant prend naissance en bordure sud du haut plateau de Makthar. Il prend successivement les noms de Oued Bahloul, Oued Skhira, Oued Kerd et en fin Oued Merguellil qu'il conservera jusqu'à Kairouan. Les principaux affluents du cours principal sont tous situés sur sa rive droite (figure n° 114). Il s'agit de l'oued Morra, l'oued Zebbes, et les oueds Ben Zitoune et Hammam qui se déversent directement dans la retenue d'El Haouareb.



Actuellement le bassin versant de Merguellil est équipé d'un réseau assez dense de stations pluviométriques, en effet, on observe plus de 60 stations pluviométriques qui dépendent du bassin versant de Merguellil. Nous n'allons nous intéresser qu'aux stations se trouvant dans les environs du barrage d'El Haouareb, c'est à dire les stations d'Aïn Baïdha, de Cherichira, d'El Ala, d'El Haouareb, de Haffouz, et de Trozza (figure n° 114) dont les caractéristiques sont comprises dans le tableau n° 112.

Cinq stations mesurent, actuellement, les débits transitant dans les oueds du bassin de Merguellil. Il s'agit de la station de Kef Labiodh située à Skhira, des stations de Haffouz cassis et téléphérique, de la station de Morra, et de la station de Zebbes. En remontant dans l'histoire on peut y rajouter la station de Sidi Boujdaria qui a cessé de fonctionner officiellement en 1989.

Les stations de Zebbes et Morra étant très récentes, nous nous intéresserons aux plus anciennes, notamment à la station Kef Labiodh située à Skhira, la station de Haffouz et la station de Sidi Boujdaria (figure n° 114 & tableau n° 113).

Tableau n° 112 : Caractéristiques des stations pluviométriques proches du barrage d'El Haouareb

Station	N° Code DGRE	Période d'observation		Coordonnées géographiques	
		Début	Fin	Latitude (°)	Longitude (°)
Aïn Baïdha	1486005311	1982	1999	35°31'16"	9°43'23"
Cherichira Ecole	1486162411	1902	1999	35°38'14"	9°50'13"
El Ala GN	1486060211	1969	1999	35°36'56"	9°33'29"
El Haouareb Barrage	1486308612	1990	1999	35°34'08"	9°45'00"
El Haouareb Bled Sbitta	1486309011	1970	1994	35°34'08"	9°46'03"
Haffouz S M	1486303711	1971	1999	35°36'59"	9°40'14"
Trozza	1486216811	1925	1999	35°31'55"	9°43'23"

Tableau n° 113 : Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin de Merguellil

Station	N° Code DGRE	Période d'observation		Coordonnées géographiques	
		Début	Fin	Latitude (°)	Longitude (°)
Skhira Kef Labiodh	1486100340	1974	1999	35°44'19"	9°22'57"
Haffouz Cassis	1486100169	1965	1974	35°39'13"	9°39'39"
Haffouz Téléphérique	1486100170	1974	1999	35°37'55"	9°39'39"
Sidi Boujdaria	1486100177	1974	1989	35°35'16"	9°41'58"
Morra	1486103010	1996	1999	35°41'00"	9°23'53"
Zebbes	1486102250	1996	1999	35°38'12"	9°36'29"

a) La station hydrométrique de Skhira - Kef Labiodh

Drainant un bassin versant de 188 Km², la station de Skhira - Kef Labiodh a une section de mesure complètement rocheuse, ce qui lui confère un étalonnage très stable. La première campagne de mesures des débits en étiage a eu lieu en Novembre et Décembre 1966, alors que les mesures des débits en crue n'ont démarré qu'en Septembre 1974 à la suite de l'installation du treuil téléphérique.

Le volume moyen annuel de base est égal à 1.57 millions de m³, alors que le volume moyen annuel de ruissellement est estimé à 4.80 millions de m³ (Rabhi, 1998). Le transport global en matériaux solides, sur huit années d'observation, est estimé à 281 milliers de tonnes par an dont 227 en suspension (Bouzaiane & Lafforgue, 1986).

b) La station hydrométrique de Haffouz

La station hydrométrique de Haffouz a été installée sur le cassis de la route Haffouz - El Ala, où elle contrôle un bassin de 650 Km², en 1955. Les installations furent détruites, pendant les crues d'automne 1969 et reconstruites en Décembre 1970. A partir de 1974, les débits ont été contrôlés par la station « téléphérique » située à 2.5 Km plus en aval et qui draine un bassin versant de 675 Km².

Le volume moyen annuel de base est égal à 3.5 millions de m³, alors que le volume moyen annuel de ruissellement est estimé à 17 millions de m³. Le transport global en matériaux solides est évalué à 820 milliers de tonnes par an dont 660 en suspension (Bouzaiane & Lafforgue, 1986).

c) La station hydrométrique de Sidi Boujdaria

La station de Sidi Boujdadia a été mise en place en 1974, dans la même campagne que ses homologues de Skhira et Haffouz téléphérique. A cette station le bassin versant de Merguellil draine une superficie de 890 Km². Cette station et celle de Haffouz ont une très grande variabilité des profils en travers ce qui confère aux étalonnages une fâcheuse instabilité.

Le volume moyen annuel de base est égal à 7.9 millions de m³, alors que le volume moyen annuel de ruissellement est estimé à 30 millions de m³. Le transport global en matériaux solides est évalué à 1460 milliers de tonnes par an dont 1170 en suspension (Bouzaiane & Lafforgue, 1986).

Les résultats obtenus ci-dessus sont relatifs aux valeurs moyennes de longue durée (55 années). En ne tenant compte que des observations sur les stations de Haffouz et Sidi Boujdaria on obtient que le ruissellement moyen annuel devient 12.95 millions de m³ à Haffouz et 23.43 millions de m³ à Sidi Boujdaria (Ayadi, 1986). Quant aux volumes de base, ils deviennent 6.44 millions de m³ à Sidi Boujdaria et 2.52 millions de m³ à Haffouz (période commune avec la station de Sidi Boujdaria).

d) Les crues exceptionnelles d'automne 1969

Les crues exceptionnelles d'automne 1969 sont dues aux pluies diluviennes, issues d'une circulation atmosphérique particulière s'intercalant entre les épisodes pluvieux abondant d'origine classique, tombées dans cette période.

La comparaison des pluies tombées dans cette période avec les moyennes sur les 50 premières années du siècle donne en moyenne une pluviométrie 8 fois supérieure en septembre et 10 fois supérieure en octobre (tableau n° 114).

Les volumes enregistrées, à la station de Haffouz, pendant les deux mois de septembre et octobre sont de l'ordre de 175 millions de m³ et 187 millions de m³ pour l'ensemble de l'année 1969-1970. Il a été enregistré donc des volumes dix fois supérieurs à la moyenne longue durée calculée sur 55 ans.

Tableau n° 114 : Comparaison de la pluie d'automne 1969 par rapport à la moyenne de 50 ans

Station	Septembre			Octobre		
	Pluie (mm)	Moy. (mm) _{50 ans}	(%)	Pluie (mm)	Moy. (mm) _{50 ans}	Ecart (%)
Haffouz DRE	193.3	29.1	538	556.7	54.9	1014
Ousseltia Forêt	288.1	36.0	800	468.0	43.4	1120
Kesra Forêt	337.6	40.1	842	368.0	42.5	866
Makthar SM	418.1	41.0	1019	439.6	40.8	1077
Moyenne	309.3	36.6	846	458.1	45.4	1009

Conclusion

A la lumière de ce qui précède, on dégage que le bassin intermédiaire entre Haffouz et Sidi Boujdaria produit plus d'écoulement par rapport à sa superficie que la partie amont de Haffouz.

Le régime hydrologique de l'oued Merguellil présente une forte irrégularité dans l'espace et dans le temps avec souvent des crues très violentes.

Il a été aussi constaté une très forte variabilité des débits de base, qui s'observe à l'échelle mensuelle et annuelle. Compte tenu des perturbations du régime naturel des étiages, non seulement par les captages de Bou Hafna mais aussi par des prises d'eau pour l'irrigation dont le nombre et l'importance des débits prélevés sont variables dans le temps, il est impossible de pousser plus loin l'étude de cette variabilité.

Il est à signaler le manque d'une station de contrôle à l'entrée du barrage d'El Haouareb qui faciliterait l'estimation des apports entrant dans la retenue.

6) L'érosion sur le bassin versant de l'oued Merguellil

Il y a toutes les formes d'érosion sur le bassin versant de Merguellil. Mais les plus courantes sont l'érosion en nappe, le ravinement, et le sapement des berges d'oueds.

L'érosion en nappe décape la couche arable des sols et les rend non fertiles. Le ravinement est très poussé sur ce bassin, il emporte à chaque pluie des quantités considérables de terres. La troisième forme d'érosion rencontrée sur ce bassin est le sapement des berges, qui est responsable de la forme caractéristique des lits d'oueds de cette région, très larges et peu profonds.

Plusieurs aménagements de conservation des eaux et des sols ont été mis en place, notamment les banquettes, les lacs collinaires, le reboisement etc., pour lutter contre l'érosion. Mais il reste beaucoup à faire pour réduire ces pertes en terre.

Chapitre II : Le barrage d'El Haouareb

1) Les objectifs du barrage d'El Haouareb

La Tunisie centrale est drainée principalement par trois oueds, l'oued Zeroud, Nebhana et Merguellil, qui ont pour exutoire la plaine de Kairouan. Avec un bassin versant de près de 10000 Km², ces oueds connaissent parfois un régime de crues très violentes (crues d'automne 1969) qui peuvent provoquer de graves inondations à l'aval.

Ces trois oueds constituent avec la pluie les seules sources d'alimentation de la grande nappe de la plaine de Kairouan dont l'importance pour l'approvisionnement en eau potable de la région du Sahel et l'irrigation des périmètres n'est plus à démontrer.

Il a fallu donc trouver une solution qui devait satisfaire ces deux objectifs contradictoires : d'une part la lutte contre les inondations de la plaine de Kairouan, et d'autre part alimenter la nappe dont l'importance est capitale. La solution envisagée était d'installer des barrages sur ces oueds afin de laminer leurs crues et d'assurer de façon contrôlée d'une part l'alimentation de la nappe de la plaine de Kairouan et l'alimentation des périmètres irrigués en eau d'autre part.

Dans cette optique, la mise en eau du barrage Sidi Saad, sur l'oued Zeroud, dont les travaux ont commencé en 1978, a eu lieu en octobre 1981. Quant aux travaux du barrage d'El Haouareb sur l'oued Merguellil ils n'ont commencé qu'en Avril 1986 et se sont terminés en août 1989, date de sa mise en eau.

Trois principaux objectifs ont donc été assignés au barrage d'El Haouareb, la lutte contre les inondations de la plaine de Kairouan, la recharge de la nappe de Kairouan, et l'approvisionnement des populations locales en eau pour leurs activités.

2) Description géologique du site du barrage d'El Haouareb

Le barrage El Haouareb se trouve à l'intersection de deux faisceaux structuraux (annexe n° 10): l'extrémité septentrionale du faisceau Nara - Touila de direction Nord Sud s'étendant sur plus de 70 km et le faisceau sud-ouest Nord-Est du Cherichira. Il est limité à gauche par la plaine de Hajeb El Aïoun et à l'Est par celle de Kairouan. Le Djebel El Haouareb, qui constitue la terminaison périclinale de la chaîne Nara - Touila se présente comme un anticlinal dissymétrique à coeur jurassique dont seul le flanc occidental n'est ni érodé ni recouvert par des alluvions. Il est limité, au Nord, par un décrochement dextre de direction grossièrement Est Ouest et au Sud par un décrochement senestre de direction Nord 20°.

La région d'El Haouareb est traversée par deux plis (annexe n° 10): le plis dont la direction générale est Nord Ouest qui est souligné par l'orientation des Djebels El Haouareb-Nara et le plis de la direction générale Nord-Est Sud dans l'alignement des Djebels Cherichira et Trozza.

Ces plis sont affectés de nombreux accidents dont les 3 plus importants sont : l'accident du Cherichira, l'accident du Merguellil, et le grand accident en bordure Est du faisceau de Nara dont le Djebel El Haouareb est le prolongement (Hedhli, 1997).

La stratigraphie du site d'El Haouareb est caractérisée par la présence de séries types de la Tunisie centrale s'étendant du jurassique au plio-quadernaire. Le trias est également présent mais n'est connu qu'en injection dans les accidents tectoniques. Le primaire n'affleure jamais. Les alluvions recouvrent la plus grande partie de l'emprise du barrage (Nasser, 1997).

Elle fait ressortir les formations suivantes déposées dans l'ordre chronologique (SNC, 1984) :

- **La formation Nara-Jurassique** : Elle est constituée de bas en haut par une alternance de bancs calcaires dolomitiques centimétriques et d'argiles marneuses vertes à verdâtres, de bancs calcaires dolomitiques avec de minces passées argileuses de couleur gris verdâtre à rougeâtre, et de niveaux stratifiés de dolomies grises à gris bleuâtres et à patine rousse en bancs. L'épaisseur de la couche est d'environ 290 m.
- **La formation Sidi Khralif - Tithonique Supérieur, Berriasien, Valangien** : Elle est constituée de marnes fossiles verdâtres avec de minces niveaux calcaires centimétriques jaune roux.
- **La formation Meloussi - Hauterivien** : Elle est constituée de grès à patine rousse, durs et formant des barres séparées par des sables plus ou moins cimentés à stratification entrecroisée avec de rares passées argileuses.
- **La formation Aleg - Turonien Coniacien** qui se subdivise en deux parties. Il y a, d'une part, les alternances calcaires et marnes Turonien formées, du bas au sommet, par des marnes feuilletées légèrement sableuses vert-grisâtres et de bancs de calcaires argileux. D'autre part, il y a des calcaires de Douleb - Coniacien Santonien, calcaires massifs à patine claire déposés dans un milieu relativement peu profond.
- **La série Volcano-Sédimentaire** : Cette formation présente à l'affleurement trois types de faciès. Un faciès violacé à matériel purement volcanique sous forme de fragments de taille moyenne non classés, un faciès verdâtre et vert clair comportant de fragments anguleux de roches volcaniques vacuolaires, et un faciès à grains millimétriques verdâtres inclus dans un ciment brunâtre.
- **Les alluvions du Merguellil** : Le lit de l'oued Merguellil est constitué d'une grande variété de matériaux allant de l'argile très plastique aux graviers sableux. Au niveau du lit mineur on y distingue, de haut en bas, trois grands ensembles :
 - * les matériaux granulaires de surface (6 mètres) constitués de sables fins à moyens contenant des graviers et des siltes.
 - * les matériaux à dominance argileuse et silteuse se trouvant entre 5 et 25 mètres (cote 190 à 170 mètres).
 - * et les matériaux hétérogènes constitués généralement de sables fins à grossiers, du gravier, du silte et de l'argile m (cote en dessous de 170 mètres).

Au niveau de la terrasse fluviatile, on y distingue quatre horizons : la couche argileuse de surface constituée par une argile silteuse et sableuse, les alluvions granulaires constitués de sables fins à grossiers et graveleux, les matériaux argileux constitués de sables fins argileux et silteux, et enfin les matériaux hétérogènes constitués de sables fins à grossiers graveleux et des traces de siltes et d'argiles.

La stratigraphie des appuis du barrage d'El Haouareb (SNC, 1984) :

- **L'Appui gauche** : La rive gauche du Merguellil à El Haouareb appartient au flanc sud-est de l'anticlinal faillé du Djebel Cherichira dont le relief est peu élevé et de succession de formations sédimentaires tendres généralement, recouvertes localement de colluvions. Ces formations sédimentaires forment une série d'âge tertiaire allant de l'Oligocène (aval) au Mio-pliocène (amont). L'emprise du barrage en rive gauche recouvre, de l'amont vers l'aval (soit en descendant) les formations suivantes :
 - * La formation des argiles Mahmoud du Miocène : Ces argiles sont essentiellement imperméables, feuilletées, gypseuses, de couleur verte et légèrement fossilifères. Elles présentent quelques minces niveaux d'argiles sableuses et forment un rideau naturel sur lequel sont ancrées les zones imperméables du barrage sur cette rive.
 - * La formation des grès Burdigaliens du miocène : Elle a une épaisseur de 20 mètres et consiste en grès grossiers, micro-conglomératiques, riches en fossiles et en quartz. Quelques minces lits d'argiles gypseuses et silteuses, et quelques petites failles à remplissage argileux recourent la formation.
 - * La formation des sables, grès et marnes de l'Oligocène continental : Elle a une épaisseur de 100 mètres et elle comprend surtout des sables fins à grossiers intercalés de bancs de grès tendres et de niveaux d'argiles. Les pourcentages relatifs des matériaux sont 11 % d'argile, 12 % de grès et 77 % de sable.
 - * La formation des grès et marnes de l'Oligocène marin : Elle est constituée d'alternances de marnes de grès avec quelques bancs de sables. Le barrage dans cette rive repose essentiellement sur la série de l'oligocène marin, particulièrement en bordure d'oued où le lambeau de l'oligocène recoupe complètement les fondations du barrage.

A l'amont des formations se trouvant sous l'emprise du barrage affleurent les formations du Vindobonien constituées de sables, d'argiles et siltes (50 mètres), et du Mio-pliocène formé de conglomérats, de marnes sableuses et de grès (400 mètres).

- **Appui droit** : L'appui droit du barrage est l'extrémité nord du Djebel El Haouareb. Les formations rencontrées dans cette partie sont au nombre de trois :
 - * La formation des calcaires gréseux affleurant à l'appui droit sur près de 150 mètres le long de l'axe du barrage entre les côtes 227.5 et 204 mètres. Ils sont massifs, durs, et en bancs décimétriques à métriques intercalés de lits centimétriques de calcaires marneux assez tendres.
 - * La formation des marno-calcaires gréseux affleure à environ 600 mètres à l'amont de l'emprise de l'appui droit entre les côtes 205 et 220 mètres, puis sur la pente Est du Djebel El Haouareb. Comme les calcaires gréseux cette formation se prolonge sous la terrasse fluviatile et sous une partie de l'oued. La composante marneuse de la roche assure à celle-ci une perméabilité très faible.
 - * La formation volcano-sédimentaire se trouve sous le marno-calcaire et affleure sous la pente Est du Djebel El Haouareb.

3) Les ouvrages hydrauliques du barrage d'El Haouareb

Le barrage d'El Haouareb est constitué d'ouvrages suivantes (annexe n° 11) :

- a) **La digue Principale** : c'est un ouvrage hydraulique en terre comportant un noyau central imperméable qui joue le rôle de barrage principal. Elle longue de 2070 m, d'une hauteur maximale de 33 m et a nécessité 6 millions de m³ de remblais.
- b) **La digue de Col** : c'est un ouvrage hydraulique en béton armé jouant le rôle de digue auxiliaire pour les plus hautes eaux. Il est haut de 3.5 m, d'une longueur de 38.5 m et d'un volume de 90 m³.
- c) **La tour de prise** : c'est un ouvrage hydraulique circulaire en béton armé, de 13 mètres de diamètre et de 36 mètres de hauteur. Il abrite les vannes de prise d'eau pour l'irrigation, pour la recharge de la nappe et pour le vidange des eaux chargées en sédiments.
- d) **La galerie semi-circulaire** : C'est un ouvrage hydraulique en béton armé qui a servi à la déviation de l'oued pendant la construction. Il est long de 217 mètres et d'un diamètre de 6 mètres. Actuellement il sert d'abri pour les conduites d'irrigation et de lâchures.
- e) **La chambre de vannes** : c'est un ouvrage hydraulique en béton armé abritant deux vannes qui servent d'affectation des eaux.
- f) **L'évacuateur des crues** : c'est un ouvrage hydraulique en béton armé de 40 mètres de longueur et d'une hauteur maximale de 8 mètres. Il sert à laminer des crues exceptionnelles et peut évacuer un débit maximum de 2450 m³/s.
- g) **Le canal d'évacuation** : canalise les eaux des crues exceptionnelles vers le lit du Merguellil. Il est conçu pour limiter l'effet des débits importants par sa faible pente (1‰) et par sa largeur de 150 mètres. Il est muni d'une **digue de protection** de 9 mètres de haut.

4) Les caractéristiques physiques de la retenue d'El Haouareb

La cote de la retenue normale est de 217 mètres, qui représentait, à la mise en eau, une capacité de 95 millions de m³. Tandis qu'à la cote des plus hautes eaux, 225 mètres, la capacité de la retenue maximale représentait 212 millions de m³.

Après la mise en eau du barrage il a été constaté un problème de fuites d'eau, qui se traduisait en partie par des émergences à l'aval de l'évacuateur des crues de la retenue d'El Haouareb. De ce fait, ajouté aux différentes sécheresses ayant sévi sur la région, cette retenue n'a jamais dépassé le niveau de 210 mètres. Dans ce qui suit nous allons, en ce qui concerne les capacités de la retenue d'El Haouareb, nous limiter à cette cote.

Les caractéristiques physiques du barrage d'El Haouareb sont comprises dans ses courbes hauteur-volume-surface établies à partir des mesures de nivellements topographiques (Garetta Ph. & Our Ghemi A., 1999). Elles changent donc en fonction du temps, au fur et à mesure que l'ouvrage se sédimente.

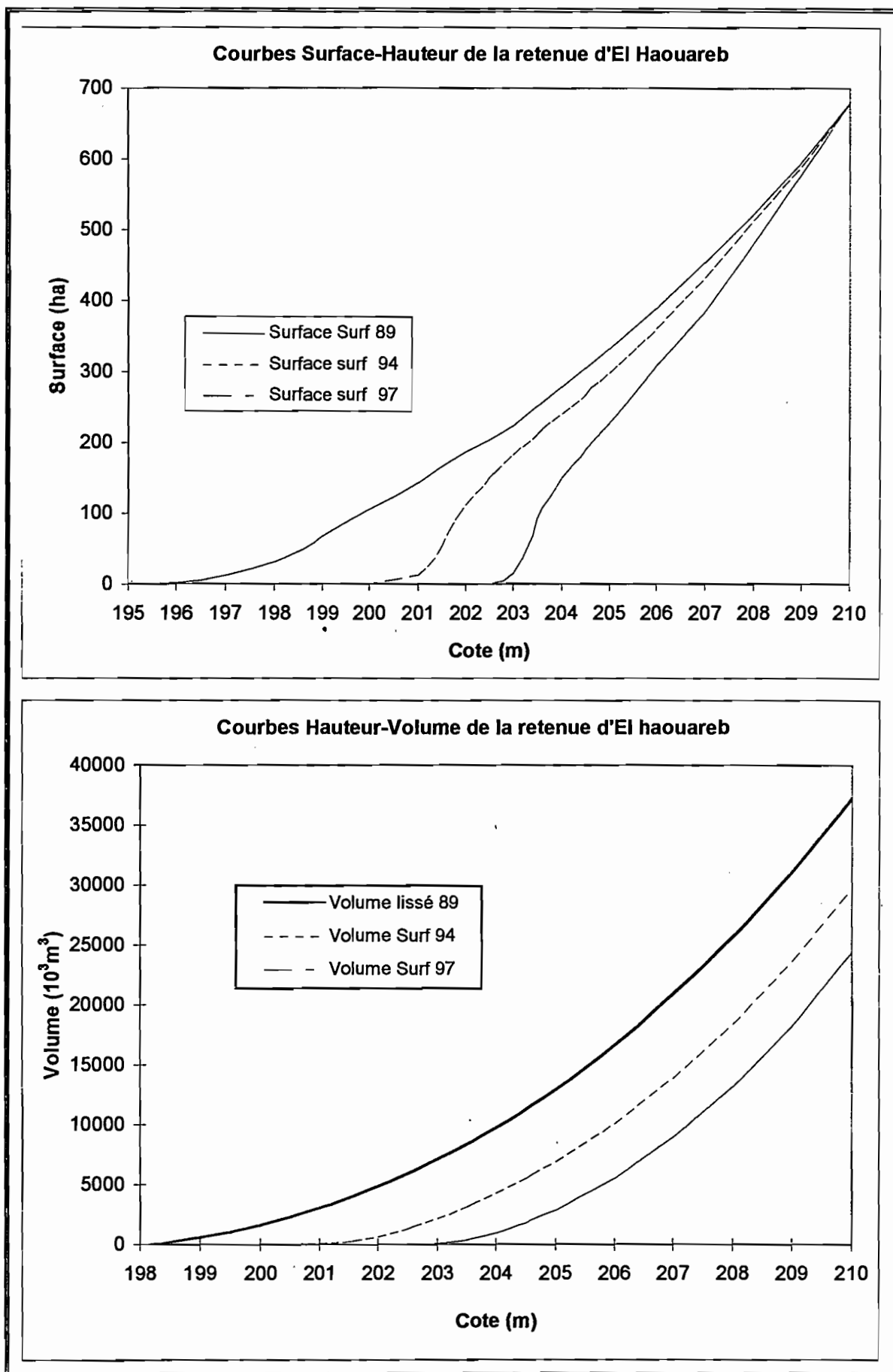


Figure n° 121 : Les caractéristiques physiques de la retenue d'El Haouareb

En ce qui concerne le barrage d'El Haouareb, durant les neuf années d'existence, seules deux mesures de nivellement ont pu être effectuées, et ce pendant la période d'assèchement de la retenue: il s'agit des mesures de 1994 et de 1997. Trois courbes de capacités sont donc disponibles : la courbe de 1989 à la mise en eau, celle de 1994 et celle de 1997 (figure n° 121).

Pour affiner ces courbes, surtout dans les basses eaux où leur précision reste à désirer, on a dû faire recours au lissage des mesures issues des différents nivellements. De plus la courbe de 1989, dont les mesures ne tenaient pas compte de la zone d'emprunt qui n'existait pas quand elles ont été effectuées, a été corrigée.

Compte tenu du fait que nous ne disposons que de trois courbes caractéristiques de la retenue d'El Haouareb, nous avons essayé de les appliquer sur l'ensemble de la période. Nous les avons donc réparties sur la période en fonction des sédiments qui arrivent au barrage qui dépendent à leur tour des apports liquides. On a ainsi appliqué la courbe de 1989 depuis la mise en eau jusqu'à la cote des plus hautes eaux d'Avril 1991. La courbe de 1994 va d'Avril 1991 jusqu'aux hautes eaux de Décembre 1995, et de cette date jusqu'à fin 1998 on applique la courbe de 1997 (figure n° 122).

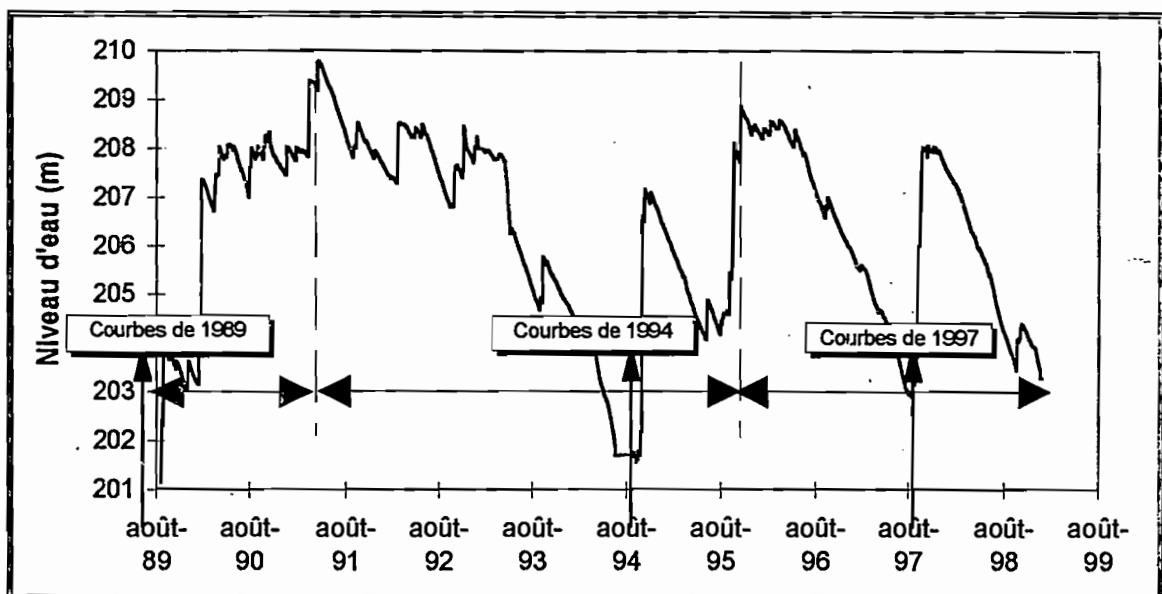


Figure n° 122 : Périodes d'application des trois courbes caractéristiques d'El Haouareb

Evidemment cette façon de procéder comporte des erreurs, étant donné que les courbes caractéristiques (Hauteur-Volume-Surface) dépendent des sédiments qui arrivent dans la retenue. Comme nous ne sommes pas en mesure de quantifier l'apport journalier en sédiments, et que même si on y arrivait on ne pourrait pas les répartir correctement en fonction de la hauteur pour avoir à l'échelle journalière les caractéristiques du barrage, nous ne pouvons aller plus loin. D'autre part, étant donné qu'au pas journalier on évalue des variations du volume entre deux jours, la connaissance du cubage exact ou approximatif de la retenue n'a pas d'influence sur les résultats journaliers. A l'opposé, ces valeurs présentent un grand intérêt pour l'exploitant du barrage.

5) Les apports en sédiment à la retenue d'El Haouareb

Partant des résultats précédents et des valeurs déduites des mesures faites par l'IRD et l'EGTH (Garetta Ph. & Our Ghemi A., 1999), on peut estimer l'apport en sédiment depuis la mise en eau du barrage d'El Haouareb jusqu'à maintenant. Ces apports sont fonction de la hauteur d'autant plus que le dépôt ne se fait pas de manière uniforme.

Comme le plan d'eau n'a jamais dépassé la cote 210 mètres, nous supposerons qu'au delà de cette cote aucun dépôt n'a été effectué. La figure n° 123 donne l'évolution du dépôt des sédiments en fonction de la cote.

Il apparaît que le dépôt total des sédiments depuis la mise en eau du barrage d'El Haouareb jusqu'en été 1997, soit 8 années d'existence, avoisine les 13 millions de m³ de sédiments. Ceci fait, avec une densité moyenne de sédiment égale à 1.3 (Garetta Ph. & Our Ghemi A., 1999), 1880 milliers de tonnes de sédiments par an. Cette valeur est supérieure à la moyenne estimée, plus haut, à Sidi Boujdaria qui est de 1450 milliers de Tonnes de sédiments par an. Donc plus de 400 milliers de tonnes de sédiments par an seraient apportés par les 300 Km² restant drainés principalement par les oueds Ben Zitoune et Hammam.

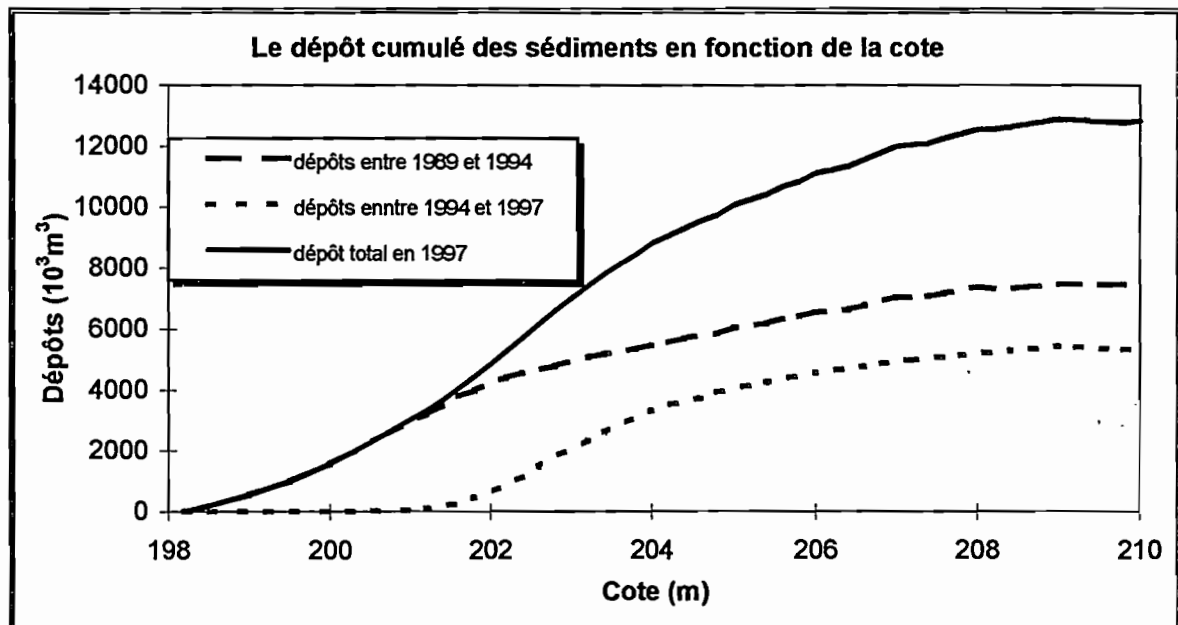


Figure n° 123: Dépôt de sédiments dans la retenue du barrage d'El Haouareb (Garetta, 1999a)

Tableau n° 121 : L'érosion spécifique sur le bassin de Merguellil

Bassin versant	Haffouz	Sidi Boujdaria	El Haouareb
Erosion spécifique (T/Km ² /an)	1215	1640	1565

En considérant les mesures, on peut conclure que c'est la partie intermédiaire du bassin de Merguellil, entre Haffouz et Sidi Boujdaria, qui apporte le plus de sédiments au barrage d'El Haouareb. Avec l'érosion spécifique sur ce bassin qui est moindre à l'amont et l'aval, et plus fort dans la partie intermédiaire (tableau n° 121).

6) L'étude des fuites ou infiltrations du barrage d'El Haouareb

L'étude des fuites du barrage d'El Haouareb a fait l'objet de plusieurs études avant et après sa mise en place. Les études élaborées avant l'implantation de l'ouvrage consistaient à faire des prévisions quant au fonctionnement futur de l'ouvrage. Celles faites par la suite consistaient, à partir des constatations faites après la mise en eau du barrage, à essayer de comprendre le fonctionnement de ce système de réservoirs.

Avant sa construction, Smaoui Moncef (1986) a travaillé sur l'estimation des débits de fuite dans le barrage El Haouareb et sur sa gestion ultérieure (bilan hydraulique). Dans cette étude il a utilisé deux modèles contradictoires, régis par l'équation bidimensionnelle de la diffusivité. D'une part le *modèle plan vertical* dans lequel on suppose que l'écoulement des eaux d'infiltration est bidimensionnel dans un plan vertical. Et d'autre part, le *modèle multicouche Horizontal* supposant que dans les couches aquifères les écoulements se font suivant le plan horizontal et qu'il y a connexion entre les différentes couches à travers les semi-perméables.

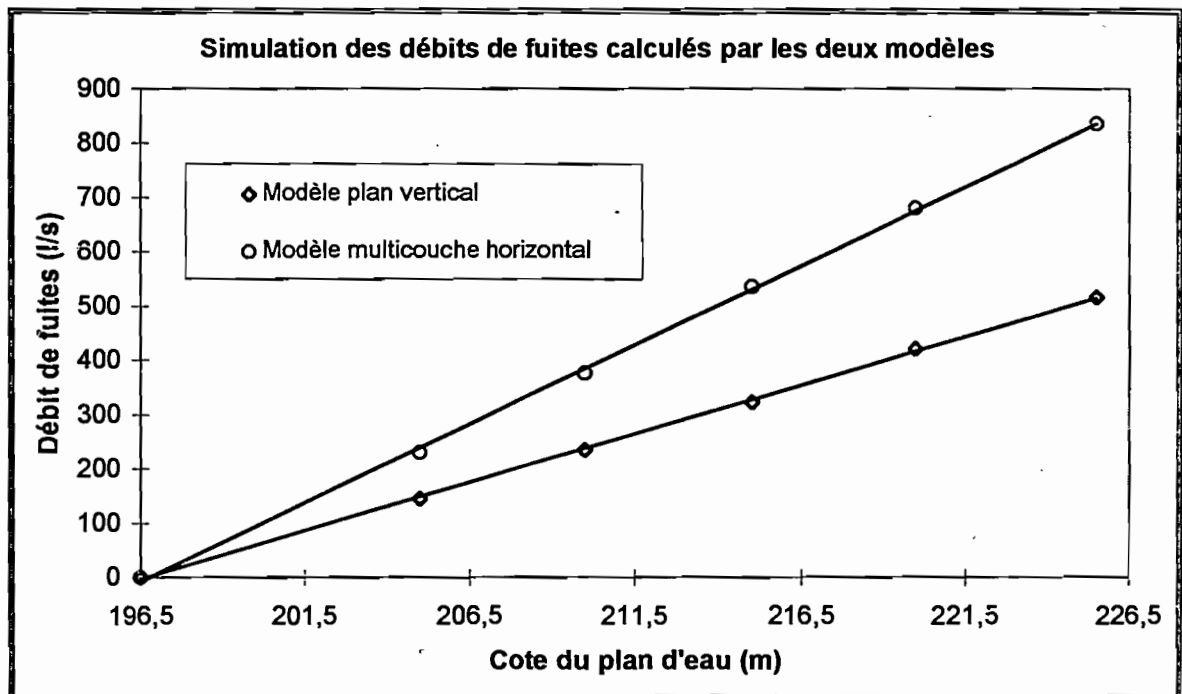


Figure n° 124 : Fuites en fonction de la cote du barrage d'El Haouareb (Smaoui Moncef, 1986)

Deux profils différents du barrage ont été examinés, les profils établis à partir des résultats des sondages géotechniques du *lit mineur* et de la *terrasse*. On a considéré que dans la région de lit mineur la fondation est formée de deux couches perméables, séparées par une couche semi-perméable. Alors que dans celle de la terrasse, on a une succession de 4 couches dont deux perméables et deux autres semi-perméables.

En ce qui concerne la stabilité du barrage, les résultats obtenus par le modèle plan vertical justifient la conception d'une ligne de puits dans la seule région de lit mineur.

Pour le modèle multicouche horizontal on a supposé, comme on l'a dit plus haut, que dans les couches perméables les écoulements sont horizontaux et que la communication entre elles passent par les couches semi-perméables. Le problème revient donc à étudier le comportement de ces aquifères en 3 dimensions, ce qui est plus conforme à la réalité.

Les débits de fuites ont été simulés par les deux modèles décrits ci-dessus et ce en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue. Il a donc calculé les débits de fuites pour les différents niveaux d'eau de la retenue. Pour les deux modèles des relations linéaires entre le débit de fuites et la hauteur d'eau dans la retenue ont été trouvées (figure n° 124).

Nasser (1997) a essayé de modéliser le système El Haouareb en utilisant le modèle MULTIC basé sur la résolution de l'équation de diffusivité régissant les écoulements souterrains dans un aquifère en charge. En entrée du modèle les données à la disposition du modélisateur étaient les charges piézométriques mesurées dans les puits en place et celles tirées des cartes piézométriques établies sur la zone. Ces charges ont servi de référence dans le calage du modèle. D'autre part, les transmissivités des matériaux de la zone ont été obtenues en faisant les essais de longue durée sur les puits et forages existant sur la zone. Comme on ne disposait que de données ponctuelles de transmissivités, leur extrapolation sur l'ensemble du domaine a été faite durant le calage du modèle et le pas de la discrétisation a été pris égal à 125 mètres.

En premier lieu, le calage a été effectué à l'état naturel et en régime permanent, c'est à dire avant la mise en eau du barrage. On a obtenu un débit de 167 l/s soit 5.2 millions de m³ par an provenant de la nappe d'Aïn El Baïdha alimentant la nappe de Kairouan et une carte piézométrique calculée proche de celle observée a été mise au point.

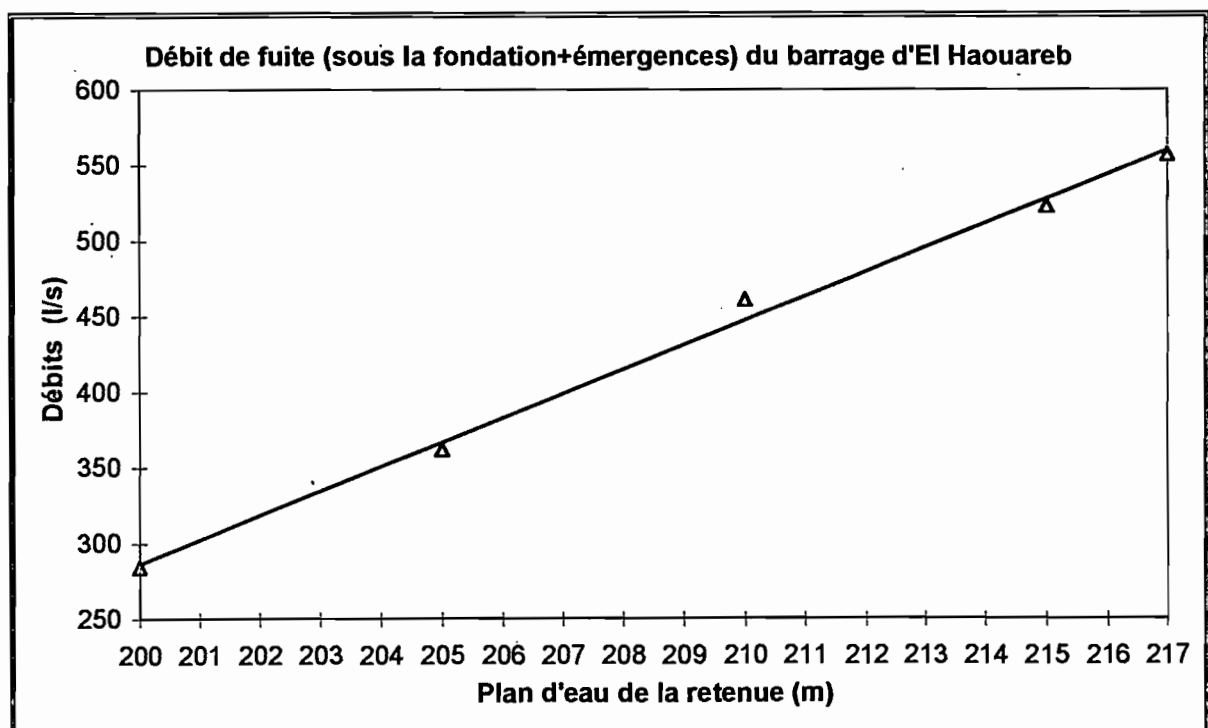


Figure n° 125 : Les fuites en fonction du plan d'eau du barrage d'El Haouareb (Nasser, 1997)

Après le calage, en régime permanent, qui a donné les valeurs des différentes caractéristiques physiques du milieu, les simulations selon les différentes côtes du lac ont été faites pour estimer les fuites sous la fondation du barrage et au pied aval de l'évacuateur des crues (figure n° 125). Les résultats obtenus sont compris dans le tableau n° 122.

Tableau n° 122 : Les débits de fuites d'El Haouareb calculés par le modèle MULTIC (Nasser, 1997)

Options	Débit de fuites sous la fondation (l/s)	Débit des émergences à l'aval de l'évacuateur des crues (l/s)
Etat naturel	167	-
Lac à la côte 200 m	132	152
Lac à la côte 205 m	145	217
Lac à la côte 210 m	196	265
Lac à la côte 215 m	211	312
Lac à la côte 217 m	216	341

La comparaison entre les valeurs des débits des émergences mesurés et celles calculées en fonction de la côte d'eau dans la retenue donne des résultats assez différents. En effet, les débits calculés sont largement inférieurs à ceux observés dans la réalité.

Conclusion

En guise de conclusion on peut retenir les éléments suivants :

- ◇ Le barrage d'El Haouareb représentant le dernier point de jaugeage de l'oued Merguellil avant la plaine de Kairouan, constitue l'exutoire d'un bassin versant d'une superficie d'environ 1200 km². Situé en Tunisie centrale, ce bassin est d'une forme allongée et a un relief fort. La prédominance des pentes faibles sur ce bassin fait qu'elles n'y jouent pas un rôle prépondérant dans le transport solide.
- ◇ Le régime pluviométrique est très irrégulier, avec une forte agressivité des pluies. La nature pédologique des terres et leur occupation composée à plus de 80 % de parcours, d'arboriculture et de cultures annuelles, font que ce bassin est très exposé à l'érosion. La forme érosive la plus fréquemment observée est le ravinement et le sapement des berges.
- ◇ Le régime hydrologique irrégulier est à l'origine de plusieurs catastrophes naturelles qui ont eu lieu dans le passé, notamment les inondations de 1969.
- ◇ La géologie du site montre que le barrage d'El Haouareb est à la confluence de plusieurs systèmes dont le fonctionnement est encore mal connu, malgré toutes les études dont il a pu faire l'objet.
- ◇ L'évolution dans le temps des caractéristiques physiques du barrage d'El Haouareb met en évidence un important phénomène d'envasement.
- ◇ Les études faites pour essayer d'expliquer le fonctionnement de ce système ont révélé des fuites d'eau importantes sous le barrage qui se sont confirmées avec la mise en eau du barrage qui n'a jamais dépassé la cote de 210 mètres. Alors que sa cote de retenue normale est de 217 mètres.
- ◇ Le site sur lequel a été construit ce barrage constitue une zone très complexe dont le fonctionnement est encore mal connu. Il nous revient, à partir des mesures et d'études déjà faites sur ce terrain d'essayer de l'éclaircir. De plus, le régime hydrologique de l'oued Merguellil qui est très irrégulier, et une faible couverture des terres et leur nature pédologique font qu'elles sont fortement érodées. Tout ceci met en exergue un problème de gestion intégrée de ce bassin versant.

Avec cette étude notre contribution pour résoudre ce problème sera de faire le bilan du système d'El Haouareb en essayant de déterminer les parts de ses différents éléments : ses apports et ses sorties. Pour y parvenir, nous aborderons cette étude en deux parties distinctes : d'abord le bilan en eau de surface, puis le bilan en eau souterraine.

Partie II :

Bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb

Partie II : Elaboration du bilan en eau de surface

Chapitre I : Position de l'équation de bilan en eau de surface

Introduction

Le bilan de tout système implique la connaissance de ses deux éléments principaux les entrants (inputs) et les sortants (outputs). Dans le cas d'un système constitué d'une retenue d'eau, les entrants sont représentés par les apports arrivant à cette dernière et les sortants par les différentes pertes et utilisations.

Normalement, les entrants et les sortants d'un quelconque système sont liés par une relation caractérisant le mode de gestion utilisée. Pour cela, plusieurs méthodes de gestion de systèmes réservoirs ont été mis au point.

En ce qui nous concerne, nous allons essayer de poser l'équation de bilan du barrage d'El Haouareb, en considérant les éléments fournis par le mode de gestion utilisé, sans s'attarder sur la gestion elle-même, puisqu'elle ne fait pas l'objet de notre étude.

1) Les éléments de bilan hydrologique d'une retenue

Les éléments suivants interviennent dans l'élaboration du bilan hydrologique d'une retenue (Direction CES et ORSTOM, 1996) :

a) Les apports ou entrants d'une retenue

De façon générale, les apports à une retenue peuvent être classés en quatre principales catégories (figure n° 211) :

- Les apports en provenance du bassin à travers l'écoulement de l'oued (**Ve**). Ces derniers sont issus des précipitations qui tombent sur les versants du bassin qui s'écoulent jusqu'à la retenue à travers le réseau de drainage. Ils comprennent des apports de crues et d'étiages.
- Les apports souterrains (**Vecs**) en provenance d'éventuelles nappes en relation avec la retenue.
- Les apports des précipitations (**Vp**) tombant directement sur la retenue. Ceux-ci sont évalués en multipliant la hauteur d'eau journalière précipitée par la surface de la retenue correspondant au même jour.

A part les apports directs par les précipitations sur la retenue (V_p), aucune de ces autres catégories d'apports n'est mesurée, étant donné qu'à l'entrée du barrage il n'y a pas de station de mesures hydrométriques.

b) Les sortants d'une retenue

Les sorties d'eau d'une retenue peuvent être classées en cinq principales catégories (figure n° 211) :

- Les pertes dues à l'évaporation (V_{ev}). Elles sont obtenues par calcul à partir de l'évaporation journalière et de la surface de la retenue du même jour.
- Les sorties par le déversement (V_d) de l'évacuateur des crues. Il se produit pendant les crues exceptionnelles et le volume déversé est évalué à partir des caractéristiques de l'évacuateur des crues. Le barrage d'El Haouareb n'a jamais atteint sa cote de retenue normale, par conséquent il n'y a jamais eu de sorties par l'évacuateur des crues.

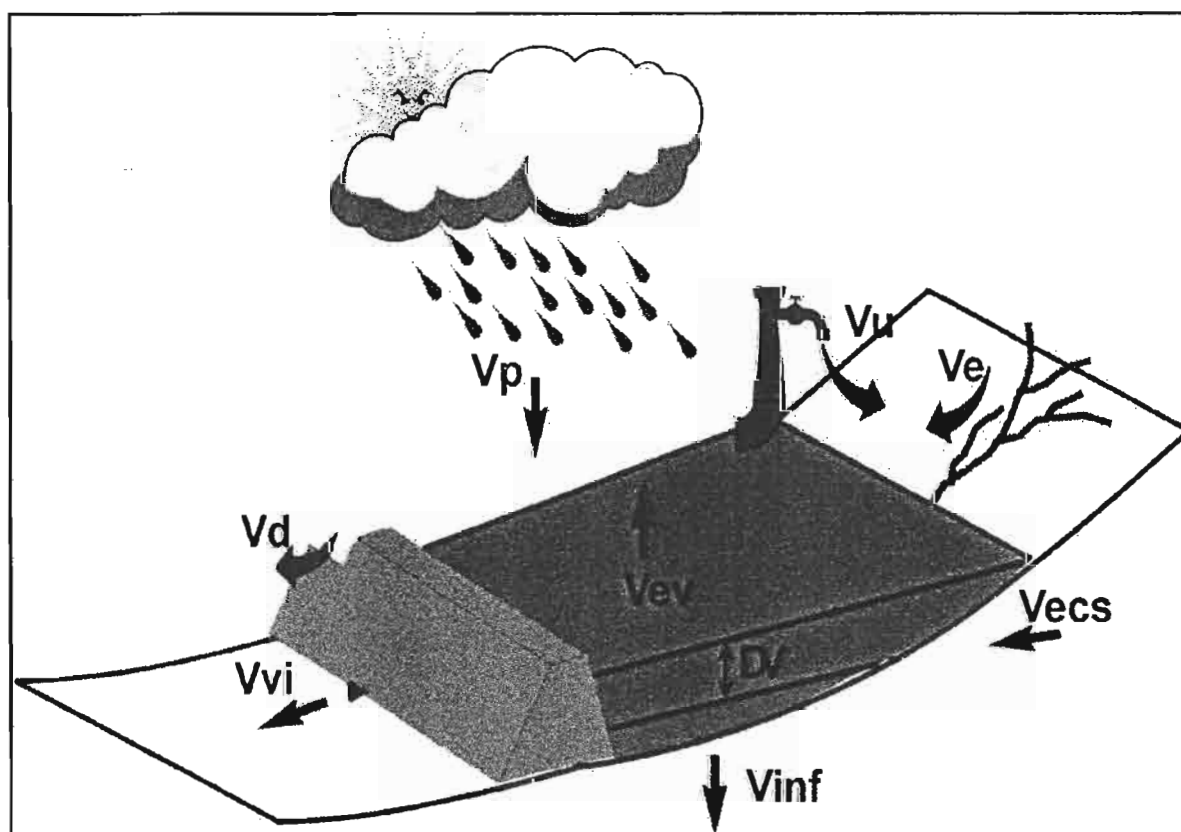


Figure n° 211: Schématisation du bilan hydrologique d'une retenue (Direction CES et ORSTOM, 1996)

- Les sorties d'eau par la vanne de vidange (V_{vi}). Le vidange de fond est utilisé pour essayer de lutter contre le colmatage de l'ouvrage par le phénomène d'envasement. Quelques vidanges, dont on verra l'ampleur plus tard, ont été faites sur le barrage d'El Haouareb.

- Les pertes d'eau dues à l'infiltration (**Vinf**). Le phénomène d'infiltration est un phénomène permanent dont la quantité est directement proportionnelle à la cote de la retenue selon la loi de Darcy. Il a été constaté que ce phénomène était particulièrement important sur la retenue d'El Haouareb, ce qui a été l'une des principales raisons évoquées pour expliquer son faible volume stocké.
- Les sorties d'eau pour divers usages (**Vu**) sont définies selon les objectifs pour lesquels le barrage a été construit. Ils peuvent être l'irrigation, l'alimentation en eau potable, la recharge de nappes, la production d'énergie électrique, etc. Pour le barrage d'El Haouareb, les principaux usages sont l'irrigation du périmètre d'El Haouareb et la recharge de la nappe de la plaine de Kairouan.

2) La position de l'équation de bilan de la retenue d'El Haouareb

Sur un intervalle de temps t , l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle du principe de la conservation des volumes d'eau (figure n° 211) qui s'écrit :

$$\text{Apports} - \text{Sorties} = \text{Variation de stock (1)}$$

En remplaçant dans l'équation (1) les apports et les sorties par les éléments définis dans le paragraphe précédent nous obtenons :

$$(\mathbf{Ve} + \mathbf{Vecs} + \mathbf{Vp}) - (\mathbf{Vev} + \mathbf{Vd} + \mathbf{Vvi} + \mathbf{Vinf} + \mathbf{Vu}) = \Delta\mathbf{V} \quad (2)$$

$\Delta\mathbf{V}$ (= Volume_{final} - Volume_{initial}) étant la variation du stock de la retenue pendant l'intervalle de temps t .

Pour le barrage d'El Haouareb, le volume déversé (**Vd**) est nul; l'équation (2) devient :

$$(\mathbf{Ve} + \mathbf{Vecs} + \mathbf{Vp}) - (\mathbf{Vev} + \mathbf{Vvi} + \mathbf{Vinf} + \mathbf{Vu}) = \Delta\mathbf{V} \quad (3)$$

De l'équation (3) on tire **Ve** qui représente l'écoulement naturel de l'oued à l'entrée de la retenue :

$$(\mathbf{Ve}) = \Delta\mathbf{V} - \mathbf{Vp} + (\mathbf{Vev} + \mathbf{Vvi} + \mathbf{Vinf} - \mathbf{Vecs} + \mathbf{Vu}) \quad (4)$$

Or, (**Vinf - Vecs**) représente le volume infiltré sur le fond qui serait plutôt « exfiltré » de la retenue diminué du volume apporté par la nappe à la retenue. Si on appelle **Vi = Vinf - Vecs** qui est la résultante des échanges entre la retenue et le système souterrain on a :

$$(\mathbf{Ve}) = \Delta\mathbf{V} - \mathbf{Vp} + (\mathbf{Vev} + \mathbf{Vvi} + \mathbf{Vi} + \mathbf{Vu}) \quad (4')$$

De l'équation (4') en mettant d'une part les inconnues, notamment le volume infiltré (V_i) et l'écoulement naturel de l'oued (V_e), du même côté et d'autre part les éléments connus de l'autre, on trouve notre équation de bilan:

$$V_e - V_i = \Delta V + V_{ev} + V_{vi} + V_u - V_p \quad (5)$$

Notre équation de bilan est donc une équation à deux inconnues, impossible par conséquent à résoudre. Pour la résoudre nous avons pensé à choisir des cas où l'une des deux inconnues devient très petite ce qui nous permettra de déterminer l'autre. Ainsi en travaillant sur les périodes où les apports de l'oued peuvent être considérés comme négligeables, on peut contourner cette impossibilité. Ceci nous conduit à l'équation (6) qui est une équation à une inconnue et qu'on résoudra dans le chapitre III concernant l'infiltration du site d'El Haouareb.

$$V_i = V_p - \Delta V - V_{ev} - V_{vi} - V_u \quad (6)$$

Conclusion

Dans ce qui précède nous avons essayé de poser l'équation de bilan du barrage d'El Haouareb (5). Cette équation, en considérant tous les éléments intervenant dans le bilan, est une équation à deux inconnues. Ces inconnues sont l'infiltration du site d'El Haouareb et les apports qui arrivent à cette retenue. Une telle équation, admet une infinité de solutions. Il faut donc trouver un moyen de la résoudre ou d'approcher sa solution optimale.

En regardant de plus près nos inconnues, on constate que l'infiltration n'est pas accessible, d'autant plus que sa mesure est impossible. Quant aux apports de l'oued à l'entrée de la retenue, malgré qu'ils ne soient pas mesurés à cet endroit, on peut trouver un moyen de les minimiser.

Ceci devient possible si on dispose de certaines données aux alentours de la retenue, notamment les données pluviométriques mesurées tout autour du barrage et les données hydrométriques mesurées à l'amont immédiat de la retenue.

En n'appliquant l'équation de bilan (6) que sur les périodes où on n'enregistre aucune pluie ni sur le barrage ni sur ses alentours, et où la station hydrométrique de Haffouz n'enregistre aucune crue qui passe, et de plus où la variation du niveau d'eau dans la retenue est décroissante de façon continue et régulière, on a la chance de minimiser ou d'annuler les apports par l'oued. Par cette approche, on arrivera à valider notre équation de bilan 6 et à évaluer (V_i).

Chapitre II : Mesure des éléments du bilan en eaux de surface de la retenue d'El Haouareb

Introduction

Comme nous l'avons vu plus haut, les éléments du bilan se partagent en deux principales catégories, d'une part les apports au système, et les sorties du système d'autre part. Les apports se distinguent à leur tour en apports d'oueds et apports de pluies qui tombent directement sur la retenue. Alors que les sorties se répartissent en plusieurs tranches selon les objectifs du barrage. Pour le barrage d'El Haouareb, les sorties sont constituées principalement par l'infiltration, l'évaporation, les lâchers de vidange de fond et d'alimentation de la nappe de Kairouan, et les pompages pour l'irrigation.

Dans ce qui suit, nous allons donner les mesures de ces différents éléments du bilan depuis la mise en eau du barrage. Pour les séries incomplètes nous allons, dans la mesure du possible, les compléter en utilisant les corrélations adéquates.

1) Les apports des oueds au barrage

Il y a trois oueds principaux qui se déversent dans le barrage d'El Haouareb (figure n° 114). Ce sont l'oued Merguellil qui draine la majeure partie du bassin versant, l'oued Ben Zitoune, et l'oued Hammam.

L'oued Ben Zitoune draine un sous bassin du sud du Djebel Trozza d'une superficie d'environ 79 Km² et prend le nom d'oued Az Zebara à l'entrée de la retenue. Aucune station ne mesure les apports de cet oued qui ne coule que pendant les périodes pluvieuses. Avec son lit sableux, il constitue une des zones d'alimentation de la nappe phréatique d'Aïn Baïdha.

L'oued Hammam draine les deux flancs du Djebel Trozza sur une superficie d'environ 98 Km². Comme l'oued Ben Zitoune, il ne coule que pendant les périodes pluvieuses et ses apports au barrage ne sont pas non plus mesurés.

L'oued Merguellil, qui constitue la principale source d'eau du barrage d'El Haouareb, draine environ 945 Km² à l'entrée de la retenue. Bien qu'aucune station ne mesure ses apports à l'entrée du barrage, il existe des stations hydrométriques implantées à l'amont immédiat depuis fort longtemps. Il s'agit principalement des stations de Haffouz et Sidi Boujdaria. Cependant, depuis la mise en eau du barrage la première est toujours suivie alors que la deuxième située dans la courbe de remous de la retenue a dû être abandonnée.

Etant sans station de mesure des débits à l'entrée du barrage, nous avons estimé les débits des crues arrivant au barrage en nous basant sur la variation de niveau d'eau dans la retenue. Ces variations de niveau reproduite sur la figure n° 221 représentent les apports apparents ou bruts depuis la date de mise en eau.

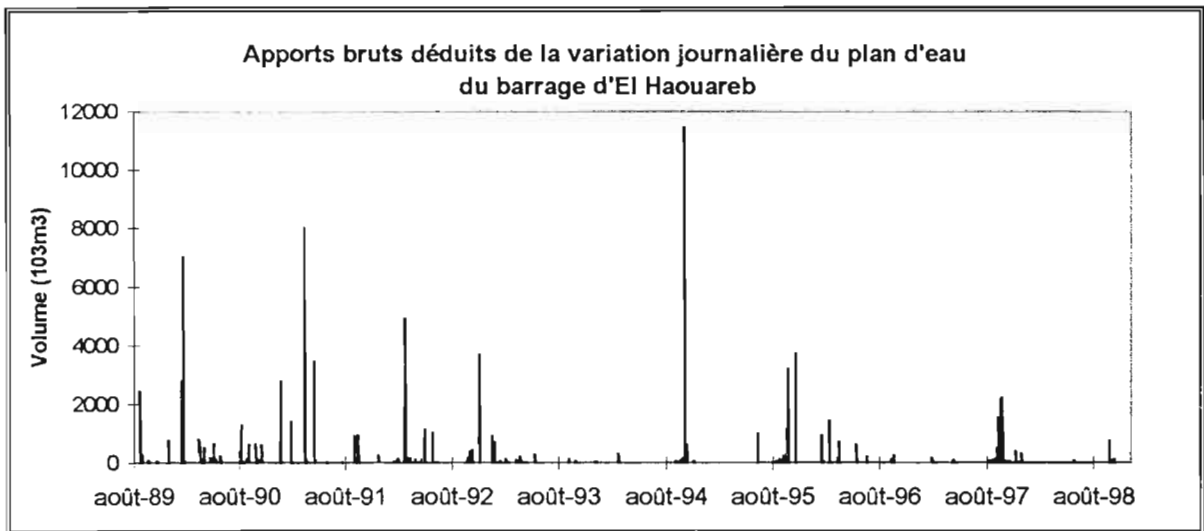


Figure n° 221 : Les apports des crues déduits de la variation du plan d'eau du barrage

Sur cette figure on observe deux grandes périodes d'apports qui s'étendent de la mise en eau à fin 1992, et de fin 1994 à début 1996. Le reste des périodes peut être considéré, vu le graphique, comme des périodes sèches.

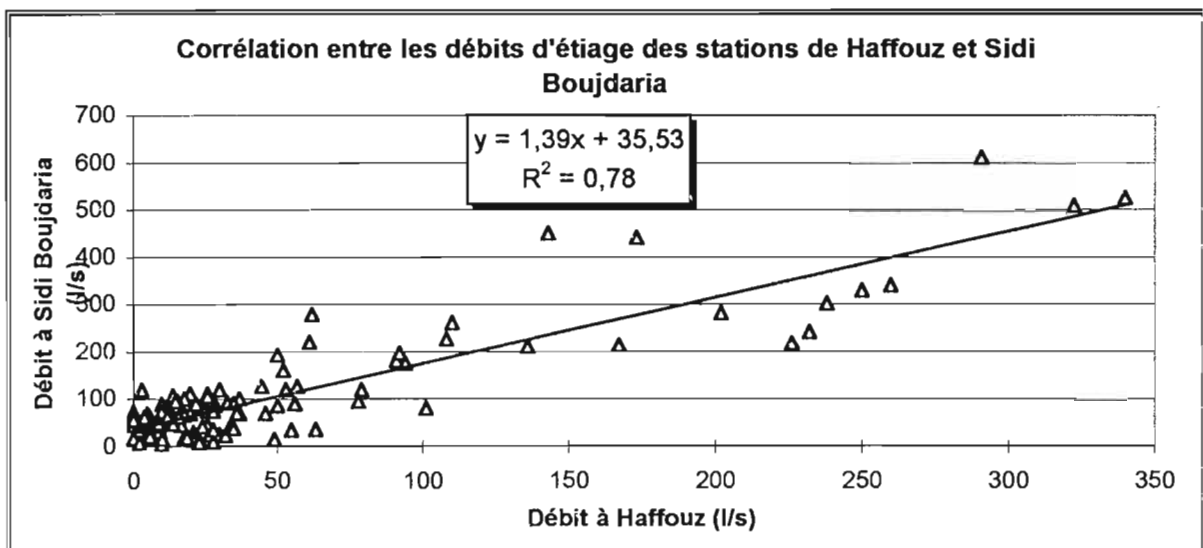


Figure n° 222 : Corrélation entre les débits d'étiages de Haffouz et Sidi Boujdaria

En revanche, pour les débits d'étiages nous avons établi, en nous basant sur les données observées depuis l'année 1980, une corrélation entre la station de Haffouz et celle de Sidi Boujdaria (figure n° 222). Cette corrélation nous permettra plus tard de corriger notre modèle d'infiltration des périodes sans apports, en supposant que dans ces périodes le débit d'étiage à Sidi Boujdaria se propage jusqu'au barrage d'El Haouareb.

Cette corrélation donne un coefficient égal à 1.39, comparable à celui des superficies drainées à Sidi Boujdaria et à Haffouz qui est de 1.32. De plus, on a une constante de 35 l/s qui peut être interprétée comme étant l'apport de la nappe alimentant l'oued Merguellil entre ces deux stations.

L'hypothèse que le débit d'étiage à Sidi Boujdaria se propage jusqu'au barrage d'El Haouareb nous a été inspiré par le fait qu'entre les deux il y aurait les débits qui s'infiltraient dans la nappe d'Aïn Baïdha et que la compensation viendrait soit des 300 Km² restant du bassin de Merguellil à l'aval de cette station, soit de l'alimentation de l'oued par la nappe d'Aïn Baïdha au niveau du Fondouk El Okbi.

2) Les apports de la pluviométrie au barrage El Haouareb

La pluviométrie constitue un des apports importants au bilan de la retenue d'El Haouareb. Pour la mesurer, un pluviomètre a été installé sur le site depuis le 05 Février 1990. Pour la période allant de la mise en eau au 05 Février 1990, cinq mois, aucune mesure n'est disponible sur le site.

Pour reconstituer la pluviométrie de cette période on va se baser sur les corrélations entre la station d'El Haouareb barrage et les stations environnantes, qui sont notamment la station de Trozza, d'Aïn Baïdha, de Haffouz, d'El Ala, de Cherichira, et la station d'El Haouareb Bled Sbitha. Ces stations pluviométriques, parfois très anciennes, encadrent bien le barrage d'El Haouareb.

Dans la première approche une corrélation « double masse » entre les différentes stations et celle d'El Haouareb nous a permis d'avoir une idée sur les stations ayant une meilleure corrélation avec celle du barrage. Deux stations se sont dégagées de cette analyse : la station de Trozza et celle d'El Ala (annexe 3).

Dans la suite nous avons représenté la pluviométrie journalière des stations considérées en fonction de celle du barrage. Ceci nous a donné une dispersion importante de nuage de points (annexe 4) qui nous a poussé à travailler à l'échelle mensuelle.

La corrélation entre la pluviométrie mensuelle d'El Ala et celle du Barrage est meilleure que celle de Trozza - Barrage (figures n° 223 et 224). Mais il est à signaler que les deux ne sont pas très bonnes avec des coefficients de détermination respectivement de 0.79 et 0.76. On a donc utilisé la corrélation la meilleure pour étendre la série des données de pluviométrie journalière du barrage avant le 05 Février 1990, soit celle d'El Ala.

Les deux corrélations obtenues, font ressortir une pluviométrie estimée au barrage d'El Haouareb bien inférieure à celle observée sur les stations de Trozza et El Ala. Ceci pourrait s'expliquer non seulement par le gradient pluviométrique du bassin du Merguellil (annexe n° 2), mais aussi par le problème de relief de la station d'El Haouareb qui sous-estime la pluie.

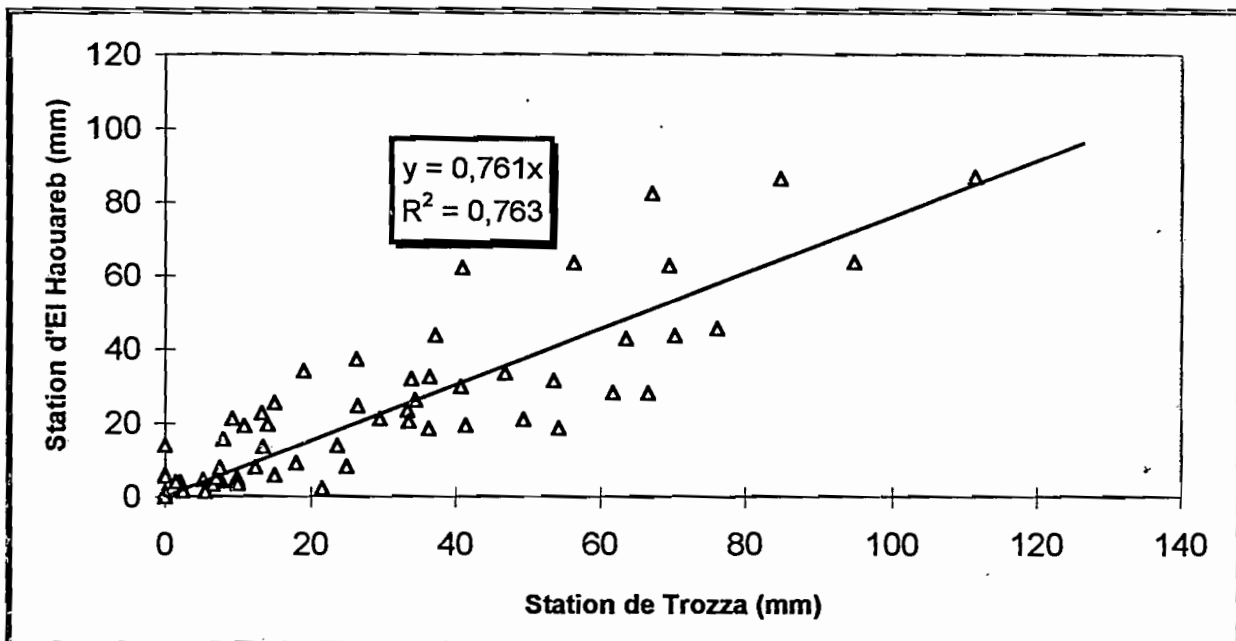


Figure n° 223 : Corrélation entre les pluviométries mensuelles de Trozza et El Haouareb

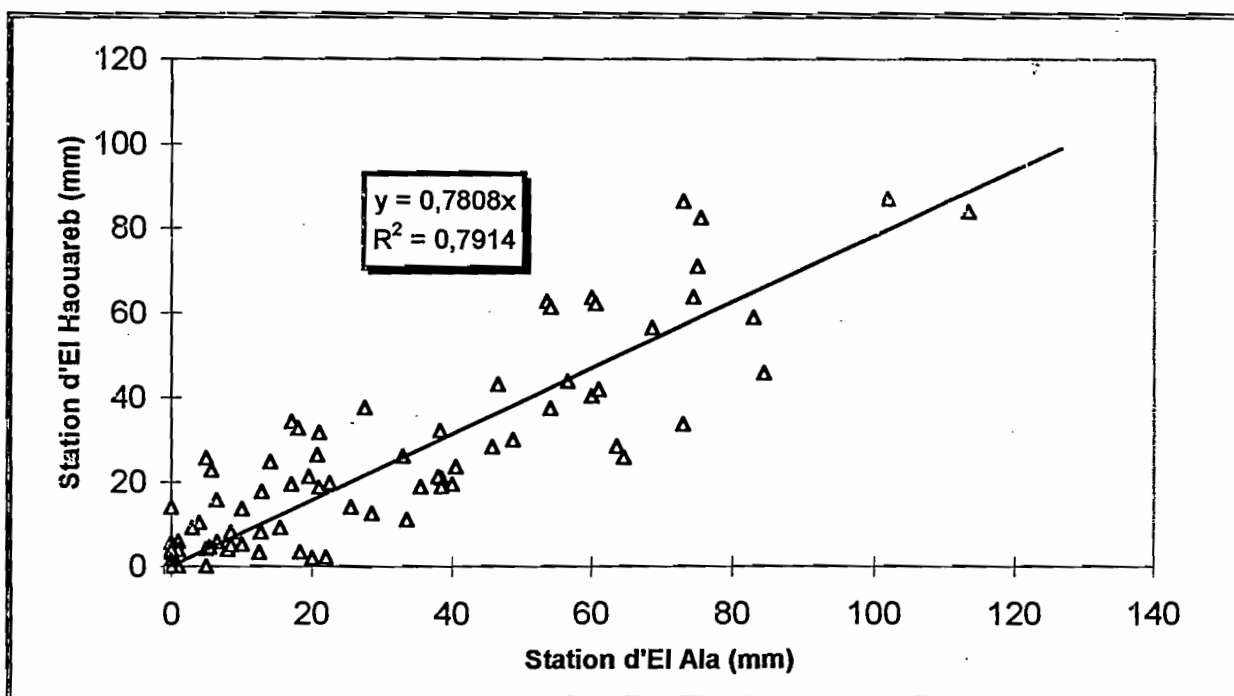


Figure n° 224 : Corrélation entre les pluviométries mensuelles d'El Ala et El Haouareb

La corrélation entre El Ala et Trozza (figure n° 225) est meilleure que celles établies entre ces stations et El Haouareb barrage; ceci pourrait être interprété comme étant dû à la distance entre ces stations.

Après avoir complété la série pluviométrique, nous avons estimé les apports de pluie (Figure n° 226) qui en découlent en multipliant la hauteur de pluie journalière par la surface de la retenue correspondante. On constate une certaine concordance dans le temps entre les apports bruts enregistrés au barrage et les apports de la pluie au même site.

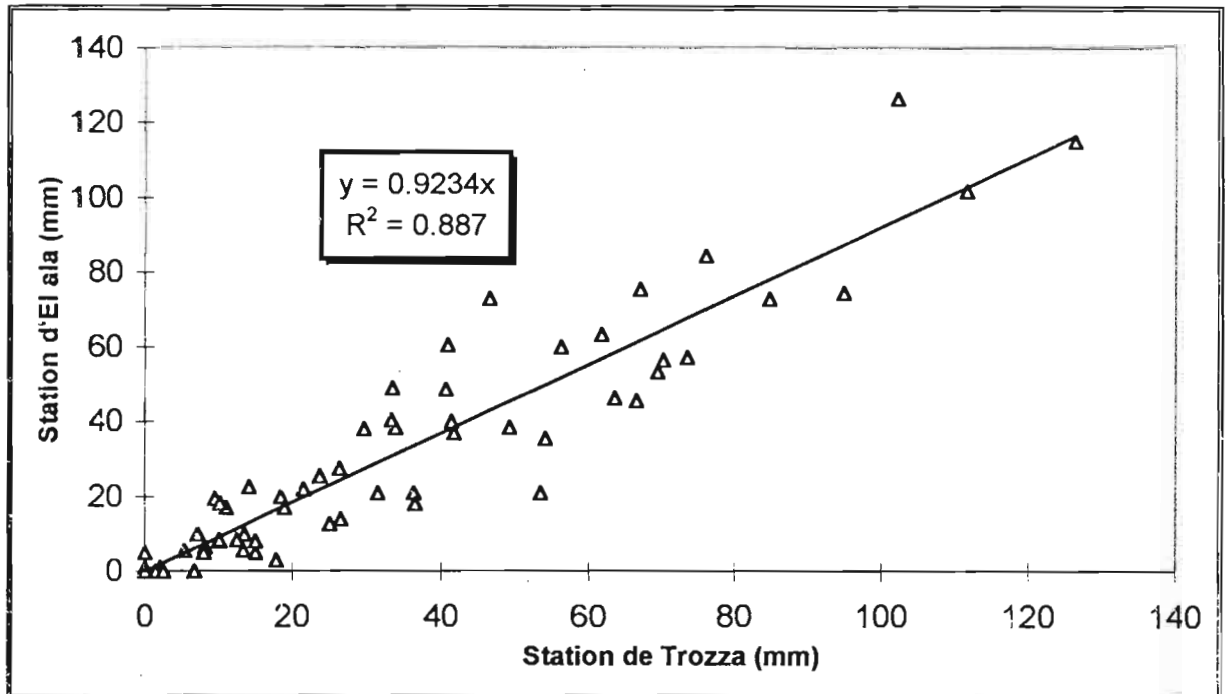


Figure n° 225 : Corrélation entre les pluviométries mensuelles d'El Ala et du Trozza

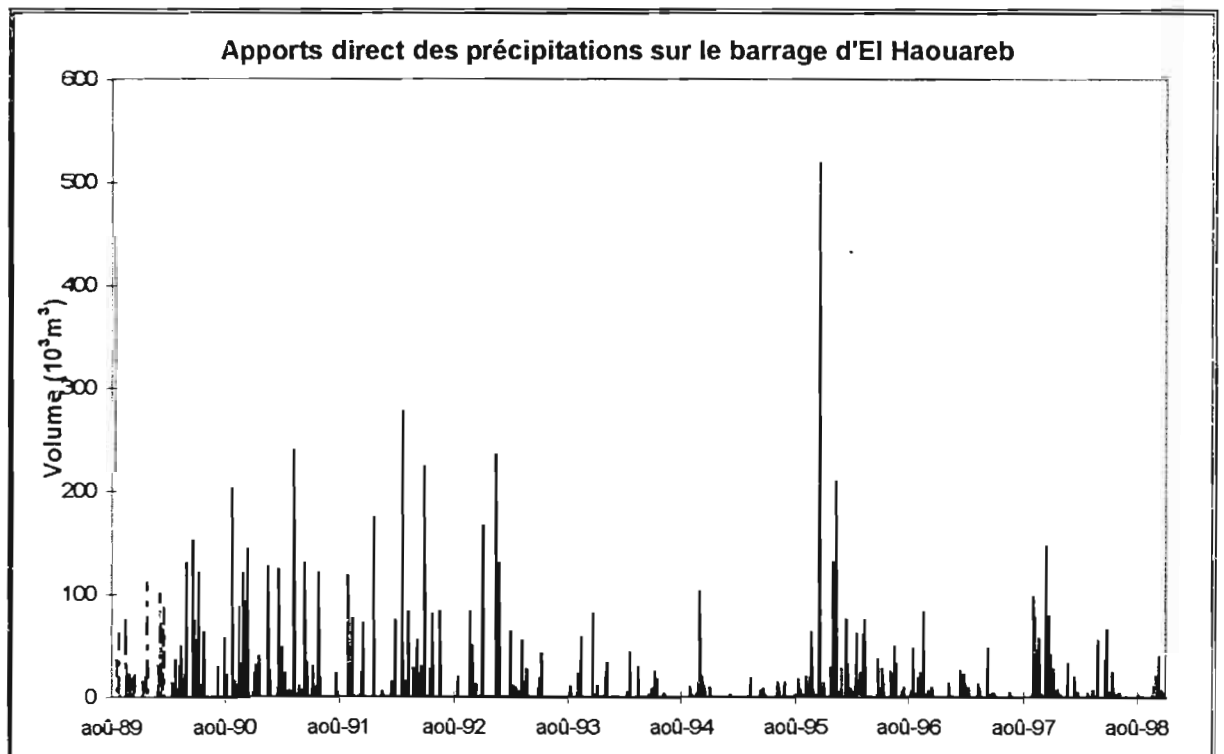


Figure n° 226 : Les apports de pluies tombant sur la retenue du barrage El Houareb

3) Les sorties par le phénomène d'évaporation

Introduction

En théorie l'évaporation peut être évaluée de trois manières suivantes (Pouyaud, 1986) :

◇ *L'évaporation, phénomène de diffusion gazeuse* : l'évaporation d'une nappe d'eau libre peut être déterminée à l'aide de certains paramètres caractéristiques de la nappe d'eau évaporante et de la masse d'air qui la surplombe.

◇ *L'évaporation, terme du bilan énergétique* : partant du fait que le phénomène d'évaporation s'accompagne d'une certaine consommation d'énergie, on peut la déterminer en partant de l'équation du bilan énergétique d'un système préalablement défini.

◇ *L'évaporation, terme du bilan hydrique* : l'évaporation d'une nappe d'eau libre peut être déterminée à partir de l'équation du bilan hydrique. La précision de l'évaporation ainsi déterminée dépendra de celles atteintes dans l'estimation des autres éléments du bilan. Pour cette approche seule une estimation de l'évaporation prévisible à partir de données climatologiques disponibles est envisageable.

Pour le barrage d'El Haouareb seule la méthode du bilan hydrique est envisageable étant donné que les deux premières exigent des données qui ne sont pas mesurées sur ce site. Dans le cas présent on dispose d'une série de mesure d'évaporation à partir d'un bac Colorado.

Fabriqués en fer galvanisé, les bacs Colorado sont des bacs de forme carrée, ayant 92 cm (36 in) de côté et 46 cm (18 in) de profondeur. On l'enfonce dans le sol de façon que son bord se retrouve à 5 cm au dessus du sol et le niveau de l'eau dans le bac est maintenu au niveau du sol ou légèrement en dessous (F.A.O., 1986).

a) La reconstitution des données manquantes

Les mesures d'évaporation par le bac n'ont commencé que le 12 décembre 1991, soit presque deux ans après la mise en eau du barrage. Comme dans le cas précédent, nous avons essayé de reconstituer l'évaporation sur le site avant cette date en nous basant sur les mesures des stations avoisinantes, localisées géographiquement en annexe n° 15, dont on dispose des données : Chebika dont le bac est de type Classe A et Fidh Ben Naceur dont le bac est de type Colorado type ORSTOM.

La comparaison entre les évaporations journalières des stations nous a donné un nuage de points très dispersé (annexe n° 5), ce qui nous a amené à travailler au pas de temps mensuel. Deux bonnes corrélations se sont dégagées entre les évaporations mensuelles des stations considérées (figures n° 227 et 228).

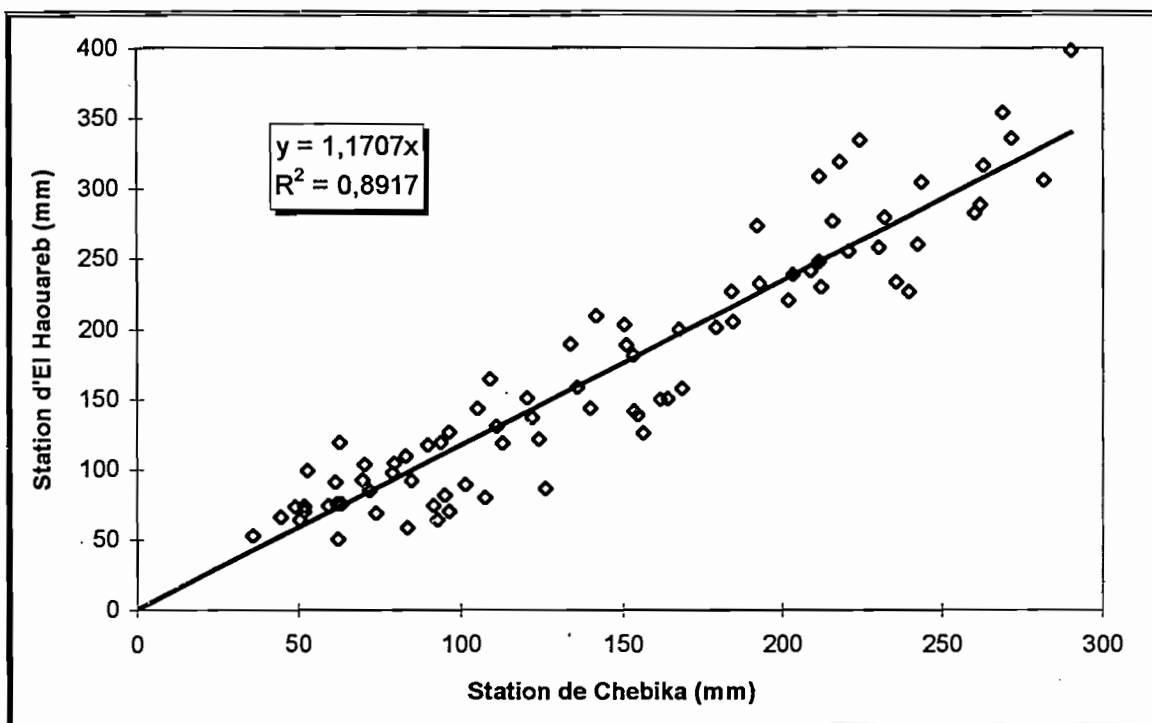


Figure n° 227 : Corrélation entre les évaporations mensuelles de Chebika et d'El Haouareb

La station de Fidh Ben Naceur dont les données ne commencent qu'en 1993 n'a servi qu'à la validation des données observées au barrage d'El Haouareb. Mise à part la validation des données, la station de Chebika a aussi permis la reconstitution des évaporations sur ce site avant la mise en place du dispositif de mesure. Ce choix a été motivé par le fait que non seulement la période commune d'observation entre ces deux stations est plus longue que la première, mais aussi par le fait que les mesures de la station de Chebika couvrent la période avant la mise en place du dispositif de mesure de l'évaporation au barrage.

Ces corrélations font ressortir des valeurs d'évaporation au barrage d'El Haouareb intermédiaires entre celles de la station de Chebika se trouvant en aval et celles de la station de Fidh Ben Naceur située en amont de la retenue d'El Haouareb.

Bien que la station de Chebika soit plus proche du barrage, les corrélations établies font ressortir que les mesures effectuées à celle-ci sont moins bien corrélées avec le barrage que celles de la station de Fidh Ben Naceur. Ceci peut s'expliquer soit par la qualité de mesures soit par la situation de cette station qui est implantée dans un secteur où il y a beaucoup d'arbre. En effet ce deuxième facteur serait à l'origine d'un rapport plus ou moins important (1.17) entre les mesures mensuelles d'El Haouareb et Chebika), comparé à la distance entre les deux stations.

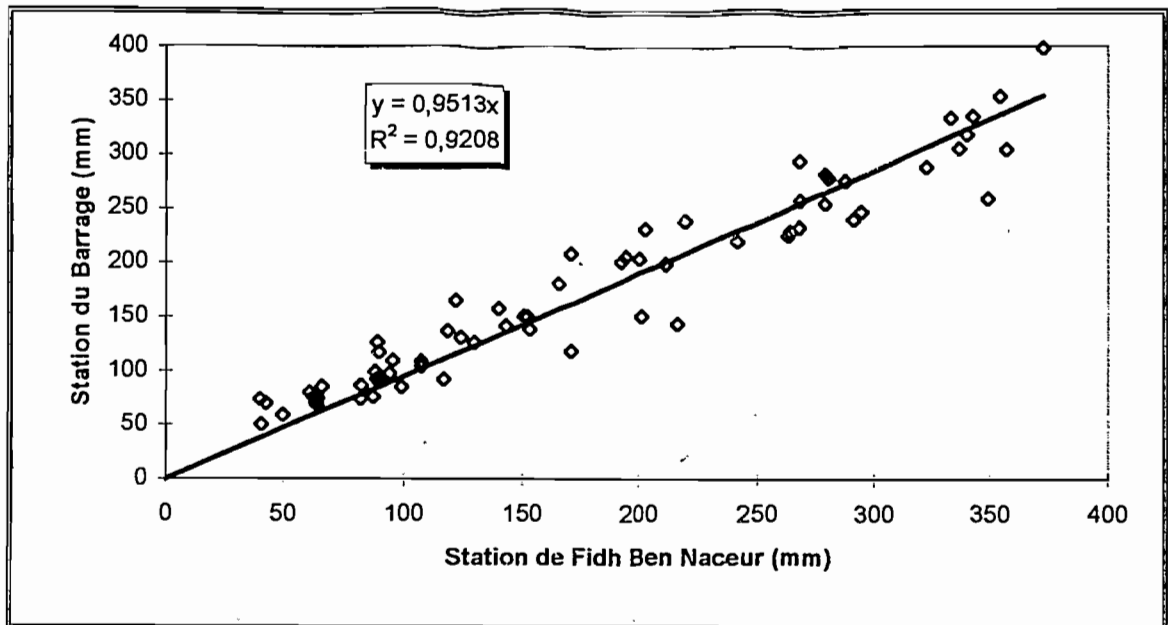


Figure n° 228 : Corrélation entre les évaporations mensuelles d'El Haouareb et Fidh Ben Naceur

b) Le Coefficient de l'évaporation

Pour ramener les mesures observées au niveau du bac à l'évaporation réelle sur la retenue un coefficient de correction s'impose pour tenir compte du transfert d'échelle. Il varie selon plusieurs études entre 0.6 et 0.9 (Abdulaziz & Fouad, 1989). Dans la région de Kairouan ce coefficient est pris par la DG/EGH égal environ 0.8 (Hayouni, 1999) pour calculer les volume évaporés des retenues d'eau à partir des données des bacs. Mais plusieurs études ont montré que ce coefficient n'est pas constant durant toute l'année; il dépend non seulement de la saison mais aussi d'autres paramètres climatiques locaux (Riou, 1975).

Une étude comparative de l'évaporation sur bac par rapport à celle d'un lac a montré que leur rapport dépendait non seulement du type de bac mais aussi de l'emplacement du bac par rapport au lac (Pouyaud, 1986). Il a aussi montré que ce rapport dépendait des dimensions des nappes d'eau étudiées; en effet la comparaison entre les mesures d'évaporation du bac Colorado soi nu et l'évaporation du plan d'eau a donné pour le lac Tchad (23000 Km²) une moyenne annuelle de 0.68 et pour le lac Bam (20 Km²) 0.73. Et ceci en considérant les mesures à des stations qui ne sont nullement influencées par les plans d'eau. En ce qui concerne le lac Bam, il a trouvé les valeurs de 0.82 et 0.84 respectivement pour les bacs des stations météorologiques de Bam et Kangoussou considérées comme influencées par le plan d'eau (Pouyaud, 1986).

A la suite de ces résultats, nous avons essayé de représenter le coefficient d'évaporation en fonction de la distance au plan d'eau du lac Bam dont la superficie est voisine de celle du barrage d'El Haouareb, tout en supposant qu'à la distance 0 m l'évaporation du bac est égale à celle du plan d'eau, c'est à dire le coefficient d'évaporation du bac est égal à 1 (figure n° 229).

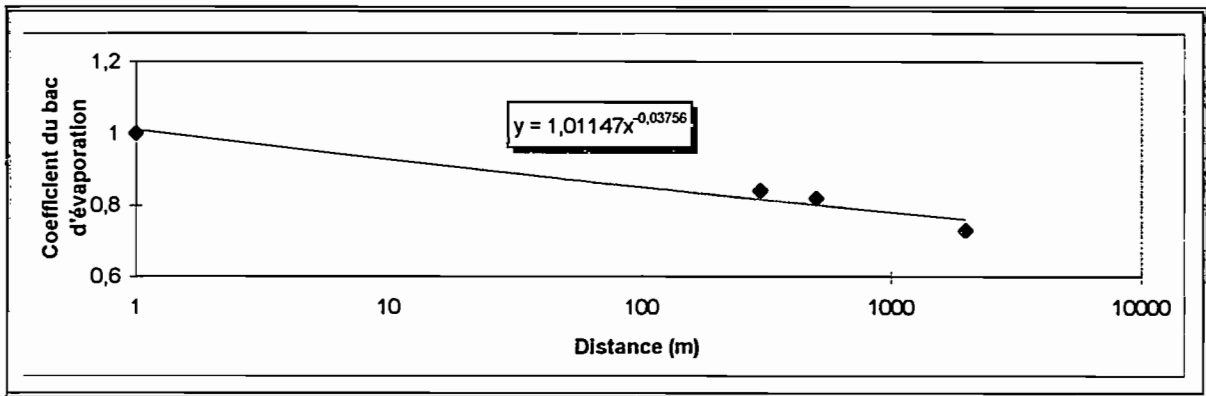


Figure n° 229 : Variation du coefficient d'évaporation du bac en fonction de la distance au plan d'eau

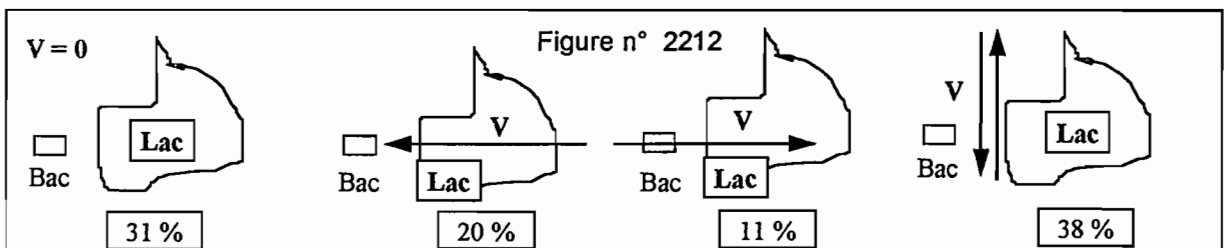
En extrapolant ces résultats au barrage d'El Haouareb dont le bac d'évaporation, de type Colorado enterré, est situé à 50 mètres en moyenne de la retenue, on aurait un coefficient de bac égal à 0.87.

Sachant que le vent est l'un des facteurs les plus influents sur l'évaporation du bac par rapport au lac, nous avons essayé d'en tenir compte dans le calcul du coefficient d'évaporation annuel du bac d'El Haouareb. Etant donné l'absence de mesures journalières du vent sur le barrage d'El Haouareb, on a utilisé les données de la station de Kairouan (1951-1970) tirées de la Monographie des oueds Zeroud et Merguellil (Bouzaiane & Lafforgue, 1986). Considérant la direction et la fréquence des vents qui soufflent sur la région, il a été obtenu le tableau n° 221(annexe n° 12).

Tableau n° 221 : Influence du vent sur les mesures d'évaporation du bac d'El Haouareb

Période n°	Observations	Pourcentage (%)
1	Périodes calmes (pas de vent)	30.9
2	Passage du vent sur le lac avant le bac	20.4
3	Passage du vent sur le bac avant le lac	11.0
4	Passage du vent en même temps sur le lac et le bac	37.7

De ce tableau on constate que 31 % de l'année est considérée comme une période calme, pendant 20 % de l'année il y a passage du vent sur le lac-avant le bac, durant 11 % de l'année le scénario s'inverse avec passage du vent sur le bac avant le lac, et pendant 38 % de l'année le vent passe en même temps sur le lac et le bac (figure n° 2212). De ceci on conclut que pendant les deux premières périodes le lac influence les mesures du bac avec une influence plus forte dans le deuxième cas. Alors que pendant la troisième et la quatrième période les mesures du bac ne sont pas influencées.



On peut calculer le coefficient annuel d'évaporation du bac d'El Haouareb par l'équation (7), en partant de l'hypothèse que quand le lac influence les mesures du bac on prend le coefficient 0.87 et quand le lac n'influence pas les mesures du bac on prend le coefficient de 0.73 obtenu sur le lac Bam.

$$K_{\text{annuel}} = [(30.9 + 20.4) \cdot 0.87 + (11.0 + 37.7) \cdot 0.73] / 100 = 0.802 \quad (7)$$

On obtient bien un coefficient annuel de bac équivalent à celui appliqué habituellement à la région de Kairouan. Pour tenir compte de la variabilité saisonnière de ce paramètre, nous allons appliquer pendant l'hiver où les vents dominant du Nord-Ouest passent sur la retenue avant le bac et influencent par la même occasion ses mesures, un coefficient de 0.87. Pendant l'été, où les vents dominants sont du nord-est et du Sud nous allons appliquer le coefficient de 0.73, car avec ces directions les mesures du bac ne sont pas influencées par le plan d'eau. Pour le reste de l'année on prendra le coefficient de 0.8.

c) Le calcul des volumes évaporés de la retenue d'El Haouareb

Avec ce coefficient d'évaporation ainsi obtenu, on calcule le volume évaporé pendant le jour j sur la retenue d'El Haouareb en le multipliant par la hauteur d'eau évaporée sur la bac pendant ce jour et par la moyenne des surfaces de la retenue du jour j et j+1 (figure n° 2210).

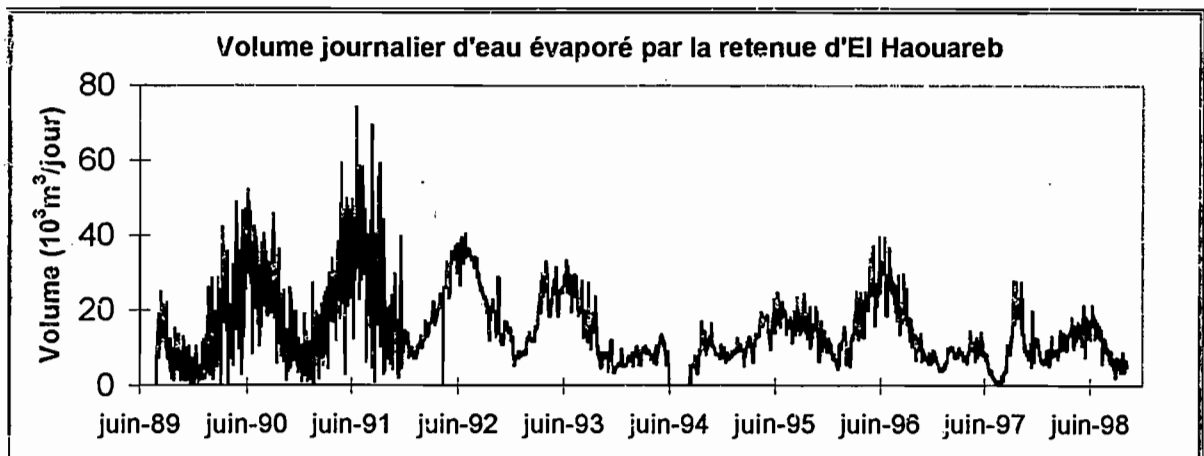


Figure n° 2210 : Evolution dans le temps des volumes évaporés par la retenue d'El Haouareb

L'évolution dans le temps des volumes évaporés par la retenue d'El Haouareb dépend de la quantité d'eau se trouvant dans le barrage. En effet les plus grosses valeurs se rencontrent en 1991, l'année des plus hautes eaux et les plus faibles en 1994, l'année de l'assèchement du barrage. Mais on constate aussi une variation bien marquée à l'échelle de l'année avec les plus grosses valeurs en été et les plus faibles en hiver. On constate aussi une dispersion prononcée des volumes évaporés du barrage d'El Haouareb pour la période antérieure à décembre 1991. Cette dispersion est due à la qualité des mesures de la station de Chebika dont on a parlé précédemment.

4) Les sorties par les pompages dans la retenue d'El Haouareb

Après la mise en eau du barrage en août 1989, il a fallu attendre décembre 1993 pour que les premiers pompages soient effectués dans la retenue d'El Haouareb. Ce retard dans la satisfaction de l'un des objectifs du barrage a été dû non seulement au fait que le barrage n'a jamais atteint sa cote de retenue normale pour appliquer les scénarios d'exploitations prévus, mais aussi au retard de l'aménagement du périmètre irrigué d'El Haouareb.

Vu qu'une bonne quantité d'eau se perdait, soit par évaporation soit par infiltration dont la destination n'était pas élucidée, une décision a été prise de passer outre ces règles d'exploitation de façon à faire profiter davantage les agriculteurs de la région de cette ressource. La station de pompage pour l'irrigation du périmètre d'El Haouareb (annexe n° 6) a été mise en service pour la première fois le 8 décembre 1993.

Par une conduite de 1.80 m de diamètre, l'eau arrive de la tour de prise jusqu'à la bêche de la station de pompage. Un flotteur permet de réguler l'arrivée d'eau dans la bêche en fonction de la demande du périmètre.

Cinq pompes, d'un débit de 250 litres/s chacune, puisent l'eau de la bêche vers le périmètre irrigué en passant par un réservoir intermédiaire qui régule leur fonctionnement. En effet, dans ce réservoir il y a le niveau minimum et maximum de telle sorte que lorsque le niveau d'eau atteint dans le réservoir le niveau maximum un signal est envoyé pour arrêter le fonctionnement des pompes. La demande du périmètre continue à être assurée par le volume du réservoir jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne le niveau minimum où le fonctionnement des pompes s'amorce de nouveau automatiquement.

Le compteur volumétrique d'eau est installé au départ du tuyau allant vers le périmètre irrigué d'El Haouareb. En revanche, il y a une petite quantité d'eau non comptabilisée qui se perd dans la chambre du flotteur et rejoint le canal d'évacuation des crues. Elle a été estimée, par le personnel du barrage, égale à 5000 m³ par mois de fonctionnement de la station de pompage.

L'assiduité et le sérieux du personnel en place, peut nous tranquilliser quant à la fiabilité des données recueillies sur ce barrage. Pour valider les données on a essayé de comparer les volumes comptabilisés au niveau des périmètres irrigués par le CRDA et ceux pompés au barrage sans pour autant trouver de relation satisfaisante entre eux (annexe n° 13). La falsification des compteurs par quelques agriculteurs escrocs et l'eau des sondages mélangée à celle du barrage avant d'être vendue aux agriculteurs ont été les seules explications fournies à ce fait.

Le 26 décembre 1996, soit 3 années après le début du pompage dans la retenue du barrage d'El Haouareb, a débuté le pompage des débits des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues ; dans le but de faire face à la demande en eau croissante et d'essayer de récupérer une partie de cette eau qui se perdait par évaporation. Une petite station constituée de deux pompes, de capacité 100 l/s chacune, a été mise en place à cet effet.

Tableau n° 222 : Prélèvements pour l'irrigation (10^3 m^3) dans la retenue d'El Haouareb

Mois / Année	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Janvier	-	741.81	407.13	-	186.97	85.32
Février	-	331.28	290.03	6.26	217.05	438.94
Mars	-	536.50	450.37	33.43	586.91	699.60
Avril	-	715.77	493.78	48.13	158.10	243.49
Mai	-	211.88	70.56	39.92	158.34	171.30
Juin	-	337.70	-	214.63	397.67	694.43
Juillet	-	110.50	-	221.48	290.88	458.57
Août	-	-	-	114.63	37.39	190.68
Septembre	-	-	-	88.23	4.51	269.12
Octobre	-	-	19.81	111.24	40.03	49.28
Novembre	-	9.80	5.27	99.99	-	193.43
Décembre	55.98	419.75	5.38	256.25	203.74	458.66
Total	55.98	3414.99	1742.34	1234.20	2281.58	3952.80

Le tableau n° 222 indique les prélèvements mensuels (10^3 m^3) pour l'irrigation ayant eu lieu sur la retenue d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'à fin 1998. Il montre que, jusqu'à la fin du mois de décembre 1998, les volumes retirés du barrage d'El Haouareb pour l'irrigation du périmètre de même nom, représentent 12.682 millions de m^3 , soit une moyenne de 2.5 millions de m^3 par an.

5) Les lâchures pour les vidanges de fond

Les lâchures pour les vidanges de fond communément appelées dévasements, ont été faites sur ce barrage, depuis sa mise en eau, chaque fois que la situation l'exigeait. D'après les consignes d'exploitation de ce barrage, les vidanges se font en période d'apports toutes les fois que la densité de l'eau dépasse une valeur de 1.07.

La densité est mesurée par un « densimètre » sur les échantillons d'eau obtenus par la vanne d'échantillonnage se trouvant en tête de la conduite de dévasement, dans la galerie souterraine.

Les volumes vidangés depuis la mise en eau du barrage d'El Haouareb sont mentionnés dans le tableau n° 223.

On constate sur la figure n° 2211 que pour l'ensemble des lâchures par vidange de fond effectuées sur le barrage d'El Haouareb, correspondant à 850.97 milliers de m³, plus de 85 % ont été faites en automne, et plus particulièrement au mois de Septembre qui englobe à lui seul près de 60 % des vidanges. Ceci démontre une fois de plus que les premières pluies d'automne qui trouvent le sol non protégé engendrent des crues plus chargées en sédiments que celles des autres saisons.

Tableau n° 223 : Volumes des vidanges de fond (10³ m³) de la retenue d'El Haouareb

Mois / Année	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Janvier		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Février		-	-	2.39	-	7.60	-	-	-	-
Mars		-	-	-	-	-	-	17.86	-	-
Avril		-	-	1.46	-	-	-	-	-	-
Mai		-	-	-	-	-	-	13.67	-	-
Juin		-	-	-	-	4.50	-	-	-	-
Juillet		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Août	-	-	-	-	-	-	10.85	-	4.92	-
Septembre	-	-	-	-	73.81	-	366.19	6.39	56.98	4.90
Octobre	-	-	-	-	-	38.97	-	-	-	-
Novembre	-	-	-	195.48	-	-	-	-	-	-
Décembre	-	-	-	45.00	-	-	-	-	-	-
Total année	0.00	0.00	0.00	244.33	73.81	51.07	377.04	37.92	61.90	4.90

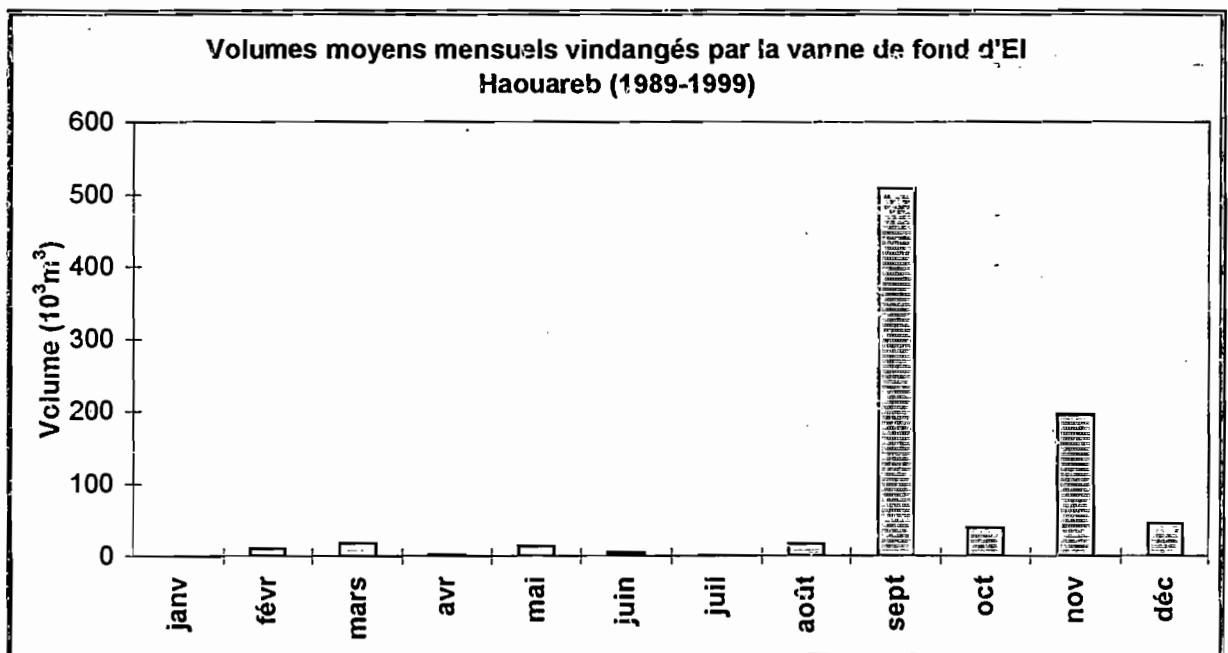


Figure n° 2211 : Comparaison des débits de vidange de fond en fonction de la période de l'année

6) Les lâchures pour l'alimentation de la nappe

L'alimentation de la nappe de la plaine Kairouan par des lâchures est l'un des principaux objectifs du barrage d'El Haouareb. Cependant ces lâchers n'ont pas pu être effectués de façon satisfaisante car la retenue n'a jamais atteint sa cote normale de remplissage.

Seules quelques campagnes de lâchures ont été faites pour alimenter la nappe de Kairouan, dont la plus importante est celle qui a eu lieu du 19 Avril au 8 Mai 1993 durant laquelle six millions de m³ ont été soustraits à la retenue. Son objectif était de tester l'aptitude du lit de l'oued Merguellil à absorber les débits lâchés et d'évaluer les volumes d'eau réellement parvenus à la nappe, contribuant ainsi à l'identification d'un scénario optimal pour la recharge de la nappe de Kairouan (Bouzaiane & al., 1993).

Au cours de cette campagne on a observé qu'un débit de 4 m³/s mesuré juste à l'aval du barrage, se propageait jusqu'à une distance de 30 Km et que les 12 premiers Km du lit étaient les plus perméables avec un débit d'infiltration pouvant aller jusqu'à 700 l/s.

Sur le plan recharge de la nappe de Kairouan cette campagne a permis d'estimer que 77 % des lâchures effectuées du barrage ont atteint la nappe.

D'autres campagnes de recharge ont été effectuées avant et après l'année 1993, le tableau n° 224 indique toutes les lâchures effectuées pour l'alimentation de la nappe de la plaine de Kairouan à partir du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau.

Comme on peut le constater sur ce tableau, les lâchures du Barrage El Haouareb pour l'alimentation de la nappe de Kairouan représentent 11.996 millions de m³, dont la moitié a été lâchée dans la seule année 1993.

Tableau n° 224 : Lâchures (10³ m³) de la retenue d'El Haouareb pour l'alimentation de la nappe

Mois / Année	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Janvier		-	-	-	403.00	-	-	-	-	-
Février		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mars		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avril		-	-	-	3001.20	-	-	-	-	-
Mai		208.00	-	-	2587.00	-	-	-	-	-
Juin		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Juillet		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Août	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Septembre	-	-	-	-	-	-	1228.05	-	-	-
Octobre	-	1404.00	-	-	-	-	1082.25	-	-	-
Novembre	-	-	-	1435.92	-	-	-	-	-	-
Décembre	-	-	-	646.20	-	-	-	-	-	-
Total année	0.00	1612.00	0.00	2082.12	5991.20	0.00	2310.30	0.00	0.00	0.00

7) Les déversements par l'évacuateur des crues

Depuis sa mise en eau, le barrage d'El Haouareb n'a jamais atteint sa cote de retenue normale, soit 217 mètres. Ceci implique, bien entendu, qu'il n'a jamais déversé. De ce fait, cet élément n'interviendra pas dans le bilan en eau de surface de cette retenue.

8) L'Infiltration sur le site de la retenue d'El Haouareb

L'Infiltration à travers la cuvette de la retenue d'El Haouareb est l'un des deux éléments du bilan en eau de surface qui ne sont pas connus. Dans le chapitre suivant nous allons essayer de la modéliser en nous basant sur les données disponibles sur ce barrage.

Conclusion

Depuis la mise en eau du barrage d'El Haouareb, une banque de données assez importantes a été mise au point par l'équipe chargée de sa gestion (DG/ETH). Les principaux éléments mesurés sur ce barrage, à un pas de temps journalier, sont le niveau d'eau de la retenue, les précipitations, l'évaporation, les lâchures d'alimentation de la nappe de Kairouan et de vidange de fond, et les pompages dans la retenue.

Les données de niveau d'eau dans la retenue nous ont permis, connaissant les caractéristiques de la retenue, de chiffrer le volume journalier parvenu au barrage, donc les apports journaliers bruts. Il a été montré que pendant les neuf années d'existence, il s'est dégagé deux grandes périodes d'apports qui s'étendent d'une part de la mise en eau à fin 1992, et de fin 1994 à début 1996 d'autre part. Ces apports seront corrigés et validés plus tard, par une comparaison avec ceux mesurés à Haffouz.

La pluie est mesurée par un pluviomètre installé sur le site depuis février 1990. La pluviométrie de la période d'avant cette date a été reconstituée en utilisant la corrélation établie entre cette station et celle d'El Ala. Cette bonne corrélation nous a permis, d'autre part, de valider les données de la station d'El Haouareb Barrage.

L'évaporation est aussi mesurée sur le site depuis décembre 1991 à l'aide d'un bac Colorado enterré. De très bonnes corrélations, qui nous ont permis de valider ces données et de reconstituer celles de la période antérieure à l'installation du bac, ont été établies entre cette station et celle de Chebika ainsi qu'avec celle de Fidh Ben Naceur.

Les vidanges de fond sont faites chaque fois que la densité des apports dépasse 1.07. Les lâchures pour l'alimentation de la nappe n'ont pas été faites abondamment, comme c'était prévu, parce que le stock de la retenue est resté faible jusqu'à présent. Tandis que les pompages pour l'irrigation n'ont débuté qu'en décembre 1993.

Chapitre III : L'étude de l'infiltration sur le site d'El Haouareb

Introduction

L'estimation de bilan du barrage d'El Haouareb suppose la connaissance de tous ses éléments. Parmi ces derniers, l'infiltration et les apports de l'oued à la retenue sont encore inconnues. Nous avons donc une équation de bilan à deux inconnues (équation (5)).

Dans ce qui suit nous allons ramener cette équation à une inconnue en ne travaillant que sur les périodes sans apports (6). Après, on corrigera les résultats obtenus en y rajoutant les débits moyens journaliers de Haffouz et ramenés à la station de Sidi Boujdaria par une corrélation entre les débits d'étiages des deux stations. Les débits d'étiages ainsi obtenus, à Sidi Boujdaria, seront supposés être ceux entrant dans le barrage d'El Haouareb dans la période considérée.

Ainsi, en utilisant deux méthodes on tentera d'établir, une relation entre infiltration et niveau d'eau dans la retenue. Dans la première méthode, on déterminera l'infiltration de la retenue en prenant la moyenne sur une période considérée sans apports. Tandis que dans la deuxième, on considérera les moyennes mobiles de 15 jours sur la période sans apports. Et pour terminer on fera une comparaison entre les résultats des deux méthodes utilisées.

1) Les critères de détermination des périodes sans apports

La détermination des périodes où les apports sont les moindres possibles a été faite à l'aide de quatre indices. Etant donné qu'on ne dispose pas, à l'entrée du barrage, d'une station hydrométrique, ces critères ont été fixés sur des indices d'apports : la pluviométrie sur les stations aux alentours du barrage, la variation du stock d'eau du barrage et les jaugeages de débits effectués à la station de Haffouz.

Le premier indice concerne la pluviométrie sur le site et dans les environs immédiats du barrage d'El Haouareb. Ce critère se justifie non seulement par le fait que la pluie qui tombe sur la retenue constitue une entrée assez importante, mais aussi par le fait que juste à l'amont du barrage il y a plusieurs oueds qui se déversent directement dans la retenue et dont on ne peut estimer les apports. Ces oueds qui ne coulent qu'en cas de pluie, peuvent apporter des volumes assez importants étant donné qu'ils drainent une partie du bassin versant du Merguellil de l'ordre 300 Km². Les plus sont l'oued Ben Zitoune et l'oued Hammam.

Le deuxième indicateur d'apports est celui des débits mesurés à Haffouz. On prend donc les périodes où les débits jaugés à cette station n'excèdent pas une certaine valeur (50 litres/s) au delà de laquelle on considère qu'il y a une crue susceptible de produire des apports au barrage. Plus ce débit est faible plus la probabilité qu'il n'y ait pas d'apports au barrage provenant de la partie amont du bassin est grande.

Le troisième indice est celui qui concerne la variation du niveau d'eau de la retenue. Il consiste à dire que lorsqu'il y a des apports assez conséquents on observe une variation positive du plan d'eau. Pour ce critère, on ne pourra considérer une période comme sans apports que dans le cas où l'on n'observe aucune variation positive ou nulle du plan d'eau.

Le quatrième et dernier indicateur de choix des périodes sans apports concerne leur durée dans le temps. Une fois que les trois premiers critères seront satisfaits, dans le souci de diminuer le plus possible l'influence des erreurs de mesures journalières, on ne considérera que les périodes dont la durée est au moins égale à quinze jours. Ce délai nous a semblé nécessaire pour pondérer les éventuelles erreurs de mesures journalières du niveau d'eau.

2) La corrélation entre les stations de Haffouz et Sidi Boujdaria

Afin de déterminer les valeurs des débits journaliers d'étiage qui arrivent au barrage, nous avons voulu d'abord déterminer ceux qui s'écoulent à la station de Sidi Boujdaria, qui est le dernier point de jaugeage avant le barrage. Mais vu le peu de mesures effectuées depuis la mise en eau du barrage à cette station, nous nous sommes rabattus sur la station de Haffouz qui est par contre mieux observée. Les mesures de débit effectuées à la station de Sidi Boujdaria ne nous ont pas permis d'établir une corrélation entre ces deux stations. Nous avons utilisé les données d'avant la mise en place du barrage, à partir de l'année 1980, afin de disposer d'une série assez longue (figure n° 222); la corrélation (8) en est sortie.

$$y = 1.39x + 35.53 \quad (8)$$

avec : y: débit d'étiage à Sidi Boujdaria en l/s

x: le débit d'étiage à Haffouz en l/s

Comme on l'a déjà dit dans le chapitre précédent, la relation (8) entre les deux stations est linéaire et admet deux paramètres. Le premier, qui représente la pente de la droite est égale à 1.39 et représente l'apport proportionnel à la superficie du bassin drainé à Sidi Boujdaria par rapport à celle de Haffouz (Superficie-Haffouz / Superficie-Sidi Boujdaria = 1.34). La deuxième constante 35.53 représente l'apport des nappes qui alimentent l'oued Merguellil entre ces deux stations.

Avec l'équation (8), nous avons reconstitué une série de débits d'étiages à la station de Sidi Boujdaria de 1989 à 1998 que nous supposons être ceux entrants dans le barrage d'El Haouareb. Avec ces débits nous compléterons le modèle d'infiltration qui sera calé sur les périodes sans apports.

3) Le modèle d'infiltration de la retenue d'El Haouareb

Puisque $V_e - V_i$ (5) peut être évalué assez facilement à partir du bilan, et que V_e est supposé négligeable au cours des périodes choisies, on va pouvoir en déduire V_i . Ce volume, résultant d'une certaine vitesse d'infiltration, est lié à la charge et donc à la cote des eaux dans la retenue. D'où la relation, le modèle, à établir entre ces deux paramètres.

L'estimation de l'infiltration en fonction de la cote d'eau dans la retenue a été faite à l'aide de deux méthodes. La première consistait à faire une moyenne d'infiltrations sur une période sans apports en fonction d'une moyenne de cotes de la même période. Dans la deuxième approche, au lieu de prendre une valeur par période sans apports on a pris les moyennes mobiles de 15 jours.

Dans la première approximation nous avons supposé que les apports par les oueds étaient nuls pendant les périodes sans apports. Or, en réalité ces apports ne sont jamais nuls. Pour en tenir compte, nous avons considéré la corrélation entre les débits d'étiages de Haffouz et Sidi Boujdaria qui, à partir des mesures de la première station, a généré des débits à la seconde que nous avons supposé se propager jusqu'au barrage.

Comme nous ne disposons que de trois relevés de bathymétrie sur le barrage d'El Haouareb, alors que la courbe de tarage hauteur_volume_surface évolue en fonction du temps, nous avons reparti ces trois courbes sur l'ensemble de la période de l'étude. La première courbe de tarage d'El Haouareb date d'avant la mise en eau du barrage et a été appliquée de la mise en eau aux plus hautes eaux du barrage d'avril 1991. Ensuite on a pris la deuxième courbe, issue du nivellement de l'été 1994 correspondant au premier assèchement du barrage, jusqu'aux hautes eaux de décembre 1995. Et en fin on a appliqué la dernière courbe de tarage, issue du nivellement de 1997 correspondant au deuxième assèchement du barrage, jusqu'à décembre 1998 (figure n° 122).

L'application de ces courbes de tarage sur les périodes décrites plus haut a permis de déterminer l'envasement du barrage en 1994 et en 1997. En effet le volume de sédiments apportés par l'oued Merguellil au barrage depuis sa mise en eau jusqu'à août 1994 a été estimé à 7.53 millions de m^3 , alors qu'en été 1997 ce chiffre a atteint 12.82 millions de m^3 d'apports solides (figure n° 123).

a) L'estimation de l'infiltration par la première méthode

Depuis la mise en eau du barrage, on a trouvé 37 périodes sans apports (d'au moins 15 jours chacune). Elles sont répertoriées dans les 3 tableaux suivants, qui ont été élaborés en fonction des périodes de validité des trois courbes de tarage (tableau n° 231, 232 et 233).

Pour la période allant de la mise en eau à avril 1991 on compte « 4 périodes sans apports », de mai 1991 à décembre 1995 « 20 périodes sans apports », et enfin de janvier 1996 à octobre 1998 « 13 périodes sans apports ».

Tableau n° 231 : Périodes sans apports correspondant à la première courbe de tarage (1989-1991)

Périodes		Cote maximum	Cote minimum	Cote moyenne	Infiltration par Jour
Début	Fin	(m)	(m)	(m)	(10 ³ m ³)
9-déc-89	25-déc-89	203.59	203.31	203.45	48.44
30-oct-89	15-nov-89	203.52	203.22	203.37	47.44
8-jun-90	3-jul-90	207.94	207.52	207.73	60.32
13-jul-90	02-août-90	207.38	206.98	207.18	63.72

Tableau n° 232 : Périodes sans apports correspondant à la deuxième courbe de tarage (1991-1995)

Périodes		Cote maximum	Cote minimum	Cote moyenne	Infiltration par Jour
Début	Fin	(m)	(m)	(m)	(10 ³ m ³)
06-jun-91	21-jun-91	209.20	208.98	209.09	55.27
25-jun-91	20-jul-91	208.9	208.5	208.70	53.30
16-août-91	01-sep-91	208.04	207.80	207.92	53.48
25-oct-91	20-nov-91	208.11	207.80	207.36	50.23
01-déc-91	18-déc-91	207.90	207.73	207.82	44.75
20-jun-92	05-jul-92	208.19	207.94	208.07	54.96
15-jul-92	08-août-92	207.79	207.36	207.58	47.59
18-août-92	02-sep-92	207.22	206.97	207.10	43.98
21-jun-93	10-jul-93	205.82	205.54	205.68	23.44
19-août-93	02-sep-93	204.90	204.68	204.79	26.08
07-nov-93	25-nov-93	205.22	204.99	205.11	32.37
20-jan-94	09-fév-94	204.31	203.91	204.11	23.05
19-mar-94	06-avr-94	204.14	203.75	203.95	31.28
20-mai-94	10-jun-94	202.50	202.25	202.38	16.59
2-déc-94	21-déc-94	206.75	206.46	206.61	45.87
10-jan-95	31-jan-95	206.20	205.89	206.05	38.03
12-fév-95	04-mar-95	205.75	205.48	205.62	32.51
10-mai-95	07-jun-95	204.43	204.09	204.26	15.31
01-jul-95	16-jul-95	204.65	204.41	204.53	29.55
16-jul-95	31-jul-95	204.41	204.19	204.30	19.40

Avec cette méthode, nous déterminons une valeur moyenne par période sans apports, qui portées sur un graphique (figure n° 231) donnent l'existence d'une relation apparemment linéaire entre V_i et la hauteur de l'eau dans le retenue.

Tableau n° 233 : Périodes sans apports correspondant à la troisième courbe de tarage (1996-1998)

Périodes		Cote maximum	Cote minimum	Cote moyenne	Infiltration par Jour
Début	Fin	(m)	(m)	(m)	(10 ³ m ³)
25-jun-96	12-jul-96	207.83	207.46	207.65	63.18
19-jul-96	12-août-96	207.35	206.97	207.16	36.50
19-oct-96	03-nov-96	206.58	206.39	206.49	35.18
03-nov-96	18-nov-96	206.39	206.21	206.30	30.49
18-nov-96	08-déc-96	206.21	205.98	206.10	29.37
25-déc-96	11-jan-97	205.83	205.59	205.71	26.61
17-fév-97	08-mar-97	205.48	205.13	205.31	24.18
18-mar-97	08-avr-97	204.95	204.63	204.78	10.79
21-jun-97	16-jul-97	203.79	203.24	203.52	1.81
01-fév-98	26-fév-98	207.21	206.85	207.03	39.82
01-jul-98	17-jul-98	204.90	204.55	204.73	15.30
17-jul-98	07-août-98	204.55	204.19	204.37	11.80
10-jun-98	30-jun-98	205.38	204.92	205.15	20.97
30-juin-98	6-août-98	204,92	204,20	204,56	13,296
22-oct-98	11-nov-98	204,33	204,09	204,21	14,93
6-déc-98	26-déc-98	203,89	203,28	203,59	12,37

b) L'estimation par la deuxième méthode

La deuxième méthode consiste, au lieu de prendre une valeur moyenne de l'infiltration sur l'ensemble de la période sans apports, à considérer les moyennes mobiles centrées de 15 jours dans la période. Pour cela, à une date donnée de la période sans apports, est affectée une valeur moyenne de l'infiltration calculée à partir des infiltrations de ce jour, de sept jours avant et de sept jours après.

Pour la représentation, les moyennes mobiles centrées sont à la fois appliquées à l'infiltration et à la cote d'eau dans la retenue.

Cette méthode permet d'avoir une série de données plus grande et diminue par conséquent le poids d'un point sur la corrélation à établir. De plus, elle devrait permettre de voir si cette moyenne est stable ou si elle varie suivant les dates considérées dans la période sans apport. Ceci permettrait de voir l'influence des mesures journalières sur la valeur de l'infiltration.

Avec cette approche on a obtenu des résultats (annexe n° 7) qui sont rassemblés dans la figure n° 232.

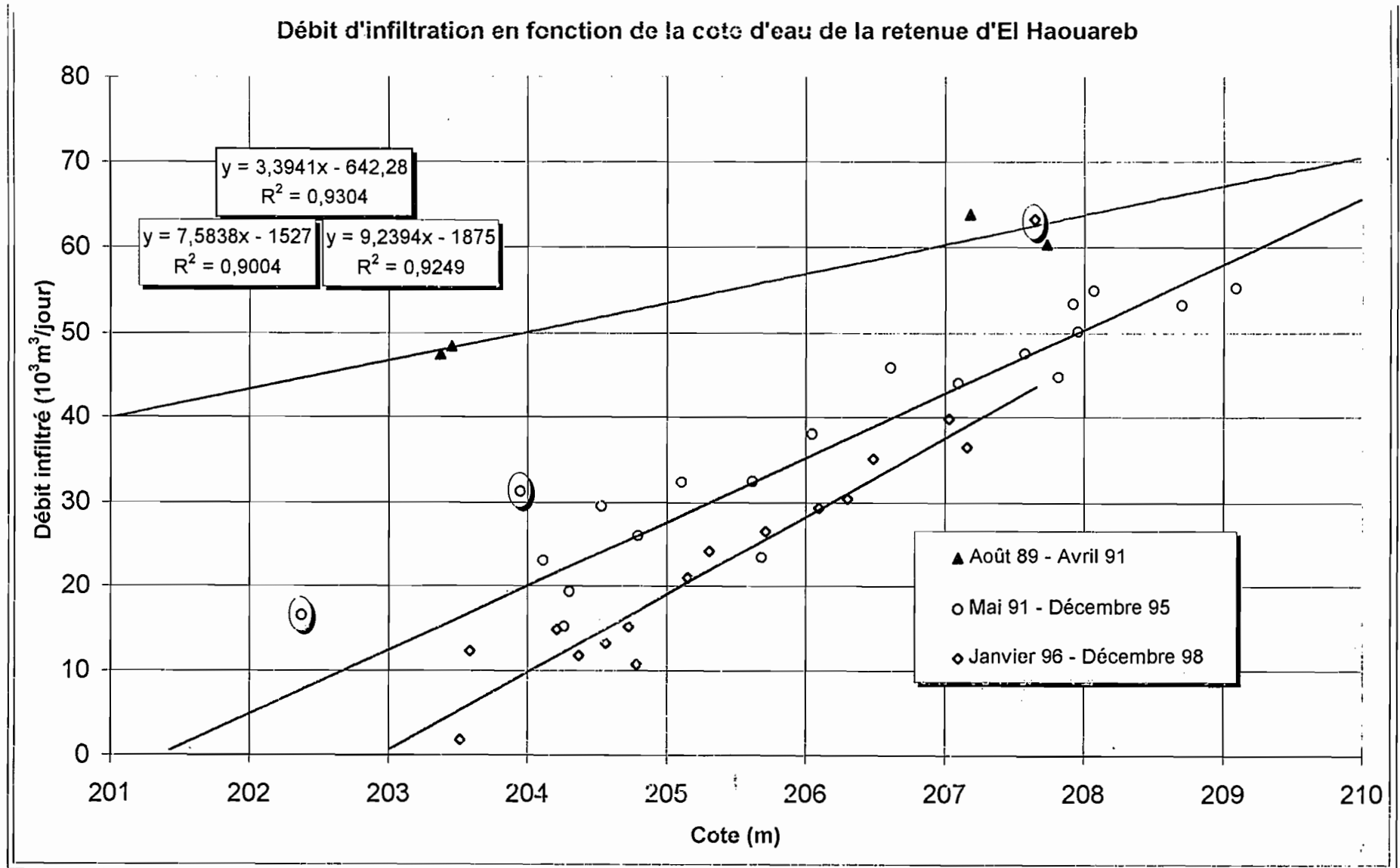


Figure n° 231 : Evolution de l'infiltration en fonction de la cote dans la retenue d'El Haouareb (sur les moyennes des périodes sans apports)

4) Comparaison et critique des résultats

Les deux méthodes aboutissent au mêmes résultats, avec un nuage plus dispersé dans la seconde (figures n° 231 et 232). Ceci implique que, malgré la pondération sur 15 jours, les erreurs dans les mesures journalières se font encore sentir. On observe dans les deux cas trois séries de points pour lesquels les valeurs d'infiltrations sont très supérieures à celles des autres périodes. Les deux premières séries correspondent à la période d'assèchement du barrage d'El Haouareb en 1994, alors que la troisième se situe entre juin et juillet 1996.

Pour les deux périodes de 1994 les valeurs importantes de l'infiltration peuvent s'expliquer par le fait que dans cette période, où les besoins en eau étaient importants à cause de la sécheresse, des prélèvements clandestins aient été effectués par les agriculteurs pour satisfaire leurs besoins en eau. Une autre explication possible est que les courbes de tarage « hauteur-volume et hauteur-surface », dont les caractéristiques varient en fonction du temps, surtout en basses eaux, sont difficiles à évaluer avec exactitude, ce qui pourrait amener à une fausse estimation de l'infiltration dans ces zones. Mais cette deuxième explication pour la période du 19 mars au 6 avril 1994 n'est pas plausible d'autant plus qu'on trouve une autre période, du 20 janvier au 9 février 1994, dont la cote est presque au même niveau mais dont l'infiltration cadre bien avec les valeurs d'autres périodes.

La troisième période qui se décale de l'allure générale des infiltrations est celle de Juin à juillet 1996. Sur une période de 15 jours on constate des variations journalières de volume très importantes de l'ordre de 100 milliers de m³/jour, qui pourrait être un indice d'une campagne de prélèvements qu'on a oublié de signaler.

Malgré ces trois lacunes, les deux méthodes utilisées aboutissent aux mêmes résultats. Les modèles obtenus sont bons et assez représentatifs des phénomènes physiques. Cependant pour le premier modèle allant de la mise en eau du barrage à Avril 1991, il est à signaler un nuage de point qui n'est constitué que de quatre périodes sans apports et dont les données d'évaporations ont dû être reconstituées puisque le bac d'évaporation n'a été installé que bien plus tard. En fait c'est une période très humide, d'où la rareté des périodes sans apports, qui correspond à la phase de stabilisation du barrage : dépôt des premiers sédiments et stabilisation des régimes hydrauliques d'échanges entre les nappes et la retenue d'El Haouareb.

Dans le cas de la deuxième méthode la pondération sur quinze jours ne dissipe pas totalement la dispersion du nuage de points (annexe n° 7). En effet d'un jour au lendemain il arrive de constater une variation de l'infiltration assez importante, preuve que l'imprécision dans certaines mesures journalières se fait encore sentir.

Ces trois courbes d'infiltration montrent aussi l'évolution du phénomène de colmatage du barrage d'El Haouareb qui se manifeste dans les premières années de vie du barrage. Elles montrent la diminution de l'infiltration en fonction du temps et de la cote, et convergent dans les hautes eaux presque vers les mêmes valeurs.

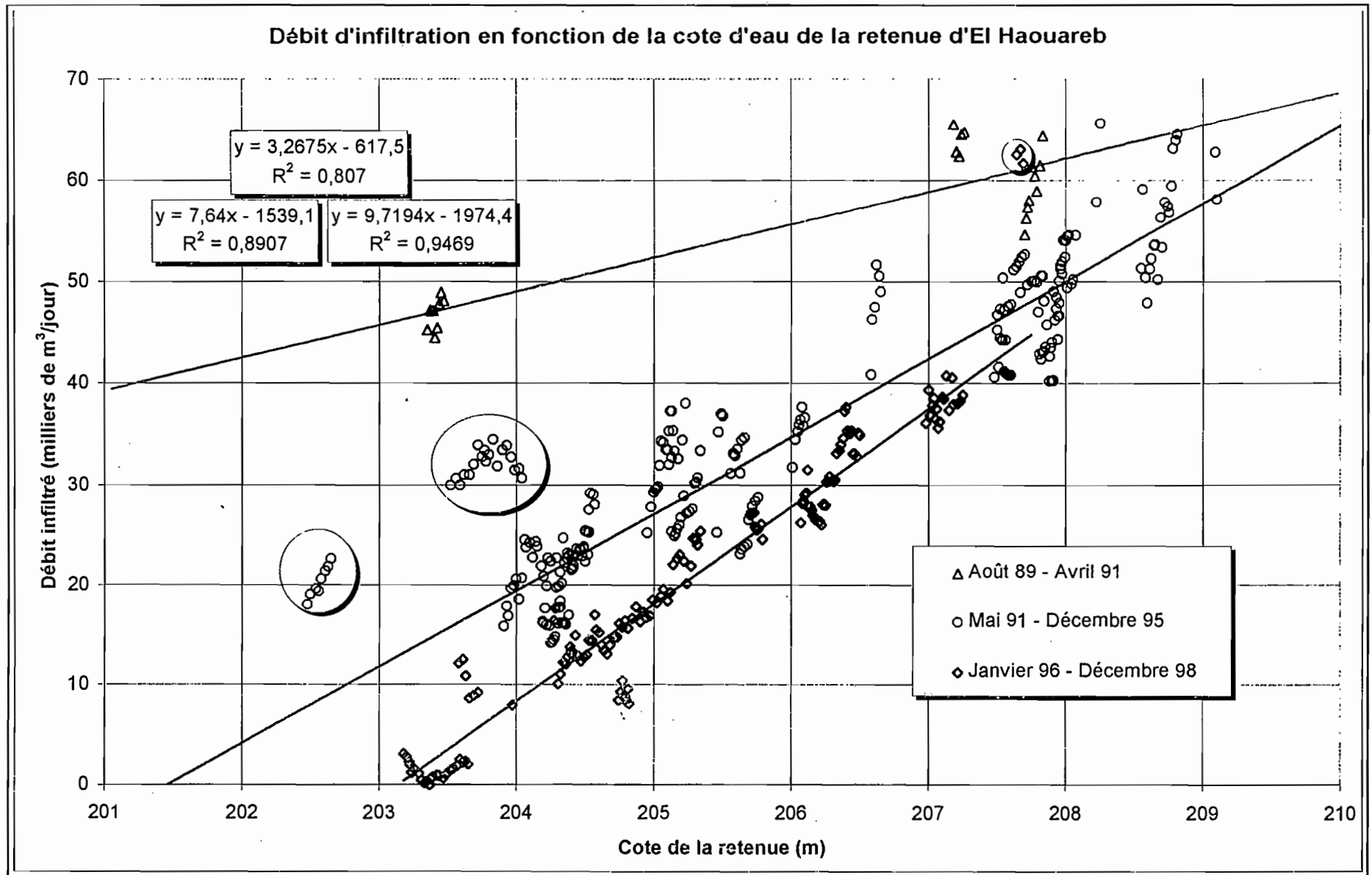


Figure n° 232 : Evolution de l'infiltration en fonction de la cote dans la retenue d'El Haouareb (sur les moyennes mobiles de 15 jours)

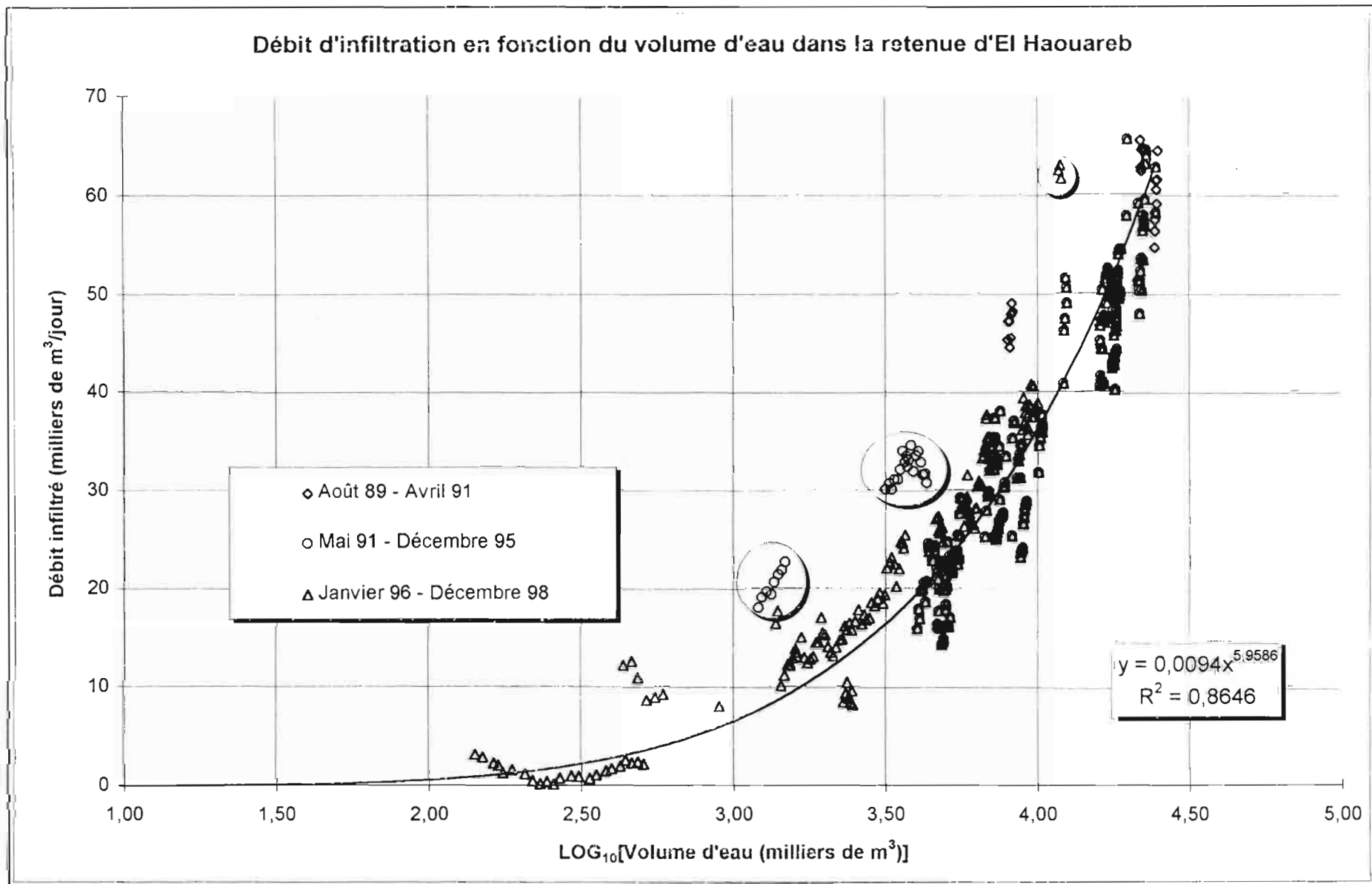


Figure n° 233 : Evolution de l'infiltration en fonction du volume d'eau dans la retenue d'El Haouareb (sur les moyennes mobiles de 15 jours)

La diminution de l'infiltration en fonction du temps pour une même cote est due aux dépôts latéraux de sédiments qui se font au fur et à mesure que les années passent. Alors que la convergence des trois courbes vers les mêmes valeurs d'infiltrations pour les hautes eaux est due au fait que dans ces zones l'infiltration latérale est de loin supérieure à la verticale qui y est d'ailleurs négligeable. Ceci fait que comme dans ces zones il n'y a pas eu de dépôt la valeur de l'infiltration est presque restée la même.

Avec ces mesures on ne peut pas, compte tenu des observations qui s'arrêtent à la cote de 210 mètres, faire les modèles définitifs de l'infiltration jusqu'à la cote des plus hautes eaux du barrage d'El Haouareb.

5) Prévision de l'infiltration à long terme

Avec ces modèles linéaires d'infiltration, il est impossible de faire la prévision de l'infiltration, étant donné que ces droites ont la pente et l'origine qui varient en fonction des sédiments déposés dans la retenue. Il faut trouver un paramètre plus facile à évaluer à partir duquel on pourrait plus tard estimer l'infiltration. Nous avons constaté que le volume, à l'instar de la hauteur d'eau dans la retenue, pouvait représenter cette donnée. Car quelque soit la hauteur d'eau dans la retenue, il est toujours possible de savoir, avec les différentes courbes de tarage qui seront déterminées plus tard, le volume dans la retenue.

La figure n° 233 nous donne la relation à partir de laquelle on peut faire la prévision des infiltrations en fonction du volume d'eau dans la retenue. A titre d'exemple à la cote de la retenue normale, où à la mise en eau le volume était estimé à 95 millions de m³, on aurait une infiltration de 134 milliers de m³ par jour.

Sur cette figure on observe les trois périodes aberrantes (deux du printemps 94 et une d'été 96) dont les valeurs se décalent de la allure générale de l'infiltration. On constate aussi que les valeurs de l'infiltration dans la période avant le colmatage de l'ouvrage (août 89 à avril 91) sont largement supérieures, sauf dans les hautes eaux où toutes les périodes se rejoignent.

Conclusion

En utilisant les données existantes, sur le barrage d'El Haouareb, nous avons essayé de modéliser l'infiltration en fonction de la cote d'eau dans cette retenue. Le modèle fait ressortir une certaine évolution de l'infiltration dans le temps; comme on peut s'y attendre, l'infiltration de la retenue diminue en fonction du temps pour la même cote. On constate que le colmatage de l'ouvrage a été surtout le fait des crues de 1991. Après cette date, l'infiltration continue à diminuer bien sûr en fonction du temps, à cote constante mais la diminution est moins importante qu'au début de la mise en eau du barrage.

En revanche, les pentes des droites d'infiltrations augmentent en fonction du temps. Ceci s'explique par les dépôts qui se repartissent de façon non uniforme dans la retenue. A l'entrée de la retenue, il se dépose les éléments les plus grossiers. Alors que les plus fins vont dans les zones les plus basses et les colmatent. De plus il est certain que les dépôts ne se font que là où il y a l'eau, comme les eaux d'El Haouareb n'ont pas dépassé 210 mètres, les dépôts ne sont demeurés que dans ses basses cotes. Ceci induit une diminution de l'infiltration plus importante dans les basses eaux, tandis que dans les hautes la diminution est moins grande.

Les régressions linéaires utilisées pour modéliser l'infiltration cadrent bien avec la loi de Darcy en régime permanent. Cependant celles-ci ne peuvent pas nous permettre de faire des prévisions de l'infiltration ni pour les mêmes hauteurs d'eau ni pour les hauteurs d'eau dans le barrage dépassant 210 mètres. C'est pourquoi il nous a semblé intéressant de faire une corrélation entre l'infiltration et le volume d'eau dans la retenue, qui nous permettrait de faire la prévision de l'infiltration.

La comparaison de ces résultats avec ceux déjà publiés montre que nos prédécesseurs ont sous estimé l'infiltration de ce site. A titre d'exemple, Moncef Smaoui (1985) trouve une infiltration de moins de 300 l/s à la cote 206.5 mètres alors que nous trouvons pour la même cote à peu près 400 l/s avec le dernier modèle (valable entre janvier 96 et décembre 98). Nasser trouve à la même cote une valeur de 375 l/s plus proche (Nasser, 1997), mais largement inférieure aux valeurs déduites des deux premiers modèles de 1989 à 1995 (660 l/s et 445 l/s).

Il est aussi important de signaler qu'étant donné que depuis sa mise en eau ce barrage n'a jamais dépassé la cote de 210 mètres, on n'a pas pu élaborer un modèle d'infiltration qui couvre toutes les cotes d'eau de la retenue d'El Haouareb.

Chapitre IV : L'élaboration du bilan en eau de surface de la retenue d'El Haouareb

Introduction

Après avoir modélisé l'infiltration du barrage d'El Haouareb, dans le chapitre précédent, à partir de l'équation (6) du premier chapitre de cette partie, on va officier le bilan de cette retenue en déterminant le dernier élément qui n'est pas encore connu qui est l'écoulement naturel de l'oued (équation (5)). A partir de cette équation, on déterminera les apports journaliers au barrage qui, en vue de leur validation, seront comparés à ceux mesurés à la station de Haffouz téléphérique. La distinction entre apports de crues et d'étiages sera faite en se basant sur l'hypothèse que les premiers induisent une variation positive de niveau d'eau dans la retenue.

Après avoir reconstitué les apports de l'oued au barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau, on fera l'inventaire de l'ensemble des éléments qui interviennent dans le bilan en eau de surface de ce lac depuis sa mise en eau jusqu'à décembre 1998.

1) Détermination des apports au barrage d'El Haouareb

L'équation de bilan de la retenue d'El Haouareb déterminée dans le premier chapitre de cette partie est suivante :

$$V_e - V_i = \Delta V + V_{ev} + V_{vi} + V_u - V_p \quad (5)$$

Les apports des oueds (V_e) au barrage d'El Haouareb, dernière inconnue de l'équation de bilan, seront calculés par l'équation (9) déduite de l'équation (5).

$$V_e = \Delta V + V_{ev} + V_{vi} + V_u + V_i - V_p \quad (9)$$

Les apports totaux ($V_e + V_p$) journaliers (apports des oueds et ceux de la pluie sur la retenue) équivalent à la somme de la variation journalière du stock du barrage (ΔV) et des sorties journalières de la retenue ($V_{ev} + V_{vi} + V_u + V_i$) (10).

$(V_e + V_p) = \Delta V + (V_{ev} + V_{vi} + V_u + V_i) \quad (10)$

L'application de cette équation (10) sur l'ensemble de la période a donné des fluctuations importantes des apports journaliers surtout dans les périodes d'étiages (figure n° 241). Ceci est dû à la précision des mesures du plan d'eau qui est de l'ordre d'un cm, à partir desquelles on calcule le volume d'eau dans la retenue.

Pour pallier ces anomalies, nous avons travaillé à l'échelle mensuelle. Nous avons donc, tout d'abord évalué les apports journaliers parvenus au barrage par l'équation (5) du bilan, puis atténué les fluctuations en faisant leurs sommes mensuelles (figure n° 242).

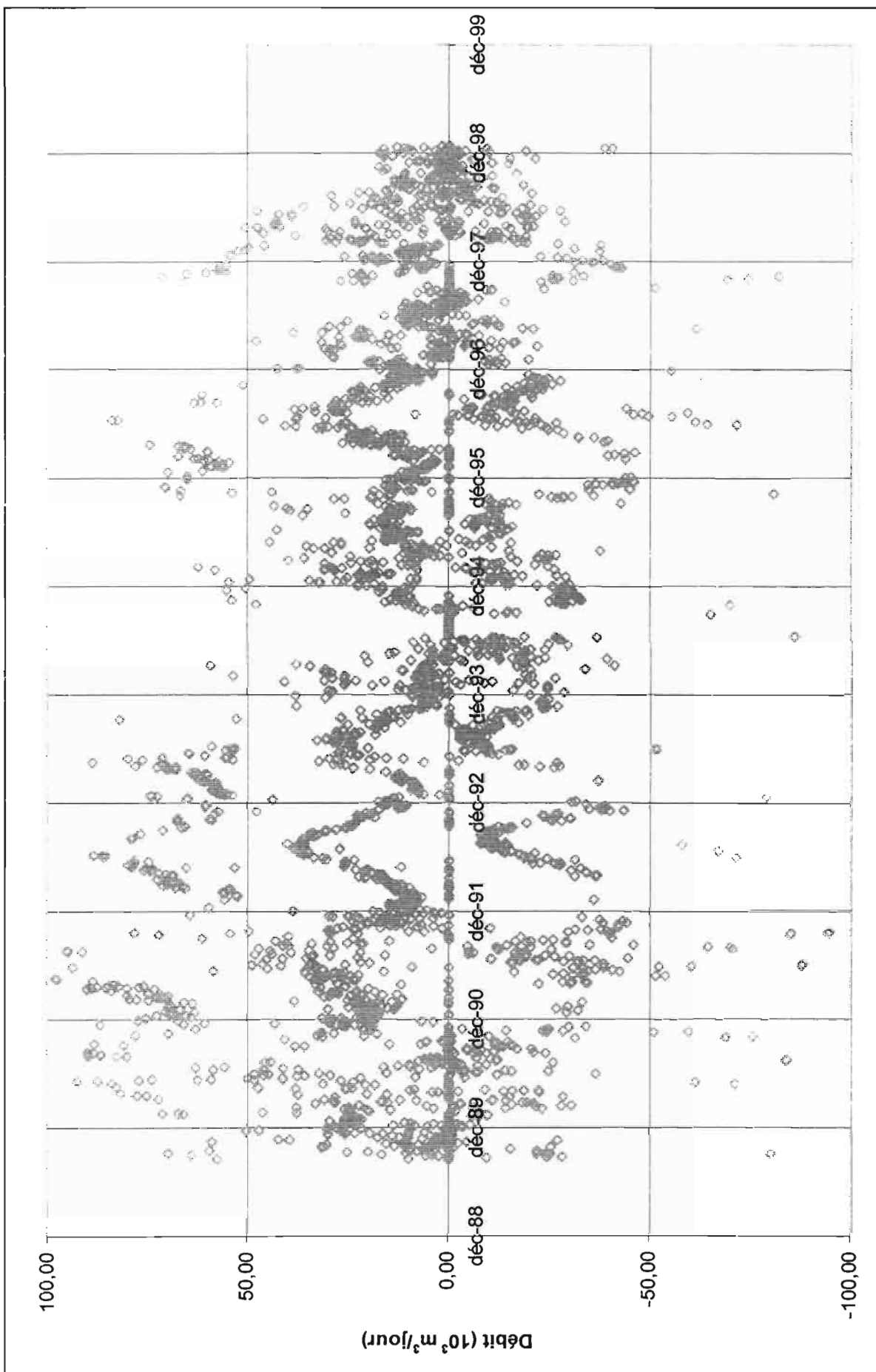


Figure n° 241 : Précision des apports journaliers d'étiages au barrage d'El Haouareb

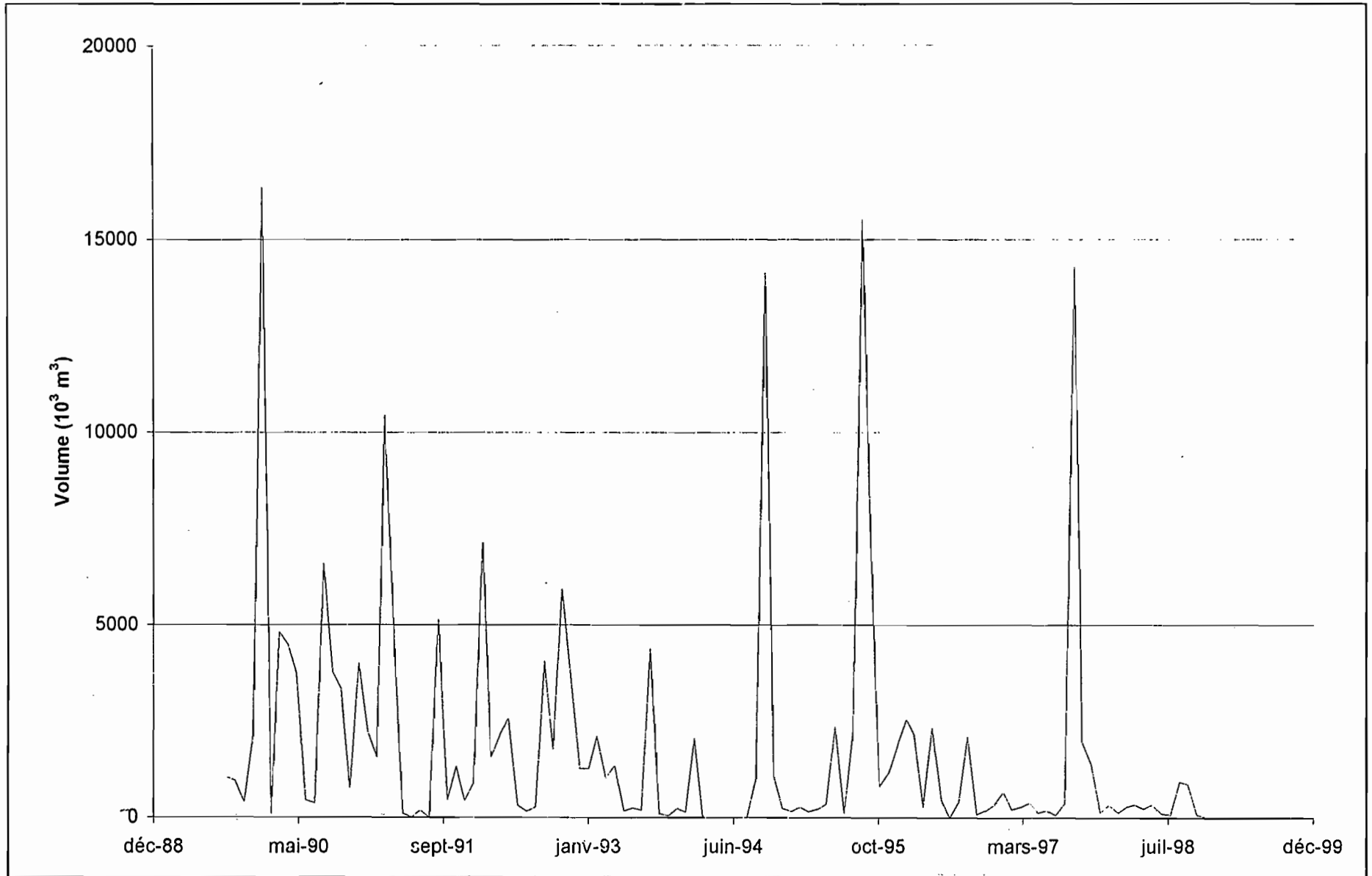


Figure n° 242 : Evolution d'apports mensuels calculés au barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'à décembre 1998

Ensuite, nous avons comparé, dans un but de validation du modèle, les apports au barrage ainsi calculés à ceux mesurés à la station de Haffouz (figure n° 243). Cette figure, qui représente les volumes calculés au barrage d'El Haouareb en fonction des ceux mesurés à Haffouz, montre bien que toutes les crues observées à cette station ont été ressenties au barrage. Ceci étant, on remarque que les apports restitués au barrage sont 1.2 fois supérieurs à ceux mesurés à la station de Haffouz. Compte tenu du rapport entre les superficies des bassins drainés à ces deux stations (1.8), ce rapport nous semble très faible. La petitesse de ce rapport peut s'expliquer par l'action conjuguée de deux facteurs : soit les erreurs des mesures qui sous-estiment les apports au barrage et surestiment les débits à Haffouz, soit que c'est la partie amont du bassin limitée à Haffouz cassis qui rapporte plus d'apport proportionnellement à sa superficie que la partie aval.

En aucun cas il n'apparaît de crue importante à Haffouz qui n'arrive pas au barrage. Par contre on mesure des apports au barrage qui ne sont pas signalés à Haffouz, ces derniers proviendraient du reste du bassin se trouvant à l'aval de cette station : soit de l'oued Zebbes, soit des oueds Ben Zitoune et Hammam (figure n° 244). Cependant la précision des mesures à cette station, dont l'instabilité est connue de tous, n'est pas très bonne. Ceci fait qu'on signale pour certains événements des volumes d'eau journaliers transitant par la station de Haffouz supérieurs à ceux ressentis au barrage d'El Haouareb (figure n° 244). C'est le cas pour les mois de septembre 1989, janvier 1990, août 1997 et septembre 1998 où on constate respectivement des différences de plus de 2, 3, 2 et 1 million de m³ d'écart (figure n° 243).

Ces erreurs de mesures s'observent d'ailleurs quand on représente le cumul des volumes observés à la station de Haffouz en fonction de celui des volumes calculés au barrage d'El Haouareb (double masse) où on constate de curieux changements de pentes (figure n° 245). En effet sur cette figure on remarque que c'est surtout dans la première période allant de la mise en eau jusqu'à avril 1992 où le cumul des apports au barrage est inférieur à celui de Haffouz.

Mise à part la précision des mesures à la station de Haffouz où le lit est instable, ceci peut être expliqué par la précision des mesures dans les premières années d'exploitation du barrage. En fait, depuis la mise en eau jusqu'à fin 1990, les mesures des données sur la barrage n'étaient pas faites les dimanches et les jours fériés. Les crues qui sont arrivés au barrage pendant ces jours ne pouvaient pas être signalés, on a dû prendre pour ces jours le plan moyen des jours qui les encadrent.

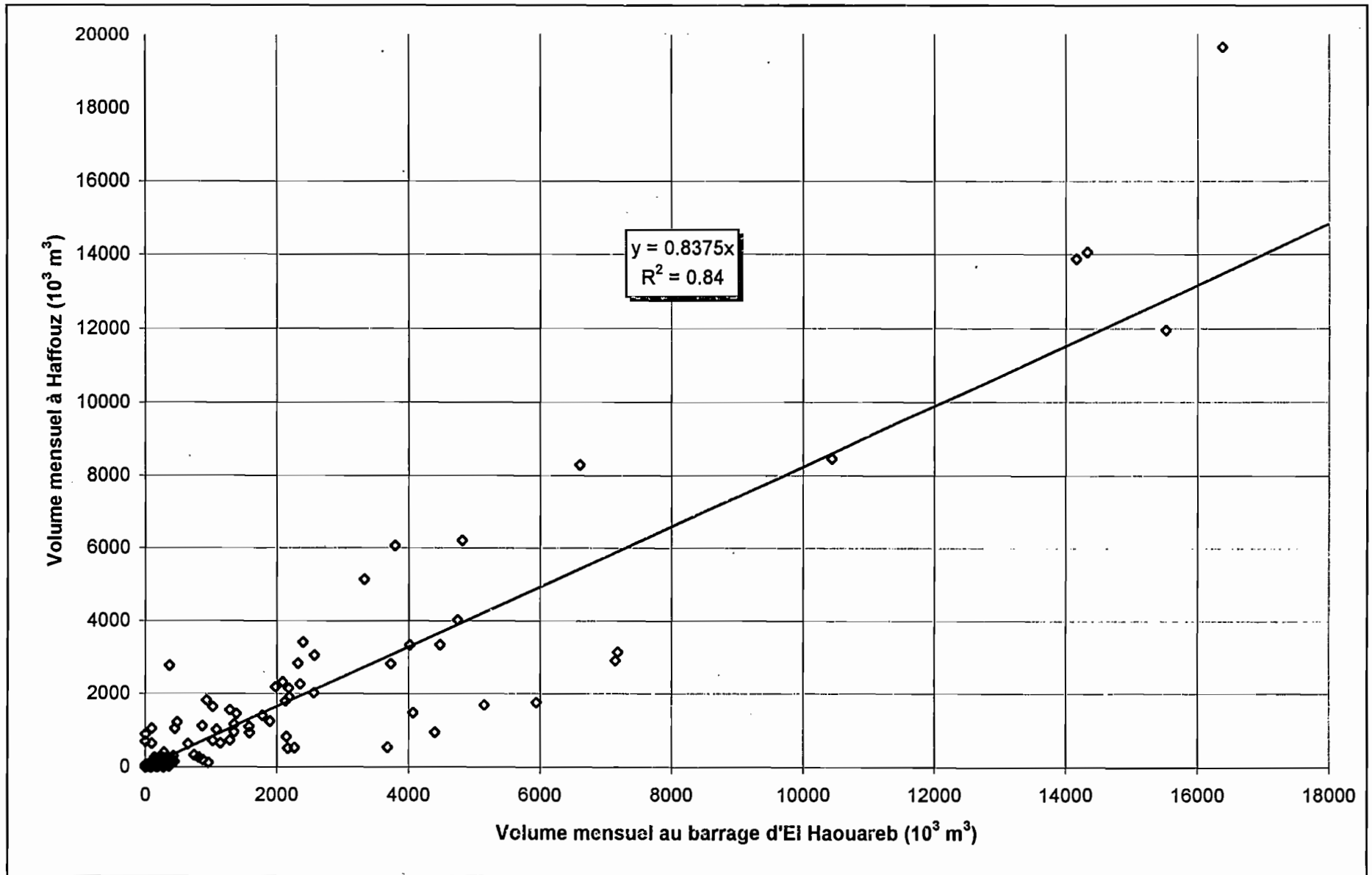


Figure n° 243 : Comparaison entre les volumes mensuels mesurés à la station de Haffouz et ceux calculés au barrage d'El Haouareb

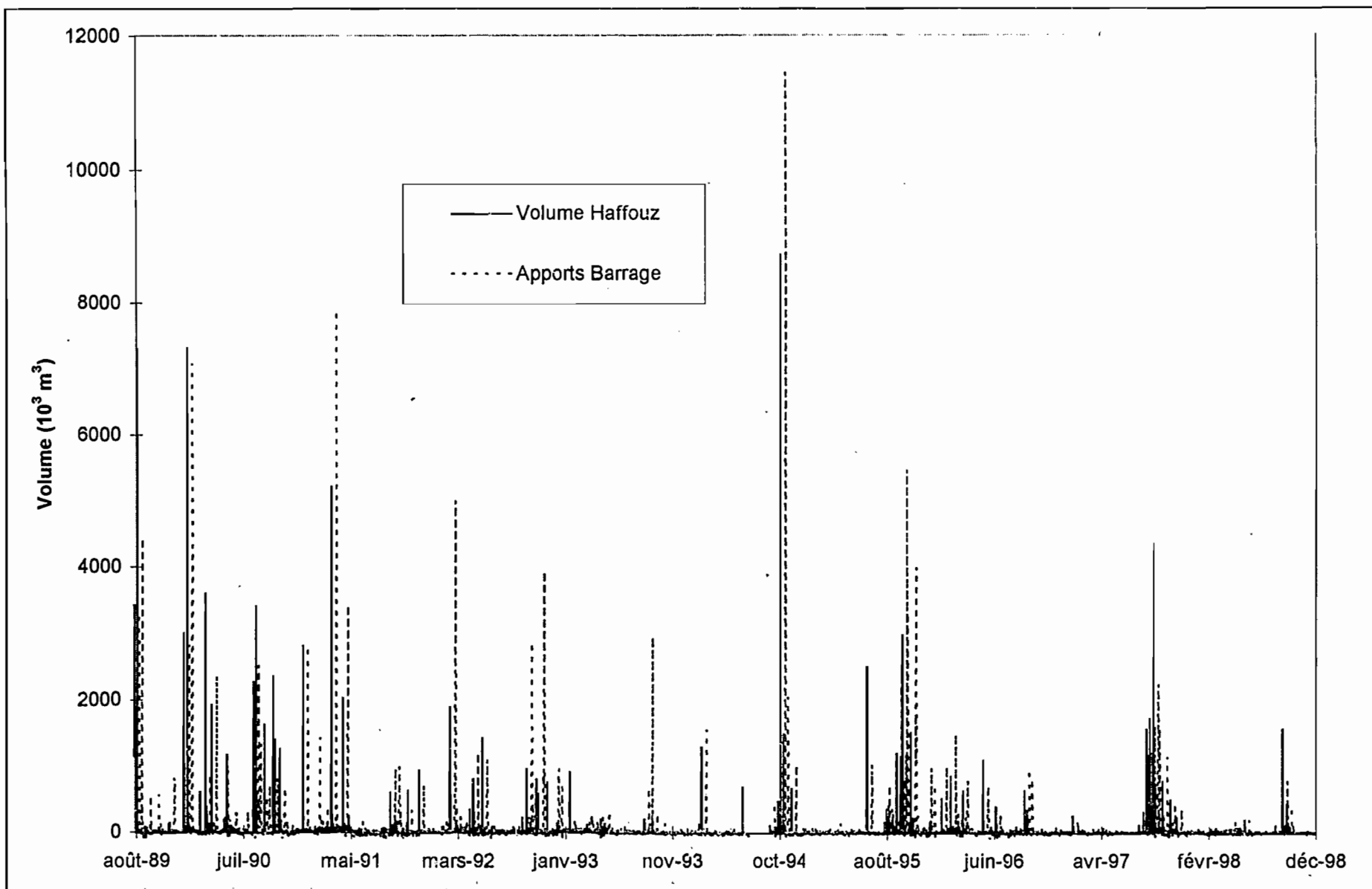


Figure n° 244 : Comparaison des volumes journaliers d'apports au barrage d'El Haouareb avec ceux mesurés à la station de Haffouz

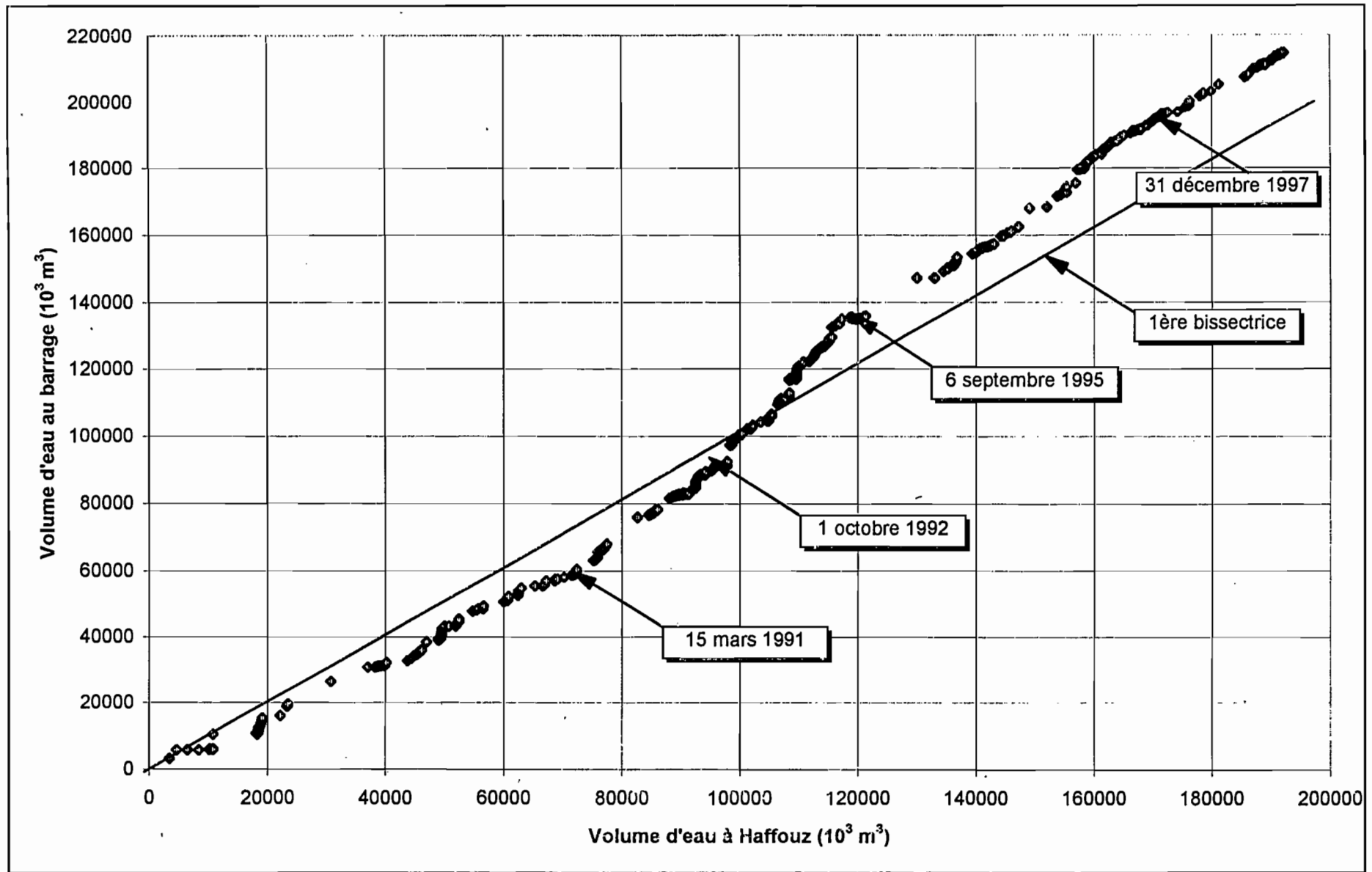


Figure n° 245 : Comparaison des volumes d'eau cumulés mesurés à la station de Haffouz avec ceux calculés au barrage d'El Haouareb

2) Bilan global du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau

Après avoir déterminé les différents éléments qui interviennent dans le bilan du barrage d'El Haouareb, il est intéressant de voir quelle est la part de chacun dans le bilan global de la période. Au 31 décembre 1998, le bilan global du barrage d'El Haouareb se chiffre comme suit (tableau n° 241) : les apports totaux au barrage 219.4 millions de m³, les sorties du barrage 206 millions de m³, et le volume restant dans la retenue est de 13.4 millions de m³ dont 0.2 million de m³ de stock d'eau (figure n° 246). Donc 13.2 millions de m³ restants constituent les apports solides parvenus au barrage d'El Haouareb depuis la mise en eau jusqu'à cette date.

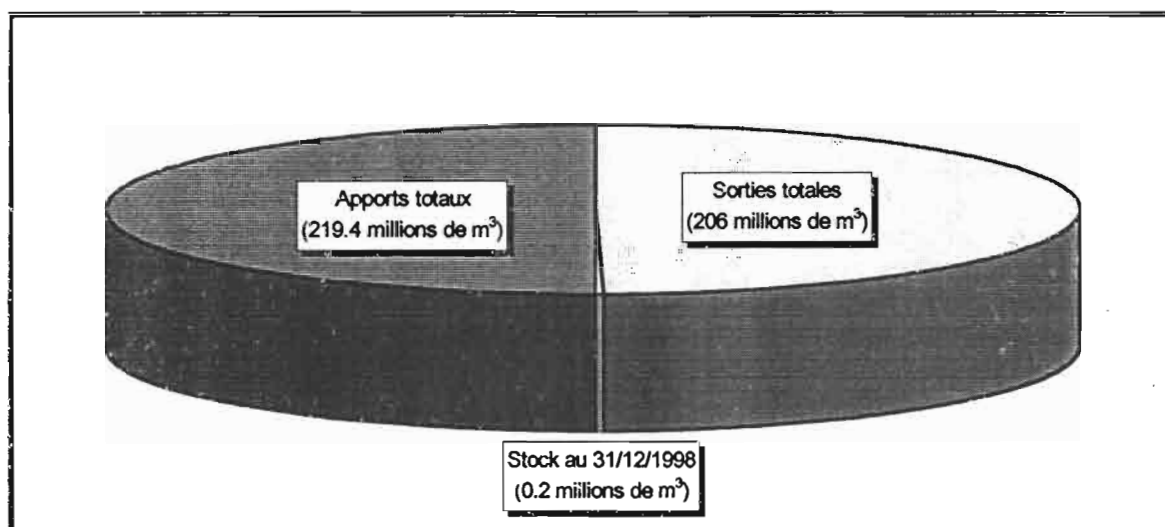


Figure n° 246 : Bilan global en eau du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'à fin 1998

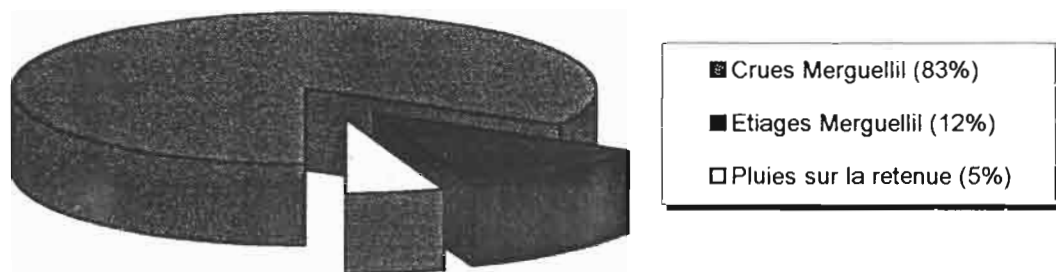
Tableau n° 241 : Bilan global du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'à fin 1998

Les apports	Quantité (millions de m ³)	Pourcentage (%)	Les sorties	Quantité (millions de m ³)	Pourcentage (%)
Les pluies	11.9	5	L'évaporation	50.8	25
Les crues	182.4	83	Les pompages	12.7	6
Les étiages	25.1	12	Les Lâchers	12.8	6
			Les infiltrations	129.7	63
Totaux	219.4	100	Totaux	206.0	100

Parmi ces apports au barrage, 5 % proviennent de la pluie, 12 % des étiages et 83 % des crues (figure n° 247). Ces apports d'étiages font un débit moyen fictif de 93 l/s. Il faut cependant reconnaître qu'il nous est très difficile de séparer les parts des crues de celles des étiages. En effet l'hypothèse utilisée pour différencier les crues des étiages n'est pas hydrologique. Nous supposons que quand la différence de niveau mesurée au barrage d'El Haouareb est positive ($\Delta H > 0$) les apports calculés sont issus des crues, dans la cas contraire ($\Delta H \leq 0$) ce sont des apports d'étiages.

Concernant les sorties, les pertes non contrôlées que constituent l'infiltration et l'évaporation constituent la quasi totalité des sorties (88 %), alors que les utilisations (lâchures et pompages) ne constituent que 12 % des sorties du barrage d'El Haouareb (figure n° 247).

Répartition des apports au barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'en décembre 1998



Répartition des sorties du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau jusqu'en décembre 1998

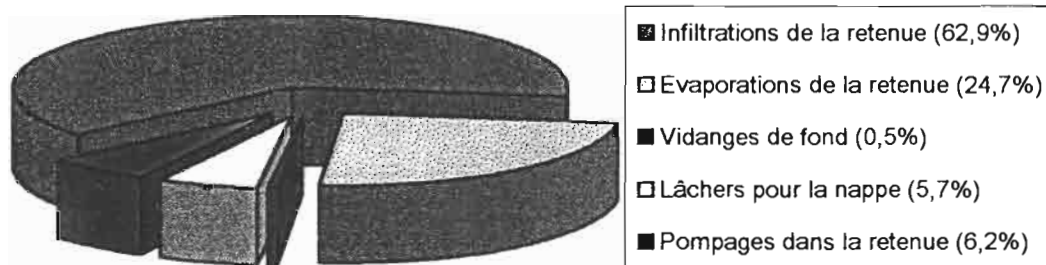


Figure n° 247 : Parts des éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb

3) Bilan détaillé du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau

Après le bilan global arrêté le 31 décembre 1998, un bilan plus détaillé à l'échelle mensuelle, dont les résultats sont présentés en annexe n° 8, a été fait. Les valeurs moyennes mensuelles des apports, représentées dans la figure n° 248, montre que les plus gros apports arrivent au barrage au mois de septembre avec plus de 5 millions de m³, tandis que juillet constitue le mois le moins riche en apports avec moins d'un million de m³.

Depuis sa mise en eau jusqu'à décembre 1998, le barrage d'El Haouareb a connu deux périodes de sécheresse et deux périodes riches en apports (Figure n° 249). Les périodes riches en apports correspondent aux années hydrologiques : 1989/1990, 1990/1991, 1994/1995, et 1995/1996 ; les autres années sont moins riches en apports avec 1993/1994 et 1996/1997 comme les années les plus sèches qui correspondent d'ailleurs à l'assèchement de la retenue. Les plus gros apports annuels jamais enregistrés sur ce barrage, plus de 40 millions de m³, correspondent à l'année hydrologique 1989/1990 qui est présentée comme une année exceptionnelle dans l'historique récent de la pluviométrie de la région.

L'évolution du niveau d'eau dans la retenue d'El Haouareb ainsi que les apports issus directs de la pluviométrie correspondent bien à cette fluctuation d'apports. La pluviométrie annuelle observée à la station du barrage d'El Haouareb montre aussi les mêmes fluctuations (tableau n° 242).

Les apports d'étiages calculés à partir de l'équation de continuité, faute de pouvoir les calculer à l'entrée du barrage, sont estimés en moyenne à 93 l/s. Ils sont inférieurs à ceux calculés dans la monographie (200 l/s) à Sidi Boujdaria (Bouzaiane et Lafforgue, 1986), mais il semble que l'évolution des prélèvements le long de l'oued Merguellil, la baisse de niveau des nappes amont (Bou Hafna et Haffouz) favorisent cette décroissance. D'autre part, les deux périodes sèches enregistrées depuis la mise en eau du barrage et la moyenne de 74 l/s calculée sur les débits d'étiage mesurés à Sidi Boujdaria dans les années 80 confirment cette évolution.

Les sorties de la retenue d'El Haouareb sont à 63 % dues à l'infiltration qui est en première approximation proportionnelle au niveau d'eau dans la retenue. Cette proportionnalité s'observe sur la figure n° 2410, avec des plus fortes valeurs (allant au delà de 20 millions de m³ par an) d'infiltration entre 1989 et 1991, qui correspond à la période de colmatage de ce barrage. Les évaporations sont aussi en partie fonction du niveau dans la retenue avec près de 8 millions de m³, comme la plus forte perte par évaporation annuelle du barrage d'El Haouareb (figure n° 2410) en 1990/1991.

Les plus grosses lâchures (8 millions de m³) ont été effectuées en 1992/1993, période pendant laquelle on a procédé à de lâchers expérimentaux pour étudier l'infiltration maximale dans le lit de l'oued Merguellil.

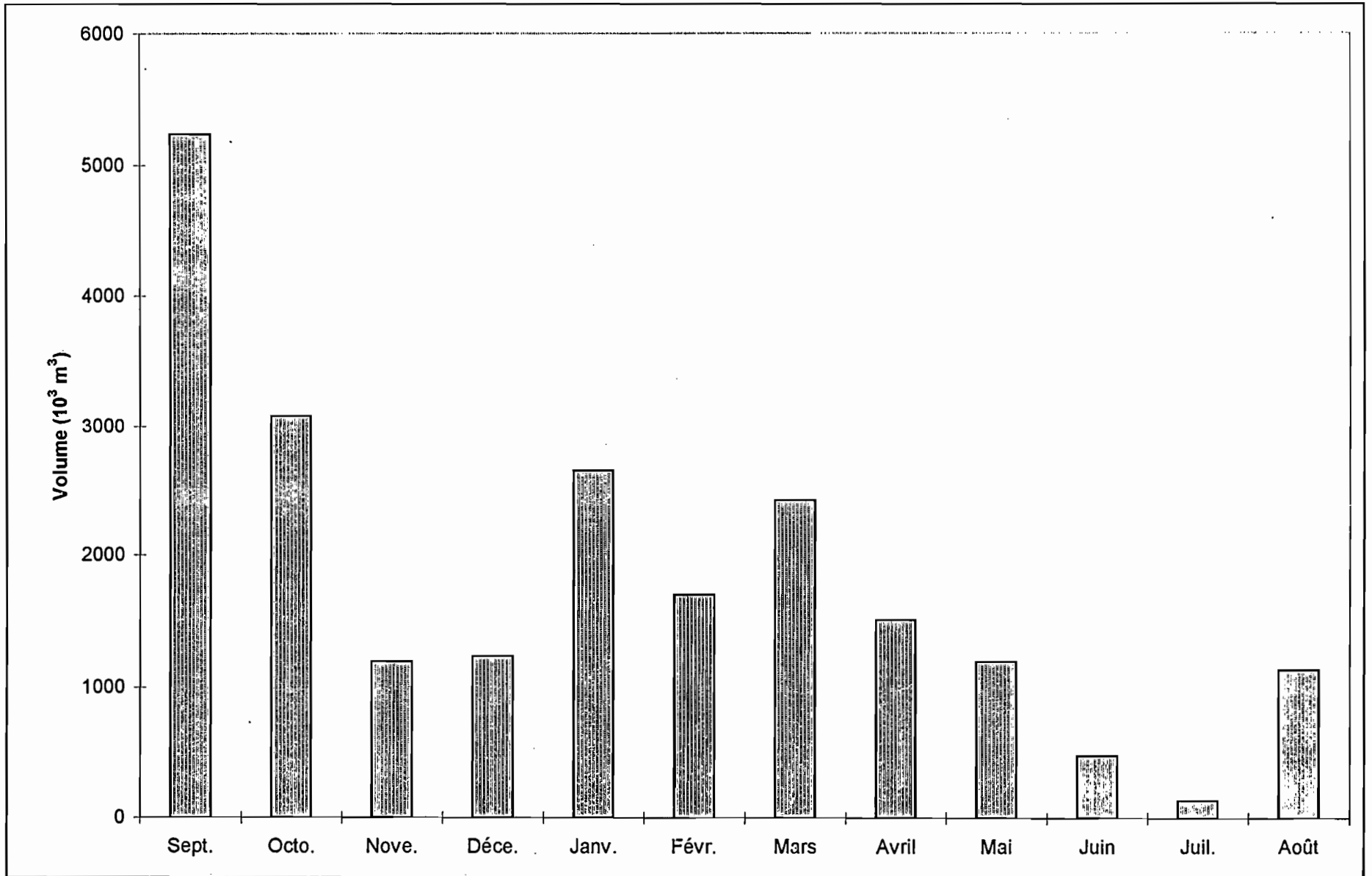


Figure n° 248 : Répartition annuelle des apports moyens mensuels au barrage d'El haouareb depuis sa mise en eau jusqu'à décembre 1998

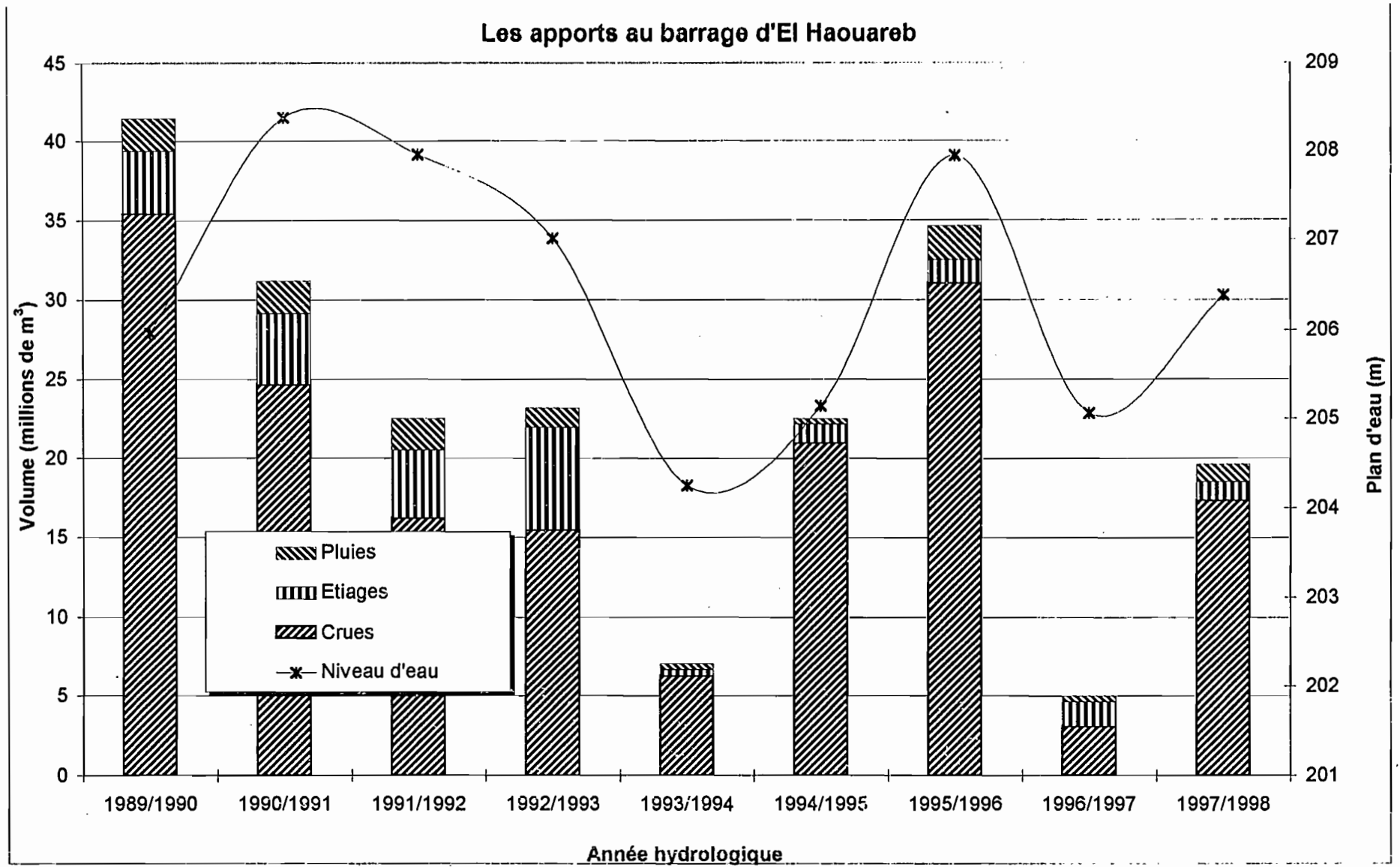


Figure n° 249 : Evolution des apports au barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau

Les pompages sont fonction de la demande en eau qui est à son tour croissante dans le temps. Le plus gros volume pompé dans le barrage d'El Haouareb a été enregistré pendant l'année 1997/1998 (figure n° 2410). Les pompages sont aussi inversement proportionnels à la pluviométrie sur la région. Plus la quantité de pluies et le nombre d'événements pluvieux sont importants on prélève davantage moins d'eau dans la retenue. Ceci se constate pendant l'année hydrologique 1995/1996 qui est assez humide et où une baisse significative du volume pompé du barrage d'El Haouareb est enregistrée par rapport aux autres années (figure n° 2410).

Tableau n° 242 : Contribution des différents éléments du bilan annuel de la retenue d'El Haouareb

LES APPORTS AU BARRAGE D'EL HAOUAREB						
Année hydrologique	Crues (milliers de m ³)	Etiages (milliers de m ³)	Pluies directes (milliers de m ³)	Apports totaux (milliers de m ³)	Pluie annuel. (mm)	
1989/1990	35463	3899	2098	41460	573	
1990/1991	24636	4471	2049	31186	380	
1991/1992	16229	4288	1943	22460	385	
1992/1993	15501	6434	1186	23122	246	
1993/1994	6291	368	393	7051	153	
1994/1995	20976	1146	342	22464	162	
1995/1996	31044	1420	2177	34642	430	
1996/1997	3113	1514	374	5001	133	
1997/1998	17333	1193	1126	19652	344	
Total	170617	24734	11687	207038	2806	
Moyenne	18957	2748	1299	23004	312	
LES SORTIES DE LA RETENUE D'EL HAOUAREB						
Année hydrologique	Infiltration (milliers de m ³)	Evaporation (milliers de m ³)	Pompages (milliers de m ³)	Lâcher & vidange (milliers de m ³)	Total sorties (milliers de m ³)	Niveau d'eau (m)
1989/1990	20263	6112	0	208	26584	205.97
1990/1991	22064	7903	0	1404	31370	208.38
1991/1992	18184	7924	0	4	26112	207.96
1992/1993	15502	7115	0	8314	30931	207.02
1993/1994	6276	2754	3041	86	12157	204.25
1994/1995	10244	4287	2141	50	16721	205.14
1995/1996	17484	6476	709	2708	27377	207.95
1996/1997	6844	3151	2589	11	12595	205.06
1997/1998	11511	4492	3232	57	19292	206.38
Total	128372	50213	11712	12841	203140	
Moyenne	14264	5579	1301	1427	22571	206.46

Les années hydrologiques déficitaires en apports sont au nombre de quatre (1991/1992, 1992/1993, 1993/1994 et 1996/1997), parmi les cinq années restantes trois sont excédentaires (1989/1990, 1994/199 et 1995/1996) et deux égalitaires (1990/1991 et 1997/1998) (figure n° 2411). La moyenne interannuelle d'apports sur neuf ans d'existence est de 19 millions de m³ pour les crues, de 2.7 millions de m³ pour les étiages et de 1.3 millions de m³ pour les pluies tombant directement sur la retenue. Soit une moyenne d'apports globaux de 23 millions de m³. Alors que la moyenne interannuelle des sorties du barrage est de 22.6 millions de m³ dont 14 millions de m³ reviennent à l'infiltration, 6 millions de m³ à l'évaporation et 2.6 millions de m³ restant aux autres sorties pour diverses utilisations (tableau n° 242).

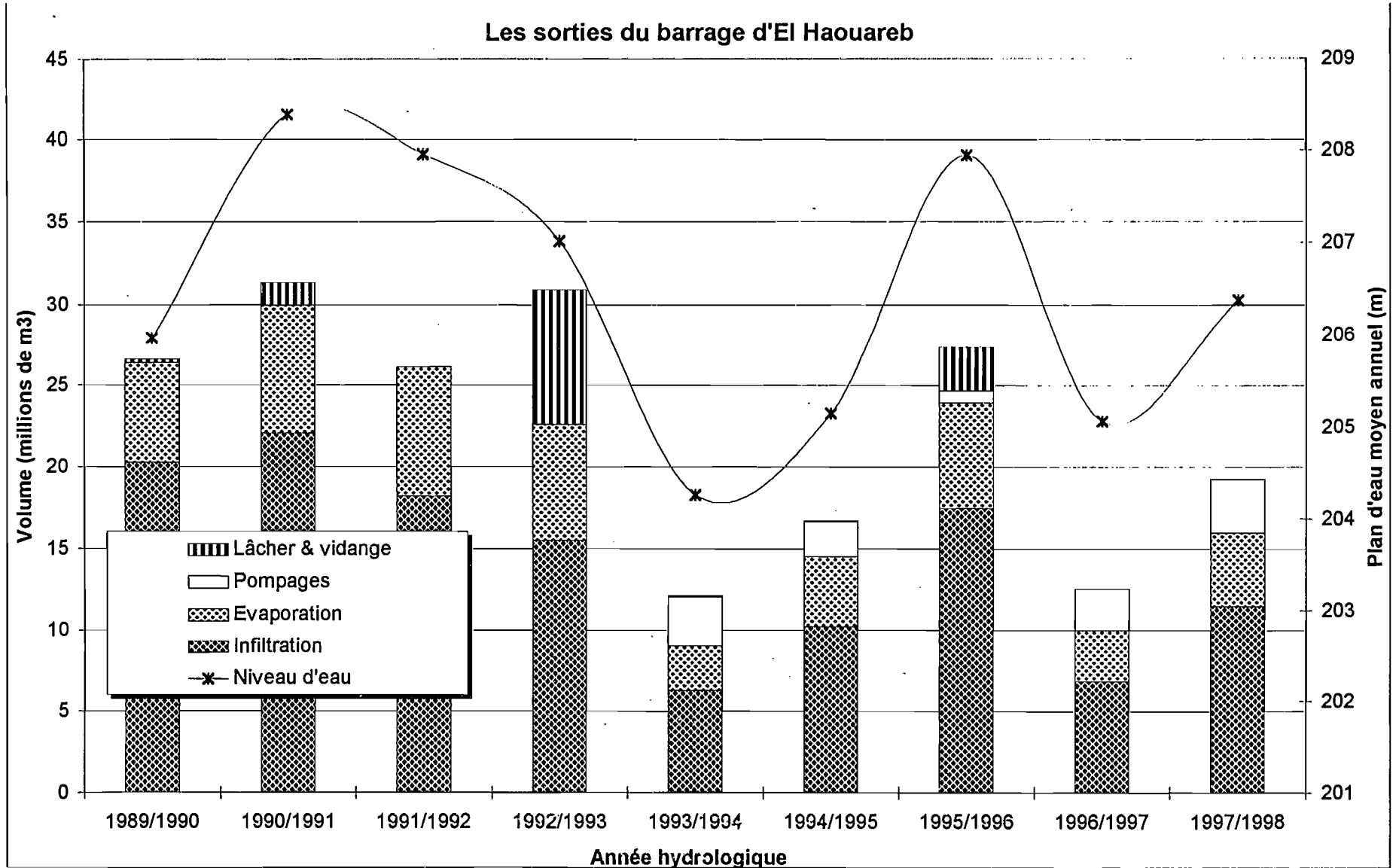


Figure n° 2410 : Evolution des sorties du barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau

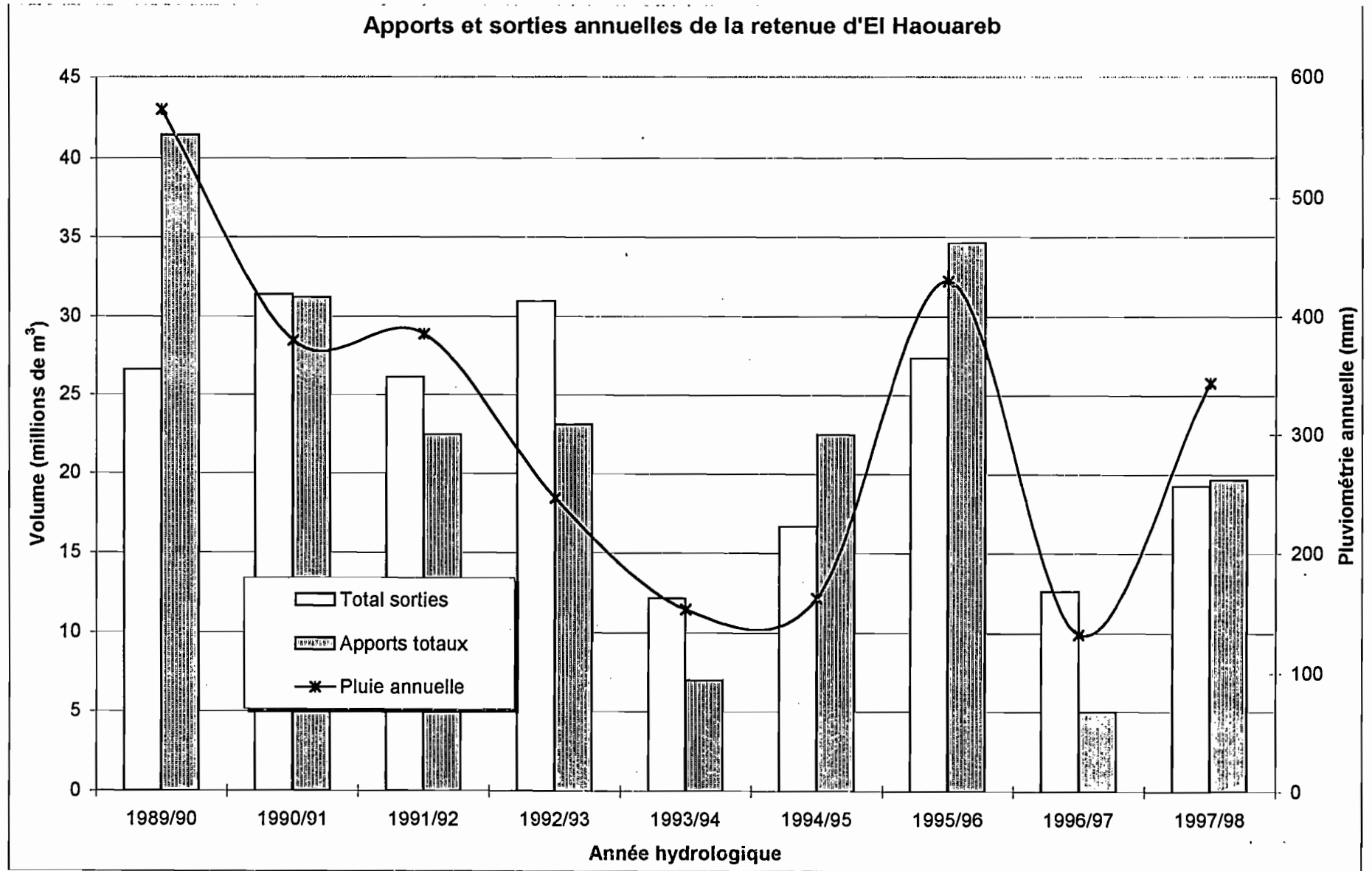


Figure n° 2411 : La comparaison des apports et sorties annuelles du barrage d'El Haouareb (1989 - 1998)

Conclusion

Le bilan de la retenue d'El Haouareb fait ressortir, pour l'ensemble de la période allant de la mise en eau à la fin de l'année 1998, les apports globaux équivalents à 219 millions de m³, parmi lesquels 12 reviennent aux précipitations directes sur le barrage, 182 aux crues et 25 millions de m³ aux étiages. Les apports moyens mensuels montrent que le mois de septembre est le plus riche en apports avec une moyenne de plus de 5 millions de m³. Alors que juillet ne rapporte en moyenne que moins de 0.2 millions de m³.

La somme des sorties de la retenue d'El Haouareb sur cette même période est égale à 206 millions de m³, avec 88 % dues aux pertes incontrôlées (évaporation et à infiltration), les 12 % restant étant distribué à l'utilisation et aux vidanges de fond. Ces chiffres confirment que les pertes d'eau non contrôlées de la retenue d'El Haouareb sont très importantes, ils sont estimés à plus de 180 millions de m³ depuis la mise en eau de ce barrage jusqu'au 31 décembre 1998.

La différence entre les apports et sorties totales sur l'ensemble de la période d'étude donne un excédent d'apport de 13.4 millions de m³ qui sont contenus dans la retenue. En soustrayant de cette valeur le stock d'eau disponible le 31 décembre 1998, on trouve une valeur de 13.2 millions de m³ d'apports solides. Cette valeur est dans le même ordre que celles produites par les deux nivellements de 1994 et 1997.

Le bilan par année hydrologique montre qu'il y a eu des fluctuations importantes d'apports au barrage d'El Haouareb. En effet ces derniers ont varié de plus de 40 millions en 1989/1990 à 5 millions de m³ d'eau en 1996/1997. Comme ça se constate dans les proportions données plus haut, ces fluctuations se rencontrent aussi bien au niveau mensuel que journalier. Deux années d'apports particulièrement importants (1989/1990 et 1995/1996) et deux autres de graves sécheresses (1993/1994 et 1996/1997) se dégagent de la série

Ce bilan montre que les pertes (évaporation et infiltration) fonction de la quantité d'eau disponible dans le réservoir, constituent l'essentiel des sorties de la retenue d'El Haouareb. Ces dernières ont subi les mêmes fluctuations dans le temps que les apports avec des valeurs moyennes annuelles qui vont de plus de 30 millions de m³ en 1990/1991 à 12 millions de m³ d'eau en 1993/1994.

La comparaison des apports et sorties fait ressortir sur l'ensemble des années hydrologiques que les apports dépassent légèrement les sorties, avec trois années hydrologiques excédentaires et quatre années déficitaires. Ceci est d'ailleurs confirmé par la moyenne annuelle des sorties sur les neuf ans qui est de 22.6 millions de m³ alors que celle des apports est de 23 millions de m³.

A la lumière de ce qui précède on confirme que les infiltrations sont très importantes sur ce barrage d'El Haouareb avec une moyenne annuelle sur l'ensemble de neuf ans de plus de 14 millions de m³, soit un débit fictif continu de plus 450 litres par seconde. Nous tenterons dans la suite d'étudier la destination de toute cette eau dans la dernière partie de cette étude plus spécialement consacrée à l'impact sur les aquifères de la création de la retenue d'El Haouareb.

Partie III :

Bilan en eau souterraine du barrage d'El Haouareb

Partie III : Bilan en eau souterraine du barrage El Haouareb

Introduction

Deux phénomènes importants sont à remarquer sur le barrage d'El Haouareb depuis sa mise en eau. D'une part il y a le phénomène de pertes très importantes qui a fait que, avec des années sèches, ce barrage ne s'est jamais rempli, et d'autre part les émergences à l'aval de l'évacuateur des crues. Pour expliquer le fonctionnement de l'ensemble de ce complexe système plusieurs études ont aient été effectuées.

Le souterrain du barrage d'El Haouareb se trouve à la confluence de plusieurs systèmes aquifères, dont les plus importants sont la nappe d'Aïn Baïdha et la nappe de la plaine de Kairouan. Un aquifère intermédiaire, se trouvant dans les calcaires turoniens du Djebel El Haouareb, a été individualisé par la D.G.R.E. (Bechir Chadly, 1990).

L'objectif de cette étude est d'essayer de comprendre le fonctionnement de tout cet ensemble souterrain qui est en relation avec la retenue d'El Haouareb pour essayer d'en dégager un bilan. Nous considérerons dans la suite de cette étude que le système souterrain d'El Haouareb est constitué par la nappe des calcaires d'El Haouareb dont les entrées et les sorties seront définies plus tard.

1) Les aquifères en relation avec le système El Haouareb

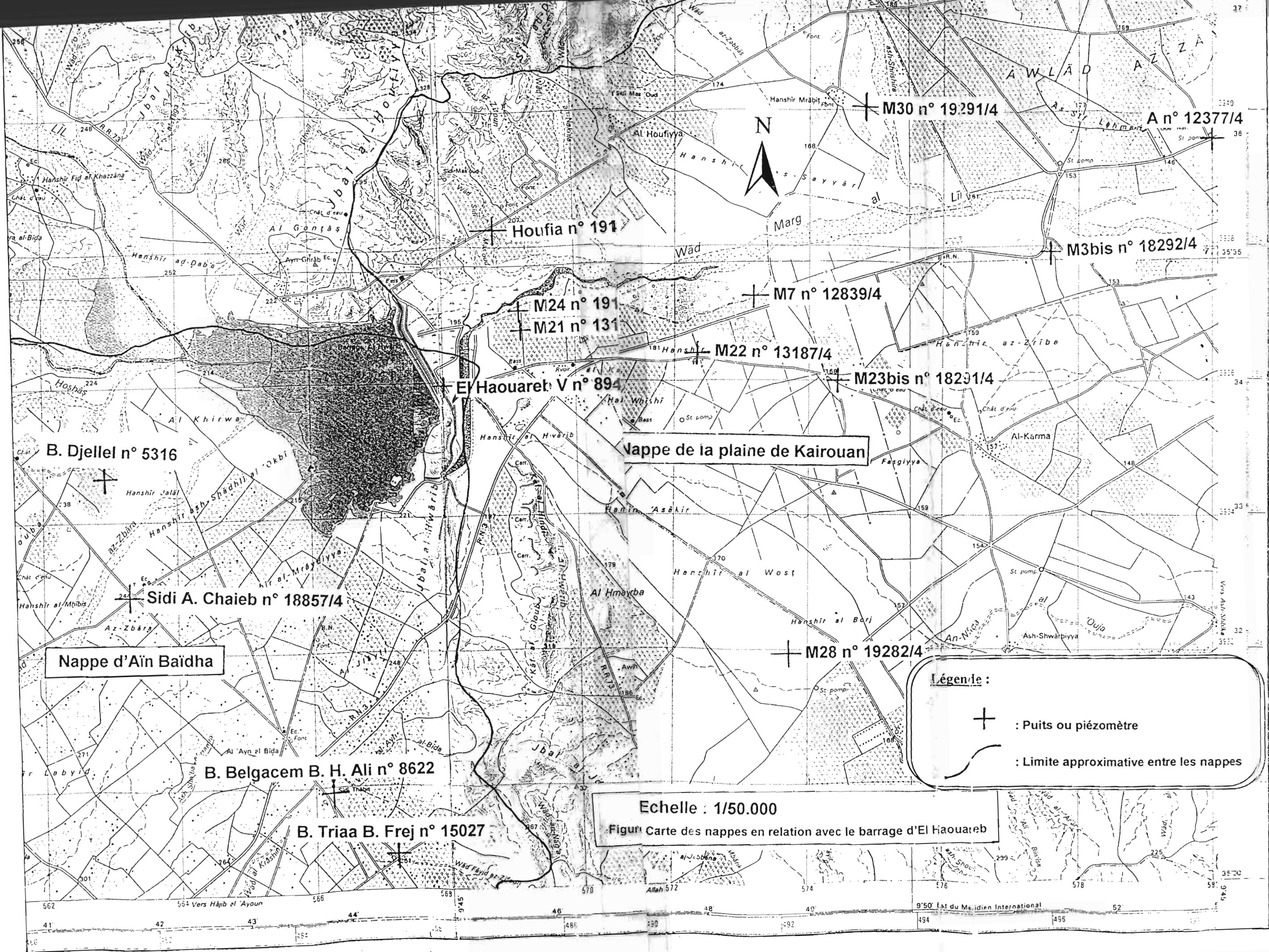
On peut distinguer dans la zone du barrage El Haouareb, d'amont vers l'aval, trois systèmes aquifères : le synclinal d'Aïn Baïdha, les calcaires du Djebel El Haouareb, et la plaine de Kairouan (figure n° 311).

a) Le système aquifère du synclinal d'Aïn Baïdha

Le système aquifère du synclinal d'Aïn Baïdha se trouve à l'amont du barrage d'El Haouareb dans la cuvette d'Aïn Baïdha. Cette dernière est un synclinal régulier plus large au sud et au niveau de Hir Khretatfa, il se rétrécit et ne fait plus que 2.5 kilomètres à Foundouk El Ousfane. L'axe du synclinal se relève vers le nord à cause du dôme jurassique du Djebel El Haouareb. La cuvette se referme au sud au niveau d'El Gmaar et communique au nord avec le synclinal de l'oued Ben Zitoune au niveau d'El Kretoua.

Cette structure renferme trois réservoirs identifiés, différenciés par leur constitution litho-stratigraphique dont la coupe Est-Ouest est présentée dans la figure n° 312. Ces réservoirs sont (Bechir Chadly, 1992b):



- Les *grès de l'oligocène supérieur* qui recèlent une nappe profonde reconnue par forage. Ces grès, dont l'eau est d'excellente qualité, sont réduits en affleurements et prennent une extension plus étendue en profondeur.



Nappe de la plaine de Kairouan

Nappe d'Ain Baïdha

Légende :

-  : Puits ou piézomètre
-  : Limite approximative entre les nappes

Echelle : 1/50.000
Figure Carte des nappes en relation avec le barrage d'El Haouareb

562 564 Vers Hâjib el 'Ayoun 566 568 570 Allah 572 574 576 578 580 582 584 586 588 590 592 594 596 598 600 602 604 606 608 610 612 614 616 618 620 622 624 626 628 630 632 634 636 638 640 642 644 646 648 650 652 654 656 658 660 662 664 666 668 670 672 674 676 678 680 682 684 686 688 690 692 694 696 698 700 702 704 706 708 710 712 714 716 718 720 722 724 726 728 730 732 734 736 738 740 742 744 746 748 750 752 754 756 758 760 762 764 766 768 770 772 774 776 778 780 782 784 786 788 790 792 794 796 798 800 802 804 806 808 810 812 814 816 818 820 822 824 826 828 830 832 834 836 838 840 842 844 846 848 850 852 854 856 858 860 862 864 866 868 870 872 874 876 878 880 882 884 886 888 890 892 894 896 898 900 902 904 906 908 910 912 914 916 918 920 922 924 926 928 930 932 934 936 938 940 942 944 946 948 950 952 954 956 958 960 962 964 966 968 970 972 974 976 978 980 982 984 986 988 990 992 994 996 998 1000

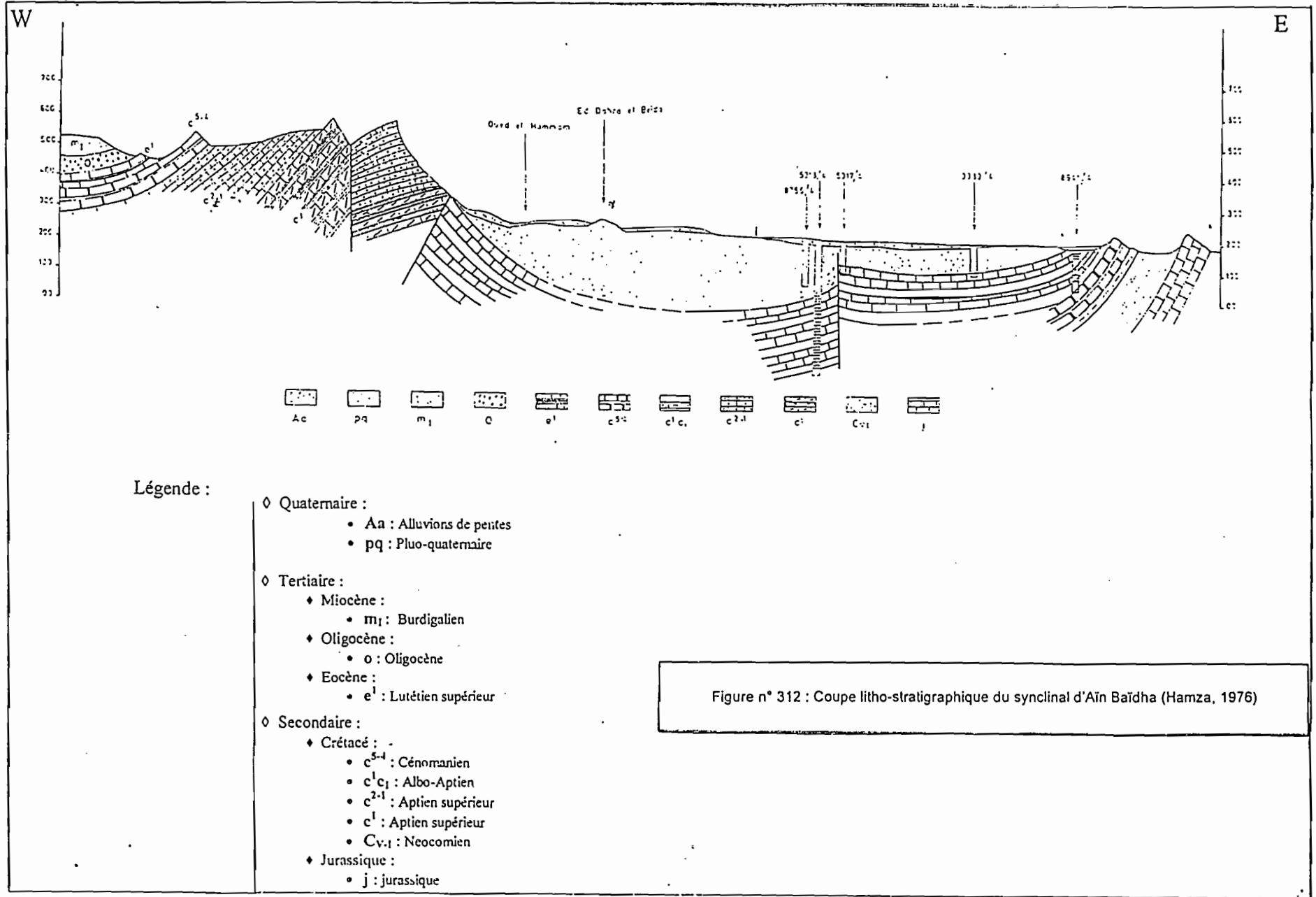


Figure n° 312 : Coupe litho-stratigraphique du synclinal d'Aïn Baïdha (Hamza, 1976)

- L'*aquifère sableux du miocène inférieur* qui est très étendu. Il est à surface libre au Sud et en charge vers le Nord. Cet aquifère communique avec les épontes perméables notamment l'oligocène.
- Le *quaternaire* comprend une nappe phréatique qui s'étend sur 200 km². Il est essentiellement formé de sables, de graviers, de galets et de minces passages d'argiles.

L'alimentation de ce système est faite à partir des précipitations sur les piémonts et à partir des eaux des crues d'oueds Ben Zitoune et Hammam. Tandis que l'un de ses principaux exutoires est l'aquifère calcaire du Djebel El Haouareb qui sert de tampon avant la grande nappe de la plaine de Kairouan.

b) L'aquifère calcaire du Djebel El Haouareb

La terminaison periclinale de la chaîne Nara-Touila que constitue le Djebel El Haouareb se présente sous forme d'un anticlinal dissymétrique à coeur jurassique. La formation aquifère se trouvant à cet endroit est formé essentiellement de bancs de calcaire blanc d'épaisseur très réduite avec passages de marnes grises et intercalations marno-calcaires.

A l'origine cet aquifère était supposé compris dans celui d'Aïn Baïdha. Son individualisation a été pour la première fois énoncée par Bechir Chadly (1992a) à la suite d'une étude de la piézométrie de la zone, de la nature chimique de ses eaux, et de sa corrélation litho-stratigraphique.

L'alimentation de cet aquifère est assuré par la nappe d'Aïn Baïdha et l'infiltration du barrage d'El Haouareb. Part ailleurs les calcaires sous le recouvrement plio-quaternaire subissent un effondrement sous l'effet d'une faille supposée et un seuil hydraulique semble présent, avec le niveau d'eau qui subit une chute de près de 40 mètres, passant de -14.5 mètres au piézomètre El Haouareb V (N° I.R.H: 8941/4) à -52.5 mètres au piézomètre M21(N° I.R.H: 13188/4) (Béchir Chadly, 1992b).

L'exutoire de ce système est constitué par la nappe de la plaine de Kairouan qui est alimentée de trois manières : l'alimentation en profondeur à travers les fissures des calcaires, l'alimentation par le déversement au dessus du seuil hydraulique, l'alimentation par les émergences à l'aval de l'évacuateur des crues.

c) L'aquifère de la plaine de Kairouan

La plaine de Kairouan est une vaste cuvette d'effondrement comblée par des dépôts détritiques continentaux d'âge plio-quaternaire. Elle est limitée à l'ouest par une série de reliefs, datant du secondaire au tertiaire, se succédant du Nord au Sud qui sont les Djebels Batène, Chérichira, El Haouareb, Draa Affane, Chérahil, et Khechem.

Ce réservoir, constitué de sables plus ou moins grossiers et d'argiles sur plus de 500 mètres d'épaisseur, est formé d'une multitude d'horizons aquifères séparés par des couches semi-perméables (Chaieb, 1988).

La nappe phréatique représente une continuité relativement bonne sur l'ensemble du domaine. La nappe profonde de 50 à 100 mètres d'épaisseur est située à une profondeur allant de 100 à 400 mètres, ce qui la distingue bien de la nappe phréatique, sauf au débouché du Merguellil où les deux aquifères se confondent.

L'alimentation actuelle de cette nappe se fait par le biais des lâchures des barrages Sidi Saad et El Haouareb, de l'aquifère amont des calcaires du Djebel El Haouareb, des apports de l'oued Chérichira, des infiltrations aux piémonts des reliefs, et des infiltrations directes sur la plaine lors des précipitations importantes.

Un système de Sebkhass, dont les plus importants sont Sidi El Hani et Kelbia, constitue le principal exutoire naturel de cette nappe.

2) L'analyse piézométrique des nappes de la zone d'El Haouareb

L'analyse de la piézométrie sera réalisée par système aquifère. L'ensemble de la nappe d'Aïn Baïdha est observé actuellement par quatorze puits et quatre piézomètres (D.G.R.E., 1997). Dans cette étude nous ne considérerons que les points d'observation situés à proximité de la retenue d'El Haouareb, soit quatre points d'observation pour cette nappe (tableau n° 311).

Pour la nappe des calcaires d'El Haouareb, le suivi est assuré par un seul piézomètre El Haouareb V, alors que pour la nappe de Kairouan on ne considérera que douze points d'observation (tableau n° 311) situés dans la partie d'influence de l'oued Merguellil.

a) La nappe amont d'Aïn Baïdha

La première étude sur la nappe d'Aïn Baïdha a été menée par Hamza (1976). L'étude piézométrique a montré que cette nappe alimente celle de Kairouan à travers le seuil d'El Haouareb. En effet, on constate sur la carte de la piézométrie que l'écoulement de la nappe converge vers le verrou d'El Haouareb au delà duquel il se déverse dans la nappe de la plaine de Kairouan (figure n° 313). Hamza a estimé le débit qui se jette dans l'aquifère aval à 82.3 l/s alors que d'après les jaugeages différentiels des années 1970-1971 et 1971-1972 un débit de 110 l/s a été estimé sortir de la nappe par l'oued Merguellil à Aïn Ghorab (Hamza, 1976).

Pour cette nappe on a choisi trois puits et un piézomètre qui sont situés à proximité de la retenue d'El Haouareb. Notre objectif était de voir l'impact de la mise en place de la retenue d'El Haouareb sur la nappe d'Aïn Baïdha. Même si la fréquence des mesures laisse à désirer à cause d'une longue période de lacune, on constate une certaine remontée piézométrique sous l'effet du remplissage de la retenue (figure n° 314) à partir de l'année 1990, surtout au niveau du puits Bir Djellel.

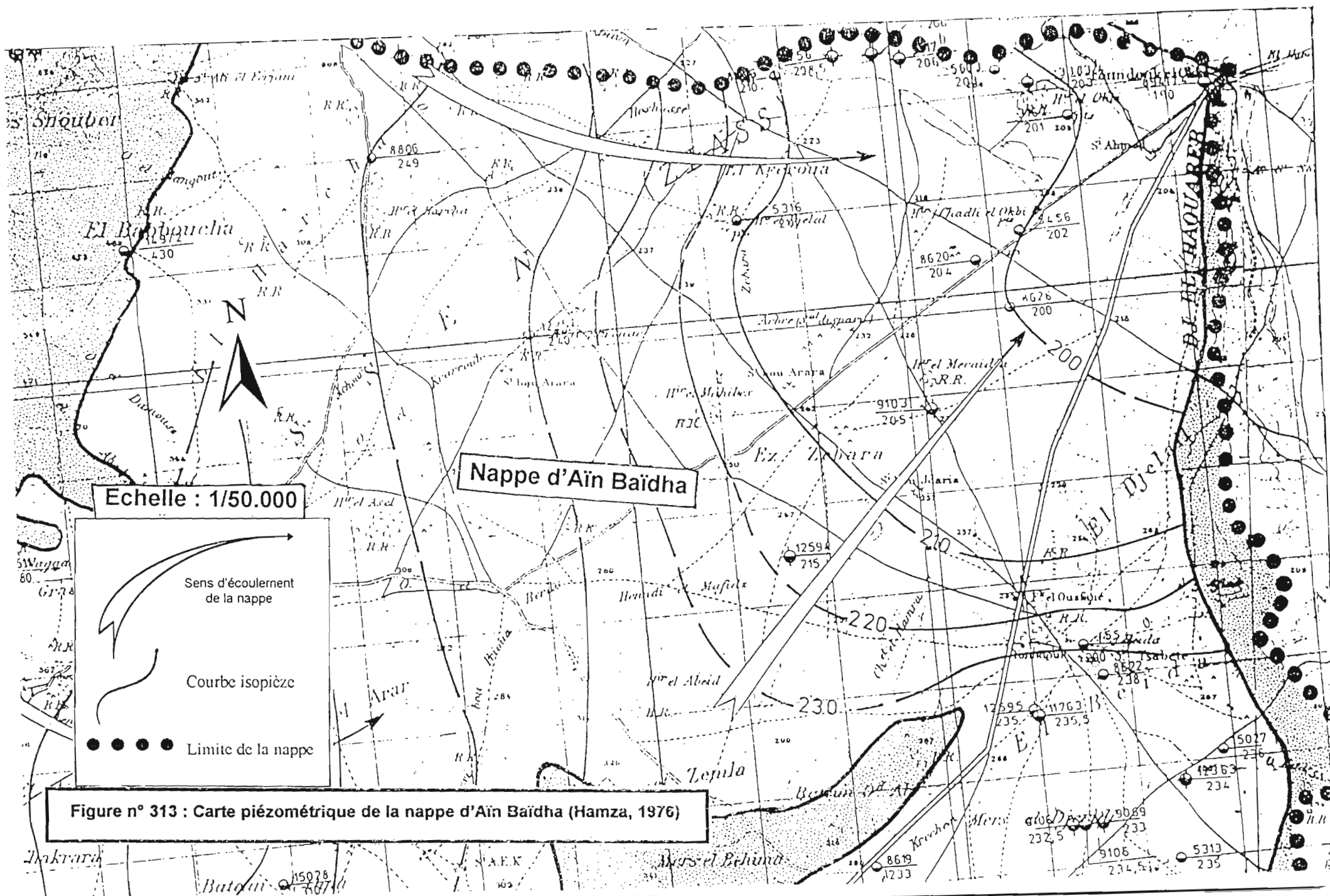


Figure n° 313 : Carte piézométrique de la nappe d'Aïn Baïdha (Hamza, 1976)

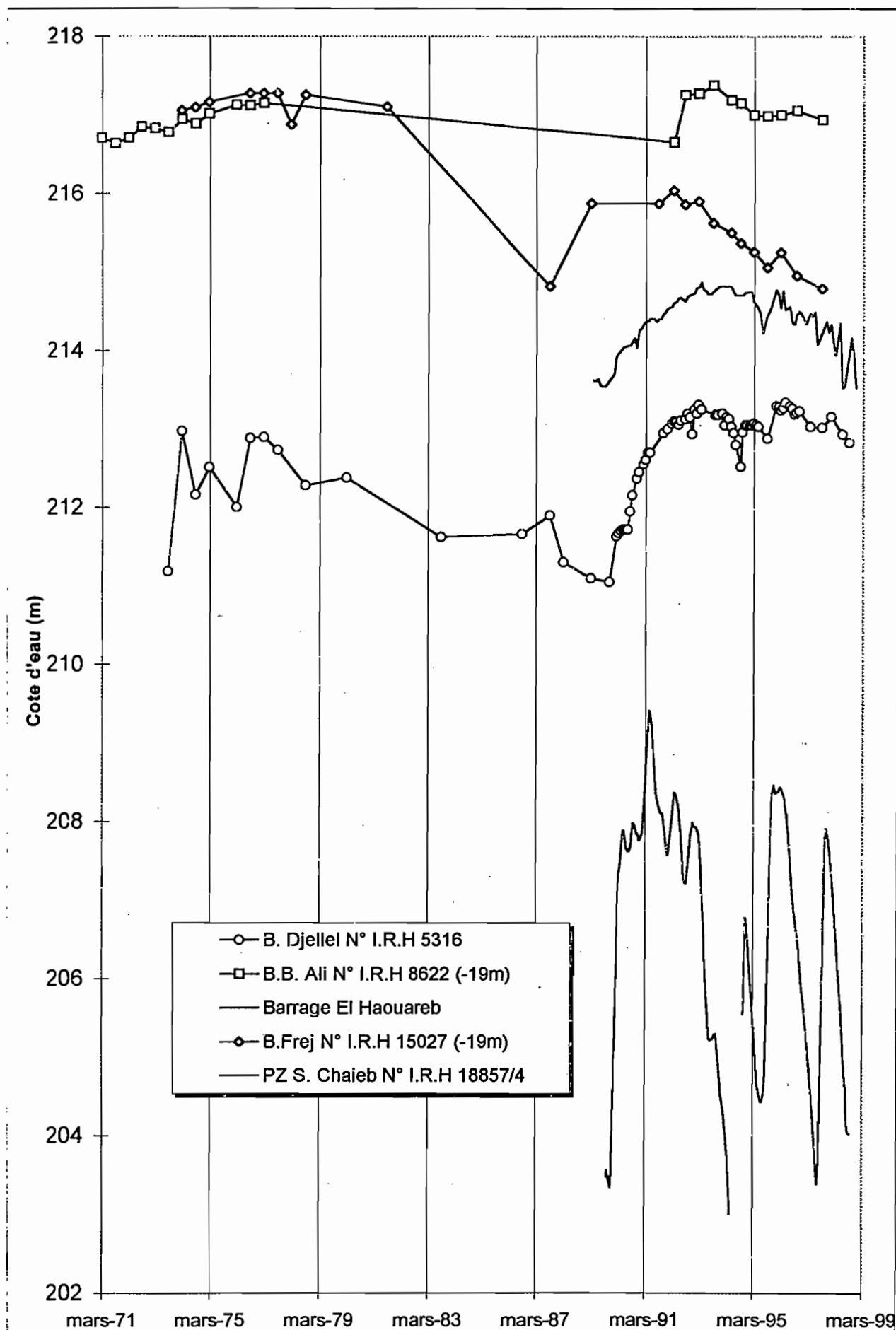


Figure n° 314 : Evolution du niveau d'eau dans la nappe d'Aïn Baïdha à proximité du barrage d'El Haouareb

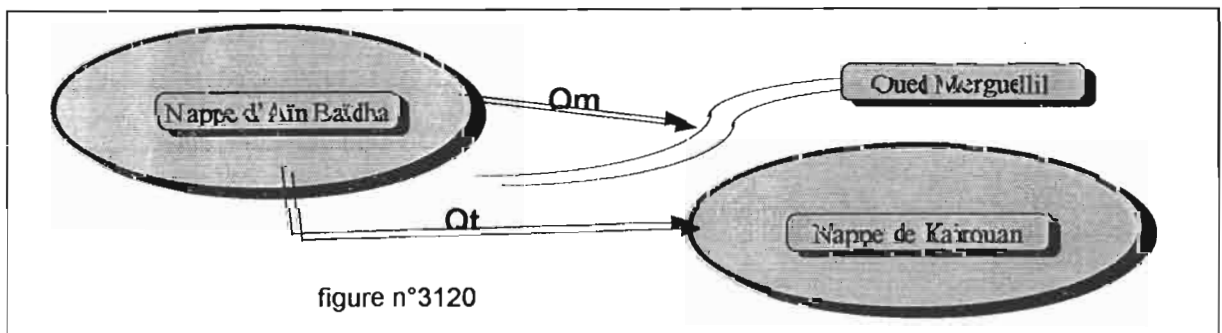
Tableau n° 311 : Les points d'observation des nappes de la zone d'El Haouareb

Nappe Amont d'Aïn Baïdha							
Nom	N° I.R.H.	Désignation	Latitudes	Longitudes	Altitudes	Caractéristiques	Implantation
			(degré)	(degré)	(m)		
Bir Djellel	5316	Puits	35° 33' 26"	9° 41' 38"	229.90	-	-
Br B. B. Hadj Ali	8622	Puits	35° 30' 48"	9° 43' 51"	244.75	-	-
Triaa B. Frej	15027	Puits	35° 30' 17"	9° 44' 33"	258.42	-	-
Sdi A. Chaieb	18857/4	Piézomètre	35° 32' 25"	9° 41' 53"	245.00	Limnigraphe	13-oct-88
Nappe des calcaires du Djebel El Haouareb							
Nom	N° I.R.H.	Désignation	Latitudes	Longitudes	Altitudes	Caractéristiques	Implantation
			(degré)	(degré)	(m)		
El Haouareb V	8941/4	Piézomètre	35° 33' 58"	9° 45' 03"	207.12	Limnigraphe	Fin 1989
Nappe Aval de Kairouan							
Nom	N° I.R.H.	Désignation	Latitudes	Longitudes	Altitudes	Caractéristiques	Implantation
			(degré)	(degré)	(m)		
M22	13187/4	Piézomètre	35° 34' 15"	9° 47' 55"	177.16	Limnigraphe	08-jan-69
M21	13188/4	Piézomètre	35° 34' 27"	9° 45' 49"	191.94	Limnigraphe	16-déc-68
M24	19178/4	Piézomètre	35° 34' 39"	9° 45' 47"	190.38	Limnigraphe	03-mar-93
M7	12839/4	Piézomètre	35° 34' 44"	9° 48' 31"	174.26	Non protégé	nov-1968
M23 bis	18291/4	Piézomètre	35° 34' 02"	9° 49' 17"	165.33	Protégé	15-avr-85
M3 bis	18292/4	Piézomètre	35° 35' 04"	9° 51' 27"	156.58	Non protégé	15-avr-85
HOUFIA	19103/4	Piézomètre	35° 35' 19"	9° 45' 32"	203.81	Non équipé	14-avr-92
M29	19281/4	Piézomètre	35° 34' 55"	9° 53' 00"	141.18	Non équipé	24-sep-94
M28	19282/4	Piézomètre	35° 31' 48"	9° 48' 44"	164.92	-	1996
M30	19291/4	Piézomètre	35° 36' 03"	9° 49' 34"	170.20	-	1996
A	12377/4	Piézomètre	35° 35' 52"	9° 52' 58"	138.74	-	1967
X8	18456/4	Piézomètre	35° 35' 03"	9° 57' 50"	113.62	-	1986

L'étude sur modèle numérique de la nappe d'Aïn Baïdha, élaborée par Baba Sy (1999), a relevé, en régime permanent (1973), un débit de transfert souterrain vers la nappe de Kairouan de 89 l/s et 136 l/s comme débit sortant de la nappe par l'oued Merguellil (figure n° 3120). Les simulations en régime permanent avec les différents niveaux d'eau dans le barrage ont donné des résultats compris dans le tableau n° 312.

Tableau n° 312 : Transfert d'Aïn Baïdha en fonction de la cote du barrage (Baba Sy, 1999)

Cote	Débit de transfert (Qt)	Débit vers l'oued Merguellil (Qm)	Total
(m)	(l/s)	(l/s)	(l/s)
201	130	90	220
202	138	81	219
203	146	72	218
204	154	63	217
205	161	54	215
206	163	54	217
207	166	51	217
208	168	49	217
209	177	40	217
210	186	30	216



Ce tableau montre l'accroissement du débit de transfert vers la nappe aval au détriment des sorties vers les eaux de surface en fonction du niveau d'eau de la retenue d'El Haouareb (figure n° 315). Les sorties vers le barrage d'El Haouareb ont été comptabilisés dans le bilan en eau de surface, seuls les débits de transfert seront tenus en compte pour le bilan en eau souterraine. Une fonction de débit de transfert vers l'aval en fonction de la hauteur d'eau dans la retenue a été déterminée :

$$Q_t = 5.6061 H - 993.15 \quad (7). \quad (200 \leq H \leq 210)$$

avec

Q_t : le débit de transfert vers la nappe aval de Kairouan (l/s)

H : la hauteur d'eau dans la retenue d'El Haouareb (m)

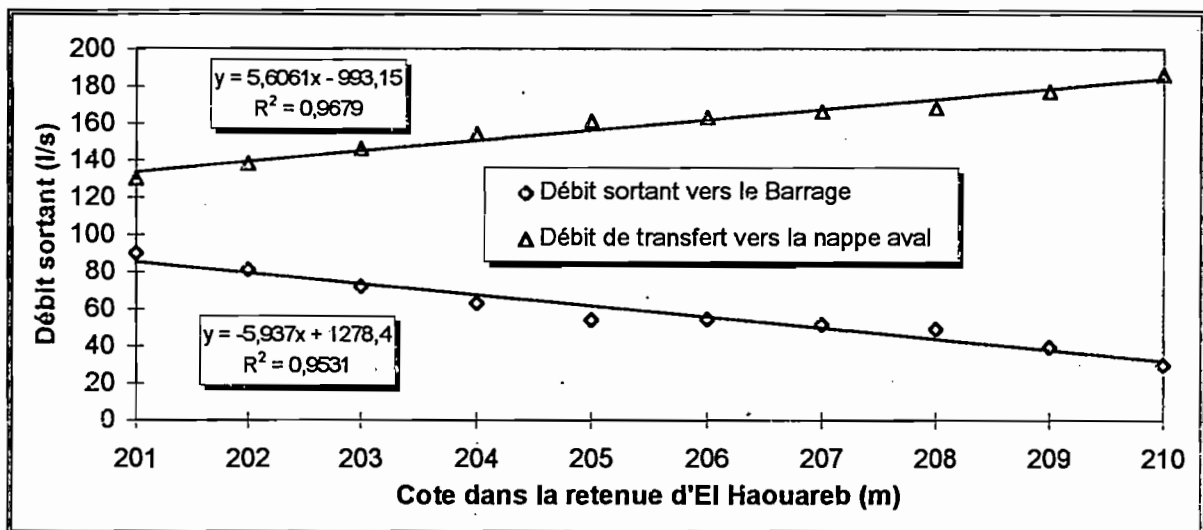


Figure n° 315: Débit sortant de la nappe d'Aïn Baïdha en fonction de la cote d'eau du barrage

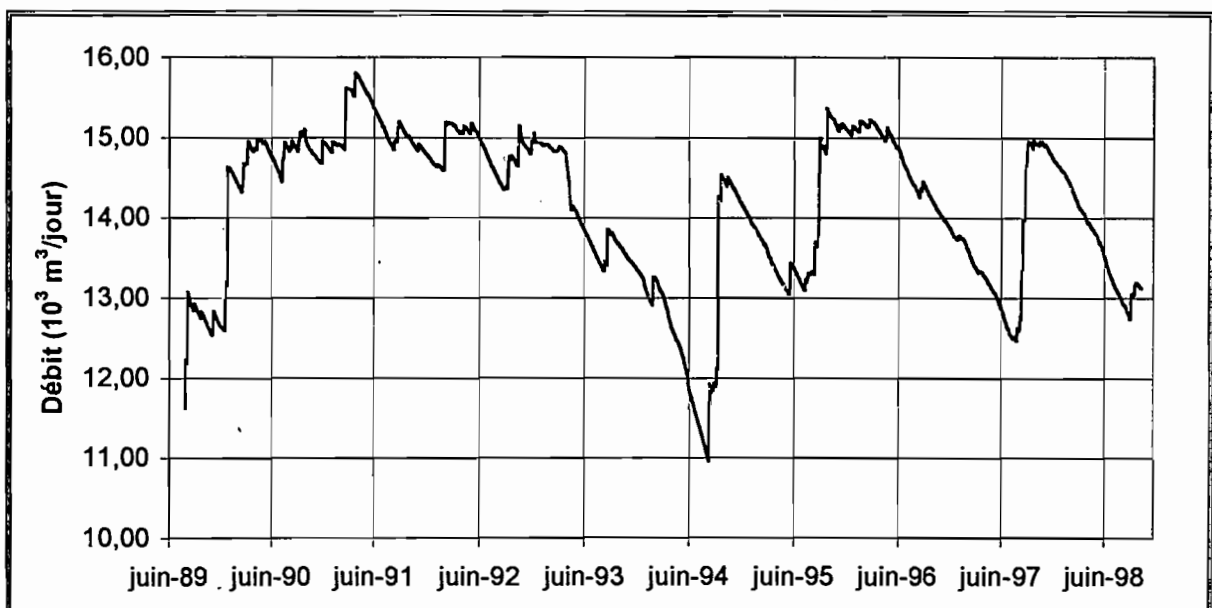


Figure n° 316 : Evolution en fonction du temps du débit de transfert de la nappe d'Aïn Baïdha

L'équation (7) a été appliquée au pas journalier pour évaluer le débit transféré de la nappe d'Aïn Baïdha vers l'aval (figure n° 316). L'évolution du débit de transfert, fonction du niveau d'eau dans le barrage, donne des valeurs comprises entre 10 et 16 milliers de m³ par jour. Le plus grand débit transféré s'observe en avril 1991 correspondant au plus hautes eaux jamais atteintes par le barrage alors que le plus faible correspond à la sécheresse de 1994.

b) La nappe des calcaires du Djebel El Haouareb

La nappe des calcaires du Djebel El Haouareb est observé par un seul piézomètre. Il a été constaté que le niveau d'eau dans cette nappe est fonction de celui du plan d'eau de la retenue d'El Haouareb, avec une différence de niveau d'environ 12.8 mètres (figure n° 317).

Cette interdépendance entre les deux plans d'eau nous pousse à affirmer que l'un est alimenté directement par l'autre, les infiltrations de la retenue d'El Haouareb vont donc dans cette nappe des calcaires de même que le débit de transfert de la nappe d'Aïn Baïdha avant d'être évacués vers la nappe aval de Kairouan. La nappe des calcaires du Djebel El Haouareb joue ainsi le rôle de transit des eaux avant leur évacuation soit par les émergences soit par le seuil hydraulique d'El Haouareb.

c) La nappe aval de la plaine de Kairouan

La piézométrie de la partie de la nappe de Kairouan proche du barrage El Haouareb a été étudiée à l'aide des données des douze piézomètres se trouvant dans cette zone (tableau n° 311). Nous avons d'abord tracé l'évolution du niveau d'eau à chaque piézomètre en fonction du temps (figure n° 318). Sur cette figure on constate que pendant la décennie des années 80, le niveau d'eau de la nappe de Kairouan n'a fait que baisser progressivement avec un rabattement moyen de 0.5 mètre par an. Avec l'implantation de la retenue d'El Haouareb, le niveau d'eau de la nappe dans cette zone a considérablement remonté, ce qui constitue un impact évident de la recharge de la nappe par le barrage d'El Haouareb.

Cette recharge s'est effectuée de trois manières différentes : par les émergences à l'aval de l'évacuateur des crues, par les percolations en profondeur et par les lâchures effectuées de la retenue d'El Haouareb.

A partir d'un relevé et d'un rattachement des piézomètres effectués à la demande de la DGRE en mars 1999, nous avons pu tracer les courbes isopièzes de la région à cette date (figure n° 319). Cette carte montre deux directions d'écoulement des eaux provenant du barrage El Haouareb : les directions ouest - nord-est, et ouest - sud-est.

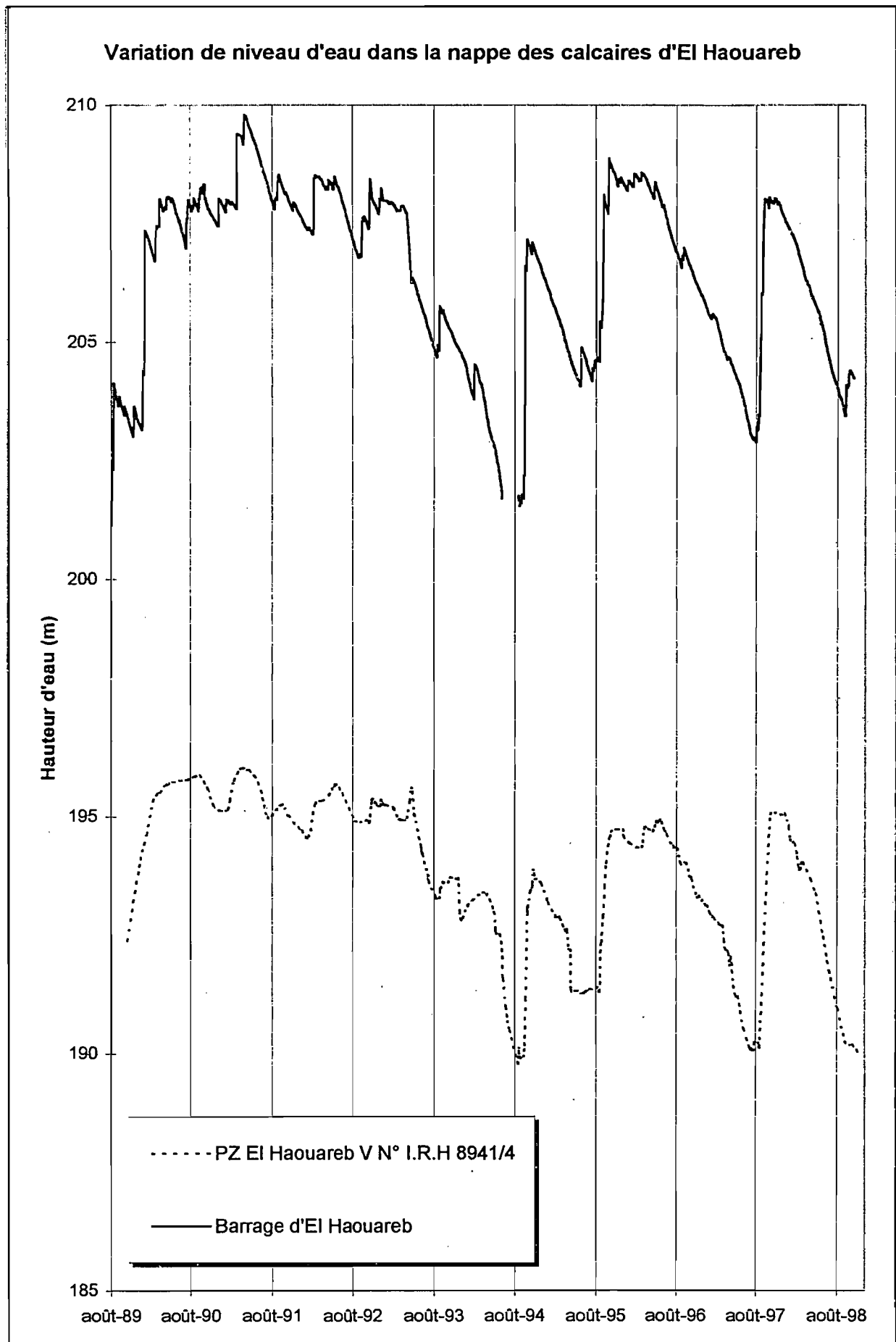


Figure n° 317 : Evolution du niveau piézométrique dans la nappe des calcaires d'El Haouareb

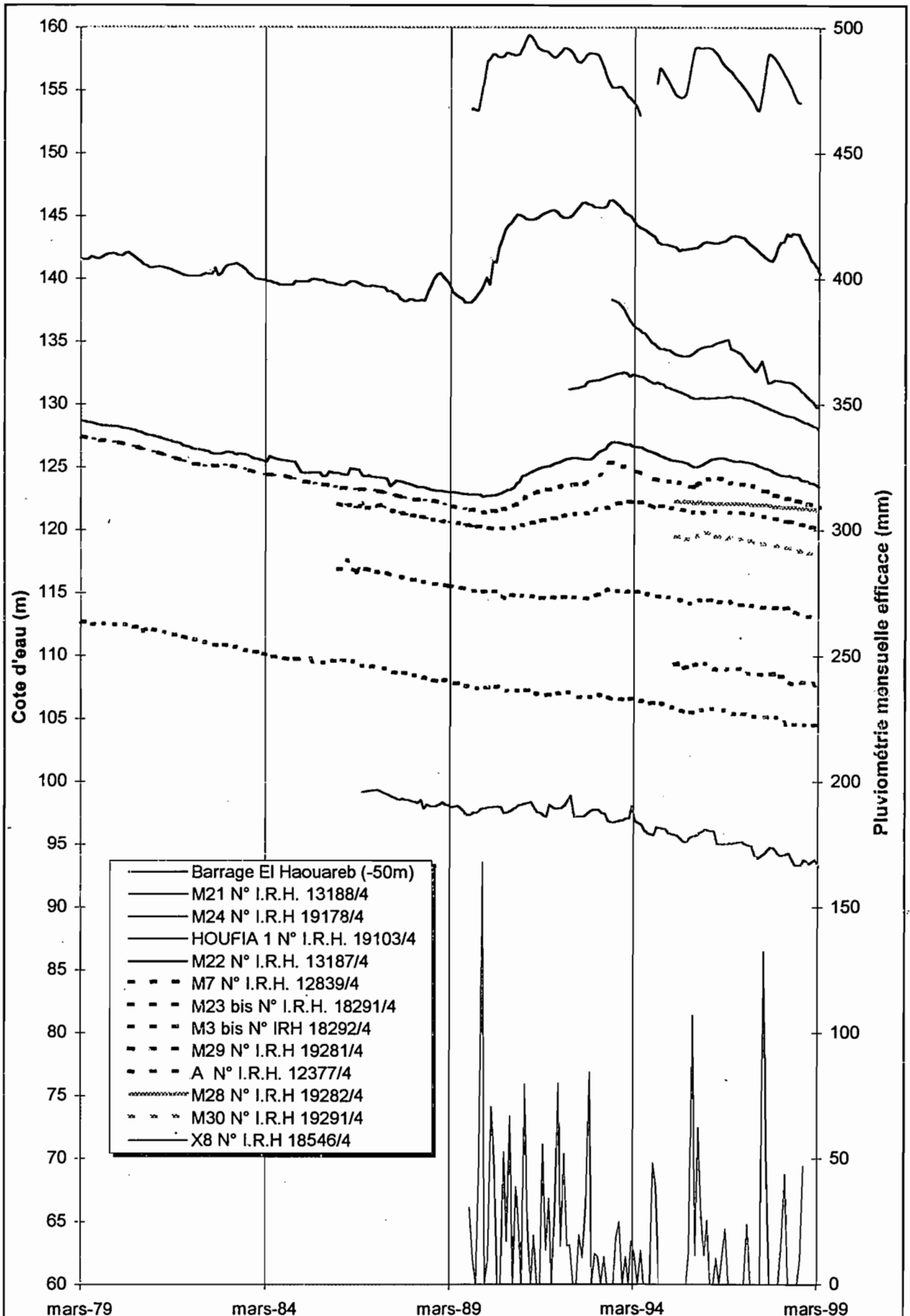


Figure n° 318 : Evolution du niveau piézométrique de la nappe de Kairouan dans la zone d'influence du Merguellil

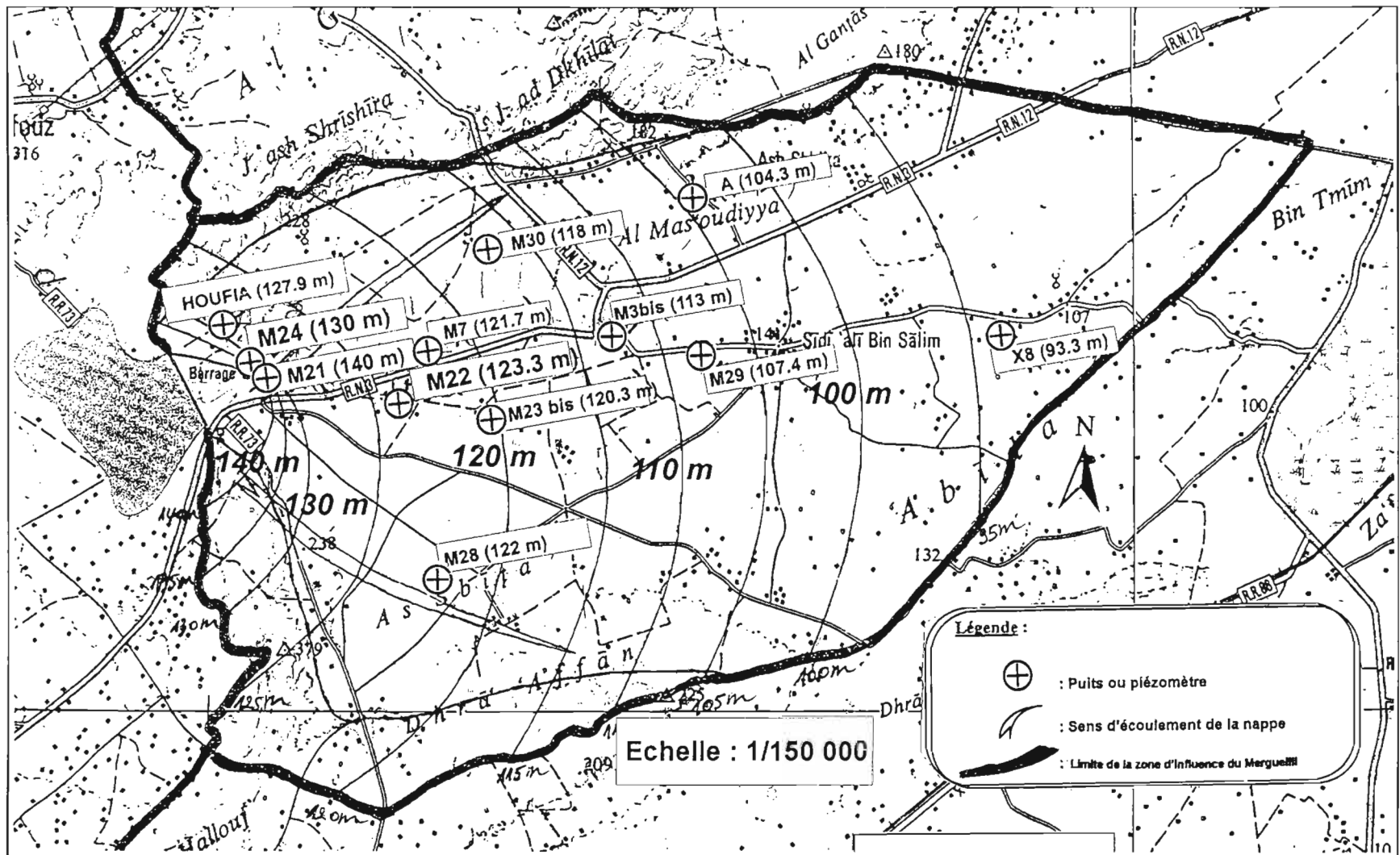


Figure n° 319 : Carte d'isopièzes dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan (mars 1999)

3) L'étude des émergences à l'aval de l'évacuateur des crues

a) Mesure et suivi des émergences du barrage d'El Haouareb

Les premières émergences sont apparues avec le décapage des bancs de calcaires lors de la construction de l'évacuateur des crues du barrage d'El Haouareb. Pour la poursuite des travaux, il a fallu assécher cette eau provenant de la nappe des calcaires. On a utilisé pour cela un pompage de 400 l/s qui devait abaisser le niveau de cette nappe et des injections sous pression de laitier de ciment et de bentonite afin de colmater les fissures localisées dans les calcaires situés sous l'évacuateur des crues.

A la mise en eau du barrage, après les travaux définitifs de construction, les émergences ont de nouveau réapparu. Toutes les tentatives effectuées pour essayer de les colmater ont permis de les réduire sans toutefois les supprimer, on a donc pris l'option de les mesurer et de suivre leur évolution en fonction du temps. C'est ainsi que les jaugeages hebdomadaires des émergences ont débuté le 30 septembre 1989.

Plus tard, pour évaluer les débits journaliers il a été installé un limnigraphe contrôlé par un seuil aménagé enfin de fournir des valeurs continues des débits émergents et permettre une analyse plus cohérente du phénomène.

Les mesures ont montré que les débits varient énormément en fonction du temps et de la cote d'eau dans le barrage d'El Haouareb. A fin de calculer leurs valeurs les jours où elles n'ont pas été mesurées, on a modélisé le débit des émergences en fonction du niveau d'eau dans la retenue.

b) Modélisation des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues

La modélisation du débit des émergences en fonction de la cote du niveau d'eau dans la retenue d'El Haouareb a été faite en régime permanent. Ce qui signifie que les mesures des périodes transitoires de 1994 et 1997 correspondant à l'assèchement du barrage n'ont pas été prises en considération. Une autre période de mai 1990 dont les mesures sont très largement inférieures aux autres a été écartée de la corrélation.

La comparaison entre le niveau d'eau dans la retenue et celui du piézomètre El Haouareb V a montré un certain décalage dans le temps entre-eux. Ce décalage nous a poussé à voir de plus près entre les débits des émergences et la cote d'eau dans la retenue d'El Haouareb et on a constaté que le temps de ce décalage variait entre dix jours pour les hautes eaux et vingt jours pour les basses eaux. C'est ainsi qu'on a pris la moyenne, 15 jours, comme temps de séjour de l'eau entre la retenue et les émergences de l'aval de l'évacuateur des crues.

Avec ces données on a tracé le débit des émergences en fonction de la cote correspondante du plan de la retenue (figure n° 3110). Deux périodes se sont dégagées de cette relation : la période allant de la mise en eau à l'assèchement de 1994 et celle allant de cette date à fin 1998. Cela pourrait s'expliquer par la consolidation des sédiments pendant la sécheresse de 1994.

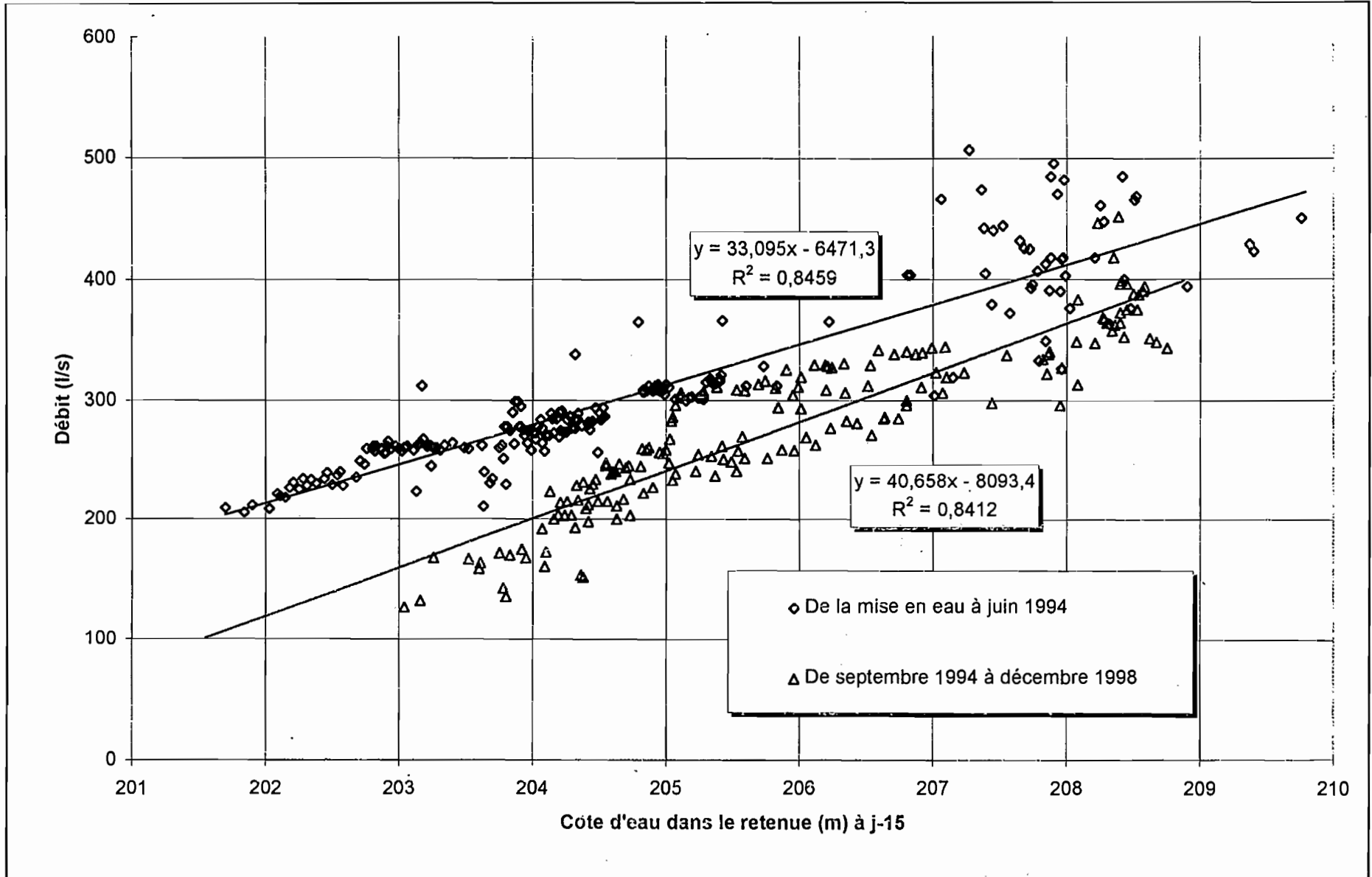


Figure n° 3110 : Evolution du débit des émergences en fonction de la cote d'eau dans la retenue d'El Haouareb à j-15

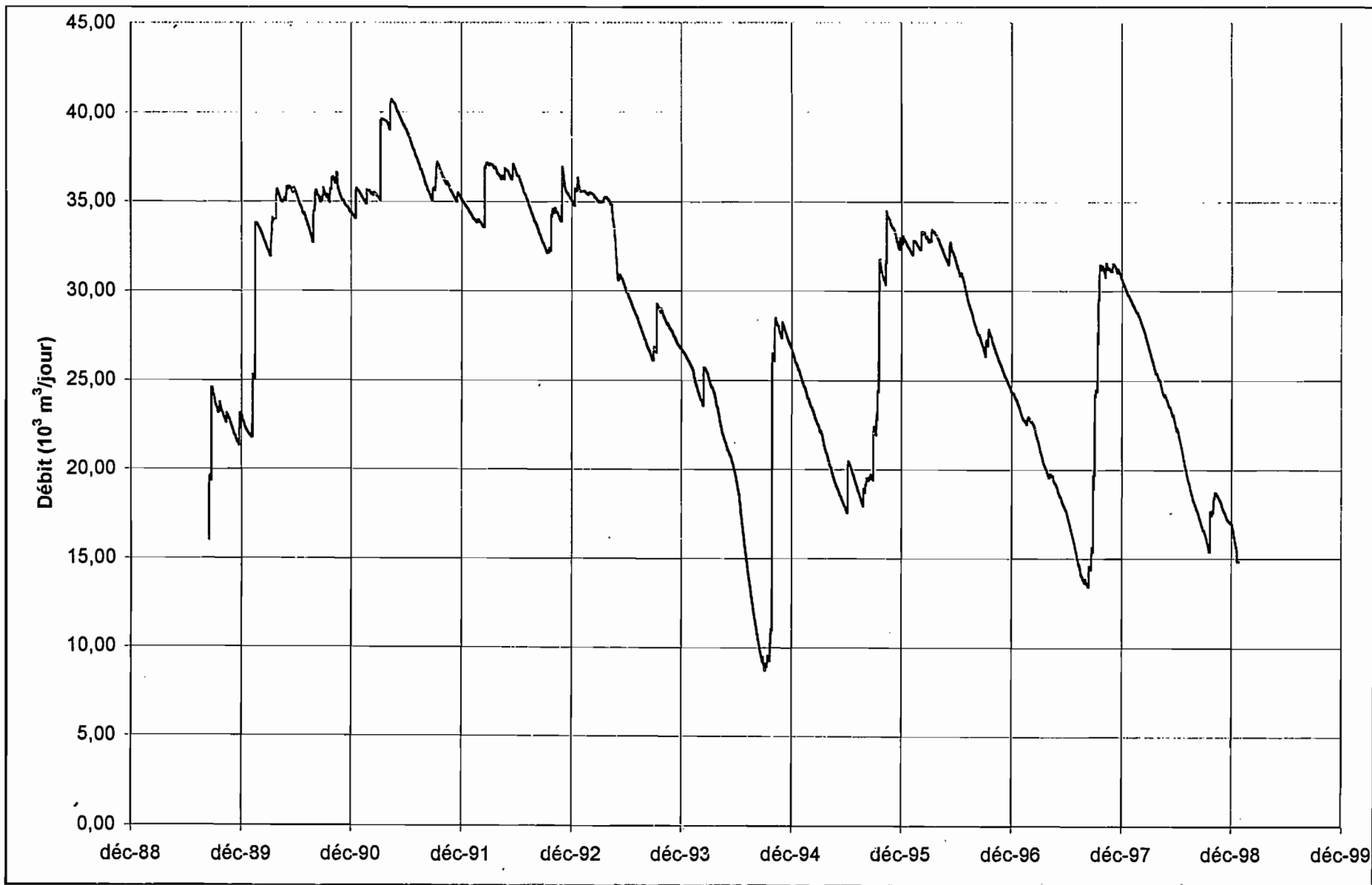


Figure n° 3111 : Evolution en fonction du temps du débit des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues du barrage d'El Haouareb

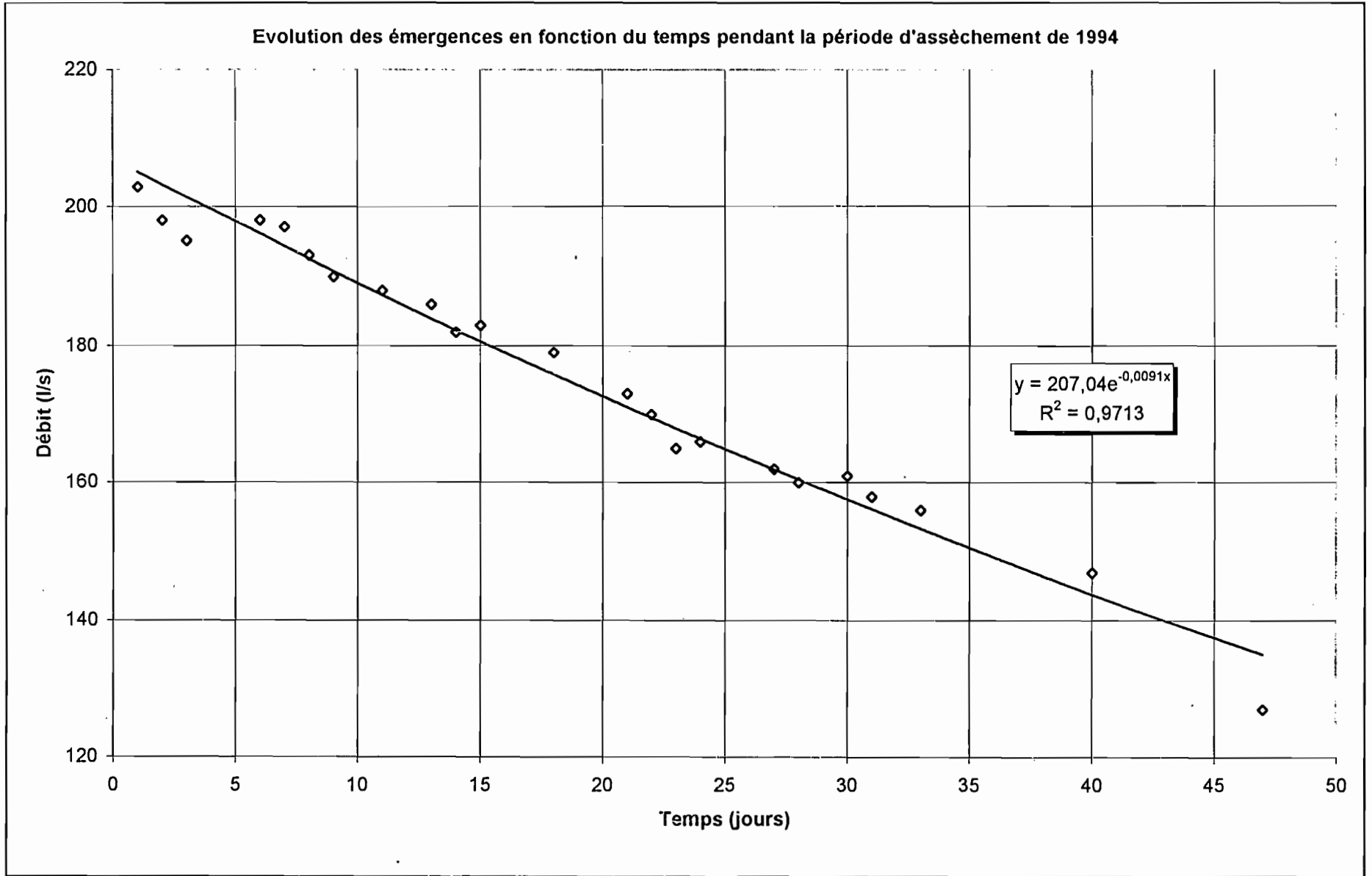


Figure n° 3112 : Courbe de tarissement des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues du barrage d'El Haouareb

Comme pour le cas des infiltrations de la retenue d'El Haouareb, on assiste, au fur et à mesure que l'ouvrage s'envase, à une évolution décroissante, pour une même cote d'eau dans le barrage, du débit des émergences. Mais compte tenu de la qualité et de la fréquence des mesures, cette évolution n'est pas très nette à l'échelle annuelle. Les deux droites ajustées tendent vers les mêmes valeurs dans les hautes eaux, alors que dans les basses eaux les variations sont beaucoup plus importantes à cause du dépôt des sédiments.

Malgré de bonnes corrélations obtenues dans ces deux modèles, il apparaît quelques périodes dont les données présentent des anomalies. C'est le cas des données de l'année 1995 qui se présentent sous forme d'un palier inexplicable dans le nuage de points. Il est aussi à signaler une dispersion très importante du nuage de points des débits des émergences jaugés dans la première période. Cette dispersion met en exergue une certaine incertitude quant au degré de fiabilité de ces données.

Ces deux droites du modèle des émergences en fonction de la cote dans la retenue ont été appliquées sur l'ensemble de la période d'existence de la retenue pour obtenir le volume d'eau sorti par les émergences (figure n° 3111) jusqu'au 31 décembre 1998.

Pendant la période d'assèchement de 1994, une série de mesure a été faite par la DG/EGTH pour essayer d'étudier le comportement des émergences en absence d'eau dans la retenue d'El Haouareb. Avec ces mesures on a pu tracer la courbe de tarissement des émergences en fonction du temps (figure n° 3112). Partant de la date du 2 juillet 1994, soit 15 jours après l'assèchement du barrage d'El Haouareb, la fonction de tarissement des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues est exponentielle, comme celle des nappes en général.

4) Approche du bilan en eau souterraine du système El Haouareb

a) L'équation du bilan en eau souterraine

Comme pour les eaux de surface, l'équation générale du bilan des eaux souterraines à un pas de temps t s'écrit :

$$\text{Apports - Sorties} = \text{Variation de stock} \quad (8)$$

Etant donné que le système souterrain d'El Haouareb ne joue que le rôle de transit, c'est à dire qu'il transfère tout ce qu'il reçoit de l'amont, nous supposons que la variation de son stock est nul. Les entrées de ce système sont le débit de transfert de la nappe d'Aïn Baïdha et les infiltrations de la retenue d'El Haouareb. Alors que ses sorties sont constituées d'émergences de l'aval de l'évacuateur des crues et des percolations en profondeur vers la nappe de Kairouan.

L'équation de bilan en eau souterraine devient donc :

$$V_p = V_i + V_{nb} - V_{em} \quad (9)$$

avec :

V_p : Volume de percolation en profondeur vers la nappe de Kairouan

V_i : Volume infiltré par la retenue d'El Haouareb

V_{nb} : Volume transféré en profondeur de la nappe d'Aïn Baïdha

V_{em} : Volume sorti par les émergences de l'aval de l'évacuateur des crues

b) Le bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb

Le bilan souterrain du système El Haouareb fait ressortir que depuis la mise en eau de ce barrage jusqu'au 31 décembre 1998, 178 millions de m³ d'eau y ont transité. Parmi lesquels 130 millions provenant de l'infiltration de la retenue d'El Haouareb modélisée dans la première partie consacrée au bilan en eau de surface et 48 millions de la nappe amont d'Aïn Baïdha calculés par Baba Sy à l'aide du logiciel MULTIC (figure n° 3113).

Sur ces entrées dans le système souterrain d'El Haouareb, 96 millions de m³ sont sortis par les émergences et on en déduit que 82 millions restants sont sortis par percolation en profondeur vers la nappe avale de Kairouan.

Les émergences représentent dans l'ensemble 54 % des sorties, le reste 46 %, étant réservé aux percolations en profondeur. Quant aux entrées, l'infiltration constitue 73 % de leur total et 27 % pour les apports de la nappe d'Aïn Baïdha.

Le bilan mensuel montre que les apports de la nappe d'Aïn Baïdha ne varient pas beaucoup, ils oscillent aux alentours de 0.5 millions de m³ par mois. Alors que les autres parts du bilan varient énormément en fonction du volume d'eau dans la retenue (figure n° 3114). Les plus fortes valeurs mensuelles se constatent en avril 1991 avec un volume de 2.5 millions de m³ qui transite par le système. Tandis que les plus faibles se rencontrent en 1994 et 1997, années correspondant à l'assèchement du barrage d'El Haouareb.

Le bilan annuel traduit les mêmes variations que le mensuel avec les volumes d'eau annuels transitant par le système souterrain d'El Haouareb compris entre 11 et 28 millions de m³ (figure n° 3115) correspondant respectivement à l'année la plus sèche (1993/1994) et à la plus humide (1990/1991). Entre ces deux années, l'infiltration varie de 22 à 6 millions de m³, les émergences de 14 à 8 millions de m³, les percolations profondes de 13 à 3 millions de m³, et l'apport de la nappe d'Aïn Baïdha qui reste égal à 5 millions de m³. De ceci on peut tirer que les percolations en profondeur sont fonctions de l'infiltration, par conséquent de la cote d'eau dans la retenue.

Les moyennes interannuelles des entrées sont : 14.3 millions m³ provenant de l'infiltration et 5.2 millions de la nappe d'Aïn Baïdha. Alors que celles des sorties sont de 10.4 millions de m³ pour les émergences et 9.1 millions pour les percolations en profondeur vers la nappe de Kairouan.

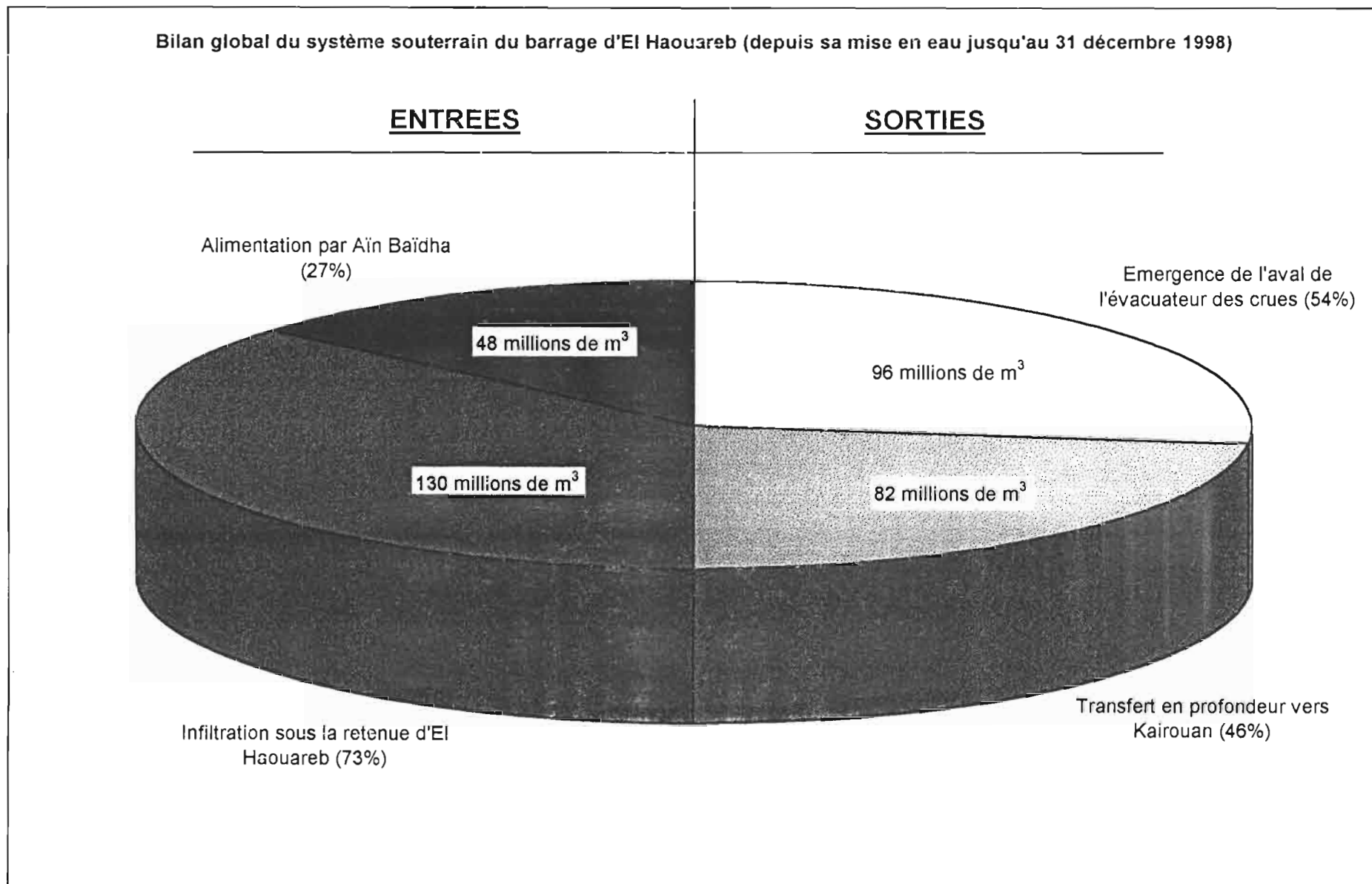


Figure n° 3113 : Repartition des parts des éléments du bilan en eau souterraine d'El Haouareb sur l'ensemble de la période d'étude

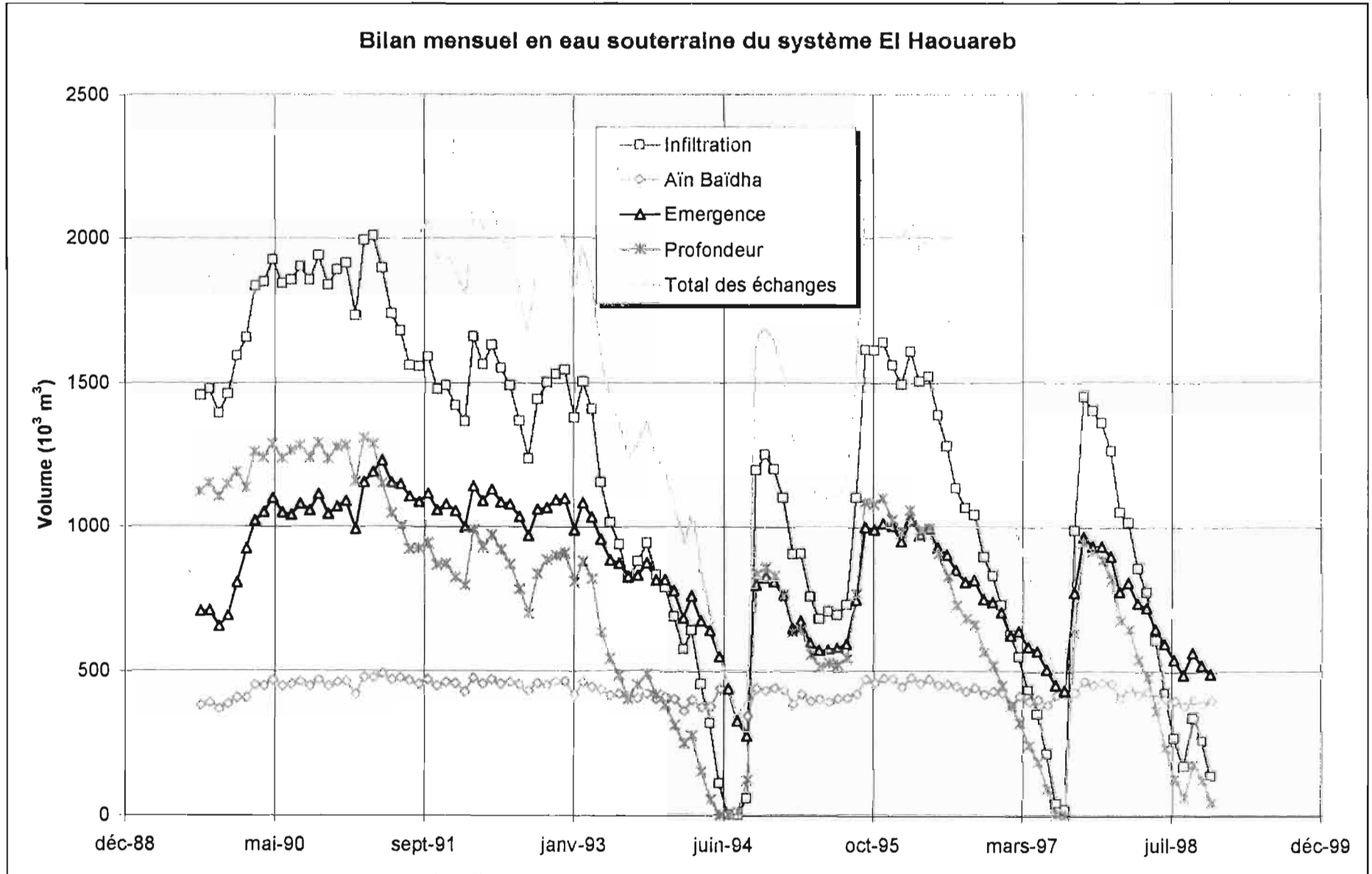


Figure n° 3114 : Evolution mensuelle des éléments du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb

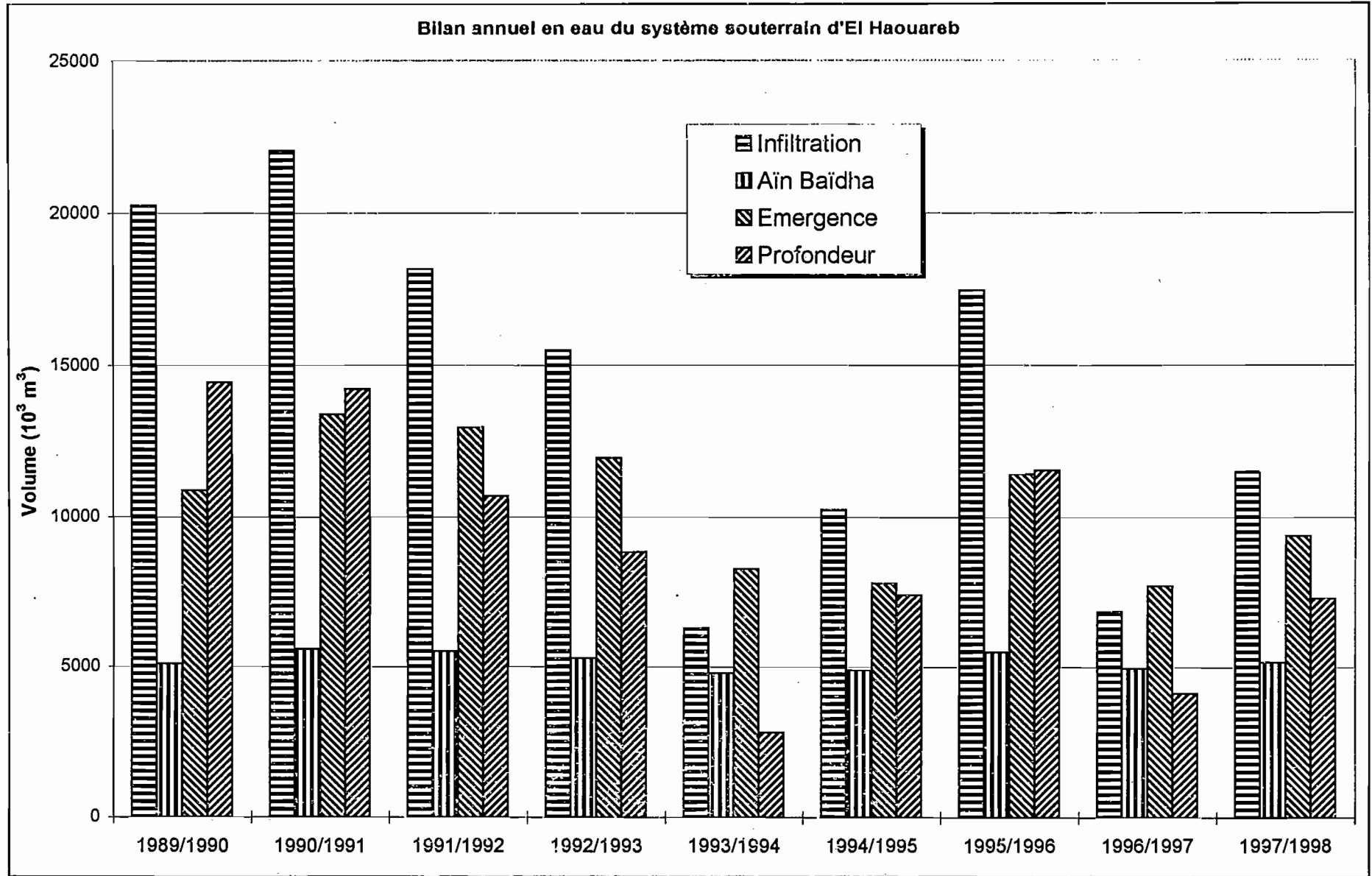


Figure n° 3115 : Evolution annuelle des éléments du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb

5) L'impact du barrage d'El Haouareb sur la nappe de Kairouan

Considérant que sans la mise en place du barrage d'El Haouareb on aurait eu le même rabattement du niveau piézométrique de la nappe de Kairouan que celui observé durant la décennie 80, on a essayé de mesurer la rehaussement du niveau de cette nappe en fonction du temps dans la région influencée par l'oued Merguellil.

Cette hypothèse suppose que tous les autres éléments sont restés les mêmes. Notamment les sorties représentées par les pompages dans la nappe et le transfert vers l'aval. Toutes les entrées autres que celles du barrage sont aussi maintenues constantes et il n'y a donc que le barrage qui cause la variation de niveau positive dans la nappe.

Par cette hypothèse l'impact du barrage sur la nappe de Kairouan est sous-estimé de deux manières :

- * en considérant les pompages dans la nappe comme une constante durant les deux décennies alors qu'ils sont supposés augmenter avec le temps.
- * en prenant le tarissement linéaire de la nappe de Kairouan alors qu'il devrait être exponentielle comme nous l'avons montré plus haut pour les émergences.

Cependant, en ne tenant pas compte des pluies de l'année 89/90 qui sont largement supérieures à celles enregistrées dans la décennie précédente, le modèle surestime l'impact du barrage.

On a pris six dates correspondant à des points significatifs de variation du stock dans la nappe de Kairouan (figure n° 3116) :

- ◆ Août 1989, date de la mise en eau du barrage d'El Haouareb.
- ◆ Décembre 1990, le premier sommet de la piézométrie dans la nappe étudiée.
- ◆ Juillet 1993, deuxième sommet de la piézométrie.
- ◆ Mai 1995, premier niveau bas de la piézométrie de la nappe étudiée.
- ◆ Janvier 1997, un autre sommet relatif de la piézométrie de la nappe.
- ◆ Mars 1999, la limite des mesures à notre disposition.

A ces différentes dates, on a évalué, en utilisant l'hypothèse précédente, la remontée de la nappe de Kairouan pour les piézomètres datant d'avant la mise en place du barrage. ce qui a donné les différentes valeurs de remontée de niveau du piézomètre pour les dates considérées (tableau n° 313).

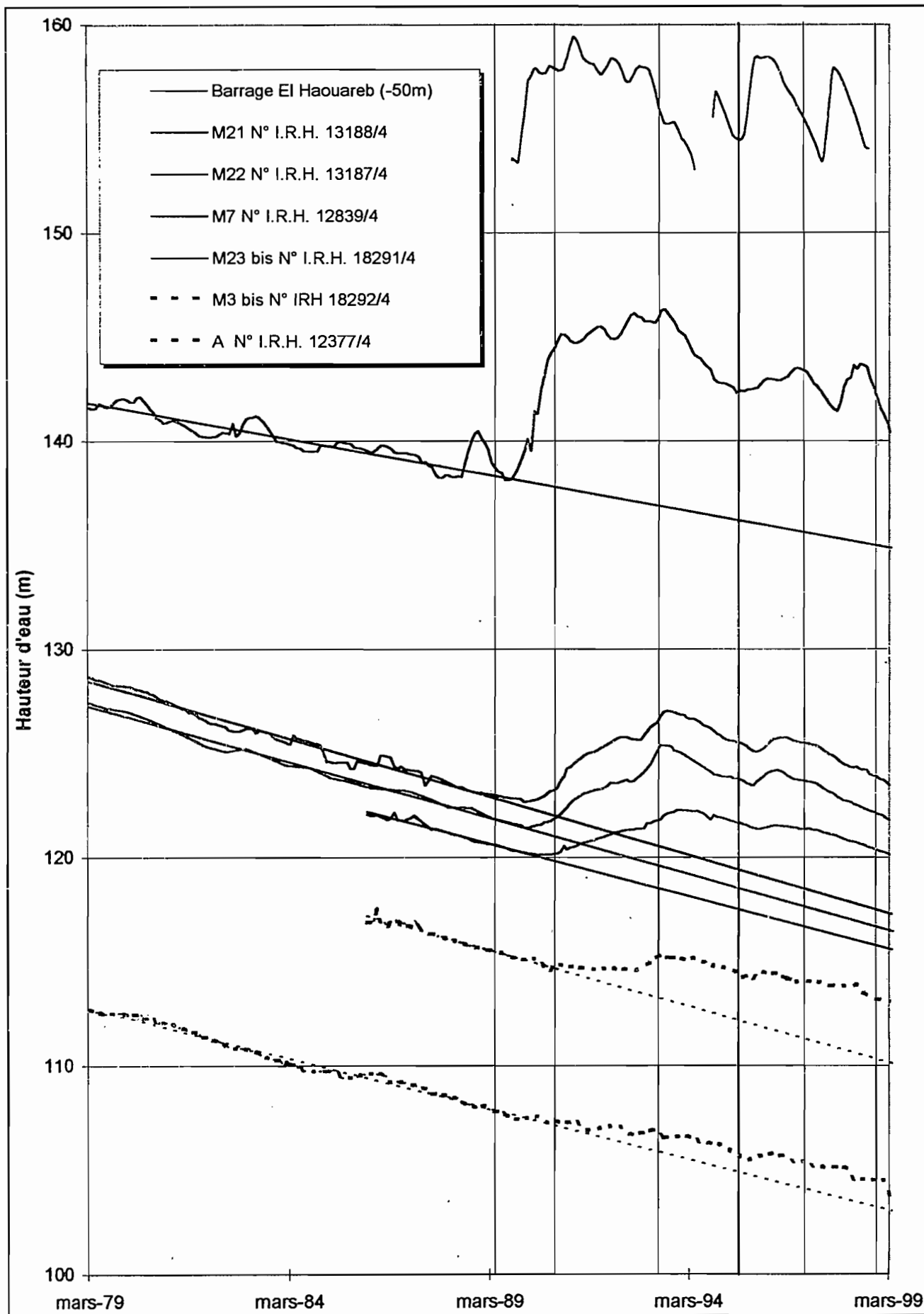


Figure n° 3116 : Extrapolation de l'évolution piézométrique (de la nappe de Kairouan) des années 80 sur la période d'étude

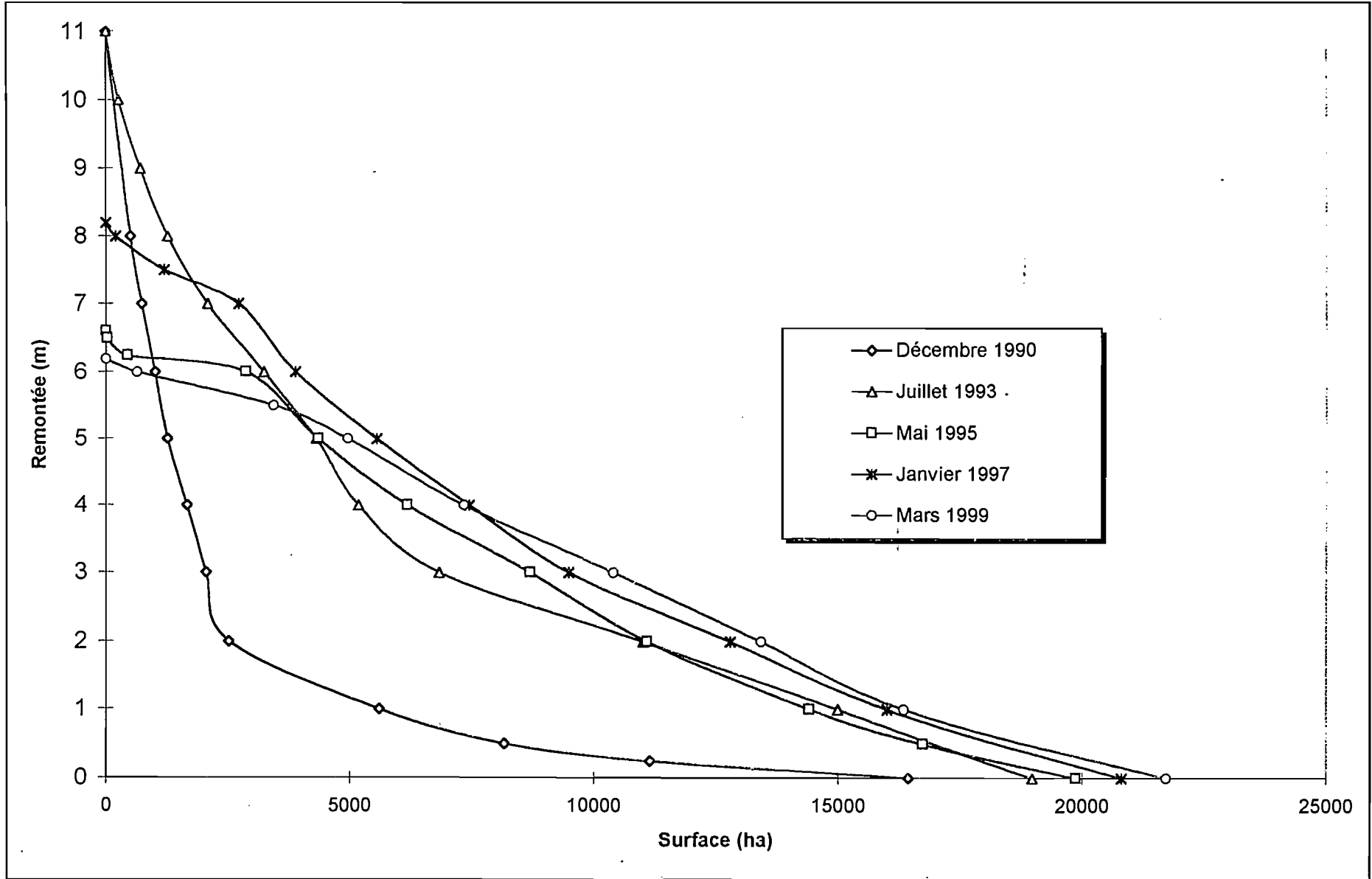


Figure n° 3117 : Evolution de la remontée du niveau piézométrique dans la zone d'influence du Merguellil de la nappe de Kairouan en fonction de la superficie couverte

Tableau n° 313 : Remontées d'eau (m) dans les piézomètres de la nappe de Kairouan

Piézomètre	Août 89	Décembre 90	Juillet 93	Mai 95	Janvier 97	Mars 99
M21	0.00	7.38	9.51	6.23	7.80	5.57
M22	0.00	1.81	6.39	6.11	6.94	6.11
M7	0.00	1.25	5.83	5.28	5.97	5.42
M23 bis	0.00	0.56	3.47	4.03	4.72	4.58
M3 bis	0.00	0.27	2.08	2.22	2.78	2.92
A	0.00	0.14	0.83	0.69	1.25	1.25

Les valeurs ponctuelles de la remontée aux différents piézomètres nous ont permis de tracer les courbes d'iso-remontée de la nappe de Kairouan aux différentes dates successives (annexe n° 8). Le planimétrage des surfaces couvertes par la même remontée nous a donné les valeurs comprises dans le tableau n° 314 dont la figure n° 3117 est la représentation. Cette dernière montre bien que jusqu'à juillet 1993 la nappe dans cette partie se remplit d'eau, en Mai 1995 on constate un abaissement du niveau d'eau dans la nappe dû à la sécheresse de 1994. Elle se remplit de nouveau jusqu'à janvier 1997 puis s'abaisse suite à la sécheresses de 1997 et 1998.

Tableau n° 314 : Valeurs des surfaces d'égale remontée pour les différentes dates

Décembre 1990		Juillet 1993		Mai 1995		Janvier 1997		Mars 1999	
Remontée	Surface	Remontée	Surface	Remontée	Surface	Remontée	Surface	Remontée	Surface
(m)	(ha)	(m)	(ha)	(m)	(ha)	(m)	(ha)	(m)	(ha)
11.00	0	11.00	0.00	6.60	0.00	8.20	0.00	6.20	0.00
8.00	505	10.00	260	6.50	30	8.00	200	6.00	640
7.00	735	9.00	710	6.25	450	7.50	1190	5.50	3440
6.00	1005	8.00	1260	6.00	2860	7.00	2720	5.00	4960
5.00	1260	7.00	2080	5.00	4350	6.00	3880	4.00	7340
4.00	1660	6.00	3230	4.00	6170	5.00	5550	3.00	10390
3.00	2050	5.00	4310	3.00	8690	4.00	7440	2.00	13420
2.00	2515	4.00	5170	2.00	11080	3.00	9480	1.00	16350
1.00	5597	3.00	8820	1.00	14410	2.00	12790	0.00	21730
0.50	8160	2.00	11010	0.50	16740	1.00	16000		
0.25	11140	1.00	14990	0.00	19880	0.00	20820		
0.00	16445	0.00	18980						

Avec cette figure n° 3117 on a pu estimer pour chaque date le volume d'eau contenu dans la nappe de Kairouan en utilisant une porosité de la zone estimée comprise entre 10 et 15 %. Les volumes supplémentaires stockés pour chaque date sont compris dans le tableau n° 315 et leur variation dans le temps est représentée par la figure n° 3118.

Pour l'estimation des quantités supplémentaires qui s'infiltrent vers la nappe de Kairouan nous allons supposer que :

- l'ensemble des percolations en profondeur s'infiltrent vers la nappe de Kairouan,
- seuls arbitrairement 60 % des émergences s'infiltrent vers la nappe de Kairouan pour tenir compte des pertes et des pompages d'eau dans les émergences,
- 77% de lâchers du barrage atteignent la nappe de Kairouan (Bouzaiane & al., 1993),
- 90 l/s, qui constitue le débit de transfert de la nappe d'Aïn Baïdha vers celle de Kairouan avant la mise en place du barrage, est soustrait de l'ensemble des infiltrations vers cette nappe.

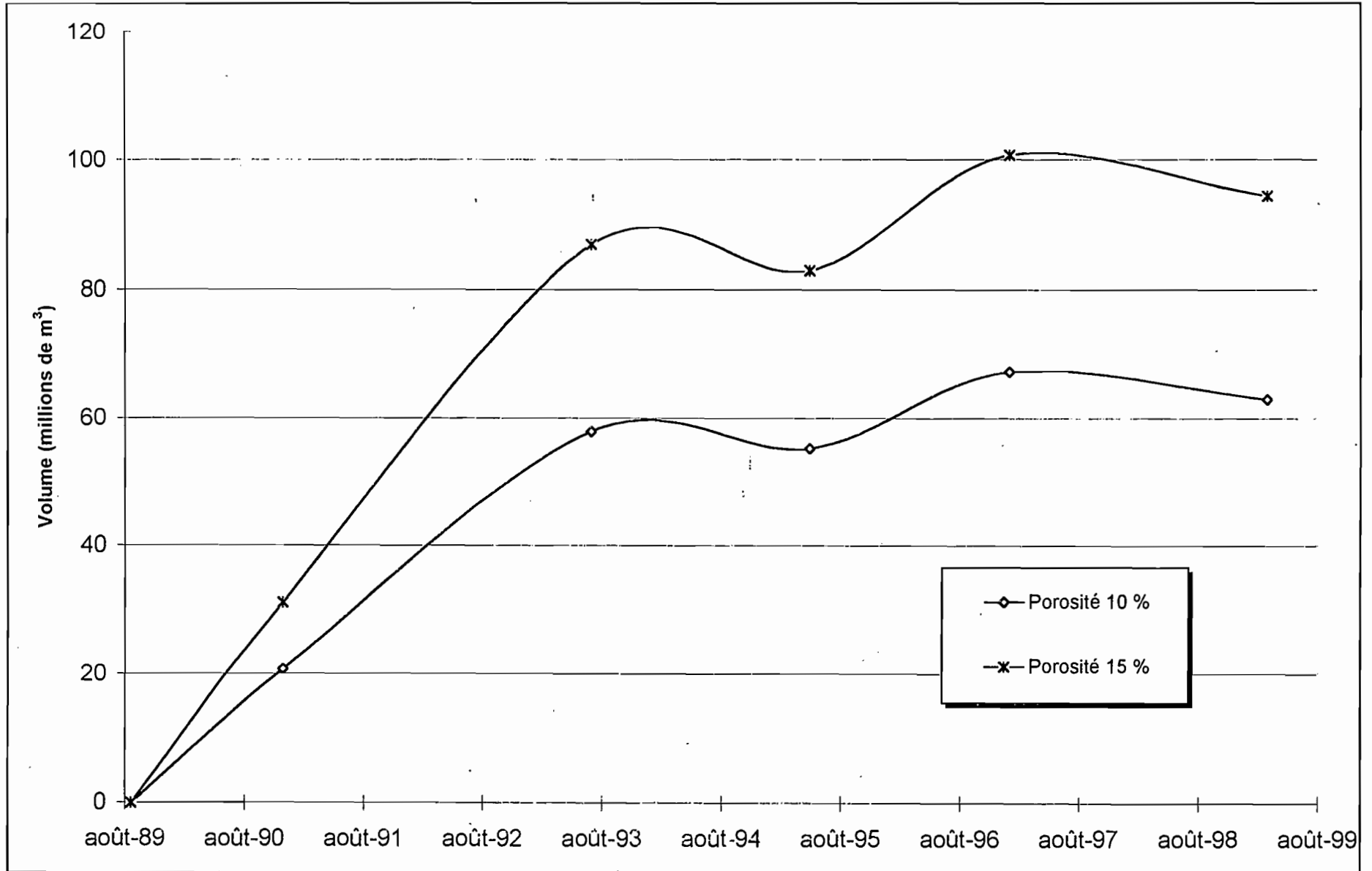


Figure n° 3118 : Evolution dans le temps du stock d'eau supplémentaire dans la zone d'influence du Merguellil de la nappe de Kairouan

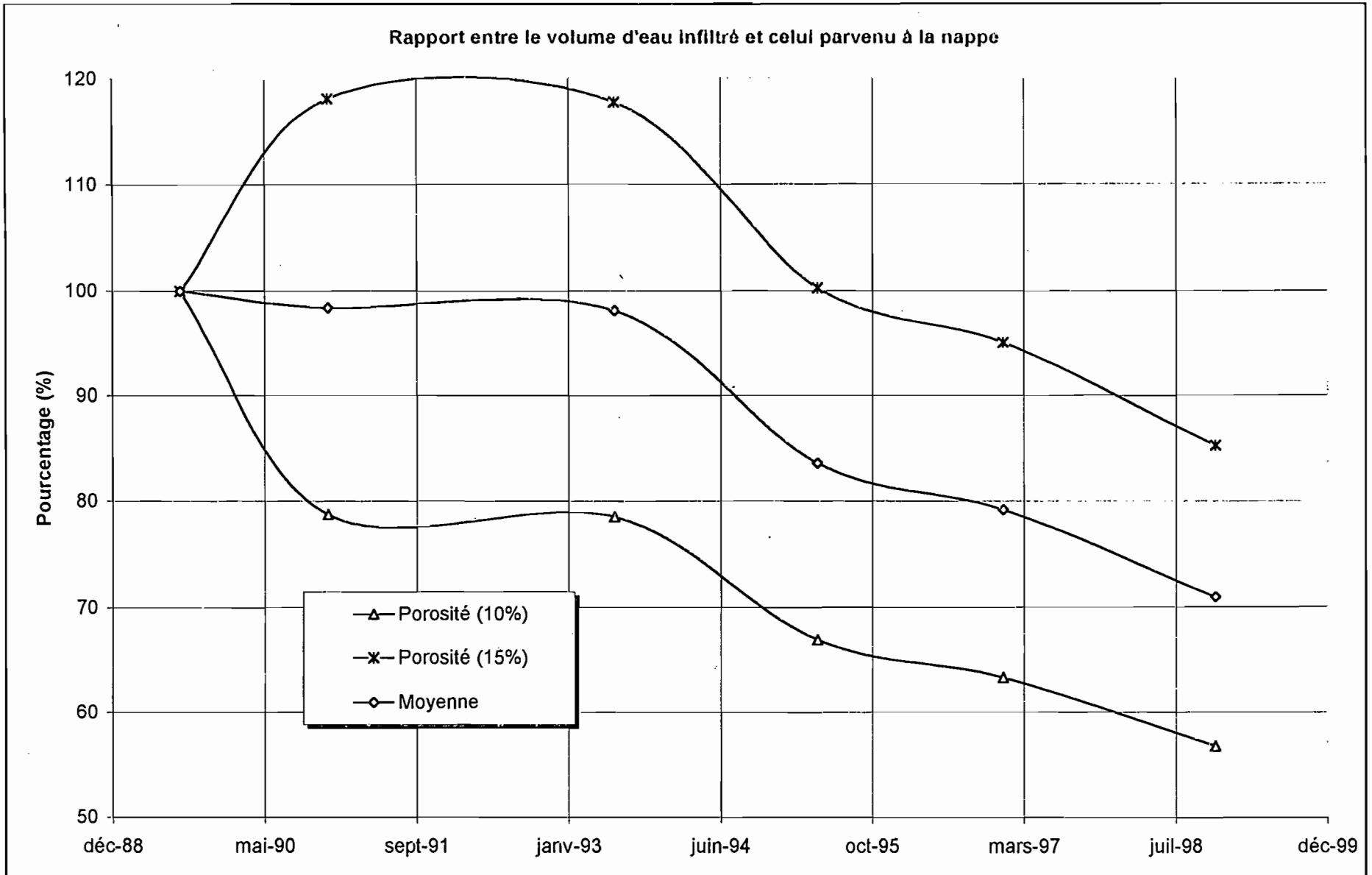


Figure n° 3119 : Impact de la mise en place du barrage d'El Haouareb sur la zone de la nappe de Kairouan alimentée par l'oued Merguellil

Tableau n° 315 : Volume supplémentaire stocké par la nappe de Kairouan à l'aval d'El Haouareb

Date	Volume de recharge	
	Porosité 10 %	Porosité 15 %
aoû-89	0.00	0.00
déc-90	20.82	31.23
juil-93	57.91	86.87
mai-95	55.25	82.88
jan-97	67.17	100.75
mar-99	62.98	94.47

Dans le tableau n° 316 nous avons estimé les quantités d'eau parvenues à la nappe pendant les périodes considérées. Ces dernières ont été comparées à celles qui ont été estimées s'infiltrer vers la nappe de Kairouan par les différents processus.

Tableau n° 316 : Comparaison des volumes d'eau infiltrés et ceux parvenus à la nappe de Kairouan

Date	Volume d'eau infiltré		Volume dans la nappe (porosité 10%)			Volume dans la nappe (porosité 15%)		
	(10 ⁶ m ³)	V. cumulé	(10 ⁶ m ³)	V. cumulé	(%)	(10 ⁶ m ³)	V. cumulé	(%)
Aoû-89	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	
Déc-90	26.44	26.44	20.82	20.82	78.75	31.23	31.23	118.13
Juil-93	47.30	73.74	37.09	57.91	78.53	55.64	86.87	117.81
Mai-95	12.86	86.60	0.00	57.91	66.87	0.00	86.87	100.31
Jan-97	23.58	110.18	11.90	69.81	63.36	17.87	104.74	95.07
Déc-98	12.68	122.86	0.00	69.81	56.82	0.00	104.74	85.25

Avec ce tableau on constate que le volume parvenu à la nappe varie entre 55 et 85 % du volume total infiltré pour la porosité allant de 10 à 15% en décembre 1998 (figure n° 3119). Il est aussi important de constater que ce pourcentage baisse en fonction du temps, cela est dû à l'effet cumulé des deux périodes de sécheresse qui ont eu lieu depuis la mise en eau du barrage. En effet, la représentation du volume d'eau parvenu à la nappe met en évidence que pendant les périodes sèches de 1994 et 1997 la variation du stock de la nappe de Kairouan a été négative (figure n° 3118). Ceci peut s'expliquer par l'effet conjugué de deux phénomènes :

- Suite à une pluviométrie faible pendant ces périodes, une exploitation très importante de la nappe par les agriculteurs de la région fait que le niveau de la nappe baisse.
- Le débit qui s'infiltré est faible, ce qui fait qu'il s'évapore avant d'atteindre la nappe ou ne l'atteint qu'en quantité minime, inférieure au débit de transfert, d'où la baisse de niveau de la nappe.

Conclusion

Le bilan en eau souterraine a été fait au niveau du système constitué par l'aquifère calcaire du Djebel El Haouareb. Cet aquifère constitue l'exutoire naturel de la nappe d'Aïn Baïdha et a été individualisé pour la première fois par Béchir Chadly en 1990. L'exutoire de cet aquifère, qui est aussi alimenté par les infiltrations du barrage d'El Haouareb, est la nappe de Kairouan. Cette dernière reçoit les eaux de l'aquifère amont de deux manières : par les émergences de l'aval de l'évacuateur des crues et par les percolations en profondeurs à travers les calcaires fissurés et au dessus du seul hydraulique d'El Haouareb. Le fonctionnement de l'ensemble de ce système est schématisé dans l'annexe n° 14.

Avec la mise en eau du barrage d'El Haouareb, on a constaté un certain rehaussement des niveaux piézométriques des nappes avales et amont. Pour la nappe avale de Kairouan l'influence s'est fait sentir jusqu'au delà du piézomètre A situé à 14 Km du barrage. Tandis que dans la nappe amont d'Aïn Baïdha l'influence a été ressentie de manière moins importante sur un rayon d'environ 5 Km de la digue du barrage.

La mise en eau du barrage d'El Haouareb a aussi provoqué l'augmentation du débit des émergences qu'on avait tenté pendant la construction de colmater par les injections de ciments sans y parvenir totalement. Ces émergences ont été jaugées à raison d'une fois les deux semaines en moyenne, et ce depuis 1989. Avec ces mesures, dont la qualité laisse à désirer, on a essayé de modéliser les émergences de l'aval de l'évacuateur des crues en fonction de la cote dans la retenue. On a obtenu un modèle, constitué de deux équations qui sont valables successivement de la mise en eau du barrage à été 1994 et d'automne 1994 à fin 1998, avec lequel on a chiffré la quantité d'eau sortant du système par les émergences.

Mise à part le modèle des émergences, le bilan en eau souterraine a été effectué en tenant compte de l'infiltration de la retenue d'El Haouareb et de l'apport de la nappe d'Aïn Baïdha. L'infiltration de la retenue d'El Haouareb a été modélisée dans la deuxième partie de cette étude consacrée au bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb. Tandis que l'apport de la nappe d'Aïn Baïdha a été fourni par le modèle numérique de cette nappe qui a été élaboré par Baba Sy à l'aide du Logiciel Multic.

Dans l'élaboration du bilan nous avons supposé que vu la taille de ce système, ce qui y rentre est immédiatement acheminé vers l'aval. Ceci suppose que la variation de stock est nulle et que les entrées équivalent aux sorties au pas journalier. Les résultats fournis par ce bilan font ressortir que, depuis la mise en eau du barrage d'El Haouareb jusqu'au 31 décembre 1998, 178 millions de m³ d'eau ont transité par ce système, dont 130 millions par l'infiltration et 48 par la nappe d'Aïn Baïdha. Parmi ces entrées, 96 millions de m³ sont sortis par les émergences et 82 millions par les percolations en profondeur.

La moyenne interannuelle des entrées par l'infiltration est estimée à 14.3 millions de m³ et 5.2 millions de m³ comme entrées par la nappe d'Aïn Baïdha, sur les 9 ans d'existence du barrage. Alors qu'on a une moyenne interannuelle de 10.4 et 9.1 millions de m³ pour les sorties respectivement par les émergences et les percolations en profondeur.

L'évaluation de l'impact du barrage d'El Haouareb sur la recharge de la nappe de la plaine de Kairouan donne en moyenne un rapport de 71 % entre le volume ayant atteint la nappe et celui infiltré (122 millions de m³). Ce taux est plus fort au début de la mise en eau du barrage, il s'atténue au fur du temps à cause des effets cumulés des différentes périodes de sécheresse ayant sévi sur la région.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le thème de cette étude est l'élaboration du bilan et modélisation du système d'El Haouareb. Ce dernier est composé non seulement du barrage d'El Haouareb stockant ses eaux de surface, mais aussi de son souterrain qui est à la confluence de plusieurs systèmes aquifères dont les deux principaux : la nappe du synclinal d'Aïn Baïdha et celle de la plaine de Kairouan.

Nous avons commencé par le bilan en eau de surface de ce système qui consistait à faire le bilan hydrologique du barrage d'El Haouareb. On a relevé l'existence de deux inconnues dans l'équation du bilan en eau de surface : les apports qui ne sont pas mesurés à l'entrée du barrage et l'infiltration du site de la retenue d'El Haouareb. Cette équation admettant ainsi plusieurs solutions, il a fallu trouver un moyen de la résoudre.

Nous avons donc décidé de modéliser l'infiltration de la retenue d'El Haouareb ce qui nous aurait permis de rester avec une seule inconnue dans notre équation de bilan. La modélisation de l'infiltration en fonction de la cote de la retenue d'El Haouareb a été faite en travaillant sur des périodes considérées sans apports qui ont été définies à l'aide de quatre indices : pas de pluies sur le site et ses alentours, le débit mesuré à Haffouz est inférieur à 50 l/s, la variation du niveau de la retenue est toujours négative, et la durée des périodes sans apports est au moins de 15 jours pour diminuer l'influence des erreurs de mesures.

Avec ces quatre indices nous avons définies les périodes sans apports dans lesquelles nous avons résolu l'équation de bilan en eau de surface en considérant que l'infiltration était la seule inconnue à déterminer. Le modèle ainsi obtenu a été corrigé en y rajoutant les débits d'étiages, des périodes considérées, calculés à Sidi Boujdaria, à partir de ceux mesurés à Haffouz, qui sont supposés se propager jusqu'au barrage d'El Haouareb. Pour cela on a au préalable déterminé une relation entre les débits d'étiages de ces deux stations.

Le modèle d'infiltration obtenu montre que le colmatage de cet ouvrage a eu lieu avec les crues d'avril 1991 qui correspondent aux plus hautes eaux jamais atteintes par le barrage. Ensuite il y a eu une lente diminution de l'infiltration pour une même cote en fonction du temps et du dépôt des sédiments.

D'autre part, les débits d'infiltration calculés par ce modèle, qui a l'avantage de tenir compte implicitement du facteur temps, sont largement supérieurs à ceux simulés par nos prédécesseurs sur ce barrage. Ce qui voudrait dire que les études antérieures auraient sous-estimé l'ampleur des fuites du barrage d'El Haouareb.

Après avoir modélisé l'infiltration du barrage d'El Haouareb en fonction de la cote de son plan d'eau, nous avons résolu l'équation du bilan en eau de surface qui ne restait qu'à une inconnue : les apports au barrage d'El Haouareb.

Les apports ainsi obtenus ont été comparés, pour la validation, à ceux mesurés à la station de Haffouz. Un rapport de 1.2 a été obtenu entre les volumes d'eau calculés au barrage et ceux mesurés à la station de Haffouz. Ce rapport est faible comparativement aux superficies drainées (dont le rapport est de 1.8). Ceci peut s'expliquer soit par les erreurs de mesures au barrage d'El Haouareb et à la station de Haffouz dont l'étalonnage est complètement instable, soit par le fait que c'est la partie amont limitée à la station de Haffouz qui rapporte plus d'eau que le reste du bassin au barrage d'El Haouareb.

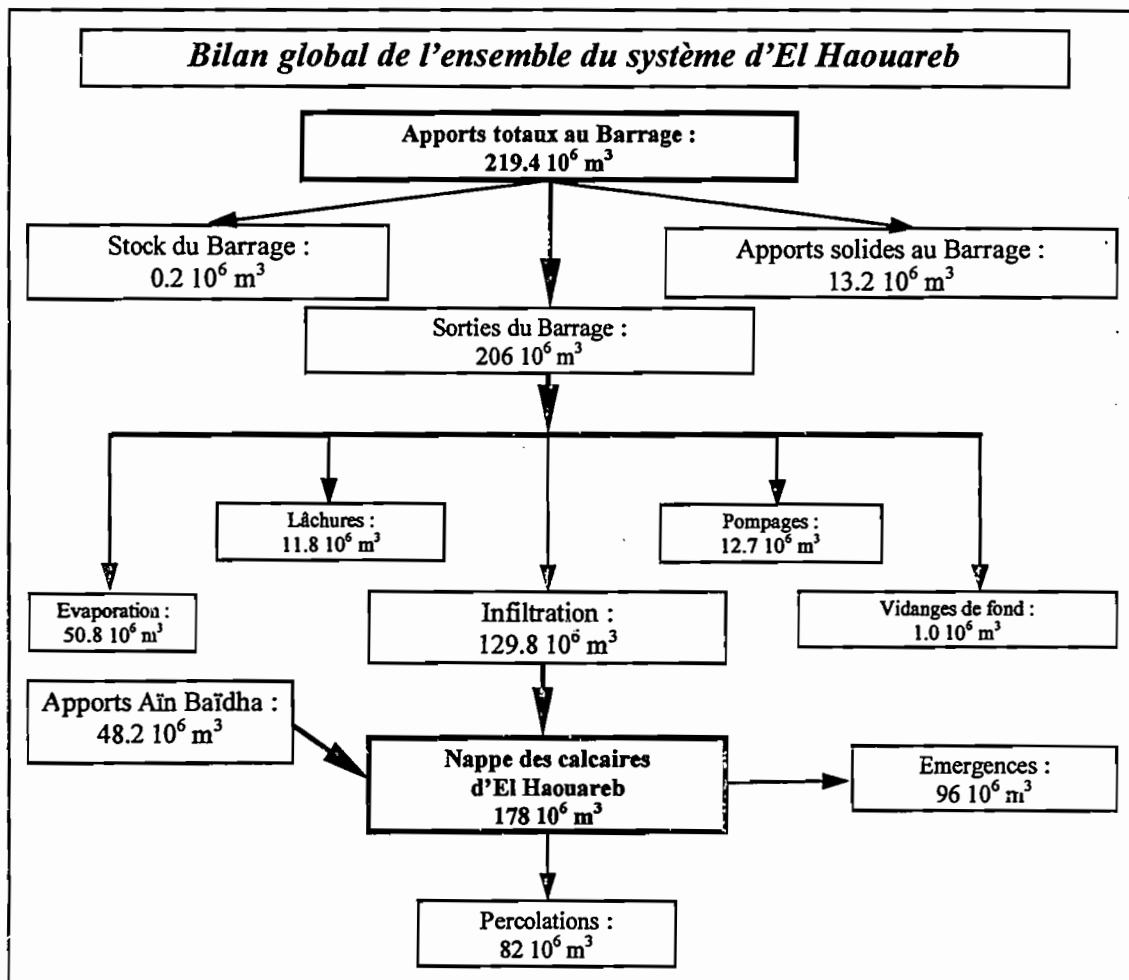
Par la suite nous avons entamé le bilan en eau souterraine dont l'équation est composée d'éléments suivants : l'infiltration de la retenue d'El Haouareb et le transfert souterrain de la nappe d'Aïn Baïdha constituant les apports au système, les émergences et les percolations en profondeur vers la nappe de Kairouan comme sorties du système souterrain d'El Haouareb. L'hypothèse prise en considération était de supposer que toute entrée dans le système était directement acheminée vers l'aval, ce qui veut dire que notre système n'admet pas de stockage.

Les inconnues de cette équation de bilan sont les apports d'Aïn Baïdha et les percolations en profondeur vers la nappe de Kairouan, l'infiltration et les émergences ayant été modélisées à partir des mesures faites sur le terrain.

Les apports de la nappe d'Aïn Baïdha ont été calculés par le modèle mathématique de cette nappe élaboré par Baba Sy à l'aide du logiciel Multic. Ainsi on a officié le bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb.

Le bilan global du système d'El Haouareb, au 31 décembre 1998 a été chiffré comme ci-après. Il en ressort que la grande partie du volume d'eau parvenu au barrage est perdue par les processus non contrôlés notamment par l'infiltration (63 % des sorties du barrage) et par l'évaporation (25 % des sorties du barrage).

Une bonne partie de l'infiltration sort par les émergences, le reste percole en profondeur vers la nappe aval de Kairouan par les fissures des calcaires et au dessus du seuil hydraulique d'El Haouareb.

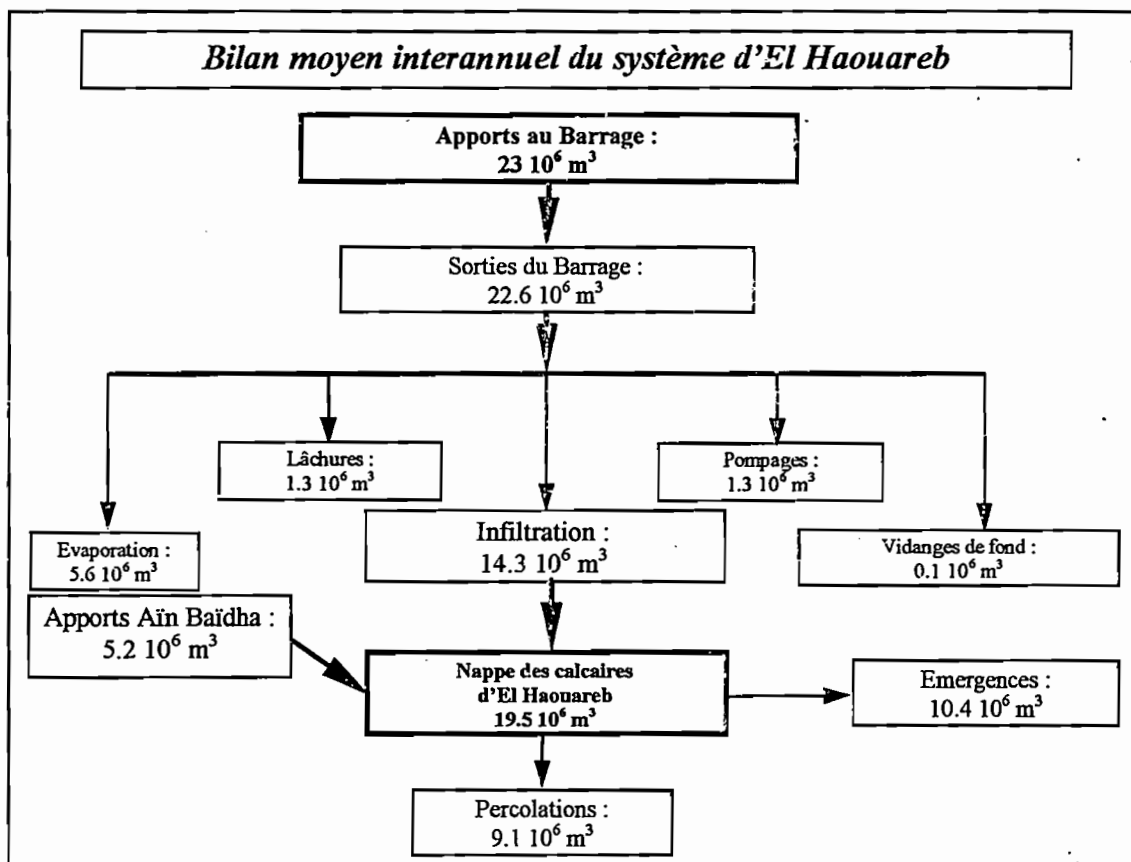


On observe aussi sur ce barrage d'El Haouareb un important phénomène d'envasement, conséquence de l'érosion sur le bassin de Merguellil. En moyenne les apports solides sont chiffrés à 1.4 millions de m^3 par an. Ce qui correspond à une érosion spécifique du bassin versant de Merguellil de plus de 1500 tonnes/ Km^2/an à El Haouareb.

Les apports moyens interannuels au barrage d'El Haouareb ont été estimés, sur les 9 ans d'existence, à 23 millions de m^3 par an. Ils sont inférieurs à la moyenne calculée dans la monographie (37.9 millions de m^3 à Sidi Boujdaria). Bien que les plus gros apports annuels enregistrés au barrage d'El Haouareb soit de 41.5 millions de m^3 , la moyenne d'apports obtenue est amoindrie par les deux périodes de sécheresses ayant sévi sur la région depuis la mise en eau de ce barrage.

Si on compare avec les valeurs préconisées par Chaieb pour l'alimentation de la nappe de Kairouan par le barrage d'El Haouareb (des lâchers de 19 millions de m³ par an), on peut dire en considérant seulement le bilan en eau souterraine (19.5 millions de m³), que cette valeur a été en moyenne respectée. Si on y rajoute les lâchers et les vidanges de fonds, on se rend compte que la nappe de la plaine de Kairouan a reçu plus qu'il ne fallait pour maintenir son régime naturel d'écoulement.

Evidement cette recharge de la nappe de Kairouan par le barrage d'El Haouareb ne s'est pas effectuée comme d'habitude de façon homogène sur l'ensemble de la zone d'influence de l'oued Merguellil. Elle s'est concentrée dans la partie amont de la nappe de Kairouan proche du barrage d'El Haouareb au détriment de la partie aval.



L'évaluation de l'impact du barrage sur la nappe de Kairouan a révélé que, en moyenne 71 % des volumes infiltrés (estimés à 122 millions de m³ en décembre 1998) ont effectivement atteint la nappe. Ce rapport est plus important à la mise en eau du barrage, il a diminué au fur du temps à cause des effets cumulés des sécheresses de 1994 et de 1997.

Ces résultats ne bouleversent pas les connaissances acquises à partir des travaux antérieurs. Ils les précisent et donnent un premier schéma de fonctionnement du système d'El Haouareb. Ce fonctionnement sera, nous l'espérons, confirmé par l'analyse des eaux de la zone qui est en cours actuellement.

Néanmoins la détermination de certains paramètres peut être améliorée. Notamment, les précipitations sur la retenue, l'évaporation en tenant compte du vent, un suivi plus précis et permanent des émergences, et l'amélioration de la section de mesure des écoulements de Haffouz à défaut de leur contrôle direct à l'entrée de la retenue.

Et au niveau souterrain, une meilleure connaissance de la piézométrie au sud de la zone de la nappe de Kairouan étudiée (Dhra Affan) pourrait aider à mieux cerner la recharge de cette nappe.

Mais surtout cette étude montre qu'il faut améliorer la connaissance du fonctionnement de ces différents réservoirs interconnectés, mieux maîtriser les évaluations des apports du bassin ce qui ouvre la voie à de nouvelles études.

Références bibliographiques

- Abdulaziz S. Al-Turbak & Fouad F. Al -Muttair, 1989 : Evaluation of dams as a recharge method. International journal of Water Resources Development - Volume 5 - Number 2, 119-124p.
- Ayadi M., 1986 : Etude du ruissellement dans les bassins des oueds Zeroud et Merguellil. Mémoire du diplôme d'études approfondies à la Faculté des Sciences de Tunis.
- Baba Sy, 1999 : Modélisation de la nappe d'Aïn Baïdha. 65p + annexes.
- Bouzaiane, Chaieb et. Maalel, 1993 : Recharge de la nappe de Kairouan par les lâchers du barrage " El Haouareb " sur oued Merguellil - Campagne du 19 Avril au 8 Mai 1993 - Rapport de Synthèse, DGRE - Tunis, 30p.
- Bouzaiane & Lafforgue, 1986 : Monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil. DGRE - ORSTOM - Tunis, 1058p.
- Chadly B., 1990 : Etat provisoire de la piézométrie au niveau du barrage d'El Haouareb, DGRE - Tunis, 15p.
- Chadly B., 1992a : Etat du réseau piézométrique du Kairouanais - Situation de Janvier 1992, DGRE - Tunis, 16p.
- Chadly B., 1992b : Note sur l'évolution de la nappe de Kairouan après la fermeture du barrage d'El Haouareb, DGRE - Tunis, 24p.
- Chaieb H., 1988 : Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques de la plaine de Kairouan. Mémoire de DEA en Sciences de la terre à la Faculté des sciences, DGRE - Tunis. 77p + annexes.
- DGRE, 1997 : Annuaire piézométrique de Tunisie. Ministère de l'Agriculture, 255p.
- Direction CES, 1986 : Aménagements antiérosifs du bassin versant de l'oued Merguellil. Ministère de l'Agriculture - Tunis.
- Direction CES & ORSTOM, 1996 : Annuaire Hydrologique des lacs collinaires 1994-1995. Tunis, 140p.

- FAO, 1986 : Les besoins en eau des cultures. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 24. Rome.
- Garetta Ph. & Our Ghemi A., 1999 : Résultats des nivellements de 1997/1998 et mise à jour de la bathymétrie de la retenue d'El Haouareb; Evaluations des apports en sédiments (IRD - DG/EGTH).
- Hamza M., 1976 : Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe d'Aïn El Baïdha, DRE - Tunis. 171p + annexes.
- Hayouni S., 1999 : Optimisation du système hydraulique du Kairouanais en vue d'un transfert d'eau. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation à l'INAT, 214p.+ annexes.
- Hedhli Amel, 1997 : Comportement mécanique du barrage d'El Haouareb, Tunis - INAT, 79p.
- Jacobs A.F.G. and Al., 1998 : Temperature variation in class A evaporation Pan. Journal of Hydrology 206, 75-83p.
- Kallel R. et al., 1975 : Etude hydrologique préliminaire des oueds Zeroud et Merguellil. Ministère de l'Agriculture DRE - Tunis.
- Kingumbi A., Juillet 1997 : Caractérisation morphométrique du bassin versant de Merguellil - Application a la simulation des écoulements de surface et à l'érosion, E.S.I.E.R. Medjez El Bab, 59p + annexes.
- Nasser, 1997 : Hydrologie du seuil d'El Haouareb avant et après la mise en eau du barrage - étude sur modèle numérique. Projet de fin d'études à la Faculté des Sciences de Tunis, 57p.
- Pouyaud B., 1986 : Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec - Exemples du lac Bam et de la mare d'Oursi (Bourkina-Faso), du lac Tchad et d'açudes du nord-est brésilien. Études et thèses - Editions de l'ORSTOM, 254p.
- Rabhi J., 1998 : Etude hydrologique et aménagements du haut bassin versant du Merguellil. Projet de fin d'études d'ingénieur (ORSTOM/INAT) - Tunis, 66p.
- Riou Charles, 1975 : La détermination pratique de l'évaporation - Application à l'Afrique Centrale. Mémoire ORSTOM n° 80 Paris.
- Scott A. Condie & Ian T. Webster, 1997 : The influence of wind stress, temperature,

and humidity gradients on evaporation from reservoirs. Water Resources Research, Volume 33, Number 12. 2813-2822p.

- Smaoui A, 1984 : Contribution Géologique et géotechnique du site du barrage EL HAOUAREB sur l'oued Merguellil, SFAX.
- Smaoui Moncef, Juin 1986 : Débits de fuite et gestion du barrage El Haouareb. ENIT - Tunis, 63p.
- SNC, 1984 : Barrage EL HAOUAREB, Note Technique n° 7010.15, Etudes d'infiltration des puits de décharge.

Références des cartes topographiques utilisées

- OTC, 1993a : Nouvelle carte de la Tunisie, 1/50 000, feuille d'Ash-shbika NI-32-XXII-4b. 1^{ère} Edition. Cité Olympique - El Menzah - Tunisie.
- OTC, 1993b : Nouvelle carte de la Tunisie, 1/50 000, feuille de Haffouz NI-32-XXII-4a. 1^{ère} Edition. Cité Olympique - El Menzah - Tunisie.
- OTC, 1987 : Carte de la Tunisie, 1/200 000, feuille de Makthar NI-32-XXII. Cité Olympique - El Menzah - Tunisie.
- OTC, 1957a : Carte de la Tunisie, 1/50 000, feuille de Trozza (LXX). Edition I. Cité Olympique - El Menzah - Tunisie.
- OTC, 1957b : Carte de la Tunisie, 1/50 000, feuille de Pavillier (LXXI) Edition I. Cité Olympique - El Menzah - Tunisie.

Liste des figures

Figure n°	Thème	Page
111	Carte de situation du bassin de Merguellil	3
112	La courbe hypsométrique du bassin versant de Merguellil	5
113	La courbe des pentes du bassin versant de Merguellil	5
114	Réseau hydrographique et stations hydro-pluviométriques du bassin versant de Merguellil	8
121	Les caractéristiques physiques de la retenue d'El Haouareb	16
122	Les périodes d'application des trois courbes caractéristiques d'El Haouareb	17
123	L'évolution du dépôt des sédiments en fonction de la côte du barrage d'El Haouareb	18
124	Les fuites en fonction de la côte du barrage d'El Haouareb (Smaoui, 1986)	19
125	Les fuites en fonction du plan d'eau du barrage d'El Haouareb (Nasser, 1986)	20
211	Schématisation du bilan hydrologique d'une retenue	24
221	Les apports des crues déduits de la variation du plan d'eau du barrage	28
222	Corrélation entre les débits d'étiages de Haffouz et Sidi Boujdaria	28
223	Corrélation entre les pluviométries mensuelles de Trozza et El Haouareb	30
224	Corrélation entre les pluviométries mensuelles d'El Ala et El Haouareb	30
225	Corrélation entre les pluviométries mensuelles d'El Ala et du Trozza	31
226	Les apports de pluies tombant sur la retenue du barrage d'El Haouareb	31
227	Corrélation entre les évaporations mensuelles de Chebika et d'El Haouareb	33
228	Corrélation entre les évaporations mensuelles d'El Haouareb et Fidh Ben Naceur	34
229	Variation du coefficient d'évaporation du bac en fonction de la distance au plan d'eau	35
2210	L'évolution dans le temps des volumes évaporés de la retenue d'El Haouareb	36
2211	Variation annuelle des débits mensuels des vidanges de fonds	39
2212	Fréquences des vents sur la retenue d'El Haouareb selon leurs directions	35
231	L'infiltration en fonction de la côte de la retenue d'El Haouareb (périodes sans apports)	47
232	L'infiltration en fonction de la côte de la retenue d'El Haouareb (moyennes mobiles)	49
233	L'évolution de l'infiltration en fonction du volume d'eau dans la retenue d'El Haouareb	50
241	L'évolution dans le temps des fluctuations journalières des apports d'étiages	54
242	L'évolution des apports mensuels calculés au barrage d'El Haouareb	55
243	Comparaison entre volumes mensuels mesurés à Haffouz et ceux calculés au barrage	57
244	Comparaison des volumes journaliers mesurés à Haffouz et ceux calculés au barrage	58
245	Comparaison entre volumes cumulés mesurés à Haffouz et ceux calculés au barrage	59
246	Bilan global du barrage d'El Haouareb	60
247	Les parts des éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb	61
248	Répartition annuelle des apports moyens mensuels au barrage d'El Haouareb	63
249	L'évolution des sorties du barrage d'El Haouareb en fonction du temps	64
2410	L'évolution des apports au barrage d'El Haouareb en fonction du temps	66
2411	La comparaison des apports et sorties du barrage d'El Haouareb en fonction du temps	67
311	Carte des nappes en relation avec le barrage d'El Haouareb	71
312	Coupe litho-stratigraphique du synclinal d'Aïn Baïdha (Hamza, 1976)	72
313	Carte piézométrique de la nappe d'Aïn Baïdha (Hamza, 1976)	75
314	Evolution du niveau d'eau dans la nappe d'Aïn Baïdha à proximité du barrage	76
315	Débit sortant de la nappe d'Aïn Baïdha en fonction de la côte du barrage	78
316	Evolution en fonction du temps du débit de transfert de la nappe d'Aïn Baïdha	78
317	Evolution du niveau piézométrique dans la nappe des calcaires d'El Haouareb	80
318	Evolution du niveau piézométrique dans la nappe de la plaine de Kairouan	81
319	Carte d'isopièzes dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan	82
3110	Evolution du débit des émergences en fonction de la côte dans la retenue d'El Haouareb	84
3111	Evolution en fonction du temps du volume des émergences d'eau d'El Haouareb	85
3112	Courbe de tarissement des émergences de l'aval de l'évacuateur des crues	86
3113	Répartition des parts des éléments du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb	89
3114	Evolution mensuelle des éléments du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb	90
3115	Evolution annuelle des éléments du bilan en eau souterraine du système d'El Haouareb	91
3116	Extrapolation de l'évolution piézométrique des années 80 sur la période d'après barrage	93
3117	Evolution de la remontée dans la nappe de Kairouan en fonction de la superficie couverte	94
3118	Evolution du stock d'eau supplémentaire dans la nappe de Kairouan proche du barrage	96
3119	Impact de la mise en place du barrage d'El Haouareb sur la nappe de Kairouan	97
3120	Schématisation des sorties de la nappe d'Aïn Baïdha	77

Liste des tableaux








Tableau n°	Thème	Page
111	Fréquence des vents de Kairouan en fonction de la vitesse	6
112	Caractéristiques des stations pluviométriques proches du barrage El Haouareb	9
113	Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin de Merguellil	9
114	Comparaison de la pluie d'automne 1969 par rapport à la moyenne de 50 ans	10
121	L'érosion spécifique sur le bassin de Merguellil	18
122	Les débits de fuites d'El Haouareb calculés par le modèle MULTIC (Nasser, 1997)	21
221	Influence du vent sur les mesures d'évaporation du bac d'El Haouareb	35
222	Prélèvements pour l'irrigation dans la retenue d'El Haouareb	38
223	Volume des vidanges de fonds de la retenue d'El Haouareb	39
224	Lâchures de la retenue d'El Haouareb pour l'alimentation de la nappe de Kairouan	40
231	Périodes sans apports correspondant à la première courbe de tarage (de 1989)	45
232	Périodes sans apports correspondant à la deuxième courbe de tarage (de 1994)	45
233	Périodes sans apports correspondant à la troisième courbe de tarage (de 1997)	46
241	Bilan global du barrage d'El Haouareb	60
242	Contributions des différents éléments du bilan de la retenue d'El Haouareb	65
311	Points d'observation des nappes de la zone d'El Haouareb	77
312	Débits sortants de la nappe d'Aïn Baïdha en fonction de la cote d'eau (Babassy, 1999)	77
313	Remontées d'eau dans les piézomètres de la nappe de Kairouan	95
314	Valeurs des surfaces d'égale remontée pour différentes dates	95
315	Volume supplémentaire stocké par la nappe de Kairouan à l'aval d'El Haouareb	98
316	Comparaison des volumes d'eau infiltrés et ceux parvenus à la nappe de Kairouan	98

Liste des annexes









Annexe n°	Thème	Page
1	Carte topographique du bassin versant de Merguellil	111
2	Gradient pluviométrique du bassin versant de Merguellil (Kingumbi, 1997)	112
3	Comparaison de données pluviométriques de la station du barrage et des voisines	113
4	Dispersion du nuage de comparaison des mesures journalières de la pluviométrie	115
5	Dispersion du nuage de comparaison des mesures journalières de l'évaporation	116
6	Schéma de fonctionnement de la station de pompage de la retenue d'El Haouareb	117
7	Valeurs des infiltrations en fonction de la cote d'eau du barrage d'El Haouareb	118
8a	Les parts des différents éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb	121
8b	L'évolution en fonction du temps du stock d'eau de la retenue d'El Haouareb	124
9	Les courbes d'égale remontée du niveau piézométrique de la nappe de Kairouan	125
11	Plan de construction du barrage d'El Haouareb (DGGTH, 1985)	130
10	Carte géologique de la région d'El Haouareb (Hamza, 1976)	131
12	Rose des vents de la région de Kairouan	132
13	Comparaison des volumes prélevés du barrage d'El Haouareb pour l'irrigation et ceux vendus par le CRDA de Kairouan	133
14	Schéma de fonctionnement du système d'El Haouareb depuis la mise en eau du barrage	134
15	Carte de situation des stations de mesure d'évaporation utilisées	135

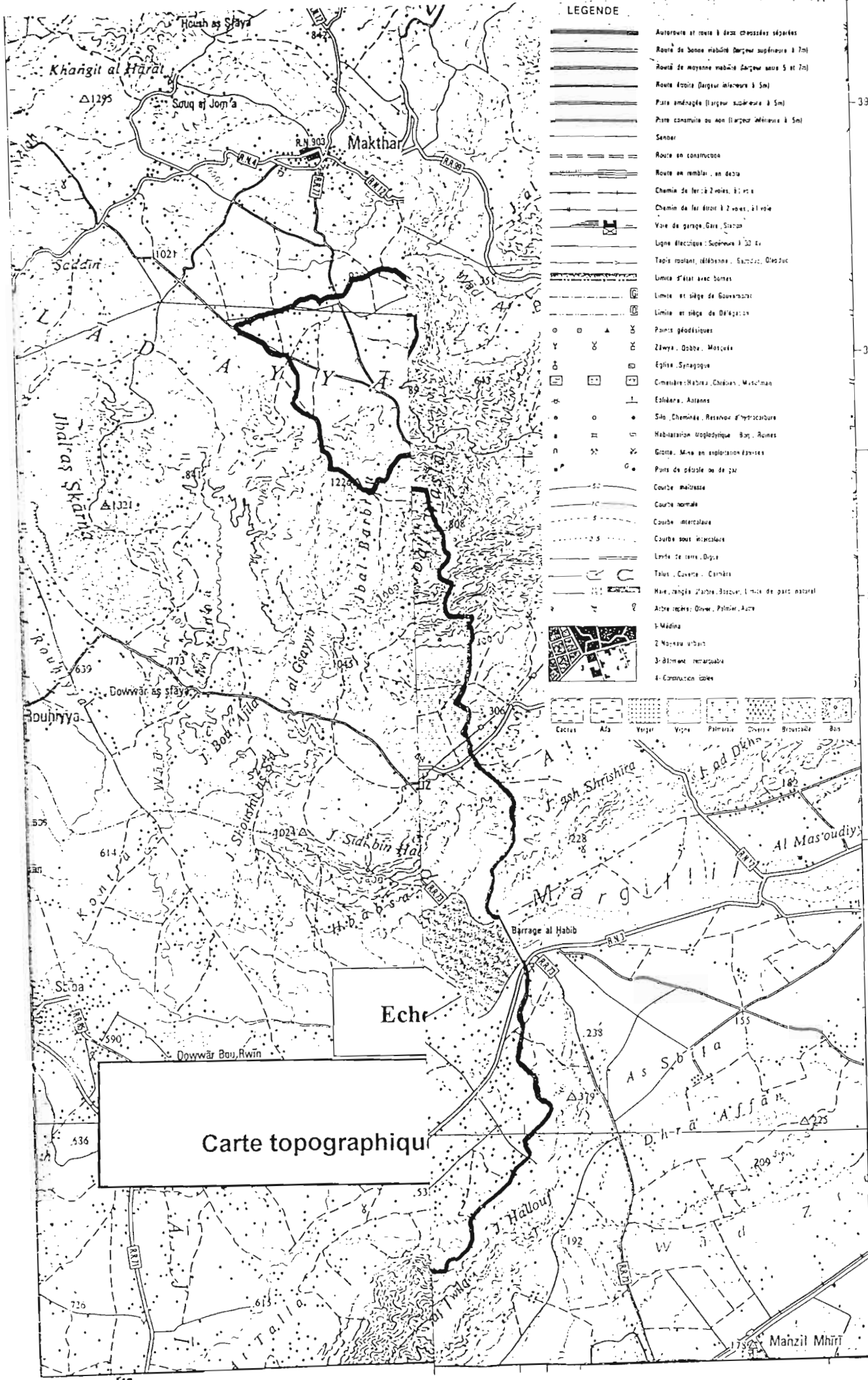
ANNEXES

LEGENDE

-  Autoroute et route à deux chaussées séparées
-  Route de bonne maillon largeur supérieure à 7m
-  Route de moyenne maillon largeur entre 5 et 7m
-  Route étroite largeur inférieure à 5m
-  Piste aménagée (largeur supérieure à 5m)
-  Piste consommée ou non (largeur inférieure à 5m)
-  Sentier
-  Route en construction
-  Route en remblai, en déca
-  Chemin de fer à 2 voies, à voie
-  Chemin de fer étroit à 2 voies, à voie
-  Voie de garage, Gare, Station
-  Ligne électrique: Supérieure à 30 kv
-  Tapis roulant, téléphère, Escalier, Escalier
-  Limite d'état avec bornes
-  Limite et siège de Gouverneur
-  Limite et siège de Délégation
-  Point géodésique
-  Zāwya, Qabba, Mosquée
-  Église, Synagogue
-  Cimetière: Hébreu, Chrétien, Musulman
-  Esplanade, Atrium
-  Site, Cheminée, Réservoir d'hydrocarbure
-  Habitation topographique: Ban, Ruines
-  Grotte, Mine en exploitation épuisée
-  Puits de pétrole ou de gaz
-  Courbe maîtresse
-  Courbe normale
-  Courbe intercalaire
-  Courbe sous intercalaire
-  Limite de terre, Digue
-  Talus, Couvert, Camions
-  Mue, Jangla d'arbre, Bosquet, Limite de parc national
-  Arbre isolés: Olive, Palmier, Acacia
-  1-Médina
-  2-Mosquée urbaine
-  3-Bâtiment remarquable
-  4-Construction isolée



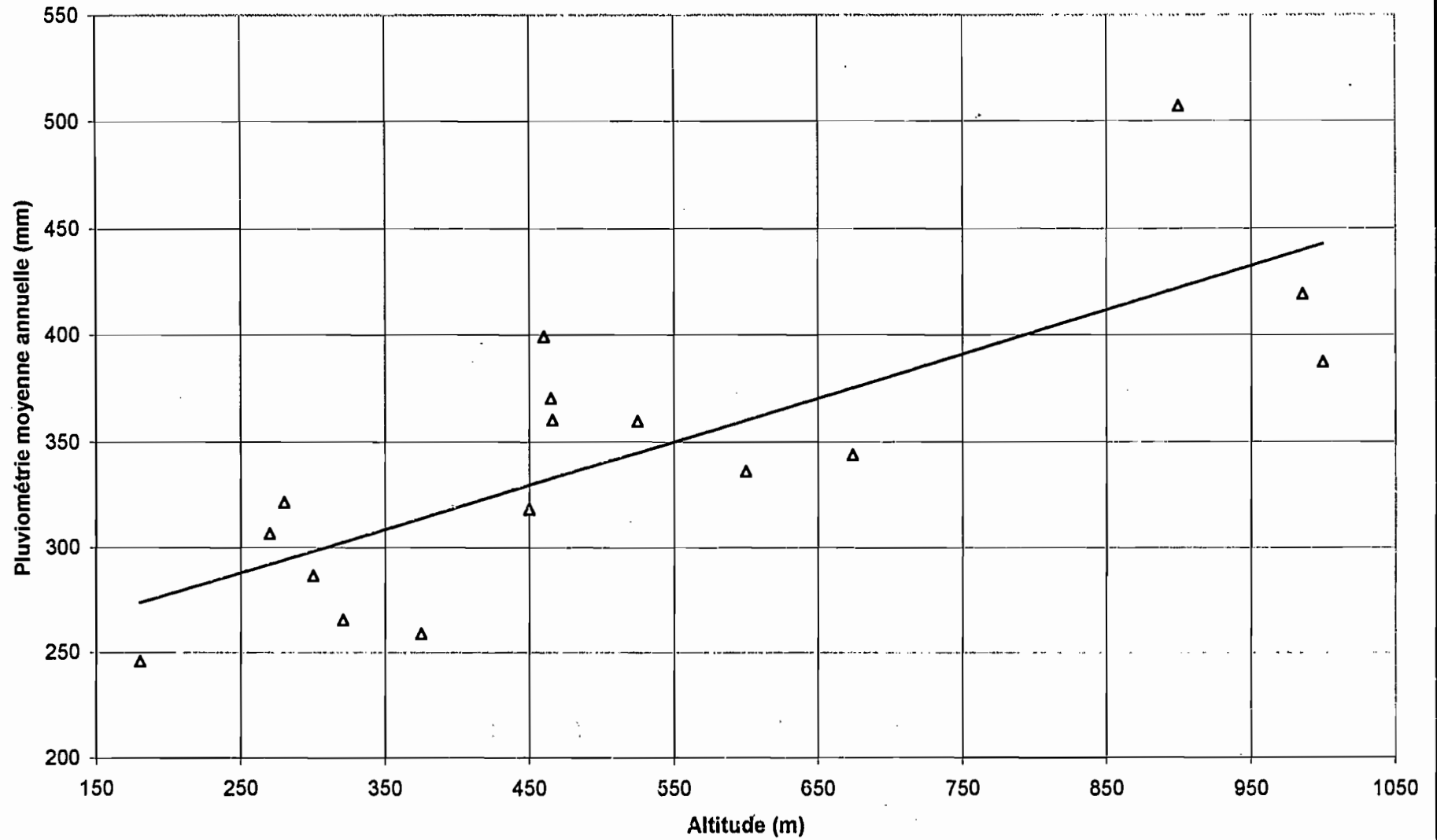
-  Cactus
-  Aca
-  Yagier
-  Yipia
-  Palmier
-  Olive
-  Brousse
-  Bos



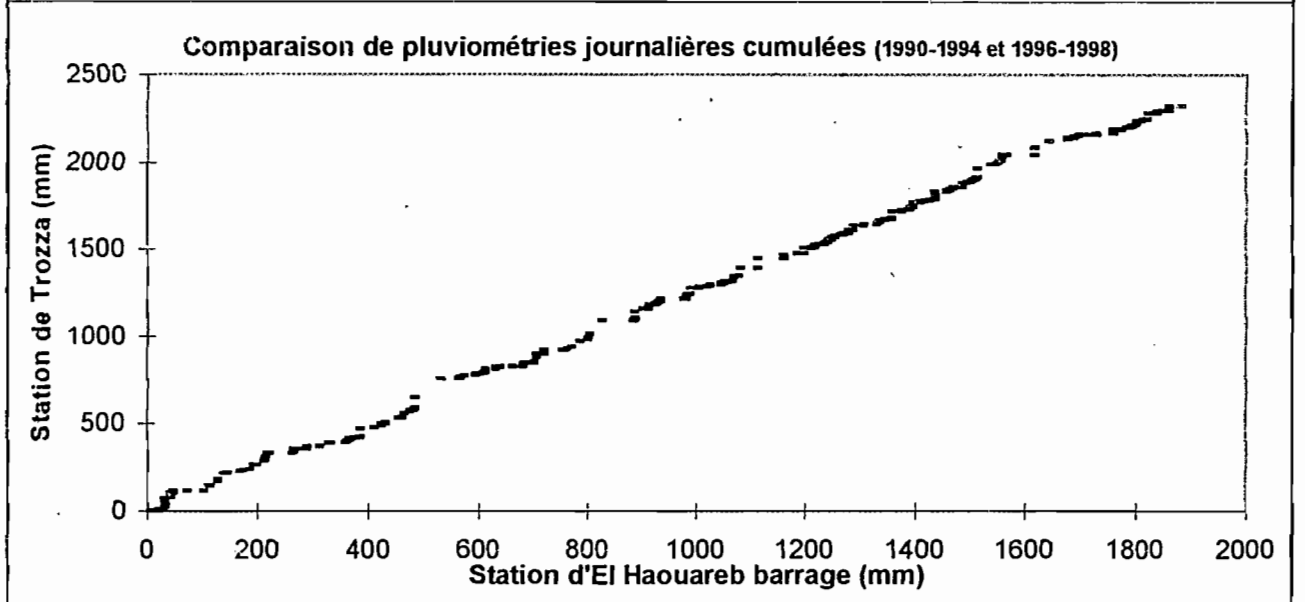
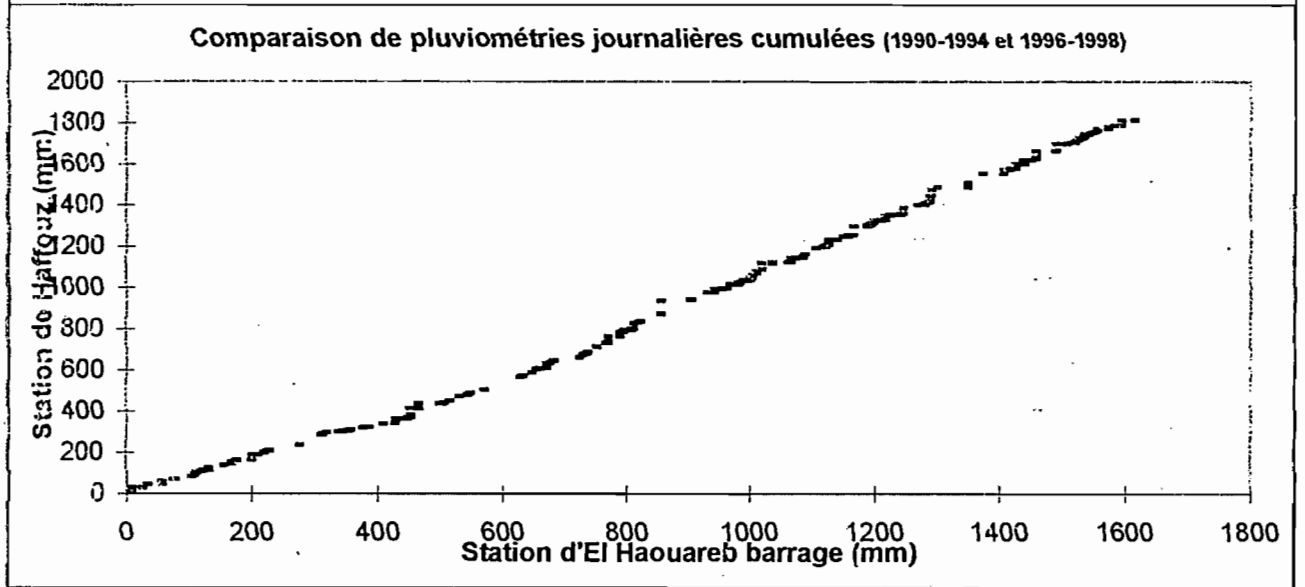
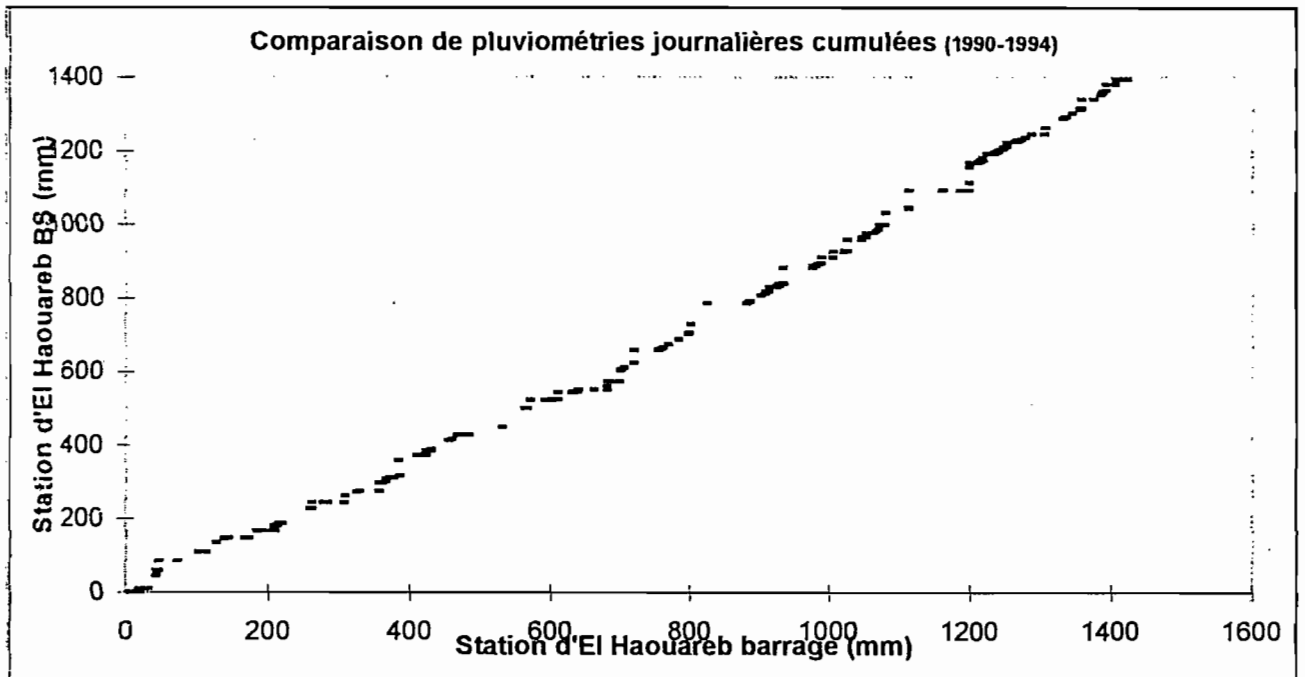
Echr
Carte topographique

3970
3960
35
45
3950
3940
3930
35
30

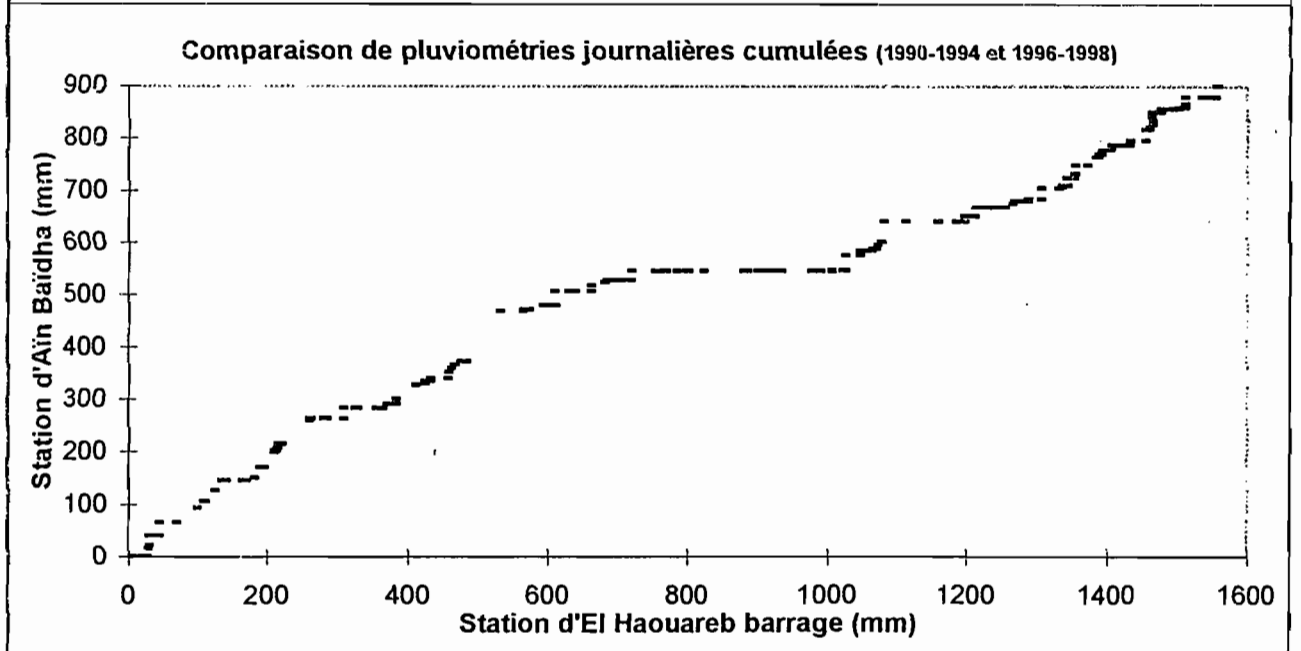
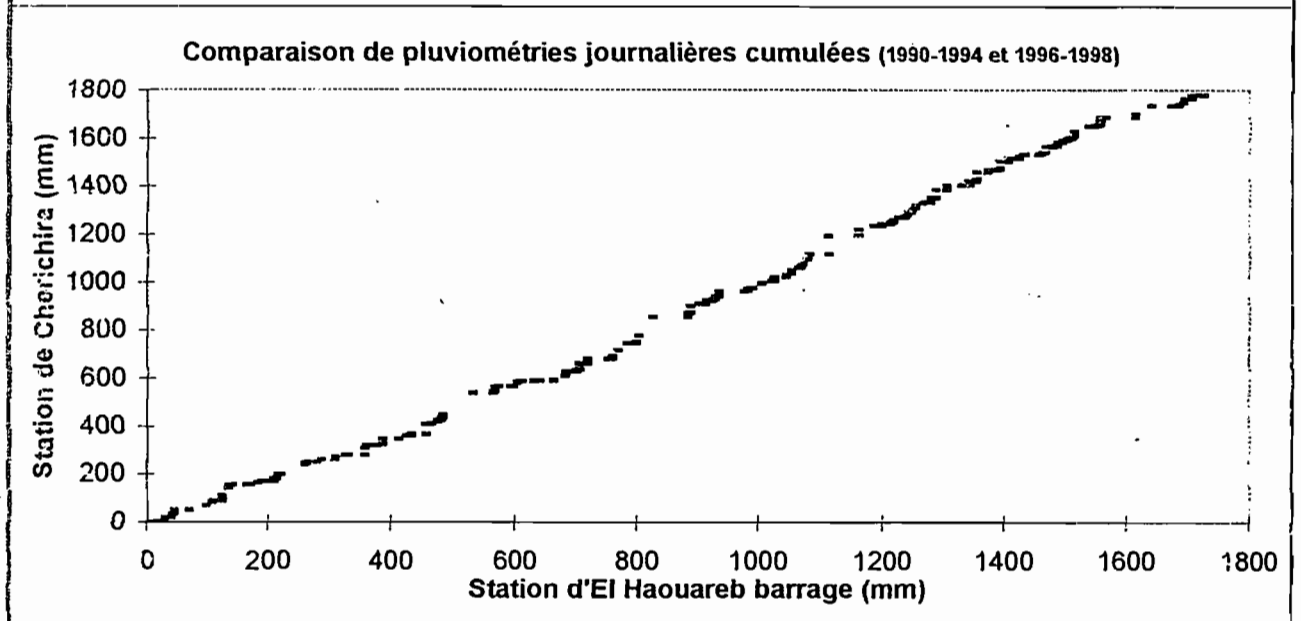
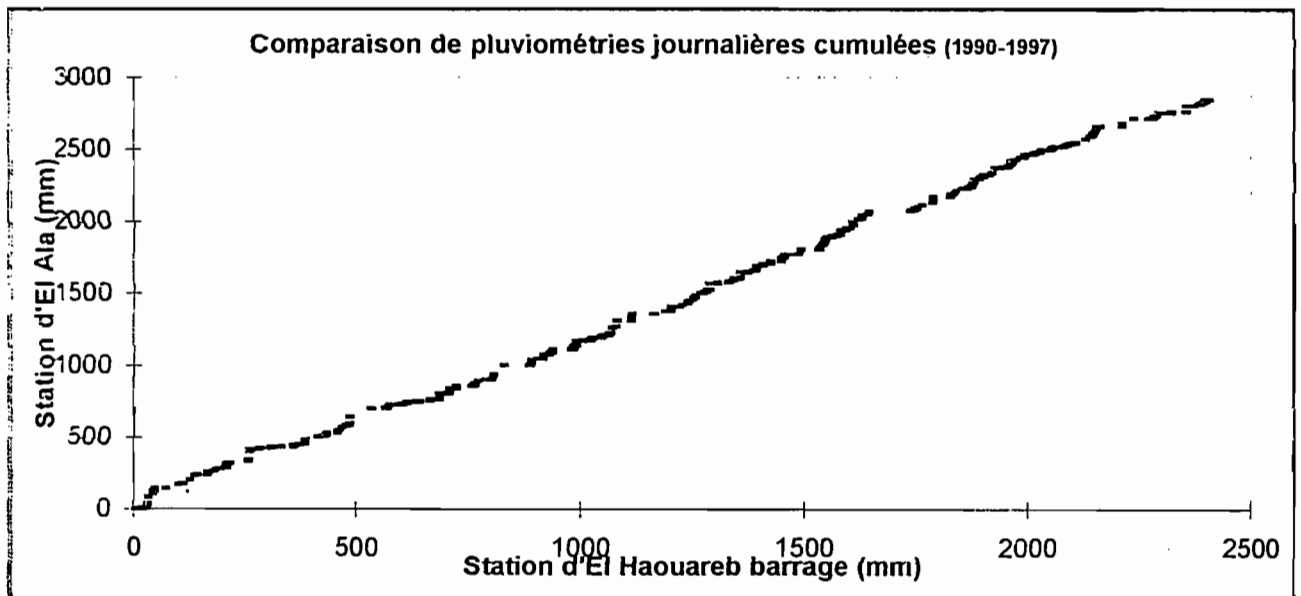
Pluviométrie moyenne annuelle des stations du bassin du Merguelli en fonction de leurs altitudes



Annexe n° 2 : Gradient pluviométrique du bassin versant du Merguelli (Kingumbi, 1997)

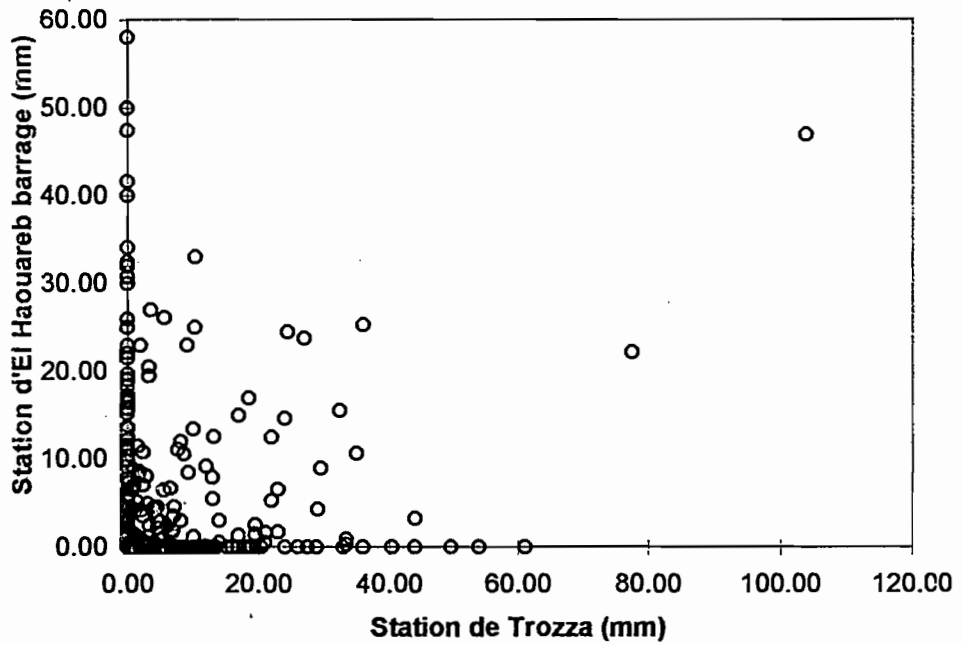


Annexe n° 3 : Comparaison des données pluviométriques de la station du barrage et des stations voisines

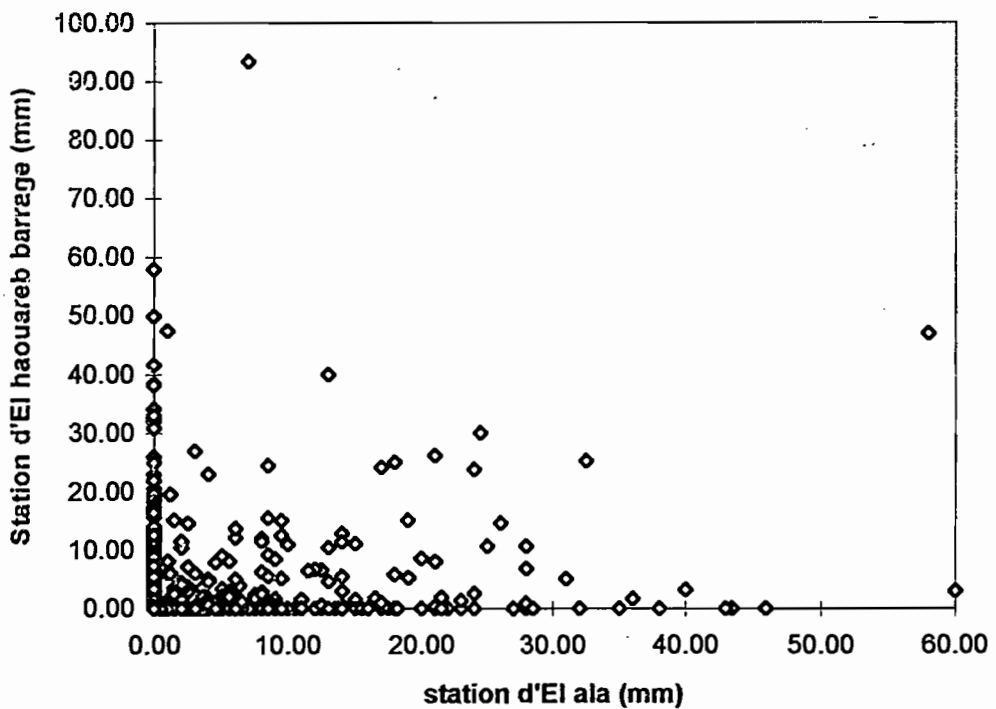


Annexe n° 3 : Comparaison des données pluviométriques de la station du barrage et les stations voisines (suite)

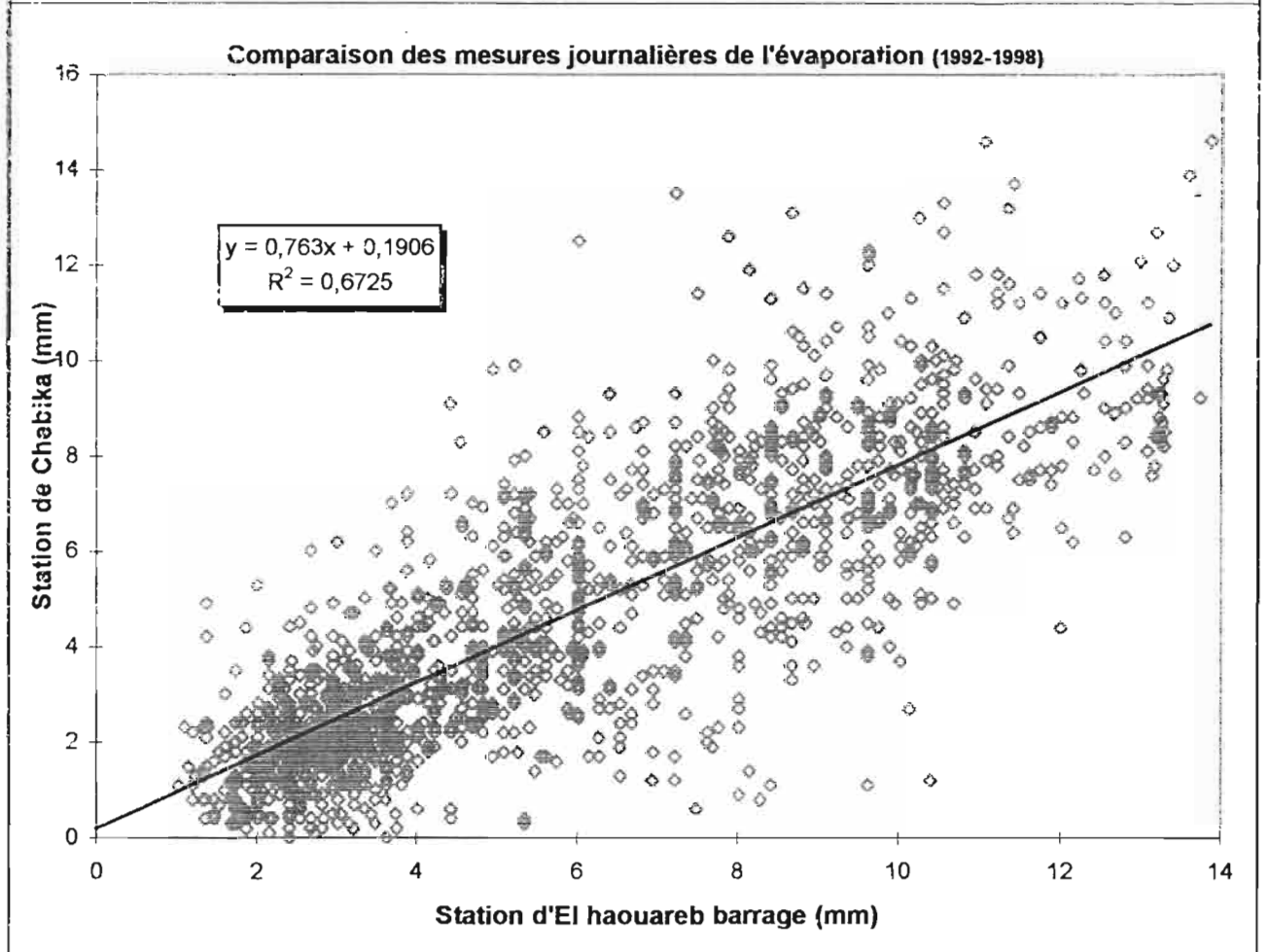
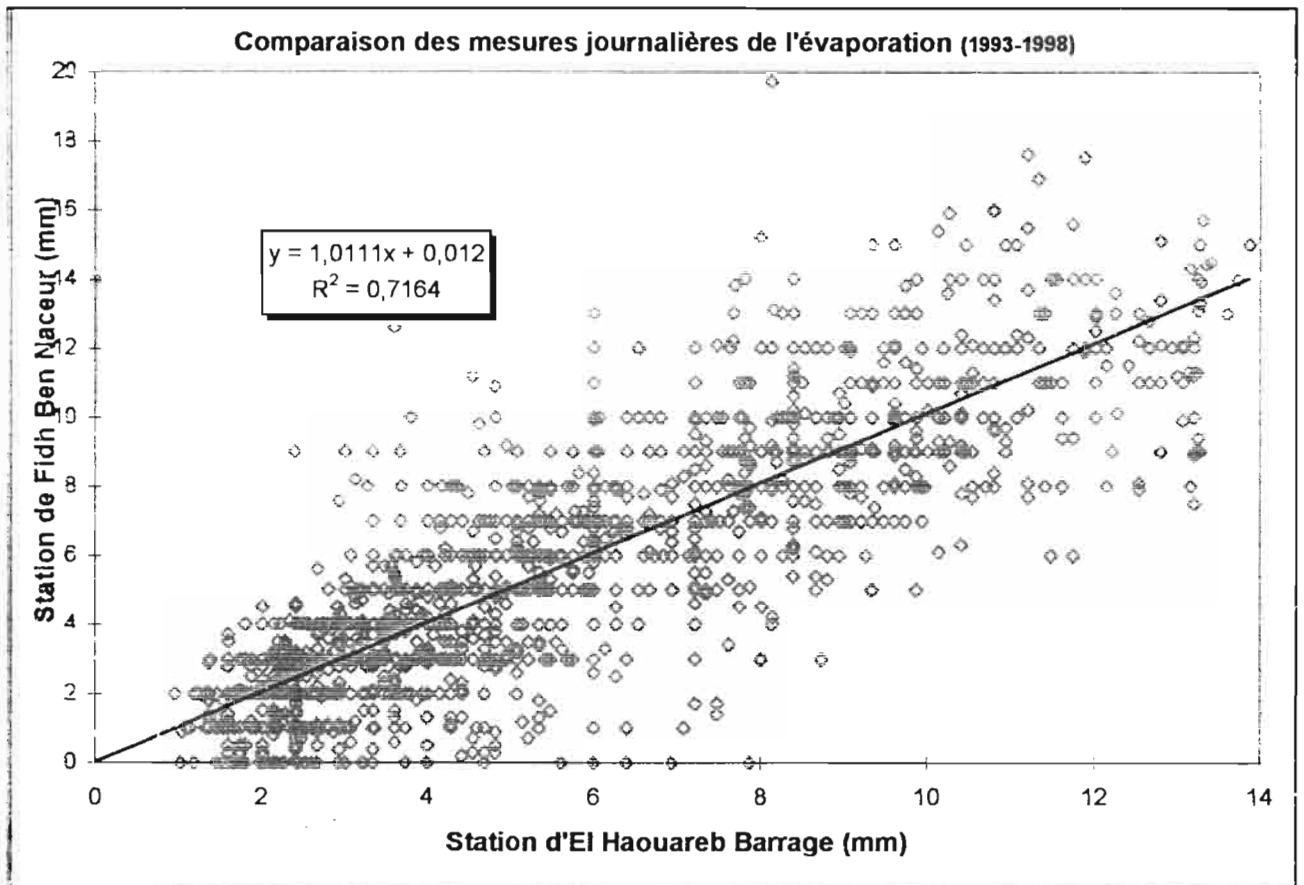
Comparaison des mesures journalières de la pluviométrie



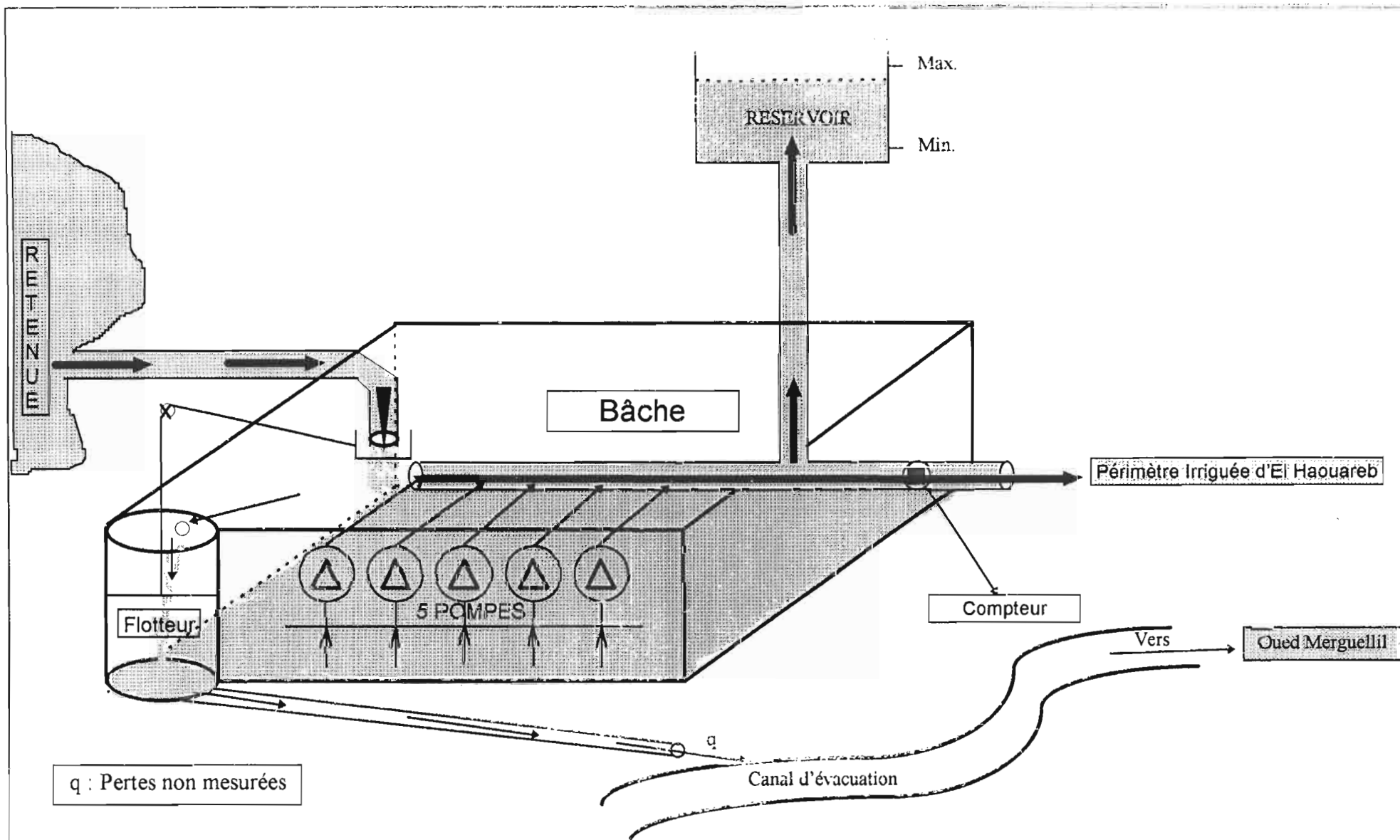
Comparaison des mesures journalières de la pluviométrie



Annexe n° 4 : Dispersion du nuage de comparaison des mesures journalières de la pluviométrie



Annexe n° 5 : Dispersion du nuage de comparaison des mesures journalières de l'évaporation



Annexe n° 6 : Schéma de fonctionnement de la station de pompage de la retenue d'El Haouareb

Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)
Période 1 : Août 89 - Avril 91			Période 2 : Mai 91 - Décembre 95			Période 2 : Mai 91 - Décembre 95		
5-nov-89	203,41	44,51	13-juin-91	209,10	58,08	28-juin-92	208,05	50,22
6-nov-89	203,39	47,20	14-juin-91	209,09	62,70	29-juin-92	208,04	49,78
7-nov-89	203,37	47,21	30-juin-91	208,81	64,47	30-juin-92	208,01	49,45
8-nov-89	203,35	45,30	1-juil-91	208,80	63,88	1-juil-92	207,99	52,38
15-déc-89	203,47	48,14	2-juil-91	208,78	63,06	2-juil-92	207,97	51,96
16-déc-89	203,45	48,97	3-juil-91	208,77	59,43	3-juil-92	207,96	51,59
17-déc-89	203,44	47,87	4-juil-91	208,75	56,76	4-juil-92	207,95	47,94
18-déc-89	203,42	45,50	5-juil-91	208,74	57,38	5-juil-92	207,94	44,33
14-juin-90	207,83	64,32	6-juil-91	208,72	57,81	6-juil-92	207,93	47,38
15-juin-90	207,81	61,45	7-juil-91	208,70	53,32	7-juil-92	207,91	40,26
16-juin-90	207,79	58,96	8-juil-91	208,69	56,27	8-juil-92	207,90	40,25
17-juin-90	207,77	60,45	9-juil-91	208,67	50,24	9-juil-92	207,88	40,21
18-juin-90	207,75	61,33	10-juil-91	208,65	53,57	10-juil-92	207,86	45,76
19-juin-90	207,73	58,02	11-juil-91	208,64	53,50	11-juil-92	207,84	48,14
20-juin-90	207,72	57,34	12-juil-91	208,62	52,24	12-juil-92	207,83	50,56
21-juin-90	207,71	56,21	13-juil-91	208,61	51,25	13-juil-92	207,82	50,59
22-juin-90	207,70	54,58	14-juil-91	208,59	47,92	14-juil-92	207,80	47,06
20-juil-90	207,26	64,69	15-juil-91	208,58	50,41	15-juil-92	207,79	49,99
21-juil-90	207,24	64,49	16-juil-91	208,56	59,09	16-juil-92	207,77	50,10
22-juil-90	207,22	62,35	17-juil-91	208,55	51,28	17-juil-92	207,75	50,03
23-juil-90	207,20	62,75	5-août-91	208,25	65,55	18-juil-92	207,72	49,70
24-juil-90	207,18	65,47	6-août-91	208,22	57,82	19-juil-92	207,70	52,59
			23-août-91	207,95	50,07	20-juil-92	207,68	52,39
			24-août-91	207,93	48,48	21-juil-92	207,67	48,97
			1-nov-91	208,02	54,48	22-juil-92	207,66	51,95
			2-nov-91	208,01	54,39	23-juil-92	207,64	51,50
			3-nov-91	208,00	53,97	24-juil-92	207,62	51,14
			4-nov-91	207,98	54,00	25-juil-92	207,60	47,78
			5-nov-91	207,97	50,80	26-juil-92	207,58	47,59
			6-nov-91	207,96	51,26	27-juil-92	207,56	44,30
			7-nov-91	207,95	46,68	28-juil-92	207,55	47,25
			8-nov-91	207,94	46,65	29-juil-92	207,54	50,38
			9-nov-91	207,92	46,24	30-juil-92	207,52	47,30
			10-nov-91	207,91	49,03	31-juil-92	207,50	46,76
			11-nov-91	207,90	44,04	1-août-92	207,48	40,57
			12-nov-91	207,89	43,47	25-oct-92	207,50	45,28
			13-nov-91	207,88	42,64	25-juin-93	205,76	28,83
			6-déc-91	207,85	43,60	26-juin-93	205,74	28,44
			7-déc-91	207,84	43,14	27-juin-93	205,72	27,92
			8-déc-91	207,83	43,02	28-juin-93	205,71	27,15
			9-déc-91	207,82	42,36	29-juin-93	205,69	26,49
			10-déc-91	207,81	42,86	30-juin-93	205,68	24,08
			1-janv-92	207,60	40,76	1-juil-93	205,66	23,86
			2-janv-92	207,59	40,76	2-juil-93	205,64	23,60
			3-janv-92	207,58	40,83	3-juil-93	205,63	23,13
			4-janv-92	207,57	40,92	22-juil-93	205,34	33,42
			5-janv-92	207,56	41,00	23-juil-93	205,32	30,78
			6-janv-92	207,55	41,13	24-juil-93	205,31	30,34
			7-janv-92	207,54	44,28	25-juil-93	205,30	30,23
			8-janv-92	207,53	44,28	26-juil-93	205,28	27,65
			9-janv-92	207,52	44,46	27-juil-93	205,26	27,33
			10-janv-92	207,51	41,58	28-juil-93	205,24	27,15
			27-juin-92	208,07	54,48	29-juil-93	205,22	28,97

Annexe n° 7 : Valeurs des infiltrations en fonction de la côte d'eau du barrage d'El Haouareb

Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)
Période 2 : Mai 91 - Décembre 95			Période 2 : Mai 91 - Décembre 95			Période 2 : Mai 91 - Décembre 95		
30-juil-93	205,20	26,75	31-mars-94	203,90	33,46	1-avr-95	205,03	29,86
31-juil-93	205,19	26,00	1-avr-94	203,86	31,88	2-avr-95	205,02	29,71
1-août-93	205,17	25,61	2-avr-94	203,83	34,53	3-avr-95	205,01	29,62
2-août-93	205,16	25,16	3-avr-94	203,80	33,03	4-avr-95	205,00	29,31
3-août-93	205,15	24,94	4-avr-94	203,78	32,37	5-avr-95	204,98	27,82
4-août-93	205,13	25,33	5-avr-94	203,77	33,43	6-avr-95	204,95	25,18
11-oct-93	205,50	36,87	6-avr-94	203,75	32,83	14-mai-95	204,38	16,99
12-oct-93	205,49	37,04	7-avr-94	203,72	33,97	15-mai-95	204,36	16,03
13-oct-93	205,47	35,26	8-avr-94	203,69	32,09	16-mai-95	204,35	16,23
14-oct-93	205,46	25,27	9-avr-94	203,66	31,05	17-mai-95	204,34	16,18
13-nov-93	205,14	35,39	10-avr-94	203,62	31,07	18-mai-95	204,33	16,16
14-nov-93	205,13	37,31	11-avr-94	203,59	30,04	19-mai-95	204,32	17,75
15-nov-93	205,12	37,34	12-avr-94	203,56	30,67	20-mai-95	204,31	17,74
16-nov-93	205,11	35,36	13-avr-94	203,52	30,04	21-mai-95	204,30	16,12
17-nov-93	205,10	33,51	26-mai-94	202,65	22,65	22-mai-95	204,28	14,77
8-janv-94	204,57	28,04	27-mai-94	202,63	21,84	23-mai-95	204,27	14,50
9-janv-94	204,56	29,08	28-mai-94	202,61	21,40	24-mai-95	204,26	14,25
10-janv-94	204,54	29,22	29-mai-94	202,58	20,61	25-mai-95	204,25	14,22
11-janv-94	204,53	27,53	30-mai-94	202,56	19,39	26-mai-95	204,24	15,89
12-janv-94	204,52	23,04	31-mai-94	202,54	19,64	27-mai-95	204,22	16,00
13-janv-94	204,50	22,40	1-juin-94	202,50	19,07	28-mai-95	204,21	17,68
14-janv-94	204,49	23,82	2-juin-94	202,48	18,03	29-mai-95	204,20	16,16
15-janv-94	204,48	22,90	9-déc-94	206,65	49,04	30-mai-95	204,19	16,34
16-janv-94	204,45	22,97	10-déc-94	206,64	50,57	8-juil-95	204,53	25,24
17-janv-94	204,41	23,00	11-déc-94	206,62	51,62	9-juil-95	204,51	25,35
18-janv-94	204,37	23,22	12-déc-94	206,61	47,49	10-juil-95	204,50	25,37
19-janv-94	204,34	24,67	13-déc-94	206,59	46,30	11-juil-95	204,49	23,60
20-janv-94	204,32	21,33	14-déc-94	206,58	40,84	12-juil-95	204,47	23,54
21-janv-94	204,29	22,74	17-janv-95	206,10	36,67	13-juil-95	204,46	23,58
22-janv-94	204,25	22,38	18-janv-95	206,09	35,87	14-juil-95	204,44	23,63
23-janv-94	204,23	22,72	19-janv-95	206,08	37,70	15-juil-95	204,42	21,93
24-janv-94	204,22	19,94	20-janv-95	206,07	36,42	16-juil-95	204,41	21,68
25-janv-94	204,20	20,89	21-janv-95	206,06	35,94	17-juil-95	204,40	21,57
26-janv-94	204,18	21,92	22-janv-95	206,05	35,29	18-juil-95	204,38	22,95
27-janv-94	204,15	23,83	23-janv-95	206,03	34,50	19-juil-95	204,37	22,66
28-janv-94	204,14	24,32	24-janv-95	206,01	31,78	20-juil-95	204,35	22,28
29-janv-94	204,12	22,79	19-févr-95	205,66	34,67	21-juil-95	204,33	20,22
30-janv-94	204,10	24,20	20-févr-95	205,64	34,47	22-juil-95	204,32	18,36
31-janv-94	204,07	23,74	21-févr-95	205,63	31,26	23-juil-95	204,31	19,91
1-févr-94	204,06	24,48	22-févr-95	205,61	33,58	24-juil-95	204,29	19,77
2-févr-94	204,04	20,72	23-févr-95	205,59	32,94			
3-févr-94	204,02	18,58	24-févr-95	205,58	33,13			
4-févr-94	204,00	20,60	25-févr-95	205,56	31,20			
5-févr-94	203,98	19,96	22-mars-95	205,23	38,05			
6-févr-94	203,96	19,69	23-mars-95	205,21	34,44			
7-févr-94	203,94	16,86	24-mars-95	205,18	32,62			
8-févr-94	203,93	17,87	25-mars-95	205,15	33,37			
9-févr-94	203,91	15,86	26-mars-95	205,13	32,78			
26-mars-94	204,04	30,72	27-mars-95	205,11	32,07			
27-mars-94	204,02	31,66	28-mars-95	205,09	33,54			
28-mars-94	203,99	31,53	29-mars-95	205,07	34,21			
29-mars-94	203,96	32,78	30-mars-95	205,05	34,37			
30-mars-94	203,93	33,89	31-mars-95	205,04	31,99			

Annexe n° 7 : Valeurs des infiltrations en fonction de la côte d'eau du barrage d'El Haouareb (suite)

Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)	Date	Côte (m)	Moy mobiles (10 ³ m ³)
Période 3 : Janvier 96 - Décembre 98			Période 3 : Janvier 96 - Décembre 98			Période 3 : Janvier 96 - Décembre 98		
2-juil-96	207,69	61,62	30-déc-96	205,76	25,64	18-juin-98	205,22	22,45
3-juil-96	207,67	62,99	31-déc-96	205,75	25,54	19-juin-98	205,19	23,08
4-juil-96	207,64	62,47	1-janv-97	205,74	25,82	20-juin-98	205,17	22,68
26-juil-96	207,25	38,87	2-janv-97	205,73	27,27	21-juin-98	205,14	22,09
27-juil-96	207,23	38,29	3-janv-97	205,71	27,08	22-juin-98	205,12	19,33
28-juil-96	207,21	38,07	4-janv-97	205,70	26,98	23-juin-98	205,10	18,44
29-juil-96	207,18	37,98	24-févr-97	205,34	25,37	24-juin-98	205,07	19,58
30-juil-96	207,17	40,53	25-févr-97	205,32	24,04	25-juin-98	205,05	18,96
31-juil-96	207,15	37,42	26-févr-97	205,31	24,54	26-juin-98	205,02	18,22
1-août-96	207,13	40,73	27-févr-97	205,29	24,70	27-juin-98	204,99	18,53
2-août-96	207,11	38,47	28-févr-97	205,27	21,97	28-juin-98	204,97	16,94
3-août-96	207,10	38,69	25-mars-97	204,82	8,16	29-juin-98	204,94	16,76
4-août-96	207,08	36,27	26-mars-97	204,81	9,57	30-juin-98	204,92	17,30
25-oct-96	206,50	34,96	27-mars-97	204,80	8,38	1-juil-98	204,90	16,33
26-oct-96	206,49	35,14	28-mars-97	204,79	8,83	2-juil-98	204,87	17,81
27-oct-96	206,48	32,88	29-mars-97	204,78	8,85	3-juil-98	204,84	16,64
28-oct-96	206,46	33,17	30-mars-97	204,77	10,43	4-juil-98	204,81	15,68
29-oct-96	206,45	33,14	31-mars-97	204,76	9,30	5-juil-98	204,79	16,40
30-oct-96	206,44	35,41	1-avr-97	204,74	8,46	6-juil-98	204,77	15,76
31-oct-96	206,43	35,16	10-mai-97	204,40	13,06	7-juil-98	204,75	16,12
1-nov-96	206,41	35,41	12-juin-97	203,97	8,01	8-juil-98	204,73	14,79
2-nov-96	206,40	37,68	28-juin-97	203,65	2,10	9-juil-98	204,71	14,71
3-nov-96	206,39	37,30	29-juin-97	203,63	2,37	10-juil-98	204,68	13,96
4-nov-96	206,38	34,63	30-juin-97	203,61	2,29	11-juil-98	204,66	13,09
5-nov-96	206,36	34,04	1-juil-97	203,59	2,57	12-juil-98	204,64	13,45
6-nov-96	206,35	33,46	2-juil-97	203,57	1,95	13-juil-98	204,62	14,00
7-nov-96	206,33	33,22	3-juil-97	203,54	1,70	14-juil-98	204,60	15,23
8-nov-96	206,32	30,60	4-juil-97	203,52	1,48	15-juil-98	204,58	15,46
9-nov-96	206,31	30,40	5-juil-97	203,49	1,06	16-juil-98	204,57	17,02
10-nov-96	206,29	30,49	6-juil-97	203,47	0,70	17-juil-98	204,55	14,47
11-nov-96	206,28	30,90	7-juil-97	203,44	0,93	18-juil-98	204,53	14,46
12-nov-96	206,27	30,45	8-juil-97	203,42	0,97	19-juil-98	204,51	12,99
13-nov-96	206,26	30,37	9-juil-97	203,39	0,77	20-juil-98	204,49	12,75
14-nov-96	206,25	28,01	10-juil-97	203,37	0,00	21-juil-98	204,47	12,38
15-nov-96	206,24	28,15	11-juil-97	203,35	0,37	22-juil-98	204,45	12,88
16-nov-96	206,23	28,04	12-juil-97	203,33	0,19	23-juil-98	204,43	14,98
17-nov-96	206,22	26,03	13-juil-97	203,31	0,50	24-juil-98	204,40	13,42
18-nov-96	206,21	26,39	14-juil-97	203,29	1,17	25-juil-98	204,39	13,81
19-nov-96	206,20	26,40	15-juil-97	203,26	1,60	26-juil-98	204,37	12,83
20-nov-96	206,18	26,51	16-juil-97	203,24	1,25	27-juil-98	204,36	12,10
21-nov-96	206,17	26,77	17-juil-97	203,23	2,02	28-juil-98	204,34	12,24
22-nov-96	206,16	26,97	18-juil-97	203,22	2,28	29-juil-98	204,32	11,10
23-nov-96	206,15	27,47	19-juil-97	203,20	2,85	30-juil-98	204,30	10,08
24-nov-96	206,14	27,87	20-juil-97	203,18	3,12	27-oct-98	204,28	17,66
25-nov-96	206,13	27,71	11-févr-98	207,07	35,66	28-oct-98	204,27	16,39
26-nov-96	206,12	31,55	12-févr-98	207,06	37,53	13-déc-98	203,72	9,21
27-nov-96	206,11	29,29	13-févr-98	207,05	36,56	14-déc-98	203,69	8,94
28-nov-96	206,10	29,02	14-févr-98	207,04	38,59	15-déc-98	203,66	8,63
29-nov-96	206,09	28,48	15-févr-98	207,03	37,89	16-déc-98	203,63	10,89
30-nov-96	206,08	28,19	16-févr-98	207,01	36,88	17-déc-98	203,61	12,52
1-déc-96	206,07	26,25	17-févr-98	207,00	39,36	18-déc-98	203,58	12,15
28-déc-96	205,79	24,62	18-févr-98	206,98	36,16			
29-déc-96	205,78	26,09	17-juin-98	205,24	20,18			

Annexe n° 7 : Valeurs des infiltrations en fonction de la côte d'eau du barrage d'El Houareb (suite)

Date	Apports (10 ³ m ³)	Vidange fond (10 ³ m ³)	LâchersNappe (10 ³ m ³)	Pompage (10 ³ m ³)	Evaporation (10 ³ m ³)	Infiltration (10 ³ m ³)	VolumeBarrage (10 ³ m ³)
							0
août-89	10371	0	0	0	107	394	9869
sept-89	1047	0	0	0	419	1457	9040
oct-89	955	0	0	0	231	1479	8285
nov-89	390	0	0	0	175	1396	7105
déc-89	2163	0	0	0	135	1462	7671
janv-90	16382	0	0	0	143	1597	22313
févr-90	92	0	0	0	322	1659	20424
mars-90	4813	0	0	0	423	1834	22980
avr-90	4477	0	0	0	608	1849	24999
mai-90	3731	208	0	0	731	1926	25865
juin-90	440	0	0	0	998	1844	23463
juil-90	368	0	0	0	1102	1856	20873
août-90	6603	0	0	0	826	1904	24746
sept-90	3793	0	0	0	836	1856	25847
oct-90	3330	0	1404	0	579	1941	25253
nov-90	739	0	0	0	347	1840	23804
déc-90	4018	0	0	0	323	1891	25608
janv-91	2261	0	0	0	246	1914	25709
févr-91	1574	0	0	0	296	1735	25253
mars-91	10441	0	0	0	452	1993	33248
avr-91	4740	0	0	0	666	2010	35313
mai-91	94	0	0	0	959	1893	32549
juin-91	9	0	0	0	997	1741	29820
juil-91	187	0	0	0	1206	1682	27118
août-91	0	0	0	0	995	1561	24561
sept-91	5152	0	0	0	787	1558	27367
oct-91	445	0	0	0	569	1592	25652
nov-91	1346	0	0	0	465	1477	25055
déc-91	426	0	0	0	382	1491	23608
janv-92	867	0	0	0	271	1423	22781
févr-92	7144	2	0	0	319	1369	28234
mars-92	1583	0	0	0	524	1662	27632
avr-92	2179	1	0	0	613	1565	27632
mai-92	2567	0	0	0	770	1633	27796
juin-92	317	0	0	0	1061	1552	25500
juil-92	162	0	0	0	1114	1491	23057
août-92	271	0	0	0	1048	1371	20909
sept-92	4066	0	0	0	768	1241	22965

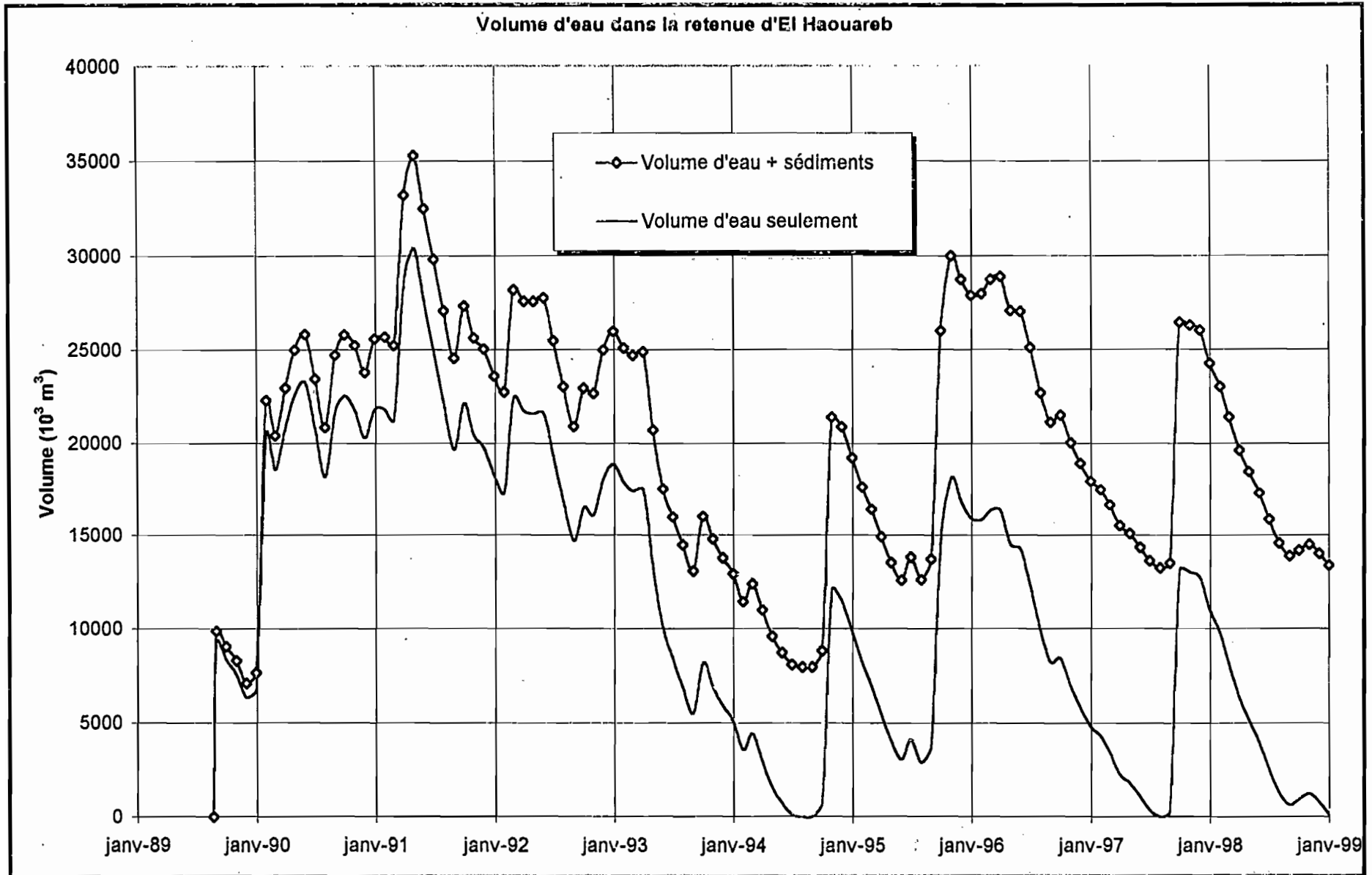
Annexe 8a : Les parts des différents éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb

Date	Apports (10 ³ m ³)	Vidange fond (10 ³ m ³)	LâchersNappe (10 ³ m ³)	Pompage (10 ³ m ³)	Evaporation (10 ³ m ³)	Infiltration (10 ³ m ³)	VolumeBarrage (10 ³ m ³)
sept-92							22965
oct-92	1772	0	0	0	604	1443	22689
nov-92	5940	195	1436	0	491	1501	25006
déc-92	3682	45	646	0	456	1531	26010
janv-93	1277	0	403	0	234	1545	25105
févr-93	1277	0	0	0	291	1382	24709
mars-93	2139	0	0	0	437	1505	24907
avr-93	1017	0	3001	0	807	1412	20704
mai-93	1341	0	2587	0	739	1159	17560
juin-93	173	0	0	0	721	1017	15995
juil-93	242	0	0	0	843	941	14453
août-93	197	0	0	0	725	825	13100
sept-93	4399	74	0	0	512	884	16028
oct-93	102	0	0	0	396	946	14788
nov-93	46	0	0	0	222	837	13775
déc-93	230	0	0	56	190	794	12963
janv-94	149	0	0	742	195	695	11480
févr-94	2087	8	0	331	212	578	12437
mars-94	39	0	0	536	275	646	11019
avr-94	0	0	0	716	253	457	9592
mai-94	0	0	0	212	312	323	8746
juin-94	0	5	0	338	185	114	8104
juil-94	0	0	0	111	0	0	7994
août-94	0	0	0	0	0	0	7994
sept-94	1023	0	0	0	119	61	8837
oct-94	14154	39	0	0	329	1202	21421
nov-94	1075	0	0	10	339	1255	20892
déc-94	228	0	0	420	257	1205	19238
janv-95	161	0	0	407	244	1103	17645
févr-95	252	0	0	290	274	910	16423
mars-95	158	0	0	450	301	911	14918
avr-95	222	0	0	494	330	764	13553
mai-95	360	0	0	71	534	686	12622
juin-95	2394	0	0	0	460	712	13845
juil-95	119	0	0	0	618	699	12646
août-95	2319	11	0	0	482	736	13736
sept-95	15523	366	1228	0	525	1104	26035
oct-95	7181	0	1082	20	495	1616	30004
nov-95	811	0	0	5	410	1613	28787

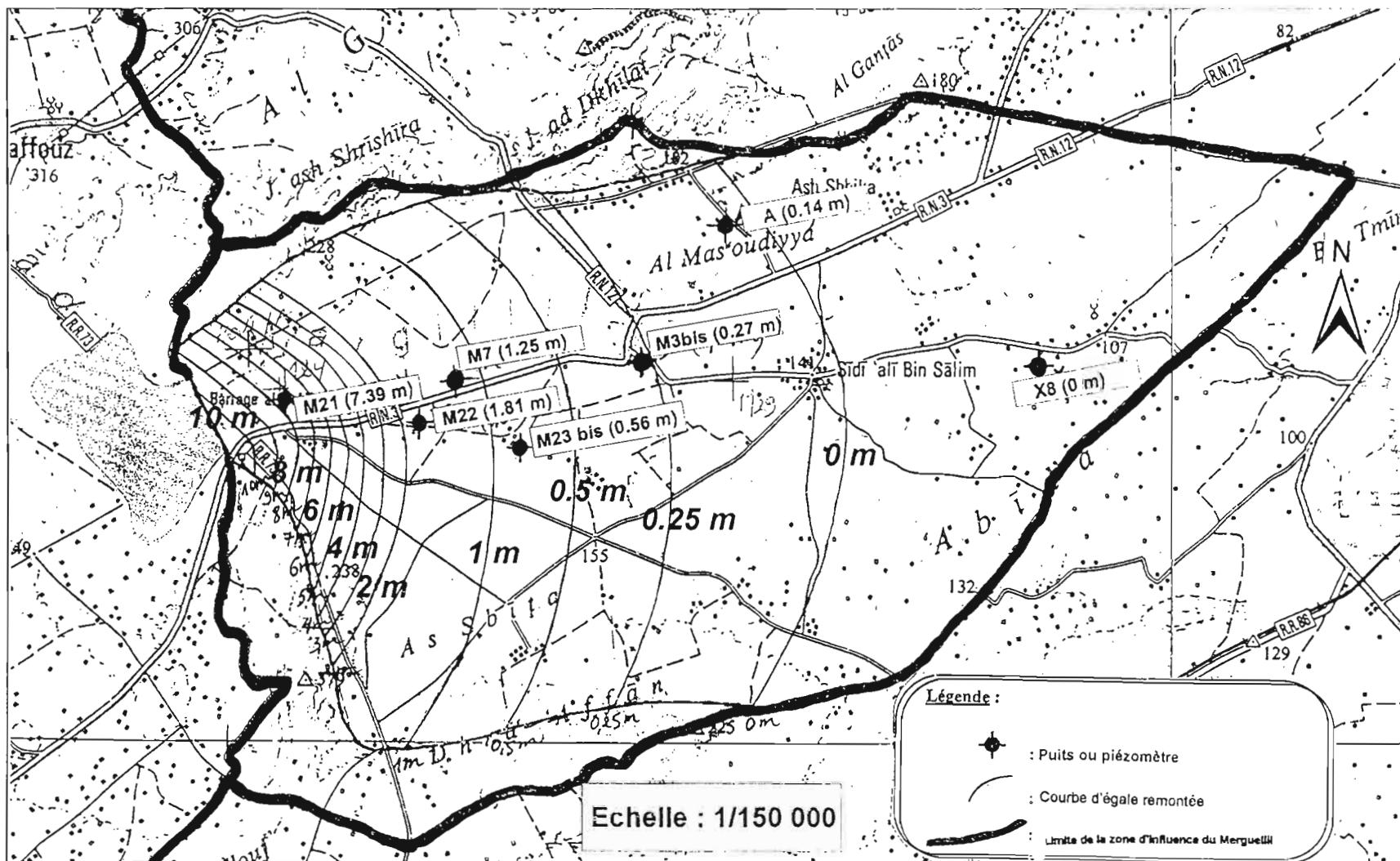
Annexe 8a : Les parts des différents éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb (suite)

Date	Apports (10 ³ m ³)	Vidange fond (10 ³ m ³)	LâchersNappe (10 ³ m ³)	Pompage (10 ³ m ³)	Evaporation (10 ³ m ³)	Infiltration (10 ³ m ³)	VolumeBarrage (10 ³ m ³)
nov-95							28787
déc-95	1139	0	0	5	348	1642	27931
janv-96	1888	0	0	0	225	1561	28033
févr-96	2555	0	0	6	320	1495	28767
mars-96	2183	18	0	33	361	1610	28928
avr-96	279	0	0	48	536	1507	27116
mai-96	2348	0	14	40	823	1521	27066
juin-96	485	0	0	215	802	1391	25143
juil-96	0	0	0	221	914	1285	22722
août-96	389	0	0	115	718	1140	21138
sept-96	2129	6	0	88	596	1069	21508
oct-96	83	0	0	111	397	1045	20037
nov-96	182	0	0	100	286	902	18932
déc-96	336	0	0	256	226	836	17949
janv-97	647	0	0	187	168	736	17504
févr-97	207	0	0	217	205	631	16659
mars-97	265	0	0	587	272	553	15512
avr-97	394	0	0	158	229	437	15082
mai-97	138	0	0	158	330	357	14374
juin-97	185	0	0	398	285	217	13658
juil-97	68	0	0	291	113	43	13280
août-97	363	5	0	37	44	17	13545
sept-97	14323	57	0	5	353	991	23462
oct-97	1979	0	0	40	630	1453	26319
nov-97	1381	0	0	0	263	1406	26031
déc-97	138	0	0	204	313	1365	24288
janv-98	327	0	0	85	214	1269	23046
févr-98	130	0	0	439	251	1055	21431
mars-98	277	0	0	700	352	1019	19638
avr-98	339	0	0	243	398	861	18474
mai-98	229	0	0	172	458	780	17293
juin-98	336	0	0	694	469	610	15856
juil-98	108	0	0	459	483	428	14594
août-98	84	0	0	191	308	274	13905
sept-98	926	5	0	280	173	172	14200
oct-98	863	0	0	49	166	344	14504
nov-98	77	0	0	193	76	263	14049
déc-98	8	0	0	459	42	139	13417

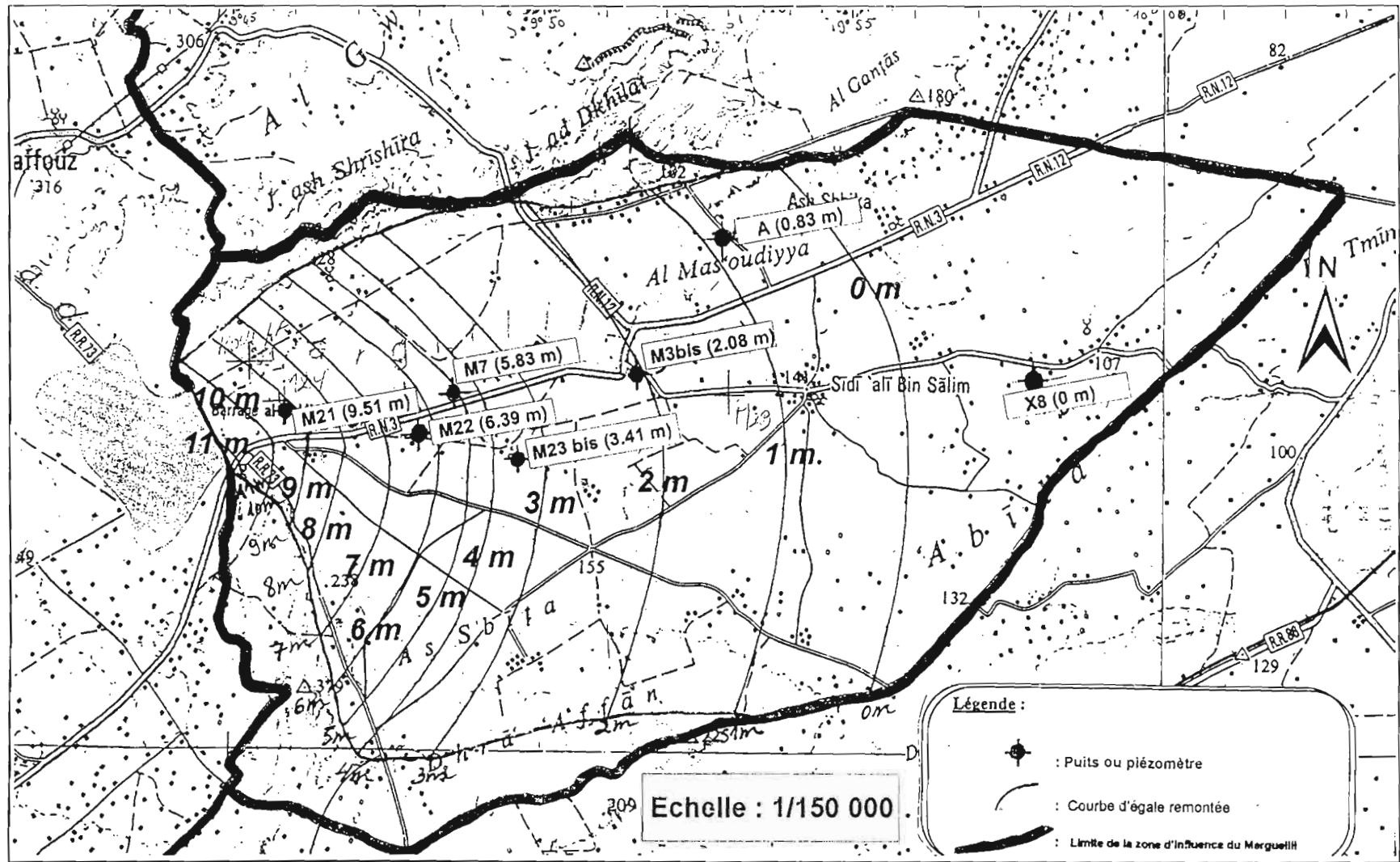
Annexe 8a : Les parts des différents éléments du bilan en eau de surface du barrage d'El Haouareb (suite)



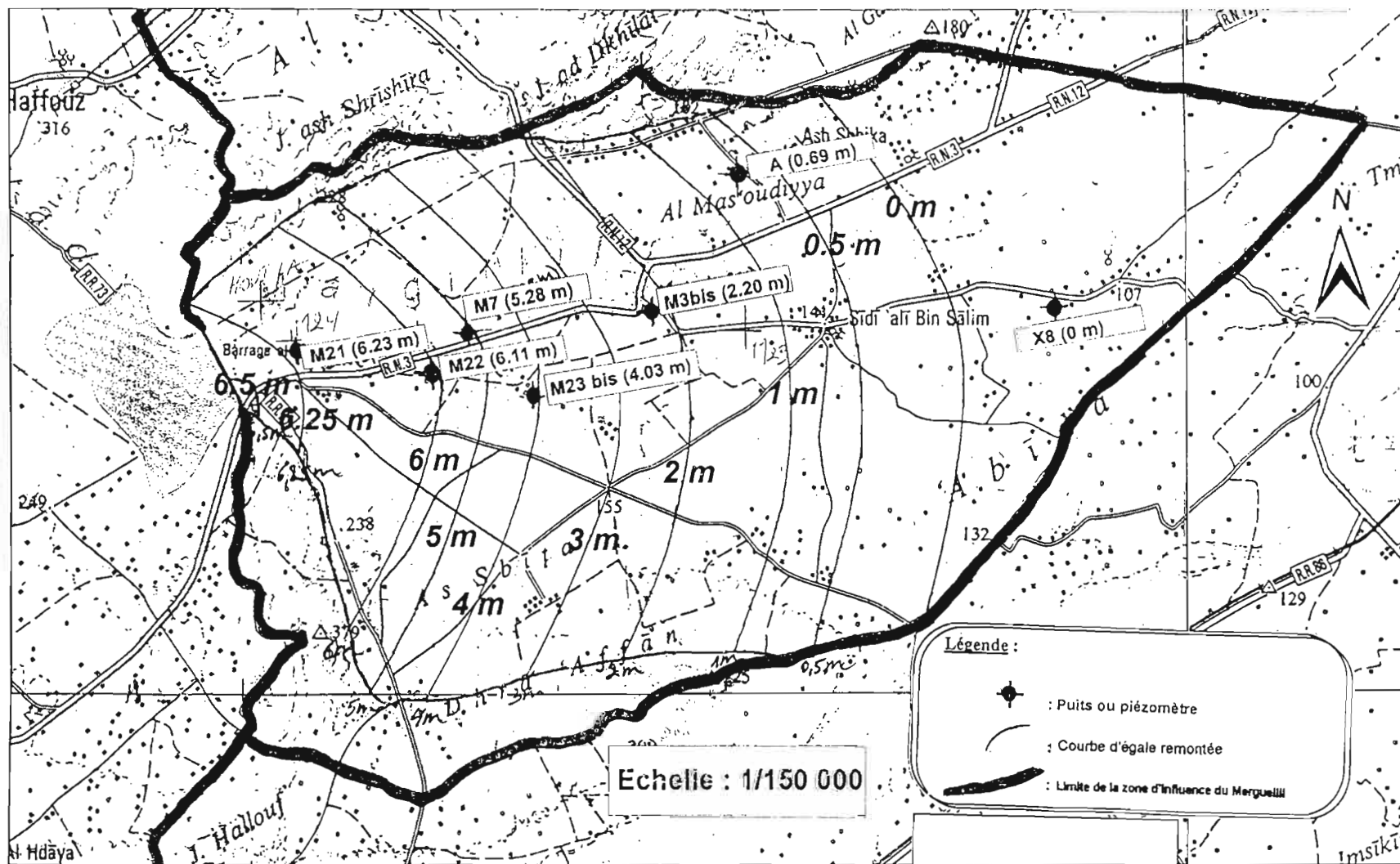
Annexe n° 8b : L'évolution en fonction du temps du stock d'eau de la retenue d'El Haouareb



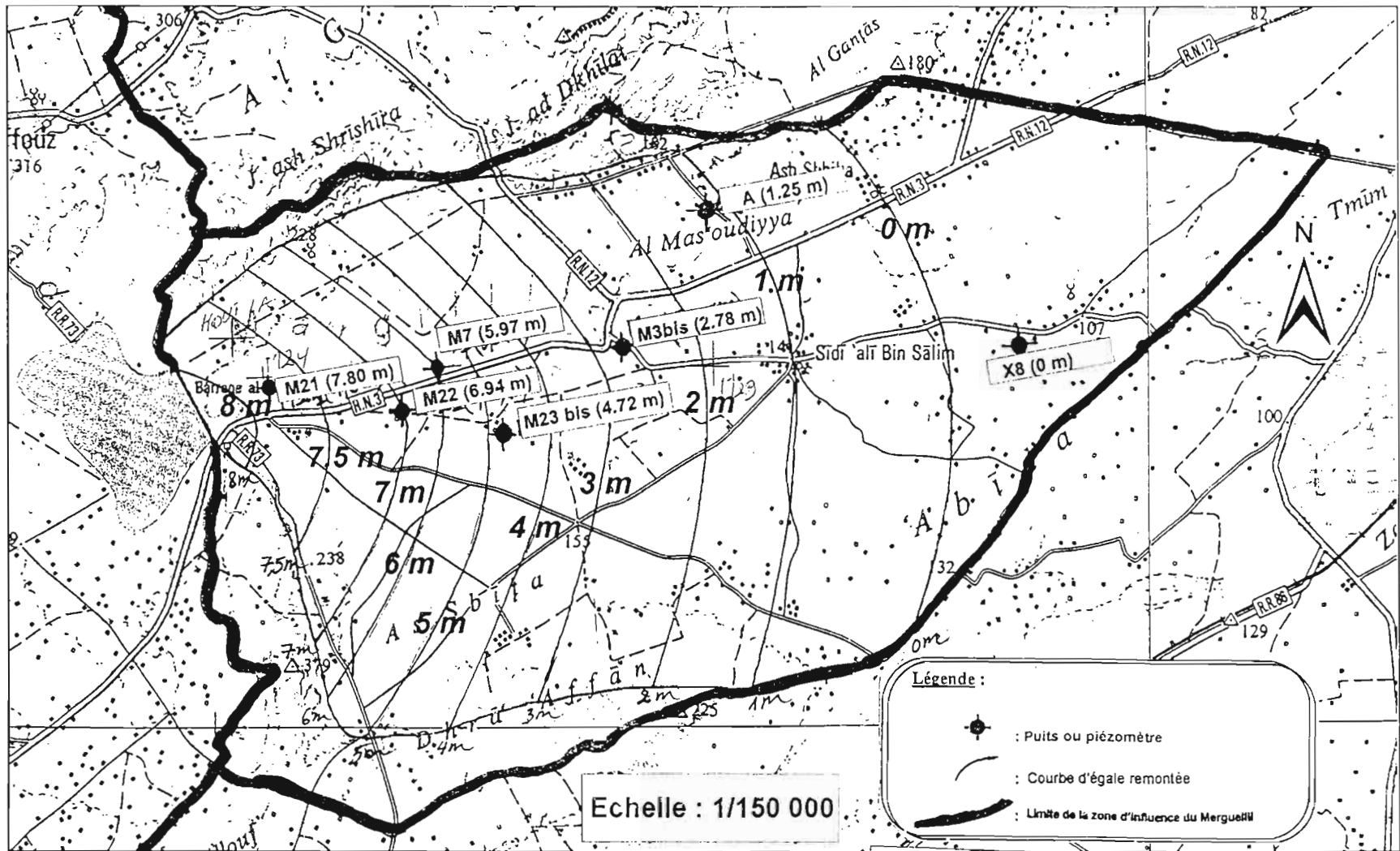
Annexe n°9 : Courbes d'égale remontée dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan (décembre 1990)



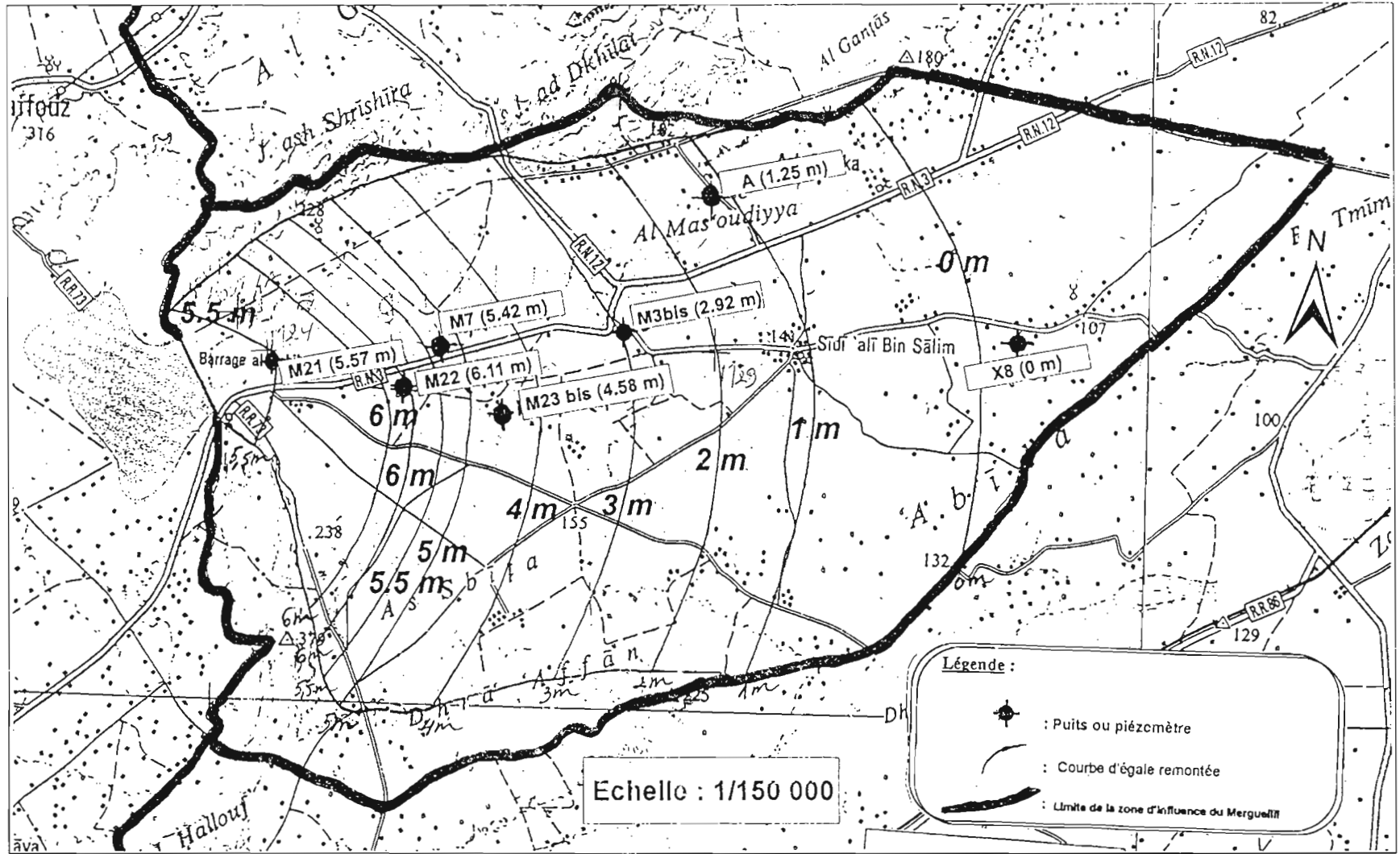
Annexe n°9 : Courbes d'égal remontée dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan (juillet 1993)



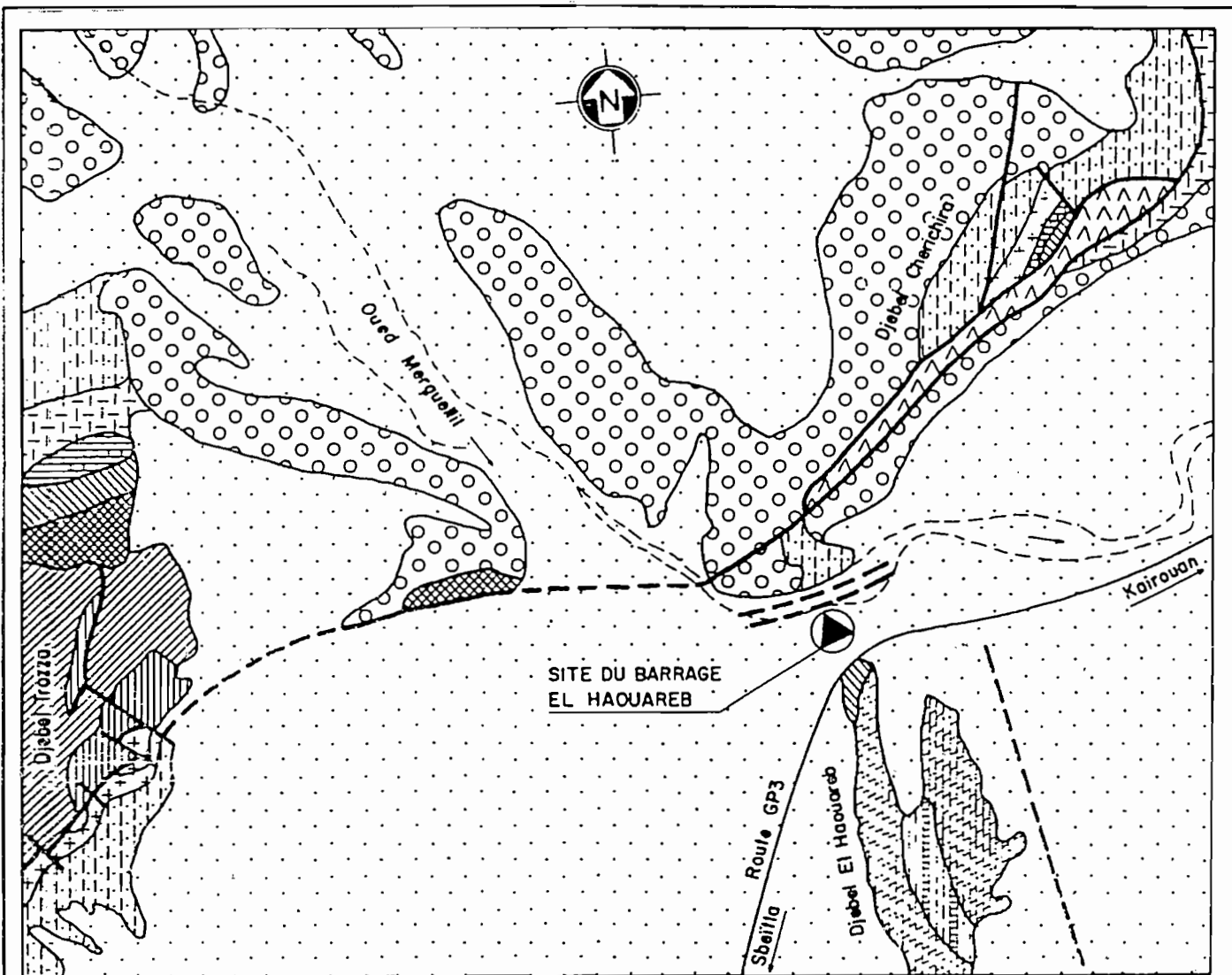
Annexe n°9 : Courbes d'égale remontée dans la partie aval du barrage d'El Hacuareb de la nappe de Kairouan (mai 1995)



Annexe n°9 : Courbes d'égale remontée dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan (janvier 1997)

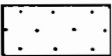
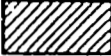
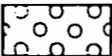



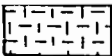

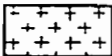




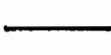

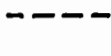


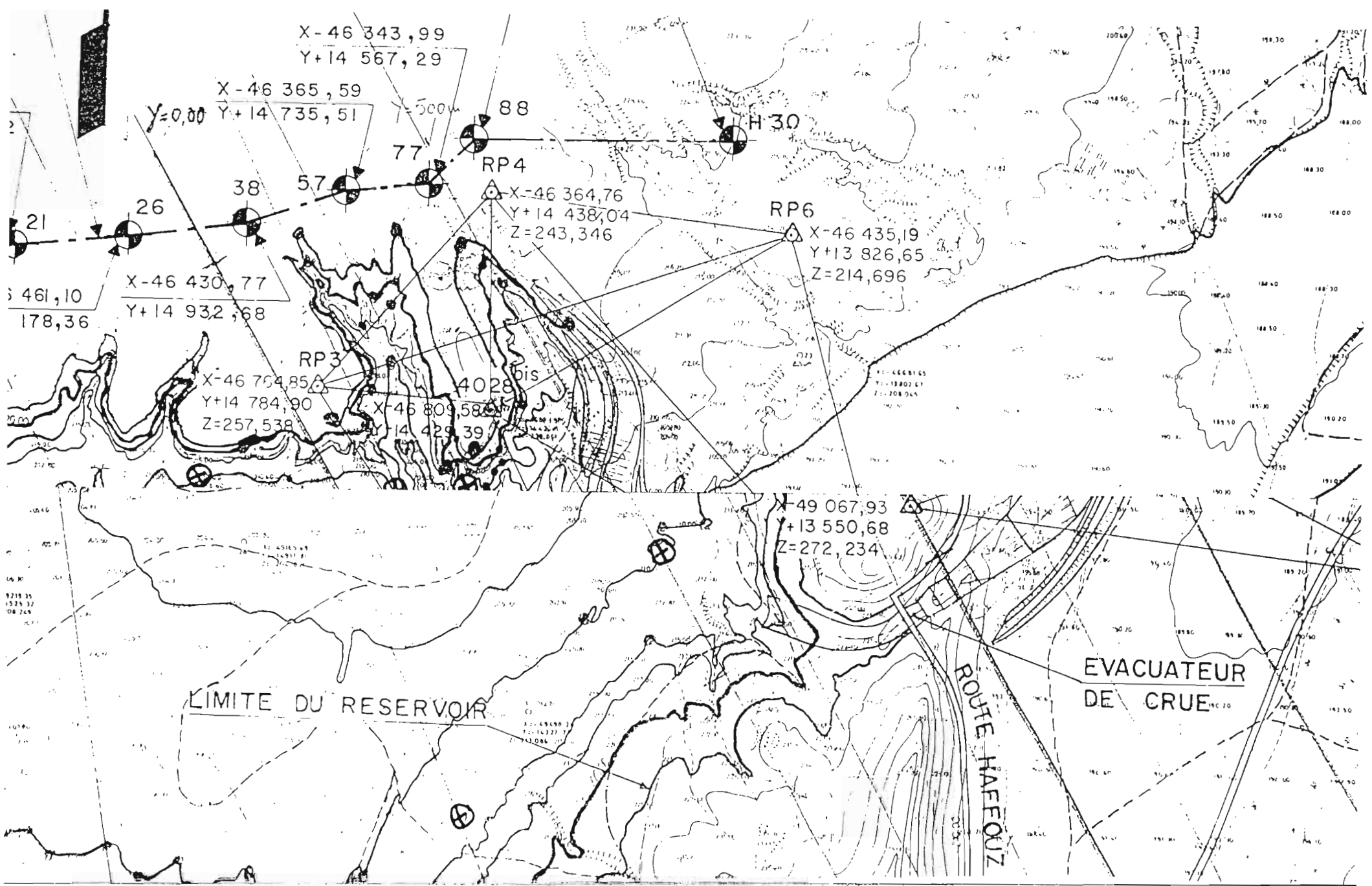
Annexe n°9 : Courbes d'égal remontée dans la partie aval du barrage d'El Haouareb de la nappe de Kairouan (mars 1999)

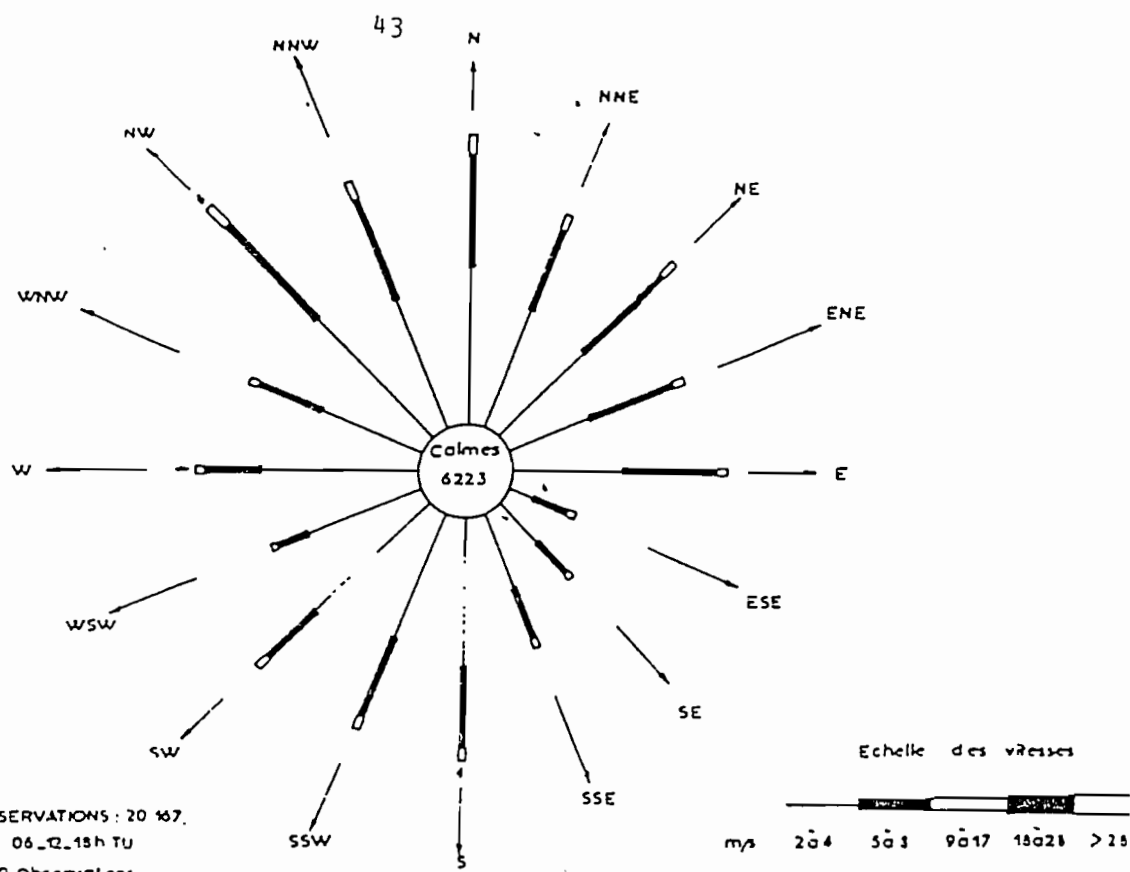


Annexe n° 10 : CARTE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE EL HAOUAREB
ECH: 1/100000

LÉGENDE

	QUATERNAIRE		BARRÉMIEN APTIEN
	MIO - PLIOCÈNE		NÉOCOMIEN SUPÉRIEUR ALTERNANCES DU MÉLOUSSI
	OLIGOCÈNE GRÈS DE FORTUNA		NÉOCOMIEN BARRÉMIEN
	ÉOCÈNE MARNES DE SOUAR		NÉOCOMIEN INFÉRIEUR ARGILES DE SIDI KRALIF
	ÉOCÈNE PALÉOCÈNE CALCAIRES METLAOUI, ARGILE HARIA		JURASSIQUE CALCAIRES DU NARA
	MAESTRICHTIEN INFÉRIEUR CALCAIRES DE L'ABIOD		TRIAS
	TURONIEN CAMPANIEN MARNES ALEG, CALCAIRES BIRÉNO		FAILLE OBSERVÉE
	ALBIEN CÉNOMANIEN		FAILLE SUPPOSÉE





NOMBRE TOTAL DES OBSERVATIONS: 20 167.
 HEURES D'OBSERVATION: 06-12-18h TU
 ECHELLE 1cm pour 20 observations

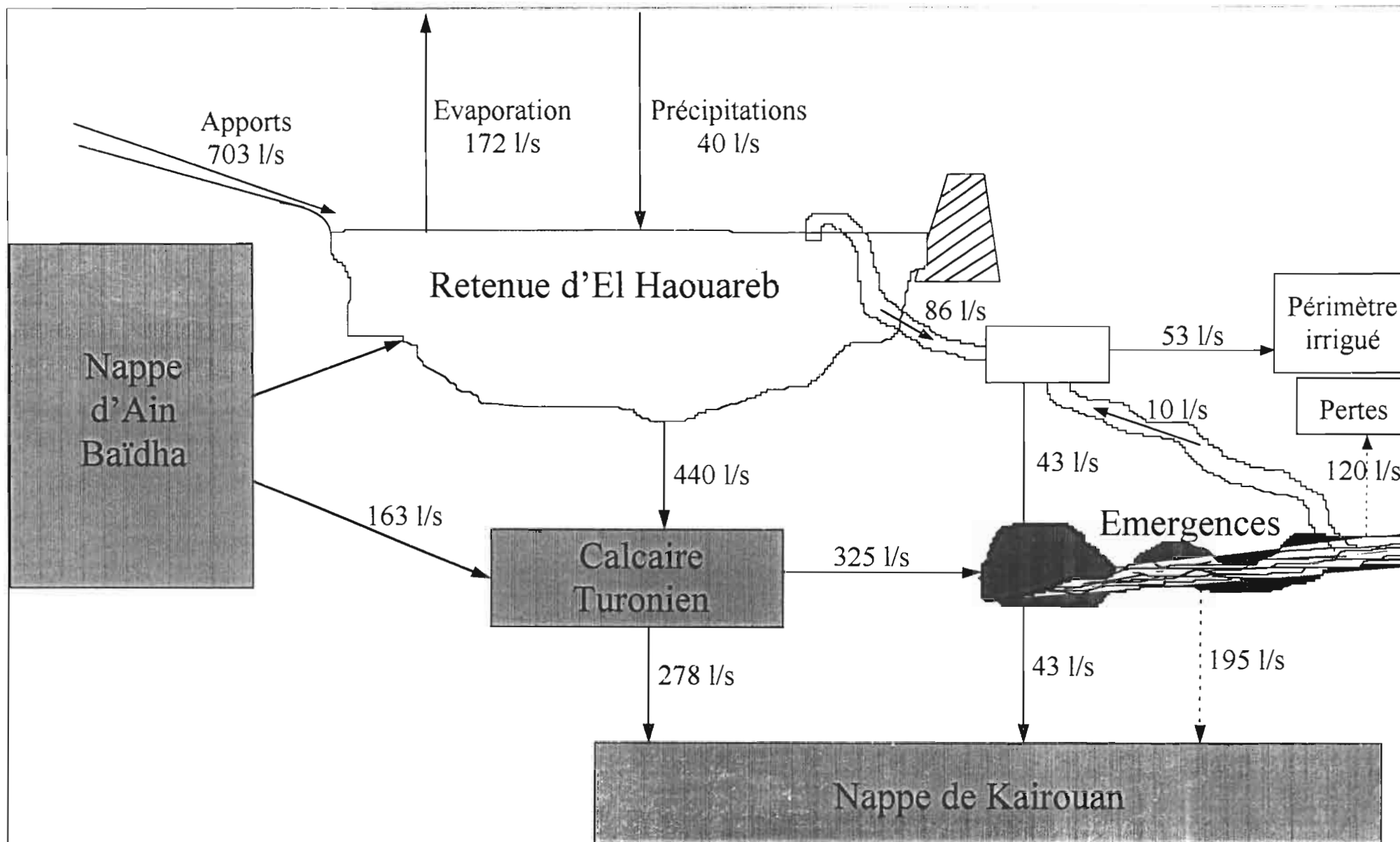
Echelle des vitesses
 m/s 2 à 4 5 à 8 9 à 17 18 à 28 > 28

Source: Institut National de la Météorologie

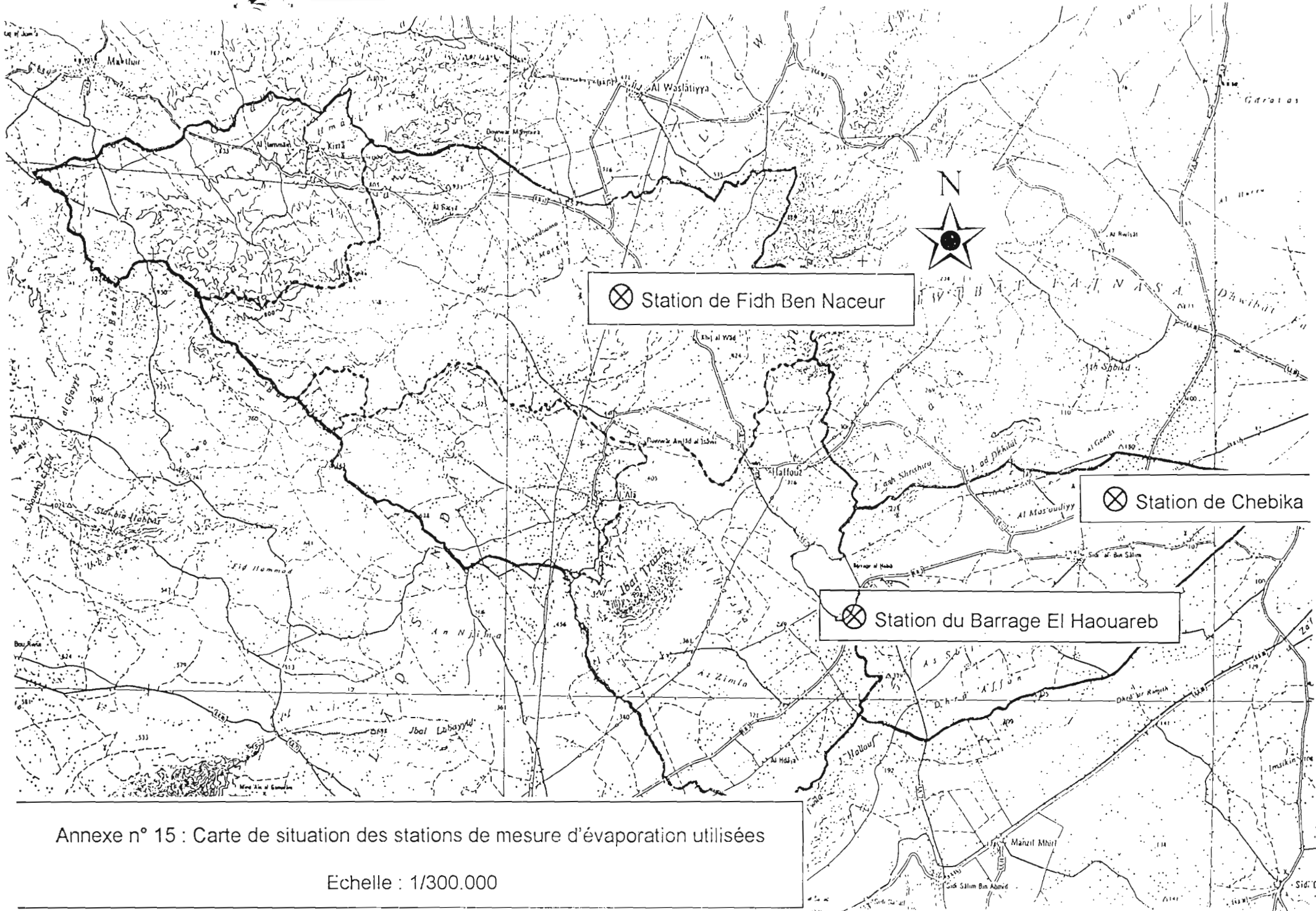
Annexe n° 12 : Rose des vents de la région de Kairouan [période 1951-1970] (Bouzaiane & Lafforgue, 1986)

Annexe n° 13 : Comparaison des volumes prélevés du barrage d'El Haouareb pour l'irrigation (10³ m³) avec ceux distribués par le C.R.D.A.

Mois / Année	1993			1994			1995		
	Retenue	Emergences	C.R.D.A.	Retenue	Emergences	C.R.D.A.	Retenue	Emergences	C.R.D.A.
Janvier	0,00	0,00	-	741.81	0,00	797,83	407.13	0,00	350,00
Février	0,00	0,00	-	331.28	0,00	331,21	290.03	0,00	299,10
Mars	0,00	0,00	-	536.50	0,00	569,20	450.37	0,00	443,52
Avril	0,00	0,00	-	715.77	0,00	567,89	493.78	0,00	233,95
Mai	0,00	0,00	-	211.88	0,00	38,06	70.56	0,00	0,00
Juin	0,00	0,00	-	337.70	0,00	69,53	0,00	0,00	0,00
Juillet	0,00	0,00	-	110.50	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Août	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Septembre	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Octobre	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00	19.81	0,00	0,00
Novembre	0,00	0,00	-	9.80	0,00	0,00	5.27	0,00	0,00
Décembre	55.98	0,00	-	419.75	0,00	399,34	5.38	0,00	0,00
Total	55.98	0,00	-	3414.99	0,00	2773,05	1742.34	0,00	1326,57
Mois / Année	1996			1997			1998		
	Retenue	Emergences	C.R.D.A.	Retenue	Emergences	C.R.D.A.	Retenue	Emergences	C.R.D.A.
Janvier	-	0,00	0,00	186.97	110,17	196,51	85.32	199,04	202,50
Février	6.26	0,00	0,00	217.05	104,83	205,91	438.94	238,49	481,28
Mars	33.43	0,00	16,19	586.91	182,23	602,61	699.60	118,44	606,53
Avril	48.13	0,00	24,02	158.10	54,83	235,92	243.49	190,16	468,71
Mai	39.92	0,00	22,37	158.34	102,04	227,42	171.30	127,72	321,47
Juin	214.63	0,00	94,38	397.67	99,18	439,64	694.43	189,10	708,82
Juillet	221.48	0,00	116,18	290.88	136,14	351,61	458.57	109,40	316,12
Août	114.63	0,00	32,60	37.39	137,09	119,17	190.68	106,07	140,10
Septembre	88.23	0,00	87,45	4.51	31,94	17,46	269.12	143,17	215,25
Octobre	111.24	0,00	48,74	40.03	45,92	65,53	49.28	69,06	1522,31
Novembre	99.99	0,00	96,73	0,00	50,43	33,29	193.43	133,45	315,42
Décembre	256.25	24,52	204,43	203.74	148,68	352,37	458.66	264,99	570,72
Total	1234.20	24,52	743,09	2281.58	1203,50	2847,45	3952.80	1889,08	4498,93



Annexe n° 14 : Schéma de fonctionnement du système d'El Haouareb sur les dix premières années d'exploitation du barrage



Annexe n° 15 : Carte de situation des stations de mesure d'évaporation utilisées

Echelle : 1/300.000