

**Ministère de L'Agriculture  
DG /ETH  
Direction Générale  
des Etudes et Travaux  
Hydrauliques**

**IRD**  
Institut de Recherches  
pour le Développement

## **NOTE SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE D'EL HAOUAREB**

**Résultats des nivellements de 1998 et mise à jour de la  
bathymétrie de la retenue d'El Haouareb ; Evaluation des apports  
en sédiments.**



*Garreta Ph., Ouerghemmi A.*

*(Décembre 1998)*

# RESULTATS DES MESURES

## SUR L'ENVASEMENT DU BARRAGE D'EL HAOUAREB

**Résultats des nivellements de 1998 et mise à jour de la bathymétrie de la retenue d'El Haouareb ; Evaluation des apports en sédiments.**

*Garreta Ph., Mission IRD, Tunis*  
*Ouerghemmi A., Direction générale des Etudes et Travaux hydrauliques,*  
*Barrage El Haouareb*

### PRESENTATION

Depuis sa mise en eau en septembre 1989, la retenue d'El Haouareb n'a jamais atteint sa cote de déversement soit 217m (cote NGT). Cependant, les apports en eaux turbides qu'elle reçoit du Merguellil ainsi que de ses autres tributaires, et dont seulement une petite partie est évacuée par des chasses de fond, amènent sans discontinuité des volumes de sédiments qui se déposent, principalement sur le fond, et réduisent progressivement la capacité de stockage du barrage.

Afin de pouvoir mesurer cet envasement qui conditionne à long terme l'espérance de vie du barrage, une campagne de nivellement a été effectuée par l'équipe de la DG/ETH d'El Haouareb lors d'un assèchement presque total de la retenue en août 1994. Les volumes ainsi calculés, ont montré, par comparaison avec la courbe hauteur/volume établie en 1989, un comblement important qu'il était impératif de pouvoir vérifier quelques années plus tard.

Le barrage d'El Haouareb étant un élément fondamental du bassin du Merguellil, il a été décidé de mettre à profit un nouvel étiage de la retenue, en 1997, pour procéder à une nouvelle campagne de nivellement effectué par la DG/ETH et l'Orstom dans le cadre du Programme MERGUSIE.

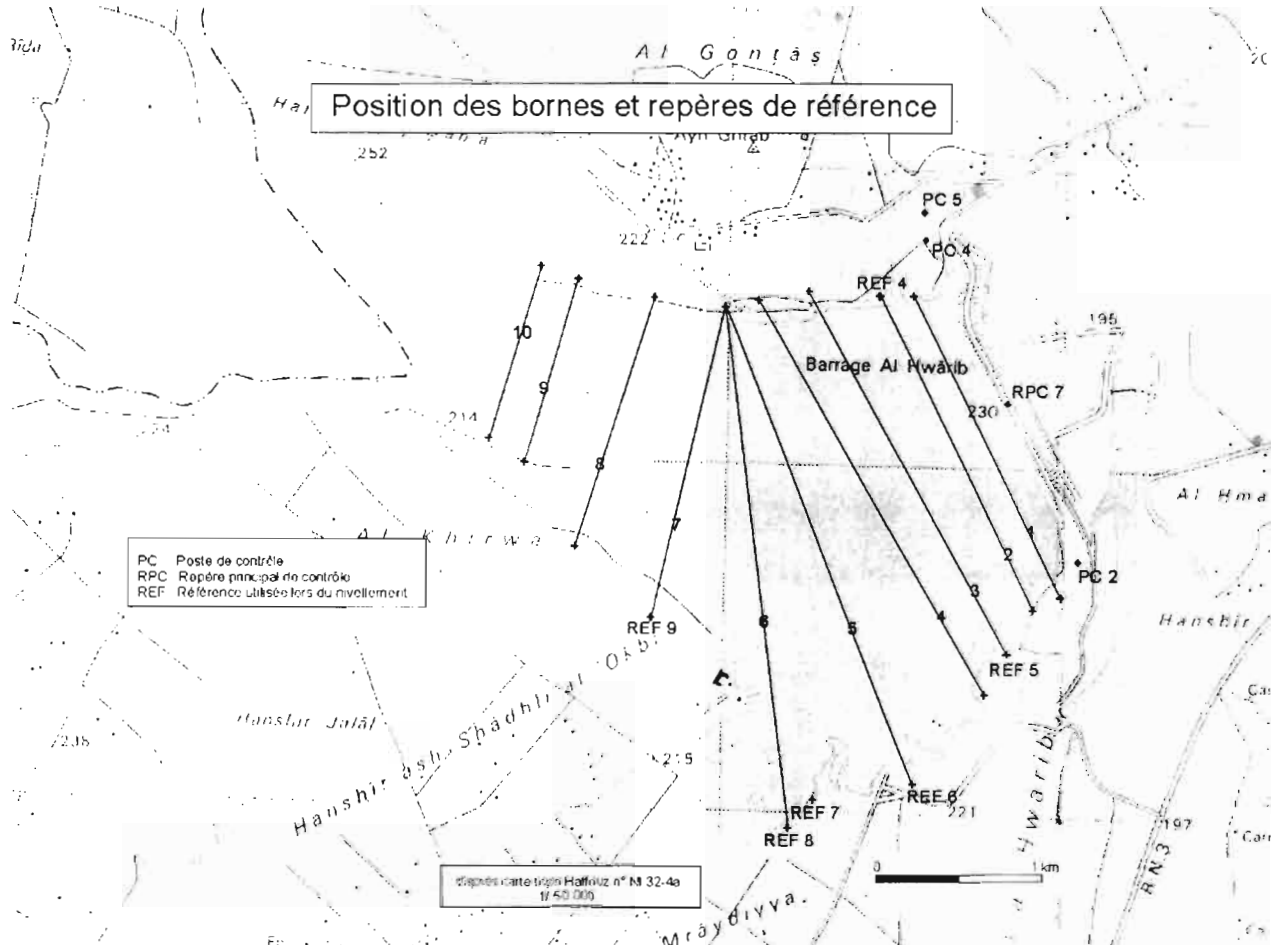
### METHODOLOGIE

La méthode employée pour évaluer le volume des dépôts dans le barrage est la méthode déjà appliquée sur les barrages du Nord à savoir un découpage de la retenue en plusieurs sections transversales dont on relève le profil topographique. Le niveau du fond peut être mesuré à l'écho sondeur ou à la perche lorsque la section est immergée, ou plus aisément par relevé topographique lorsque le profil est exondé. Etant donné les conditions propres à la retenue d'El Haouareb (retenue très ouverte, peu profonde et tarissement assez fréquent), ces relevés de profil ont été effectués au tachéomètre lors de l'assèchement total (1994) ou partiel du barrage (1997).

## MESURES TOPOGRAPHIQUES D'EL HAOUAREB

La première mesure d'envasement a été effectuée par la DG/ETH en août 1994. Dix sections transversales ont été réparties de l'aval vers l'amont de façon à restituer le modelé du fond de la retenue jusqu'à la cote 210 NGT (Voir carte Fig 1).

Afin de comparer ces profils à ceux du terrain naturel, antérieurement à la mise en eau de la retenue en 1989, ces dix sections ont été reportées le plus précisément possible sur le plan de 1985 au 1/10 000 (STER Tunis, 1985). Les altitudes des points pris dans l'axe de ces profils, à des distances rondes de 10 ou 5 mètres, ont été relevés afin de reconstituer le tracé du profil naturel antérieur à 1989 (voir tableau A1 et fig A2 en annexe)



**Figure 1 : Position des 10 sections transversales choisies pour le nivellement de la retenue d'El Haouareb ainsi que l'emplacement des bornes et repères de référence**

### Opérations de mesure 1997-1998

En août 1997, lors d'un étiage assez prononcé de la retenue, une seconde campagne de nivellement a été lancée et effectuée conjointement entre la DG/ETH et l'Orstom sur les mêmes profils. Malheureusement les crues intervenues en septembre 1997 ont obligé à arrêter les mesures à la section 5. Les levés des profils 5 à 10 n'ont pu être réalisés qu'en mars et avril 98. Il est probable que les crues intervenues entre ces deux dates, c'est à dire uniquement celles de septembre ont légèrement augmenté les dépôts de sédiment mais cette imprécision reste marginale par rapport aux volumes mesurés.

Avec l'acquisition récente d'un théodolite LEICA à laser et mémoire interne, la méthode employée pour exécuter les mesures d'envasement de la retenue est un levé de points par rayonnement, en ayant soin de choisir au minimum une borne de référence d'altitude connue, et en lui donnant l'azimut zéro, afin de caler tous les points dans un système d'axes de coordonnées cartésiennes. Il est bon de pouvoir valider ce calage à partir d'une seconde borne de référence. Suivant la superficie à couvrir, le nivellement peut nécessiter plusieurs mises en station de l'appareil et donc la définition d'autres bornes intermédiaires ou le rattachement à d'autres références déjà enregistrées (tableau 1).

Ainsi, dans le cas d'El Haouareb, étant donné la dimension du barrage et de la cuvette de la retenue, nous avons, au cours de cette campagne, changé 4 fois de station et utilisé 6 points de référence intermédiaires pour lesquels nous avons planté des piquets en fer de 50 cm près de la borne, lorsqu'elle existait encore (voir tableau A1 en annexe).

**Tableau n°1 : Bornes repères du barrage d'El Haouareb et altitude (NGT)**

Désignation des Bornes	Type de Borne	Alti. nivelée en 1998 (pl. bronze)	Alti. contrôlée par GTH (pl. bronze)
GTH	sur le Plan de 1985		
PC2	Réf.n°2 du niv. orstom cyl.ciment coul.gris plaque à 116.5cm du sol	235,984	235,972
PC4	4028bis cyl.ciment coul.blanche plaque à 114cm du sol	240,247	240,257
PC5	RP4 cyl.ciment coul.blanche	236,986	237,005
RPC7	Réf.n°3 du niv. orstom cyl.ciment coul.gris	229,316	229,307

Lors de ce levé seules les bornes réf 2 et 3 du nivellement (PC 2 et RPC 7) (voir tableau 1) ont été considérées comme repères d'altitude rattachés au Nivellement Général Tunisien (NGT). Mais chacun des deux repères qui balisent les dix sections choisies a été matérialisé sur le terrain et rattaché au NGT (Tableau A1 en Annexe).

*Remarque* : lors du nivellement de 1994, des piquets de fer ont été plantés en RD et RG de chaque profil, matérialisant les extrémités des profils. Peu de temps après, des bornes en ciment ont été coulées par dessus ces piquets nivelés. En conséquence, le nivellement de 1997-98 peut laisser apparaître des différences entre les altitudes d'une même borne puisque le prisme de la mire n'a pu être placé exactement au même emplacement (voir tableau A1 annexe). Il arrive aussi que la borne implantée en 1994 demeure introuvable. Dans ce cas l'emplacement a été redéfini au mieux mais avec plus ou moins de précision.

### Traitement et calcul

Les logiciels utilisés sont : TC Tools version 3.1 pour transférer les données du tachéomètre sur l'ordinateur et TOUTATIS pour les traiter ce qui permet d'obtenir les coordonnées dans l'espace X, Y et Z des points relevés à condition d'avoir introduit au préalable les coordonnées du ou des points de référence connue qui ont été enregistrés au début de la mesure au tachéomètre. Le fichier ainsi obtenu, importé sous EXCEL, indique pour chaque point les coordonnées calculées ce qui permet de tracer les profils en travers et les courbes isobathes ou isohypses.

## RESULTATS DES MESURES TOPOGRAPHIQUES

### Tracés des profils en travers

Bien que les profils de 1989 aient, en rive droite, à peu près la même origine que ceux de 1994, ils ont par contre bien souvent été prolongés en rive gauche au-delà de la cote 210 et dépassent de loin les bornes de 1994. Ce qui peut expliquer que la concordance des profils sur les deux rives n'est pas toujours parfaite (fig. A2 en annexe).

De même la disparition de certains repères de sections a pu conduire à la non-concordance exacte des profils entre les trois périodes comme c'est le cas pour la section 6 et dans une moindre mesure pour les sections 9 et 10.

La comparaison des profils de l'ensemble des sections met parfaitement en évidence le rehaussement progressif du fond de la retenue en 1994 et en 1997 par l'alluvionnement, aussi bien à l'amont (sections 7 à 9) qu'à l'aval (sections 1 à 4).

### Bathygraphie

Afin d'obtenir une représentation synthétique de la configuration du fond et des berges de la retenue, le seul levé des profils ne suffit plus et il faut tracer les courbes d'égale profondeur, les isobathes, qui permettront de déduire aussi les courbes surface/cote et volume/cote de la retenue ; pour cela, il faut importer les données traitées sous le logiciel SURFER.

Bien que les mesures faites sur chaque profil nous permettent de faire apparaître l'envasement correspondant à chaque période, force nous est de constater que pour utiliser le logiciel SURFER les points des seuls profils que nous avons, sont nettement insuffisants si l'on désire un tracé précis des courbes de niveau. De plus, les dix profils de 1994 n'ont guère été prolongés au-delà de la cote 215 alors que la cote de déversement est à 217m. Et enfin, certains profils se trouvent très espacés les uns des autres (300 à 400 m) engendrant ainsi un découpage trop lâche que ne peut combler le logiciel.

C'est pourquoi, considérant que le modelé du terrain naturel a peu changé au-dessus de la cote 215 puisque la cote maximale de remplissage n'a pas dépassé 210, nous avons localisé sur le plan au 1/10 000<sup>e</sup> de 1985 des points supplémentaires correspondant aux cotes 215, 217 et 220 qui ont permis au logiciel, en complétant les profils, de mieux affiner ses calculs. Parmi ces points supplémentaires, on peut mentionner également tous les points qui matérialisent la digue de retenue, et qui ont été nivelés lors de la campagne de 1997.

A partir de toutes ces données, le logiciel nous permet de tracer les cartes de bathymétrie de la retenue correspondant aux trois périodes de mesures : 1989, 1994 et 1997 (Voir Fig A3 à A5 en annexe) et d'en déduire pour ces 3 cas une relation entre le volume de la retenue (ou sa superficie) et sa cote (Fig 2).

### Inconvénient des visées au tachéomètre

Lorsqu'on utilise un appareil à visée laser sur de grandes distances (> 1 Km), on ne peut plus négliger les corrections de sphéricité de la terre qui entraînent des erreurs systématiques importantes : 8 cm pour une visée de 1000m. et près de 30 cm sur 2 Km. Outre la difficulté à viser le prisme sur d'aussi grandes distances, intervient aussi la distorsion optique due à la réfraction de l'air. La version du logiciel utilisée ne pratiquant pas ces corrections nous avons dû cheminer par portées de 50 à 60m.

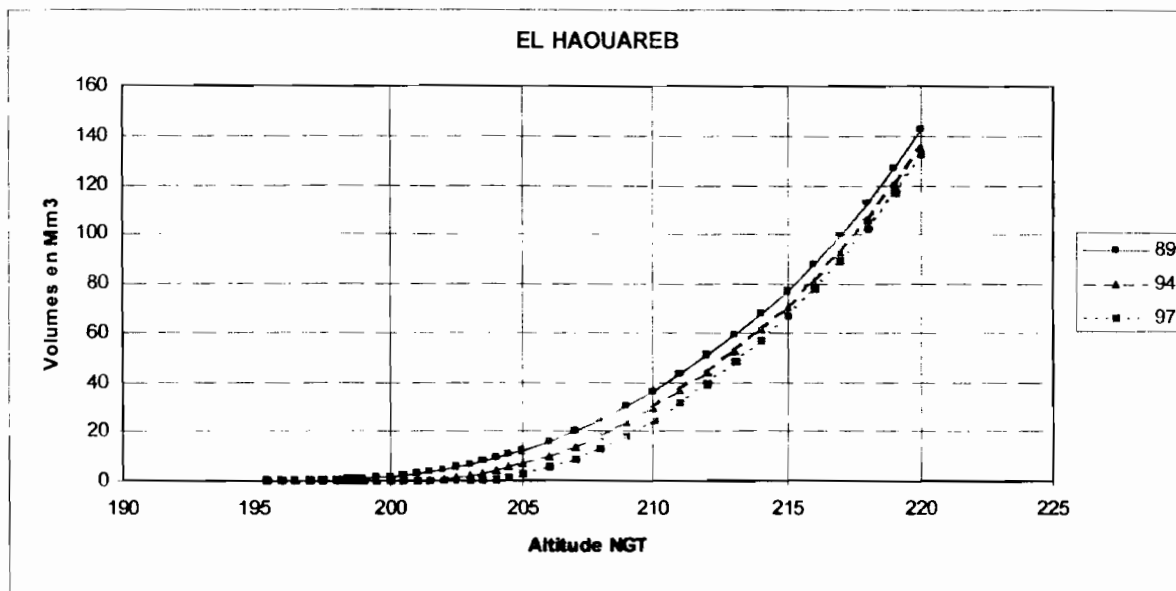


Fig 2 : Courbes Volume fonction de la cote de la retenue d'El Haouareb en 1989, 1994 et 1997

Pour contrôler nos mesures nous avons effectué un tour du lac en nivelant tous les repères des profils et avons fermé ce nivellement avec une bonne précision.

## ESTIMATION DES VOLUMES DE DEPOTS

Partant des résultats précédents, il apparaît que le dépôt total des sédiments de 1989 à 1997, soit 8 années, avoisine les 13 millions de m<sup>3</sup> (Tableau 2).

Tableau 2 : Volume des dépôts mesurés au fond de la retenue d'El Haouareb

Période	Volume de dépôts (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
1989 - 1994	7,4
1994 - 1997	5,4
1989 - 1997	12,8

Bien que la notion de moyenne soit peu représentative en climat semi aride elle permet de situer l'ordre de grandeur du phénomène. Le volume moyen annuel apporté sur la période étudiée est de 1,6 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> et correspond à un taux d'envasement annuel de 1,7% nettement inférieur au taux observé sur les lacs et barrages collinaires (4%) (Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1999-2000 CES/IRD).

## MESURE DE LA DENSITE APPARENTE

Afin de passer d'une évaluation volumétrique déduite des mesures topographiques précédentes à une évaluation plus "objective" c'est à dire de la masse de sédiments apportés, il faut passer par une évaluation de la densité en place du matériau. Selon sa nature, ses caractéristiques physiques et en particulier sa granulométrie, mais aussi selon l'emplacement par rapport au lit principal ou la tranche d'eau qui surmonte le fond, la densité apparente peut être sensiblement différente. En particulier il était intéressant de voir si certaines valeurs de densité trouvées sur les grands barrages du nord de la Dorsale (Claude, 1975) étaient applicables dans le cas présent.

Pour cela une campagne de mesure de densité apparente a été effectuée en Août 1998. Interrompue par une crue elle a été poursuivie en septembre.

### Matériel

Nous avons utilisé des cylindres à prélèvements en acier d'une capacité de 250 ou 400 cm<sup>3</sup> et de 8 cm de diamètre que l'on enfonce à l'aide d'un support de cylindre muni d'un manche. Suivant la dureté du sol, il est parfois nécessaire de se servir d'un marteau ou d'une petite masse pour que le cylindre soit parfaitement enfoncé et bien rempli de terre mais il faut opérer délicatement de façon à ne pas détruire la structure du sol en place.

Afin de chasser l'air qui se comprime entre le haut du cylindre et le fond du support un petit trou a été aménagé sur le support. Il faut veiller à le nettoyer après chaque prélèvement, surtout lorsqu'on travaille sur de la vase.

### Méthode de terrain

Après avoir enfoncé le cylindre en surface, soit 5cm de profondeur pour qu'il soit rempli, on passe une spatule sous le cylindre pour le décoller et l'enlever. L'opérateur déboîte alors le cylindre ajusté sur le support, arase encore le fond, puis le haut, et enfin chasse le contenu du cylindre au-dessus d'un sachet en plastique qui sera hermétiquement fermé et étiqueté avant d'être ramené au laboratoire.

Ces mesures sont faites à plusieurs niveaux de profondeur pour tenir compte de l'hétérogénéité de la densité le long du profil vertical. Malheureusement la présence d'eau en dessous de 60 cm n'a pas permis de prélever plus bas. On notera que les prélèvements en profondeur sont les plus pénibles à exécuter, car il faut nécessairement faire un trou d'environ 1 mètre de diamètre afin de pouvoir introduire correctement la spatule sous le cylindre.

Lors de cette campagne une première série de 12 prélèvements (au cylindre) a été effectuée le 13 août 1998 en rive gauche du barrage et dans l'axe des Profils 3 et 4 (Voir carte Fig 2). Malheureusement, la cote à cette date était encore haute et ne nous a pas permis d'avancer très loin vers le centre de la flaque. Une deuxième série de prélèvements a été possible un mois plus tard, les 15 et 16 septembre, alors que la flaque d'eau avait considérablement diminué et nous donnait accès à des sites en RG mais également en RD.

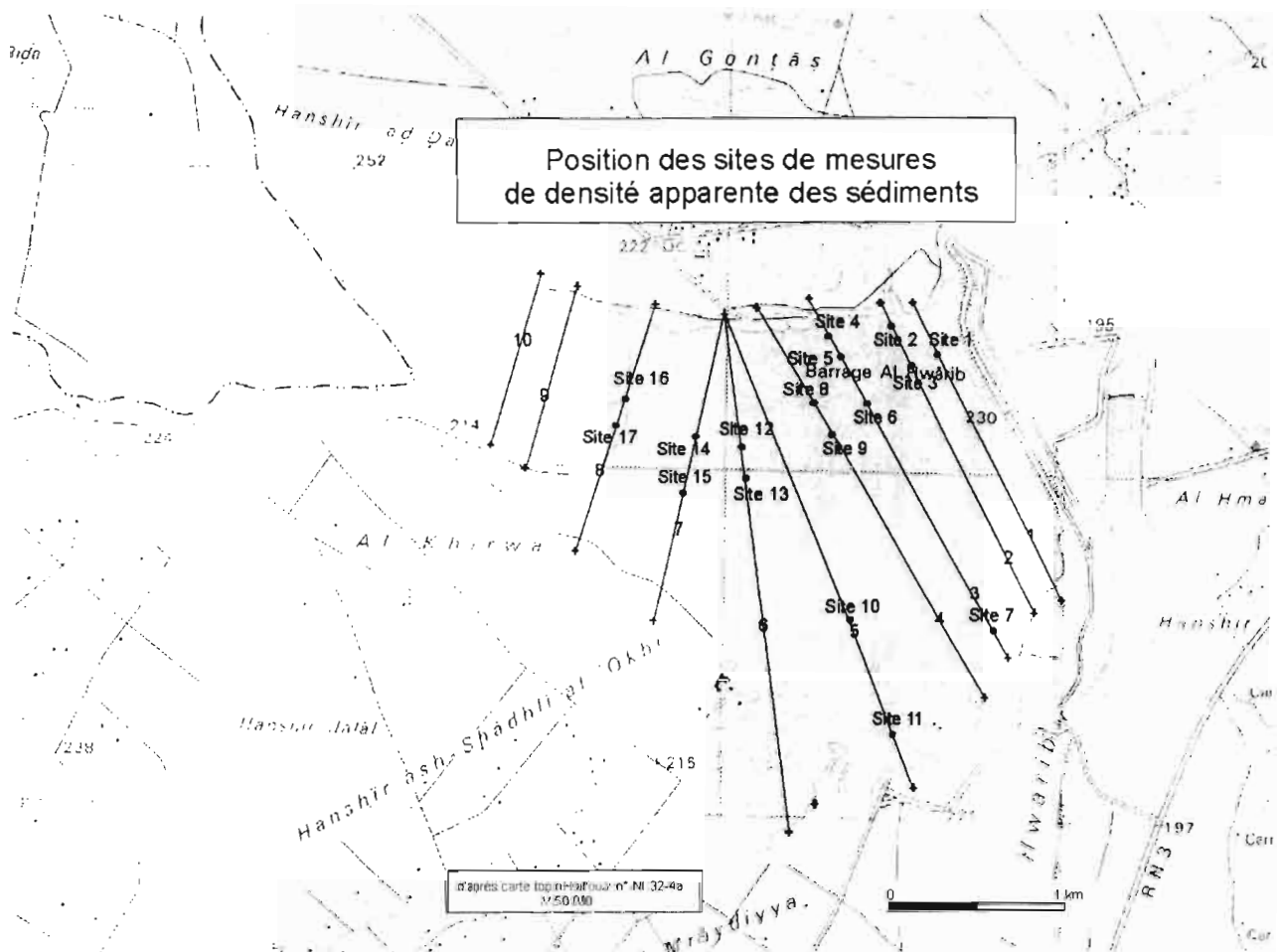


Fig 2 : Carte de situation des emplacements de mesure de densité apparente (1998)

Tous ces échantillons, fermés et étiquetés, ont été pesés le soir même de leur prélèvement à Kairouan sur une balance de précision au 1/10 de gramme de marque OHAUS. On utilisera la même balance pour les pesées après passage à l'étuve à une température de 105°C pendant 48 heures au minimum.

Du résultat de ces pesées, nous déduisons le poids sec de l'échantillon et sa densité apparente. On peut constater que les mesures fournissent des valeurs sensiblement différentes puisqu'on trouve des valeurs inférieures qui vont de 0,8 à 1,6 sans que cette différence puisse se rattacher à une partie de la retenue ou à un niveau de profondeur du prélèvement (Voir tableau 3). D'une façon générale, ces sédiments, en partie gorgés d'eau, n'étaient pas complètement stabilisés et il est à craindre que toutes les mesures ne soient pas représentative de la densité apparente réelle.

Dans une première approche on remarque que l'ensemble des valeurs des densités calculées est inférieur à la valeur de 1,6 adoptée sur les barrages du Nord et, en attendant de valider ces premières mesures, nous adopterons comme densité apparente 1,3 valeur intermédiaire entre la précédente et la moyenne des valeurs mesurées à El Haouareb (1,15).



**Tableau 3 : Résultats des prélèvements d'échantillons pour mesure de la densité apparente des sédiments d'El Haouareb (Août 1998)**

Site N°	Profil	Profond.	Nature	Volume	P.hum.	P.sec	P.eau	H%	densité
1	1	surf.	vég.vase	400 cm3	550,8	329,9	220,9	67,0	0,825
	1	50 cm	vase	250 cm3	369,3	237,9	131,4	55,2	0,952
2	2	surf.	terreau	400 cm3	626,5	407,2	219,3	53,9	1,018
	2	50 cm	vase	250 cm3	372,5	331,8	40,7	12,3	1,327
3	2	surf.	vég.vase	"	330,2	192,5	137,7	71,5	0,770
	2	50 cm	vase	"	508,8	362,6	146,2	40,3	1,450
4	3	surf.	terreau	"	554,0	404,4	149,6	37,0	1,618
	3	6 cm	"	"	423,7	326,1	97,6	29,9	1,304
	3	40 cm	"	"	479,5	400,2	79,3	19,8	1,601
5	3	surf.	vase	250 cm3	378,4	205,9	172,5	83,8	0,824
	3	6 cm	"	"	397,2	278,0	119,2	42,9	1,112
	3	40 cm	"	"	416,8	335,7	81,1	24,2	1,343
6	3	surf.	vase	"	410,0	286,9	123,1	42,9	1,148
	3	50 cm	"	"	419,1	303,6	115,5	38,0	1,214
7	3	surf.	vég.vase	"	428,5	255,5	173,0	67,7	1,022
	3	50 cm	vase	"	453,8	271,2	182,6	67,3	1,085
8	4	surf.	vase	"	405,7	319,6	86,1	26,9	1,278
	4	6 cm	"	"	268,3	195,3	73,0	37,4	0,781
	4	40 cm	"	"	490,4	387,6	102,8	26,5	1,550
9	4	surf.	vase	"	390,1	246,0	144,1	58,6	0,984
	4	6 cm	"	"	400,9	227,4	173,5	76,3	0,910
	4	30 cm	"	"	539,7	297,2	242,5	81,6	1,189
10	5	surf.	croû.vase	"	479,5	303,2	176,3	58,1	1,213
	5	50 cm	vase	"	505,8	303,7	202,1	66,5	1,215
11	5	surf.	vase mel.	"	371,0	240,7	130,3	54,1	0,963
	5	40 cm	sable dur	"	456,3	301,6	154,7	51,3	1,206
12	6	surf.	vase	"	395,0	335,9	59,1	17,6	1,344
	6	50 cm	"	"	438,2	277,8	160,4	57,7	1,111
13	6	surf.	vase	400 cm3	553,2	385,4	167,8	43,5	0,964
	6	50 cm	"	250 cm3	320,0	245,7	74,3	30,2	0,983
14	7	surf.	vase	400 cm3	365,8	détruit			
	7	50 cm	"	250 cm3	421,3	276,4	144,9	52,4	1,106
15	7	surf.	croûte	400 cm3	582,2	341,2	241,0	70,6	0,853
	7	50 cm	vase	250 cm3	463,0	détruit			
16	8	surf.	croû.sable	"	369,3	détruit			
	8	50 cm	sable	"	414,5	détruit			
17	8	surf.	vég.sable	"	408,5	388,6	19,9	5,1	1,554
	8	50 cm	sable	"	286,4	266,1	20,3	7,6	1,064

En conséquence, partant des résultats précédents (12,8 million de m<sup>3</sup>) et en optant pour une densité moyenne de 1,3, nous obtenons un apport total entre 1989 et 1997 de près de 17. 10<sup>6</sup> T de sédiments soit une moyenne des apports de 2,1 million de tonnes par an (voir tableau 4), ce qui correspond à une érosion spécifique sur le bassin du Merguellil de 1730 T/km<sup>2</sup>/an.

**Tableau 4 : Poids de sédiments déposés dans la retenue d'El Haouareb entre 1989 et 1997**

Période	Poids de sédiments déposés (10 <sup>6</sup> T)	Poids moy annuel (10 <sup>6</sup> T)
1989 - 1994	9,6	1,9
1994 - 1997	7,0	2,3
1989 - 1997	16,6	2,1

On peut constater que la moyenne est différente sur les 2 périodes observées. Mais si on considère que les mesures ont été terminées pour la partie amont en 1998 au lieu de 1997, et concernent donc une période de 4 ans (1994-1998), le poids moyen annuel devient 1,8 10<sup>6</sup> T /an c'est à dire presque le même que celui pour la période 1989-1994 et l'érosion spécifique correspondante de 1540 T/km<sup>2</sup>/an.

Comme on l'a vu, la précision des mesures, tant en ce qui concerne la topographie que les mesures de densité apparente, peut être sensiblement améliorée et ne permet pas en l'occurrence d'analyser et d'interpréter les différences constatées entre les deux périodes, antérieures et postérieures à 1994. Les taux d'érosion spécifique qui découlent de ces mesures sont tout à fait en concordance avec ceux évalués dans des travaux antérieurs.

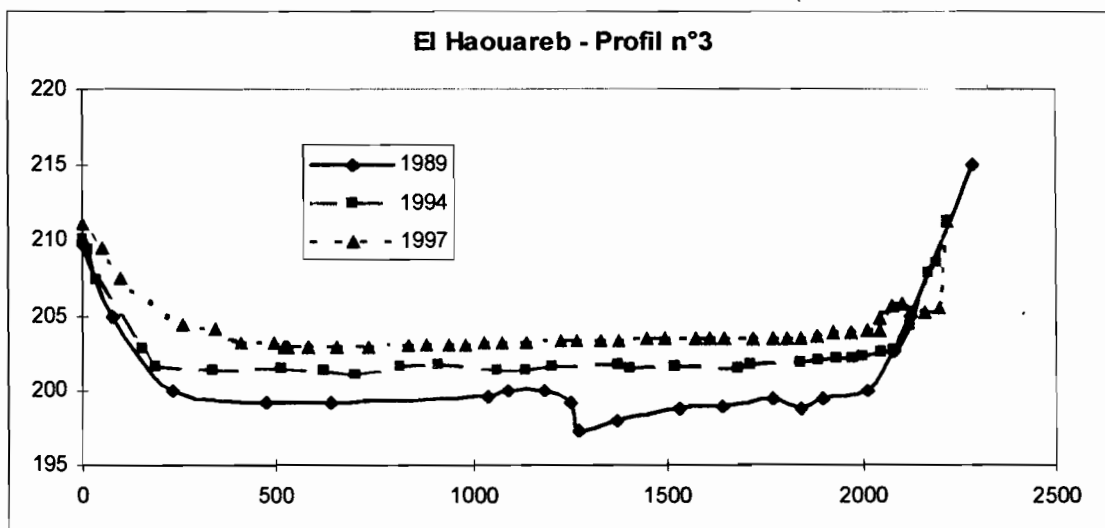
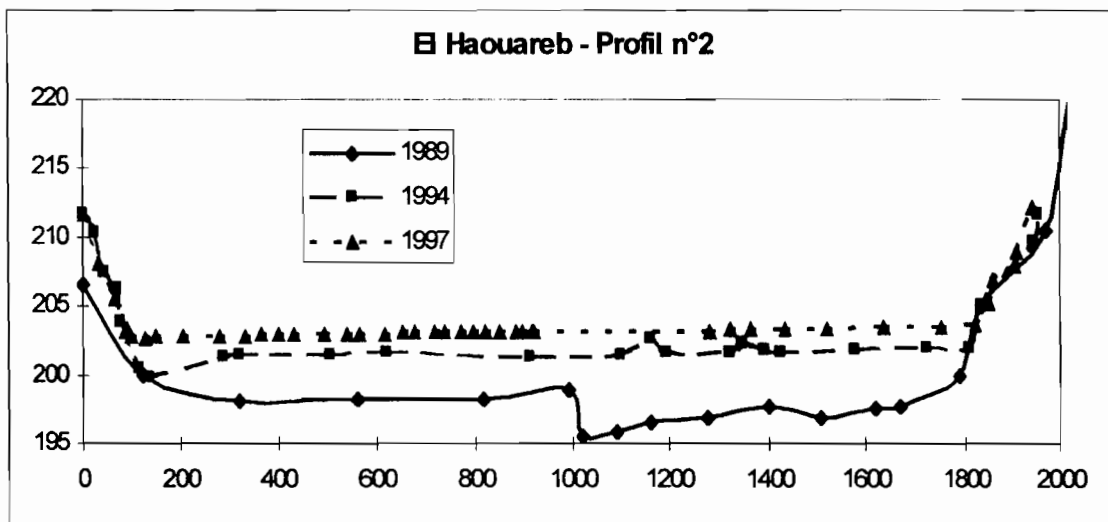
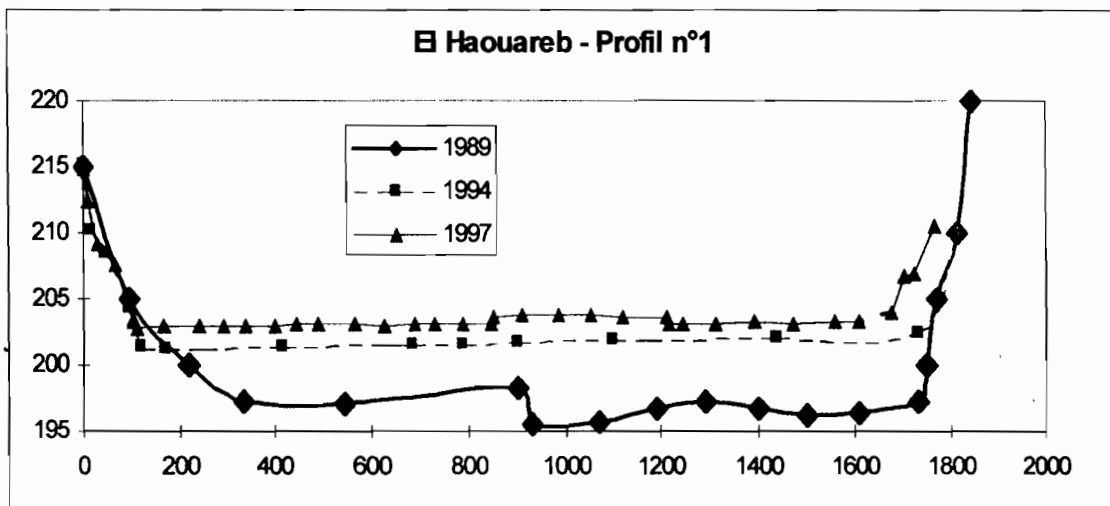
## ANNEXES

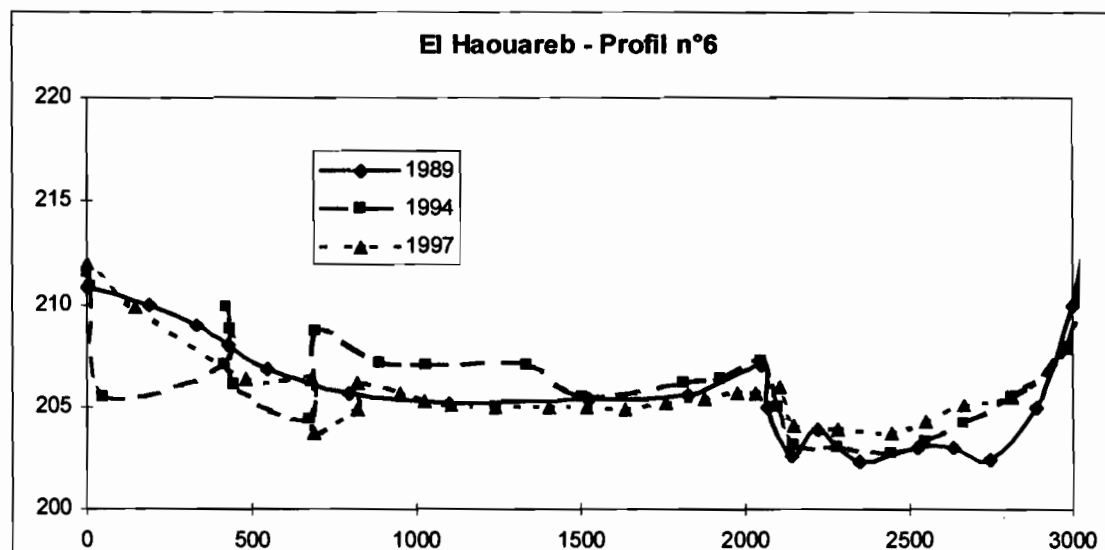
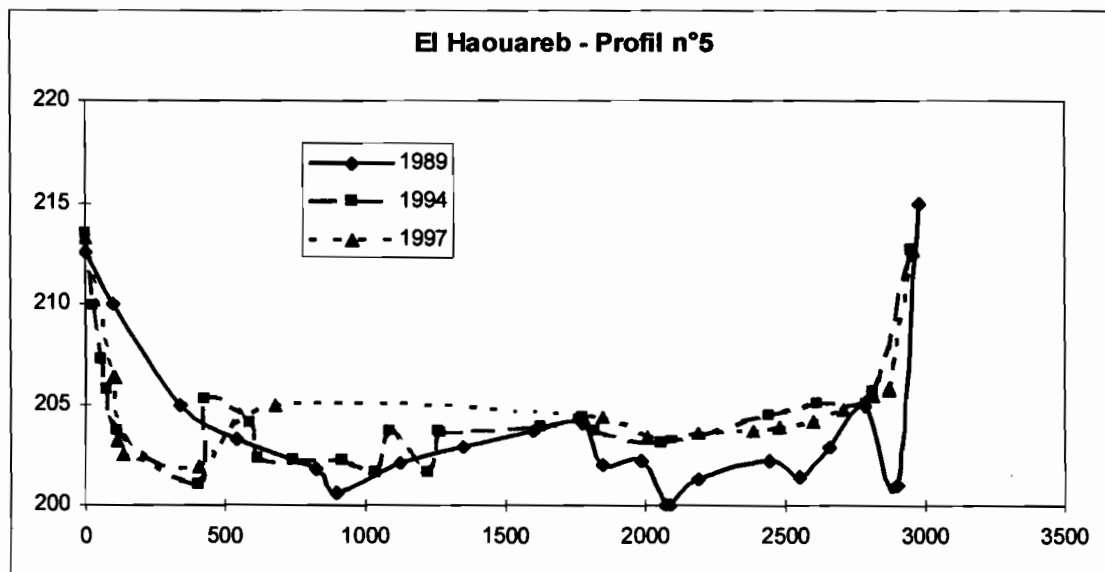
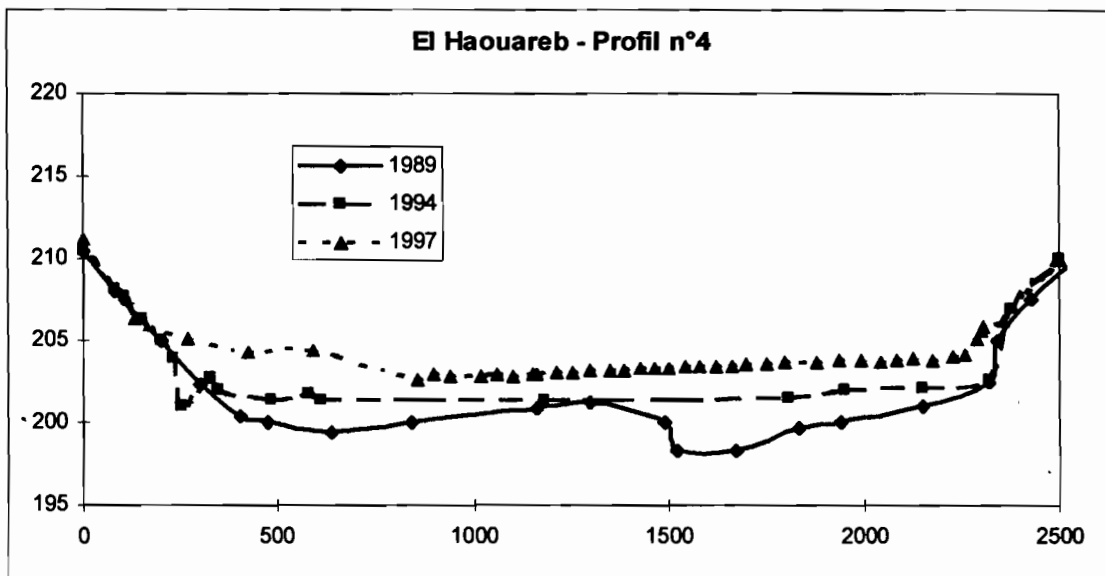
Tableau A1 : Altitudes des bornes de balisage des profils de 1 à 10 (NGT).

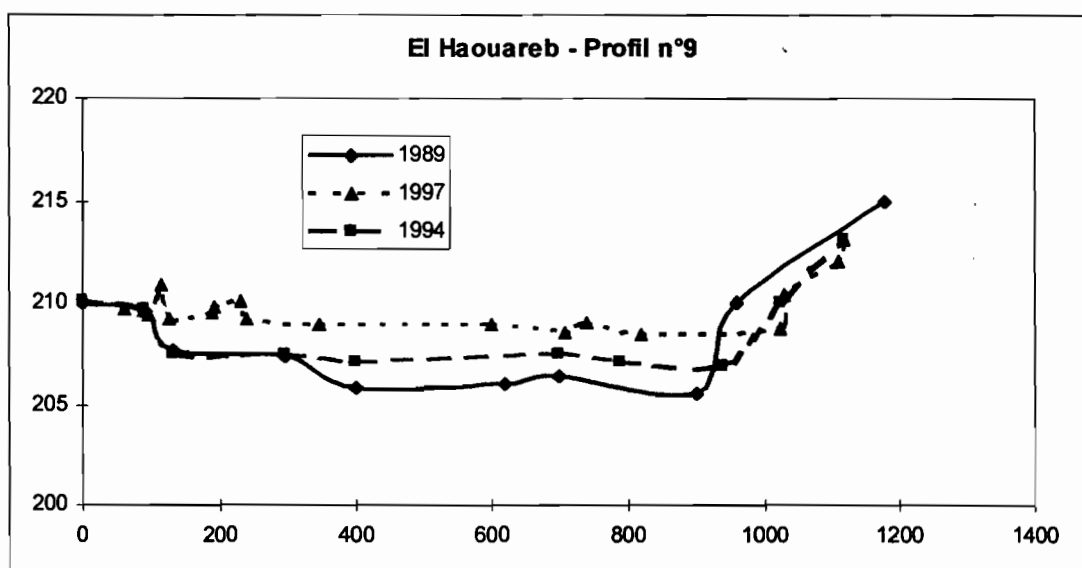
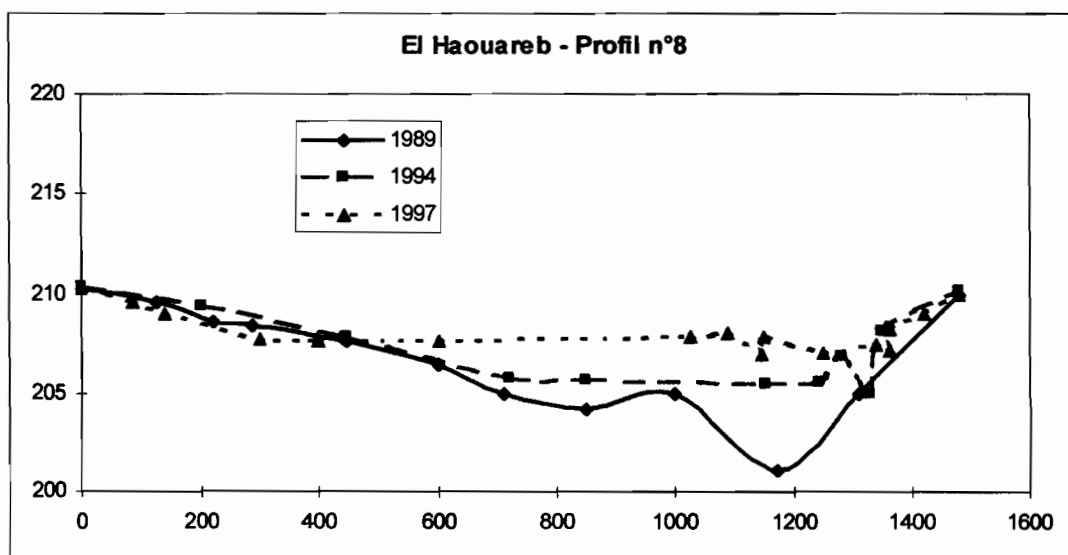
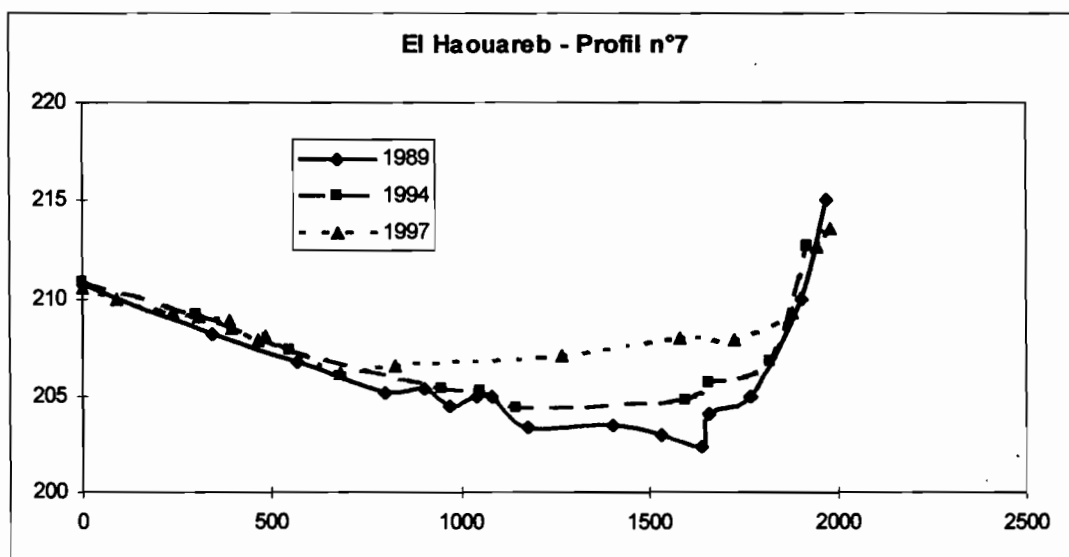
Désignation	Type de borne	Alti. 1994 du piquet fer	Etat actuel 1998	Nouveaux Repères 98	Alti. 98 rattachée au PC2 ou Réf. n°2 (*)
B1 RD	cyl.ciment dans pvc coulé sur piquet en fer	215,100	détruite et sans piquet	Rep.1 RD	214,863
B1 RG	idem	210,020	idem	Rep.1 RG	pour mém. 209,381
B2 RD	idem	211,750	blanche et sans piquet	Rep.2 RD	211,763
B2 RG	idem	211,640	idem	Rep.2 RG	212,299
B3 RD et pt. de Réf.5	idem	210,020	non peinte sans piquet	Rep.3 RD	211,194
B3 RG	idem	211,200	blanche et sans piquet	Rep.3 RG	210,797
B4 RD	idem	210,430	disparue	Rep.4 RD	non nivelé
B4 RG	idem	210,000	blanche et sans piquet	Rep.4 RG	211,212
B5 RD et pt. de Réf.6	idem	213,450	blanche avec piqt.fer de 97	Rep.5 RD	piqt.fer 97 213,284
B5 RG	idem dite du "palmier"	212,680	couchée à terre	Rep.5 RG	piqt.fer 98 placé + haut 213,556
B6 RD	idem	211,490	abimée et sans piquet	Rep.6 RD	212,038
B6 RG	idem dite du "palmier"	212,680	couchée à terre	Rep.6 RG	piquet 98 placé + haut 213,556
B7 RD et pt. de Réf.9	idem	210,850	blanche avec piqt.fer de 97	Rep.7 RD	210,557
B7 RG	idem dite du "palmier"	212,680	couchée à terre	Rep.7 RG	piquet 98 placé + haut 213,556
B8 RD	idem	210,340	couchée et sans piquet	Rep.8 RD	niv.GTH 98 210,300
B8 RG	idem	210,120	blanche et sans piquet	Rep.8 RG	niv.GTH 98 210,000
B9 RD	idem	210,100	décapitée et sans piquet	Rep.9 RD	niv.GTH 98 210,200
B9 RG	idem	213,130	blanche et sans piquet	Rep.9 RG	niv.GTH 98 213,100
B10 RD	idem	210,000	décapitée et sans piquet	Rep.10 RD	niv.GTH 98 210,100
B10 RG	idem	211,300	blanche et sans piquet	Rep.10 RG	niv.GTH 98 211,130

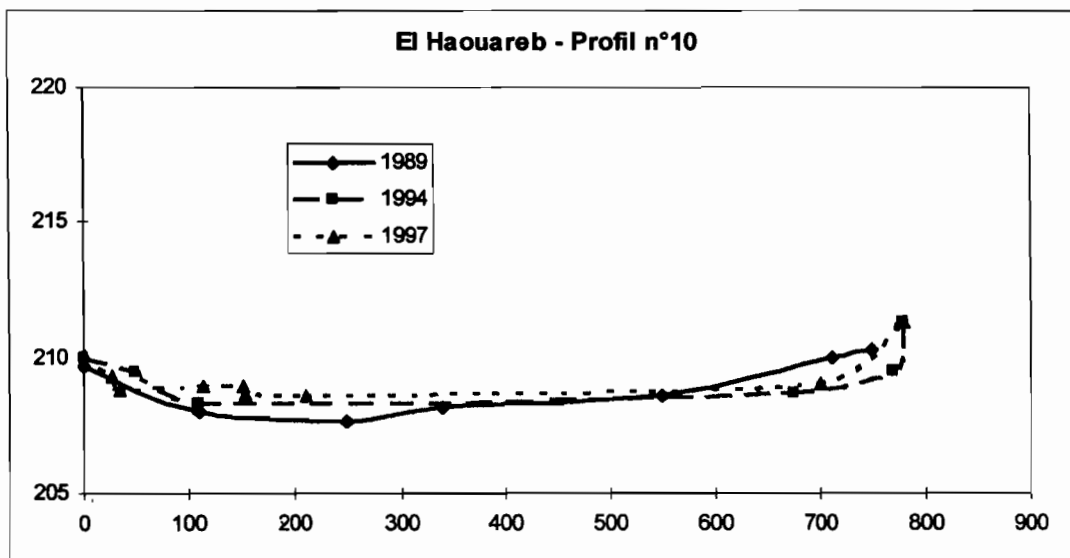
(\*) Ces points ont été pris à coté de la borne lorsqu'elle existe, par obligation, puisque les piquets en fer du nivellement de 1994 ont été recouverts par du ciment.  
Dans le cas d'une borne mentionnée disparue ou couchée, un piquet en fer a été placé approximativement à son emplacement de 1994.

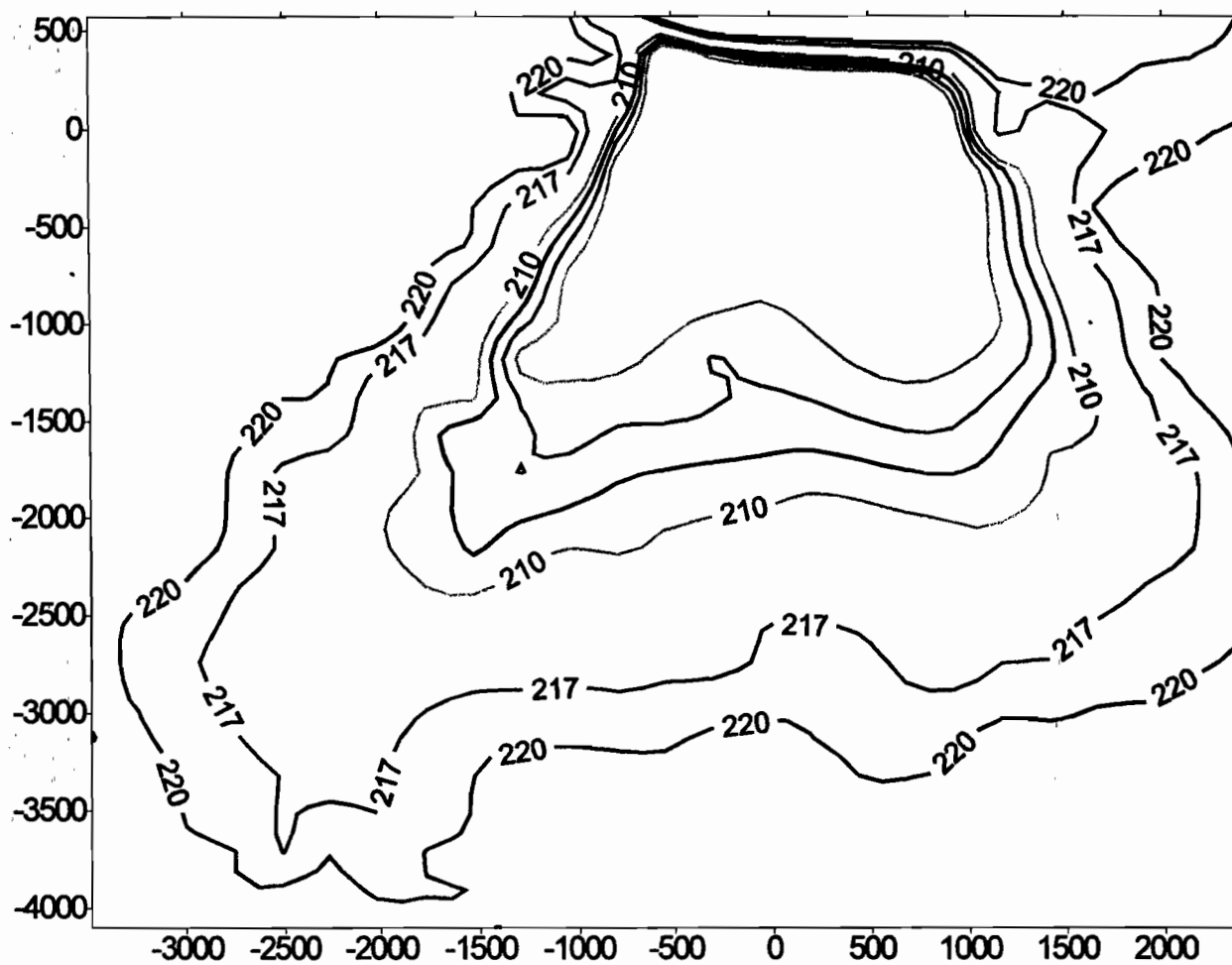
Annexe : Fig A2 Profils en travers des sections de 1 à 10



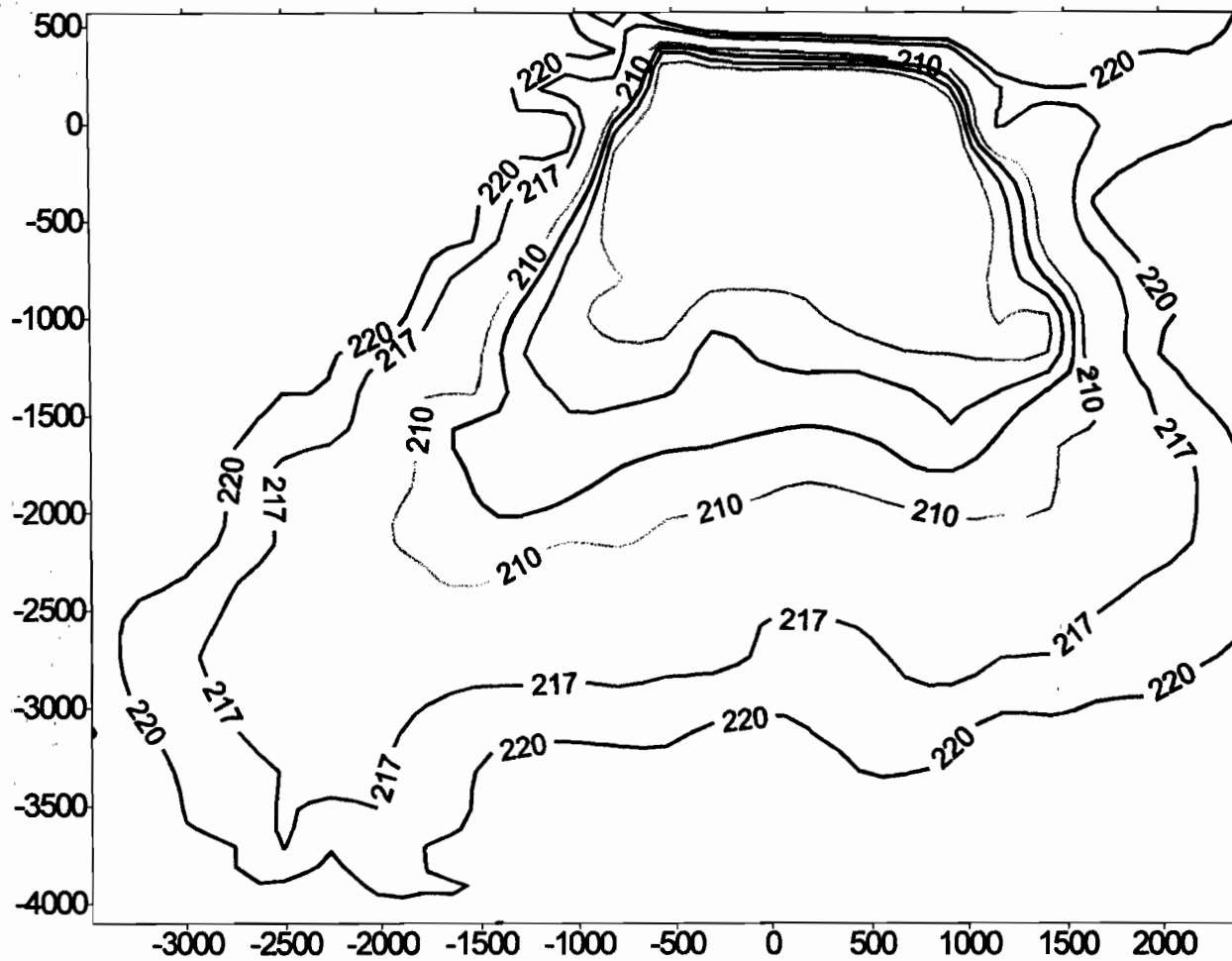






**Fig A3 : Carte bathymétrique de la retenue d'El Haouareb lors de la mise en eau (1989)**



**Fig A4 : Carte bathymétrique de la retenue d'El Haouareb en aout 1994**

**Fig A5 : Carte bathymétrique de la retenue d'El Haouareb en aout 1997**