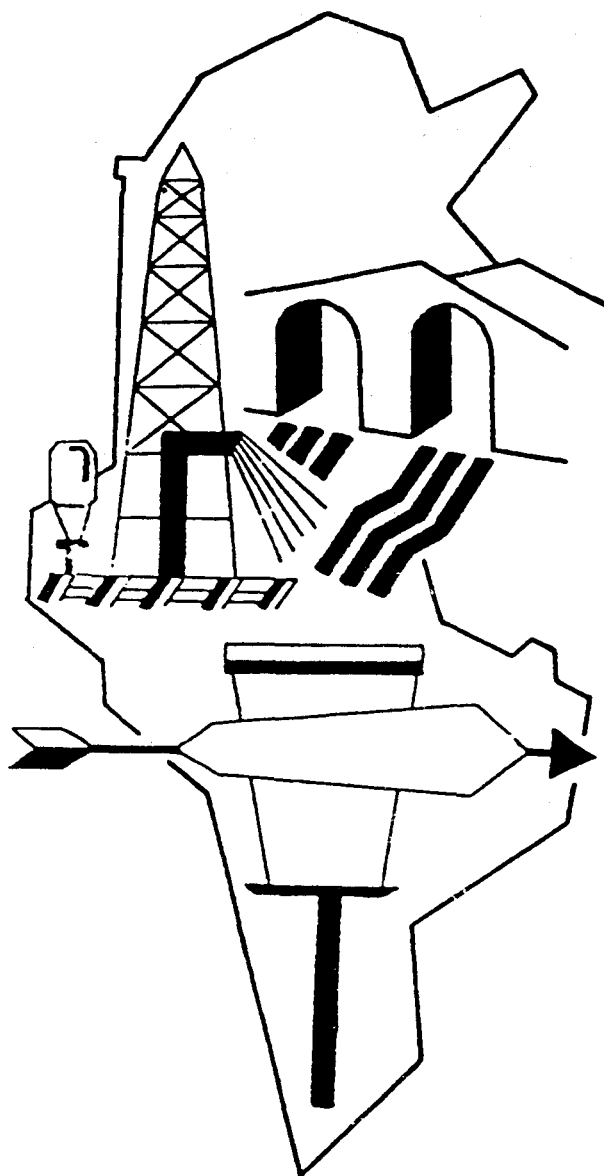


RESSOURCES EN EAU DE TUNISIE

No 10 - 1987



Publication de la DIRECTION GENERALE DES RESSOURCES EN EAU
Ministère de l'Agriculture
43 Rue la Manoubia - Montfleury 1008 Tunis - Tunisie

TABLE DES MATIERES

Page

INTRODUCTION

1ère Partie : Articles divers sur les ressources en eau

| | |
|---|----|
| 1 - Etude du ruissellement dans les bassins versants des Oueds ZEROUD et MERGUELLIL..... | 7 |
| Par H. Ayadi Chikhaoui : Ingénieur T.E - DGRÉ | |
| 2 - Examen à la caméra de télévision de 100 forages d'eau en TUNISIE..... | 18 |
| Par Y. Belkhiria : Ingénieur T.E - DGRÉ | |
| 3 - Evaluation du débit d'exploitation d'un puits par la méthode PORCHET | 28 |
| Par R. Khanfir : Ingénieur principal - DGRÉ | |
| 4 - Etude de l'eutrophisation en climat chaud (cas de la retenue de SIDI SALEM)..... | 35 |
| Par H. Sâadaoui : Ingénieur en chef - DGRÉ | |
| 5 - Simulation du comportement de la nappe de GAFSA Nord au niveau du seuil..... | 53 |
| Par H. Zammouri : Ingénieur principal - DGRÉ | |
| L. Noumni : Ingénieur T.E - DGRÉ | |

2ème Partie : Aperçu sur les principales études réalisées

| | |
|---|----|
| 6 - Contribution à l'étude hydrogéologique du flanc Sud-Est des dunes de NEFZA (OUCHTATA)..... | 60 |
| Par H. Hanâa : Ingénieur principal - DGRÉ | |

PREMIERE PARTIE**Articles divers sur les ressources en eau**

INTRODUCTION

Le 10ème numéro de la Revue " Ressources en Eau de Tunisie " illustre, par la diversité de ses articles, l'épanouissement des activités de recherches entreprises par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE). En effet, beaucoup d'efforts ont été déployés pour adapter de nouvelles technologies et utiliser de nouvelles méthodologies, de plus en plus performantes, grâce à la disponibilité d'un matériel technique plus sophistiqué.

De même, cet épanouissement s'est matérialisé par l'appréhension de nouveaux thèmes jadis ignorés, tel que l'eutrophisation des réservoirs de barrage en climat chaud.

L'introduction de ces nouvelles approches a été favorisée par le développement de divers projets, entre autres, de coopération bilatérale ou bien grâce à une assistance des Nations Unies par l'intermédiaire du PNUD, ses technologies ont été bien assimilées et constituent actuellement un outil de plus pour une valorisation adéquate de nos ressources en eau.

La deuxième partie de ce numéro présente un résumé succinct d'une étude sur l'hydrogéologie d'une région naturelle du pays.

ETUDE DU RUISSELLEMENT DANS LES BASSINS VERSANTS DES OUEDS ZEROUD ET MERGUELLIL

M. AYADI CHIKHAOUI : Ingénieur T.E - DGRE

INTRODUCTION

Les projets d'infrastructures hydrauliques dans les zones semi-arides sont soumis aux aléas des ressources en eau. En particulier, l'établissement des ouvrages et l'utilisation agricole des eaux de surface nécessitent des connaissances sur le ruissellement des cours d'eau.

Cette étude s'intéresse à l'évaluation de la disponibilité en eau de ruissellement en tout point des bassins versants des Oueds ZEROUD et MERGUELLIL qui constituent les principaux cours d'eau de la TUNISIE CENTRALE et qui sont connus depuis longtemps par la rareté de leurs ressources en eaux perennes et la violence redoutable de leurs crues. ces deux bassins sont limités comme suit :

- à la station de SIDI SAAD pour le ZEROUD.
- au site d'EL HAOUAREB pour le MERGUELLIL.

1. PLUVIOMETRIE DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS ZEROUD ET MERGUELLIL

1.1 Données pluviométriques :

Sur l'ensemble des deux bassins versants nous disposons de 42 postes où les données pluviométriques sont homogènes sur une période de 56 ans (1925/26-1980/81). L'homogénéisation de ces données a été faite par la méthode du vecteur régional des indices annuels de précipitation et ceci par application d'un programme de calcul automatique mis au point à l'ORSTOM (Y. BRUNET MORET, 1979).

1.2 Estimation des pluies moyennes interannuelles

Compte tenu de l'hétérogénéité de la répartition spatiale de ces 42 postes (Fig.1) et afin de tracer les isohyètes annuelles, nous avons cherché à améliorer l'information pluviométrique sur ces deux bassins. Pour cela, nous avons essayé d'estimer les moyennes interannuelles "longue durée" pour les postes ayant de courtes séries d'observations et qui n'ont pas été pris en compte dans l'étude d'homogénéisation (A. LAFFORGUE et E. MAMI, 1983). La méthode utilisée consiste à :

- a) Chercher pour chacun de ces postes, des corrélations avec les stations voisines présentant des séries étendues (56 ans) puis à prendre comme station de référence celle avec laquelle, le poste présente le meilleur coefficient de corrélation et possède le maximum d'années d'observations communes.
- b) Estimer pour ces postes des valeurs moyennes "longue durée" à partir de celles des postes de référence correspondants.

Ainsi, nous avons été obligés, faute de mieux, de considérer à priori que les données sont homogènes.

La moyenne "longue durée" est alors calculée par l'expression suivante :

$$M_L = \frac{M_C + M_A}{2}$$

Dans laquelle :

- \bar{M}_A : Moyenne "longue durée" de la station de référence A.
- \bar{M}_B : Moyenne inconnue "longue durée" de la station B.
- \bar{m}_A : Moyenne "courte durée" de la station de référence A.
- \bar{m}_B : Moyenne "courte durée" de la station B.

Cette expression nous a permis de calculer les moyennes "longue durée" pour 48 postes, totalisant ainsi avec les 42 postes citées ci-dessus un nombre de 90 valeurs moyennes (Tableau 1).

1.3 Etablissement des corrélations pluie-altitude

Les 90 valeurs moyennes restent toujours insuffisantes pour le tracé des isohyètes en raison également de leur mauvaise répartition spatiale; ceci nous a conduit à chercher une corrélation liant la pluie à l'altitude à partir des moyennes des postes retenus dans l'étude d'homogénéisation. La représentation graphique de la pluviométrie, dans toute la région, en fonction de l'altitude des postes a montré un nuage de point trop dispersé pour l'ajustement d'une courbe quelconque. Par contre, en procédant par zone climatique, il a été possible chaque fois d'ajuster aisément une courbe. Les courbes ainsi obtenues et présentées sur la figure 2 sont des droites dont les équations sont :

$$\begin{aligned} P &= 0,46 H + 177,65 && \text{pour la zone 1} \\ P &= 0,20 H + 237,61 && \text{pour la zone 2} \\ P &= 0,50 H + 287,54 && \text{pour la zone 3 et 6} \\ P &= 0,23 H + 158,13 && \text{pour la zone 4} \\ P &= 0,15 H + 306,99 && \text{pour la zone 5} \end{aligned}$$

dans lesquelles P représente la pluie moyenne exprimée en mm et H l'altitude exprimée en mètre.

1.4 Mise au point de la carte des isohyètes

Pour l'établissement de la carte des isohyètes, nous avons utilisé les 90 valeurs moyennes aux postes pluviométriques et les différentes corrélations liant la pluie à l'altitude. Ces corrélations ont permis d'estimer avec une précision acceptable la valeur de la pluie en un point à partir du moment où l'on connaît son altitude.

Il a d'abord été fait un tracé des courbes de niveau les plus caractéristiques secteur par secteur. La détermination de la correspondance entre les courbes de niveau et leurs valeurs en équivalent hauteur de pluie a posé quelques problèmes au niveau des "raccordements de secteurs". Ce premier tracé a ensuite été superposé à la carte sur laquelle avaient été portés les postes avec leurs hauteurs pluviométriques moyennes. Les résultats obtenus se sont avérés très satisfaisants à quelques exceptions près.

Les courbes d'égale hauteur pluviométrique sont par la suite dessinées avec une équidistance de 25 mm.

21

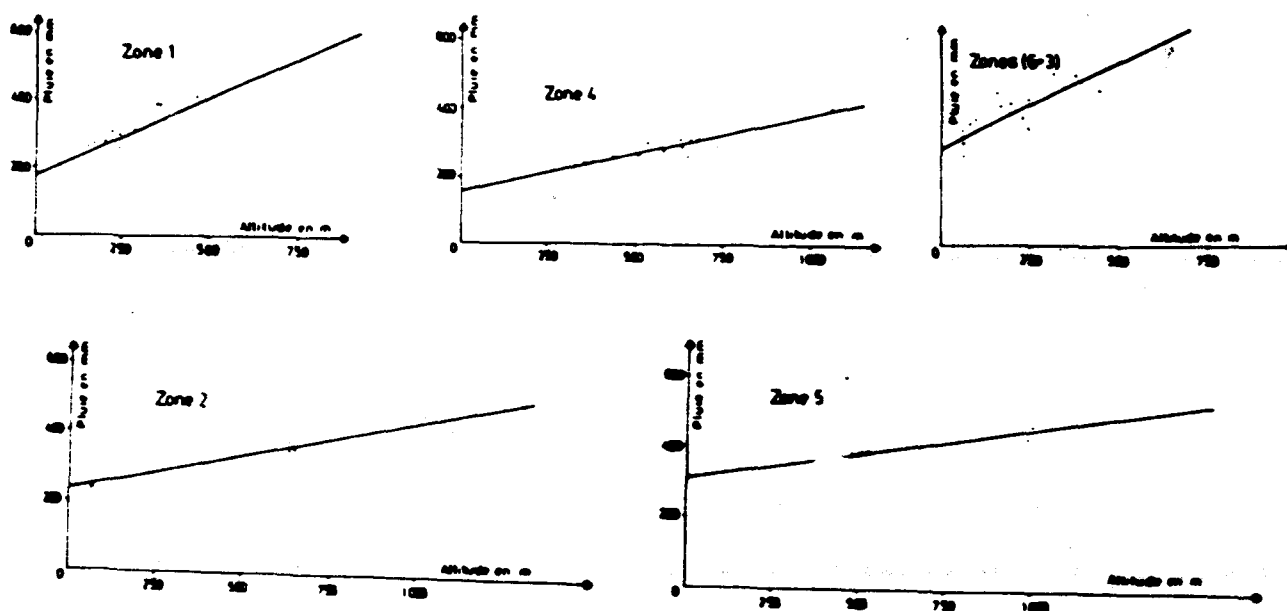
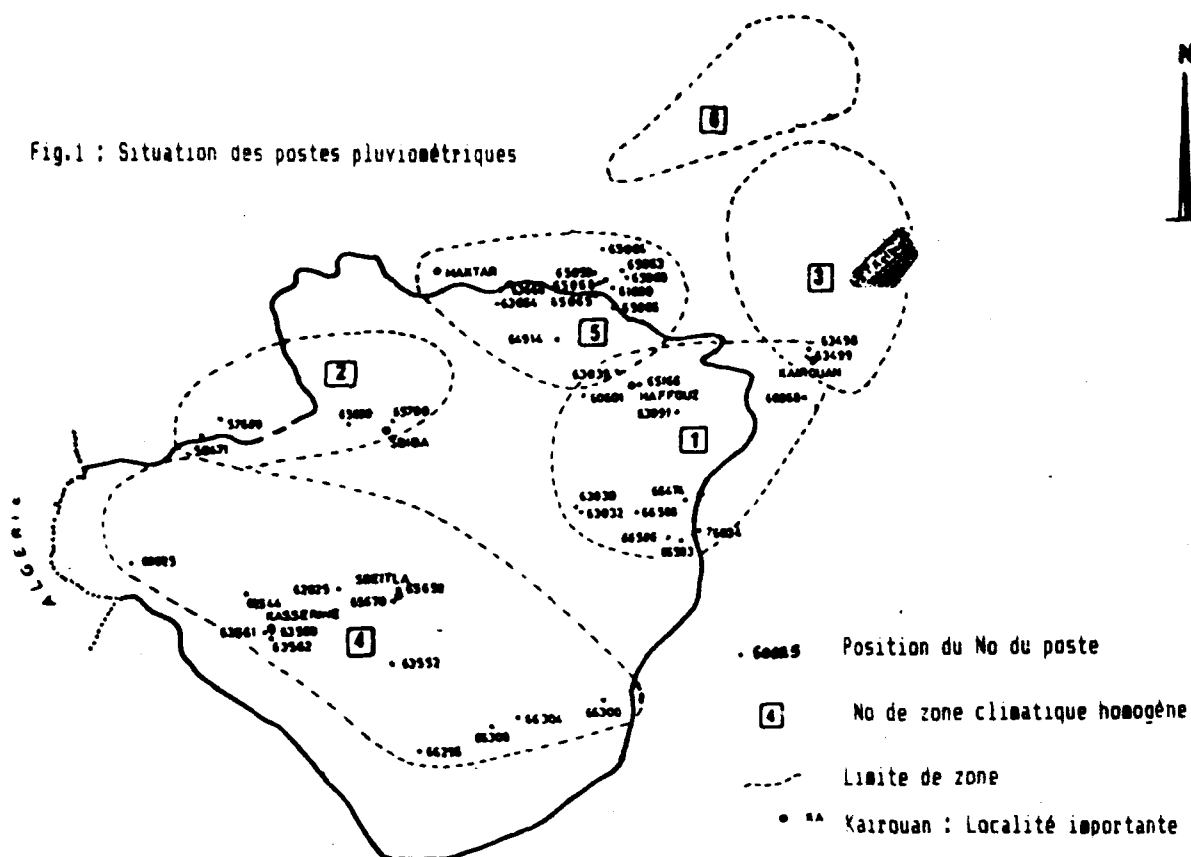


Fig.2 : Correlation plume-altitude

Tableau 1 : Altitude des postes pluviométriques et pluies moyennes durant la période (1925/26 - 1980/81)

| No | No Mecano | Nom de la station | Pluie (mm) | Alt-de (m) | No | No Mecano | Nom de la station | Pluie (mm) | Alt-de (m) |
|----|-----------|--------------------------|------------|------------|----|-----------|---------------------------|------------|------------|
| 1 | 60025 | Ain Amara P.F | 404,2 | 1 060 | 46 | 63646 | Megada | 274,6 | 295 |
| 2 | 60098 | Ain Boughanem | 233,8 | 805 | 47 | 64768 | Oum Jeddour | 414,1 | 902 |
| 3 | 60146 | Ain Jaffel Sbeitla | 363,6 | 670 | 48 | 64780 | Oum Latham | 235,7 | 338 |
| 4 | 60169 | Ain Jelloula | 322,2 | 175 | 49 | 64808 | Oued El Kared | 319,5 | 680 |
| 5 | 60237 | Ain Khazazia | 260,8 | 70 | 50 | 64842 | Oued Berb Barrage | 238,7 | 700 |
| 6 | 60291 | Ain Khmouda | 317,1 | 780 | 51 | 64906 | Oued El Hachim | 282,4 | 455 |
| 7 | 60318 | Ain Kaudial | 390 | 410 | 52 | 64914 | Oued Hajar B4 | 313,2 | 375 |
| 8 | 60393 | Ain Saboun | 361 | 560 | 53 | 65059 | Ousslatia Ksour Magren | 322,1 | 540 |
| 9 | 60572 | Adhira Henchir B.Tebba | 321,2 | 782 | 54 | 65063 | Ousslatia Ferme 4 | 404,7 | 520 |
| 10 | 60601 | El Ala Ecole | 404,6 | 457 | 55 | 65064 | Ousslatia Forêt | 420,8 | 465 |
| 11 | 60979 | Bir Rtiba Jebel Selloum | 240,6 | 880 | 56 | 65056 | Ousslatia INRAT | 404 | 460 |
| 12 | 61371 | Bou Hafna Pompage | 304,4 | 300 | 57 | 65066 | Ousslatia G.M | 394 | 525 |
| 13 | 61542 | Chaambi Mine S.K | 370,1 | 1 300 | 58 | 65068 | Ousslatia F5 | 387,4 | 500 |
| 14 | 61544 | Chaambi Borj | 263,4 | 650 | 59 | 65069 | Ousslatia Boujedra FAO | 390,1 | 505 |
| 15 | 61545 | Barrage Chaambi | 248,3 | 658 | 60 | 65168 | Pichon T.P Haffouz | 331,4 | 296 |
| 16 | 61624 | Cherichira Ecole | 304,9 | 321 | 61 | 62726 | Foum El Guelta Sbeitla | 387 | 565 |
| 17 | 61800 | Degouara Ferme Ousslatia | 388,5 | 480 | 62 | 65432 | Rohia Bonnenfank | 320,2 | 625 |
| 18 | 62051 | Djilma B.Jaballah Ferme | 253,1 | 350 | 63 | 65437 | Rohia Ferme | 352,5 | 625 |
| 19 | 62053 | Djilma Gare | 256,2 | 367 | 64 | 65670 | Sbeitla T.P.H | 307 | 533 |
| 20 | 62054 | Djilma HER | 256,6 | 360 | 65 | 65657 | Sbeitla P.F | 420,3 | 700 |
| 21 | 62159 | Jebel Semama P9 | 435,7 | 1 248 | 66 | 65658 | Sbeitla S.E | 282,6 | 580 |
| 22 | 50471 | Ain Taza Kef Chagaga | 426,4 | 1 100 | 67 | 65666 | Sbeitla Nerd Hir Amara | 324,7 | 630 |
| 23 | 62343 | Draa Zmoul | 278,5 | 664 | 68 | 65667 | Sbeitla Derrichon | 304,3 | 490 |
| 24 | 62735 | Foussana Sonede | 307,5 | 712 | 69 | 65668 | Sbeitla Jebel Mrhilla | 317,5 | 830 |
| 25 | 62744 | Faid Sonede | 271 | 325 | 70 | 62049 | Djilma Agro-Cominat | 309 | 352 |
| 26 | 62825 | Garrat El Attach | 297 | 634 | 71 | 65672 | Sbeitla Combement | 319,2 | 471 |
| 27 | 62969 | Gueria | 345,3 | 674 | 72 | 65673 | Sbeitla Ferme Dumont CFP | 340,1 | 560 |
| 28 | 63030 | Hajeb El Aïoun | 381,5 | 350 | 73 | 65674 | Sbeitla Ferme Chastel | 380,5 | 357 |
| 29 | 63032 | Hajeb El Aïoun 1 | 281,9 | 343 | 74 | 65690 | Shiba Barrage | 361,2 | 640 |
| 30 | 63038 | Haffouz D.R.E | 309 | 270 | 75 | 65700 | Shiba Ville S.M | 374,8 | 627 |
| 31 | 57680 | Thala T.P.H | 466,1 | 1 020 | 76 | 65847 | Skhira B.16 Kef Labiodh | 404,1 | 600 |
| 32 | 63091 | Haouareb 1 | 271,4 | 195 | 77 | 66024 | Sidi Ali Ben Aoun | 256,8 | 465 |
| 33 | 63325 | Henchir Mnhla | 292,2 | 845 | 78 | 66068 | Sidi Amor Kenani | 222,8 | 82 |
| 34 | 63474 | Jidiliene Ecole | 340,1 | 610 | 79 | 66238 | Sidi Boujdaria | 286,1 | 215 |
| 35 | 63498 | Kairouan S.M | 309,4 | 66 | 80 | 66296 | Sidi Bouzid Bir El Hfay | 269,5 | 435 |
| 36 | 63499 | Kairouan CFP ex:Pompage | 305,4 | 66 | 81 | 66300 | Sidi Bouzid Ferme 16 | 225,4 | 325 |
| 37 | 63549 | Khanguet Slouguia J.Hra | 293,5 | 785 | 82 | 76034 | Sidi Ali Nasrallah | 258,6 | 150 |
| 38 | 63552 | Khanguet Zazia | 269,3 | 502 | 83 | 66302 | Sidi Bouzid Ferme 14 | 311,8 | 330 |
| 39 | 63560 | Kasserine 1 Village | 318,3 | 328 | 84 | 66304 | Sidi Bouzid Ferme 18 | 233 | 330 |
| 40 | 63561 | Kasserine INRAT | 215,1 | 657 | 85 | 66588 | Sidi Saad Jaugeage | 253,8 | 238 |
| 41 | 63562 | Kasserine HER | 318,2 | 676 | 86 | 66308 | Sidi Bouzid Ferme 22 | 239,1 | 404 |
| 42 | 63664 | Kessra B9 | 471,6 | 1 000 | 87 | 66314 | Sidi Bouzid Ouled M'hamed | 262,4 | 350 |
| 43 | 63666 | Kessra Forêt | 438,3 | 986 | 88 | 66586 | Sidi Saad 1 Fraternite | 297,1 | 340 |
| 44 | 63815 | Ksar Kebrit | 410,9 | 281 | 89 | 66474 | Sidi Mansour Cherahil | 264,8 | 162 |
| 45 | 63936 | Lajeret P.F | 439,3 | 950 | 90 | 66587 | Sidi Saad 2 | 301,8 | 270 |

Dans certains cas où des valeurs pluviométriques moyennes sont supérieures ou inférieures à l'isohyète tracée, nous avons choisi les valeurs observées lorsque nous étions sûrs de la qualité des observations. Dans d'autres cas, la connaissance d'anomalies de tout ordre dans les valeurs moyennes, nous a amené à évaluer la hauteur pluviométrique par la corrélation appropriée.

La carte des isohyètes annuelles ainsi établie a montré que :

- La pluviométrie varie entre 250 et 450 mm avec 72 % du bassin recevant plus de 300 mm et 27 % plus de 400 mm.
- La décroissance de la pluie se fait dans la direction Nord-Ouest - Sud-Est.

2. LE RUISSELLEMENT DANS LES BASSINS DU ZEROUD ET DU MERGUELLIL

2.1 Extension des données hydrologiques

Les bassins versants des Oueds ZEROUD et MERGUELLIL sont équipés de 8 stations principales et de 13 stations secondaires. Les séries d'observations dans les stations secondaires étant trop courtes, nous n'avons utilisé que les données des 8 stations principales (Tableau 2).

L'extension de lames d'eau ruisselées observées dans les stations principales est faite à l'aide de regressions hydropluviométriques en

ajustant, par la méthode des moindres carrés, une courbe ($Y=ax^b$) en puissance à l'ensemble des points représentatifs des ruissellements annuels observés à une station en fonction du vecteur d'homogénéisation régional des indices annuels de précipitation Z_i de la zone climatique dans laquelle est situé le sous-bassin considéré.

Les vecteurs des 5 zones climatiques des bassins du ZEROUD et MERGUELLIL étant connus sur 56 ans, les séries hydrologiques seront également étendues à cette même période (1925/26 - 1980/81).

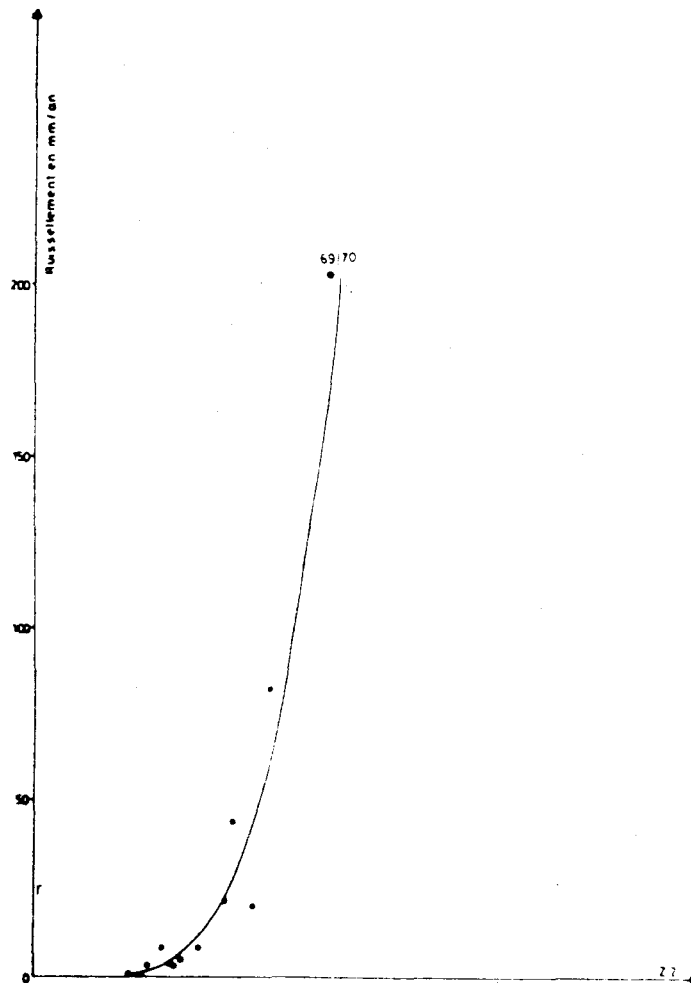
Signalons que :

- Ce mode de reconstitution n'est valable que dans la mesure où il conserve les valeurs moyennes et de dispersion de l'échantillon observé. Les valeurs annuelles reconstituées prises séparément peuvent être très différentes des valeurs réellement observées.
- La corrélation n'est sûre qu'à l'intérieur de l'intervalle observé, au delà toute extrapolation est hasardeuse.

Ainsi, après avoir ajusté une courbe à l'ensemble des points observés dans chacune des stations, nous reconstituons tout d'abord les valeurs de la période d'observation. Ensuite pour juger de la qualité de la reconstitution, nous comparons les caractéristiques des 2 échantillons (observé et reconstitué) sans tenir

Tableau 2 : Inventaire des stations hydrométriques principales

| Bassins | Stations | Coordonnées | | | Nombre d'années complètes d'observa- tions |
|------------|----------------|------------------|------------------|---------------|--|
| | | Latitude Nord | Longitude Est | Alti- tude | |
| MERGUELLIL | Skhira | 376 71 10 | 76 83 00 | 570 | 7 |
| | Haffouz | 396 61 50 | 86 13 70 | 268 | 13 |
| | Boujdaria | 396 54 20 | 86 18 00 | 215 | 5 |
| ZEROUJ | Ain Saboun | 396 51 10 | 76 53 20 | 560 | 14 |
| | Ksar Kebrit | 396 32 90 | 86 11 95 | 281 | 7 |
| | Khanguet Zazia | 386 99 80 | 76 53 80 | 481 | 24 |
| | Bled Lassoued | 396 14 45 | 76 95 65 | 295 | 7 |
| | Sidi Saad | 396 32 00 | 86 17 00 | 230 | 27 |

Fig.3 : Correspondance entre les lames ruisselées annuelles à AIN SABOUN et l'indice pluviométrique régional Z_2

compte de la valeur de l'année exceptionnelle 1969/70 qui perturbera forcément les résultats de calcul des caractéristiques hydrologiques. Ainsi, l'équation de la courbe ajustée est conservée pour la reconstitution de la série de lames ruisselées sur 56 ans lorsque les caractéristiques des deux échantillons (observé et reconstitué) sont très proches. Ceci nous a permis d'avoir 5 courbes dont les équations sont :

$R = 29,42 (Z5)^{1,02}$ pour le MERGUELLIL à SKHIRA.

$R = 22,03 (Z5)^{2,54}$ pour le MERGUELLIL à HAFFOUZ.

$R = 12,65 (Z4)^{2,09}$ pour l'Oued HATAB à KGT ZAZIA.

$R = 12,96 (Z2)^{1,54}$ pour l'Oued HATOB AIN SABOUN.

$R = 8 (Z)^{2,37}$ pour le ZEROUB à SIDI SAAD.

avec :

R = Lame d'eau ruisselée moyenne annuelle en mm.

Z_i = Vecteur régional de la zone climatique i .

$$Z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_4}{3}$$

La figure 3 représentative de la station de AIN SABOUN est donnée à titre d'illustration.

Pour les autres stations (BLED LASSOUED, KSAR KEBRIT et BOUJDARIA) la période d'observations étant trop courte (74/75 - 80/81), les extensions des séries par ces regressions ont conduit à des sous estimations des apports. Cependant nous avons estimé les volumes ruisselés moyens annuels à ces stations comme suit :

- Les volumes ruisselés moyens à BLED LASSOUED et à KSAR KEBRIT sont estimés comme étant égaux respectivement à 33 % et 59 % du volume ruisselé moyen à SIDI SAAD (S. BOUZAIANE et A. LAFFORGUE, 1982).

- Le volume ruisselé moyen à SIDI BOUJDARIA est calculé à partir de celui de HAFFOUZ et ceci en supposant que les modules des apports à ces deux stations sont dans le même rapport que les moyennes calculées sur la période commune d'observation (puisque ces deux stations sont bien corrélées $r = 0,84$).

Nous présentons dans le tableau 3 les valeurs moyennes observées et reconstituées.

Tableau 3 : Moyennes établies

| Stations (...)km2 | Années Obs- vées | Moyenne | |
|----------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| | | observée | reconstituée |
| | | Lame ruis- selée (mm) | Volume ruis- selé (Mm3) |
| Skhira (188) | 7 | 25,62 | 4,82 |
| Haffouz (675) | 12 | 39,17 | 26,44 |
| Boujdaria (890) | 5 | 26,32 | 23,43 |
| Ain Saboun (813) | 14 | 30,41 | 24,73 |
| Ksar Kebrit (2945) | 6 | 13,58 | 39,99 |
| Kgt Zazia (2200) | 24 | 20,09 | 44,20 |
| B.Lassoued (5290) | 7 | 3,01 | 15,92 |
| Sidi Saad (8650) | 27 | 18,81 | 162,71 |

2.2 Relation pluie-ruissellement

Cette relation est déterminée par l'ajustement d'une courbe de regression à l'ensemble des 8 valeurs moyennes de lames ruisselées en fonction de la pluie moyenne annuelle sur les huit bassins correspondants. Cette pluie moyenne étant calculée par la méthode des isohyètes en utilisant la carte des précipitations

La courbe ajustée (Fig.4-a) a pour équation :

$$R = 4,26 \times 10^{-15} (P)^{4,06} \quad (1) \text{ avec } r = 0,92$$

Cette équation permet à chaque fois qu'on connaît la pluie moyenne annuelle sur un bassin versant, de calculer la lame d'eau ruisselée à son exutoire.

2.3 Etablissement de la carte de ruissellement

La relation indiquée ci-dessus ne permet pas de tracer directement une carte de ruissellement car en chaque point où on veut faire passer une courbe d'égale lame ruisselée, il faut calculer la pluie moyenne sur le bassin délimité en ce point. Or ceci est impossible, ce qui nous a amenés à chercher d'autres relations liant le ruissellement à la pluviométrie moyenne ponctuelle.

2.3.1 Relation lame ruisselée-pluie à l'exutoire du bassin

Nous avons utilisé la relation (1) pour le calcul de 13 lames ruisselées dans les 13 stations secondaires, totalisant ainsi avec celles des

stations principales 21 valeurs sur lesquelles nous avons essayé d'ajuster une courbe en fonction de la pluie à l'exutoire. Le nuage de point étant trop dispersé, nous avons alors procédé par bassin versant en ajustant trois courbes de la forme ax^b (Fig.4 : b,c,d) dont les équations sont :

$$R = 2,09 \times 10^{-9} (Pe)^{2,95} \quad (2) \text{ Pour le bassin de la branche Nord du ZEROUD.}$$

$$R = 7,67 \times 10^{-10} (Pe)^{4,18} \quad (3) \text{ Pour le bassin de la branche Sud du ZEROUD.}$$

$$R = 0,02x(Pe)^{4,27} \quad (4) \text{ Pour le bassin du MERGUELLIL.}$$

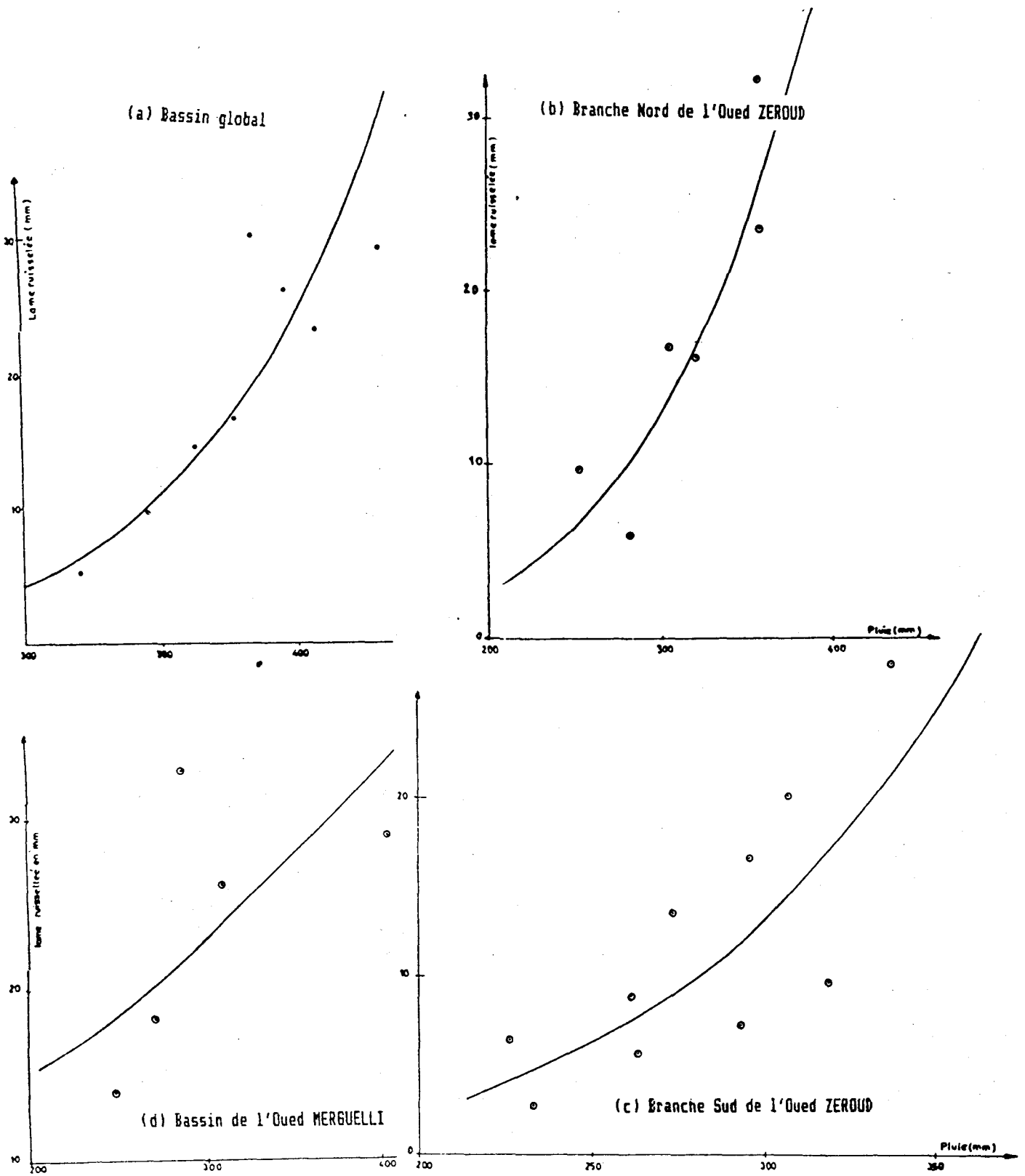
Dans lesquelles R représente la lame ruisselée moyenne annuelle en mm et Pe la pluie moyenne à l'exutoire du bassin en mm.

2.3.2 Mise au point de la carte de ruissellement

Les trois relations (2, 3 et 4) permettent d'estimer avec une précision acceptable la lame ruisselée moyenne annuelle en un point à partir du moment où on connaît la pluie moyenne annuelle en ce point.

Il a été d'abord fait un tracé des isohyètes avec leurs valeurs en équivalents de lames ruisselées bassin par bassin. Ce premier tracé a été par la suite superposé à la carte sur laquelle avaient été portées les stations avec leurs valeurs en lames ruisselées. Les résultats s'étant avérés satisfaisants, les courbes "isolames" ruisselées sont alors dessinées avec une équidistance de 5 mm.

Fig.4 : REGRESSION : Lane ruisselée - pluie moyenne



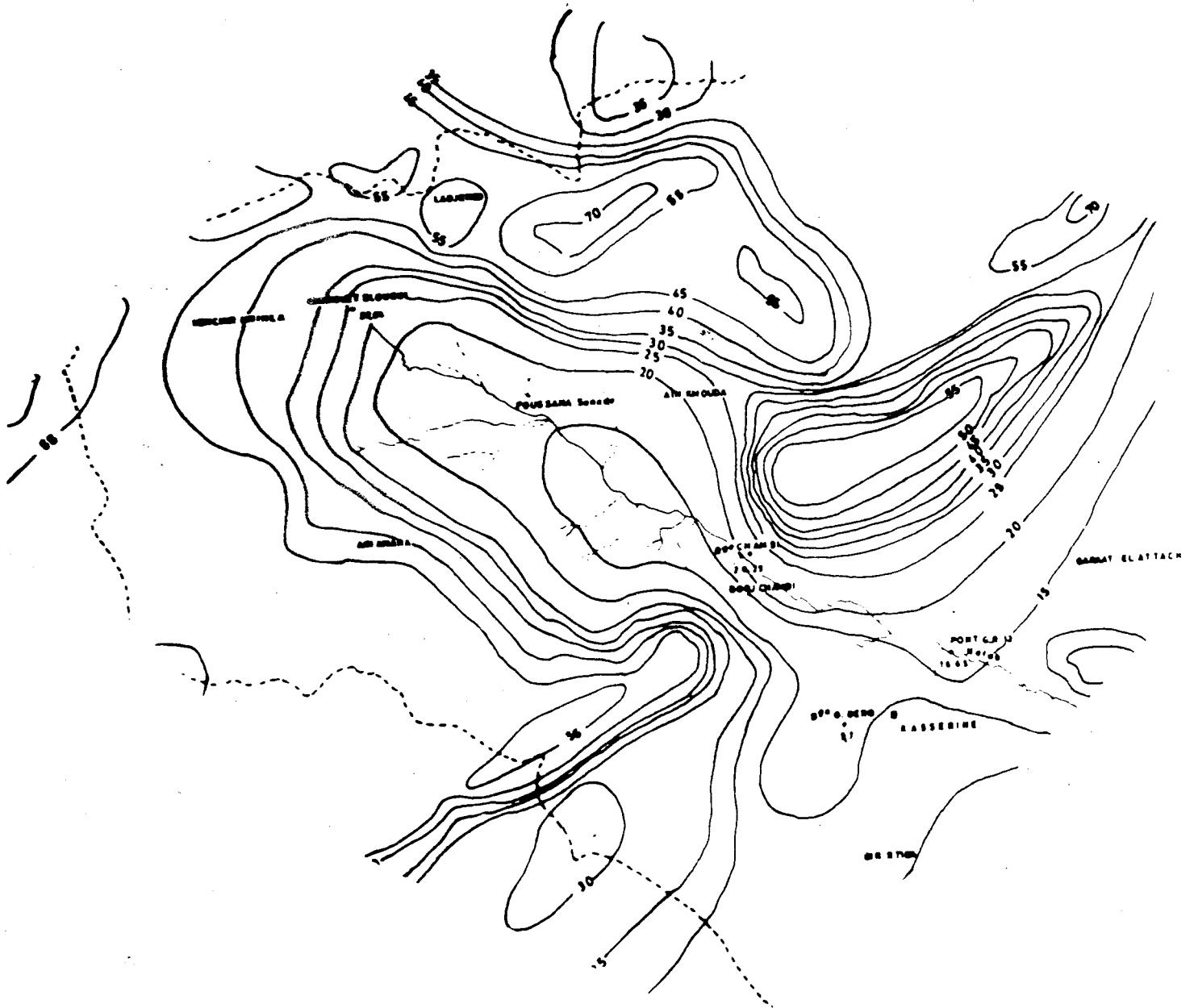


Fig.5 : Extrait de la carte de ruissellement
 (Branche Sud de l'Oued ZERQUD)
 Période d'homogénéisation (1925-61) 56 ans

La carte de ruissellement établie et dont un extrait est présenté en Fig.5 montre que :

- La lame d'eau ruisselée varie entre 70 mm en amont du bassin de la branche Sud et 5 mm au niveau de la plaine confirmant ainsi les phénomènes d'épandage de crue et d'infiltration au niveau de l'Oued EL FEKKA.
- Lame ruisselée décroît de 40 mm dans le haut MERGUELLIL au niveau du plateau de la KESRA à 15 mm à l'aval du bassin.

CONCLUSION

- Les formules, liant le ruissellement à la pluviométrie, présentées ci-dessus ne sont valables que dans les bassins du ZEROUD et MERGUELLIL.

- La carte de ruissellement établie dans cette étude permet de déterminer par lecture directe la lame ruisselée moyenne annuelle en tout point de ces deux bassins. Toutefois, l'équation (1) reste la meilleure pour le calcul de cette lame en un point d'un cours d'eau où on veut construire un ouvrage hydraulique quelconque.

$$R = 4,26 \times 10^{-15} \cdot (P)^{4.04} \quad (1)$$

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|-----------------------------|--|
| AYADI, CHIKHAOUI, M. | : Etude du ruissellement dans les bassins versants des Queds ZEROUD et MERGUELLIL mémoire de D.E.A Faculté des Sciences de TUNIS ; Avril 1988. |
| BRUNET MORET, Y. | : Homogénéisation des Précipitations. Cahier ORSTOM Série hydrologie, Vol XVI No 3 et 4 PARIS, 1979. |
| BOUZAIANE, S. LAFFORGUE, A. | : Contribution des Queds HAJEL et HATHOB aux apports en eau et en sels dissous de l'Oued ZEROUD. Rapport int.DRE., TUNIS, 1982. |
| LAFFORGUE, A. MAMI, E. | : Homogénéisation et extension des données pluviométriques du Centre de la TUNISIE, Rapport.int. DRE, TUNIS, 1983. |

EXAMEN A LA CAMERA DE TELEVISION DE 100 FORAGES D'EAU EN TUNISIE

Y. BELKHIRIA : Ingénieur T.E - DGRE

1. INTRODUCTION

Bien souvent, nous constatons après une certaine période d'utilisation ou encore après une interruption prolongée de l'exploitation, que les forages n'offrent plus la même capacité spécifique qu'aux essais de réception. Rares sont ceux qui conservent longtemps leurs performances d'origine ; on dit que le forage a vieilli.

Les remèdes à apporter aux forages montrant des signes de vieillesse pratiqués en TUNISIE, sont peu nombreux et souvent mal appliqués.

On pratique le plus souvent une injection d'acide chlorhydrique ou sulfamique, de chlore ou de polyphosphates dans le but de faire dissoudre les incrustations qui ont colmatés notamment la crépine et parfois le massif de gravier. Généralement cette injection ne se fait pas sous pression, d'où pénétration dans les parties non colmatées c'est à dire dans les endroits où le traitement est inutile.

Nous citons aussi le brossage à l'aide de brosses métalliques, méthode peu efficace car elle ne permet de nettoyer que la face interne des crépines avec risque de déchirure des fentes surtout dans le cas où il y a corrosion.

On opère parfois un chemisage c'est à dire l'introduction d'une nouvelle crépine dans l'ancienne. Ceci ne peut sauver l'ouvrage que provisoirement car le mal continue à ronger la nouvelle colonne de captage. Nous

enregistrons dans ce cas une réduction notable du rendement.

Les opérations précédentes ont des résultats qui ne sont pas toujours probants. C'est pourquoi, les utilisateurs de forages vieillis pensent plutôt à remplacer purement et simplement leurs ouvrages que de procéder à leur régénération.

Afin d'éviter le remplacement prématuré des forages, nous avons testé en TUNISIE une nouvelle méthode qui consiste :

- A diagnostiquer le forage à l'aide d'un système de caméra télévision (en noir et blanc ou en couleurs).
- A appliquer le moyen le plus approprié pour régénérer le forage en vue de retrouver ses caractéristiques lors de sa réception et si possible les améliorer davantage.

2. INSPECTION TELEVISEE

2.1 Présentation

Dans le cadre de la Coopération Technique Tuniso-Allemande, la Direction Générale des Ressources en Eau a acquis un matériel d'inspection de forages par caméra télévision. Des experts allemands ont assisté pendant deux années 1984/85 le personnel tunisien afin de le familiariser avec le matériel et d'améliorer sa qualification professionnelle.

2.2 Matériel utilisé

Il s'agit d'un système de télévision qui peut être équipé par l'une des deux caméras citées. Les images apparaissent directement sur un écran avec indication de la profondeur et sont également enregistrées sur cassette vidéo. Ceci nous permet donc de visualiser l'intérieur du tubage et des crépines ainsi que l'état des équipements tubulaires après l'exécution de l'ouvrage. (V. Photos ci-contre).

3. EVOLUTION DE L'ETAT DES COLONNES DE CAPTAGE

On a examiné jusqu'aujourd'hui une centaine de forages. Leur endoscopie montre une diversité de cas dont voici les plus importantes formes :

3.1 Colmatage et incrustation

La perméabilité de l'ouvrage est réduite par des dépôts obstruant les fentes des crépines et pouvant se manifester aussi au niveau du massif filtrant (formation aquifère adjacente). Ces matières apportées par attaque chimique ou par action bactérienne et déposées autour de la paroi filtrante entraînent une réduction du débit spécifique du forage.

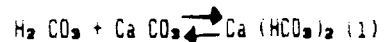
Elles peuvent être constituées par :

3.1.1. Les carbonates

Ils se présentent généralement sous la forme de couches blanchâtres, dures, homogènes ou noduleuses.
Exemple : Forage de SOTEMI No 10448/2
BEN ALEYA No 10459/2...

Le gaz carbonique dissous dans l'eau joue un rôle capital dans le phénomène de dissolution et de précipitation.

Tout d'abord, il s'hydrate pour donner de l'acide carbonique H_2CO_3 qui attaque le carbonate de chaux $CaCO_3$ ou de magnésie $MgCO_3$ pour entrer en solution sous forme de bicarbonate.



1er cas :

Quant la quantité de CO_2 diminue suite à une baisse de la pression de la nappe au moment de sa mise en exploitation, des carbonates alcalino-terreux prennent naissance par suite de la décomposition des bicarbonates.

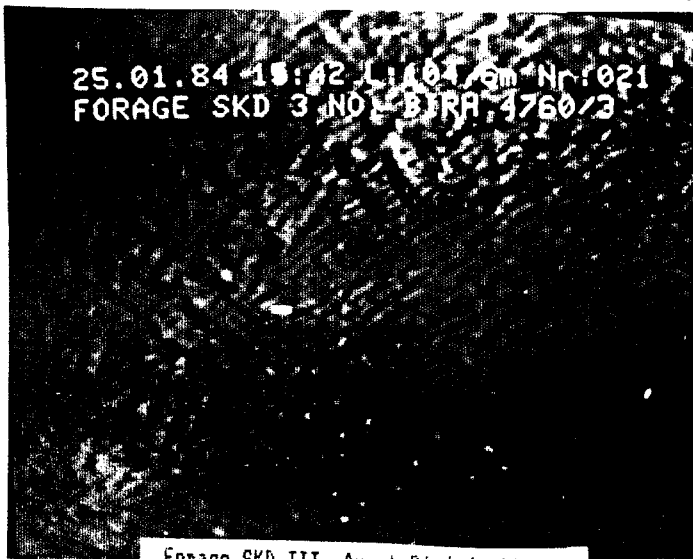
C'est la présence de ces carbonates qui confère à l'eau son caractère entartrant ou incrustant car ils sont, contrairement aux bicarbonates, très peu solubles.

2ème cas :

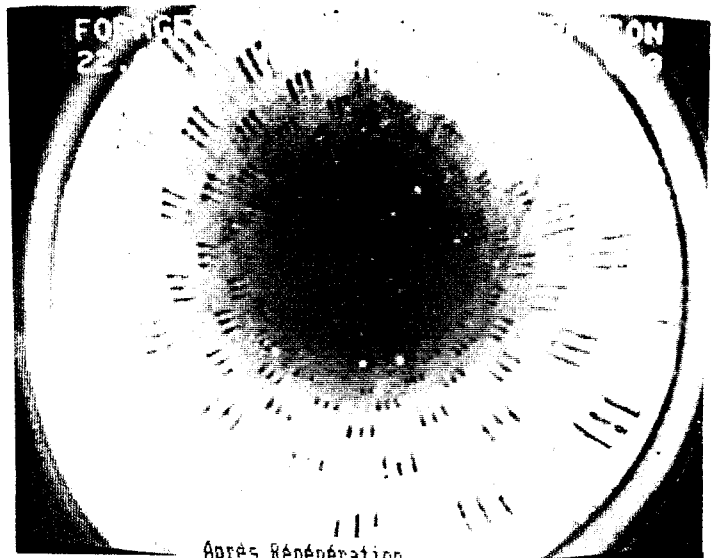
Si au contraire, le CO_2 dissous est en excès, il pourra attaquer le calcaire s'il y'a lieu. C'est le CO_2 agressif.

3ème cas :

Lorsque l'eau contient la dose convenable de CO_2 équilibrant pour n'être ni incrustante ni agressive, elle est à l'équilibre ou est neutre.



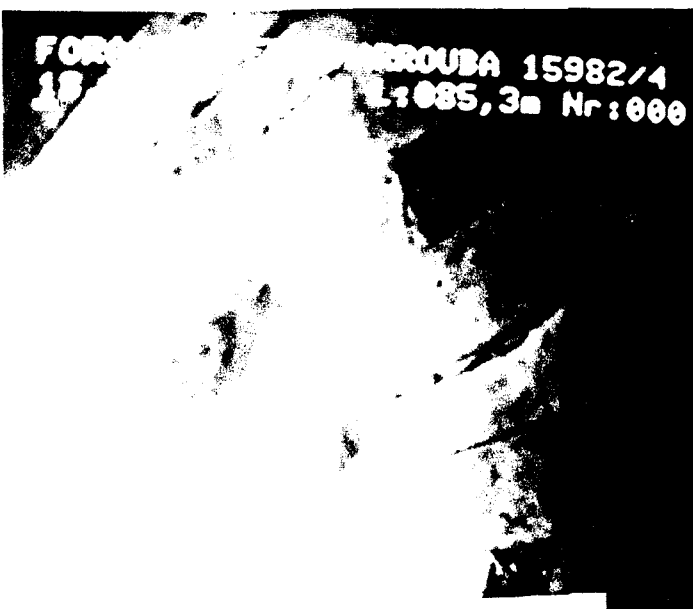
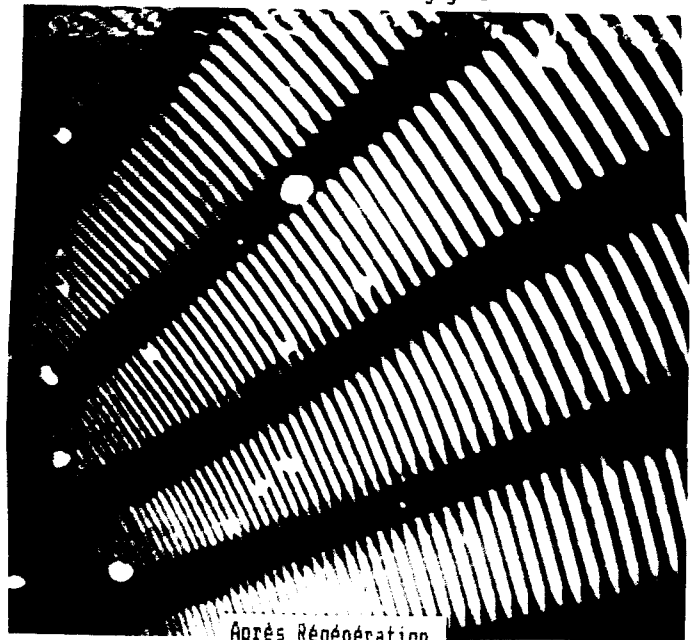
Forage SKD III, Avant Régénération
vue latérale du tube lanterné colmaté



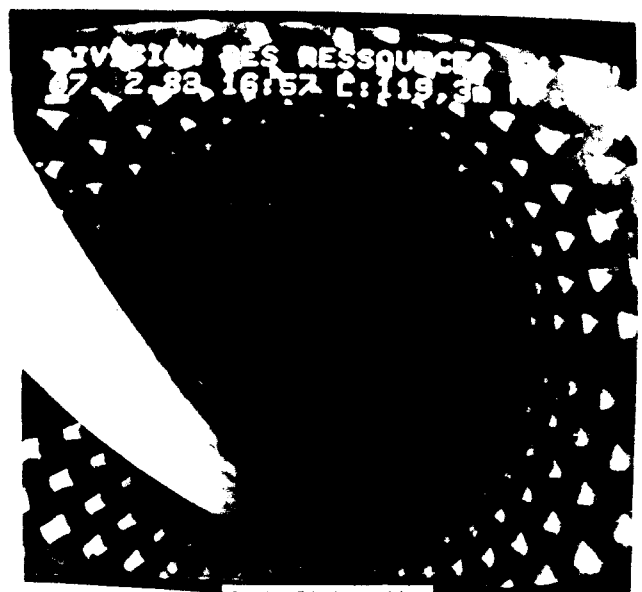
Après Régénération
Vue axiale, fentes dégagées



Forage Ajim, Avant Régénération
Crépine Johnson colmatée par de la bentonite



Forage O. El Kharouba, Avant Régénération



Après Régénération

Le CO_2 équilibrant est la quantité de CO_2 dissous nécessaire pour maintenir en solution les bicarbonates alcalino-terreux. Cet équilibre est variable.

Il est fonction de la température et de la minéralisation de l'eau. En effet, si la température augmente, la solubilité du CO_2 diminue et si les teneurs en sels (tels que les chlorures et les sulfates) augmentent, les phénomènes de mise en solution ou de précipitation se compliquent.

Ainsi la connaissance du pouvoir incrustant ou agressif d'une eau impose d'une part la connaissance approfondie de sa qualité chimique et d'autre part la connaissance des conditions locales d'exploitation qui modifient l'état initial de l'eau.

3.1.2. Les dépôts ferrugineux et manganeux

Il s'agit de composés gélatineux insolubles d'hydroxyde de fer ou de manganèse à la suite de processus physico-chimiques ou biologiques.

Exemple : Forage de BLED MESSAOUZIA No 11561/4 ; BIR BOU SETTA No 17675/4

Le fer et le manganèse sont généralement dissous dans l'eau à l'état bivalent et très peu à l'état trivalent (quadrivalent).

L'oxydation du fer bivalent en trivalent et du manganèse bivalent en quadrivalent se fait :

- Par apport d'oxygène à partir de la surface d'une nappe libre ; dans ce cas, le colmatage atteint d'abord la partie supérieure des crépines pour

descendre progressivement en profondeur.

- Quant l'équilibre d'oxydo-réduction de l'eau est modifié à la suite d'une variation du pH, causée par le départ de CO_2 ou par mélange d'eau provenant des couches différentes.

- Par action biologique en présence de bactéries ferriphages ou manganiphages qui se développent dans des conditions bien déterminées telles que :

pH compris entre 5,4 et 7,2

Présence de CO_2 et de O_2

Teneur en fer ferreux entre 1,6 et 12 mg/l

Potentiel d'oxydo-réduction Eh sup à -10 mV

3.2 Corrosion

3.2.1. Processus de la corrosion

C'est l'ensemble des actions physico-chimiques affectant la colonne tubulaire entraînant la dissolution du métal et son dépôt comme produit de corrosion.

La corrosion est essentiellement due à une hétérogénéité dans le métal. Ces hétérogénéités déterminent des régions du métal ayant un caractère d'anode et d'autres ayant le caractère de cathode :

Prenant par exemple une colonne de tubage constituée d'un alliage de fer et de cuivre.

L'eau à l'état ionique : $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$
 En présence de O_2 on a : $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
 D'autre part : $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$
 A la cathode on a : $Fe^{2+} + 2e^- \rightarrow Fe$
 A l'anode on a : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$
 D'où on obtient : $2Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_2$

Cet effet électrochimique est d'autant plus intense que les métaux sont différents. Expérimentalement, on a obtenu une liste des métaux dans l'ordre progressif de leur tendance à la corrosion dont voici un classement.

(OR, argent, acier inox, nickel, cuivre, plomb, acier, fer, fonte, aluminium, zinc, magnésium).

Dans cette série, le premier métal qui est l'or est celui qui résiste le mieux à la corrosion, on dit qu'il est passif.

Le dernier qui est le magnésium est le plus vulnérable à la corrosion, on dit qu'il est le plus actif.

La corrosion est d'autant plus intense que les deux métaux sont placés plus loin l'un de l'autre dans ce classement.

Cependant, la corrosion électrochimique peut également prendre naissance sur un seul métal. Il suffit que ce dernier comporte, en certains points, des impuretés. L'action corrosive est dans ce cas moins intense.

Des phénomènes électrochimiques peuvent encore se produire sur un seul métal, lorsque par exemple, la colonne tubulaire traverse des couches de terrain de nature très différente. C'est ce qu'on appelle ;

pile géologique, exemple : un tubage traversant une couche calcaire bien aérée puis un banc d'argile. Ce dernier provoque la corrosion de la partie du casing qui lui est adjacente (anode) par rapport au tronçon situé dans les calcaires (cathode).

REMARQUE

L'entrée de l'eau avec une forte vitesse dans la crépine, due à un débit d'exploitation important ou simplement à l'artésianisme du forage provoque l'enlèvement de la couche déposée sur la cathode et favorise ainsi le phénomène de la corrosion.
 exp: forage SK5 No 18925/5

3.2.2. Morphologie de la corrosion

Il existe plusieurs formes de corrosion ; les plus communes sont :

* La corrosion dite uniforme où le métal est attaqué sur toute sa surface. La vitesse d'attaque peut être mesurée en mm/an ou par perte de poids en mg/dm²/jour.

Exemple : Forage de EL ALEM IV No 13276/4 ; EL M'GUITLA No 19161/5.

* La corrosion dite caverneuse qui se produit dans des espaces clos à dimensions réduites. Dans ce cas le liquide aqueux a très peu d'échanges avec l'extérieur.

Exemple : Forage de THELEPTE I No 10929/4

* La corrosion dite par piqures où l'attaque est localisée sur des points particuliers de la surface métallique. Ce type de corrosion est dû soit à une discontinuité du revêtement protecteur soit à la

présence de bactéries ou encore d'une goutte d'électrolyte.

Exemple : Forage de BIR EL M'RABET No 15278/4 .

* La corrosion dite intergranulaire où les joints de grains sont attaqués provoquant la formation de fissures profondes et ramifiées. Ce type de corrosion est très dangereux puisqu'il fait varier les propriétés mécaniques du matériau considéré.

Exemple : Forage de AIN MASTOUR No 15373/4 ; Forage de O. SEDJANE No 7827/2.

3.2.3. Les facteurs de la corrosion

Les principaux facteurs de corrosion sont :

* L'O₂ dissous : Dans la réaction électrochimique que nous avons vu précédemment il y'a dégagement d'atome d'hydrogène par électrolyse de l'eau dont une partie va se dégager sous forme de bulles gazeuses, l'autre se dirige vers la cathode sur laquelle elle se fixe formant une mince couche protectrice. On dit dans ce cas que la cathode est polarisée.

* L'O₂ : peut jouer le rôle d'un dépolarisant en formant des molécules d'eau avec les atomes d'hydrogène et favorise ainsi la continuation de l'attaque.

* Le pH : Lorsque le pH réel de l'eau est inférieur à son pH d'équilibre, l'eau est considérée comme corrosive. Généralement, les eaux à pH acide sont considérées comme corrosives.

* Le H₂S : qui peut se comporter comme un diacide et attaque le tubage. Son effet est généralement limité à cause de sa teneur faible dans les eaux naturelles. Sa présence est détectée par son odeur désagréable.

Exemple : Forage de HADJEB 2BIS No 16248/4

REMARQUE

La présence des bactéries sulfato-réductrices (desulfovibriodesulfurécans) peut en produire de plus grandes quantités.

* Le CO₂ libre dans l'eau favorise la formation de l'acide carbonique H₂ CO₃ qui attaque le métal. Quand la teneur en CO₂ est de 50 pp m, l'eau est considérée comme corrosive.

* Les ions Cl⁻ peuvent former de l'acide chlorhydrique HCL, en s'associant aux atomes d'hydrogène, et accélèrent la corrosion du métal.

* La concentration en sel : Plus l'eau est chargée en sels, plus importante est sa conductivité facilitant ainsi la production et la circulation des courants électriques qui favorisent la corrosion.

* La température intervient dans la vitesse des réactions chimiques qui double pour toute augmentation de température de 10°C (Réf ERESS 1972).

3.3 Qualité de l'exécution des forages

D'autres anomalies sont souvent à l'origine de la réduction de la durée de vie des forages d'eau.

Ces anomalies sont dues aux malfaçons constatées lors de l'exécution de ces ouvrages telles que :

a. Maîtrise du fluide de forage : L'emploi de boue de mauvaise qualité ainsi que son emploi d'une manière discontinue (attente de la colonne de captage ou congé de repos pour le chantier) entraînent le colmatage de la crépine et de l'aquifère (exemple : Forage de CHEIMET SUD II 17771/4, Forage de AJIM PECHERIES No 19496/5.)

b. Techniques de développement Elles sont réduites au soupapage et au surpompage, ce qui est souvent insuffisant pour décolmater l'aquifère et le massif du gravier surtout si on a utilisé un additif (ex. baryte) pour mieux maîtriser l'artésianisme lors de la descente de la colonne de captage (exemple : Forage de REJIM MAATOUG No 19257/5, forage de JBILET EL OUST No 19208/5).

c. Mise en place du gravier : Le gravier qui doit remplir l'espace annulaire autour de la crépine n'y est pas, parfois, arrivé à destination en quantité suffisante ou bien se tasse. Une partie de la crépine se trouve alors sans gravier autour ; d'où venue de sable (exemples : Forage de BOUDEN.A No 18566/4, Forage S.F 17 No 17608/4).

d. Choix des crépines : Le type et l'ouverture des crépines sont choisis parfois en fonction des stocks disponibles plutôt que de la granulométrie de la formation à capter, indiquée par l'hydrogéologue (Forage de CHIBA III No 17805).

Dans ce cas et quant la formation renferme des matériaux meubles, un ensablement est provoqué. Le sable risque de mettre hors d'usage la pompe car c'est un abrasif puissant (dureté 7 alors que l'acier est de dureté 6).

e. Le remplacement d'une pompe à axe vertical (Diesel) par une autre électrique, sans nettoyage préalable de la crépine, entraîne souvent une forte sollicitation ponctuelle de la crépine. d'où résultent des déboitements et des déchirures des crépines et un élargissement des fentes avec remontée de sable et de gravier et parfois même d'eau boueuse ou noirâtre (Forage de JELMA 7 No13994/2, Forage de OUM LADHAM 6432/5).

f. Crépine posée à une cote non appropriée : (Forage OUCHTATA II No 8767/1). De ce décalage il peut en résulter un colmatage par les éléments fins (argiles limons imperméables) qui s'agglutinent dans les voies d'eau de la crépine et de la formation.

g. Forages présentant des obstacles : Lors de l'exécution ou de l'exploitation des forages, des objets peuvent tomber accidentellement et former un obstacle empêchant toute forme d'intervention (lestage, installation, pompe, etc...).

Le contrôle par caméra permet dans ce cas d'identifier la forme des objets à repêcher et de ce fait la méthode la plus appropriée de repêchage (Forage IBN CHABBAT 11 No 19027/5 ; Forage GHARDIMADOU OM4 No 6100/1.)

4. ANALYSE

L'analyse de l'ensemble des 100 forages inspectés par caméra montre une grande diversité de cas schématisée dans le tableau ci-dessous.

Sur l'ensemble des 100 cas auscultés, 50 ont pu être réhabilités et régénérés à notre décompte pour la Régie des Sondages Hydrauliques selon un programme d'intervention fixé au préalable et moyennant un matériel de régénération approprié.

Ce qui dénote de l'importance de l'inspection télévisée, alors le diagnostic des maux des forages et dans la prescription des remèdes.

| Résultat de l'inspection télévisée | Nombre de forages | Forages régénérés |
|---|----------------------|----------------------|
| Incrustation ou colmatage par des produits de cor- rosion | 40 | 25 |
| Corrosions sévères (déchi- rures) | 16 | - |
| Défaut d'exécution (mau- vais développement = 5) | 15 | 12 |
| Opération de repêchage | 16 | 13 |
| Forages bouchés ou obs- trusés | 6 | - |
| Forages négatifs | 4 | - |
| Forages ne présentant au- cun défaut (ou neufs) | 3 | - |
| TOTAL | 100 | 50 |

4.1 Cas des incrustations

Ce sont les cas des forages incrustés ou encore colmatés avec les produits de la corrosion ou d'autres qui sont les plus nombreux (40 % environ de l'ensemble des forages examinés). Ces ouvrages sont généralement facilement régénérables (25 ont été régénérés sur 40 soit 63 %).

En effet les dépôts, présents généralement sous forme de couches, sont enlevés par un procédé mécanique tel que le jetting d'eau latéral sous haute pression.

Dans le cas de dépôts insolubles de fer ou de manganèse, l'opération est accompagnée d'un traitement chimique adéquat à base essentiellement d'acides, d'alcools et de vitamine C (Exp : forages captant la nappe de KALAA KHASBAH dans la région du KEF).

4.2 Cas de la corrosion

Les forages présentant une corrosion sévère ou encore des déchirures dans les colonnes et qui représentent 16 % du total des forages inspectés, restent les plus difficiles à récupérer. En effet le seul remède possible étant le chemisage auquel on opte rarement à cause de son coût ainsi que la réduction notable du débit qu'il engendre.

Cependant une mesure préventive peut être prise dans ce cas ; il s'agit d'utiliser l'équipement de forage le plus adéquat en tenant compte de la qualité chimique de l'eau. Par exemple :

- Utiliser de l'acier inox pour capter une eau agressive (Exp : Nappe de OGLET MARTBA dans la région de GABES).

- Eviter de capter deux nappes différentes par un même ouvrage ou d'utiliser des métaux hétérogènes qui favorisent l'effet électrochimique (Exp : Forages dans la nappe de HADJEB LAYOUN dans la région de KAIROUAN).

4.3 Cas de défaut d'exécution

Nous signalons aussi les forages montrant un défaut d'exécution (15 %) et notamment ceux qui ont été mal développés et qui présentent 10 %.

Parmi ces 15 forages, 12 ont été régénérés (développés) et ont pu ainsi être récupérés. (Exp : Forages artésiens dans le Sud tunisien).

4.4 Cas d'opération de repêchage

A côté de ces forages, nous mentionnons les forages présentant un obstacle et dont le contrôle par caméra a permis d'identifier la forme des objets à repêcher et de ce fait la méthode de repêchage la plus appropriée à employer (16 cas dont 13 ont été récupérés à la suite d'interventions réussies).

4.5 Autres cas

- Ceux bouchés ou obturés par des pierres à la suite, généralement de négligence de la part du propriétaire (Forage de BDU ARAR No 10635/2). Ces forages présentent 6 % du total et sont difficiles à

régénérer du fait de la complexité de l'opération = Surforage ou intervention dans un trou déjà revêtu.

- Ceux enfin, négatifs pour diverses raisons : captant un horizon peu productif (Forage de JEDLIENE No 18322/4) ou encore crépine posée à une côte non appropriée (Forage BIR AYED No 10616/2). Ils présentent 4 % du total des forages inspectés par caméra télévision.

CONCLUSION

De l'ensemble des 100 forages inspectés par caméra TV, une cinquantaine d'entre eux ont été récupérés à la suite d'une intervention appropriée : régénération, repêchage, poursuite de développement etc...

L'ensemble des forages inspectés totalise 15,766 m. Ces forages étaient destinés à l'abandon.

La profondeur des forages régénérés puis récupérés est de 7883 m. Le coût actualisé de ces ouvrages soit de 2.364.900 DT sur la base d'un coût unitaire de 300 DT/ml.

Le coût des investigations et des opérations de régénération conduites sur ces ouvrages est estimé à 10 % du prix de revient de ces forages soit 236.490 DT.

L'inspection et la réhabilitation de ces 50 ouvrages pendant les 4 dernières années a permis à l'Etat d'économiser 2.357.017 DT représentant les coûts de remplacement de 50 forages de 150 m de profondeur moyenne.

Le développement en Tunisie de ces techniques modernes de contrôle de forage répond à un besoin réel de l'économie tunisienne d'où la nécessité d'instituer d'ores et déjà l'inspection systématique des forages

à leur réception pour vérifier la qualité des prestations fournies par les entreprises, dans le but d'optimiser le rendement et la longévité de ces ouvrages.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|----------------|--|
| BOURGEOIS, M. | : La corrosion et l'incrustation dans les forages d'eau (choix de l'équipement adapté) Rapport BRGM 76 379 AME (1976) |
| BREMOND, R. | : Etude de l'influence des caractéristiques technologiques des puits et forages sur leur rendement et leur longévité. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) OUAGADOUGOU (1965) |
| DEGALLIER, R. | : Décolmatage des puits et forages - Manuel pratique Publication BRGM (Mars 1987) |
| KREMS, G. | : Studie uber die Brunnenalterung Bun des ministerium des Inners, Interabteilung, Warsserwitschaft - BERLIN (1983) |
| MARSILLY, G.DE | : The role of colloids in nuclear waste disposal. Boston, Scientific basis for nuclear waste management (1983) |
| MABILLOT | : Le forage d'eau, Johnson France (1980) |
| PROJET ERESS | : Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentriennal (1972). |

APPROCHE PRATIQUE POUR L'EVALUATION DU DEBIT ET DE LA DUREE DE POMPAGE JOURNALIER D'UN Puits DE SURFACE

R. KHANFIR : Ingénieur Principal - DGRE

1. INTRODUCTION

L'hydrogéologue de terrain est appelé de plus en plus à donner le débit et le régime d'exploitation d'un puits alors qu'en réalité, il ne dispose que de la méthode d'interprétation des essais PORCHET qui lui permet d'estimer le débit spécifique d'un puits.

Si le débit spécifique est relativement important et la tranche d'eau est suffisante, l'hydrogéologue peut proposer un débit d'exploitation en fictif continu. Dans le cas contraire, lorsque le débit spécifique du puits est faible, l'hydrogéologue est obligé de proposer une exploitation en 2 ou plusieurs phases par jour. A ce niveau, l'hydrogéologue se heurte au manque de méthode pratique pour le calcul du temps de pompage et de remontée dans le puits afin de pouvoir proposer un programme d'exploitation journalier.

Nous essayons alors dans cet article d'exploiter au maximum la méthode d'interprétation des essais PORCHET pour estimer le temps, le débit et le régime d'exploitation journalier d'un puits. Cette méthode bien qu'elle est approximative, permet aux hydrogéologues de proposer un modèle d'exploitation journalier pour un puits de surface.

2. PRINCIPE ET THEORIE DE LA METHODE PORCHET

La méthode d'interprétation des essais de pompage de PORCHET consiste à évaluer le débit spécifique d'un puits, déduction faite de l'eau accumulée aux environs du puits et

facilement mobilisable.

L'essai PORCHET est généralement de courte durée et approprié pour les puits de grand diamètre et à pénétration partielle.

La méthode PORCHET repose sur l'interprétation des courbes de rabattement et de remontée du niveau piézométrique dans le puits à la suite d'un essai de pompage effectué à débit constant.

Si un ouvrage, un puits par exemple, ayant une section S et un débit fictif continu q , dans lequel on effectue un pompage à débit Q constant. On obtient la courbe de rabattement OR . Après l'arrêt du pompage, on a la courbe de remontée RT (Fig.1)

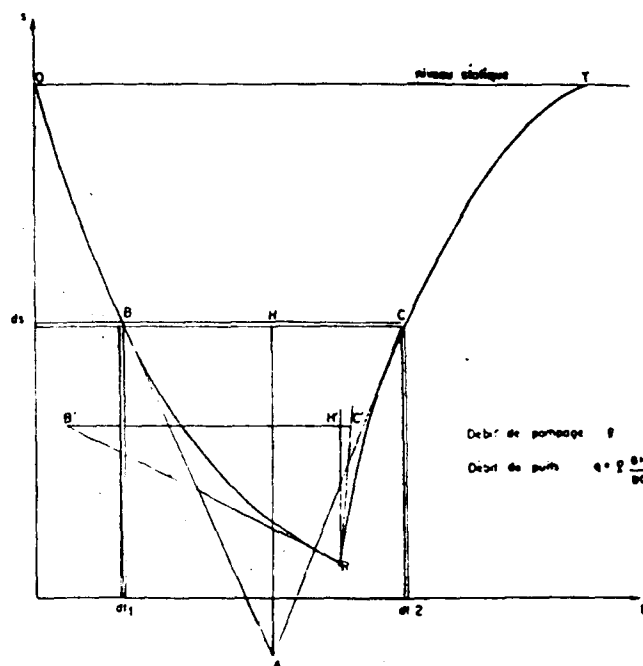


Fig.1 : Méthode de PORCHET (Théorie)

Pour un temps de pompage dt_1 , on constate une baisse du niveau de l'eau dans le puits ds , d'où on peut écrire :

$$S ds = (Q - q) dt_1 \quad (1)$$

Après l'arrêt de pompage, le niveau de l'eau mettra pour remonter de la même hauteur ds , un temps dt_2 , on a alors :

$$S ds = q dt_2 \quad (2)$$

De ces 2 équations, on déduit que :

$$(Q - q) dt_1 = q dt_2 \quad (3)$$

Ou encore :

$$q = \frac{Q dt_1}{dt_1 + dt_2} \quad (4)$$

En divisant le tout par ds , l'équation (4) devient :

$$q = Q \frac{dt_1 / ds}{dt_1 / ds + dt_2 / ds} \quad (5)$$

dt_1/ds et dt_2/ds représentent les pentes des tangentes aux points B et C correspondants. Ces tangentes, se coupent en un point A .

Nous avons alors :

$$\frac{dt_1}{ds} = \frac{HB}{HA} \text{ et } \frac{dt_2}{ds} = \frac{HC}{HA}$$

D'où l'équation (5) devient :

$$q = Q \frac{BH}{BC} \quad (6)$$

q représentent le débit fictif continu pour un rabattement s correspondant aux points B et C . Le débit spécifique q_s du puits sera alors égal à :

$$q_s = q = Q \frac{BH}{s BC} \quad (7)$$

Connaissant le débit spécifique du puits q_s et la colonne d'eau exploitable h_e dans le puits, on peut calculer le débit fictif continu (q_e) du puits.

$$q_e = q_s \times h_e \quad (8)$$

3. EVALUATION DU DEBIT D'EXPLOITATION ET DU TEMPS DE POMPAGE D'UN PUIITS

Dans le cas où le débit spécifique du puits est assez faible, il est plus commode de proposer un débit d'exploitation plus fort que le débit fictif continu. Il est donc intéressant de préciser le débit d'exploitation, le temps de pompage et le régime d'exploitation journalier du puits.

Avant l'essai, le débit fictif continu initial q_s est nul. Dans le cas des nappes artésiennes, le débit q_s est égal au débit artésien du puits.

A la fin de l'essai, le rabattement est égal à h_r et le débit fictif continu correspondant est égal à q_r .

$$q_r = q_s \times h_r \quad (9)$$

Le volume d'eau pompé V_p au cours de l'essai est égal à la somme des volumes d'eau fournis par la nappe V_m et accumulé dans le puits avant l'essai de pompage V_c .

$$V_p = V_n + V_e \quad (10)$$

Le volume d'eau pompé V_p est égal

$$V_p = Q_p \times t_p \quad (11)$$

Q_p = le débit de pompage
 t_p = le temps de pompage

D'où on peut écrire :

$$Q_p \times t_p = V_n + V_e \quad (12)$$

Le volume d'eau accumulé dans le puits V_e est égal à la section du puits S multipliée par la tranche d'eau rabattue au cours de l'essai h_r ; soit :

$$V_e = S \times h_r \quad (13)$$

Le volume d'eau fourni par la nappe V_n au cours du pompage est égal au débit médian q_m multiplié par le temps du pompage t_p . Le débit médian du puits correspond au débit à la moitié du temps de pompage où dans le cas échéant on peut utiliser le débit moyen du puits.

$$V_n = q_m \times t_p \quad (14)$$

d'où

$$V_p = Q_p \times t_p = S \times h_r + q_m \times t_p$$

$$S \times h_r = t_p (Q_p - q_m)$$

$$t_p = \frac{S \times h_r}{Q_p - q_m} \quad (15)$$

4. ESTIMATION DU TEMPS DE REMONTEE D'UN PUIT

Dans le cas général, le temps de remontée est assez long et il est pratiquement difficile de le suivre totalement. Après avoir déterminé le temps de pompage, il est nécessaire d'estimer le temps de remontée dans un puits pour pouvoir proposer un programme d'exploitation journalier.

Pour estimer le temps de remontée dans un puits, nous proposons de

subdiviser la colonne d'eau dans ce puits en plusieurs tranches, de calculer le volume d'eau et le débit de remplissage moyen de chaque tranche, d'en déduire le temps de remplissage de chaque tranche et enfin le temps de remontée totale.

Soit un ouvrage de section S et de colonne d'eau h subdivisant la colonne d'eau en trois tranches d'épaisseur h_1 , h_2 et h_3 .

Le volume d'eau de chaque tranche serait alors de :

$$V_1 = S \times h_1, V_2 = S \times h_2 \text{ et } V_3 = S \times h_3$$

Le débit de remplissage moyen de chaque tranche est égal au débit spécifique multiplié par la profondeur moyenne de la tranche :

$$q_1 = q_s \frac{h_1}{2}$$

$$q_2 = q_s \frac{h_1 + (h_1 + h_2)}{2} = q_s \frac{h_2 + 2 h_1}{2}$$

$$q_3 = q_s \frac{(h_1 + h_2) + (h_1 + h_2 + h_3)}{2} = q_s \frac{(h_3 + 2h_2 + 2h_1)}{2}$$

Le temps de remplissage de chaque tranche est égal au volume de la tranche divisé par son débit de remplissage moyen :

$$t_1 = \frac{V_1}{q_1} = \frac{2S h_1}{q_s h_1} = \frac{2 S}{q_s}$$

$$t_2 = \frac{V_2}{q_2} = \frac{2S h_2}{q_s (h_2 + 2 h_1)}$$

$$t_3 = \frac{V_3}{q_3} = \frac{2S h_3}{q_s (h_3 + 2 h_2 + 2 h_1)}$$

Remarque

t_1 qui est égal à $2S/q_s$ correspond au temps de remontée du dernier mètre dans le puits, d'où h_1 devrait être toujours égal à 1 m.

le temps de remontée totale du puits est égal alors à :

$$t = t_1 + t_2 + t_3 = \frac{2S}{q_s} + \frac{2S h_2}{q_s(h_2 + 2h_1)} + \frac{2S h_3}{q_s(h_3 + 2h_2 + 2h_1)}$$

D'où la formule générale serait :

$$t = \frac{2S}{q_s} + \frac{2S h_2}{q_s(h_2 + 2h_1)} + \dots + \frac{2S h_n}{q_s(h_n + 2h_{n-1} + \dots + 2h_1)}$$

Etant donné que h_1 devrait être toujours égal à 1 m, la formule serait de la forme suivante :

$$t = \frac{2S}{q_s} + \frac{2S h_2}{q_s(h_2 + 2)} + \frac{2S h_3}{q_s(h_3 + 2h_2 + 2)} + \dots + \frac{2S h_n}{q_s(h_n + 2h_{n-1} + \dots + 2h_2 + 2)} \quad (16)$$

5. ETUDE D'UN CAS PRATIQUE :
PUITS DE L'UCP JOUGGAR A AIN
BEL KHIR DANS LA NAPPE DU FAHS
 (cf tableau et fig.2 ci-dessous)

Ce puits a une colonne d'eau h égale à 3,90 m et une section s égale à 7,1 m².

Les résultats de l'essai PORCHET sont comme suit :

- Le débit moyen de pompage: $Q_p = 7,24$ l/s.
- Le temps de pompage: $t_p = 1$ h 20 mn.
- Le rabattement: $s = 3,80$ m
- La remontée = 1,24 m
- Le temps de remontée partielle = 2h

5.1 Calcul du débit spécifique du puits

D'après la méthode d'interprétation des essais PORCHET, le débit fictif

continu correspondant au rabattement s est égal à :

$$q = Q_p \frac{BH}{BC} = 7,24 \frac{1}{4,1} \quad (\text{Formule (6)})$$

$q = 1,76$ l/s pour un rabattement de 3,20 m

D'où le débit spécifique q_s du puits est égal :

$$q_s = \frac{q}{s} = \frac{1,76}{3,20} = 0,55 \text{ l/s/m}$$

5.2 Calcul du temps de pompage

Pour calculer le temps de pompage (t_p) dans un puits pour un débit de pompage donné (Q_p), nous pouvons appliquer la formule No 15

$$t_p = \frac{S \times hr}{Q_p - q_m}$$

Q_p = Le débit de pompage proposé soit 5 l/s

hr = Le rabattement maximum qu'on peut faire dans le puits soit 3,80 m.

q_m = Le débit médian correspondant à 50 % du temps de pompage de l'essai PORCHET soit égal à 1,1 l/s.

S = La section du puits soit 7,1 m²

Le temps de pompage (t_p) correspondant à un débit d'exploitation de 5 l/s serait alors de :

$$t_p = \frac{7,1 \times 3,80}{(5 - 1,1) 10^{-3}} = 6918 \text{ sec} = 1 \text{ h } 55 \text{ mn}$$

$$t_p = 1 \text{ h } 55 \text{ mn}$$

5.3 Calcul du temps de remontée totale

Pour estimer le temps de remontée on applique la formule No 16.

ESSAI DE PROCHET AU PUIITS

U.C.P AIN BEL KHIR - JOUGGAR

DATE ET HEURE 21/4/86

CARTE DE : Dj FKIRINE

ECHELLE : 1/50.000

Repère de mesure des niveau : Margelle Hauteur de la margelle m: 1,00 m

Profondeur totale du puits P : 23,50 m, ϕ intérieur et extérieur du puits : 3,00 m

Niveau statique : 19,50, Profondeur d'immersion de la pompe : 23,45 m

Instruments de mesure des niveaux : Sonde, du débit : fût de volume : 75 l

| Abaissement / Q Constant / Moyen l/s | | | | | | | | Remontée | | | | | |
|--------------------------------------|----------|--------|----------|-----------|----------|--------|----------|-----------|----------|------|-----------|----------|------|
| t en h/mn | N.D en m | S en m | Q en l/s | t en h/mn | N.D en m | S en m | Q en l/s | t en h/mn | N.D en m | S' m | t en h/mn | N.D en m | S' m |
| 0 | 19,60 | 0,00 | | 1h20 | 23,40 | 3,80 | | 0 | 23,40 | 0,00 | 1h20 | 22,44 | 0,94 |
| 1 | 19,64 | 0,04 | | 1h30 | | | | 1 | 23,35 | 0,05 | 1h30 | 22,36 | 1,02 |
| 2 | 19,69 | 0,09 | | 1h40 | | | | 2 | 23,31 | 0,09 | 1h40 | 22,28 | 1,10 |
| 3 | 19,74 | 0,14 | | 1h50 | | | | 3 | 23,28 | 0,12 | 1h50 | 22,21 | 1,17 |
| 4 | 19,79 | 0,19 | | 1h50 | | | | 4 | 23,26 | 0,14 | 2h00 | 22,14 | 1,24 |
| 5 | 19,84 | 0,24 | | 2h00 | | | | 5 | 23,24 | 0,16 | 2h10 | | |
| 6 | 19,89 | 0,29 | | 2h10 | | | | 6 | 23,23 | 0,17 | 2h20 | | |
| 7 | 19,95 | 0,35 | | 2h20 | | | | 7 | 23,20 | 0,18 | 2h30 | | |
| 8 | 20,00 | 0,40 | | 2h30 | | | | 8 | 23,18 | 0,19 | 2h40 | | |
| 9 | 20,05 | 0,45 | | 2h40 | | | | 9 | 23,17 | 0,21 | 2h50 | | |
| 10 | 20,11 | 0,51 | | 2h50 | | | | 10 | 23,15 | 0,23 | 3h00 | | |
| 12 | 20,21 | 0,61 | 8,0 | 3h00 | | | | 12 | 23,12 | 0,26 | 3h15 | | |
| 14 | 20,31 | 0,71 | | 3h15 | | | | 14 | 23,09 | 0,29 | 3h30 | | |
| 16 | 20,42 | 0,82 | | 3h30 | | | | 16 | 23,06 | 0,32 | 3h45 | | |
| 18 | 20,52 | 0,92 | | 3h45 | | | | 18 | 23,03 | 0,35 | 4h00 | | |
| 20 | 20,63 | 1,03 | | 4h00 | | | | 20 | 23,00 | 0,38 | 4h15 | | |
| 25 | 20,88 | 1,28 | | 4h15 | | | | 25 | 22,92 | 0,46 | 4h30 | | |
| 30 | 21,13 | 1,53 | | 4h30 | | | | 30 | 22,87 | 0,51 | 4h45 | | |
| 35 | 21,37 | 1,77 | | 4h45 | | | | 35 | 22,80 | 0,58 | 5h00 | | |
| 40 | 21,61 | 2,01 | | 5h00 | | | | 40 | 22,77 | 0,61 | | | |
| 45 | 21,84 | 2,24 | | 5h15 | | | | 45 | 22,72 | 0,66 | | | |
| 50 | 22,05 | 2,45 | 6,9 | 5h30 | | | | 50 | 22,68 | 0,70 | | | |
| 55 | 22,25 | 2,65 | | 5h45 | | | | 55 | 22,64 | 0,74 | | | |
| 1h00 | 22,46 | 2,86 | | 6h00 | | | | 1h00 | 22,60 | 0,78 | | | |
| 1h10 | 22,88 | 3,28 | | | | | | 1h10 | 22,52 | 0,86 | | | |

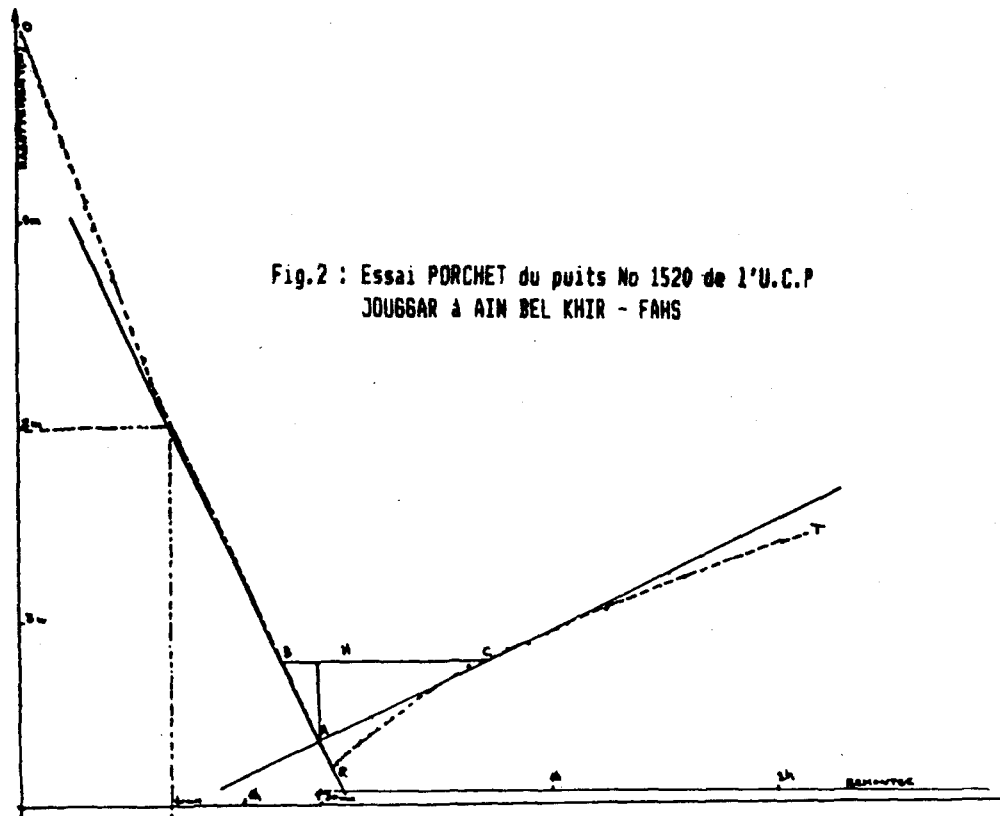


Fig.2 : Essai PORCHET du puits No 1520 de l'U.C.P
JOUGGAR à AIN BEL KHIR - FAHS

$$t = \frac{2S}{q_5} + \frac{2Sh_2}{q_5(h_2+2)} + \frac{2Sh_3}{q_5(h_3+2h_2+2)} + \dots + \frac{2Sh_n}{q_5(h_n+2h_{n-1}+2h_{n-2}+2)}$$

Nous subdivisons la colonne d'eau h_1 en 4 tranches
Soit $h_4 = 0,80$ m et $h_3 = h_1 = 1$ m

$$t = \frac{2 \times 7,1}{0,55} + \frac{2 \times 7,1}{3 \times 0,55} + \frac{2 \times 7,1}{5 \times 0,55} + \frac{2 \times 7,1 \times 0,8}{6,8 \times 0,55}$$

$$t = 25818 + 8606 + 5164 + 3037 = 42625 \text{ s}$$

$$\text{soit } t_r = 11 \text{ h } 50 \text{ mn}$$

5.4 Le programme d'exploitation

D'après le calcul précédent, nous constatons que le temps de remontée pour 2,80 m est égal à :

$$t_r = 8606 + 5164 + 3037 = 20168 \text{ s}$$

soit de l'ordre de 6 heures

Le temps de pompage de cette tranche d'eau est égal d'après la formule No 15 à :

$$t_p = \frac{S \times h_1}{Q_p - q_m}$$

S = Section du puits égale à 7,7 m²

h_1 = Tranche d'eau pompée égale à 2,8 m

Q_p = Débit de pompage égal à 5 l/s

q_m = Le débit moyen du puits pendant le temps de pompage, il est égal à la moitié de la somme des débits minimum et maximum du puits au cours de la remontée, soit alors :

$$\frac{(0,55 \times 3,80) + (0,55 \times 1)}{2} = q_m = 1,32 \text{ l/s}$$

$$t_p = \frac{7,1 \times 2,80}{(5 - 1,32)10^{-3}} = 5402 \text{ s soit } 1 \text{ h } 30 \text{ mn}$$

Nous proposons alors d'exploiter ce puits avec un débit de 5 l/s durant 2 périodes de 2 heures et 1 heure 30 mn, intercalées par une phase de repos de 6 heures.

Le volume d'eau pompé serait alors de 63 m³/j

6. CONCLUSION

En conclusion, nous remarquons que le temps de remontée pour la partie observée est sousestimé de 22 % alors que pour le temps de pompage, l'erreur est uniquement de moins 10 % .

Ces erreurs sont dues surtout :

- Aux erreurs de mesures de débit, du niveau piézométrique et du temps au cours de l'essai.

- A la notion du débit spécifique qui admet une linéarité de la fonction $q = f(h)$ alors qu'elle est logarithmique.

- A la détermination du débit moyen ou médian du puits qui ne prend pas en considération la forme logarithmique de la fonction $q = f(t)$.

Tout au moins, nous considérons les résultats obtenus, très indicatifs et pratiques ; ainsi l'hydrogéologue peut proposer le débit, le temps et le volume d'eau journalier pompé par jour qui sont des valeurs très appréciées et compréhensibles par les exploitants qui ne s'accrochent pas très bien avec la notion du débit fictif continu du puits.

ETUDE DE L'EUTROPHISATION EN CLIMAT CHAUD (cas de la retenue de SIDI SALEM)

M. SAADAoui : Ingénieur en Chef - DGR

1. INTRODUCTION

Dans un corps d'eau donné, les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent au sein des écosystèmes lacustres sont complexes ; une simple analyse statistique des données de terrain disponibles, ne permet pas de bien comprendre le fonctionnement de l'écosystème ou de prévoir son évolution sous différentes contraintes, d'optimiser la gestion d'un aménagement tout en proposant des critères de qualité d'eau pour lutter contre les nuisances (eutrophisation, macrophytes...etc).

Deux modèles mathématiques ont été utilisés pour étudier le phénomène d'eutrophisation :

- Un modèle hydraulique basé sur le bilan de chaleur a été utilisé pour simuler l'évolution de la thermocline au cours de l'année.
- Un modèle dynamique d'eutrophisation inclue des descriptions mathématiques de toute une gamme de processus importants dans un lac réservoir, d'ordre physique, chimique et biologique.

2. CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET INDICATEURS DE L'ETAT TROPHIQUE DE LA RETENUE

2.1 Qualité de l'eau des oueds alimentant la retenue

Les stations de prélèvements étudiées sont sur la MEJERDAH au queue du barrage près de BOU SALEM, sur le BEJA et l'Oued ZARGA.

2.1.1 Température

La température de l'eau des Oueds MEJERDAH, BEJA et ZARGA, évolue de la même façon ; elle atteint 9 à 11°C en Janvier-Février et 26 à 30°C en Juillet-Août ; ce qui influence la stratification de l'eau de la retenue.

2.1.2 Oxygène dissous

Pour la MEJERDAH, la concentration en oxygène varie entre 4,5 et 12 mg/l pour la période 1/84 - 1/86 et elle varie de 4 à 13 mg/l pour le ZARGA. Tandis que pour le BEJA, la concentration en oxygène n'a pas dépassée les 6 mg/l ; de Mars à Mai, elle atteint des valeurs très faibles. Cette consommation d'oxygène peut être due à la forte teneur de carbone organique dissous.

2.1.3 Demande biologique en oxygène (DBO₅) et demande chimique en oxygène (DCO)

Pour l'Oued BEJA les fortes valeurs en DBO₅ et DCO situées en été (Juin à Août) s'expliquent :

- D'une part par les rejets de substances organiques biodégradables avec les eaux usées.
- D'autre part par la présence d'algues formées à partir des substances nutritives. Pendant l'hiver les valeurs sont faibles car l'ensoleillement est également faible donc la production algale l'est également. Pour la MEJERDAH et le ZARGA les valeurs en DBO₅ et DCO sont très faibles par rapport aux valeurs observées à BEJA.

Pour le ZARGA, les valeurs sont inférieures à 8 et à 30 mg O₂/l respectivement pour la DBO₅ et le DCO et pour la MEJERDAH, ces valeurs ne dépassent pas 10 et 25 mg O₂/l respectivement pour la DBO₅ et le DCO.

2.1.4 Phosphore total et orthophosphate

Pour la MEJERDAH les concentrations en phosphore total sont faibles. Durant la période 1/84 - 6/86, la valeur 100 mg/l n'a été dépassée que 18 fois et la valeur 200 mg/l, 5 fois, ces fortes valeurs correspondent à des crues.

Pour le ZARGA, la valeur 100 mg/l n'a été dépassée que 3 fois durant la même période. Pour le BEJA, la teneur en phosphore total est élevée à la fin de l'été et en automne au moment où les betteraves sont conditionnées par la raffinerie.

2.1.5 Nitrates et azotes totaux

Les concentrations en azote Kjeldhal et en nitrate évoluent avec les saisons. Les fortes valeurs sont enregistrées en hiver ; et de Mars à Octobre - Novembre, les concentrations en ces matières diminuent : comme les nitrates et l'ammonium sont assimilés par les algues ce qui explique les fortes valeurs en DBO₅ et DCO.

L'analyse des résultats enregistrés aux 3 affluents fait remarquer que :

- L'Oued BEJA est le plus chargé en phosphore total (1000 µg/l). La concentration en cet élément est 12 fois plus élevée

à BEJA qu'à MEJERDAH (80 µg/l) et 20 fois qu'à l'Oued ZARGA (45 µg/l).

- Pour les nitrates, la valeur moyenne est identique d'une année à l'autre et aussi la même pour les trois affluents (environ 3,5 mg/l NO₃-N).

2.1.6 Les matières en suspension

Les transports solides se font essentiellement au cours des crues qui représentent au moins 80 % de l'écoulement annuel. A BOU SALEM, les concentrations moyennes minimales sont estimées à 25 g/l. Si on tient compte des débits moyens annuels (487 Mm³) on peut estimer le transport solide au niveau de cette station à 12 millions de tonnes.

2.2 Qualité de l'eau de la retenue de SIDI SALEM

Nous présentons ci-après les paramètres caractéristiques de l'évolution de la qualité de l'eau.

2.2.1 Température

Les diagrammes profondeurs temps, températures de la retenue sont caractérisés par deux périodes :

- L'homothermie d'hiver : du mois de Novembre au mois de Février Mars, une circulation totale et une oxygénation complète du fond de la retenue est provoquée par le mélange intégral de l'eau de ses affluents et l'action du vent.
- Période de stagnation : A partir de Mars, la température

de l'eau de la retenue commence à augmenter pour atteindre son maximum en Juillet à Août 27 à 30°C à l'épilimnion et 14 à 18°C en Septembre - Octobre à l'hypolimnion.

2.2.2 Oxygène dissous

Le début de la chute de la concentration en oxygène dissous au fond de la retenue commence à partir du mois d'Avril et ceci du moins pour les années 1985 et 1986 pour atteindre des valeurs très faibles en Octobre (Valeur nulle le 25/10/85). Tant qu'il existe une différence de température entre la surface et le fond, le lac reste stratifié et les couches profondes perdent plus ou moins rapidement leurs réserves d'oxygène sous l'effet de la respiration des êtres qui l'habitent. L'hypolimnion peut devenir anoxique, ce qui permet le recyclage dans la retenue des éléments piégés par les sédiments du fond en période de l'aérobie.

2.2.3 Nitrates

Parallèlement à la concentration en oxygène on remarque une diminution des concentrations des nitrates observées au fond de la retenue à partir du mois Mai-Juin. On note que l'épuisement de l'oxygène se fait en premier lieu puis les nitrates seront épuisés en second lieu pour servir comme substances oxydatrices supplémentaires retardant ainsi l'utilisation des sulfates dans le processus de décomposition des matières organiques déposées au fond de la retenue.

2.2.4 Phosphore - Orthophosphate

La concentration des orthophosphates reste, en dehors de la période des apports, pratiquement stable. Par contre les concentrations du phosphore total et assimilable ont diminué sensiblement durant la période de stratification.

L'évolution presque constante du phosphore au fond du lac (20 à 40 µg/l P_{tot}) peut être expliquée par le fait que les ions orthophosphates sont fixés par les matières en suspension et les ions calciums et seront éliminés par sédimentation ou transformés en phosphate insoluble.

2.3 Les indicateurs trophiques

2.3.1 Chlorophylle

La concentration de chlorophylle utilisée en tant qu'indicateur de la biomasse phytoplanctonique a été déterminée depuis l'année 1982 dans la retenue. Pour les 5 stations de prélèvement, nous donnons ci-après les moyennes arithmétiques des teneurs en chlorophylle a (mg/m³) pour les 3 dernières années.

Tableau 1 : Concentration en chlorophylle

| Station | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | Moyenne |
|-------------------|------|------|------|------|------|----------|
| Année | | | | | | annuelle |
| 1984 | 3,90 | 4,75 | 3,84 | 4,18 | 5,01 | 4,34 |
| 1985 | 4,3 | 5,55 | 5,3 | 4,88 | 7,64 | 5,54 |
| 1986 jusqu'à Août | 7,6 | 7,7 | 4,3 | 6,6 | - | 6,6 |

D'après ce tableau il paraît que l'année 1986 a connu une période de production algale

plus importante que les deux années précédentes. Les preuves de cette haute productivité sont d'une part les concentrations de chlorophylle enregistrées dans les différentes parties de la retenue, d'autre part les biovolumes phytoplanctoniques des différents prélèvements de l'année 1986.

La quantité de chlorophylle a en mg/m^2 a été déterminée pour quatre stations de la retenue. La moyenne pour la période (Janvier-Août 86) varie entre 60 et 130 mg/m^2 avec une moyenne pour la retenue de 85 mg/m^2 .

2.3.2 Production primaire et biomasse

La production primaire a été mesurée par la méthode de l'oxygène produit par la photosynthèse algale. Les résultats obtenus pour toutes les profondeurs sont intégrés jusqu'à la profondeur où la photosynthèse est minimale.

Tableau 2 : Productivité mesurée à la station B1

| Date | 2/10 | 25/10 | 10/11 | 21/2 | 23/4 | 7/5 | 13/5 | 29/5 | 3/7 |
|------------------------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Méthode | | | | | | | | | |
| Oxygène produit | 2980 | 5790 | 7740 | 7330 | 3960 | 7170 | 7270 | 5700 | 7300 |
| $mg/O_2/m^2/12\ H$ | | | | | | | | | |
| Biomasse au fil- | | | | | | | 6,8 | 4,5 | 5,6 |
| let 20 μ m (ml/m3) | | | | | | | | | |
| (5m - surface) | | | | | | | | | |

Le résultat est exprimé en $mg\ O_2/m^2/12h$ (Tableau 2)

Les espèces dominantes dans la retenue sont :

- En Mai-Juin ce sont les chlorophycées qui sont dominantes sauf pour la station B9 située à l'embouchure de l'Oued BEJA où les diatomées ont une forte dominance. Cette dominance en diatomées est un indice de la dégradation de la qualité de l'eau et un degré de trophie élevé dans cette partie de la retenue.

- Les genres dominants en tant que biomasse est le cyclotella et le Péridinium, tandis qu'en nombre de cellules, le cyclotella est le plus abondant ; les chlorophycées oocystis et les autres espèces contribuent aussi à la communauté phytoplanctonique (Tableau 3).

Tableau 3 : Biomasse phytoplanctonique SIDI SALEM Station B1

| | 10/4/86 | | 23/4/86 | | 29/5/86 | | 17/6/86 | | 3/7/86 | |
|---------------------------|---------|------|---------|-----|---------|------|---------|------|--------|------|
| Profondeur (m) | 1 | 2 | 1 | 4 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 |
| Biomasse totale (mg/l) | 1,96 | 2,23 | 0,5 | 2,0 | 5,5 | 10,7 | 6,6 | 3,8 | 1,9 | 2,9 |
| Péridinium % | 91 | 80 | 0 | 87 | 10,8 | 0 | 36 | 0 | 64 | 0 |
| Cyclotella % | 0 | 8 | 41,8 | 7,8 | 78,4 | 39 | 54,2 | 65,8 | 2,1 | 46,6 |

2.3.3 Transparence de l'eau et matière en suspension

la pénétration de la lumière dans l'eau est fonction de la concentration des matières en suspension (MES) et de la turbidité de l'eau et elle est généralement mesurée comme la transparence de l'eau au disque SECCHI (D.S) (Tableaux 4 et 5).

Tableau 4 : Transparence au disque SECCHI pour le lac

| Bouées | Maxi- mum | Mini- mum | Moyenne | | |
|--------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| | | | 1984 (MAI-DEC) | 1985 (JAN-DEC) | 1986 (JAN-AOÛT) |
| 1 | 4,28 | 0,50 | 1,99 | 1,62 | 1,29 |
| 2 | 2,10 | 0,60 | 1,35 | 1,34 | 0,70 |
| 3 | 2,83 | 0,75 | 1,58 | 1,64 | 0,90 |
| 4 | 2,24 | 0,60 | 1,26 | 1,28 | 0,89 |
| 5 | 1,20 | 0,36 | 0,58 | 0,73 | 0,50 |

Tableau 5 : M.E.S (total en mg/l) à 4 stations et à différentes profondeurs

| ST ^{on} | B1 | | B2 | | B3 | | B4 | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Prof (m) | 0,2 | 10 | 0,2 | 10 | 0,2 | 10 | 0,2 | 10 |
| Moy | 11,7 | 7,5 | 18,6 | 15,0 | 12,7 | 12,3 | 16,6 | 12,4 |
| S. | 6,2 | 3,56 | 16,8 | 9,2 | 6,1 | 7,0 | 12,3 | 7,85 |
| C.V | 0,53 | 0,47 | 0,91 | 0,61 | 0,48 | 0,57 | 0,74 | 0,63 |

2.3.4 Estimation de l'état trophique de la retenue

Nous donnons ci-après les paramètres caractérisant le régime hydraulique

et la morphologie de la retenue de SIDI SALEM pour pouvoir déterminer l'état trophique de cette retenue.

Le temps de résidence de l'eau de la retenue est estimé à 0,5 ans pour une côte ne dépassant pas 105 mNGT. Ce temps de résidence suffit pour un développement important de planctons à partir des éléments nutritifs présents dans le lac. Pendant la période de stratification où les conditions sont favorables à la photo-assimilation, la durée de séjour de l'eau dans la retenue ne constitue pas un facteur limitant de l'eutrophisation.

La profondeur moyenne du barrage est de 10-13 m ce qui correspond à un rapport volume de l'épilimnion avec le volume de l'hypolimnion de 2,6 à 1,3 : c'est un barrage peu profond. Le barrage présente donc une morphologie très défavorable surface-contenance autrement dit les algues produites dans un épilimnion 1,3 fois plus important que l'hypolimnion où ces algues se dégradent.

Pour le lac principal près de la digue, nous avons obtenu les moyennes annuelles des paramètres suivants (Tableau 6).

Tableau 6 : Paramètres trophiques de la retenue

| | P tot mg/m3 | Chl a mg/m3 | D.S moy (m) | D.S min (m) |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1985 | 40 | 4,3 | 1,62 | 0,45 |
| 1986 (JAN-AOÛT) | 27 | 7,6 | 1,29 | 0,60 |

Pour l'année 1986 la température hypolimnique est relativement élevée par rapport à l'année 1985, ceci est

dé au manque d'apport de crue (eau froide) durant l'année hydrologique 85/86.

Si on porte nos résultats d'étude dans un tableau qui donne les catégories trophiques des eaux des lacs, nous pouvons conclure à priori que les eaux de la retenue de SIDI SALEM pour l'année 1986 (année hydrologiquement sèche) sont eutrophes :

Si on applique le modèle prédictif VOLLENWEIDER en prenant une profondeur moyenne de 10 m et une charge en phosphore de $1 \text{ g/m}^2/\text{an}$ (d'après BERNARDH) la charge en phosphore serait excessive et le réservoir est eutrophe. Les résultats de l'étude indiquent par contre que notre retenue est caractérisée par une production algale non excessive avec des concentrations moyennes en chlorophylle allant de 4 à $7,5 \text{ mg/m}^3$ (dans la zone euphotique, environ de 10 mg/m^3) des biomasses algales allant de 2 à 10 g/m^3 , une production primaire de $1,5$ à $3 \text{ gc/m}^2/\text{jour}$ et une profondeur au disque de SECCHI d'environ 1,5 m.

Ces indicateurs de l'état trophique montrent que la retenue est eutrophe à la limite de la mésotrophie.

Malgré les faibles teneurs enregistrées en oxygène dissous dans l'hypolimnion durant la période de stratification, l'hydrogène sulfuré est absent dans le fond de la retenue.

Les conditions chimiques de l'eau ont joué leur rôle positif : les concentrations en calcium ont transformées les phosphates assimilables en phosphore insoluble

qui sera éliminé de la zone trophogène par précipitation.

3. MODELISATION DE LA RETENUE DE SIDI SALEM

3.1. Modèle de simulation du régime thermique (Modèle hydraulique)

3.1.1 Principe et hypothèses du modèle

La modélisation thermique est effectuée par un modèle mathématique intégral unidimensionnel sur la verticale basé sur le bilan de chaleur.

Ce modèle prend en compte :

- Les mécanismes induits par les échanges atmosphériques tels que :

* La pénétration du rayonnement solaire en profondeur et bilan de chaleur à l'interface air-eau.

* Mouvements convectifs gravitationnels dus à un profil de densité instable à la suite d'un refroidissement en surface.

* Mélange dû au vent : l'énergie cinétique turbulente créée par frottement à la surface de l'eau, contribue au mélange vertical des masses d'eau.

- Action advective des entrées-sorties d'eau : les apports et les prises d'eau vont donner lieu à une advection qui va conditionner le régime thermique de la retenue. Cette action a été négligée étant donné

qu'on travaille durant une période où les apports liquides et les prises d'eau sont habituellement faibles (de Mars à Septembre-octobre) tout en considérant les hypothèses suivantes

- * Les entrées d'eau dans le réservoir se font à leur niveau de densité.
- * Les sorties d'eau sont centrées autour du niveau de soutirage.

3.1.2. Application du modèle hydraulique

3.1.2.1 Données d'entrée

- Données morphométriques

La morphologie de la retenue de SIDI SALEM est très compliquée, il s'agit en réalité de trois retenues en séries reliées l'une à l'autre par des passages étroits. La partie la plus profonde se trouve près de la digue. Pour l'application du modèle la retenue a été traitée comme étant homogène en sens horizontal.

Les données suivantes sont utilisées :

- * La longueur du réservoir
- * Surface du plan d'eau et largeur moyenne de la retenue en fonction de la cote.
- * Nombre de couches utilisées pour la description géométrique du réservoir (N = 42) ; ce qui permet d'avoir une résolution spatiale convenable.

- * Latitude et longitude du réservoir

- * Côtes des prises et entrées d'eau au réservoir

- Données hydrologiques

- * Apports et prises d'eau du barrage : Les séries temporelles des apports et des prises d'eau sont présentées au modèle comme des moyennes calculées sur 24 heures pour des périodes où ces paramètres sont stables. Pour les débits entrant au réservoir, on fournit au modèle, le couple débit-température de l'eau de surface correspondant au même pas de temps.

- * Un profil de température de l'eau du réservoir est donné comme donnée de référence pour le modèle.

- * Cote du plan d'eau est donnée pour le premier jour de simulation.

- Données météorologiques

Les séries temporelles des données météorologiques ont été structurées avec un pas de temps de 10 jours en utilisant des moyennes calculées sur 24 heures :

- * Températures de l'air sèche et humide,
- * Nébulosité,
- * Vitesse du vent,
- * Pression atmosphérique.

Les données météorologiques utilisées sont celles de la station agrométéorologique de Béja ; c'est la

station la plus proche du barrage pouvant fournir les données nécessaires à l'estimation du flux échangé à l'interface eau - atmosphère.

- Le pas d'intégration utilisé est de 6 heures, étant donné la grande différence de température de l'air entre le jour et la nuit.

- Le pas de simulation est variable ou fixe. Le pas variable permet de sélectionner les jours qui correspondent à des observations pour pouvoir contrôler la déviation entre l'observé et le calculé.

3.1.2.2 Résultats obtenus de l'application du modèle

a) Calibration à l'aide des données de l'année 1985

La période choisie pour tester le modèle était 20 Mai-Octobre. Les résultats de calibration sont satisfaisants. La correspondance entre les simulations et les observations est bonne (Tableau 7). Les profils de température calculés et observés sont donnés dans les figures No 1 et 2 .

Pour le dernier jour de simulation, l'écart entre les valeurs observées et calculées pour la côte et le volume correspondant, peut s'expliquer par les grands débits de prise entre le 5/9 et 26/9/85 qui est de 46,5 m³ /s ce qui correspond à l'ouverture de la vanne de fond en Septembre. Les courants générés par ce débit sont trop importants pour être décrits par ce modèle hydraulique dans sa version actuelle.

b) Vérification du modèle avec les données 1984 et 1986

La simulation de la situation hydraulique et thermique de l'année 1984 et 1986 avec les résultats de calibration de l'année 1985 a été faite aussi avec les données météorologiques calculées sur un pas de temps de 10 jours.

Pour la période stratifiée, les résultats sont satisfaisants. Les correspondances entre les profils de température observés et calculés d'une part, et les bilans hydrauliques observés et calculés d'autre part sont bonnes (Tableau 8). Les profils de température sont donnés en Fig No 2 et 3.

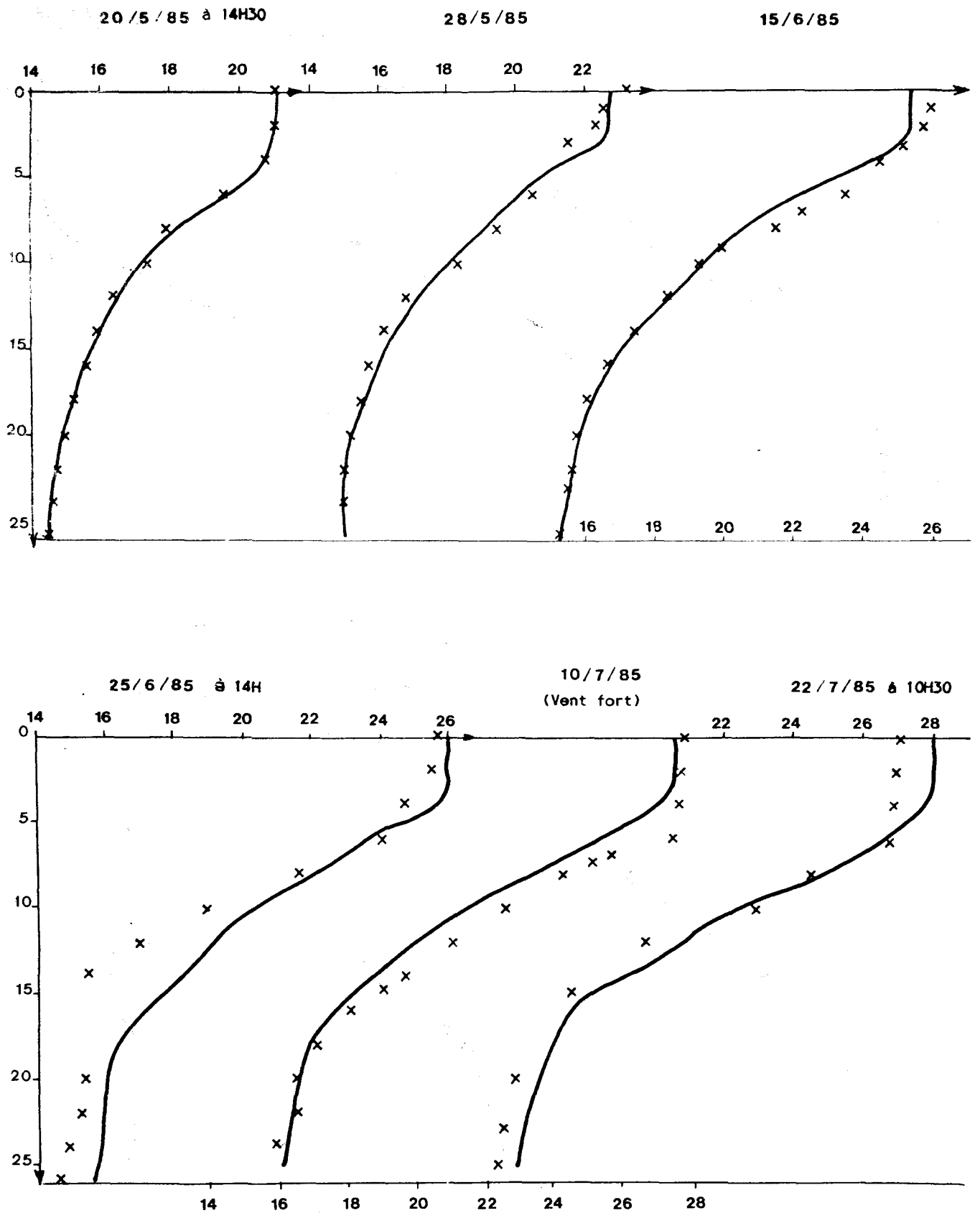
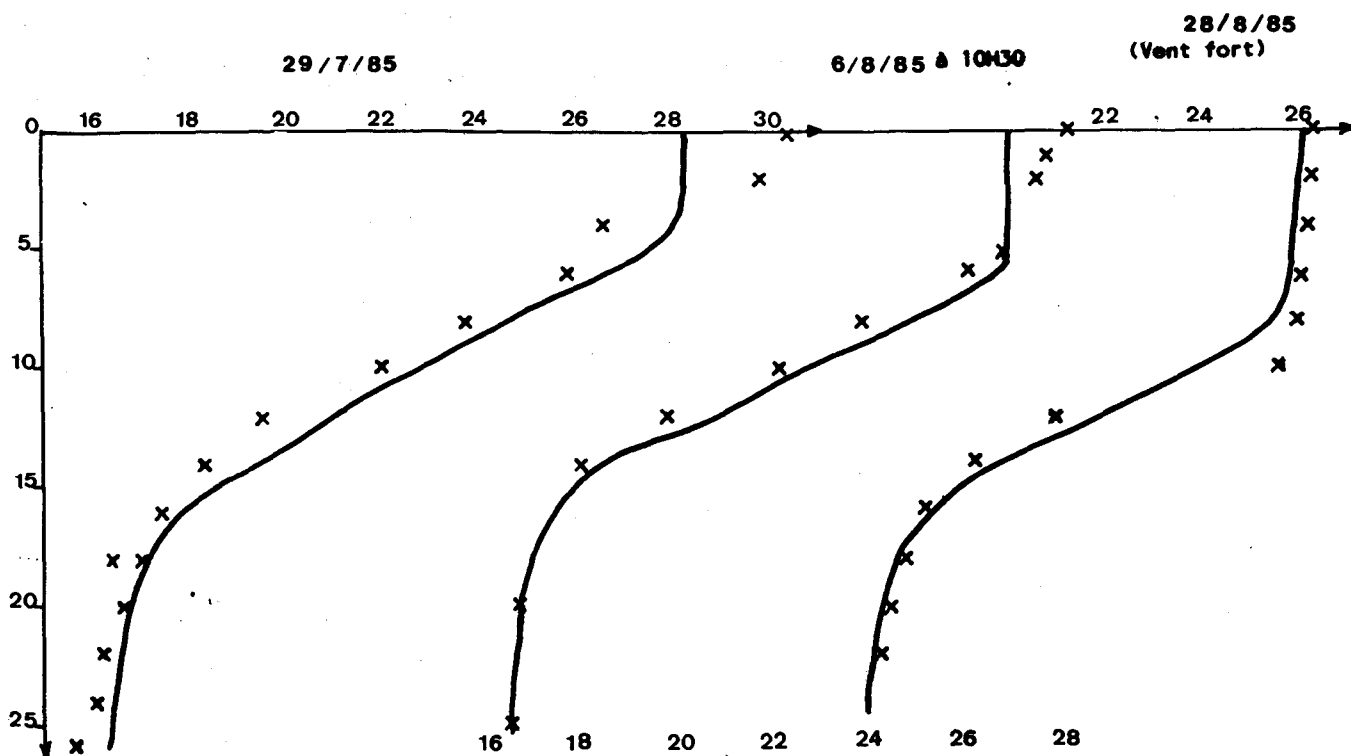


Fig.1 : Résultats de calibration du modèle hydraulique : Année 1985



Résultats de simulation du développement de la stratification au cours de l'année 1984

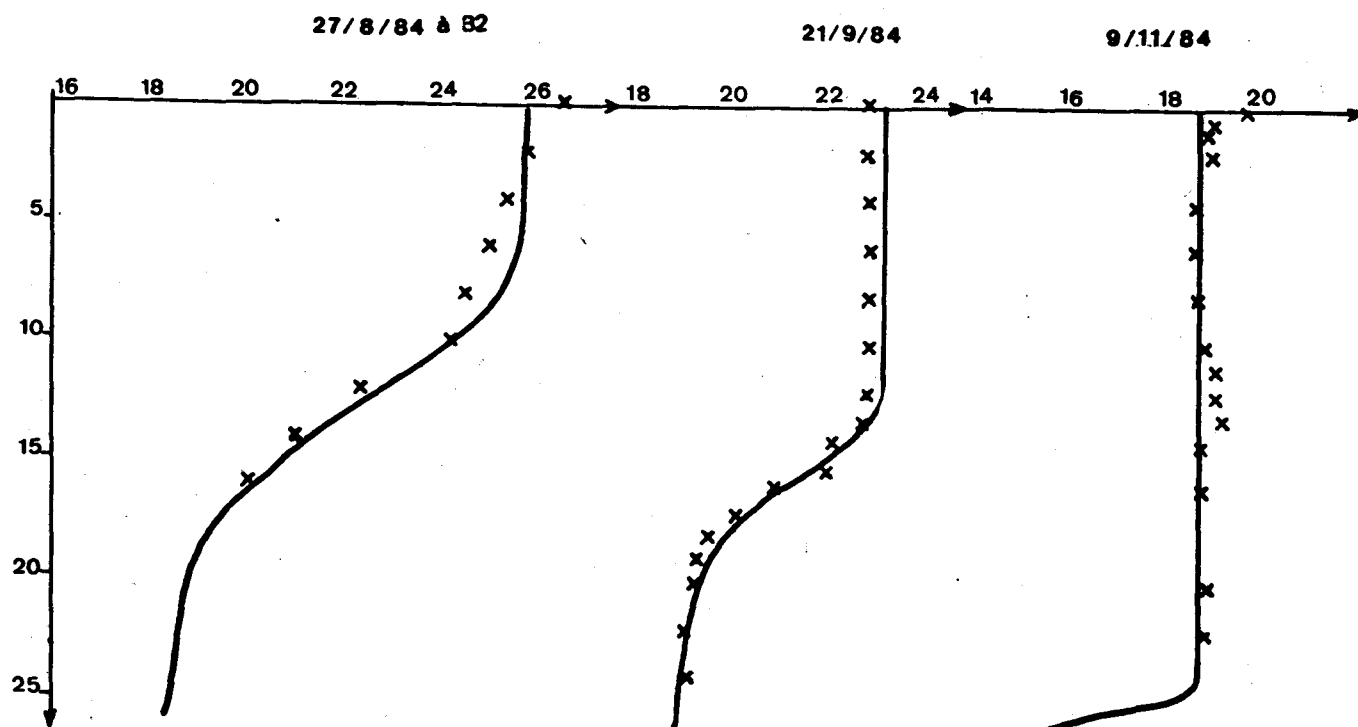


Fig.2 : Résultats de calibration du modèle hydraulique avec les données de l'année 1985

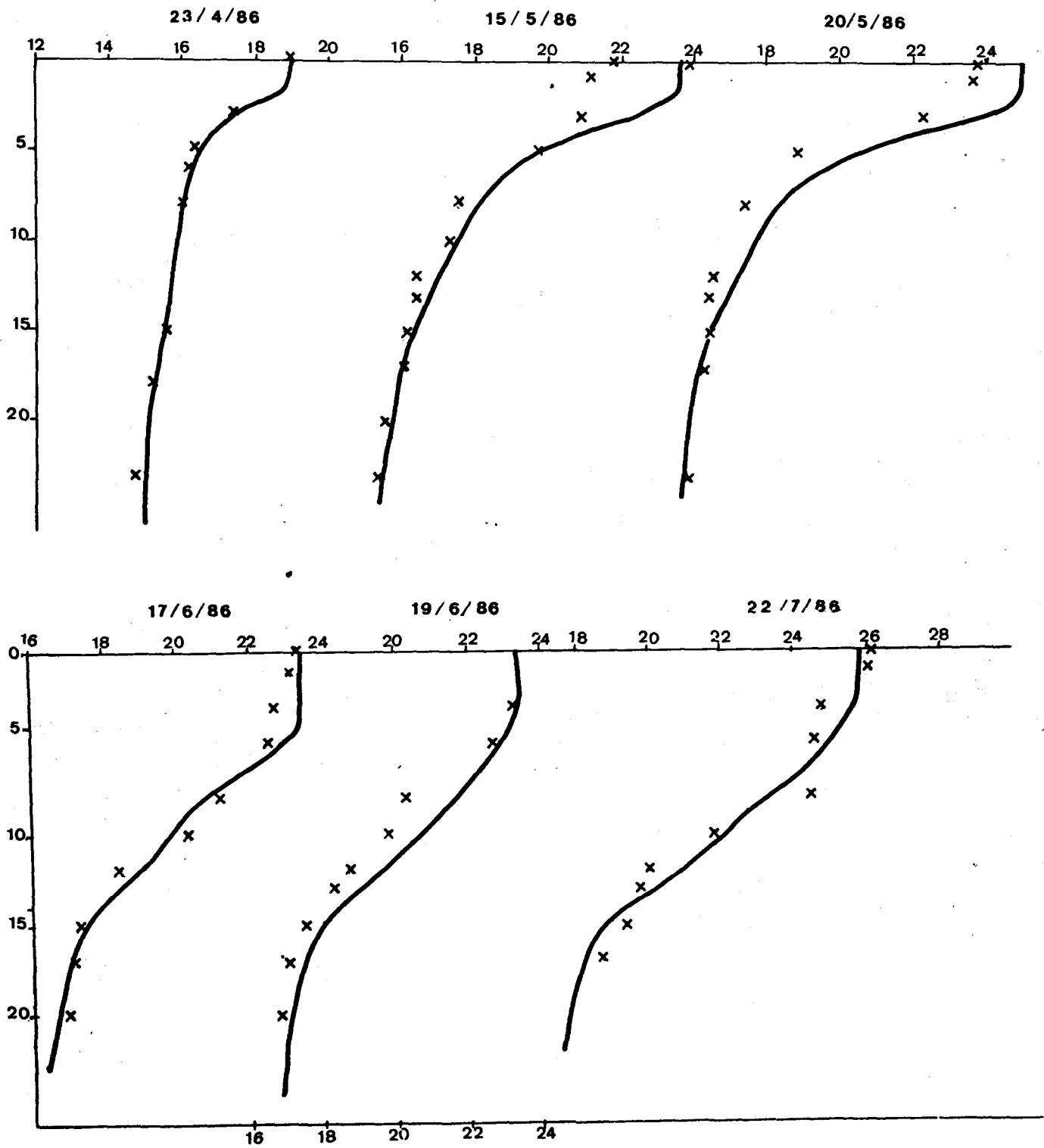


Fig.3 : Résultats de simulation du développement de la stratification : Année 1986

**Tableau 7 : Résultats du bilan hydraulique de la retenue
pour l'année 1985**

| Date | Côte (m) | | Volume (106 m3) | | Evaporation (mm) | |
|---------|----------|--------|-----------------|-------|------------------|------|
| | obs. | cal. | obs. | cal. | obs.(bac) | cal. |
| 20/5/85 | 107,30 | 107,30 | 450 | 447,8 | 4 | 6,8 |
| 28/5/85 | 107,26 | 107,26 | 446 | 444,1 | 5 | 5,5 |
| 15/6/85 | 106,68 | 106,8 | 432 | 431,6 | 9 | 8,0 |
| 10/7/85 | 105,77 | 105,9 | 384 | 397,9 | 9 | 9,9 |
| 22/7/85 | 105,24 | 105,3 | 374 | 380,8 | 9 | 9,1 |
| 29/7/85 | 104,98 | 105,0 | 365 | 371,0 | 10 | 9,4 |
| 06/8/85 | 104,56 | 104,6 | 355 | 356,7 | 9 | 10 |
| 28/8/85 | 103,46 | 103,4 | 322 | 322,3 | 10 | 8,8 |
| 5/10/85 | 101,75 | 99,8 | 275 | 229,4 | 3 | 4,9 |

Tableau 8 : Bilan hydraulique de l'année 1984

| Date | Côte (m) | | Volume (106 m3) | | Evaporation (mm) | | Observation |
|----------|----------|-------|-----------------|-------|------------------|------|-------------|
| | obs. | cal. | obs. | cal. | obs.(bac) | al. | |
| 28/5/84 | 108,80 | 108,8 | 509 | 505,0 | 8 | 4,1 | |
| 25/6/84 | 107,50 | 107,5 | 458 | 455,3 | 7 | 8,6 | |
| 30/7/84 | 105,78 | 105,6 | 495 | 388,4 | 8 | 10,8 | |
| 27/8/84 | 104,45 | 104,1 | 350 | 341,2 | 7 | 7,7 | |
| 21/9/84 | 103,64 | 103,0 | 325 | 310,7 | 2,7 | 7,0 | pluvieux |
| 29/10/84 | 103,23 | 102,2 | 317 | 298,4 | 2,7 | 4,6 | 3,7 |
| 9/11/84 | 103,08 | 102,3 | 308 | 291,5 | 3 | 4,9 | |
| 10/12/84 | 102,42 | 101,4 | 294 | 266,8 | 1 | 2,6 | |

Pour l'année 1984, les écarts entre les côtes et les volumes observés et calculés commencent à partir de la fin Octobre à la suite des crues enregistrées le 29/8, 21/9, 19/10 et 23 et 24/10/84. Cet écart s'accroît à la fin de la période de simulation au moment où un débit de prise de 94 m³ /s a été enregistré à partir du 20/11/84 jusqu'au 6/1/85.

Pour l'année 1986 les résultats de simulation sont satisfaisants.

3.2. Modèle écologique : (ou modèle de la qualité de l'eau)

3.2.1 Hypothèses et équation de base

Dans les régions à climat chaud, les masses d'eau des retenues sont non homogènes surtout pendant les périodes de stratification de température et d'établissement de thermocline. La non-homogénéité de la masse d'eau est prise en considération par la division de la retenue en plusieurs couches horizontales où les courants d'advection et la dispersion sont décrits par un échange de masse entre les couches.

Le modèle repose sur des processus dynamiques contenant 3 types de fonctions :

- Interaction chimique et biologique,
- Transport par des courants et des turbulences,
- Fonctions extérieures comme température, profondeur, volume, zone benthique... etc.

Les équations différentielles contenues dans le modèle ont la forme principale suivante :

$$\frac{dx_i^p}{dt} = f_i(x_1^p, \dots, x_n^p, \lambda, x_i) + g_i(x_{i-1}^p, x_i^p, x_{i+1}^p, \lambda, \alpha, \beta)$$

$$i = 1, n \quad p = 1, N$$

où

x_i = représente des variables d'état ($i = 1, n$)

f_i = contient les interactions intrasegmentales (dans une couche).

g_i = décrit les effets des courants d'advection et de dispersion entre les couches voisines (N couches ou segments).

3.2.2 Interactions intrasegmentales

L'interaction entre les algues, les détritiques et les sédiments est forte, ces termes sont décrits chacun par 3 variables d'état distinctes : le carbone, l'azote et le phosphore qu'on note : PC, PN, PP, DC, DN, DP, SC, SN et SP. Etant donné que les biomasses des zooplanctons et des poissons sont de faibles importances par rapport à la biomasse planctonique, les zooplanctons et les poissons ne sont pas divisés en compartiments différents et l'erreur introduite ainsi dans les bilans de masse est négligeable.

Ce modèle est utilisé pour le développement temporel des algues, de l'oxygène dissous, du nitrate, du phosphore, des sédiments, des détritiques etc... Ce modèle contient 15

variables d'état pour chacune des 5 couches qu'on a adopté pour la retenue de SIDI SALEM

Les interactions dans une couche entre les variables d'état sont décrites par des processus (par exemple la production primaire, la consommation de sels nutritifs et la consommation de phytoplancton par les zooplanctons qui représentent le flux intrasegmental de matière.

Les fonctions extérieures qui sont utilisées par le modèle sont fournies au modèle comme des séries temporelles (température, insolation etc...)

3.2.3 Interactions intersegmentales

Les variations causées par des mouvements d'eau sont représentées par les flux d'advection et de dispersion qui sont calculés pour chaque couplage intersegmental.

3.2.4 Application du modèle à la retenue de SIDI SALEM

3.2.4.1 Données d'entrée du modèle

Les résultats d'échange de masse générés par le modèle hydraulique unidimensionnel servent comme données d'entrée au modèle écologique et ceci après transformation à l'aide d'un programme d'interface en facteurs directement utilisables par le modèle de qualité de l'eau.

Suivant l'allure des profils de température calculés par le modèle hydraulique, le modèle d'interface calcule pour des séries chronologiques pour des couches plus profondes (5 pour SIDI SALEM) la

lumière (seulement pour la couche superficielle), la profondeur de chaque couche, son volume, sa température, l'inflow, l'outflow de chaque couche et pour de couches successives l'advection et la dispersion.

Le fichier du modèle fait appel aussi à des données physico-chimiques et hydrobiologiques telles que le phytoplancton (carbone, azote, phosphore) le détritus (carbone, azote, phosphore), au sédiment (carbone, azote, phosphore), au zooplancton, poisson, ammonium, nitrate, phosphate et oxygène dissous.

3.2.4.2. Calibration du modèle

Les données de l'année 1985 ont été utilisées pour réaliser une calibration brute du modèle. Les résultats obtenus sont indiqués dans les figures No 4 et 5.

Pour les concentrations en oxygène dissous, la correspondance entre les valeurs observées et calculées est bonne pour le fond de la retenue sans apparition d'hydrogène sulfuré, tandis que pour la couche superficielle, les résultats du modèle sont légèrement sous estimés si on considère que tous les résultats d'observation sont fiables.

Pour les nitrates, les valeurs obtenues en surface et au fond par la simulation sont dans la même gamme que les valeurs observées.

Les valeurs calculées des concentrations de phosphate sont légèrement surestimées dans l'hypolimnion et ceci peut être

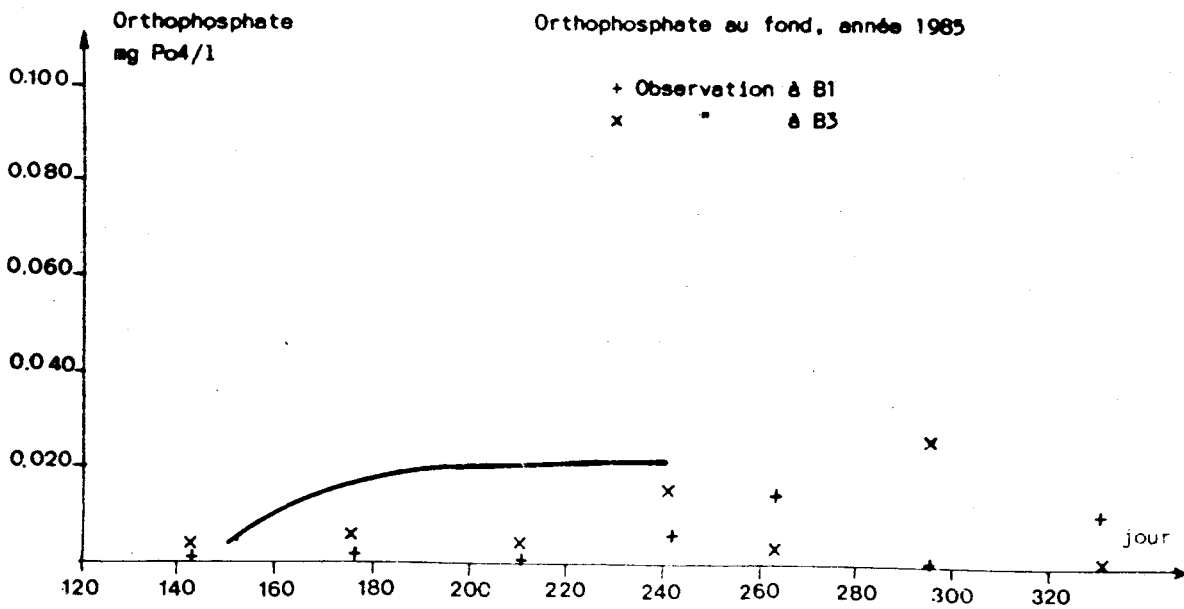
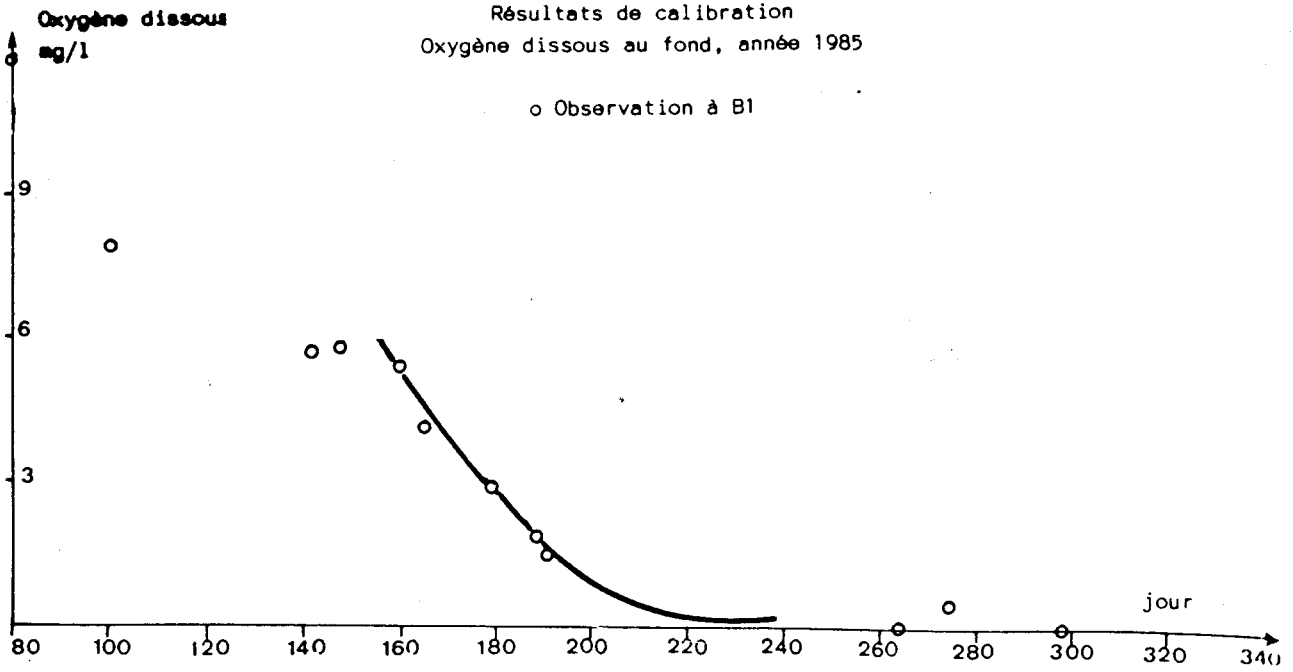


Fig.4 : Résultats de calibration

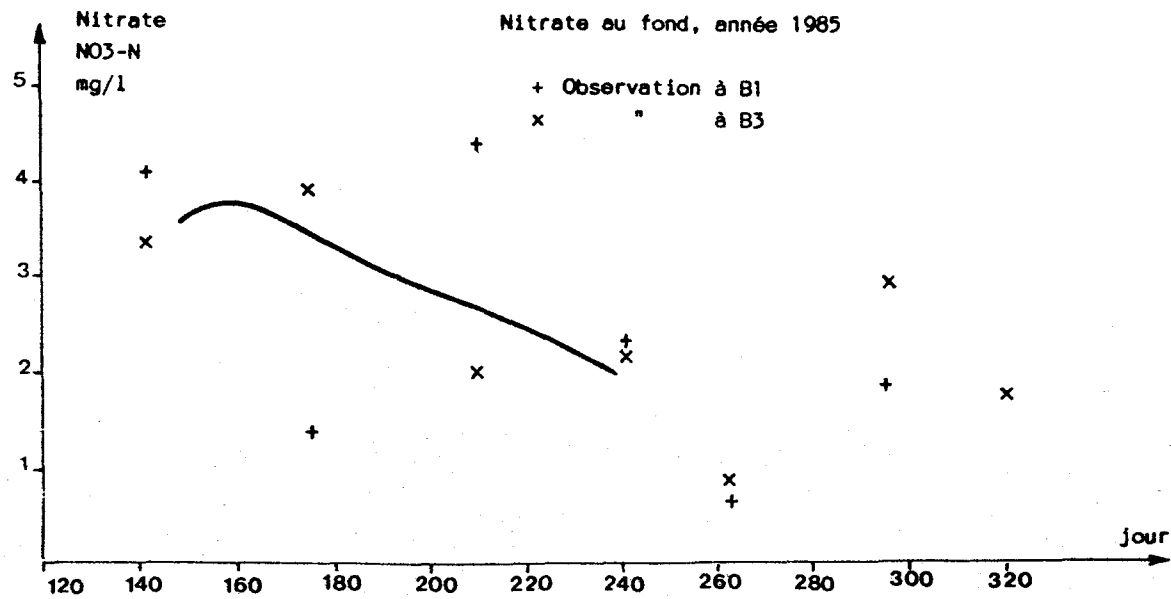
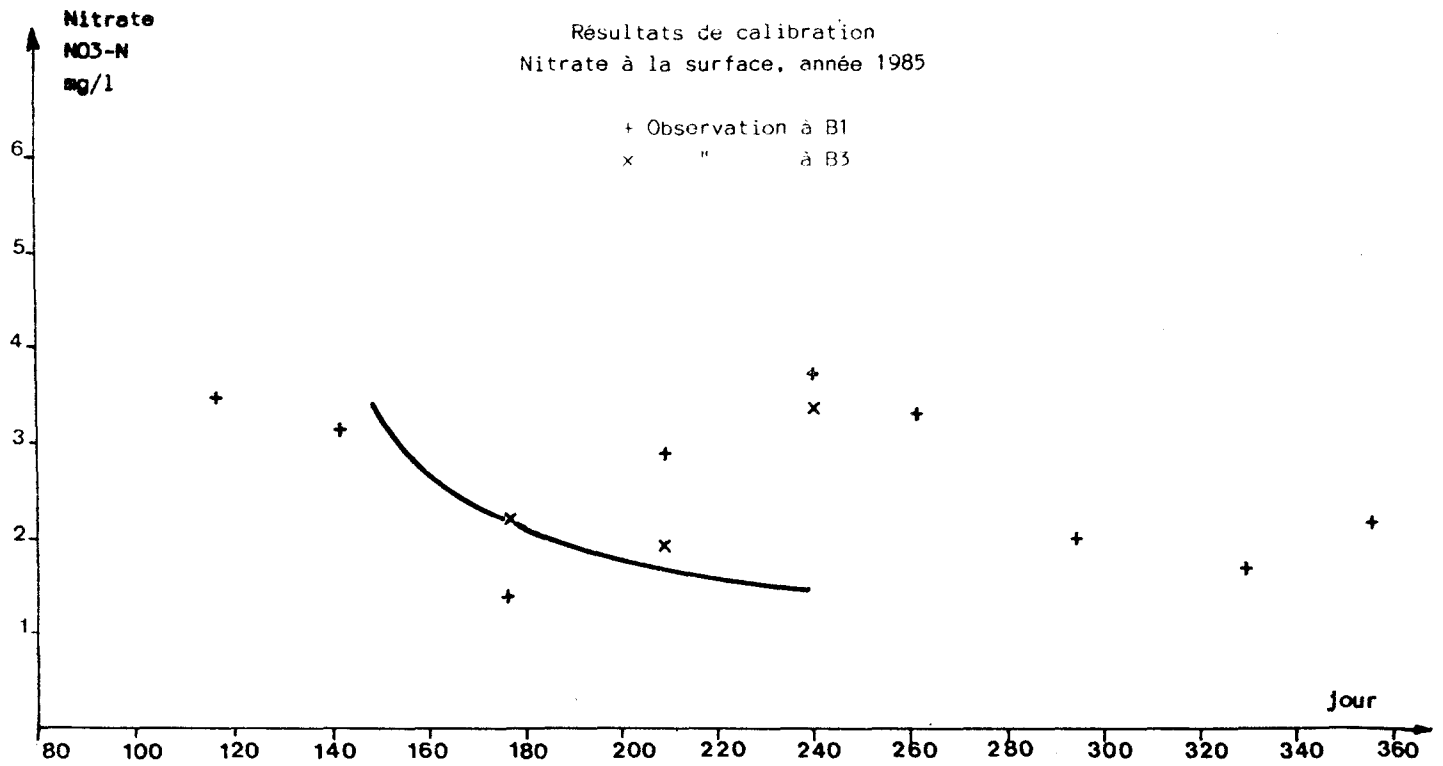


Fig.5 : Résultats de calibration

expliqué par le fait qu'il y a une précipitation de phosphate par le calcium sous forme d'hydroxyapatite. D'ailleurs cette précipitation de phosphore par le calcium est observée pour 4 stations de la retenue.

4. CONCLUSION

La Tunisie caractérisée par un fort accroissement démographique et une industrialisation qui devient de plus en plus active, arrive à une situation critique en trouvant les sources de pollution potentielles de ses ressources en eau se multiplier.

Dans le bassin de la retenue de SIDI SALEM, les zones agricoles, les périmètres communaux et industriels sont à l'origine de la pollution primaire résultant des déversements d'eaux usées dans le lac ou dans ses affluents.

Malgré les apports importants, en phosphore de l'Oued BEJA, les teneurs en ions orthophosphates n'augmentent pas dans la retenue. Les ions sont fixés par les matières en suspension et les ions calciums et seront éliminés par sédimentation de la zone trophogène et transformés en phosphore insoluble inaccessible aux algues. Par conséquent l'état trophique de l'eau est à considérer comme une eau entre l'état méso et eutrophe.

Ceci est d'ailleurs confirmé par les valeurs relativement modestes de chlorophylle a (en général 10 mg/m³ dans la couche trophogène), et de biomasse algale (2 - 10 g/m³ - poids frais). Cependant la production primaire estimée à partir de la production d'oxygène est relativement

élevée (environ de 500 à 1000 gc/m² ans). Aussi les valeurs de la transparence au disque de SECCHI (Valeur moyenne 1,3 - 1,6 m ; valeur minimale environ de 0,5 m) indiquent un état d'eutrophie, sinon d'hyper eutrophie.

Ici il convient de signaler que la classification de l'état trophique d'une retenue en climat chaud ne peut pas se faire directement en utilisant le système de classification élaboré pour les lacs en climat tempéré/froid ceci est vrai surtout pour les indicateurs tels que la production primaire et la transparence de l'eau.

L'application des modèles mathématiques (modèles hydrauliques et modèle de qualité de l'eau) sur la retenue de SIDI SALEM a donné des résultats satisfaisants. Ainsi on a pu simuler l'évolution de la thermocline d'une manière correcte pour toute la période Mai-Novembre si on compare avec les données mesurées in situ.

En outre, la calibration du modèle de qualité de l'eau a résulté en une bonne description de l'évolution au moins d'un paramètre clef : la disparition successive de l'oxygène dissous dans l'hypolimnion.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- LILJEBLAD, A1. : A mathematical describing the thermal balance and the transport mechanisms in the reservoir on the BOU REGREG River MOROCCO. Rapport technique, série D No 2, du projet MOR/RCE 001-PNUD/MOR/79/005 IVL, STOCKHOLM - SWEDEN (1982).
- LANDNER, L.WAHLGREN, U : Eutrophisation des lacs et réservoirs en climat chaud. O.M.S / P.N.U.D - 30/7/86 - STOCKHOLM (1986)
- WAHLGREN, U. : Modèle mathématique de la qualité de l'eau : calibration et simulation des conséquences de diverses mesures pour combattre l'eutrophisation et de la surélévation de la retenue du barrage SIDI MOHAMED BEN ABDALLAH sur le BOUREGREG, MAROC. Rapport technique, série D, No 5 du projet MOR/RCE 001-PNUD/MOR/79/005, IVL, STOCKHOLM, SUEDE (1982).
- LANDNER, L. (et al) : Protection de la qualité des eaux des lacs-réservoirs au MAROC. Rapport final (Section A, partie scientifique) du projet MOR/RCE 001-PNUD/MOR/79/005/85 (1982).
- SAADAQUI, M. : Projet R.A.B 80/011 : Eutrophisation, rapport final, DRE - TUNIS Sep 1986.

SIMULATION DU COMPORTEMENT DE LA NAPPE DE GAFSA NORD AU NIVEAU DU SEUIL

M. ZAMHOURI : Ingénieur Principal - DGRE
L. HOUNNI : Ingénieur T.E - DGRE

1. INTRODUCTION

Les Oasis de GAFSA sont alimentées à partir des nappes de GAFSA Nord et Gafsa Sud qui sont séparées par le seuil hydraulique semi étanche de GAFSA. Au Nord du seuil, le projet de rénovation des oasis de GAFSA prévoit le remplacement de quelques forages ainsi que la création d'une quinzaine de forages dans les régions de RAGOUBA et LALLA (Fig.1). Le calcul du rabattement résultant de la mise en exploitation simultanée de ces forages permettra d'apprécier la situation piézométrique, au niveau du seuil, à l'échéance de sept ans et de guider l'équipement de nouveaux forages.

2. HYDROGEOLOGIE DE LA REGION DU SEUIL DE GAFSA

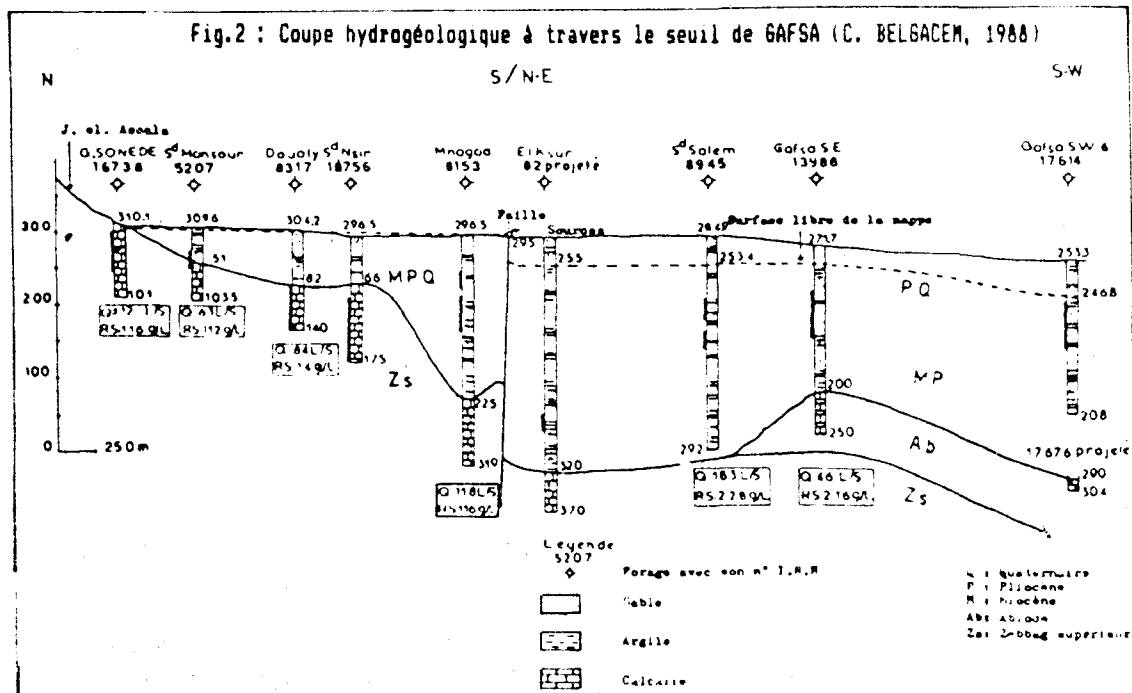
Au Nord du seuil de GAFSA s'étend une vaste cuvette bordée par les anticlinaux BEN YOUNES, ATTIG, ORBATA, MAJOURA, SOUINA et SIDI AICH. La cuvette est comblée par un remplissage Mio-Plio-Quaternaire indifférencié surmontant les formations du Crétacé Supérieur. Etant donné l'absence d'un niveau imperméable, le système aquifère se comporte comme une seule entité hydrogéologique.

L'alimentation du système est essentiellement assurée par l'infiltration directe et l'infiltration des eaux de ruissellement des Oueds KEBIR et SIDI AICH. L'écoulement général de la nappe converge vers le Goulet de GAFSA au niveau du seuil, la chute piézométrique d'environ 40 m en aval du seuil, est accompagnée par la naissance d'un groupe de sources qui

suit le tracé de la faille de GAFSA. A ce niveau cette faille met en contact deux compartiments de perméabilité différente, un compartiment Nord surelevé caractérisé par une forte perméabilité, un compartiment Sud effondré de perméabilité médiocre (Fig.2). En ce qui concerne les paramètres hydrodynamiques de la nappe de GAFSA Nord, l'interprétation des pompages d'essai indique que les transmissivités sont de l'ordre de 310^{-2} m²/s dans la région de RAGOUBET-ASSALA. Dans la région de LELLA, les transmissivités varient de 10^{-2} à 310^{-2} m²/s (Tableau 1). Quant au coefficient d'emménagement, il est d'environ 4.10^{-2} .

Tableau 1: Rabattements calculés aux forages situés dans les régions de RAGOUBA et LELLA

| Forages | No | T | S | Rabat- |
|------------|-------|-------------------|------|---------|
| | IRH | 10-2 | 10-3 | tement! |
| | | m ² /s | | (7ans)! |
| Ragouba 2b | 18926 | 3,2 | 4 | 38,50! |
| Ragouba P1 | 19427 | 3 | 4 | 40,29! |
| Ragouba P2 | 19508 | 3 | 4 | 39,85! |
| Ragouba P3 | 19521 | 3 | 4 | 38,96! |
| Ragouba P4 | 19537 | 3 | 4 | 37,42! |
| Ragouba P5 | 19530 | 3 | 4 | 36,14! |
| Ragouba P6 | 19554 | 0,5 | 4 | 139,13! |
| Ragouba P7 | 19555 | 3 | 4 | 34,12! |
| Ragouba P8 | 19570 | 0,5 | 4 | 127,73! |
| Ragouba P9 | 19571 | 2,8 | 4 | 41,08! |
| GNR1 | 19530 | 3,3 | 4 | 35,12! |
| GNR2 | 19539 | 3,3 | 4 | 36,83! |
| Lalla P1B | 19590 | 1,7 | 4 | 60,69! |
| Lalla P2B | 19589 | 3 | 4 | 38,44! |
| Lalla P3 | 19489 | 3 | 4 | 36,90! |
| Lalla P5B | 19591 | 3 | 0,4 | 54,79! |
| Lalla P6 | 19569 | 4,7 | 4 | 26,54! |
| Lalla P7 | 19596 | 3,8 | 4 | 32,26! |



L'exploitation actuelle dans la région du seuil de GAFSA est de 148 l/s mais elle est appelée à atteindre 988 l/s. Il en résultera un effet d'interférence qui ne manquera pas d'engendrer le tarissement des sources, ainsi que l'amplification du rabattement au niveau des forages. N'ayant pas suffisamment de données hydrogéologiques pour l'élaboration d'un modèle maillé qui prend en compte tous les types de conditions aux limites, des simulations sur modèle simplifié basé sur la solution de THEIS, sont effectuées dans l'objectif de prévoir le comportement de la nappe à l'échéance de sept ans.

3. MODELE DE CALCUL

D'après la solution de THEIS, le rabattement au temps (t) en un point situé à la distance (r) du puits de pompage dont le débit est susceptible d'évoluer par paliers de débit constant, s'exprime comme suit :

$$s(r,t) = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1}) W\left(\frac{Sr^2}{4T(t-t_{i-1})}\right) \quad (1)$$

où (T) et (S) désignent respectivement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère.

(Q_i) est le débit constant entre (t_{i-1}) et (t_i).

Dans le cas de plusieurs puits de pompage et puits témoins, l'expression du rabattement devient :

$$s(i,k) = \frac{1}{4\pi T} \sum_{j=0}^n [Q(j,0) - Q(j,0-1)] W\left(\frac{Sr^2(i,j)}{4T(t(k)-t(0-1))}\right) \quad (2)$$

où les indices (i), (j), (k) et (m) désignent respectivement :

- Les puits témoins,
- Les puits de pompage,
- Les temps où sont calculés les niveaux piézométriques,
- Les temps où se produisent un changement de débit.

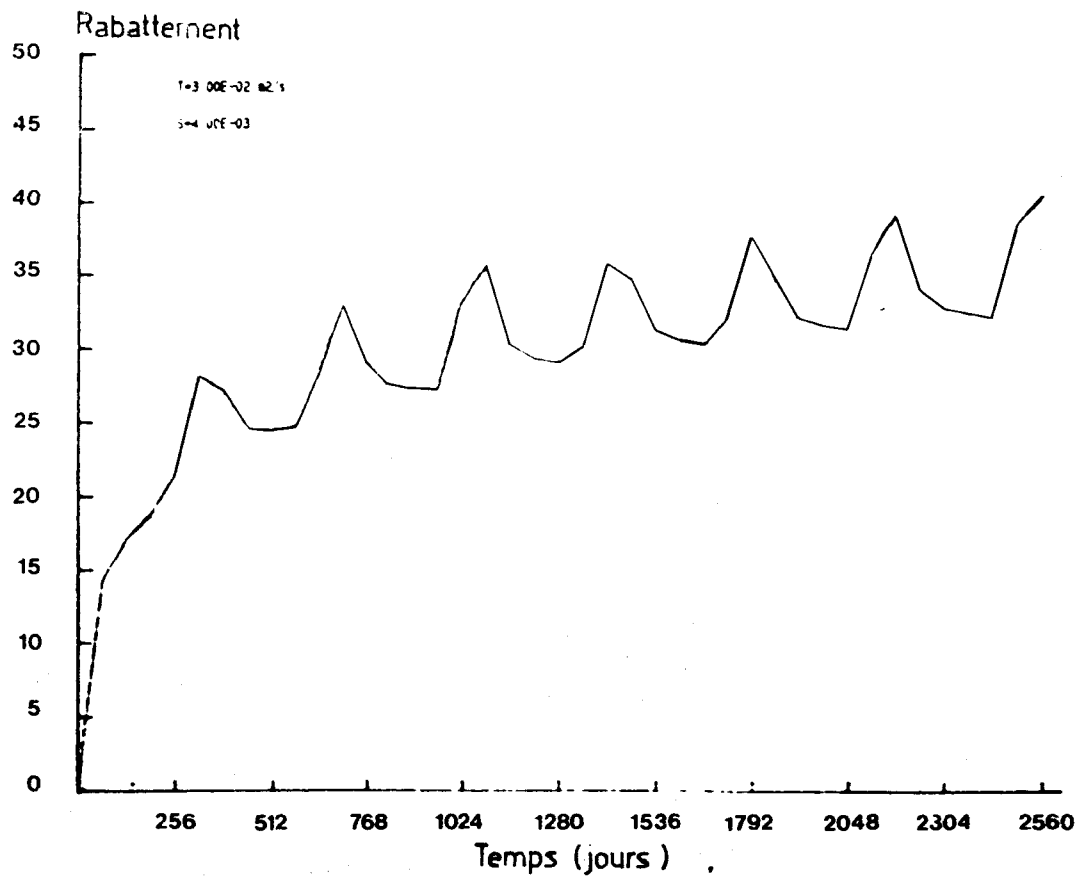
Au Nord, le système aquifère est supposé illimité, par contre les limites étanches, la faille de GAFSA et Jebel ASSALA, sont introduites en appliquant la méthode des images.

4. RESULTATS

Les débits d'exploitation des nouveaux forages sont évalués en fonction des besoins en eau d'irrigation des oasis et des débits spécifiques obtenus lors des essais de réception.

Les débits d'exploitation instantanés proposés sont de 70 l/s sauf pour les forages à faible débit spécifique, RAGOUBA P8 (30 l/s), RAGOUBA P6 (40 l/s) et LELLA P4 (55 l/s). Le pompage est effectué sur la base de 18 heures/jour pendant la saison sèche et de 12 heures /jour pendant la saison humide. Ce mode de pompage a pour effet d'atténuer le rabattement. Des remontées saisonnières du niveau piézométrique d'environ 5 m sont observées sur tous les forages (Fig.3). Les rabattements calculés sur 7 ans varient de 26,5 m à 60 m sauf sur les forages à faible transmissivité où le rabattement est de 130 à 140 m, ces forages sont alors considérés comme forages de secours et ils ne seront pas exploités.

Fig.3 : Rabattements calculés au forage RAGOUBA P1



5. CONCLUSION

Un modèle simplifié basé sur la solution de THEIS et prenant en compte la multiplicité des puits de pompage ainsi que les variations de débits, a permis d'effectuer des simulations prévisionnelles du comportement de la nappe de Gafsa Nord. Les résultats du modèle permettent d'apprécier la situation piézométrique à l'échéance de sept ans et de choisir le scénario, de développement des eaux souterraines,

adéquat. Ainsi la mise en exploitation de nouveaux forages localisés à RAGOUBA et LELLA aura pour effet de porter le débit total prélevé qui est actuellement de 148 l/s à 988 l/s, le jour où l'équipement de nouveaux forages sera terminé. L'adoption de ce nouveau système d'exploitation basé sur le pompage se traduira par le tarissement des sources.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- | | |
|---------------------------|---|
| BELGACEM, C. | : Fonctionnement hydraulique du seuil de GAFSA mémoire de D.E.A Faculté des Sciences de TUNIS.(1988) |
| MOUMNI, L. ; ZAMMOURI, M. | : Note sur l'exploitation de forages du seuil de GAFSA, Note.int, DRE, TUNIS.(1987) |
| ZAMMOURI, M. | : Calculs, programme basic de calcul automatique de transmissivités et des coefficients d'emmagasinement, Note.int. DRE, TUNIS.(1986) |

DEUXIEME PARTIE

Aperçu sur les principales études réalisées

CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU FLANC SUD-EST DES DUNES DE NEFZA (OUCHTATA)

M. HANAA : Ingénieur Principal - DGRE

1. SITUATION ET OBJECTIF DE L'ETUDE

1.1 Situation

Les dunes de OUCHTATA se situent sur la côte Nord de la TUNISIE à une vingtaine de kilomètres de la ville de TABARKA. Elles appartiennent au versant Sud-Est des dunes de NEFZA, dans lesquelles on individualise un second versant marin ou versant Nord-Ouest.

Du point de vue pluviométrie, les dunes font partie de la région la plus arrosée de la TUNISIE (Plus de 1000 mm à TABARKA et plus de 1500 mm à AIN DRAHAM).

Elles font émerger plusieurs sources importantes et en particulier la source de RAS EL OUED débitant plus de 60 l/s en moyenne.

1.2 Objectif de l'étude

Cette étude hydrogéologique a pour objectif de définir le comportement hydraulique du système aquifère dunaire de OUCHTATA, de contribuer à l'évaluation de sa ressource en eau globale et d'étudier le captage le plus approprié de cette ressource.

En effet pour ce qui interesse les captages, le système utilisé jusqu'ici comprend une série de puits siphonnants installés depuis 1960. Ce système de captage assez coûteux devait assurer un exhaure de plus de 100 l/s, le débit actuel a beaucoup chuté et n'est que de 20 l/s.

2. ESQUISSE GEOLOGIQUE - CONFIGURATION ET GEOMETRIE DU RESERVOIR DUNAIRE

2.1 Esquisse géologique

La plaine des NEFZA appartient à ce que l'on appelle l'ensemble géologique de KROUMIRIE ou " Zone du flysch", cette zone est caractérisée par le très grand développement des terrains gréseux et argileux de l'oligocène (NUMIDIEN). Les couches sous-jacentes n'apparaissent qu'à la faveur d'extrusions triasiques ou à la suite d'une érosion intense. La plaine des NEFZA est la seule zone de la TUNISIE septentrionale où l'érosion a été assez puissante pour enlever l'énorme masse de flysch argilo-gréseux de recouvrement, qui partout ailleurs borde la côte.

La dépression topographique créée a été envahie en partie par les sables dunaires jusqu'à onze kilomètres à l'intérieur des terres (OUED EL MELAH).

La zone des dunes de NEFZA apparait ainsi comme une demi-fenêtre dans le flysch où l'on voit affleurer un substratum complexe et varié, constitué de terrains autochtones et d'autres allochtones allant du Trias jusqu'à la fin du Tertiaire.

L'étude stratigraphique et structurale des dunes et de leur substratum a montré l'existence de trois formations géologiques pouvant constituer des systèmes aquifères d'importance variable selon leur structure et leur lithologie.

Il s'agit des dunes et alluvions de plaine, des calcaires crétacés et éocènes, et enfin des grès numidiens. Les calcaires crétacés et éocènes présentent des étendues très limitées et des structures monoclinales souvent subverticales, ils constituent de ce fait des aquifères assez limitées.

Les grès numidiens occupant la structure synclinale de DJ. KREROUFA ne semblent pas renfermer des ressources importantes vu leurs alternances avec des couches argileuses.

Inversement les sables dunaires et les alluvions de plaine de l'Oued MELAH, occupant une superficie de 24 km² et couvrant les zones les plus basses, semblent constituer un aquifère intéressant.

On doit souligner enfin les résultats apportés par l'étude granulométrique des sables dunaires : celle-ci a permis de soulever le phénomène de bicéphalisme dans l'alimentation des dunes et qui trouve son explication dans le réseau hydrographique (Oued ZOUARAA), l'étude a également montré que les grains de sables sont en général fins à moyens (0,125 à 0,5 mm) et que la majorité présentent des diamètres de 0,25 à 0,3 mm.

2.2 Configuration et géométrie du réservoir dunaire

L'étude par prospection électrique dans les dunes de NEFZA, nous a permis de rendre compte des épaisseurs des dépôts dunaires, ce qui a permis d'illustrer la présence de cinq zones à forte épaisseur dunaire et correspondant à

des dépôts dunaires dans des dépressions fossiles (Fig.1).

Les sondages de reconnaissance réalisés à la lumière de cette étude ont permis de vérifier les hypothèses avancées quant à l'épaisseur de ces dépôts dunaires, ces derniers peuvent être soit exclusivement dunaires, soit formés d'une superposition de sables éoliens et de sables fluviaux (Fig.2).

Le substratum des sables dunaires et des alluvions des Oueds LAHMAR et MELAH est constitué généralement par les alternances argilo-gréseuses du Numidien, celui-ci reposant sur des marnes d'abord santionniennes à l'amont, puis paléocènes à l'aval, le substratum triasique recoupé à l'amont est sub-affleurant et présente un faciès dolomitique.

L'étude géophysique a également permis de tracer la ligne de partage des eaux souterraines et de montrer que le bassin dunaire Sud-Est est peu étendu (24 km²) et que l'écoulement vers les deux exutoires EL AHMAR et Titria s'explique par une remontée du substratum conducteur selon une ligne de crête orientée sensiblement Est-Ouest.

3. ESQUISSE CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE DE LA REGION DES DUNES DE OUCHTATA

3.1 Climat des dunes

L'étude climatique a permis l'évaluation d'une lame d'eau moyenne de 992 mm dans la région des dunes de OUCHTATA (Méthode de THYSEN) et dont 75 % se produit entre Septembre et Février.

Fig.1 : Carte des épaisseurs des dunes

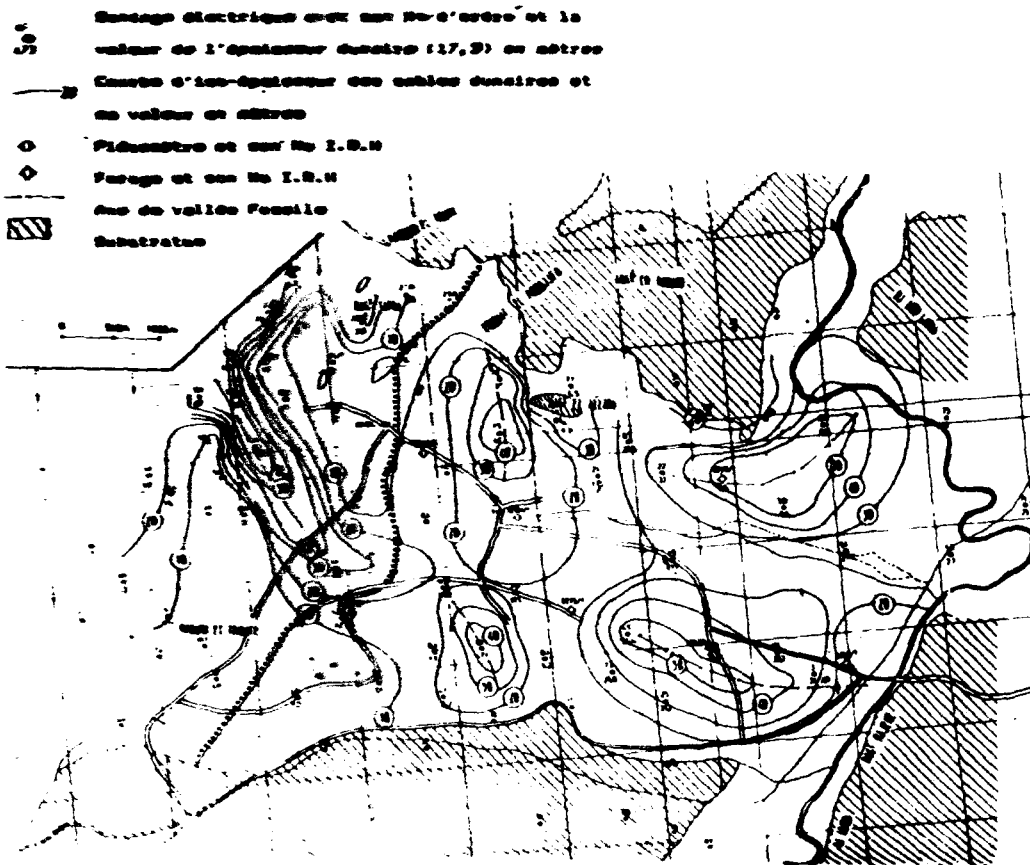
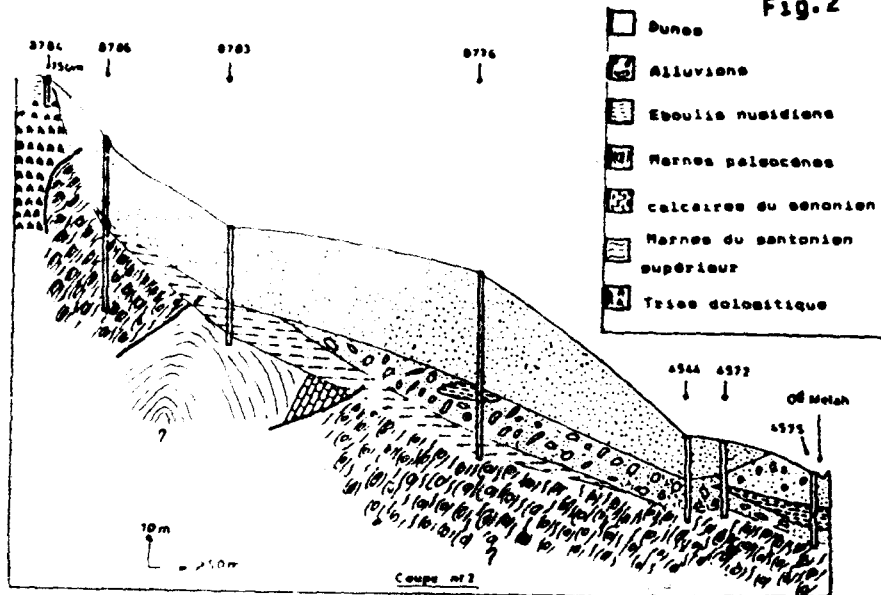


Fig.2



A l'échelle interannuelle on a noté l'existence de deux périodes pluviométriques, la première pluvieuse de 1952 à 1967, la seconde sèche et s'étendant sur les 17 dernières années (1967-1983). La moyenne pluviométrique calculée pour cette dernière période sèche est de 926 mm.

On doit enfin noter la contribution du bilan hydrologique de THORNTWHAITE dans l'évaluation de l'infiltration des eaux pluviales et son évolution en fonction du temps. Cette infiltration représente 49 % de la pluie brute, elle présente un maximum en Janvier-Février, et un minimum nul en Septembre et Octobre.

L'étude des débits d'étiage des principaux cours d'eau (LAHMAR, TITRIA et MELAH) et de leurs courbes de tarissement a permis de retenir trois points importants :

- Le premier concerne l'apport annuel moyen d'étiage des Oueds LAHMAR et TITRIA qui est évalué à 4,6 millions de m^3 /an pour la période 1983, 1984 et 1985. Cet apport est cependant plus important pour l'Oued LAHMAR (3,34 millions de m^3 /an) se traduisant par un faible coefficient de tarissement et un bassin versant plus étendu comme cela a été démontré par l'étude géophysique (9,3 km^2 pour le sous-bassin de l'Oued LAHMAR et 6,4 km^2 pour celui de l'Oued TITRIA).

- le deuxième point interesse le décalage entre les maximums de la pluie et ceux du débit des Oueds. Ce décalage varie de 1 à 3 mois indiquant la rapidité de réponse de la nappe. Le maximum de débit d'étiage est atteint en Janvier pour

l'Oued TITRIA et en Février pour l'Oued LAHMAR ce qui renforce les résultats obtenus sur l'infiltration des eaux pluviales par le bilan de THORNTWHAITE et selon lesquels l'infiltration serait maximale en Janvier-Février.

- Le dernier point concerne l'évaluation de la quantité d'eau emmagasinée dans la nappe à la fin de la période pluvieuse, à partir des courbes de tarissement. Cette méthode donne une capacité d'emmagasinement moyenne de 4,24 millions de m^3 /an pour les deux oueds. Les résultats obtenus pour les trois périodes de tarissement (1983, 1984 et 1985) varient énormément d'une année à l'autre parfois du simple au triple, sans qu'il y ait une relation avec la pluviométrie.

4. HYDROGEOLOGIE DES DUNES DE OUCHTATA

4.1 Inventaire des points d'eau

Le nombre total de puits de surface inventoriés dans la région des dunes s'élève à 91 dont 37 dans la nappe dunaire. Les 37 puits dunaires groupent 10 puits siphonnants situés dans la vallée de l'Oued LAHMAR, les autres sont concentrés près du village de OUCHTATA.

les sources dunaires inventoriées sont au nombre de 16 dont les plus importantes : AIN RAS EL OUED (64 l/s), AIN DAMOUS (12 l/s) AIN MOUTA (8 l/s) AIN DHEHEB (5 l/s) et AIN TITRIA (1 l/s).

les forages exploitables sont au nombre de trois (OUCHTATA 2, OUCHTATA 5 et OUCHTATA 8).

4.2 Piézométrie - Alimentation - Décharge de la nappe

La piézométrie a montré que l'écoulement général de la nappe s'effectue du Nord-Ouest vers le Sud-Est et qu'il se développe dans les vallées des Oueds LAHMAR et TITRIA pour se déverser dans l'Oued MELAH. Elle a également montré que l'alimentation de la nappe est essentiellement de type pluvial et que la décharge se fait non seulement par les puits siphonnants et de surface mais aussi par drainage au niveau des Oueds LAHMAR, TITRIA et MELAH (Fig.3)

La carte des profondeurs du plan d'eau a montré que la zone dunaire centrale présente les valeurs les plus fortes (20 à 30 m) et que l'évaporation se manifeste essentiellement le long des Oueds LAHMAR et TITRIA et dans la basse plaine de l'Oued MELAH (zones où la profondeur du plan d'eau est proche de la surface du sol).

4.3 Hydrochimie - Bactériologie

La salinité des eaux dunaires varie généralement de 0,2 à 0,4 g/l avec exceptionnellement des valeurs de 0,9 g/l. (Fig.4)

L'étude géochimique des éléments majeurs et en traces (Fer), a montré que les eaux dunaires sont de famille bicarbonaté calcique et que le passage dans la partie Sud-Ouest à des facies bicarbonaté - magnésiens ou sulfaté - calciques et magnésiens, est lié à une percolation des eaux dunaires sur un substratum flysch riche en oxydes de fer.

L'analyse bactériologique a montré que toutes les eaux analysées contiennent un bon nombre de coliformes (330 à 700 germes / litre) et par conséquent elles sont impropres à la consommation et doivent faire l'objet de traitement.

4.4 Détermination de la transmissivité de l'aquifère à partir des pompages d'essai

L'interprétation de 14 essais de pompage de type PORCHET sur puits de surface a montré que la transmissivité moyenne de l'aquifère est de 3×10^{-4} m²/s dans une gamme allant de 1 à 8×10^{-4} m²/s. Les valeurs de T calculées sur les forages piézomètres varient de $0,7 \times 10^{-4}$ à 1×10^{-3} m²/s.

Ces valeurs sont relativement faibles en comparaison avec celles des nappes alluviales.

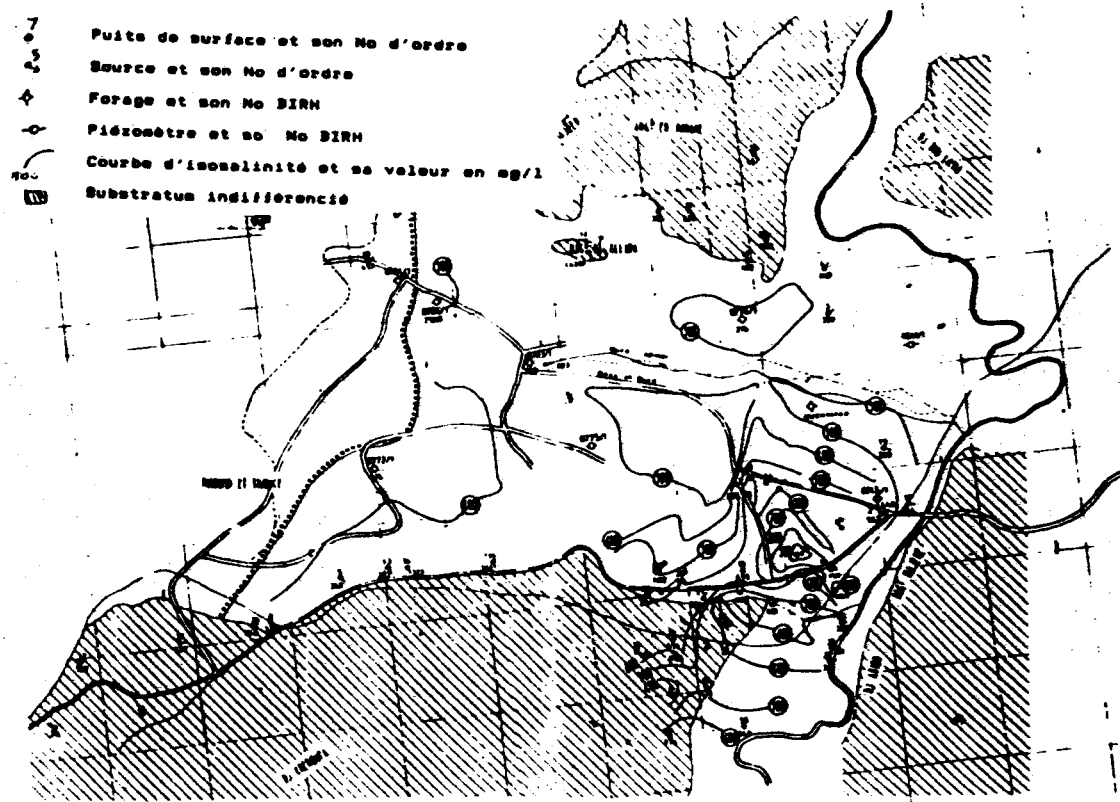
4.5 Fluctuations du niveau de la nappe

L'analyse des fluctuations du niveau de la nappe dunaire durant les années 1983 et 1984 a montré que les variations saisonnières vont de 0,4 m (à l'aval) à 2,5 m (à l'amont). Cette surveillance a également permis de souligner que la période des hautes eaux se place en Janvier-Février et que celles des basses eaux se situent en Septembre, ces observations concordent avec les données sur les débits des Oueds LAHMAR et TITRIA, et avec les résultats de l'infiltration calculée à partir du bilan de THORNTWHAITE.

Fig.3 : Carte piézométrique



Fig.4 : Carte d'isosalinité des eaux



Un autre résultat important tiré de cette surveillance intéresse le décalage pluie - piézométrie, ce décalage variant de 2 à 3 mois montre comme pour les débits d'oueds la rapidité de réponse de la nappe.

4.6 Etude des captages

Les essais de pompage effectués sur puits et forages, ont montré que nous avons affaire à des terrains très peu perméables et que la technique de captage utilisée (tube lanterné, crépine P.V.C) n'est pas adéquate. En effet, 60 % des rabattements observés sont liés au terrain aquifère (perméabilité de $1 \times 6 \times 10^{-8}$ m/s) et 40 % liés à l'équipement des forages (surface des vides des crépines faibles).

Pour l'atténuation des pertes de charge liées aux équipements des forages on recommande des crépines de type JOHNSON, mais pour diminuer celles dues au terrain aquifère nos propositions s'orientent vers des puits à drains rayonnants. Ces ouvrages horizontaux semblent cependant être très coûteux, c'est pourquoi nous recommandons des puits de gros diamètres avec forages filtrants dans les zones à faible profondeur de la nappe. Inversement dans les zones où la profondeur du plan d'eau est importante on conseille la multiplication du nombre de forages.

4.7 Application d'un modèle mathématique pour évaluation des ressources et choix des zones de captage

L'emploi d'un modèle de simulation numérique à la nappe des dunes de

OUCHTATA jugé par la bonne concordance entre l'état de la nappe observé et celui calculé, a permis de répondre à plusieurs objectifs dont l'évaluation de "la ressource en eau renouvelable" du système aquifère estimée à 360 l/s en année moyenne.

- L'exploitation actuelle de la nappe est de 30 l/s, il apparaît donc que la nappe est presque non exploitée.

- les réserves géologiques sont relativement faibles et sont estimées à 66 Mm³.

- Le coefficient d'infiltration des eaux pluviales, calculé par le modèle est de 45 %, le coefficient d'emmagasinement varie de 7 à 30 % (en général 15 %).

- Les zones de captage déterminées par le même modèle se répartissent en 6 branches de collecteurs devant assurer un pompage de 300 l/s pendant 20 ans. La modalité d'exploitation des 6 collecteurs groupera 3 collecteurs à exploiter par forages et 3 collecteurs à exploiter par puits filtrants. Le nombre de forages s'élèvera à 23 d'une profondeur ne dépassant pas 70 m, et celui des puits filtrants s'élèvera à 15 seulement.

Imprimerie DGRE - Déc-1988

DIRECTION GENERALE DES RESSOURCES EN EAU

MONTFLEURY - TUNIS (Tunisie)

La DIRECTION GENERALE DES RESSOURCES EN EAU a le plaisir de vous adresser cet envoi au titre d'échanges gratuits et vous prie de bien vouloir lui faire part de vos remarques et suggestions relatives à la présentation et au contenu de ce numéro 10 de notre revue " Ressources en Eau de Tunisie".

Elle vous serait reconnaissante ,en contre partie ,de l'inscrire dans le fichier de vos correspondants,et de bien vouloir lui adresser vos propres publications à titre d'échange à l'adresse suivante :

DIRECTION GENERALE DES RESSOURCES EN EAU

43,Rue de la MANOUBIA

1008 - MONTFLEURY - TUNIS - TUNISIE

IMP. BIRH