



08742

MICROFICHE N°

تیس سنیات تی تی مؤسسہ  
میں لنگھو، لنگھو

République Tunisienne

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

بیمہ ما انما  
بیمہ ما انما  
بیمہ ما انما

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

1

F

CND 9745

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION GENERALE  
DES RESSOURCES EN EAU

*DIRECTION  
DES EAUX DE SURFACE*

**EROSION ET TRANSPORT SOLIDE EN TUNISIE  
MESURE ET PREVISION DU TRANSPORT SOLIDE  
DANS LES BASSINS VERSANTS  
ET DE L'ENVALEMENT DANS LES RETENUES DE BARRAGES**

-oOo-

Janvier 1995

M.SAADAOUI: Ingénieur Général Hydrologue

## SOMMAIRE

-00-

### I. INTRODUCTION

### II. LES FACTEURS DE L'EROSION

1. Facteurs climatiques
2. Le sol
3. Le relief
4. Facteurs socio-économiques
5. Pratiques culturales inadéquates

### III. MESURE DE L'EROSION

#### 1. Estimation quantitative de l'érosion

##### 1.1 Mesures des débits solides des cours d'eau

- 1.1.1 Bassins versants de la Mejerda
- 1.1.2 Bassins versants des oueds Zéroud et Merguellil
- 1.1.3 Bassins versants de l'extrême Nord et du lac Ichkeul
- 1.1.4 Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide

##### 1.2 Mesure de l'envasement dans les retenues de barrages et estimation des transports solides

##### 1.3 Stations et bassins versants expérimentaux

- 1.3.1 Bassins versants expérimentaux
- 1.3.2 Stations expérimentales

#### 2. Estimation qualitative de l'érosion

### IV. PREVISION DU TRANSPORT SOLIDE ET DE L'ENVASEMENT

#### 1. Prévision du transport solide

- 1.1. Analyse des données
- 1.2. Prévision du transport solide
- 1.3. Application et discussion

#### 2. Prévision de l'envasement des retenues de barrages

- 2.1. Modèle de prévision
- 2.2. Résultats et discussion

## V. CONSÉQUENCES DE L'ÉROSION ET DU TRANSPORT SOLIDE

1. Impact de l'érosion sur les infrastructures

2. Impact des transports solides et de l'envasement sur la qualité d'eau des barrages (cas du Sidi Salem)

## VE. CONCLUSION

## VI. BIBLIOGRAPHIE

## I. INTRODUCTION

Soumise au climat méditerranéen, la Tunisie est caractérisée par des conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socio-économiques particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération de l'érosion hydrique qui menace gravement les potentialités en eau et en sol du pays. Les conséquences de ce phénomène sont multiples:

- appauvrissement des terres agricoles
- envasement des retenues de barrages et des infrastructures hydrauliques qui est la conséquence la plus grave dans les régions semi-arides où l'eau constitue le facteur limitant du développement économique.
- réhaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation des zones environnantes et une menace pour les voies de communication.

Dans cette étude on se propose de mettre en relief la gravité du phénomène de l'érosion à travers l'analyse des facteurs responsables de cette érosion. Au niveau des grands bassins, les mesures de concentrations des matières en suspension effectuées ont permis d'évaluer le transport en suspension des différents cours d'eau contrôlés par des stations hydrométriques. Au niveau des barrages, la mesure de l'envasement a abouti à une estimation globale du transport solide et l'érosion spécifique du bassin versant contrôlé; ce qui a permis l'évaluation du transport de fond pour les bassins où l'on dispose que de stations hydrométriques. Dans les bassins où l'on dispose d'une station hydrométrique en amont d'une retenue, le transport de fond est estimé correctement ( cas du Mellègue ).

L'évaluation quantitative de l'érosion dans les différents bassins hydrologiques du pays a permis de faire une analyse entre le transport solide moyen annuel et les facteurs conditionnels tels que les superficies des bassins et les lames écoulées . Cette recherche a abouti à l'établissement de modèles empiriques de prévision du transport solide et de l'envasement des retenues de barrages.

## II. LES FACTEURS DE L'EROSION

L'érosion en Tunisie est due à différents facteurs :

### 1) Facteurs climatiques: agressivité et irrégularités des pluies

La Tunisie fait partie de la zone méditerranéenne subtropicale, caractérisée par l'agressivité des pluies et des crues. La moyenne annuelle de pluie varie du Nord au Sud entre 1500 et 30 mm et elle est caractérisée par une irrégularité inter-annuelle et inter-saisonnière importante : les crues sont violentes, brutales et épisodiques ; les pluies d'automne sont les plus intenses et les plus dangereuses pour les sols, elles surviennent à une période où la couverture végétale est faible ou inexistante et les sols sont ameublés par les labours et après la saison sèche de l'été. Ce sont les crues d'automne qui causent le plus d'érosion. (cas de la crue d'automne de septembre de 1969). Cette action érosive de la pluie est liée à son intensité et à sa répartition. L'érosion hydrique par son ampleur et son

agressivité, constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales dans le pays. Depuis les années soixante, plusieurs programmes de conservations des eaux et des sols et de restauration des terres furent exécutés. Dans le cadre de ces programmes de lutte contre l'érosion, des évaluations de l'ampleur du phénomène et d'estimation de l'agressivité de l'érosion ont porté sur l'analyse qualitative du phénomène et l'estimation quantitative de la perte en terre.

## 2. Le sol

Les caractéristiques de classification pédologique d'un sol permettent de déterminer, après corrélation avec des données quantitatives, un coefficient de sensibilité de l'érodabilité". Ces éléments de classification comprenant, la structure, la texture, la teneur en matière organique, la capacité de rétention de l'eau et perméabilité, ne peuvent être connus que par un inventaire pédologique. En Tunisie, l'action érosive crée continuellement des sols jeunes alluviaux ou colluviaux à prédominance marneuse ou argileuse, pauvres en matière organique à la suite de la disparition de la couverture végétale.

## 3. Le relief

La Tunisie est caractérisée par un relief peu élevé mais il présente en général des terrains à pente raide favorisant l'accélération du phénomène de l'érosion.

## 4. Facteurs socio-économiques

L'érosion n'est pas un phénomène nouveau en Tunisie. La lutte contre l'érosion remonte avant même l'occupation romaine. En soixante dix ans, l'espace rural tunisien a subi des bouleversements considérables : le tableau n° 1 présente l'accroissement démographique et la mise en culture des terres par le défrichement des terres de parcours.

Tableau 1 : Evolution démographique et mise en culture des terres de parcours

| Année | terreins de cultures (10 <sup>6</sup> ha) | Population (10 <sup>6</sup> d'individus) |
|-------|---|--|
| 1920  | 1,2                                       | 2  |
| 1990  | > 5                                       | 8  |

Cet accroissement démographique est à l'origine d'un important défrichement des terres de parcours ; ce qui s'est traduit par une surexploitation des surfaces pâturées, accélérant ainsi leur dégradation et par conséquent favorisant les phénomènes d'érosion et des transports solides à l'aval.

## 5. Pratiques culturales inadéquates

Le labour par des engins inadaptés dans le sens de la pente et l'absence d'assolement...etc favorisent l'érosion des terres.

### III. MESURE DE L'EROSION

#### 1. Estimation quantitative de l'érosion

##### 1.1. Les mesures des débits solides des cours d'eau

Le réseau hydrométrique qu'on dispose est relativement bien réparti contrôlant l'ensemble des grandes unités hydrologiques du pays. Ce réseau bien équipé a permis de fournir l'évaluation de l'érosion dans les différents bassins contrôlés par des stations hydrométriques.

Les concentrations de sédiments dans les cours d'eau sont très élevées partout sauf dans les zones traitées. Suivant les cours d'eau et l'importance des crues, elles varient énormément et peuvent atteindre ou même dépasser les 200 g/l. Des concentrations supérieures à 100 g/l sont fréquentes à la Mejerda, au Zéïoud et au Merguellil. Presque la totalité des prélèvements qu'on dispose sont des prélèvements surfaciques.

##### 1.1.1 Bassin versant de la Mejerda

Il est à considérer que les transports solides se font essentiellement au cours des crues et que les crues elles mêmes représentent en moyenne au moins 80 % de l'écoulement annuel. D'après les mesures existantes (monographie de la Mejerda), l'estimation des transports en suspension est obtenue en partant des débits moyens liquides et des concentrations moyennes en suspension.

Tableau 2: Transport solide dans le B.V de Mejerda

| Station                               | Apport liquide moyen annuel ( $10^6 \text{ m}^3$ ) | concentration (g/l) | Sédiments en suspension transportés annuellement en moyenne (valeur minimale) |                                  | Transport solide total moyen annuel |                                  |
|---------------------------------------|--|---------------------|---|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
|                                       |  |                     | $10^6 \text{ T/an}$   | $\text{T}/\text{km}^2/\text{an}$ | $10^6 \text{ T/an}$                 | $\text{T}/\text{Km}^2/\text{an}$ |
| Mejerda à Ghardimou (1946 - 1969)     | 151  | 20                  | 3   | 2000                             | 3.69                                | 2636                             |
| Mejerda à Jendouba (1899 - 1969)      | 173  | 20                  | 3.5   | 1450                             | 4.30                                | 1786                             |
| Mejerda à Bou Salem (1953 - 1969)     | 487  | 25                  | 12.2  | 737                              | 15                                  | 9246                             |
| Mejerda à Redjez El Bou (1953 - 1969) | 716  | 25                  | 17.9  | 850                              | 22                                  | 1050                             |
| Rhezala à Fernane (1948 - 1969)       | 34.6   | 10                  | 0.35  | 2536                             | 0.43                                | 3120                             |
| Sou Hourtsa à Kef Rira (1962 - 1969)  | 63.8   | 10                  | 0.64  | 1640                             | 0.787                               | 2020                             |
| Hellague K13 (1954-1973)              | 164  | 31                  | 5.08  | 562                              | 6.26                                | 695                              |

Ces résultats concernant une année moyenne, traduisent une intense érosion spécifique. Le transport solide total est obtenu en ajoutant à ces valeurs le charriage de fond qui est estimé à 23 % des transports en suspension.

### 1.1.2. Bassins versants des oueds Zéroud et Merguellil

Situés dans la zone aride, les bassins des Oueds Zéroud et Merguellil sont caractérisés par des régimes pluviométriques et hydrologiques très irréguliers. La soudaineté et la violence des crues rendent difficile les mesures des débits liquides et solides. Nous présentons dans les tableaux 3 et 4 les résultats obtenus sur les différentes stations d'observations.

Tableau 3 : Transports solides dans le B.V du Zéroud

| Station<br>Paramètre   | Hathob à<br>Ain Saboun    | Hathob à<br>Kaar Keblit   | Hatab à<br>Khanguet Zizia | Megada à<br>bled Lassoud | Zéroud à<br>Sidi Saad |
|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Superficie (km <sup>2</sup> )                                | 813                       | 2945                      | 2200                      | 5290                     | 8650                  |
| Volume annuel des crues<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 18,2<br>(étendu à 54 ans) | 24,6<br>(étendu à 47 ans) | 31,2<br>(23 ans)          |                          | 80,2<br>(26 ans)      |
| Taux moyen de N.S (g/l)                                      | 35                        | 38                        | 52                        | 50                       | 60                    |
| Apport moyen de N.S<br>(10 <sup>6</sup> T/an)                | 0,637                     | 2,4                       | 1,62                      | 1,250                    | 4,8                   |
| Apport solide moyen<br>annuel (10 <sup>6</sup> T/an)         | 0,790                     | 3                         | 2                         | 1,56                     | 6                     |
| Erosion spécifique<br>(T/km <sup>2</sup> /an)                | 980                       | 1016                      | 909                       | (284)                    | 694                   |

Tableau 4: Transports solides dans le B.V de Merguellil

| Paramètre  | Behloul à<br>Skhira-Kef Labiodh | Merguellil<br>à Haffouz   | Merguellil à<br>Sidi Boujdaria |
|--|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Superficie (km <sup>2</sup> )                            | 188                             | 675                       | 893                            |
| Volume annuel des crues                                  | 5,28<br>(étendu à 55 ans)       | 16,9<br>(étendu à 85 ans) | 29,3                           |
| Taux moyen de N.S (g/l)                                  | 43                              | 39                        | 39                             |
| Apport moyen de N.S<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 0,227                           | 0,660                     | 1,170                          |
| Transport solide moyen<br>annuel (10 <sup>6</sup> T/an)  | 0,281                           | 0,820                     | 1,460                          |
| Erosion spécifique<br>(T/km <sup>2</sup> /an)            | 1207                            | 1215                      | 1640                           |

### 1.1.3 Bassins versants de l'extrême Nord et du lac Ichkeul

La mesure du transport solide aux stations hydrométriques de l'extrême Nord et du bassin du lac Ichkeul a commencé à partir de l'année 1979. Les caractéristiques du transport solide ont été déterminées à partir des résultats d'une large campagne de mesure de 2 ans de la turbidité de l'eau des principaux oueds de la région ainsi que sur les données concernant l'envasement des retenues situées dans des conditions naturelles analogues. Les résultats de cette campagne montrent que la turbidité moyenne annuelle des oueds de la région varie entre 3 et 7 g/l ; ceci s'explique par la différence de tailles des bassins versants ainsi que par l'influence des facteurs tels que la lithologie, la morphométrie des bassins versants, la couverture végétale, la surface labourée... etc.

Tableau 5 : Apport en suspension aux sites des stations hydrométriques (campagne intensive de 2 ans)

| Paramètre<br>Bassin | Superficie<br>(km <sup>2</sup> ) | Volume<br>annuel<br>de crue<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Taux<br>moyen<br>de R.S<br>(g/l) | Apport<br>moyen<br>de R.T<br>(10 <sup>6</sup> T) | Apport<br>solide<br>moyen<br>annuel<br>(10 <sup>6</sup> T) | Erosion<br>spécifique<br>T/km <sup>2</sup> /an |
|---------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|--|--|
| Kébir - Tabarka     | 164                              | 64,6   | 4,07                             | 0,263  | 0,368  | 2244   |
| Bou Terfess - P.R.  | 68,3                             | 26,8   | 5,60                             | 0,150  | 0,210  | 3075   |
| Melah - Ouchtata    | 317                              | 101  | 3,41                             | 0,344  | 0,482  | 1519   |
| Madéne - Hefza      | 194                              | 60   | 3,82                             | 0,229  | 0,321  | 1553   |
| Bou Zenna - P.R.    | 133                              | 42,6   | 6                                | 0,256  | 0,358  | 2695   |
| M'lif - P.V.F.      | 80                               | 22,7   | 5,6                              | 0,127  | 0,178  | 2222   |
| Zouara-S.El Berrak  | 865                              | 251  | 3,53                             | 0,886  | 1,24   | 1434   |
| Sejnane - IS 5      | 377                              | 103  | 3,03                             | 0,312  | 0,437  | 1158   |
| Ghezala - P.R.      | 52                               | 10,7   | 6,56                             | 0,070  | 0,098  | 1885   |
| Tine - IS 20        | 418                              | 24,3   | 5                                | 0,122  | 0,171  | 408,6  |

Pour le calcul du transport charrié des oueds de la région, on ne dispose d'aucune mesure. Les résultats des bilans de transport solide dans les retenues de barrages ont permis de calculer le transport charrié qui est pris égal à 40 % du transport en suspension. Ceci a été confirmé par les résultats des analyses de laboratoire des échantillons d'eau ainsi que de sédiments de fond prélevés dans les oueds Zouara, Sejnane, Bou Zenne et le lac Ichkeul après les grandes crues de janvier 1981. Ces résultats ont montré que 60 à 80 % du transport charrié de ces oueds sont représentés par des particules dont le diamètre est supérieur à 0,25 mm.

### 1.1.4 Phénomènes exceptionnels d'érosion et de transport solide

Les régions arides et semi-arides caractérisées par leur très grande irrégularité climatique, ont connu des événements d'érosion et de transports solides exceptionnels à la

suite d'averses très importantes et rares. Les exemples donnés portent sur la crue de la Mejerda en mars 1973 et au Sud près de Gabès, sur le bassin de l'Oued Zita et à l'automne de 1969 sur l'Oued Zéroud à Sidi Saâd.

Tableau 6 : Événements exceptionnels de transports solides dans les B.V Mejerda, Sidi Saâd et Zita

| Bassin               | Mejerda   | Zéroud à Sidi Saâd   | Zita près de Gabès   |
|----------------------|---|--|--|
| Superficie $km^2$    | 23500 à la mer  | 8950   | 3,2  |
| Pluviométrie         | Total de Mars atteint 3 à 8 fois la normale épisode 3 à 4 jours : 100 à 300 mm  | du 30/8/1969 fin Oct P. moyenne = 478 mm   | Pluie interannuelle = 170 mm Décembre 1973 : Averse de 300 mm sur 17 heures Papy du B.V = 284 mm   |
| Écoulement           | crue rare de 5 jours : récurrence 50 à 150 ans suivant les stations volume écoulé de période de retour de 100 à 200 ans                     | Écoulement total $2636 \cdot 10^9 m^3$ dont 10% solide soit $2,4 \cdot 10^9 m^3$ liquide et $240 \cdot 10^9 m^3$ solide - pointe crue $17000 m^3/s$ soit $cs = 1,9 m^3/s/km^2$ | crue Q max = $40 m^3/s/km^2$ coeff. de ruissellement 30 % pour toute la crue   |
| Vitesse du courant   |   | V courant = 10 m/s   | vitesse du courant plus de 7 m/s.  |
| Inondation           | catastrophique $45,2 \cdot 10^9 m^3$ de dépôt soit $75 \cdot 10^9 t$ $473 km^2$ inondés   | catastrophique 40 à 50 cm d'accumulation, 1 à 1,20 m par endroits  |  |
| Erosion et Transport | $1000 m^3/ha$<br>$17000 t/ha$<br>soit 10 cm sur $473 km^2$<br>concentration moy 108 g/l<br>maximum: 150-200 g/l<br>$4250 t/km^2$ en 6 jours | $40.000 t/km^2$<br>en 2 mo/s<br>soit 26,8 mm<br>Transport de fond : 40 à 50 % du total   | Transport H.S : 47g/l avec max : 87 g/l<br>transport total 34.300 t soit 108 t/ha soit 7 mm d'érosion transport de fond 20 à 50 % du total |

Ces trois exemples illustrent le caractère dévastateur des événements exceptionnels de l'érosion en zones arides et semi arides. L'érosion observée à la suite de crues exceptionnelles comme celle de l'automne 1969 au Centre et au Sud du pays et celle de mars 1973 sur le Mejerda, devait être répartie sur plusieurs années, car une grande part du transport provient de la reprise dans le lit des alluvions déposées par des crues localisées, beaucoup moins puissantes et incapables d'évacuer les sédiments descendus des versants et des affluents.

### 1.2 Mesure de l'envasement dans les retenues de barrages et estimation du transport solide

Le contrôle de l'envasement des retenues de barrages est un moyen efficace pour obtenir des valeurs globales sur l'importance du transport des matériaux par les oueds barrés intégrant l'ensemble des processus érosion - transport solide, y compris le charriage de fond. En effet, le barrage constitue une fosse à sédiment de grande taille à l'échelle du bassin versant contrôlé.

Des campagnes de mesure ont été entreprises en utilisant un écho-sondeur à ultra sons permettant un relevé en continu des fonds de retenues. Le cubage des sédiments déposés conduit à l'estimation du transport solide retenu derrière les digues et de l'érosion spécifique des bassins versants contrôlés.

La première campagne systématique de mesure a été entreprise en 1975 et 1976 et a intéressé six barrages. La lecture du tableau 7 fait ressortir les faits suivants :

- \* pour l'ensemble des barrages, les transports solides ont atteint des valeurs très élevées supérieures aux estimations faites aux niveaux des sites avant la construction des barrages (Tixeront, 1960);

- \* les charges moyennes des eaux entrant dans les barrages depuis leur création sont très élevées par rapport aux concentrations de matières en suspension mesurées dans les prélèvements d'eau faits dans les stations hydrométriques. Les prélèvements faits sur le bord de l'eau représentent mal le transport solide dans la section de prélèvement et sous-estiment énormément les concentrations de matières en suspension(M.S.).

- \* le charriage a été estimé dans le cas du barrage Mellègue où l'on dispose d'une station de contrôle à l'amont et où les matières en suspension représentent  $112 \cdot 10^6$  tonnes sur les  $152 \cdot 10^6$  tonnes entrées dans la retenue tout en tenant compte des bassins intermédiaires. Dans ce cas, le charriage représente 23 % du total.

- \* lors des épisodes pluvieux exceptionnels qu'a connu la Tunisie (octobre 1969, mars 1973, décembre 1973), les apports liquides et solides dus à ces épisodes sont énormes et qu'ils contribuent à augmenter fortement les valeurs moyennes calculées sur la période de fonctionnement depuis la mise en eau jusqu'à la date de mesure de l'envasement.

Les campagnes de mesure récentes ont intéressé quelques retenues de barrages. Pour les lacs où nous disposons des résultats de dépouillement de mesure, nous présentons dans le tableau N°8 les caractéristiques du transport solide. L'examen de ce tableau permet de faire les commentaires suivants :

- \* pour le Masri qui a fait l'objet de mesure en 1975 et en 1991 (c'est à dire 16 ans plus tard) les résultats obtenus lors des 2 campagnes sont incomparables : 13 contre 85 g/l comme charge moyenne des apports liquides. A priori, la valeur de 13 est plus réaliste que 85 car elle est obtenue pour une période de fonctionnement plus représentative du régime normal de l'oued. Ce sont les événements exceptionnels survenus durant cette première période, qui ont contribué à augmenter fortement cette valeur à 85 g/l. Mais l'analyse graphique de toutes les données recueillies sur le réseau d'observation éprouve le contraire : la valeur 85 g/l est à retenir et non la valeur 13.

- \* pour le Sidi Salem, nous avons considéré que la partie du bassin active au moment des crues: c'est à dire le bassin de la retenue sans les barrages de Mellègue, de Kasseb et de Bou Heurtma, qui constituent de grands pièges à sédiments. Nous pouvons considérer que Sidi Salem est en équilibre sédimentologique avec les barrages amont, en d'autres termes, les apports en transports solides pendant les lâchers et les dévasements de ces barrages sont en équilibres avec ceux effectués au niveau de Sidi Salem.

- \* pour le barrage de Bir Mcherga, c'est la retenue du barrage de l'oued Kébir qui a joué son rôle de piège à sédiments. Le tonnage enregistré à l'aval au niveau de Bir Mcherga est médiocre par rapport aux caractéristiques du régime normal de ce cours d'eau.

Et cette vieille infrastructure hydraulique mise en eau en 1931 a joué et jouera encore son rôle dans la protection de l'aval contre les crues et l'envasement, ce qui permettra d'allonger la durée de vie du barrage Bir Mcherga.

\* pour le barrage Ghézala Ichkeul, il n'y a pas eu aucun évènement crue-transport solide notable depuis sa mise en eau en 1985, c'est pourquoi la valeur du transport mesuré au niveau de sa retenue est très faible, ce qui est expliqué encore une fois par la faiblesse des apports liquides enregistrés au niveau de ce barrage.

\* pour le barrage Bou Heurtma, où l'amont de son bassin est contrôlé par le barrage de Ben Méfir, et où le taux de couverture végétale est élevé, le transport solide évalué au niveau de sa retenue est sous estimé.

\* pour le barrage Kasseb, le taux de couverture végétale de son bassin est aussi important et par conséquent, le phénomène d'érosion n'est pas intense et son apport solide est très modeste.

\* pour les barrages où l'on dispose plus d'une campagne de mesure d'envasement, nous remarquons d'après les résultats obtenus, que durant les premières années d'exploitation, le processus d'envasement est plus intense, ensuite, on observe une atténuation qui peut durer plusieurs années. Cette constatation a été faite pour beaucoup de barrages dans le monde pour ne pas citer que les barrages de l'Algérie.

Tableau 7 : Mesure de l'envasement dans les retenues de barrages  
Campagne de mesure de 1975

| Barrage   | Mellègue          | Mebiana        | Bazirk            | Chibe      | Masri               | Lakhaes          |
|---|-------------------|----------------|-------------------|------------|---------------------|------------------|
| Surface du B.V (ha <sup>2</sup> )   | 10300             | 855            | 73-84             | 64         | 40                  | 131              |
| Volume total de la retenue (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )              | 268               | 86,4           | 6,46              | 7,86       | 6,82                | 8,07             |
| Date de mise en service<br>Période de fonctionnement : jusqu'en Août 1975 | Avril 54<br>21,33 | Avril 65<br>10 | Déc.1960<br>14,75 | 1963<br>12 | Février 1968<br>7,5 | Avril 56<br>9,33 |
| Volume de sédiment déposé (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )               | 47,6              | 12,9           | 1,68              | 2,65       | 1,32                | 2,01             |
| Taux d'envasement (‰)   | 17,8              | 14,9           | 26,0              | 33,7       | 19,3                | 25,1             |
| Rythme annuel de de comblement (‰)  | 0,83              | 1,5            | 1,76              | 2,81       | 2,58                | 2,69             |
| Apports liquides totaux (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )                 | 4100              | 414,4          | 63,65             | 44,65      | 21,47               | 65,99            |
| Apports moyens annuels (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )                  | 128               | 41,4           | 4,32              | 3,72       | 2,86                | 4,15             |
| Apports solides totaux (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )                  | 126,7             | 16,4           | 2,42              | 2,70       | 1,52                | 2,92             |
| Apports solides moyens annuels (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )          | 5,94              | 1,64           | 0,164             | 0,255      | 0,202               | 0,313            |
| Tonnage moyen annuel (10 <sup>6</sup> T)                                  | 7,13              | 1,97           | 0,197             | 0,270      | 0,242               | 0,375            |
| Erosion spécifique (T/ha <sup>2</sup> /an)                                | 695               | 2300           | 2430              | 4220       | 6050                | 2865             |
| Charge moyenne des apports liquides (g/l) ou (kg/m <sup>3</sup> )         | 38                | 47,5           | 45,6              | 72,5       | 85                  | 53               |



Tableau 8 : Campagnes recentes de mesure de l'envasement de retenues de barrages

| Barrage  | Sidi Salem   | Maari                               | Lakhsess                          | Zéroud S. Saïd                    | Bir R'Chergo                      |
|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Surface du B.V. (km <sup>2</sup> )                               | 7479<br>sans B.V. Kasseb,<br>Bou Heurtma et<br>Mellôge | 40                                  | 131                               | 8650                              | 1398                              |
| Volume total de la retenue (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )     | 555  | 6,82                                | 8                                 | 131                               | 53                                |
| Date de mise en service  | Décembre 1981  | Février 68                          | Avril 66                          | 1982                              | 1971                              |
| Date de la campagne de mesure                                    | Mars 1991  | 20/5/1991                           | Avril 1991                        | Avril 1988                        | Avril 1987                        |
| Volume de sédiment déposé (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )      | 52   | 0,837                               | 0,926                             | 6,979                             | 6,200                             |
| Taux d'envasement (‰)  | 9,27   | 12,3                                | 11,58                             | 5,33                              | 11,7                              |
| Rythme annuel de de comblement (‰)                               | 1,01   | 0,535                               | 0,463                             | 0,888                             | 0,731                             |
| Apport liquide moyen annuel (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )    | 511<br>(81/82 - Mars 91)<br>(9,25 ans)                 | 2,74<br>(69/70 - 90/91)<br>(25 ans) | 5,18<br>(66/67-90/91)<br>(26 ans) | 28,84<br>(82/83-87/88)<br>(6 ans) | 31,6<br>(71/72-85/87)<br>(16 ans) |
| Apports solides moyens annuels (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 5,62   | 0,0365                              | 0,0370                            | 1,163                             | 0,3877                            |
| Tonnage moyen annuel (10 <sup>6</sup> T)                         | 6,745  | 0,0438<br>(1. faible)               | 0,0444                            | 1,396                             | 0,465                             |
| Erosion spécifique (T/ha <sup>2</sup> /an)                       | 902  | 1094                                | 139                               | 160                               | 333                               |
| Charge moyenne des apports liquides (g/l)                        | 13,2   | 13,3                                | 7,2                               | 48,5                              | 15                                |

## Suite du tableau 8

| Barrage  | Siliana                              | Béziak                              | Ghezala Ichkeul          | Bou Heurtma         |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Superficie du B.V. (Km <sup>2</sup> )                            | 1040                                 | 73                                  | 48                       | 380                 |
| Volume total de la retenue (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )     | 70                                   | 6.82                                | 11.7                     | 117.5               |
| Date de mise en service  | Decembre 1987                        | Decembre 1960                       | Janvier 1985             | 1976                |
| Date de la campagne de mesure                                    | Mai 1994 (6.5 ans après mise en eau) | * 1977 (17 ans)<br>* Juin1993(32.5) | Mai 1993 (8.4 ans après) | Mars 1993 ( 17 ans) |
| Volume de sédiment déposé (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )      | 4.08                                 | * 0.460<br>* 0.550                  | 0.192491                 | 2                   |
| Taux d'envasement (‰)  | 5.8                                  | * 6.92 * 8.3                        | 1.65                     | 1.7                 |
| Rythme annuel de de comblement (‰)                               | 0.9                                  | * 0.41<br>* 0.26                    | 0.2                      | 0.1                 |
| Apport liquide moyen annuel (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )    | 23.16                                | * 3.154<br>* 3.883                  | 7.50                     | 79.6                |
| Apports solides moyens annuels (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | 0.6277                               | * 0.027<br>* 0.0169                 | 0.0229                   | 0.1176              |
| Tonnage moyen annuel (10 <sup>6</sup> T)                         | 0.753                                | * 0.0324<br>* 0.02028               | 0.0229                   | 0.1176              |
| Erosion spécifique (T/ha <sup>2</sup> /an)                       | 724                                  | * 444<br>* 278                      | 477                      | 310                 |
| Charge moyenne des apports liquides (g/l)                        | 32.5                                 | * 10.3<br>* 5.2                     | 3                        | 1.5                 |

### 1.3 Stations et bassins versants expérimentaux

#### 1.3.1 Bassins versants expérimentaux

L'étude des bassins représentatifs et/ou expérimentaux a démarré en Tunisie depuis les années soixante dans le but de déterminer les ruissellements et les quantités de terre perdues par les champs dans différentes utilisations du sol.

##### • Les bassins de Jougar

Ce sont trois bassins au sol assez homogène, destinés à différentes utilisations :

B.V.I : (S = 60 ha) : Forêt de pins *alepensis* et garrigue et de végétation spontanée.

B.V.II (S = 100 ha) : céréaliculture mécanisée sans précaution anti-érosive.

B.V.III (S = 85 ha) : arboriculture mécanisée en courbe de niveau dans un réseau de banquettes en majorité horizontales mais à extrémités déversantes.

Les résultats obtenus sur ces trois bassins versants après 11 ans d'expérimentation, ont permis de conclure ce qui suit :

Pour une pluviométrie assez uniforme, le B.V.I couvert par la forêt et le B.V.III avec l'arboriculture et des travaux C.E.S, ont des comportements hydrologiques assez semblables, mais très différents de celui du B.V.II cultivé en céréales. Le débit du B.V.II est beaucoup plus irrégulier, les pointes de crues pour une période de retour de 2 ans sont environ 20 fois plus élevées et le ruissellement total est 10 fois plus important que les 2 autres bassins (3500 l/s/km<sup>2</sup> pour le bassin B.V.II et 200 l/s/km<sup>2</sup> pour les B.V.I et B.V.III).

De même on a enregistré 40 %, 70 % et 80 % du ruissellement total de la période d'observation qui s'est écoulé pendant les 5 crues les plus grandes enregistrées respectivement sur les B.V.II, B.V.I et B.V.III.

##### • Bassin Chott Mariem au Sahel

Pour le système hydrologique "Meskat" aménagé dans le but d'aboutir à une meilleure utilisation des eaux de ruissellement; les résultats de 3 années de mesure (1975-1978) montrent que les transports solides moyens variaient suivant les impluviums entre 7 et 45 T/km<sup>2</sup>/an.

Tableau 9 : Caractéristiques des impluviums de Chott Mariem

| Impluvium                    | 1    | 2    | 3    | 4    |
|------------------------------|------|------|------|------|
| Superficie (m <sup>2</sup> ) | 2035 | 1932 | 1205 | 1550 |
| Fente (%)                    | 3,4  | 4,7  | 6    | 3,7  |

Le transport annuel moyen déterminé sur l'ensemble des 4 Impluviums et pour la période de 3 ans est de 23,7 T/km<sup>2</sup>/an. Cette valeur est très faible si l'on compare aux chiffres obtenus sur les bassins non traités sous climat semi-aride.

**Conclusion :** Le système d'aménagement "Meskat", en plus de son rôle d'augmenter la quantité d'eau reçue par les plantes, est un excellent moyen de lutte contre l'érosion.

\* Bassin du Zita (près de Gabès) de superficie 3,2 km<sup>2</sup> a donné 1,2 tonne/ha pour des pluies de 13 mm/h.

\* Citerne 1 Piste trapsa dans le Sud : S = 2,38 ha, transport solide : 6,3 m<sup>3</sup>/ha/an.

### 1.3.2 Stations expérimentales

La Tunisie dispose actuellement de 2 stations expérimentales pour la mesure et la quantification de la perte en terre.

- Station du piedmont de Semmama dans la région de Kasserine (Tunisie Centrale).

Climat : semi-aride inférieur, pluviométrie 300 à 400 mm/an. Cette station comprend :

\* des parcelles d'érosion de différentes tailles et de positions différentes sur le versant, pour l'étude de l'influence de quelques facteurs de l'érosion (pente, couvert végétal... etc).

\* des micro-bassins pour l'étude des facteurs qui conditionnent les mécanismes de ruissellement, de l'érosion et du transport solide.

Les résultats obtenus ne sont pas encore publiés.

- Station de Béja au Nord

Climat : Sub-humide, pluviométrie de l'ordre de 620 mm/an.

Elle se compose :

\* 1 parcelle de 1 m<sup>2</sup> utilisée pour le simulateur de pluie.

\* 2 parcelles d'érosion de 256 et 560 m<sup>2</sup>

\* 1 micro-bassin de 7 ha pour l'étude de l'hydrodynamique (érosion en ravine et sapement des berges et l'efficacité des traitements anti-érosifs).

## 2. Estimation qualitative de l'érosion

La première évaluation qualitative de l'érosion hydrique en Tunisie a été effectuée vers la fin des années soixantes par l'élaboration de la carte de l'érosion au 1/50.000 du Nord et du Centre du pays. L'approche cartographique utilisée a pris le facteur "lithologie" comme paramètre de base pour la définition d'unités territoriales homogènes.

Les principales zones d'érosion hydrique inventoriées à partir de la carte au 1/200.000 se répartissent comme suit (tableau 10) :

**Tableau 10 : Zones d'érosion hydrique de la Tunisie du Nord et du Centre**

| Zones d'érosion<br>Régions                                 | Zones de<br>collecte<br>(%) | Zones<br>d'épandage<br>(%) | Zones de départ et d'ablation<br>selon la gravité du phénomène |                      |                    |       | Érosion<br>globale<br>(%) |
|--|-----------------------------|----------------------------|--|----------------------|--------------------|-------|---------------------------|
|  |                             |                            | 1<br>très<br>affec.  | 2<br>Moyen<br>affec. | 3<br>Peu<br>affec. | 1+2+3 |                           |
| Nord-Est (17 %)  | 8,5                         | 6,5                        | 6  | 3                    | 20                 | 29    | 44                        |
| Nord-Ouest (21 %)  | 17,5                        | 0,5                        | 13   | 21                   | 26                 | 60    | 78                        |
| Centre-Est (30 %)  | 2                           | 13                         | 1  | 7                    | 30                 | 38    | 52                        |
| Centre-Ouest (33 %)  | 12                          | 2                          | 4,5  | 19,5                 | 30                 | 54    | 68                        |
| Total du Nord<br>& Centre<br>56000 km <sup>2</sup> (100 %) | 9,5                         | 5,5                        | 5,5  | 13,5                 | 28                 | 47    | 62                        |

Il ressort de ce tableau les remarques suivantes :

- les phénomènes d'érosion hydrique affectent 62 % des terres plus ou moins fertiles (Nord-Centre).
- le Nord-Ouest est la région la plus soumise à l'érosion (78 %), tandis que le Nord Est (44 %) est la région la moins affectée.
- les zones d'épandage prennent de l'importance à l'Est (6,5 à 13 %), ceci s'explique par le sens d'écoulement des principaux oueds vers la côte orientale du pays.
- les zones très affectées par l'érosion hydrique sont plus importantes au Nord (Ouest 13 % , Est 6 %) qu'au Centre (Ouest : 4,5 % , Est : 1 %).

Fig 2: CARTE DE REPARTITION DU TAUX DE PERTE DES TERRES EN T/ha/an SELON L'INDICE DE I.A.P.O.

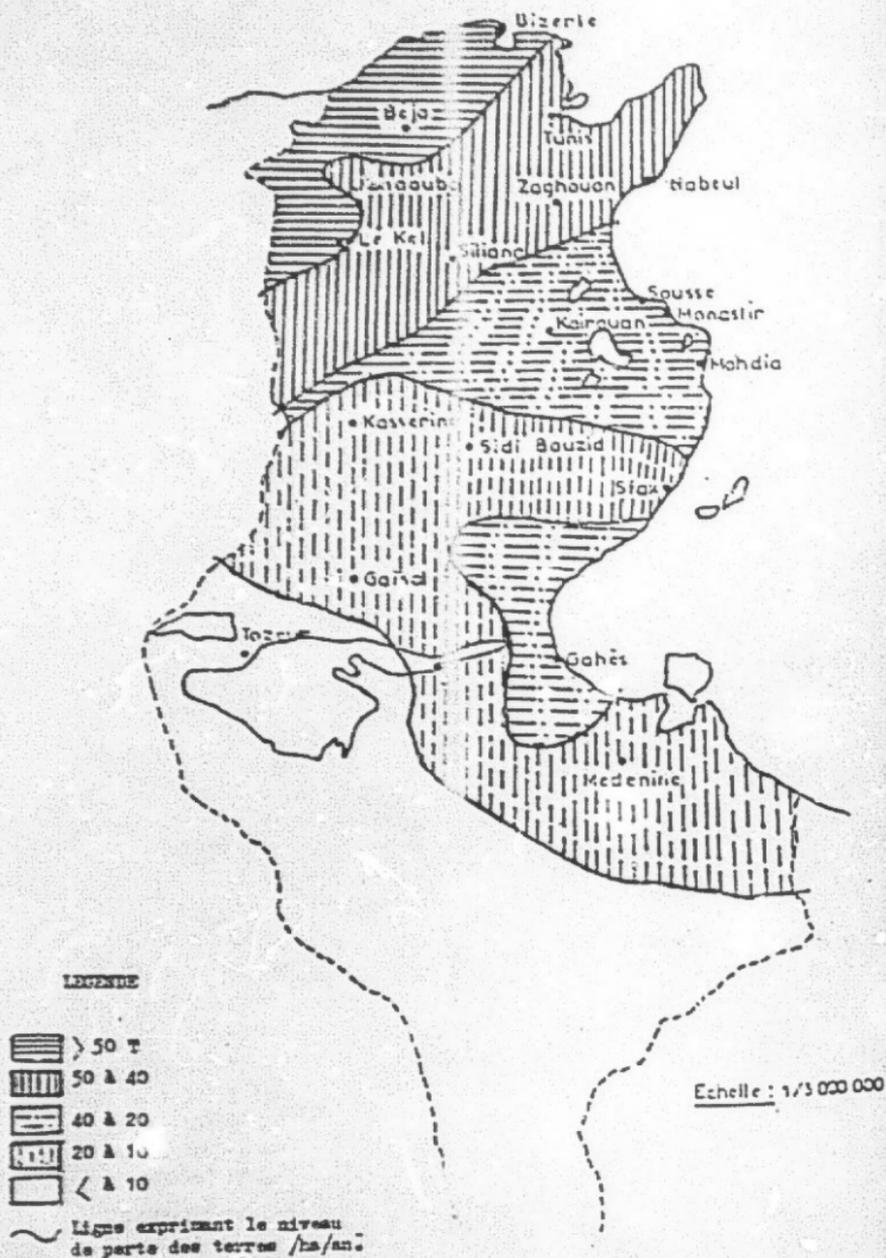
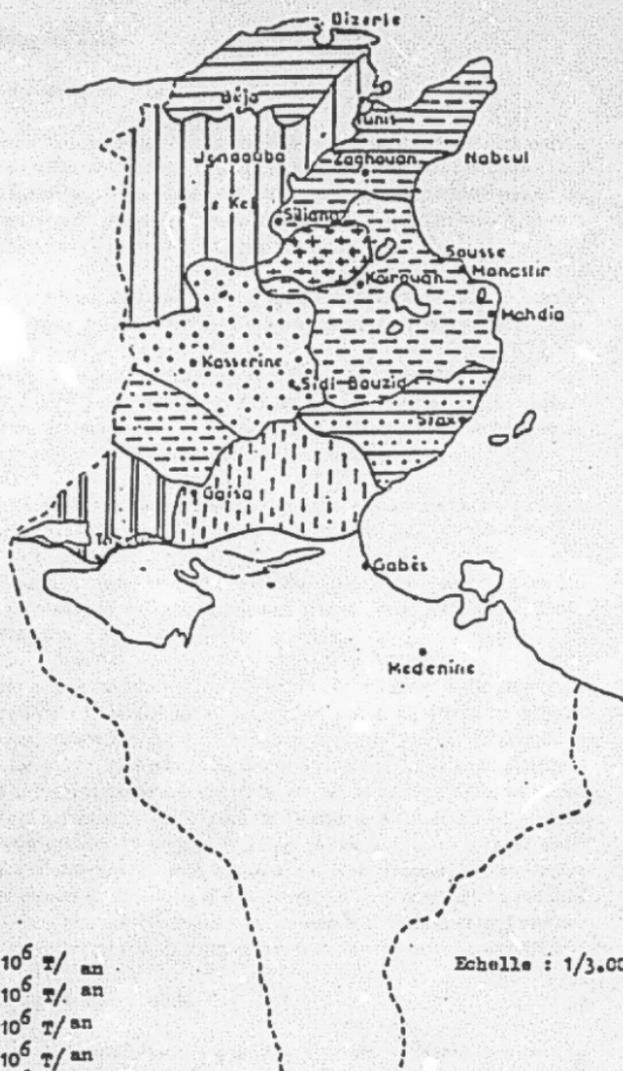


Fig 3: PERTE EN DEBIT SOLIDE DES GRANDS BASSINS VERSANTS DE LA TUNISIE



LEGENDE

|  |                           |
|--|---------------------------|
|  | $7,6 \times 10^6$ T/ an   |
|  | $22,6 \times 10^6$ T/ an  |
|  | $3,6 \times 10^6$ T/ an   |
|  | $3,3 \times 10^6$ T/ an   |
|  | $2 \times 10^6$ T/ an     |
|  | $1,5 \times 10^6$ T/ an   |
|  | $0,9 \times 10^6$ T/ an   |
|  | $0,52 \times 10^6$ T/ an  |
|  | $0,065 \times 10^6$ T/ an |
|  | $0,043 \times 10^6$ T/ an |

Echelle : 1/3.000.000

## IV. PREVISION DU TRANSPORT SOLIDE ET DE L'ENVAISEMENT

### 1. Prévision du transport solide

#### 1.1. Analyse des données

La plupart des données hydrologiques comme la pluie et l'écoulement sont aléatoires à l'échelle annuelle. Le débit solide et la taille des sédiments du fond ont des caractéristiques analogues du fait qu'ils dépendent, de la pluie et de l'écoulement. Les caractéristiques du bassin versant (superficie, pente, géologie, nature des sols) présentent une variation spatiale mais sont invariables dans le temps (à l'échelle humaine).

Toutes les données hydrologiques et du transport solide recueillies sur tous les bassins versants contrôlés par des stations hydrométriques et des barrages sont inventoriées.

Sur un papier log-log, tous les couples: apport solide total annuel du bassin (en  $10^6 T/\text{an}$ ) et sa superficie ( $\text{km}^2$ ) correspondante (Ts,S) ont été reportés sur ce papier. L'analyse du nuage obtenu (graphique n° 4) permet l'identification des valeurs sous-estimées ou surestimées par rapport à l'allure générale de tout le nuage de points.

L'analyse des données par la méthode graphique permet d'évaluer les caractéristiques homogènes ou non homogènes des données. Les points aberrants sont faciles à détecter :

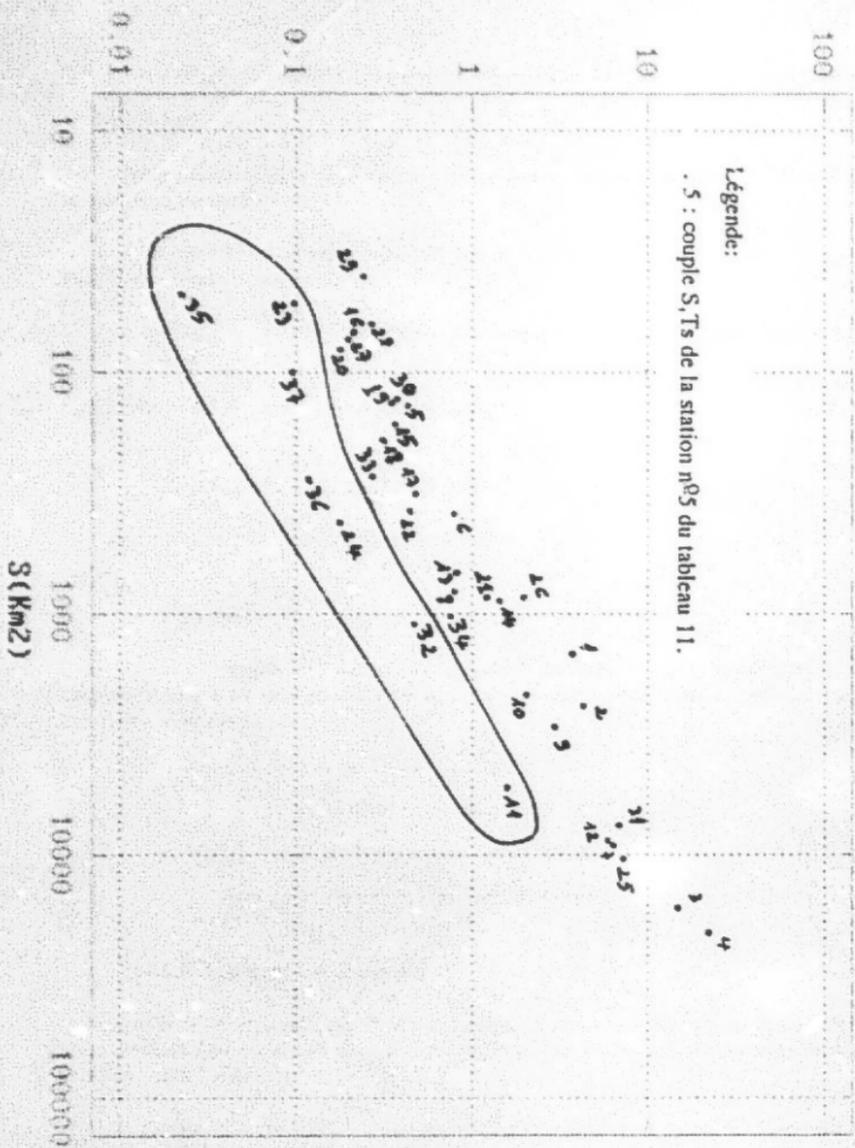
+ une valeur extrêmement forte peut être expliquée par le fait qu'il y a eu un événement d'érosion et de transport solide exceptionnel comme celui de l'année 1969, survenu à la suite d'averses rares.

+ une valeur sous-estimée comme le cas de la valeur mesurée à Negada Bled Lassoued, peut être expliquée par le fait qu'au niveau de l'oued El Fekka se produit d'énormes pertes de transport solide lors des inondations de la plaine par cet affluent de la branche Sud du Zéroud. De même les retenues en amont d'autres retenues en exploitation jouent le rôle de pièges à sédiments, comme le cas de la retenue du barrage Kébir en amont de Bir Mcherga. De même les données des bassins de l'extrême Nord et du lac Ichkeul peuvent ne pas être représentatives du régime hydrologique de la région et sont sous-estimées car les 2 années d'observations sont insuffisantes pour avancer des moyennes représentatives du régime moyen de ces cours d'eau. La plupart des séries d'observations des cours d'eau du pays ont connu des événements exceptionnels d'érosion et de transport solide, ce qui a permis d'avoir des moyennes représentatives du régime de ces cours d'eau.

#### 1.2. Prévision du transport solide

Pour prédire l'érosion ou la sédimentation d'un bassin versant se manifestant dans le réseau de drainage en utilisant les données des cours d'eau et l'envasement des retenues de barrages, nous avons procédé comme suit :

Ts (Millions de tonnes/an)



Légende:

5 : couple S, Ts de la station n°5 du tableau 11.

Fig. 4: CORRELATION TRANSPORT SOLIDE-SUPERFICIE DE BASSINS VERSANTS EN TUNISIE

- faire une corrélation entre l'érosion spécifique ( $E_s$ ) et l'étendue du bassin versant :

$$E_s = f(S).$$

- faire une corrélation entre l'apport solide moyen annuel et la superficie du bassin versant correspondant :  $T_s = f(S)$

- faire une corrélation entre l'apport solide moyen annuel, la superficie du B.V et la lame d'eau écoulée correspondante.

La meilleure corrélation obtenue est la corrélation linéaire entre le  $T_s$  et l'étendue du bassin versant S.

Pour l'ensemble des données (37 couples)(tableau 11 ), la corrélation obtenue est significative et s'écrit sous la forme linéaire suivante:

$$T_s = 0,09482 + 9,0299 \cdot 10^{-4} \cdot S \quad (1)$$

avec un coefficient de corrélation  $r = 0,968$ .

où  $T_s$  en  $10^5$  T/an  
S en  $km^2$

Si on élimine les 7 stations où les valeurs du transport solide annuel sont sous estimées comme il est déjà indiqué plus haut, une sensible amélioration du coefficient de corrélation a été obtenue (Fig 5).

|  |
|--|
| $T_s = 0.232384 + 9.08585 \cdot 10^{-4} \cdot S$ $r = 0.976 \quad \text{avec } S \geq 40 \text{ km}^2$ |
|--|

(2)

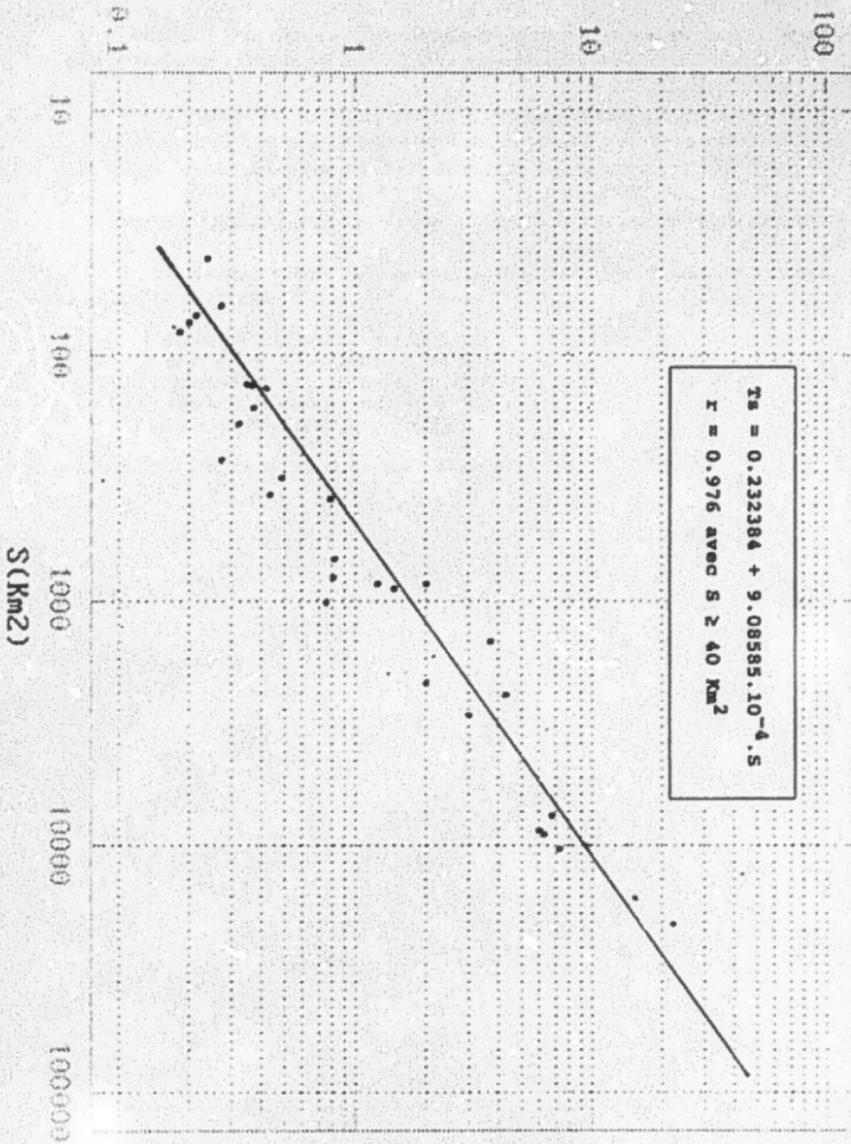
### 1.3. Application et discussion

Cette relation appliquée aux différents bassins versants contrôlés soit par des stations hydrométriques soit par des retenues de barrages, donnerait des apports solides calculés aux sites de contrôle (tableau n° 11).

La comparaison des valeurs observées et calculées aboutit au calcul des incertitudes des valeurs observées aux différentes stations de mesure.

La lecture de ce tableau fait ressortir les remarques suivantes:

Ts(Millions de tonnes/an)



- pour les 7 sites mentionnés sur le graphique comme points aberrants, le transport solide annuel a été estimé par la corrélation adoptée ( corrélation 2)

- sur la branche Sud de l'oued Zéroud, le transport solide mesurée au niveau de la station Negada Bled Lassoued est sous-estimé vu les pertes qui se sont produites au niveau de l'oued El Fekka lors des grandes crues enregistrées dans le bassin de l'oued Hatab.

- sur les bassins du Nord observés durant 2 années, le transport solide est sous-estimé.

- sur les erreurs relatives ( $E_r$ ) calculées pour les 30 stations de contrôle mentionnées au tableau 11, on compte :

- 5 stations (20 %) ayant  $E_r < 5$  %
- 9 stations (30 %) ayant des  $E_r < 10$  %
- 14 stations (46,6 %) ayant des  $E_r < 20$  %
- 18 stations (60% ) ayant des  $E_r < 30$  %
- 25 stations (83% ) ayant des  $E_r < 50$  %

soit une erreur relative moyenne de l'estimation égale à: 26,4%.

Tableau 11: Transport solide total annuel observé et calculé au niveau des différents sites d'observations

| n° | Station   | Paramètre | Superficie du B.V. (km <sup>2</sup> ) | Transport solide total annuel T <sub>a</sub> (10 <sup>6</sup> T) |         | Erreur relative (%) | Observations   |
|----|---|-----------|---------------------------------------|--|---------|---------------------|--|
|    |   |           |                                       | observé  | calculé |                     |  |
| 1  | Wejerda Ghardimaou  |           | 1480                                  | 3.69   | 1.577   | 57.26               |  |
| 2  | Wejerda Jendouba  |           | 2410                                  | 4.30   | 2.422   | 43.67               |  |
| 3  | Wejerda Bou Salem   |           | 16230                                 | 15   | 14.9787 | 0.14                |  |
| 4  | Wejerda Wejer El Bab  |           | 21000                                 | 22   | 19.313  | 12.2                |  |
| 5  | Rhazala Fernane   |           | 138                                   | 0.43   | 0.358   | 16.6                |  |
| 6  | Bou Heurtme Kaf Rira  |           | 390                                   | 0.787  | 0.5867  | 25.45               |  |
| 7  | Nellégué K13  |           | 9000                                  | 6.26   | 8.4096  | -34.34              |  |
| 8  | Zéroud Methob Ain Sabou   |           | 813                                   | 0.79   | 0.571   | -22.92              |  |
| 9  | Zéroud Methob Kasr Kebt   |           | 2945                                  | 3  | 2.9082  | 3.06                |  |
| 10 | Zéroud Methob Khanguet Zaia   |           | 2200                                  | 2  | 2.2313  | 11.56               |  |
| 11 | Zéroud Negada Bled Lassoued   |           | 5290                                  | 1.56   | 5.0388  | -                   | en aval plaine Gaouda  |
| 12 | Zéroud Sidi Saâd  |           | 8650                                  | 6  | 8.0816  | -34.86              |  |
| 13 | Merguelli Haffouz   |           | 675                                   | 0.82   | 0.84558 | -3.13               |  |
| 14 | Merguelli Sidi Boujdaria  |           | 891                                   | 1.46   | 1.041   | 28.7                |  |
| 15 | Kébir -Tabarta  |           | 164                                   | 0.368  | 0.3214  | -3.64               |  |
| 16 | Bou Terfess - P.R   |           | 68.3                                  | 0.210  | 0.2945  | -40.2               |  |
| 17 | Melah - Ouchtata  |           | 317                                   | 0.442  | 0.5204  | -7.97               |  |
| 18 | Madene - nefza  |           | 194                                   | 0.321  | 0.4286  | -27.3               |  |
| 19 | Bou Zenne - P.R   |           | 133                                   | 0.358  | 0.3532  | 1.3                 |  |
| 20 | Bélif - P.V.R   |           | 80                                    | 0.178  | 0.105   | -11.4               |  |
| 21 | Zouara - Sidi El Barrak   |           | 865                                   | 1  | 1.0183  | 17.9                |  |
| 22 | Sejnane - IS 5  |           | 377                                   | 1.437  | 0.575   | -31.6               | Affluents du Lac Ichkeul caractérisés par des déficits d'écoulement durant la période d'observa. |
| 23 | Ghezala - P.R (Ichkeul)   |           | 52                                    | 3.098  | 0.2796  | -                   |  |
| 24 | Tine - IS 20  |           | 418                                   | 0.171  | 0.612   | -                   |  |
| 25 | Barrage Nellégué  |           | 10300                                 | 7.13   | 9.5908  | -34.5               |  |
| 26 | Barrage Nebhana   |           | 855                                   | 1.97   | 1.0092  | 48.77               |  |
| 27 | Barrage Bézirt  |           | 73                                    | 0.97   | 0.2987  | -51.6               |  |
| 28 | Barrage Chiba   |           | 64                                    | 0.271  | 0.2905  | -7.6                |  |
| 29 | Barrage Maar  |           | 40                                    | 0.242  | 0.2087  | -11.05              |  |
| 30 | Barrage Lakhaes   |           | 131                                   | 0.375  | 0.3514  | 6.5                 |  |
| 31 | Barrage Sidi Salem (sans les B.V de Nellégué Bou Heurtme et Kasseb) |           | 7479                                  | 6.745  | 7.028   | -4.2                |  |
| 32 | Barrage Bir K'Cherga (sans Kébir S = 271 km <sup>2</sup> )          |           | 1127                                  | 0.455  | 1.256   | -                   | retenue située en aval du barrage Kébir  |
| 33 | Barrage Kébir   |           | 271                                   | 0.27   | 0.4786  | -77                 |  |
| 34 | Silliane barrage  |           | 1060                                  | 0.753  | 1.1773  | -56                 |  |
| 35 | Barrage Ghezala(Ichkeul)  |           | 48                                    | 0.0223   | 0.276   | -                   | période hydro. déficit   |
| 36 | Barra.BouHeurtme sans B.Mtir  |           | 277                                   | 0.1176   | 0.484   | -                   | situé aval Ben Métir   |
| 37 | Barrage Kasseb  |           | 101                                   | 0.093  | 0.324   | -                   | toux végétation élevé  |

## 2. PREVISION DE L'ENVASEMENT DES RETENUES

### 2.1. Modèle de prévision de l'envasement

Les observations faites sur l'envasement de nombreuses retenues de barrages dans le monde ont montré que le processus de l'envasement durant les premières années d'exploitation des retenues, est très intensif et il s'atténue au fur et à mesure que la durée d'exploitation devient plus longue.

Le premier auteur qui a décrit ce processus d'envasement fût F.ORTH (1934). Il suppose que la capacité résiduelle d'une retenue après une certaine période d'exploitation varie dans le temps en fonction d'une loi à décroissance exponentielle.

$$C_t = C_{rn} \cdot a^t$$

où  $C_t$ : capacité résiduelle après  $t$  années de service

$C_{rn}$ : capacité à retenue normale,

$a$ : paramètre propre à chaque retenue,

Le problème qui se pose est la détermination du paramètre "a". Pour ce faire, nous écrivons la capacité résiduelle de la retenue sous la forme suivante:

$$C_t = C_{rn} - V_{st} = C_{rn} \cdot a^t$$

où  $V_{st}$ : volume envasé après  $t$  années d'exploitation

$$\text{Soit: } V_{st} = C_{rn} - C_{rn} \cdot a^t = C_{rn} \cdot (1 - a^t)$$

Si l'on suppose que durant la première année d'exploitation ( $t=1$ ), le volume de sédiment accumulé  $V_{s1}$  est égal à l'apport solide moyen annuel  $T_s$ .

On aura:  $T_s = C_{rn} \cdot (1 - a)$

ce qui entraîne:  $a = 1 - T_s / C_{rn}$  (c'est une valeur approchée de "a".)

La formule de prévision devient:

$$C_t = C_{rn} \cdot (1 - T_s / C_{rn})^t$$

(3)

### 2.2. Résultats et discussion

Nous présentons dans le tableau n°13 les résultats obtenus indiquant la comparaison entre les capacités observées et celles calculées par la formule (3). Les erreurs calculées entre les valeurs observées et calculées montrent que l'on a pour 13 barrages (100% des cas) un écart absolu moyen < à 10%.

La formule proposée donne donc des résultats très satisfaisants. cette formule repose sur la détermination du transport solide annuel moyen et par conséquent sur le paramètre "a" et c'est sa valeur qui conditionnera la précision des prévisions. Les valeurs obtenues du paramètre "a" sont en général assez stables pour une retenue donnée. Cette constatation se traduit par le fait que modèle exponentiel proposé par F.ORTH est bien confirmé par les données des retenues des barrages de la Tunisie.

Les écarts observés sur les valeurs du paramètre "a" sont essentiellement dûs aux erreurs commises sur la détermination des capacités des retenues (erreurs commises sur les levés bathymétriques).

**Tableau 12 : Comparaison des capacités résiduelles du barrage observées et calculées par le modèle**

| Barrage            | Année du levé bathymétrique                     | Capacité résiduelle (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |          | Ecart | "σ"     |        |
|--------------------|---|---|----------|-------|---------|--------|
|                    |   | observée  | calculée |       | observé | adopté |
| KEBIR              | 1931  | 22,4  | 22,4     | 0     |         |        |
|                    | 1945  | 19,6  | 19,7     | 0,1   | 0,9916  |        |
|                    | 1950  | 17,6  | 18,0     | 0,4   | 0,9893  | 0,9786 |
|                    | 1967  | 15,9  | 16,7     | 0,8   | 0,9879  |        |
|                    |   | 12,3  | 14,36    | 2,06  | 0,9880  |        |
|                    | Ecart absolu moyen = 5,5% $Ct = Crn.(0,9786)^2$ |   |          |       |         |        |
|                    | Prévision 1994                                  |   | 5,5      |       |         |        |
| BIR F'CHERGA       | 1971  | 53  | 53       | 0     |         |        |
|                    | 1987  | 46,8  | 47,06    | 0,26  | 0,9926  | 0,9926 |
|                    | Ecart absolu moyen = 0,6% $Ct = Crn.(0,9926)^2$ |   |          |       |         |        |
|                    | Prévision 1994                                  |   | 44,7     |       |         |        |
| NEBEUR<br>MELLEGUE | 1954  | 268   | 268      | 0     |         |        |
|                    | 1962  | 247,8   | 248,4    | 0,6   | 0,9905  | 0,9921 |
|                    | 1975  | 220,4   | 224,2    | 3,8   | 0,9915  |        |
|                    | 1980  | 216   | 218,0    | 2     | 0,9921  |        |
|                    | Ecart absolu moyen = 1 % $Ct = Crn.(0,9921)^2$  |   |          |       |         |        |
|                    | Prévision fin 1994                              |   | 195      |       |         |        |
| NEBHAMA            | 1965  | 86,4  | 86,4     | 0     | -       |        |
|                    | 1975  | 73,5  | 74,3     | 0,8   | 0,9850  | 0,9850 |
|                    | Ecart absolu moyen = 1,1 % $Ct = Crn.(0,985)^2$ |   |          |       |         |        |
|                    | Prévision 1994                                  |   | 47       |       |         |        |
| SILIANA            | 1987  | 70  | 70       | 0     |         |        |
|                    | 1994  | 65,92   | 66,0     | 0,08  | 0,9910  | 0,9910 |
|                    | Ecart absolu moyen = 0,1 % $Ct = Crn.(0,991)^2$ |   |          |       |         |        |
|                    | Prévision fin 1994                              |   | 65,7     |       |         |        |

Tableau 12 (suite): Comparaison des capacités résiduelles du barrage observées et calculées par le modèle

|  |   |       |        |      |        |        |  |
|--|---|-------|--------|------|--------|--------|--|
| LAKHNES  | 1956  | 8     | 8      | 0    | -      | -      |  |
|  | 1975  | 6     | 6,2    | 0,2  | 0,9730 | 0,995  |  |
|  | 1991  | 7,074 | 7,1    | 0,03 | 0,9954 |        |  |
| Ecart absolu moyen = 1,8 % $Ct = Crn. (0,995)^t$ |   |       |        |      |        |        |  |
| Prévision fin 1994                               |   |       | 6,95   |      |        |        |  |
| BOU HEURTHA                                      | 1976  | 117,5 | 117,5  | 0    | -      |        |  |
|  | 1993  | 115,5 | 115,5  | 0    | 0,9989 | 0,9989 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 0 % $Ct = Crn. (0,9989)^t$   |       |        |      |        |        |  |
| Prévision fin 1994                               |   |       | 115,2  |      |        |        |  |
| BEZIAK   | 1960  | 6,46  | 6,46   | 0    | -      |        |  |
|  | 1975  | 4,78  | 4,97   | 0,19 | 0,9823 |        |  |
|  | 1977  | 6     | 6,01   | 0,01 | 0,9958 |        |  |
|  | 1991  | 5,91  | 5,93   | 0,02 | 0,9974 | 0,9974 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 1,5 % $Ct = Crn. (0,9974)^t$ |       |        |      |        |        |  |
| Prévision fin 1994                               |   |       | 5,9    |      |        |        |  |
| CHIBA  | 1963  | 7,86  | 7,86   | 0    | -      |        |  |
|  | 1975  | 5,21  | 5,58   | 0,37 | 0,9719 | 0,9719 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 6,6% $Ct = Crn. (0,9719)^t$  |       |        |      |        |        |  |
| Prévision fin 1994                               |   |       | 4,5    |      |        |        |  |
| NASSI  | 1968  | 6,82  | 6,82   | 0    | -      |        |  |
|  | 1975  | 5,5   | 5,62   | 0,12 | 0,9742 |        |  |
|  | 1991  | 5,98  | 6,02   | 0,04 | 0,9946 | 0,9946 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 1,4 % $Ct = Crn. (0,9946)^t$ |       |        |      |        |        |  |
|  | Prévision fin 1994                                |       |        | 5,9  |        |        |  |
| SIDI SAAD  | 1982  | 131   | 131    | 0    | -      |        |  |
|  | 1988  | 124   | 124,17 | 0,17 | 0,9911 | 0,9911 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 0,1 % $Ct = Crn. (0,9911)^t$ |       |        |      |        |        |  |
| Prévision Déc 1994                               |   |       | 118    |      |        |        |  |
| SIDI SALEN                                       | 1981  | 555   | 555    | 0    | -      |        |  |
|  | 1991  | 503   | 505    | 2    | 0,9898 | 0,9898 |  |
|  | Ecart absolu moyen = 0,4% $Ct = Crn. (0,9898)^t$  |       |        |      |        |        |  |
| Prévision Déc 1994                               |   | 491   |        |      |        |        |  |
| RHEZLA (ICHKZUL)                                 | 1985  | 11,7  | 11,7   | 0    | -      |        |  |
|  | 1993  | 11,5  | 11,51  | 0,01 | 0,9980 | 0,998  |  |
|  | Ecart absolu moyen = 0,1% $Ct = Crn. (0,998)^t$   |       |        |      |        |        |  |
| Prévision Jan 95                                 |   |       | 11,5   |      |        |        |  |

Tableau 13: Etat de l'envasement des barrages

| Barrage           | Date de mise en eau | Volume total de la retenue normale (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Date du Levé bathymétrique  | nombre d'années d'exploitation | Envasement total mesuré (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Capacité résiduelle (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) |
|-------------------|---------------------|--|-----------------------------|--------------------------------|---|---|
| Kébir Miliane     | 1931                | 22,4   | 1930                        | 0                              | 0   | 22,4  |
|                   |                     |  | 1945                        | 15                             | 2,8   | 19,6  |
|                   |                     |  | 1950                        | 20                             | 4,8   | 17,6  |
|                   |                     |  | 1954                        | 24                             | 6,5   | 15,9  |
|                   |                     |  | 1967                        | 37                             | 9,9*  | 12,3  |
|                   |                     |  | Estimation 1994: formule(2) | 64                             | 17,7  | 4,7   |
| Bir M'Cherga      | 1971                | 53   | 1971                        | 0                              | 0   | 53  |
|                   |                     |  | Avr 1987                    | 16                             | 6,2   | 46,8  |
| Hebeur Mellègue   | Mai 1954            | 268  | 1954                        | 0                              | 0   | 268   |
|                   |                     |  | Jun 1962                    | 8                              | 20,2  | 247,8   |
|                   |                     |  | Jun 1975                    | 21                             | 47,6  | 220,4   |
|                   |                     |  | Fai 1980                    | 26                             | 55  | 213   |
| Neohana           | Avr 1965            | 86,4   | 1965                        | 0                              | 0   | 86,4  |
|                   |                     |  | Août 1975                   | 10                             | 12,9  | 73,5  |
| Silliana          | Déc 1987            | 70   | 1987                        | 0                              | 0   | 70  |
|                   |                     |  | Mai 1994                    | 6,5                            | 4,08  | 65,92   |
| Lakhees           | Avr 1966            | 8  | 1966                        | 0                              | 0   | 8   |
|                   |                     |  | Août 1975                   | 9,33                           | 2,01  | 6   |
|                   |                     |  | Avr 1991                    | 25                             | 0,926   | 7,074   |
| Bou Heurttae      | 1976                | 117,5  | 1976                        | 0                              | 0   | 117,5   |
|                   |                     |  | Mars 1993                   | 17                             | 2   | 115,5   |
| Bézirk            | Déc 1960            | 6,46   | 1960                        | 0                              | 0   | 6,46  |
|                   |                     |  | Août 1975                   | 14,75                          | 1,680   | 4,78  |
|                   |                     |  | 1977                        | 17                             | 0,460   | 6   |
|                   |                     |  | Juin 1993                   | 32,5                           | 0,550   | 5,91  |
| Chiba             | 1963                | 7,86   | 1963                        | 0                              | 0   | 7,86  |
|                   |                     |  | Août 1975                   | 12                             | 2,65  | 5,21  |
| Masri             | Fév 1968            | 6,82   | 1968                        | 0                              | 0   | 6,82  |
|                   |                     |  | Août 1975                   | 7,5                            | 1,32  | 5,5   |
|                   |                     |  | Mai 1991                    | 23                             | 0,839   | 5,98  |
| Sidi Saâd         | 1962                | 131  | 1981                        | 0                              | 0   | 131   |
|                   |                     |  | Mars 1991                   | 6                              | 6,979   | 124   |
| Sidi Salem        | Dec 1981            | 555  | 1981                        | 0                              | 0   | 555   |
|                   |                     |  | Mars 1991                   | 9,25                           | 52  | 503   |
| Rhézala (Ichkeul) | Jan 1985            | 11,7   | 1985                        | 0                              | 0   | 11,7  |
|                   |                     |  | Mai 1993                    | 23                             | 0,1925  | 11,5  |

\* la valeur de l'envasement mesuré en 1967 au barrage Kébir est très sous-estimée.

## V. CONSEQUENCES DE L'EROSION ET DU TRANSPORT SOLIDE

La mobilisation des ressources en eau pour satisfaire les besoins des centres urbains, industriels et des périmètres irrigués, constitue l'objectif principal de la stratégie nationale pour le développement des ressources en eau. Ce programme qui prévoit la réalisation de 21 barrages, 203 barrages collinaires et 1000 lacs collinaires comporte des actions de C.E.S prioritaires pour la protection et la préservation de ces ressources en eau.

### 1. Impact de l'érosion sur les infrastructures

La Tunisie est dotée actuellement d'une infrastructure hydraulique dont dépend, dans une large mesure, le développement économique du pays. Cette infrastructure est menacée par l'envasement et le colmatage. Au moins 25 à 30 millions de m<sup>3</sup> de sédiments se déposent chaque année dans les retenues de barrages, entraînant ainsi la diminution des disponibilités en eau pour l'irrigation et l'eau potable. L'étude de la régularisation qui est à la base de tout aménagement hydraulique, repose sur la connaissance de tranche morte, qui correspond au volume de la zone où les matériaux solides se déposent.

La détérioration des routes et des ouvrages de communications par les dépôts solides apportés par les crues est non négligeable.

Les dépôts d'apports solides dans les plaines lors des crues entraînent l'envasement des terres cultivables. A titre indicatif, les dépôts mesurés dans les zones d'inondation dans la basse et moyenne Mejerda lors de la crue de mars 1973, sont les suivants :

Tableau 14 : Importance des dépôts solides dans la basse Mejerda (crue de mars 1973)

| Epaisseur des dépôts | Volumes (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Superficie (ha) |
|----------------------|---|-----------------|
| traces               | -   | 17331           |
| < 5 cm               | 5,5                                       | 13760           |
| 5-20 cm              | 11,6                                      | 4660            |
| 20-40 cm             | 14,8                                      | 4930            |
| 40-80 cm             | 5,0                                       | 978             |
| 80-150 cm            | 7,5                                       | 632             |
| Total                | 45,2                                      | 47291           |

Des transports solides importants peuvent aussi avoir des conséquences néfastes:

- ° sur l'endiguement des cours d'eau, ce qui peut entraîner de possibilité de débordements et création de courants de retour.
- ° sur les canaux d'irrigation et des prises d'eau agricoles, ce qui nécessite des travaux de dévasage coûteux
- ° la diminution des hauteurs d'aspiration des pompes par les dépôts solides peuvent influencer énormément le rendement des pompes de même aussi le bouchage des crépines nécessite un entretien permanent.

## 2. Impact des transports solides et de l'envasement sur la qualité d'eau des retenues de barrages (cas de Sidi Salem)

Dans les régions semi-arides ou arides où le couvert végétal est insuffisant et les pluies sont concentrées sur la période humide de l'année, l'érosion et le lessivage des sols des bassins versants apportent des quantités importantes de transport solide et de sels nutritifs dans la retenue de barrage qui causent l'envasement de la retenue et l'eutrophisation.

La retenue de Sidi Salem a perdu 52 millions de m<sup>3</sup> de sa capacité depuis sa mise en eau en décembre 1981 jusqu'au mois de mars 1991, avec un taux d'envasement annuel de 1,04 %.

Tableau 15 : Evasement de la retenue de Sidi Salem

| Capacité initiale<br>M <sup>3</sup> | Volume de sédiment<br>M <sup>3</sup> | Capacité actuelle<br>M <sup>3</sup> | Taux d'envasement<br>(%) |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| 550                                 | 52                                   | 503                                 | 9,36                     |

Quant à l'état trophique, la retenue de Sidi Salem est classée à l'état de mésotrophie, ce qui se répercute négativement sur la qualité de l'eau produite à partir de la retenue.

Un projet intégré intitulé "Protection des Ressources en Eau de la retenue de Sidi Salem" qui vise :

- \* la préservation et l'amélioration de la qualité de l'eau
- \* la préservation et l'amélioration de la protection contre l'érosion, se compose de différentes mesures pour la protection de la retenue.

Les mesures de reboisement dans les zones de protection proches de la retenue sont déjà faites. Les opérations de protection proposées "avec et sans" interventions forestières schématisées sur le graphique n° 4, montrent que le taux d'envasement est fonction du temps et que ce processus peut être freiné par des mesures sylvicoles pour combattre l'envasement et l'eutrophisation.

Le rythme de l'envasement du barrage (10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> /an) supposé suivre 2 variantes (optimiste et pessimiste), sans et avec interventions des actions sylvicoles est étudié ; la durée de vie peut être prolongée de 76 ans (période qui s'ajoute à la période de l'amortissement du barrage).

Fig 6 : EVOLUTION DE L'ENVASEMENT ET DE L'ETAT TROPHIQUE DE LA RETENUE DE SIDI SALEM AVEC OU SANS TRAITEMENT SYLVICOLE DE LA ZONE PROCHE DE SON BASSIN VERSANT.

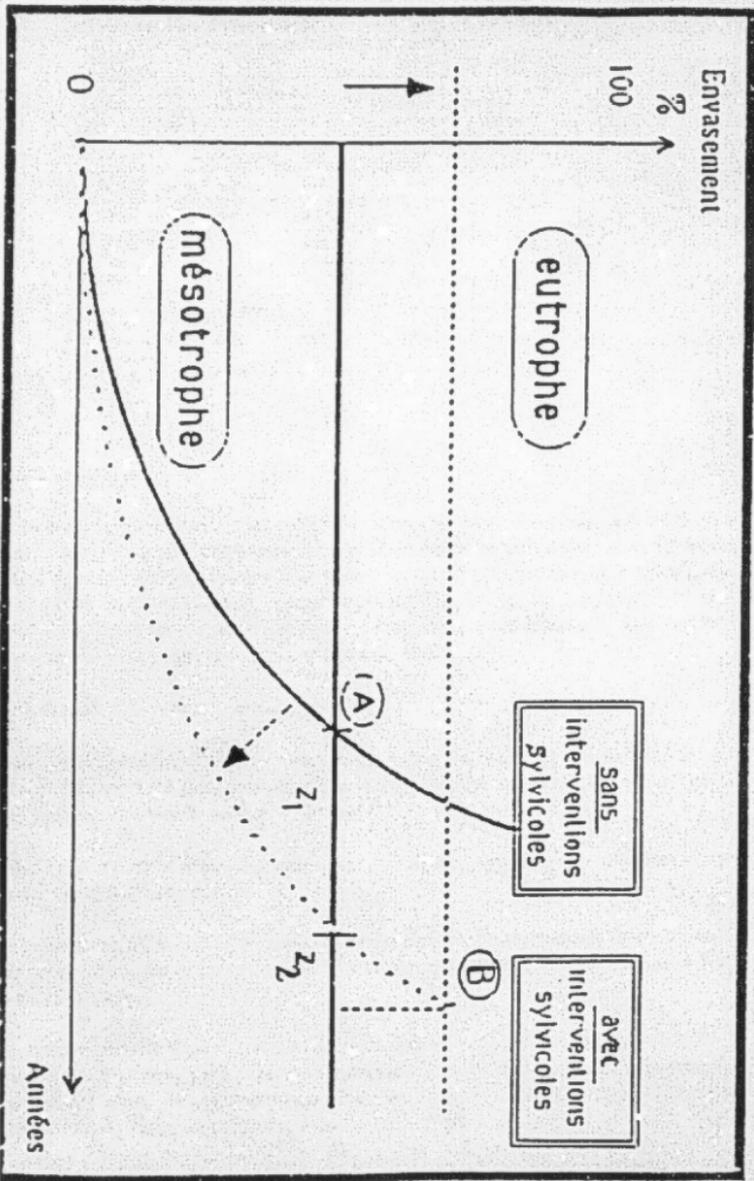


Fig 6 : EVOLUTION DE L'ENVASEMENT ET DE L'ETAT TROPHIQUE DE LA RETENUE DE SIDI SALEM AVEC OU SANS TRAITEMENT SYLVICOLE DE LA ZONE PROCHE DE SON BASSIN VERSANT.

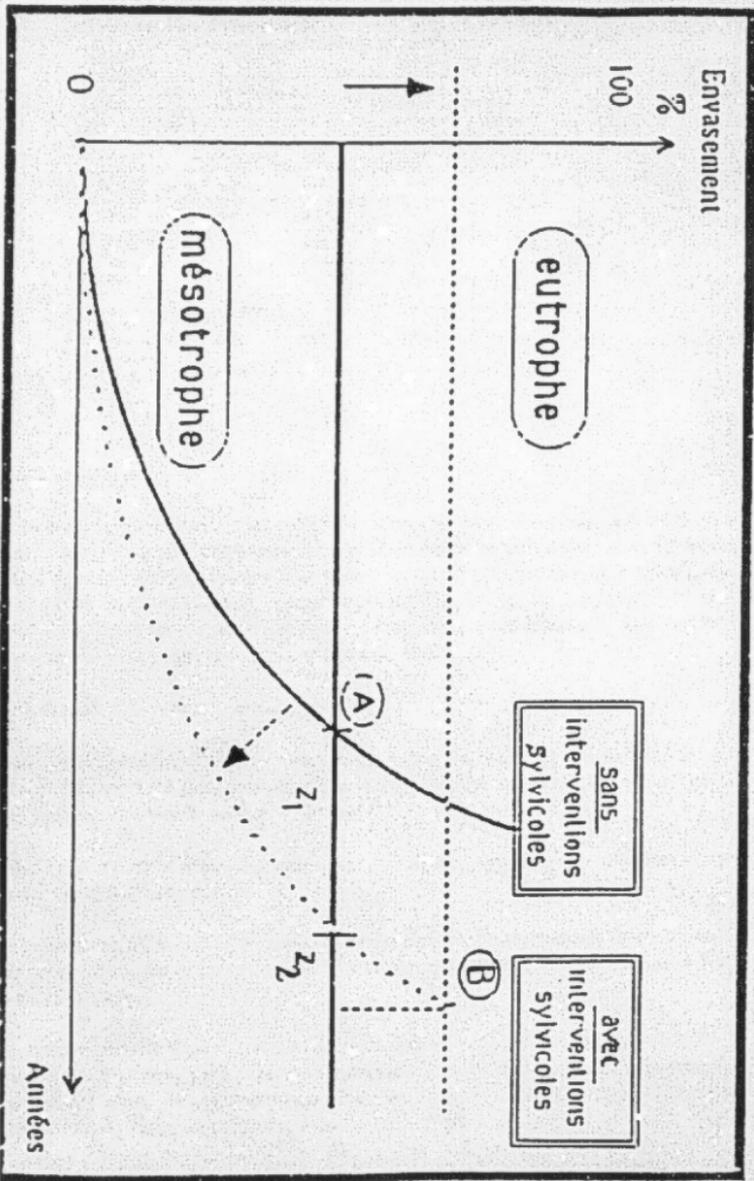


Tableau 16 : Evolution de l'envasement de Sidi Salem avec ou sans traitement sylvicole

| Année                      | Sans Interventions |             | Avec Interventions |             |
|----------------------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|
|                            | Variante I         | variante II | Variante I         | variante II |
| 1982                       | 5,0                | 5,5         | 4,9                | 4,7         |
| 2002                       | 5,5                | 6,0         | 4,7                | 4,3         |
| 2022                       | 6,0                | 6,5         | 4,3                | 3,8         |
| 2042                       | 6,5                | 8,0         | 3,6                | 3,2         |
| 2062                       | 6,8                | 8,2         | 3,0                | 2,7         |
| Année d'envasement complet | 2075               | 2065        | 2128               | 2141        |

## VI. CONCLUSION

Après avoir inventorié toutes les données relatives à l'érosion, au transport solide et à l'envasement des barrages en exploitation, et ceci pour toutes les tailles des bassins ( depuis la parcelle d'érosion (quelques ha) jusqu'au bassin versant de quelque milliers de km<sup>2</sup>), une étude de synthèse a été effectuée en mettant au point des corrélations appropriées pour la prévision du transport solide total annuel pour mieux envisager des techniques anti-érosives pour la sauvegarde et la préservation du capital: eau - sol.

Cette étude a débouché d'une part :

- sur l'établissement d'une formule de prévision du transport solide total moyen annuel au niveau des sites des futurs barrages dans n'importe quelle région de la Tunisie (pour une superficie de bassin versant  $\geq 40$  km<sup>2</sup>)
- sur la proposition d'une formule assez simple de prévision de l'envasement des retenues de barrages d'autre part.

Le phénomène d'érosion et de transport solide menace l'infrastructure hydraulique du pays étant donné qu'il existe une perte annuelle de capacité de ces ouvrages estimée à 1 à 5 % de la réserve totale.

Le développement d'une stratégie de lutte contre l'érosion, le transport solide et l'envasement des barrages, par l'expérimentation de différents traitements anti-érosifs et de la mesure de l'efficacité de ces traitements, nécessite la mise au point d'un programme de recherche de longue durée; ce programme comportera en particulier:

- \* un développement et un approfondissement de la recherche en hydrologie à l'échelle de petits bassins versants expérimentaux pour l'étude des événements averses-crues-

transport solide, ce qui permettra de développer des modèles simples permettant l'estimation et la prévision de la production des sédiments.

\* d'entreprendre pour les retenues de barrages des campagnes systématiques de mesure de l'envasement pour mieux évaluer le transport solide déposé au fond des retenues.

un tel programme pourra aboutir à la mise au point de mesures anti-érosives permettant de combattre efficacement les effets de l'érosion, ce qui permettra d'allonger la durée de vie des ouvrages et de préserver la qualité de l'eau stockée dans les retenues.

## BIBLIOGRAPHIE

ABID A., 1980: "Apports solides et soutirages au barrage de Nebeur sur l'oued Mellègue pour la période du 1<sup>er</sup> Mai 1954 au 30 Avril 1980", Séminaire International d'Experts sur le dévasement des retenues, Tunis 1-4 Juillet 1980.

B.I.R.E., "Barrage réservoir de l'oued Kébir, relevé topographique de la retenue, Août 1967. Tunis RES".

B.I.R.E., 1950 "Barrage sur l'oued Kébir, graphiques des capacités, Tunis, BIRH".

BOUZAÏENE S., LAFORGUE A., 1986: Monographie hydrologique des Oueds Zeroud et Merguellil, DGRE-ORSTO, Decembre 1986-Tunis.

CLAUDE J., CHARTIER R., 1975, "Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie", ORSTOM.

COLLOQUE SUR L'EROSION DES SOLS ET L'ENVASEMENT DES BARRAGES, 1-3 decembre 1991- ANKH-GTZ et Institut Goethe d'ALGER- ALGER.

COMMISSION INTERNATIONALE DES GRANDS BARRAGES, 1987, Comité de l'alluvionnement des retenues." Recommandations relatives à l'alluvionnement".

D.G.T.E. - COOPERATION TECHNIQUE RUSSE: Utilisation des Eaux de l'Extrême Nord de la Tunisie- Etude Technique et Economique - Volume 2, Dossier 1 - Institut d'Etat de Projet et de Recherches scientifiques - YKRGUIRD0 PROVOKHOZ.

DITRICH-STIEVE SEPP OBERAULA, 1988: "Propositions de mesures sylvicoles pour la zone de protection d'eau I et II du barrage de Sidi Salem". Direction des Forêts- GTZ- Janvier 1988 - PN.85.2292.2-03.100

DIRECTION DES TRAVAUX PUBLICS (Service des études et Grands Travaux), 1949: "Cuvette de l'oued Mellègue", 22 Avril 1949 ,Tunis.

DRE-COOPERATION TECHNIQUE TUNISO-ALLEMANDE, 1973 " Monographie de l'oued Miliane" Tunis 1973.

DRE-ORSTOM, 1981: " Monographie de la mejerda". Tunis 1981.

GHORBEL A., 1980: " les transports solides en Tunisie". Séminaire International sur le dévasement des retenues des barrages; Tunis, 1-4 Juillet 1980, ENIT.

HADRI H., TSCHINKEP H., 1976: "Hydrologie de trois petits bassins versants caractérisés par une utilisation différente de sol". Annale de l'Institut National de Recherche Forestière, 1976-Vol.6 Fasc.2, ISSN 0330-096X

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, Direction de la C.E.S., Tunisie, 1991: Stratégie nationale pour la conservation des eaux et du sol.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, Direction des sols. Tunisie - Carte de l'érosion 1980.

**OUKHEEY M.**

- 1991: "Mesure de l'envasement du barrage Sidi Salem". DG/ETH, Mars 1991
- 1991: "Mesure de l'envasement du barrage Sidi Saâd". DG/ETH, Mars 1991
- 1991: "Mesure de l'envasement du barrage Lakhmes". DG/ETH, Avril 1991
- 1991: "Mesure de l'envasement du barrage Masri". DG/ETH, Mai 1991
- 1993: "Mesure de l'envasement du barrage Bou Heurtma". DG/ETH, Mars 1993
  
- 1993: "Mesure de l'envasement du barrage Ghezala". DG/ETH, Mai 1993
- 1993: "Mesure de l'envasement du barrage Sézirk". DG/ETH, Juin 1993
- 1994: "Mesure de l'envasement du barrage Siliana". DG/ETH, Mai 1994

PROJET RAB/80/011, Ressources en Eau dans les pays de l'Afrique du Nord, 1987: " Etude de l'érosion et du transport solide dans les zones semi-arides". Rapports techniques, Vol. 1, première partie. PNUD/OPE-Algérie-Maroc-Tunisie; Mai 1987.

TIXERONT, 1956 " Oued Kebir, transport des matériaux et ruissellement, période 1952-1956." Tunis-HAR.

---

**FIN**

**35** .....

**VUES**