

N° 3 - 2<sup>e</sup> TRIMESTRE 1972

# HOMMES TERRE & EAUX



A. LAHBAÏ

REVUE DE L'ASSOCIATION NATIONALE DES AMÉLIORATIONS FONCIÈRES DE L'IRRIGATION ET DU DRAINAGE

# AUX CONGRESSISTES DE VARNA

LA date de publication de ce numéro 3 de « Hommes, Terre et Eaux » en avance sur l'échéance normale puisqu'il paraît un mois et demi à peine après notre précédent numéro a été choisie pour coïncider avec le VIII<sup>ème</sup> congrès de l'I.C.I.D. qui se tient actuellement à Varna, auquel nous voulons, en quelque sorte, qu'il soit dédié.

Si ce numéro ne constitue pas, en lui-même une contribution aux travaux du congrès (l'ANAFID étant de création trop récente pour pouvoir apporter une véritable contribution dans ce sens) il est toutefois consacré à une autre grande entreprise de la Commission Internationale. Il s'agit des deux enquêtes sur la maîtrise des crues et les problèmes de salinité que l'I.C.I.D. a lancées en vue de la publication d'une « Revue Mondiale ».

Ce numéro est notre contribution à cet important travail. Nous y avons reproduit d'une part les réponses intégrales au questionnaire sur « La Maîtrise des Crues » au Maroc, d'autre part, une synthèse des réponses au questionnaire sur les problèmes de salinité (adressées par ailleurs à l'I.C.I.D.) complétées par une étude récente sur la simulation du mouvement des sels dans le sol au moyen d'un modèle mathématique.

Par ailleurs et toujours dans le cadre de l'activité internationale de notre jeune Association, notre délégation au Congrès de Varna saisira cette occasion pour prendre des contacts avec les spécialistes présents au congrès en vue d'un colloque international sur le drainage que l'ANAFID projette d'organiser vers la fin de cette année en collaboration avec d'autres organismes nationaux.

Enfin, nous prions les participants au VIII<sup>ème</sup> congrès de trouver ici l'expression de nos souhaits de pleine réussite dans leurs travaux et les chaleureuses salutations de l'Association Nationale des Améliorations Foncières, de l'Irrigation et du Drainage.

# MAITRISE DES CRUES AU MAROC

## 1. — INTRODUCTION

Le texte qu'on lira ci-après, est la contribution de l'ANAFID à l'enquête lancée par la Commission Internationale pour l'Irrigation et le Drainage (I.C.I.D.) sur la maîtrise des crues en vue de la publication d'une revue mondiale.

Dans ce texte, nous avons essayé de nous conformer, autant que possible, à la démarche proposée par l'I.C.I.D. dans le formulaire qu'elle nous a adressé il y a déjà un an, et que nous reproduisons en annexe.

En espérant avoir apporté à la commission internationale la contribution qu'elle attend de nous, nous la prions de nous excuser si, faute de matériaux disponibles, nous n'avons fait qu'effleurer certaines questions où même parfois totalement omis de répondre à d'autres.

Au Maroc, on peut considérer que le problème de la protection contre les crues n'est étudié que depuis peu. Non que le phénomène soit apparu récemment (encore que la dynamique de l'évolution de certains bassins et de celui du Sebou en particulier conduit à une aggravation des dégâts dus aux inondations) mais bien parce qu'au départ les équipements réalisés en vue de la maîtrise de l'eau ont été surtout étudiés dans un but soit de réserve pour l'irrigation ou l'adduction, soit dans un but de production d'énergie.

Cependant la réalisation des aménagements des périmètres d'irrigation, les problèmes sociaux, le montant des dégâts provoqués par les crues, les projets de mise en valeur de régions menacées ont rapidement conduit les responsables à se préoccuper de la maîtrise des crues.

C'est à partir des études nombreuses qui ont été réalisées sur les principaux fleuves marocains que nous avons rassemblé les données concernant le régime et plus spécialement les crues de ces fleuves ; soit en indiquant les résultats obtenus, soit en insistant sur les méthodes qui ont permis de les obtenir lorsqu'il a fallu avoir recours à des méthodes particulières en l'absence de mesures directes sur une période suffisamment longue.

Qu'il nous soit permis, à cette occasion de remercier les ingénieurs de la Direction de l'Hydraulique (MTPC) pour la franche collaboration qu'il nous ont apportée en guidant nos premières recherches et en nous ouvrant largement leurs archives et leur documentation.



## 2. — RIVIERES PRINCIPALES ET LEURS AFFLUENTS

**L'OUED SEBOU** : Il a une longueur de 690 km et débouche dans l'Océan Atlantique près de Kénitra. Il draine le couloir de plaines, de plateaux et de collines compris entre les chaînes rifaines au Nord et les hauts plateaux et crêtes du Moyen-Atlas au Sud. Ses affluents moyen-atlassiques : oued Guigou, oued Tloul, oued Fès, oued Mikkès, ont des débits réguliers alimentés par de nombreuses sources. Au contraire les oueds drainant la partie méridionale du domaine rifain, l'oued Lebène et plus encore l'oued Ouerrha, ont des régimes torrentiels favorisés par la nature argileuse des roches et le déboisement accéléré des montagnes du Nord. L'oued Inaouène, au contact des domaines moyen-atlassique et rifain, a un régime mixte. En aval dans la plaine du Rharb, la pente est très faible et le Sebou dessine des méandres. Il y dépose une partie de sa charge qui constitue des bourrelets de rive.

Le débit moyen annuel du Sebou atteint 199 m<sup>3</sup>/s, mais en étiage moyen il peut descendre à 17 m<sup>3</sup>/s et même dans les cas extrêmes à 3 m<sup>3</sup>/s. Les crues sont violentes et impressionnantes et dépassent souvent 2 000 à 4 000 m<sup>3</sup>/s à l'entrée dans la plaine. Le débit des crues de l'Ouerrha peut atteindre 6 000 m<sup>3</sup>/s. Les crues du Sebou et de l'Ouerrha peuvent être concomitantes comme ce fut le cas en janvier 1963 où on a atteint un débit de 8 000 m<sup>3</sup>/s.

**L'OUED OUM-ER-BIA** : c'est le second par sa longueur (555 km) après le Sebou. Il débouche dans l'Océan Atlantique au niveau d'Azemmour. Il prend sa source avec quelques-uns de ses affluents, oued Serou et oued Derna, dans le Moyen-Atlas où des résurgences dans la masse des calcaires assurent une alimentation régulière. Il rejoint ensuite la plaine intérieure du Tadla où il reçoit des affluents venus du Haut Atlas : oued El-Abid, Oued Tessaoute et l'oued Lakhdar dont le débit moyen total est plus important que celui du fleuve lui-même. Le lit de l'oued est encaissé entre des rives abruptes et n'inonde pas les campagnes riveraines. Par suite de la nature calcaire de la plus grande partie de son bassin, l'Oum-Er-Rbia a le régime le plus régulier des oueds marocains. A Imfoute le débit moyen annuel atteint 105 m<sup>3</sup>/s. En 6 mois (de décembre à mai) les 3/4 du volume des eaux de l'année sont écoulés avec un maximum en mars par suite de la fonte des neiges, ce qui indique un régime pluvio-nival. Les crues dépassent rarement 1 000 m<sup>3</sup>/s, une seule a atteint 2 500 m<sup>3</sup>/s. Quant aux étiages les écarts sont relativement élevés : 34 m<sup>3</sup>/s pour les minimas moyens et 21 m<sup>3</sup>/s pour les extrêmes.

**L'OUED MOULOUYA** : C'est le plus grand fleuve du versant méditerranéen. Il est long de 520 km et draine des régions très différentes. Certains affluents lui amènent les eaux des hautes montagnes comme l'oued Melloulou du Moyen-Atlas, l'oued Ansegmir du Haut Atlas. L'oued Msoun, de débit moindre et plus irrégulier draine la partie orientale de la montagne rifaine. Dans la plus grande partie de son cours, l'oued Moulouya traverse des plaines de climat semi-désertique où l'évaporation est très forte. Le débit de la Moulouya à Mechra-Homadi est relativement faible : la moyenne annuelle n'atteint que 34 m<sup>3</sup>/s. La période des hautes eaux relativement longue, s'étend de décembre à mai. Les irrégularités du régime sont grandes : les étiages moyens tombent à 5 m<sup>3</sup>/s avec des extrêmes de 1 m<sup>3</sup>/s tandis que la crue de mai 1963 dépassait 5 000 m<sup>3</sup>/s.

**L'OUED LOUKKOS** : Son bassin versant a une superficie de 3 700 km<sup>2</sup> et il est situé au Nord-Ouest du Maroc dans une des régions les plus arrosées. Il a une longueur de 180 km et draine une partie des versants Ouest et Sud-Ouest du Rif. Les eaux s'écoulent vers l'Ouest en direction de l'Océan Atlantique qui sert d'exutoire. Le débit moyen annuel est de 33 m<sup>3</sup>/s environ. Ses crues sont très importantes (débit de pointe maximum = 1 650 m<sup>3</sup>/s) et entraînent de grands dégâts dans la « Vallée basse ».

**L'OUED DRAA et L'OUED ZIZ** : Le Draa est formé du Dadès, et de l'Ouarzazate. Il coule dans sa section supérieure suivant une direction Nord-Ouest-Sud-Est séparant Ainti-Atlas et Sarho puis change de direction en aval de Zagora où il coule du Nord-Est vers le Sud-Ouest.

Les eaux du Draa n'atteignent pas la mer et se perdent plus ou moins rapidement en fonction de la pluviosité. Les crues sont pourtant brutales.

L'étude de cet oued, de même que celle du Ziz est particulièrement intéressante étant donné le caractère saharien de ces deux cours d'eaux.

Les moyennes de pluviométrie et de débit ont dans ce cas encore moins de valeur, les extrêmes et même les valeurs « normales » annuelles pouvant seuls être pris en compte pour permettre de comprendre le régime de ces fleuves.

### 3. — ETUDE DES CRUES DU SEBOU

#### Caractéristiques du bassin hydrographique :

Le bassin du Sebou et de ses affluents a une superficie totale de 39 000 km<sup>2</sup>. Cette superficie comprend non seulement le bassin du Sebou proprement dit mais divers bassins fermés (endoréiques). Pour des raisons de commodité d'étude, le bassin du Sebou a été divisé en cinq grands sous-bassins :

— Sebou inférieur : à l'aval du confluent Sebou-Ouerrha .....	15 052 km <sup>2</sup>
Ouerrha : au confluent Sebou-Ouerrha .....	7 325 >
— Sebou moyen : entre l'oued Lyhoudi et confluent Sebou-Lyhoudi .....	6 017 >
— Sebou supérieur : en amont du confluent Sebou-Lyhoudi .....	6 017 >
— Inaouène : Au confluent Sebou-Inaouène .....	5 203 >
TOTAL .....	38 995 >

Les régions naturelles du Maroc qui intéressent le bassin du Sebou sont :

#### *Le Moyen-Atlas :*

C'est un important massif calcaire qui reçoit sur ses versants Nord et Ouest des précipitations relativement abondantes (1 200 mm). Les calcaires dolomitiques et Karstiques du Moyen-Atlas constituent un régulateur naturel du régime du Sebou supérieur qui est alimenté en partie par d'abondantes sources vaclusiennes.

#### *Le Rif et le Prérif :*

C'est une chaîne montagneuse en forme d'arc de cercle possédant un relief accidenté. Le versant méditerranéen offre des pentes très raides tandis que le versant atlantique est formé de montagnes qui s'abaissent progressivement vers le domaine des collines prérimaires. Ce dernier versant est la région du Maroc la mieux arrosée (1 000 à 2 000 mm). Par la nature de ses terrains (essentiellement marneux), son relief accusé et l'érosion intense de ses versants, le Rif constitue la source principale des crues du Sebou.

#### *Le plateau de Fès-Meknès*

Le bassin est un karst récent (pliocène) constitué de calcaires lacustres, de poudingues et de sables, formations reposant sur un substratum général

épais et imperméable (marnes du Tortonien) qui sert de radier à une abondante nappe phréatique.

Les eaux superficielles du bassin sont collectées par les oueds : Rdom, Mikkès et Fès.

#### *Le Rharb, la Mamora et le pays Zemmour :*

Le plateau des Zemmour fait partie du grand ensemble géographique appelé : la Meseta marocaine. Mais le bassin du Sebou ne contient qu'une très faible partie de la Meseta ; le plateau du Telt situé presque entièrement dans le bassin versant du Beht supérieur.

Au Nord le plateau des Zemmour s'abaisse lentement vers la plaine du Rharb.

La plaine du Rharb occupe un ancien golf qui a été comblé depuis la fin du miocène par des sédiments pluvio-marins argilo-sableux de grande épaisseur recouverts de dépôts d'alluvions fines que le Sebou et ses affluents ont apportés au cours du Quaternaire. Du point de vue topographique, le Rharb est une cuvette basse bordée de hauteur la privant de tout exutoire naturel (collines prérimaires, plateau de la Mamora et dunes côtières).

L'estuaire du Sebou n'est pas, à proprement parler, un exutoire car l'oued coule entre 2 berges hautes qui l'empêchent de drainer la plaine et de recueillir les débits des affluents de son cours inférieur à l'exception du R'dat et du Beht. Les apports de tous les autres affluents se répandaient entièrement dans la cuvette du Rharb jusqu'à ces dernières années où un système de canaux permet de ramasser une partie de ces apports et de les conduire soit vers l'océan soit vers l'oued Sebou. A ces apports s'ajoutent périodiquement, les eaux de débordement du Sebou et de ses affluents aval.

Autres caractéristiques hydrographiques du Bassin du Sebou :

#### *Indice de compacité :*

$$K = \frac{P}{2 \sqrt{\pi A}}$$

P étant le périmètre du bassin en km.  
A sa superficie en km<sup>2</sup>

Dans le cas du Sebou P = 1 055 km et A = 38 995 km<sup>2</sup>.

Le rayon du cercle de surface équivalente serait de 111 km et la valeur de K égale à 1,51.

#### *Densité du réseau hydrographique :*

Elle est définie par la relation :  $D = \frac{1}{A}$

1 étant la longueur d'un affluent d'ordre quelconque et A la surface du bassin.

\* Pour le bassin versant du Sebou au confluent avec l'Inaouène  $D = 0,0108$ . Une aussi faible valeur signifie un réseau peu développé et un ruissellement modeste ce qui s'explique par la grande perméabilité des terrains. La concentration des eaux est modérée, les crues peu puissantes et les étiages soutenus. Le régime du Sebou supérieur est donc régulier.

\* Pour le bassin versant de l'Ouerrha  $D = 0,0209$ . Cette valeur relativement élevée de la densité, signifie un réseau développé et un ruissellement de type torrentiel, susceptible de provoquer des crues brutales.

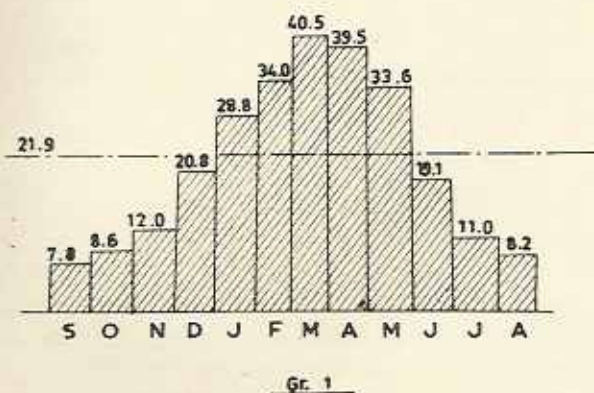
\* Pour les bassins versants de l'Oued Beht et de l'Inaouène des densités sont respectivement 0,0132 et 0,0156. Par leurs régimes le Beht et l'Inaouène présentent certaines similitudes. Moins torrentiels que l'Ouerrha, ils sont plus irréguliers que le Haut-Sebou.

#### Régimes du Sebou et de ses affluents :

##### Le Haut-Sebou :

Il est situé entièrement dans les calcaires du Moyen-Atlas. La pente moyenne de l'Oued est de 6 à 7 ‰. Le Haut-Sebou a un régime régulier. Les crues sont faibles et le débit reste pratiquement uniforme pendant l'été, l'Oued étant alors alimenté, presque exclusivement par des sources.

Le graphique ci-dessous nous montre la répartition des débits moyens mensuels :



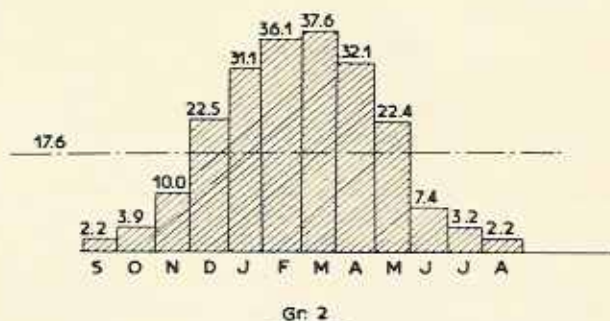
- Station de Aïn-Timedrine
- Débits en m<sup>3</sup>/s
- Moyennes mensuelles calculées pour la période de 1933-63

##### — Le Moyen-Sebou et l'Inaouène :

Il coule dans une vallée alluviale creusée entièrement dans les marnes des collines pré-rifaines. Sa pente est faible (0,3 à 0,8 ‰) et son cours dessine de nombreux méandres. Le Moyen-Sebou reçoit les apports de l'Oued Fès et de l'Inaouène. Ce dernier a une pente moyenne comprise entre 1 et 2 ‰ sauf dans les schistes primaires de Zazekka où elle atteint 5 ‰.

Quant à son régime, le Moyen-Sebou conserve les caractéristiques essentielles de celui du Haut-Sebou. Cependant, l'influence de l'Inaouène qui est moins régulier se fait sentir par une durée moindre des débits moyens. La durée des crues est par contre plus longue.

Le diagramme des débits moyens mensuels à la station de Touaba sur l'Inaouène nous donne une idée plus précise du régime de ce dernier.



- Station Touaba
- Débits en m<sup>3</sup>/s
- Moyennes mensuelles calculées pour la période de 1933-1963.

##### — L'Ouerrha :

Il coule d'Est en Ouest en traversant en amont des cuvettes miocènes et en aval serpente dans une large vallée alluviale creusée dans les marnes de la nappe pré-rifaine. Il divise son bassin en 2 versants d'inégale importance formant une sorte de gouttière qui recueille essentiellement les eaux de la face méridionale du Rif central.

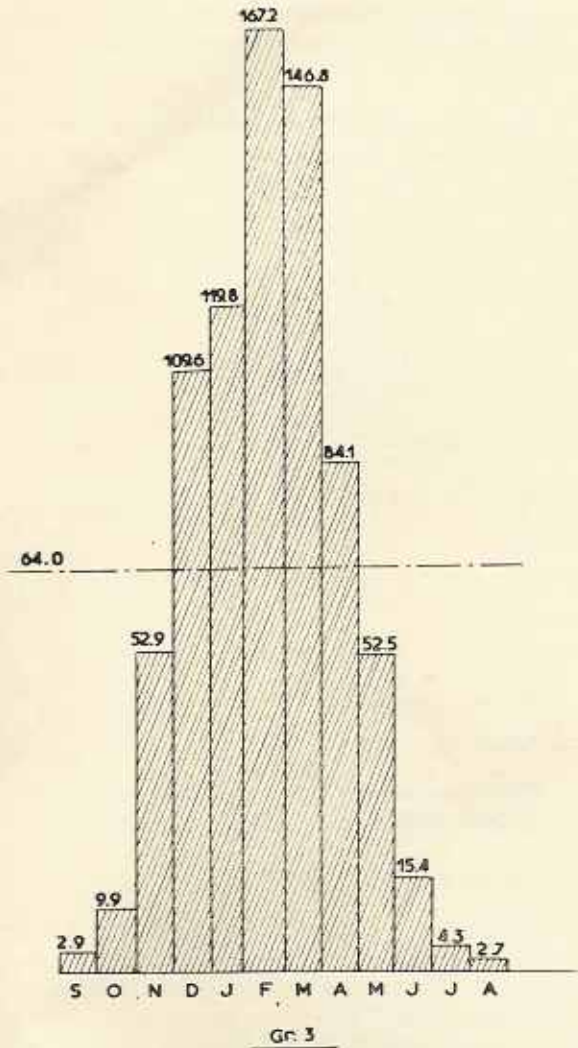
Le bassin versant de l'Ouerrha est soumis à une érosion intense due à une conjonction de facteurs agissant tous dans le même sens :

- Pluviométrie élevée.
- Fortes pentes.

- Constitution géologique et lithologique.
- Action de l'homme sur la végétation et les sols.

Le régime de l'Ouerrha est torrentiel. Ses crues sont violentes et les étiages extrêmement faibles comme le montre le diagramme ci-dessous :

- Station Ourtzagh.
- Débits en m<sup>3</sup>/s
- Moyennes mensuelles calculées pour la période 1933-1963.



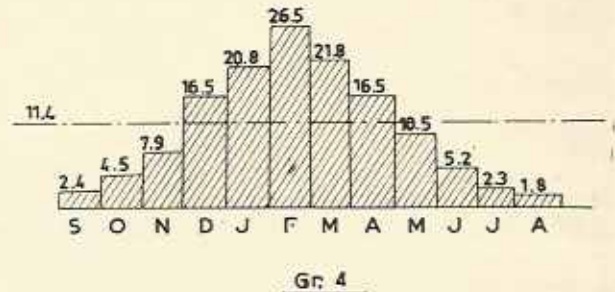
—Le Bas-Sebou et le Beht :

Le Bas-Sebou a une pente extrêmement faible (0,005 % en moyenne) et coule dans un lit exhaussé formé d'alluvions très fines entre 2 berges qui l'empêchent de jouer son rôle de collecteur général

du bassin versant. Il ne reçoit sur ce parcours que les apports du R'Dat alimenté par des collines marneuses et ceux du Beht dont les sources sont situées dans la causeuse Moyen-Atlasique.

Le régime du Beht se rapproche de celui de l'Ouerrha pour les forts débits et cela s'explique par la nature des matériaux généralement imperméables, qui forment son bassin versant. Cependant les crues du Beht n'atteignent pas la violence de celles observées sur l'Ouerrha et ses affluents. Pour les débits moyens et les étiages, le régime du Beht se rapproche davantage de celui du Sebou et ce fait s'explique par le rôle que jouent les calcaires du Moyen-Atlas dans l'alimentation du Haut-Beht.

- Station : El Kansera.
- Débits en m<sup>3</sup>/s.
- Moyennes mensuelles calculées pour la période 1933-1963.



Description des crues du Sebou et de ses affluents :

- La première crue importante connue remonte à 1904 et fut comparable à celle de 1950 dont le débit de pointe a atteint 6 800 m<sup>3</sup>/s au confluent Sebou-Ouerrha.
- La deuxième crue importante décrite par les riverains est apparue en décembre 1913.
- Deux autres crues de faible importance se produisent en mars 1917 et en décembre 1926.
- La crue de 1927 doublée d'une crue de l'oued Beht marqua le début de la mise en valeur et de l'assainissement de la plaine et la mise à l'étude du barrage d'El Kansera mis en eau en 1934.
- D'autres inondations de faible ou de moyenne importance se produisirent en janvier-février 1930, mars 1931, décembre 1933, novembre 1934, décembre 1937 et février 1940.
- La crue de 1941 causa d'importants dégâts dans la vallée de l'Ouerrha où un débit maximum de 5 000 m<sup>3</sup>/s fut enregistré.

- En 1942 une crue conjuguée du Sebou et de l'Ouerrha donna 3 300 m<sup>3</sup>/s et les débordements durèrent 54 heures.
- De très faibles débordements furent observés en février-mars 1947.
- En janvier 1948 une crue de l'Ouerrha entraîna des débordements pendant 40 heures.
- La crue de décembre 1950-janvier 1951 fut brutale. L'Ouerrha transita un débit minimum de 6 000 m<sup>3</sup>/s ; le Sebou un débit de 1 000 m<sup>3</sup>/s. 160 000 hectares furent inondés.
- En février et mars 1955 une succession d'ondes de crue, provoqua des débordements pendant 164 heures sans que le débit de conjonction n'ait dépassé 3 100 m<sup>3</sup>/s.
- En février 1956 et décembre 1957 des débordements assez importants furent observés.
- La crue de janvier 1960 fut déclenchée par des apports du Sebou et en particulier d'un de ses affluents du cours moyen, l'oued Inaouène 100 000 ha furent inondés.
- Enfin en janvier 1963, où l'hiver fut particulièrement humide, se produisit la plus forte crue connue due à une conjonction d'une crue sur l'oued Sebou (3600 m<sup>3</sup>/s) et d'une crue sur l'oued Ouerrha (6050 m<sup>3</sup>/s). La hauteur et l'intensité des précipitations furent exceptionnellement élevées : 1098 mm en 27 jours à Kétama dans le Rif. Le débit au confluent fut estimé à 8 000 m<sup>3</sup>/s. 180 000 ha furent inondés. Estimation des dégâts : 13 à 14 milliards de francs.
- En février 1969, le débit maximum du Sebou atteignit 3 585 m<sup>3</sup>/s le 28/2 à 6 heures, celui de l'Ouerrha 2 930 m<sup>3</sup>/s le 28/2 à zéro heure.
- La crue dura 5 jours. 100 000 ha furent submergés. Estimation des dégâts 3 milliards de francs.
- Début janvier 1970, 2 crues successives (du 31/12/69 au 5/1/70 et du 10/1/70 au 17/1/70) furent également provoquées par la conjonction de crues sur le Sebou et l'Ouerrha (débits maximum 2 620 m<sup>3</sup>/s et 6 550 m<sup>3</sup>/s). 150 000 ha furent submergés.  
Estimation des dégâts — 10 milliards de francs.
- Enfin début avril 71, (crue très tardive) une nouvelle conjonction des crues du Sebou et de l'Ouerrha (1 300 m<sup>3</sup>/s et 3 600 m<sup>3</sup>/s) provoqua des débordements durant 3 jours sur une superficie de 80 000 hectares. Estimations des dégâts : 3 milliards de francs.

D'une manière générale on peut observer que les inondations ont lieu entre décembre et mars. Le rapprochement dans le temps de crues importantes ces dernières années, traduit la détérioration du bassin versant (particulièrement le Rif) qui joue un rôle de moins en moins grand pour tamponner la crue.

#### Analyse statistique des crues du Sebou et de ses affluents :

Les mesures deviennent plus fréquentes à partir de 1931. L'étude des crues des affluents de l'Ouerrha ne sont observées que depuis 1950-52, cependant l'insuffisance des années d'observation est compensée dans une certaine mesure par la grande fréquence et la forte densité des crues observées au cours de cette dernière période.

Les diverses méthodes statistiques employées conduisent à des résultats très voisins.

Ainsi à titre d'exemple, si l'on applique aux données fournies par la station de l'Ourtzaghi sur l'Ouerrha, la loi d'ajustement de Galton qui a pour expression  $z = \log (Q - Q_0) + b$  on trouve les valeurs suivantes :

- crue decennale ( $F = 0,10$ ) :  $Q_{10} = 4 032$  m<sup>3</sup>/s
- crue centenaire ( $F = 0,010$ ) :  $Q_{100} = 5 895$  m<sup>3</sup>/s
- crue millinaire ( $F = 0,001$ ) :  $Q_{1000} = 7 590$  m<sup>3</sup>/s

Si l'on applique à la même série la loi de Gumbel qui a pour expression :  $F(Q) = \exp [-e^{-a(Q-Q_0)}]$  on trouve des résultats très proches de ceux obtenus par l'ajustement par la loi de Galton :

- $F = 0,10$   $Q_{10} = 4 011$  m<sup>3</sup>/s
- $F = 0,01$   $Q_{100} = 6 221$  m<sup>3</sup>/s
- $F = 0,001$   $Q_{1000} = 8 399$  m<sup>3</sup>/s

D'autres méthodes encore (Foster-Pearson III et Gibrat) ont été employées et les résultats obtenus sont toujours convergents.

- D'autre part on a procédé à un contrôle des résultats de caractère plus général en utilisant la méthode dite des « courbes enveloppes » qui représentent les débits des plus fortes crues enregistrées en divers points du monde en fonction des superficies des bassins versants.

- A part le débit de pointe de la crue, la durée de la crue et donc le volume total écoulé ont une grande importance. Cependant on n'a pas pu déter-

miner une corrélation entre débit de pointe et volume des crues de l'Ouerrha. De même aucune corrélation n'a pu être établie entre les précipitations exceptionnelles mal connues dans le Rif et le ruissellement et ainsi on s'est trouvé dans l'impossibilité d'appliquer les méthodes d'hydrologie analytique.

- Conjonction des crues du Sebou et de l'Ouerrha : La connaissance de l'intensité et de la fréquence des crues au confluent est extrêmement importante, mais faute d'observations correctes, ces données sont mal connues. On pourrait rechercher une limite supérieure des débits de fréquence donnée en fonction des débits et des fréquences connus aux stations de M'Jara sur l'Ouerrha et d'Azib-es-Soltane sur le Sebou. On commettrait ainsi une erreur par excès

car on négligerait les laminages naturels qui se produisent entre ces 2 points et le confluent. Connaissant les lois débits - fréquences à ces 2 stations, le problème consiste à chercher une fonction à 2 variables aléatoires liées par un certain coefficient de corrélation. Les résultats de cette étude théorique devront être vérifiés par des mesures systématiques sur le terrain et à cet effet plusieurs stations de jaugeages sont en cours d'installation.

- Débits et fréquences des crues aux principales stations du bassin du Sebou :

F = fréquence. q = débit spécifique exceptionnel en m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>.

Débits exprimés en m<sup>3</sup>/s.

STATIONS	CRUE MAXIMALE OBSERVEE	F = 1/2	F = 1/10	F = 1/20	F = 1/50	F = 1/100	F = 1/1000	q
M'Jara sur l'Ouerrha	7 950 m <sup>3</sup> /s en 1932-33	2 670	5 200	6 500	8 000	8 900	13 000	2,27
Ourtzagh sur l'Ouerrha	4 845 m <sup>3</sup> /s en janv. 1963	2 380	4 150	5 000	6 000	6 700	9 500	2,32
Pont du Sker sur affluent du Ouerrha	768 m <sup>3</sup> /s en janv. 1963	267	620	760	935	1 090	1 480	3,84
Babouender sur l'Ouerrha	1 788 m <sup>3</sup> /s en janv. 63	582	1 225	1 535	1 960	2 270	3 340	2,10
Rhafsaï sur affluent Ouerrha	1 215 m <sup>3</sup> /s en 1951-52	570	1 100	1 325	1 600	1 830	2 550	3,35
Tafrant sur affluent du Ouerrha	1 420 m <sup>3</sup> /s en janv. 63	810	1 350	1 550	1 900	2 020	2 700	2,86
Aïn-Timedrine sur le Sebou	1 107 m <sup>3</sup> /s en 1959-60	290	575	750	1 000	1 200	2 000	0,46
Pont du Sebou sur le Sebou	2 700 m <sup>3</sup> /s en 1962-63	690	1 600	2 100	2 750	3 300	5 500	0,35
Tissa sur le Lébène : affluent du Sebou	—	265	600	750	890	1 180	1 900	2,44
Touaba sur l'Inaouène	—	275	670	875	1 150	1 420	2 500	0,74

#### Etude des méthodes de protection contre les crues du Sebou et affluents :

3 grands types d'aménagement ont été prévus par le Projet Sebou (1) :

- Ecrêtement des crues par installation de barrages qui serviraient d'autre part à l'irrigation et la production électrique.
- Aménagement dans la plaine du Rharb.

— Aménagement des bassins versants.

#### Rôle des barrages vis-à-vis des crues :

##### a) Ecrêtement des crues de l'Ouerrha.

On pensait autrefois qu'une retenue aménagée sur le Sebou moyen permettrait d'assurer la plus grande partie des besoins agricoles de la plaine du Rharb et que, par conséquent, un barrage sur l'Ouerrha aurait été destiné presque exclusivement

à laminier les crues. C'est pour ces raisons que les premières études du projet Sebou ont été orientées vers une protection contre les crues très exceptionnelles de l'Ouerrha (crue millénaire). Les résultats de ces études furent décevants. Ainsi la pointe de crue de 13 000 m<sup>3</sup>/s pourrait être abaissée à 9 000 ou 7 000 m<sup>3</sup>/s, mais les volumes débordés dans le Rharb resteraient encore trop importants. Aussi on a renoncé à cette solution et on a cherché à se protéger contre des crues « moins exceptionnelles ».

Les études du projet Sebou ont déterminé les capacités nécessaires pour laminier les plus fortes crues connues de l'Ouerrha en fonction du débit évacué en permanence par les organes de vidange du barrage :

Q. évacué	1 000 m <sup>3</sup> /s	750 m <sup>3</sup> /s	500 m <sup>3</sup> /s
Crues			
1927-28	225	325	460
1933-34	630	870	1 140
1941	550	730	1 030
1950-51	330	380	440
1959-60	150	180	270
1962-63	950	1 220	1 510

C'est sur la base de ces résultats qu'a été choisie la capacité de tranche de laminage du barrage de M'jara : 980 millions de m<sup>3</sup> dont 500 en toute époque et 400 jusqu'à la fin février avec un débit permanent lâché de 1 000 m<sup>3</sup>/s. Une autre solution a été étudiée par ailleurs par le Projet Sebou : elle consiste à substituer au grand barrage de M'jara, des petits barrages sur les divers affluents de l'Ouerrha. Mais l'efficacité de ces barrages s'est avérée faible car on ne pourra leur affecter des tranches de laminage importantes s'ils doivent en outre être utilisés pour l'irrigation. D'autre part sur 2 des plus importants affluents de l'Ouerrha on n'a pas trouvé de sites favorables à des barrages.

#### b) Ecrêtement des crues du Sebou :

Le problème de contrôle des crues du Sebou, proprement dit, se pose de façon toute différente car il n'existe pas sur le Moyen-Sebou de site favorable à la création d'une grande retenue. On ne peut donc espérer laminier que les crues de l'Inaouène par le barrage en cours de construction à Arabat et celle du Haut-Sebou par le barrage prévu à Dar-El-Arsa.

Les crues des autres affluents resteraient incontrôlées à moins que l'on ne construise des barrages sur ces affluents.

La somme des superficies des bassins versants d'Arabat et de Dar-El-Arsa représente 57 % de la superficie du bassin versant du Sebou proprement dit et la somme des débits moyens contrôlés par les 2 barrages atteint 71 % du débit total du Sebou. Ces chiffres mesurent en quelque sorte la limite des possibilités des barrages d'Arabat et de Dar-El-Arsa en ce qui concerne le laminage des crues.

Ainsi les crues cinquantennaires peuvent être laminées dans des conditions satisfaisantes par ces 2 barrages, à condition de prévoir des tranches de laminage de 100 millions de m<sup>3</sup> de capacité et de régler les vidanges de chacun des ouvrages pour un débit de 500 m<sup>3</sup>/s. Il convient d'ajouter que l'on peut affecter au laminage des crues une fraction de la tranche réservée en principe aux atterrissements tout au moins pendant une certaine période. D'autre part les barrages secondaires établis sur les affluents du Sebou peuvent avoir une action, quoique limitée, sur les crues grâce à l'effet de laminage de leur plan d'eau.

#### Les aménagements dans la plaine du Rharb

Les études du projet du Sebou ont montré que les débordements commençaient pour un débit de 1 300 m<sup>3</sup>/s environ. L'ensemble des barrages que l'on pourrait construire sur l'Ouerrha, le Sebou et ses Affluents ne pourraient pas donner une protection totale contre les débordements pour des débits supérieurs à ceux de la fréquence cinquantenaire. Si l'on veut, une fois l'équipement intégral amont réalisé (ou si l'on ne peut attendre l'équipement amont), obtenir une sécurité plus grande, il faut établir dans la plaine elle-même des ouvrages de protection.

On peut répartir ces ouvrages en 2 groupes :

- le premier fait appel à l'aménagement du lit actuel : endiguement du lit mineur de l'oued ou aménagement de zones d'épandage.
- le second consiste à détourner la partie du flot que le chenal de l'oued, même aménagé, ne peut transiter.

#### a) Endiguement du Bas-Sebou :

Un calcul rapide permet d'écarter cette éventualité comme solution intégrale et indépendante. Pour doubler le débit actuel (de 1 200 à 2 500 m<sup>3</sup>/s) il faut établir un endiguement continu (sur 2 fois 240 km) dont le coût serait d'environ 150 millions de dirhams. Un tel doublement du débit serait à peine suffisant pour assurer l'efficacité des écrête-

ments des barrages sur les crues de fréquence inférieure à la cinquantenaire. Ainsi seul le second groupe de solutions pourrait répondre au problème posé.

#### b) Aménagement des zones d'épandage

Une telle solution consiste dans son principe à diriger les eaux débordées dans les dépressions naturelles de la plaine où un aménagement sommaire permet de les stoker et de laminar leur débit. Les eaux s'évacuent ensuite par des émissaires de faible débit. Dans le cas particulier de la plaine du Rharb, cet aménagement est facilité par la présence de vastes dépressions naturelles et d'un système de canaux collecteurs formant émissaires à la mer.

• La capacité actuelle d'évacuation des grands canaux collecteurs d'assainissement est de :

- 125 m<sup>3</sup>/s, soit 11 millions m<sup>3</sup>/j en rive droite du Sebou
- 200 m<sup>3</sup>/s, soit 17 millions m<sup>3</sup>/j en rive gauche

• Cinq dépressions naturelles peuvent constituer des casiers d'inondation d'une capacité de :

- 300 millions de m<sup>3</sup> au Nord du Sebou (superficie : 20 000 ha)
- 430 millions de m<sup>3</sup> au Sud (superficie inondée : 36 000 ha)

Quelques endiguements légers seraient nécessaires pour obtenir ces dépressions.

• Ainsi, sous réserve de maîtriser l'écoulement de l'eau dans les chenaux de débordement, il est possible de contrôler sans travaux importants une crue de l'importance de celle de 1963 qui n'aurait submergé que 56 000 ha de casiers d'inondation contre 150 000 ha. effectivement inondés.

• Un tel type d'aménagement ne peut évidemment pas assurer une protection complète de la plaine mais il constitue l'investissement le plus faible car il utilise au mieux les conditions naturelles (points de débordements, dépressions) et l'infrastructure existante.

#### c) Aménagement par chenaux de dérivation.

On a vu précédemment que la capacité de transport du lit du Sebou ne dépassait pas 1 300 m<sup>3</sup>/s dans l'état actuel du chenal et que par la mise en œuvre d'endiguements raisonnables, on ne pouvait atteindre plus de 2 000 m<sup>3</sup>/s environ. Un tel débit n'est pas à l'échelle du problème de la protection du Rharb de sorte que la canalisation des crues doit être prévue dans des chenaux artificiels

(By-pass) dérivant les eaux excédentaires du Sebou en dehors du chenal naturel. Deux chenaux ont été ainsi conçus :

- l'un en rive droite du Sebou débouchant dans l'Océan calibré pour 1 500 à 2 500 m<sup>3</sup>/s.
- l'autre en rive gauche débouchant dans le Sebou lui-même et transitant de 1 500 à 2 000 m<sup>3</sup>/s.

Cet aménagement serait complété par :

- un endiguement du Sebou dans la région du confluent Sebou-Ouerrha pour contenir les débits des crues avant dérivation dans les chenaux.
- un endiguement en aval vers la restitution du chenal rive gauche.
- l'endiguement du Sebou entre Moghrane et Mechra Bel Ksirri pour fixer sa capacité de transport à 1 500-2 000 m<sup>3</sup>/s.
- un casier de submersion en rive gauche pouvant recevoir en cas de forte crue, l'excédent d'eau que les chenaux ne pourraient transiter.

Aussi en combinant par exemple un chenal rive droite de 2 000 m<sup>3</sup>/s, un chenal rive gauche de 1 500 m<sup>3</sup>/s et en fixant à 1 500 m<sup>3</sup>/s la capacité de transport du Sebou, un tel dispositif pourrait canaliser au total 5 000 m<sup>3</sup>/s.

Le dispositif fonctionnerait ainsi :

- Jusqu'à 1 500 m<sup>3</sup>/s les eaux sont canalisées dans le lit du Sebou.
- De 1 500 m<sup>3</sup>/s à 3 500 m<sup>3</sup>/s le chenal rive droite les évacue.
- Lorsque le débit de crue dépasse 3 500 m<sup>3</sup>/s le chenal rive gauche entre en fonctionnement et permet d'évacuer les crues jusqu'à un débit total de 5 000 m<sup>3</sup>/s.
- Au delà de 5 000 m<sup>3</sup>/s les eaux sont toujours dérivées par le chenal rive gauche mais ce dernier est saturé. Elles s'accumulent alors dans le casier d'inondation dont la capacité est d'environ 200 millions de m<sup>3</sup>. Ce casier se vide progressivement dans le chenal dès que le débit de la crue descend au-dessous de 5 000 m<sup>3</sup>/s.

Caractéristiques des ouvrages :

- ouvrages de prise : trois sont prévus, 2 pour le chenal rive droite et 1 pour le chenal rive gauche. Ce sont de simples déversoirs latéraux réalisés par un rideau de palplanches suivi ou non d'un bassin de dissipation d'énergie suivant la hauteur de la chute.
- chenaux de dérivation : Ils seraient réalisés par 2 digues espacées de 1 à 2 km d'une hauteur de 2 à 3 m, avec pente des talus de 2,5/1 et largeur en crête de 5 m. La terre sera prélevée

latéralement ce qui permettra de constituer un contre-canal de chaque côté qui facilitera l'assainissement du chenal.

- percement de la dune côtière : pour le débouché du chenal rive droite de l'Océan, il est nécessaire de percer la dune côtière dont la crête atteint dans cette région + 24 m. Le volume total des terrassements serait de 3,6 millions de m<sup>3</sup>.
- ouvrages de franchissement : 4 ouvrages de franchissement importants sont nécessaires au passage des routes principales et des voies ferrées. Ils seraient réalisés par des dalots multiples en béton armé (4 m x 4 m de débouché unitaire).

Pour apprécier l'efficacité du dispositif, les ingénieurs du Projet Sebou ont déterminé les probabilités de fonctionnement des différents ouvrages pour différentes capacités du dispositif en utilisant

#### 4. — ETUDE DES CRUES DE L'OUUM-ER-BIA

##### Caractéristiques du bassin :

*Situation géographique : Hydrographie.*

Le bassin versant de l'Oum-Er-Bia a une superficie de 34 000 km<sup>2</sup> environ et draine plusieurs régions géographiques :

- le bassin supérieur de l'Oum-Er-Bia.

C'est une zone essentiellement montagneuse ; elle est constituée de contreforts du Moyen-Atlas. L'altitude moyenne de cette région est de 1 350 m alors que les plus hauts sommets atteignent une altitude de 2 400 m. La pluviométrie moyenne annuelle s'élève à 800 mm, le taux de boisement est de l'ordre de 55 %. Les profils longitudinaux de l'Oum-Er-Bia supérieurs sont irréguliers, et à fortes pentes.

- Les bassins des grands affluents du Haut-Atlas.

Une autre partie montagneuse du bassin est constituée des bassins des grands affluents méridionaux de l'oued, à savoir : l'oued El Abid et l'oued Tessaout, Lakhdar. Ils drainent la partie centrale et Est du versant Sud-Ouest du Haut-Atlas. L'oued El Abid est l'affluent le plus important de l'Oum-Er-Bia aussi bien du point de vue de la superficie de son bassin versant qu'en ce qui concerne ses débits. Il est limité à l'Est par les bassins de la Moulouya et du Rif et au Sud par le bassin de l'oued Dadès (affluent de l'oued Draa). Le bassin versant de l'oued Tessaout avec l'oued Lakhdar se situe au Sud-Est du bassin de l'oued El Abid. L'altitude moyenne de ces bassins est de 2 000 m environ.

les courbes des débits classés. Aussi par exemple, dans le cas où le barrage de M'Jara ne serait pas construit, le dispositif canalisant 5 000 m<sup>3</sup>/s ne donnerait lieu à débordement dans le casier d'inondation qu'une fois tous les 20 ans. Un tel dispositif assurerait donc une protection très efficace de la plaine.

#### CONCLUSION

Le Projet Sebou avait étudié certaines solutions techniques permettant la protection de la plaine du Gharb. Cependant au vu des dernières inondations, et surtout de l'évolution des caractéristiques des bassins versants, donc des crues elles-mêmes, les services de l'hydraulique ont lancé des études tenant compte de la dynamique de cette évolution. Les résultats ne sont pas encore connus mais il est probable qu'ils conduiront à des solutions encore plus complexes.

Les précipitations sont plus faibles que sur le Moyen-Atlas : 600 mm sur le bassin de la Tessaout et 500 mm/an sur celui de l'oued El Abid.

Le taux de boisement dépasse 50 % dans cette région.

Les profils longitudinaux des affluents mentionnés sont : réguliers et à fortes pentes.

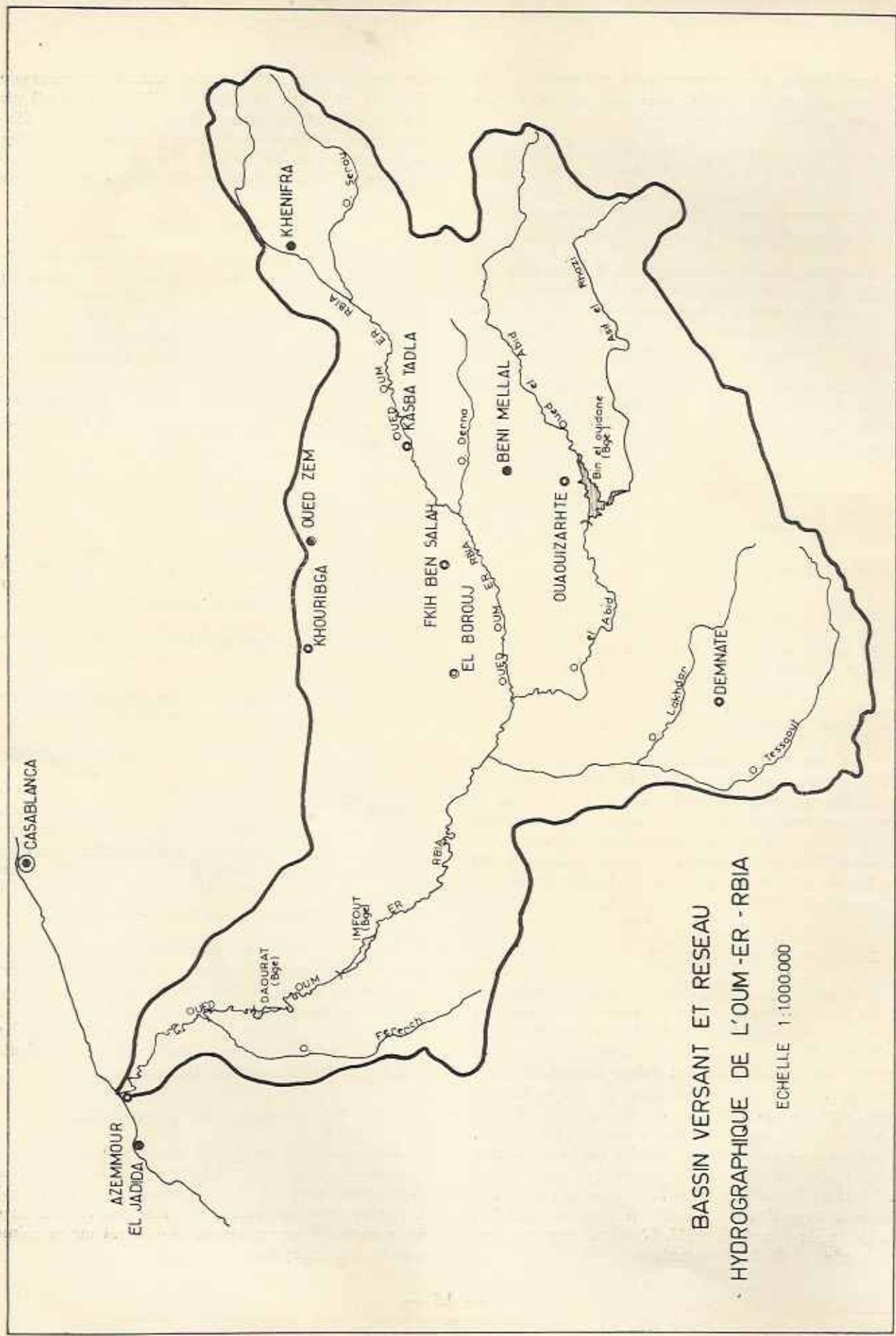
- Le bassin du cours moyen de l'Oum-Er-Bia.

Le cours central de l'Oum-Er-Bia traverse la cuvette du Tadla tout en drainant au Nord une grande partie du plateau crétacé des « phosphates » et au Sud les contreforts du Haut-Atlas. Les plus hauts sommets à la limite Nord ne dépassent guère 1 000 m alors qu'au Sud dans la direction de l'oued El Abid ils atteignent l'altitude de 2 400 m.

Les précipitations moyennes annuelles sont remarquablement inférieures à celles du haut bassin. Dans cette région, l'Oum-Er-Bia n'a pratiquement pas d'affluents rive-droite sauf les quelques thalwegs qui l'alimentent durant les averses, en rive gauche, il reçoit ses affluents les plus importants du Haut-Atlas : El Abid-Tessaout -Lakhdar.

- Le bassin inférieur de l'Oum-Er-Bia.

L'Oum-Er-Bia supérieur s'écoule à travers une région très pauvre en précipitations et en végétation. L'altitude varie de 0 (à l'embouchure à l'océan) à 700 m. Contrairement à ce qu'on pourrait attendre le cours inférieur de l'Oum-Er-Bia est moins calme que le cours moyen.



BASSIN VERSANT ET RESEAU  
 HYDROGRAPHIQUE DE L'OUM-ER-RBIA

ECHELLE 1:1000000

En effet les rives abruptes, les tournants aigus, les grandes vitesses sont les caractéristiques de l'Oum-Er-Bia inférieur.

Parmi ses affluents dans ce tronçon on peut citer :

- en rive droite : l'oued Igli, l'oued Khibane, l'oued Bredia et l'oued cheguigua.
- en rive gauche : l'Oum Ahnou, l'oued Tarfa, l'oued Tinoun et le plus important : l'oued Faregh.

Tous ces oueds tarissent en été, en hiver ils apportent de grandes quantités d'eau : des crues violentes y sont possibles.

#### Climatologie :

Le vaste bassin de l'Oum-Er-Bia qui s'étend des zones montagneuses de l'Atlas jusqu'à la côte atlantique présente au point de vue climat de très nombreux types.

#### Températures :

• Températures minimum : variables selon l'altitude.

A la station d'Ifrane en montagne la moyenne des températures minima est de 4,3° en janvier et de 12,1° en août.

A la station de Kasba Tadla en plaine cette moyenne est de 4,2° en janvier et atteint 20,4° en août.

Température maxima : là aussi on constate une loi de décroissance selon l'altitude.

A Ifrane la moyenne des températures maxima du mois de janvier et de 8,6° et celle du mois d'août est de 30,2°.

A Kasba Tadla cette moyenne est de 16,8° en janvier et de 39,2° en juillet.

#### Précipitations :

La carte des isohyètes du bassin montre que les massifs montagneux font figure de secteurs privilégiés notamment le Moyen-Atlas et la moitié Nord-Ouest du Haut-Atlas. L'isohyète de 900 mm enveloppe des parties notables de la surface de réception dans le bassin versant moyen atlasique. Par contre, la même isohyète 900 mm ne recouvre que quelques sommets du Haut-Atlas.

Les précipitations diminuent rapidement vers l'embouchure. Dans le secteur central se situe une enclave vraiment steppique, plus développée sur la rive gauche de l'oued.

### Régime de l'Oum-er-Rbia et de ses affluents :

#### a) Equipement hydrométrique :

Liste des stations de jaugeage du bassin.

Station de jaugeage	Cours d'eau	Année d'installation
1. Khénifra .....	Oum-Er-Bia	1927
2. Dehra eloued ...	> >	1953
3. Kasba Tadla ...	> >	1936
4. Kasba Zidania ...	> >	1938
5. Pont route 133 ..	> >	1938
6. Talmest .....	> >	1963
7. Mechra ben Abbou	> >	1918
8. Im Fout .....	> >	1941
9. Si Saïd Machou ..	> >	1927
10. Ouaurhint .....	El Abid	1924
11. Bin El Ouidane ..	> >	1943
12. Agadir Bou Acheiba .....	Tessaout	1931
13. Timi N'outine ...	>	1963
14. Bissi-Bissa .....	>	1963
15. Assaka .....	Lakhdar	1931
16. Sidi-Driss .....	>	1963
17. Tilougrute Hom- madi .....	Srou	1954
18. El-Herri .....	Chbouka	1954
19. Ououmana .....	Ououmana	1954
20. Moulay-Bou- Tebri .....	Derna	1963
21. Taghzirt .....	>	1963

#### b) Les débits

Le calcul des débits caractéristiques n'a pas été une tâche facile en raison de l'existence de plusieurs barrages et l'irrigation de 3 périmètres avec les eaux de l'Oum-Er-Bia et de ses affluents qui perturbent profondément le régime naturel de l'oued.

Chaque sous-bassin versant sera étudié séparément :

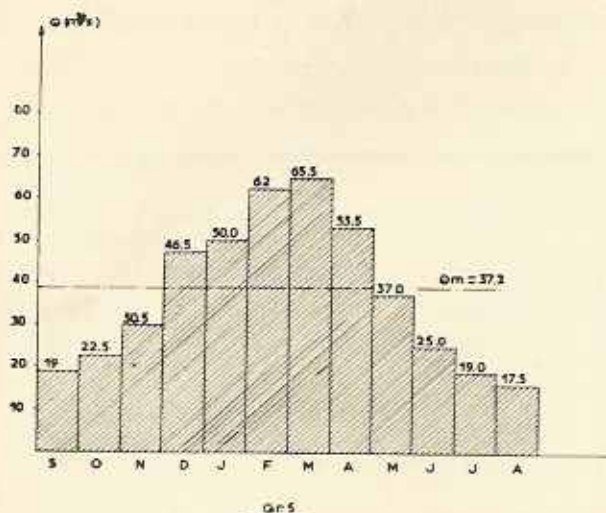
— Cours moyen de l'Oum-Er-Bia : station de Kasba-Tadla :

— Superficie du bassin versant dominé par la station : 4 308 km<sup>2</sup>

— Précipitations moyennes annuelles : 775 mm

— Débit fictif continu : 37,2 m<sup>3</sup>/s.

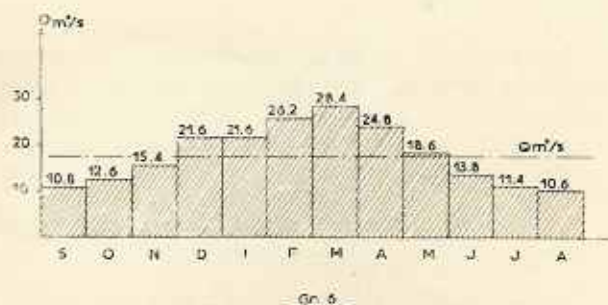
Les débits naturels ont été considérés comme la somme des débits déversés au barrage et ceux dérivés par le canal d'irrigation.



Débits moyens mensuels de la période  
1933-34 - 1962-63

- Cours supérieur de l'Oum-Er-Bia : station de Khénifra
- Superficie du bassin versant : 1 086 km<sup>2</sup>
- Précipitations moyennes annuelles : 905 mm
- Débit fictif continu : 18,3 m<sup>3</sup>/s

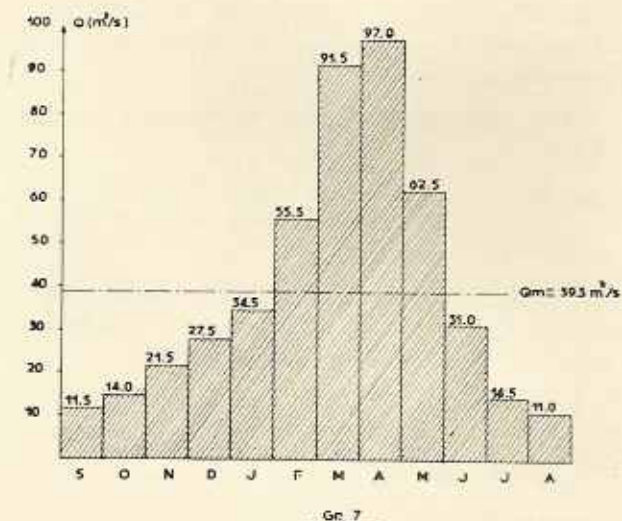
La corrélation entre les débits moyens mensuels Kasba Tadla - Khénifra s'exprime par la relation :

$$Q_{KH} = 0,905 Q_{KT}^{0,85}$$


Débits moyens mensuels de la période  
1933-34 - 1962-63

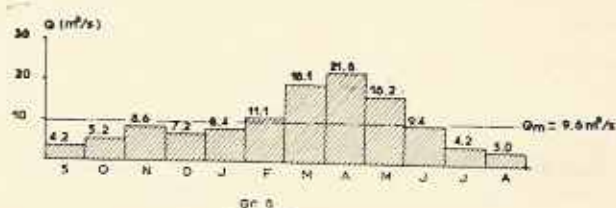
• Les grands affluents du Sud :

- Station de Bin El Ouidane sur l'oued El Abid :  
Superficie du bassin versant : 6 467 km<sup>2</sup>  
Précipitations moyennes annuelles : 494 mm  
Débit fictif : 127,5 m<sup>3</sup>/s.



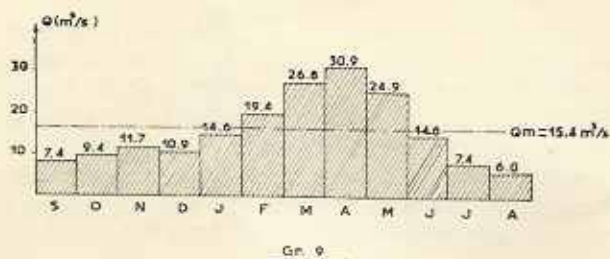
Débits moyens mensuel de la période  
1933-34 - 1962-63

- Station d'Agadir Bou Acheiba sur l'oued Tessaout  
Superficie du bassin versant : 1 491 km<sup>2</sup>  
Précipitations moyennes annuelles : 617 mm  
Débit fictif continu : 9,6 m<sup>3</sup>/s.



Débits moyens mensuels de la période  
1933-34 - 1962-63

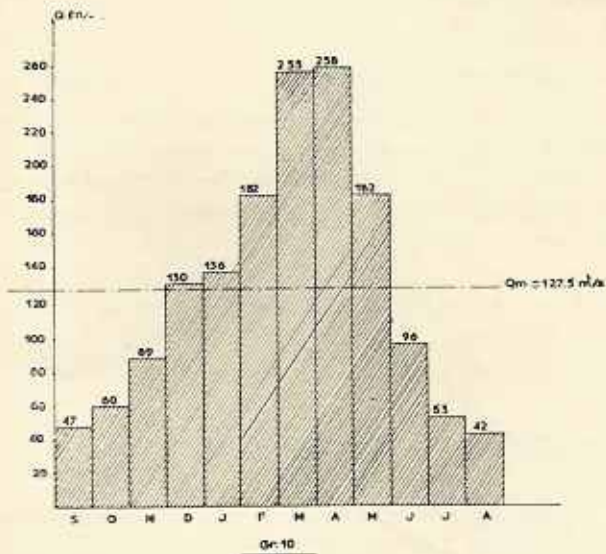
- Station d'Assaka sur l'oued Lakhdar  
Superficie du bassin : 2 606 km<sup>2</sup>  
Précipitations moyennes annuelles : 629 mm  
Débit fictif continu : 15,4 m<sup>3</sup>/s.



Débits moyens mensuels de la période  
1933-34 - 1962-63

• Le Bas Oum-Er-Bia : station d'Imfout

Superficie du bassin versant : 30 614 km<sup>2</sup>  
 Précipitations annuelles : 500 mm  
 débit fictif continu : 127,5 m<sup>3</sup>/s.



Débits moyens mensuels de la période  
 1933-34 - 1962-63

### Etude statistique des crues de l'Oum-er-Rbia

Les crues dans le bassin de l'Oum-Er-Bia ont lieu à partir du mois d'octobre jusqu'à fin mai. Elles proviennent des averses qui tombent sur l'ensemble ou partie du bassin versant. En outre, la fonte des neiges, abondantes dans le Moyen et le Haut-Atlas provoquent des crues de printemps qui peuvent devenir menaçantes quand elles se produisent simultanément avec des averses générales. Cependant les crues de l'Oum-Er-Rbia provoquent rarement des débordements dans la partie basse du bassin et ceci essentiellement pour 2 raisons.

- le profil de l'oued dans la partie basse est très encaissé
- Il existe sur l'Oum-Er-Rbia et ses affluents plusieurs barrages dont le rôle principale est de fournir de l'eau pour l'agriculture et la production d'énergie, mais qui peuvent en même temps assurer un amortissement des crues.

L'étude des crues a été faite d'après les données recueillies à Kasba Tadla et Kasba Zidania pour l'Oum-Er-Rbia central, à Bin El Ouidane sur El Abid, et à Imfout pour le bas Oum-Er-Bia.

Deux méthodes statistiques ont été utilisées pour la détermination des débits de différentes fréquences. La loi de Pearson III et la loi de Galton-Gibrat.

Le tableau ci-après résume les résultats de cette étude :

STATION DE JAUGEAGE	Débits maxima journalier m <sup>3</sup> /s		Débits instantanés maxima m <sup>3</sup> /s	
	PEAR- SON	GIBRAT	PEAR- SON	GIBRAT
Kasba - Tadla				
Q 0,1 %	3 300	3 660		5 620
Q 1 %	2 160	2 190		
Q 10 %	1 080	1 050		
Kasba Tidania				
Q 0,1 %		3 730	4 400	5 390
Q 1 %		2 180	2 980	3 100
Q 10 %		1 020	1 550	1 450
Bin El Ouidane				
Q 0,1 %			2 440	2 830
Q 1 %			1 620	1 630
Q 10 %			827	680
Im Fout				
Q 0,1 %		5 525	5 454	6 760
Q 1 %		3 350	3 860	4 170
Q 10 %		1 710	2 200	2 140

Q. inst. max.

Le rapport  $\frac{Q. inst. max.}{Q. jour. max.}$  à la station d'Imfout varie

de 1,23 à 1,25 alors qu'à Kasba Zidania, il varie de 1,42 à 1,44. Les auteurs de l'étude ont considéré que ce rapport est pratiquement constant en chaque station.

Ainsi étant donné qu'à Kasba Tadla on ne dispose pas de données sur les débits instantanés maxima ; on a multiplié les résultats obtenus d'après la méthode de Galton-Gibrat pour les débits maxima journaliers avec le coefficient 1,44 (correspondant à Kasba Zidania en considérant que les 2 stations ont les mêmes caractéristiques vu leur proximité.

La méthode de l'hydrogramme unitaire n'a pas été appliquée parce que les données disponibles sur les précipitations sont incomplètes. D'autre part les auteurs de l'étude ont considéré que les formules empiriques mise au point sur la base des études effectuées dans différentes régions du monde (méthode des courbes enveloppées par exemple) ne peuvent être appliquées sans une certaine prudence sur les oueds d'Afrique du Nord.

D'autre part à partir des valeurs obtenues pour le débit de crue millénaire sur plusieurs profils, l'étude a essayé de déterminer une loi valable pour l'ensemble du bassin de l'Oum-Er-Rebia. Cet ajustement

à été basé sur l'hypothèse que 
$$QO, 1 \% \text{ inst. max} = \frac{S}{S}$$

q max m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> dépend en premier lieu de la superficie du bassin et des précipitation annuelle au droit de chaque profil.

$$q \text{ max} = f(P, S) = A S^b P^c$$

Cette équation ne comporte pas tous les paramètres influençant les débits de crue ; cependant, avec 2 paramètres essentiels, elle a fourni des résultats très acceptables. Les constantes A, b, c ; ont été déterminées d'après les méthodes des carrés minima

$$\text{et on a obtenu l'expression : } q \text{ max} = \frac{0,016 P^{1,47}}{S^{0,64}}$$

## 5. — ETUDE DES CRUES DE LA MOULOUYA ET SES AFFLUENTS

### Caractéristiques du bassin versant de la Moulouya :

#### a) Situation géographique - Réseau hydrographique :

Le bassin versant de la Moulouya est situé au Nord-Est du Maroc. Il comprend la région entre le versant Est du Moyen-Atlas et le versant Nord-Ouest du Haut-Atlas. Il draine également les versants Est du Rif et les Hauts plateaux ; ces derniers sont traversés par son affluent principal de rive droite : l'oued Za. La Moulouya se jette dans la Méditerranée au Nord de la ville de Berkane, terminant ainsi son cours dans la plaine des Triffa.

Les caractéristiques principales du bassin versant de la Moulouya sont sa forme étirée et son réseau hydrographique peu développé. Ses 2 affluents importants de rive gauche sont : l'oued Melloulou et l'oued M'soun ; ceux de rive droite sont : l'Ansegmir, le Za et le Ksob. Toute une série d'affluents que la Moulouya reçoit des 2 rives n'ont que très peu d'influence sur le régime de son écoulement. Le bassin versant de la Moulouya a une superficie totale de 53 726 km<sup>2</sup>. On peut le subdiviser en :

— La bassin versant de la haute-Moulouya comporte la partie du bassin versant allant jusqu'au confluent avec l'Ansegmir et les bassins versants des 2 affluents l'oued Si Ayad et l'oued Shout Sherg ; il s'étend donc de la source jusqu'à la station de Missouri.

— La partie centrale du bassin de la Moulouya entre les stations de Missouri et de Dar El Caïd.

D'après cette équation les valeurs suivantes ont été obtenues aux différents profils, pour la crue millénaire :

— Dechra El Oued :	5 400 m <sup>3</sup> /s
— Parcours Kasba Tadla Kasba Zidania	5 600-5 700 m <sup>3</sup> /s
— Bin El Ouidane	3 400 m <sup>3</sup> /s
— Assaka	3 540 m <sup>3</sup> /s
— Agadir Bou Acheiba	2 800 m <sup>3</sup> /s

Les écarts entre ces valeurs et celles calculées d'après les méthodes statistiques varient de ± 10 %

l'exception de la station de Bin El Ouidane où la différence est de 20 % par excès avec la formule  $Q \text{ max} = f(P, S)$ .

Ceci nous amène à la conclusion que l'équation obtenue est représentative pour le calcul de la crue millénaire sur l'Oum-Er-Bia de Dechra El Oued à Im Fout.

Cette dernière contrôle le bassin versant de l'oued Melloulou l'affluent le plus important de la rive gauche.

— Le bassin de la Basse Moulouya y compris les bassins versants du M'soun en rive gauche, du Za et du Ksob en rive droite.

Il est utile de souligner le caractère particulier du bassin versant de l'oued Za. Ce bassin s'étend sur les Hauts Plateaux et n'a pratiquement pas de réseau hydrographique bien marqué. Pourtant une partie des eaux originaires des Hauts Plateaux parviennent à atteindre l'oued avant de se perdre dans le sol et participent donc à l'écoulement superficiel sur le Za.

La superficie de ce bassin est de l'ordre de 1 800 km<sup>2</sup> ; il intervient dans l'écoulement moyen lorsqu'il s'agit des apports annuels, alors qu'en période de crue c'est le ruissellement sur la superficie effective du bassin versant soit 8 000 km<sup>2</sup> qui influence le régime de l'oued Za.

#### b) Topographie - Géologie

Les pays de la Moulouya, qui s'allongent du Sud-Ouest au Nord-Est entre les hauts plateaux et le Moyen-Atlas plissé, décrivent un grand couloir aride constitué par de vastes glacis inclinés de part et d'autre vers le fleuve. Ils se prolongent en amont par le fossé de la Haute Moulouya, enserré entre le Haut et le Moyen-Atlas et en aval par un cha-pelet de basses plaines séparées par des gorges qui les relie à la mer.

• Au Sud-Est, un haut relief tabulaire, constitué de plateaux qui prolongent ceux d'Algérie, atteint environ 1 000 m d'altitude moyenne. Ce bloc de hautes terres trouve son origine dans un socle ancien (la Meseta orano-marocaine) qui a conservé une partie de sa couverture sédimentaire. Des accidents l'ont faiblement déformé et morcelé sauf sur ses bordures où ils ont été beaucoup plus énergiques. Au Sud, des chaînes discontinues, prolongent les crêtes du Haut-Atlas, et atteignent 1 800 m.

Au Nord, ces hauts plateaux sont limités par une ligne d'abrupts vigoureux et dominant les basses plaines de Taourirt et d'Oujda.

A l'Ouest, des mouvements simples et imposants ont créé de grandes cuvettes allongées au pied du Moyen-Atlas. Celles-ci, en partie remblayées par une masse de débris venus des montagnes voisines, ont été longtemps des bassins fermés que la Moulouya n'a drainés que récemment.

Les plaines de la Moulouya moyenne, situées à une altitude d'environ 900 m autour de Missour, dessinent un long couloir, dominé à l'Ouest par les sommets du Moyen-Atlas. Les basses plaines enfin s'étalent plus largement et ont une altitude moyenne comprise entre 400 et 500 m.

Enfin, sur une centaine de kilomètres de largeur la bordure méditerranéenne constitue un domaine bien à part caractérisé par un morcellement de reliefs en chaînes et bassins petites unités très individualisés qui s'opposent aux vastes plaines de la Moulouya et aux monotones plateaux du Sud-Est.

### c) Climatologie-Végétation

Le Maroc Oriental est une région exceptionnellement aride. Il est en effet abrité des vents qui abordent par l'Ouest le Maroc Atlantique et qui provoquent d'abondantes précipitations sur le versant occidental du Moyen-Atlas. On ne recueille 400 à 600 mm d'eau dans l'année que sur les chaînes méditerranéennes du bassin. Partout ailleurs, de rares orages principalement de printemps donnent un total faible de l'ordre de 300 mm. Ce climat continental sec est rendu plus pénible encore par des contrastes thermiques sévères.

L'hiver est une longue saison froide où le thermomètre descend souvent au-dessous de 0°. Les étés sont au contraire très chauds.

La végétation qui, vue de loin, donne une trompeuse impression de verdure apparaît dans le détail sous forme d'une maigre steppe discontinue de touffes d'Alfa ou d'armoise, de plus en plus pauvre vers le Sud. Quelquefois apparaissent des thuyas ou des pistachiers de l'Atlas. Les chaînes septentrionales, plus arrosées sont couvertes de forêts de chênes verts ou de thuyas.

## Régime de la Moulouya et de ses affluents :

### a) Equipement hydrologique :

Station de jaugeage	cours	Superf. du bassin versant km <sup>2</sup>	Date de mise en service
Zaïda .....	Moulouya	1 673	1959
Pont de la route 21	Ansegmir	961	1959
Missour .....	Moulouya	10 323	1959
Guercif .....	Melloulou	2 596	1959
Dar El Caïd .....	Moulouya	24 422	1959
Pont de Sakka ...	M'Soun	1 791	1952
Pont de Taourirt .	Za	18 027	1953
Barrage de Mechra Homadi ....	Moulouya	51 618	1951

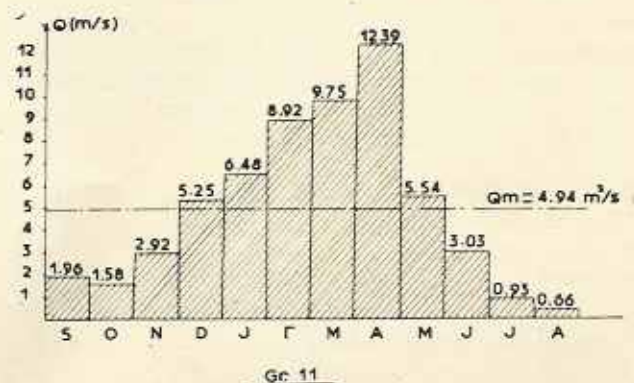
### b) Débits moyens mensuels

A la date de l'élaboration de l'étude du bassin versant de la Moulouya, seules 2 stations de jaugeage disposaient d'observations continues pour une période de 14 ans : Guercif sur l'oued Melloulou et Dar El Caïd sur la Moulouya. Les observations au droit des autres stations couvrent 7 ou 8 années seulement ; ce qui ne suffit pas pour définir les caractéristiques nécessaires à la détermination du régime d'écoulement.

A défaut d'observations régulières et pour des périodes comportant des lacunes, les débits moyens mensuels ont été reconstitués par corrélation avec les stations de jaugeages voisines.

Le calcul des débits moyens mensuels a été fait à partir des débits moyens journaliers.

• Régime de la Haute Moulouya : station de Zaïda :



Débits moyens mensuels de la période 1952-66

L'hiver et le printemps apportent 81,4 % du volume total annuel ce qui indique un régime d'écoulement non uniforme en fonction des précipitations, le bassin versant présentant une certaine rétention :

$$Q = 4,94 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{Débit spécifique } q = 2,95 \text{ l/s/km}^2$$

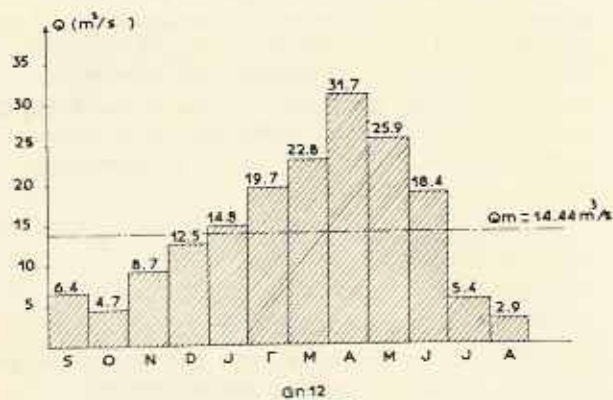
$$V_Q = 155,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ (volume apporté par la Moulouya à Zaïda)}$$

$$P = 487,7 \text{ mm} \quad V_P = 816,10^6 \text{ m}^3 \text{ (volume des précipitations)}$$

$$\text{coefficient d'écoulement moyen } n = \frac{V_Q}{V_P} = 0,191$$

Ceci confirme la faiblesse des apports sur le haut bassin de la Moulouya, le réseau hydrographique étant peu développé sur le cours supérieur contrôlé par la station de Zaïda.

*Régime de la Moyenne Moulouya : Station de Missour :*



Débits moyens mensuels de la période 1952-66

L'hiver et le printemps apportent 73,24 % du volume annuel écoulé, c'est-à-dire un pourcentage équivalent à celui calculé pour la station de Zaïda. Par conséquent, l'influence des apports de la Moulouya amont se traduit fidèlement sur le régime d'écoulement à la station de Missour.

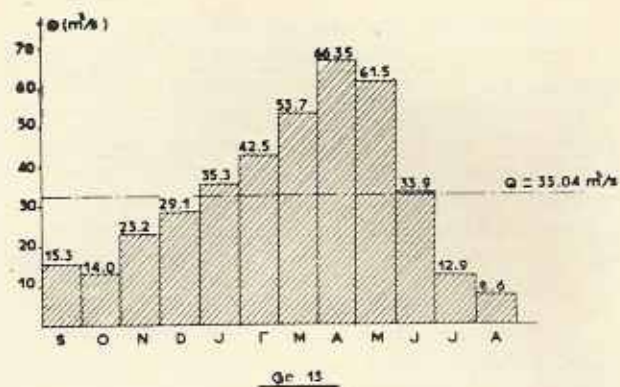
$$Q = 14,44 \text{ m}^3/\text{s} \quad q = 1,40 \text{ l/s/km}^2$$

$$V_Q = 455,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$P = 368 \text{ mm} \quad V_P = 3\,798 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Coefficient d'écoulement } n = \frac{V_Q}{V_P} = 0,120$$

*Régime de la basse Moulouya à Mechra Klila*



Débits moyens mensuels de la période 1952-66

Les volumes écoulés en hiver et au printemps représentent 72,8 % du volume annuel, ce qui correspond au même régime d'écoulement que pour la Moulouya centrale.

$$Q = 33,04 \text{ m}^3/\text{s} \quad q = 0,66 \text{ l/s/km}^2$$

$$V_Q = 1\,041,95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$P = 314,3 \text{ mm} \quad V_P = 15\,689,86 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Coefficient d'écoulement } n = \frac{V_Q}{V_P} = 0,066$$

En conclusion : l'examen des débits moyens mensuels met en évidence les caractéristiques du régime d'écoulement sur l'ensemble du bassin versant de la Moulouya. Il se présente comme une modification du type pluvial atlantique.

*Régime des affluents de la Moulouya :*

*Régime du Za à la station de Taourirt*



Débits moyens mensuels de la période 1952-66

L'hiver et le printemps ne fournissent que 59,19 % du volume total annuel. Le réseau hydrographique est développé dans cette partie du Haut-Atlas.

D'autre part, les apports des précipitations s'écoulent surtout par l'intermédiaire des sources situées au bord du plateau. Ceci entraîne un régime de l'oued presque uniforme en toutes saisons

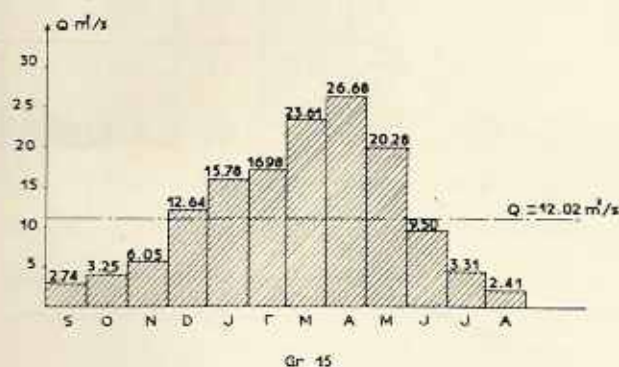
$$Q = 2,90 \text{ m}^3/\text{s} \quad q = 0,161 \text{ l/s/km}^2$$

$$P = 291 \text{ mm} \quad V_p = 5\,245,566 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$V_Q = 91,454 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Le coefficient d'écoulement } n = \frac{V_Q}{V_p} = 0,01$$

Régime de l'oued Melloulou à la Station de Guercif :



Débits moyens mensuels de la période 1952-66

Les volumes écoulés en hiver et au printemps représentent 80,41 % des apports annuels ; c'est la caractéristique des régimes torrentiels atténués, drainant le Moyen-Atlas.

$$Q = 12,02 \text{ m}^3/\text{s} \quad q = 4,627 \text{ l/s/km}^2$$

$$V_Q = 379,063 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$P = 521,7 \text{ mm} \quad V_p = 1\,355,376 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

$$\text{Coefficient d'écoulement } n = \frac{V_Q}{V_p} = 0,28$$

### Description des crues observées :

Le début des observations des crues sur le bassin versant de la Moulouya coïncide avec celui du fonctionnement des stations de jaugeage. Cependant, certaines observations sur les hauteurs d'eau lors des crues importantes datent d'époques antérieures. Le plus souvent elles sont inutilisables du fait que ni le lieu ni le profil en travers où elles ont été effectuées ne sont précisés. Le volume a été dans ces cas, calculé d'après les mesures des vitesses d'eau faites à la surface.

L'application de différentes méthodes et l'emploi de coefficients auxiliaires ne pourraient être qu'arbitraires ; par conséquent les résultats obtenus sont incertains et non valables. Pour toutes ces raisons, le choix a été porté sur les seules données enregistrées qui ont été contrôlées. Malheureusement la période d'observation de la plupart des stations ne s'étend que sur 8 à 9 ans ; elle est donc insuffisante pour satisfaire aux besoins des analyses statistiques utilisées pour la détermination des débits maxima des crues. Les stations de jaugeage de Guercif et de Dar El Caïd dont la période d'observation s'étend sur 14 ans, ont permis la détermination des paramètres nécessaires pour l'Application des formules empiriques destinées à déterminer les valeurs extrêmes des crues aux autres stations de jaugeage.

Après analyse des variations de volumes écoulés à chaque station de jaugeage, a été considérée comme crue, tout débit supérieur aux étiages admis possédant les caractéristiques connues, notamment : la concentration, la pointe et la décrue. Dans le cas de plusieurs débits maxima consécutifs, la plus forte pointe a été adoptée sous conditions toutefois qu'elle soit espacée de la crue suivante de moins de 48 heures. Le tableau suivant nous donne pour chaque station de jaugeage le nombre des crues observées et les débits instantanés minima et maxima de la pointe :

Station de Jaugeage	Années d'observations	Nbres de crues observées	Nbre moyen des crues p/en	Débit instantané minima de la pointe	Débit instantané maxima
Zaïda .....	8	87	11	5,31	231
Pont de la route 21 .....	8	65	8	6,63	358
Missour .....	9	115	13	21,4	2 500
Guercif .....	16	180	11	14	2 000
Dar El Caïd .....	13	165	13	23,3	4 950
Pont de Sakka ...	8	80	10	10,3	293
Taourirt .....	9	51	6	8,8	585
Mechra Klila .....	—	—	14	25	5 800

## Analyse statistique des crues

### a) Classification des crues d'après leur fréquence

Dans le tableau suivant sont représentées les fré-

quences mensuelles des crues par rapport à la somme totale des crues observées.

Fréquences exprimées en %

STATION	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Zaïda .....	5,74	5,74	8,40	11,50	11,50	10,34	19,54	11,50	6,90	4,60	2,30	2,30	100
Ansegnir ...	2,30	6,15	6,15	3,10	1,54	4,61	1,54	6,15	21,53	26,15	4,61	6,15	100
Missour ..	7,82	7,84	4,35	3,48	7,82	7,82	11,30	12,17	13,91	15,65	5,22	4,35	100
Guercif ...	4,44	4,35	6,67	11,11	13,33	11,11	13,89	12,22	11,11	6,11	1,11	2,22	100
Dar El Caïd.	9,10	6,67	5,45	8,48	9,10	8,48	10,30	10,30	15,76	12,12	1,82	2,42	100
Pont de Sak- ka .....	3,75	5,45	5,00	11,25	7,50	13,75	11,75	10,66	11,11	12,50	2,50	2,50	100
Taourirt ...	7,65	5,66	7,84	1,96	3,92	1,96	5,88	9,80	19,60	15,69	5,88	3,52	100

• Ce tableau comparatif fait apparaître une différence remarquable entre les bassins versants de l'Ansegnir et de la haute Moulouya contrôlée par la Station de Zaïda. Dans ce dernier les crues ont lieu presque régulièrement de décembre à mai, le mois de mars comprenant le plus grand nombre de crues observées. Sur l'Ansegnir la fréquence des crues est la plus forte en mai, juin et septembre ; ce qui provient certainement de la fonte des neiges dont l'influence sur le régime d'écoulement est importante.

• Le nombre de crues enregistrées à la station de Guercif sur l'oued Melloulou est conforme à celui enregistré à la station de Zaïda ; ce qui veut dire que cette partie du bassin versant de la Moulouya a le même régime de crue. Ceci confirme en plus les conclusions annuelles auxquelles a abouti l'analyse des débits moyens.

• Le régime de la Moulouya à Dar El Caïd est influencé par celui des affluents dont les débits sont contrôlés par cette station. Il est en outre représentatif des caractéristiques de crue de la basse Moulouya : le plus grand nombre de crues se produit en mai.

• En ce qui concerne le bassin versant de l'oued Za contrôlé par la station de Taourirt et qui draine les Hauts Plateaux, son régime correspond à celui

de l'oued Ansegnir : les crues sont plus nombreuses en hiver car elles ne sont pas alimentées par les neiges comme celles de l'Ansegnir.

### b) Analyse des hydrogrammes caractéristiques de crue :

Etant donné que la méthode de l'« hydrogramme unitaire » nécessite un réseau développé de pluviomètres et de pluviographes, l'analyse des crues de la Moulouya est basée uniquement sur la détermination des hydrogrammes caractéristiques. L'intérêt de cette méthode, même si elle n'étudie pas la relation pluie-débit, est que l'hydrogramme théorique est établi à partir des hydrogrammes réels.

Ce calcul permet de déterminer la forme des hydrogrammes que pourraient avoir les crues extrêmes, de fréquences données.

Le tableau suivant nous donne pour chaque station de jaugeage les caractéristiques de crues suivantes :

Débit maximum

$$- \varphi_{\max} = \frac{\text{Débit maximum}}{\text{Volume total de l'hydrogramme}}$$

Volume total de l'hydrogramme

$$- t_c = \text{Temps de concentration en heures}$$

$$- T = \text{Durée de la décrue en jours}$$

STATION	$\varphi$ max.	te heures	T jours
Zaïda .....	11,22	12	8
Pont de la route 21 .....	18,73	5	6
Missour .....	14,77	8	11
Guercif .....	12,57	8	10
Dar El Caïd ....	16,22	22	18
Pont de Sakka .	9,54	7	7
Taourirt .....	21,48	6	5
Mechra Klila ...	9,50	24	18

(Pour Mechra Klila les valeurs données sont estimées car il n'y a pas eu d'observations permettant de déterminer l'hydrogramme caractéristique).

### c) Temps de propagation des crues

La propagation d'une crue sur le bassin versant dépend d'une série de facteurs constants ou variables. Les facteurs constants sont les caractéristiques topographiques et géologiques du terrain, variables sont les facteurs climatologiques dont dépend le volume d'eau de la crue. La vitesse du courant dans le lit de l'oued dépend principalement de la pente du terrain, de la forme du profil, et du volume d'eau. Compte tenu de tous ces facteurs et des mesures de la vitesse du courant effectuées pour différents niveaux d'eau, il a été procédé à une estimation approximative du temps de propagation des crues sur le cours principal de l'oued Moulouya.

Ainsi le temps de propagation en heures de la crue pour les différents débits instantanés serait :

Parcours	800 m <sup>3</sup> /s	1 500 m <sup>3</sup> /s	2 500 m <sup>3</sup> /s	5 000 m <sup>3</sup> /s	Km
Zaïda - Missour .....	12	10	9	8	147
Missour - Dar El Caïd ....	17	14	13	11	180
Dar El Caïd - Mechra Klila	10	7	6	5	81
Zaïda - Mechra Klila .....	39	31	28	24	408

### d) Probabilité des crues :

Pour déterminer les valeurs extrêmes des débits maxima on a recours pratiquement en hydrologie au calcul statistique. Ce calcul se base sur un nombre suffisant de données, pendant une longue série d'années d'observation. A défaut de relevés de crues on peut avoir recours aux différentes formules et méthodes empiriques.

Malheureusement dans le cas du bassin de la Moulouya seules 2 stations de jaugeage, Dar El Caïd et Guercif, disposent d'un nombre suffisant d'années d'observation (14 ans) permettant l'application du calcul statistique. Aux autres stations de jaugeage, la période ne s'étend que sur 8 à 9 années d'observation ;

ce qui nécessite l'application des méthodes empiriques déjà utilisées et vérifiées pour les autres oueds du Maroc.

En premier lieu, les paramètres nécessaires pour le calcul statistique de la probabilité des crues, tels que les débits instantanés maximum et le volume de la crue, ont été déterminés, on est passé ensuite aux paramètres pour les formules empiriques utilisées et ajustées aux régimes hydrologiques des oueds du Maroc, telles que la méthode d'Iskowsky et de Mallet-Gautier. Ont été appliquées également l'équation de Galga et l'équation des courbes enveloppes.

Le tableau suivant nous donne pour chaque station de jaugeage les résultats de cette étude selon les méthodes et formules utilisées :

STATION DE JAUGEAGE	Méthode de Hazen			Mallet- Gauthier Q 0,1 % m3/s	Iskowski Q 0,1 % m3/s	Courbes enveloppés Q 0,1 % m3/s	Valeurs adoptées	
	Q 0,1 % m3/s	Q 0,1 % m3/s/km2	Q 1 % m3/s				Q 0,1 % m3/s	Volume 10 <sup>6</sup> m3
Zaïda .....	2 000	1,19	936	2 80	1 990	2 050	2 000	178,25
Pont Ansegmir	1730	1,82	833	1 700	1 760	1 770	1 750	93,43
Missour .....	6 150	0,6	3 379	6 050	6 180	6 100	6 200	419,77
Guercif .....	4 460	1,65	2 450	4 400	4 280	4 230	4 280	340,08
Dar El Caïd ..	10 748	0,44	5 632	10 030	10 040	10 630	10 750	1 127,0
Pont de Sakka	2 628	1,45	1 230	2 627	2 645	2 540	2 600	156,44
Taourirt .....	3 990	0,5	1 814	4 030	3 930	4 000	4 000	186,72
Mechra Klila .	12 220	0,245	6 400	12 190	12 150	12 290	12 250	1 289,47

Nous constatons que les valeurs obtenues par les différentes méthodes sont très proches malgré le nombre insuffisant d'années d'observations.

Q 0,1 % = Débits de la crue millénaire

Q 1 % = Débit de la crue centenaire

q 0,1 % = Débit spécifique de la crue millénaire

V = Volume de la crue millénaire déterminé à partir de l'hydrogramme caractéristique.

## 6. — ETUDE DES CRUES DU LOUKKOS

### Etude des crues du Loukkos et de ses affluents : Caractéristiques du Bassin versant :

#### a) — Situation :

Le bassin versant du Loukkos d'une superficie de 3 700 km<sup>2</sup> environ, est situé au Nord-Ouest du Maroc (approximativement entre les latitudes 34° 45' et 35° 30') dans une des régions du pays où la pluviosité est la plus élevée. Il draine une partie des versants Ouest et Sud Ouest du Rif ; les eaux s'écoulent vers l'ouest en direction de l'Océan Atlantique qui leur sert d'exutoire.

#### b) — Topographie :

En dépit de la hauteur relativement importante des sommets rifains, l'altitude du bassin reste faible l'altitude moyenne s'élevant à 280 m environ. Ceci est illustré par la pente de l'oued Loukkos qui est très forte (allant souvent au delà de 5 à 10 %) dans son premier tronçon et à laquelle fait suite une pente très faible sur le reste du parcours. La région dite « Vallée basse », comprise entre Larache et Ksar El Kebir correspond approximativement au périmètre dont l'aménagement agricole est envisagé. C'est une plaine pratiquement plate d'altitude variant entre 2 et 15 m. Cette caractéristique en fait la partie du bassin versant la plus vulnérable lorsque des crues importantes de l'oued Loukkos et de ses affluents se

manifestent. A l'Est de Ksar El Kebir, la topographie devient de plus en plus vallonnée pour atteindre finalement la région montagneuse du Rif.

#### c) — Géologie

Le bassin du Loukkos peut être subdivisé d'Ouest en Est en 3 zones distinctes :

- La première assimilable à la plaine du Bas Loukkos est essentiellement constituée de terrains alluvionnaires composés de terrasses conglomératiques ou limoneuses.

- La partie centrale du bassin est formée de séries marneuses dans lesquelles sont intercalées quelques barres de grès. Cette zone est soumise à une forte érosion.

- Enfin, la partie supérieure du bassin du Loukkos est constituée d'une alternance de terrains marneux et gréseux.

#### d) — Végétation

On peut là aussi diviser le bassin versant en 3 zones correspondant pratiquement à celles de la carte lithologique.

- La zone ouest du bassin est recouverte de forêts, souvent plantées.

- Au centre du bassin par contre, il n'y a pratiquement pas de forêts et on n'y rencontre que quelques zones de broussailles.

- La partie du bassin est relativement boisée et de grandes étendues sont couvertes de taillis. Cette zone comporte également de nombreuses surfaces plus ou moins bien cultivées.

e) — *Climatologie*

— *Précipitations :*

Comme le laissent prévoir la topographie et la morphologie, les précipitations augmentent plus ou moins régulièrement de l'ouest vers l'est.

De 700 mm en bordure de l'océan, les précipitations atteignent environ 1400 mm à la limite Est du Bassin au voisinage des sommets du Rif. Les précipitations moyennes sur l'ensemble du bassin s'élèvent à 980 mm. L'examen des valeurs mensuelles des précipitations montre que la pluviométrie est maxima pour la quasi totalité des stations en décembre (pour les autres stations le maximum est atteint en janvier). A ce maximum succède une diminution rapide des pluies suivie en mars par un palier ou une seconde pointe de moindre importance que la première. Les mois de juin à septembre sont pour toutes les stations des mois de sécheresse. En ce qui concerne l'intensité et la fréquence des averses, aucun relevé de pluviométrie instantanée n'est disponible.

— *Températures*

Pour l'ensemble des stations le mois dont la température minimale est la plus basse est janvier, le mois le plus chaud est en général août. Ainsi pour la station Beni Aros (Altitude : 190 m — distance à l'Atlantique : 42 km).

On a les données suivantes :

- température moyenne : 17,4° c
- moyenne des maxima du mois le plus chaud : 43,3°
- Moyenne des minima du mois le plus froid : 0,7°

— *Evaporation :*

L'évaporation annuelle mesurée par l'évaporimètre pèche varie entre 450 mm et 950 mm selon le degré de continentalité des stations. L'évaporation du mois de janvier est la plus faible, alors que le maximum est atteint tantôt en juillet tantôt en août.

f) — *Réseau hydrographique :*

Le bassin du Loukkos peut être subdivisé en 3 sous bassins principaux, à savoir :

- Le bassin de l'oued Loukkos, le plus important, (en Amont du confluent de l'oued Ouarour) couvre les parties est et sud du bassin versant total soit environ 2100 km<sup>2</sup> ou 57 % de la superficie totale du bassin.

- Le bassin de l'oued Mekhacène qui couvre la partie nord soit 880 km<sup>2</sup> ou 24 % du bassin total.

- D'autres affluents de l'oued Loukkos : Menzora, Ourhane, Azla, débouchant dans ce dernier à une altitude d'environ 100 m. En aval, l'oued Loukkos longe la limite sud du bassin sans recevoir d'affluents importants.

**Etude des régimes du Loukkos et de ses affluents :**

a — *Données de base :*

Les données de base relatives à l'hydrométrie du bassin de l'oued Loukkos, ne s'étendent que sur des périodes trop courtes pour permettre la définition des apports de diverses fréquences avec suffisamment de précision et de sûreté, la plus longue période de mesures ne comptant que 8 années. Il convenait donc, pour suppléer à l'insuffisance des données de recourir à d'autres méthodes faisant intervenir soit les précipitations, soit les débits d'un bassin versant de caractéristiques hydrologiques semblables.

L'utilisation des données pluviométriques pour l'extension de la période de mesure des débits s'est révélée décevante. En effet, les données relatives aux débits, présentent de nombreuses lacunes. Aussi on a utilisé la 2<sup>e</sup> méthode qui consiste à établir des corrélations entre les stations du bassin de l'ouerrha et celui du Loukkos. Le choix du bassin de l'ouerrha pour l'extension des mesures de débits au Loukkos, est justifié par la similitude des caractéristiques hydrologiques de ces deux bassins.

b — *Régime de l'oued Loukkos :*

L'oued Loukkos a une longueur développée totale de 180 km. Il prend naissance à plus de 1300 m d'altitude. Son cours se caractérise par 3 tronçons bien distincts :

- Le tronçon Amont d'une longueur de 40 km environ qui reçoit la plupart des premiers affluents à une pente moyenne de 2 % (avec une valeur maximum de 20 % sur 2 km à la source). Le cours de l'oued, qui a un caractère nettement torrentiel dans cette partie, présente un tracé comportant peu de méandres.

- Le tronçon intermédiaire a une longueur de 90 km et une pente moyenne de 1 %. Le cours de l'oued dans ce tronçon est très sinueux mais présente encore des caractères torrentiels.

• Le tronçon aval a une longueur de 50 km et une pente pratiquement nulle (moins de 3/100 000). Caractérisé par de très nombreux méandres qui montrent les difficultés qu'à l'oued à s'écouler à travers la plaine, le fond du lit se situe au-dessous du niveau de la mer à 44 km déjà de son embouchure. La capacité d'écoulement de l'oued se trouve particulièrement réduite dans ce tronçon inférieur ce qui provoque de fréquents débordements et inondations.

#### Apports du Loukkos

Apports annuels moyens de fréquence 50 %  
 V  $776.10^6$  m<sup>3</sup> Q 24,6 m<sup>3</sup>/s

Apports moyens annuels de la période 1952-69  
 906.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 28,7 m<sup>3</sup>/s

Apports annuels en année sèche :

f = 1/10 347.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 11,0 m<sup>3</sup>/s  
 f = 1/30 246.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 7,8 m<sup>3</sup>/s  
 f = 1/100 177.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 5,6 m<sup>3</sup>/s

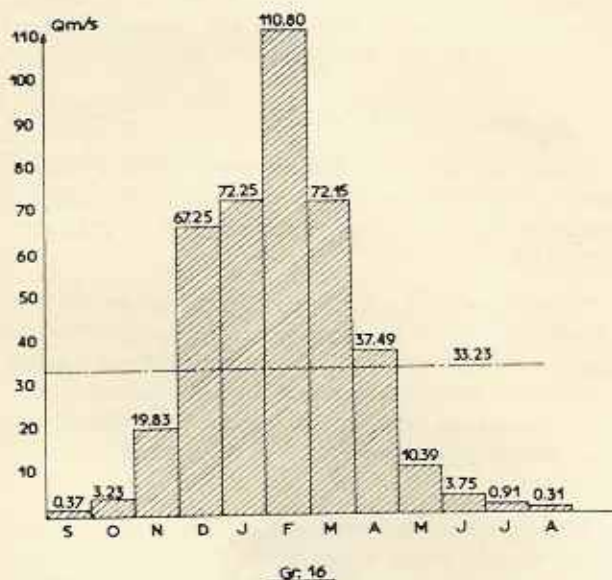
Apports annuels en année humide :

f = 1/10 1734.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 55,0 m<sup>3</sup>/s  
 f = 1/30 2447.16<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 77,6 m<sup>3</sup>/s  
 f = 1/100 3374.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 107,0 m<sup>3</sup>/s

#### Régime du Loukkos à la station M'Rissa

— Débits moyens mensuels calculés sur la période de 1952-69 (les débits de 1962-69 sont mesurés, ceux d'avant sont synthétiques).

— moyenne annuelle : 33,23 m<sup>3</sup>/s



#### c — Régime de l'oued Ouarour :

Il draine la partie centrale du bassin versant de l'oued Loukkos et débouche dans la « Vallée basse ». Il a un bassin versant modeste de 200 km<sup>2</sup> mais n'en constitue pas moins un oued important par ses crues.

Il débouche dans une merja, zone d'inondation atteignant plusieurs milliers d'hectares qui se déverse ensuite partiellement dans le Mekhacène.

#### — Apports de l'oued Ouarour à Oulad Jouaber :

Apports annuels de fréquence 50 %

V(Mm<sup>3</sup>) Q(m<sup>3</sup>/s)

36 1,2

Apports annuels moyens de la période 1952-69

54 1,7

Apports annuels en année sèche :

f = 1/10 9,1 0,3

f = 1/30 5 0,16

f = 1/100 2,8 0,09

Apports annuels en année humide

f = 1/10 144 4,6

f = 1/30 256 8,1

f = 1/100 448 14,1

#### d — Régime de l'oued Mekhacène ;

Cet affluent, le plus important du Loukkos, draine toute la partie Nord du bassin versant, au total une surface de 880 km<sup>2</sup> dont la partie basse est particulièrement plate comme pour le Loukkos lui-même. Prenant sa source à une altitude de 380 m environ et débouchant dans l'oued Loukkos à la cote — 3,0 m, le Mekhacène a une pente moyenne de 4 ‰ et une longueur totale de 90 km. Le Mekhacène tant par l'importance de la superficie qu'il draine que par les conditions d'écoulement qui le caractérisent à l'aval, joue un rôle important dans l'hydrologie générale du bassin du Loukkos, de même que dans le problème de la protection de la « vallée basse » contre les crues et les inondations.

Apports de l'oued Mekhacène à la station Sidi Ayad Soussi :

Apports annuels de fréquence 50 %

V (Mm<sup>3</sup>) Q (m<sup>3</sup>/s)

218 6,9

Apports annuels moyens de la période 1952-69

257 8,2

#### Apports annuels en années sèches

$f = 1/10$	100	3,2
$f = 1/30$	72	2,3
$f = 1/100$	54	1,7

#### Apports annuels en année humide

$f = 1/10$	476	15,1
$f = 1/30$	659	20,9
$f = 1/100$	889	28,2

#### Analyse des crues observées :

La caractéristique la plus importante des crues dans cette région du Maroc est la simultanéité de leur apparition sur tous les cours d'eau du bassin. En effet les précipitations ont lieu en règle générale en même temps sur l'ensemble du bassin versant. On peut constater en outre que l'ordre d'importance des crues est en général le même pour différents cours d'eau. En particulier, la crue de janvier 1970 a été, en ce qui concerne le volume, la plus forte jamais observée pour chacun de ces cours d'eau.

L'analyse des hydrogrammes de crues aux stations de l'oued Loukkos et de ses affluents permet de tirer les conclusions suivantes :

— Les crues sont caractérisées par une succession de pointes provoquées vraisemblablement par une variation de l'intensité des précipitations sur une partie plus ou moins importante du bassin.

— L'augmentation des débits est en général très rapide, ce qui est dû à la pente relativement forte du lit de l'oued dans la zone montagneuse de son cours.

— La durée des crues est importante et varie entre 1 et 3 semaines durant lesquelles les pointes se succèdent les unes aux autres, séparées par des intervalles dont la durée varie entre quelques heures et quelques jours.

D'autres part l'étude a cherché à établir pour chacune des crues importantes enregistrées ces der-

nières années un bilan hydraulique permettant de comparer le volume écoulé et le volume des précipitations sur le bassin versant qui ont été à l'origine de la crue. Les résultats de cette étude ont amené aux conclusions suivantes :

— Le rapport entre volume écoulé et volume des précipitations ne peut être assimilé à un coefficient de ruissellement au sens propre du terme.

— En effet les valeurs de ces rapports sont en général très élevées et proches de 1,0. Même si l'on tient compte de l'intensité élevée des averses, du relief accentué du bassin et de son imperméabilité, ce coefficient paraît très élevé. On a expliqué ce fait par les considérations suivantes :

- Difficulté de définir le début et la fin des crues
- Prise en compte d'un écoulement de base dû à des précipitations antérieures
- Estimation très grossière du volume des précipitations par la méthode de Thiessen
- Absence de stations pluviométriques dans les régions les plus élevées donc les plus arrosées des bassins versants.

#### Analyse statistique des crues du Loukkos et ses affluents :

##### a — Crues de faible fréquence

L'ouvrage de retenue envisagé sur l'oued Loukkos au site de Koudiat El Rhorfa sera une digue en terre ou en enrochements. Pour un tel type d'ouvrage, l'arrivée d'une crue exceptionnelle dépassant la capacité de l'évacuateur provoquerait un débordement aux conséquences catastrophiques puisque conduisant à la destruction de l'ouvrage lui-même. Aussi le dimensionnement des ouvrages a été basé sur la crue dix millénaire dont la faible fréquence garantit une sécurité suffisante. Les volumes et les débits des crues annuelles maximums ont fait l'objet d'une étude statistique selon la loi de Gumbel. La loi de Gumbel a été retenue parce qu'elle donne pour cette région les résultats les plus pessimistes.

STATIONS	F = 1/10 000				F = 1/1 000		F = 1/100	
	Surf. bassin Km <sup>2</sup>	Volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Volume spécifique 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> par km <sup>2</sup>	Débit de pointe m <sup>3</sup> /s	Volume : 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Débit de pointe m <sup>3</sup> /s	Volume : 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Débit de pointe m <sup>3</sup> /s
Loukkos - M'Rissa	2 116	3 100	1,46	3 500	2 450	3 000	1 720	2 300
Loukkos - Pont du Loukkos .....	266	440	1,90	2 600	340	2 000	250	1 500
Mekkhacène - Sidi Agad Soussi ....	630	810	1,28	1 300	630	1 100	450	850
Ouarour - Oulad Jouaber .....	162	215	1,32	900	160	700	120	500

L'étude a cherché à contrôler pour la station de M'Rissa l'ordre de grandeur des débits de pointe obtenus par la méthode de Gumbel pour la crue dix-millénaire en utilisant la formule empirique d'Iskowsky. Cette formule qui fait intervenir la précipitation moyenne annuelle et la surface du bassin versant donne pour la pointe de crue extrême un débit de 3 800 m<sup>3</sup>/s. Cette valeur est très proche de celle définie par l'analyse statistique des crues observées.

D'autre part il faut noter que le débit de pointe a, pour le dimensionnement des ouvrages de retenues sur le Loukkos, une importance moins grande que le volume de la crue. En outre toutes les crues observées sur le Loukkos ont présenté plusieurs pointes. Il est justifié d'admettre que la crue dix-millénaire présentera elle aussi un certain nombre de pointes. C'est la raison pour laquelle il a été nécessaire de tracer divers hydrogrammes tenant compte à la fois des caractéristiques physiques du bassin et de la forme des hydrogrammes des crues observées et de contrôler que ces crues peuvent être absorbées par les organes d'évacuation sans mettre en danger l'ouvrage de retenue.

La durée de la crue dix-millénaire a été définie sur la base de l'analyse de la relation entre volume de la crue et durée de celle-ci. Le diagramme établi à partir des crues observées a montré que la durée d'une crue dix-millénaire sera de l'ordre de 45 jours environ. Le volume de la crue étant de 3 100 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, le débit moyen durant celle-ci sera de 800 m<sup>3</sup>/s.

#### b — Crues de fréquence élevée.

Sous cette dénomination, on désigne les crues decennales et cinquanteales. La détermination de telles crues est indispensable pour le dimensionne-

ment des ouvrages nécessaires à la protection des exploitations agricoles contre les inondations. La détermination des débits et des volumes des crues de fréquence élevée est tout aussi délicate que la définition de la crue dix-millénaire lorsqu'on ne dispose que d'une courte période d'observation des débits. D'autre part les observations effectuées dans les bassins voisins de celui du Loukkos ont montré que la période 1962-70 pendant laquelle les débits du Loukkos sont connus, a été caractérisée par l'apparition de crues fréquentes et importantes. Il est donc possible, dans ces conditions que l'analyse statistique donne, pour les crues de fréquence élevée des valeurs trop élevées.

— Caractéristiques de la crue cinquanteale du Loukkos et de ses affluents.

Station	Volume 10 <sup>6</sup> /m <sup>3</sup>	Débit de pointe m <sup>3</sup> /s
Loukkos - Koudiat El Korfa .....	1 300	2 100
Mekkhacène - Sidi Agad Soussi .....	395	750
Ouarour - Oulad Jouaber .....	105	450

#### c — Distribution des crues durant l'année :

L'examen des caractéristiques des crues relevées à partir de 1961 sur le Loukkos et ses affluents permet de tirer les conclusions suivantes :

— Pour toutes les stations les 2 crues annuelles les plus importantes se produisent durant les mois de décembre, janvier et février.

— La possibilité de voir une telle crue se produire en mars ne peut cependant être écartée, des crues relativement fortes ayant été observées pendant ce mois.

### 7. — ETUDE DES CRUES DU DRAA



## Caractéristiques du bassin versant de l'Oued Draâ :

### 1) Hydrographie

Le bassin versant de l'Oued Draâ en Amont du profil de Zaouïa N'Ourbaz est composé de plusieurs bassins à savoir : le bassin de l'oued Dadès (7 130 km<sup>2</sup>) et celui de son affluent l'oued Izerki (410 km<sup>2</sup>). Le bassin de l'oued Ouarzazate (4 530 km<sup>2</sup>) et de son affluent l'oued Asif Aït Douechem (2 940 km<sup>2</sup>). Ces 2 bassins diffèrent remarquablement tant au point de vue grandeur et forme que par leurs caractéristiques topographiques, géologiques et climatologiques de sorte que chacun a son propre régime d'écoulement.

#### a) Oued Dadès :

L'oued Dadès est le plus important affluent de l'Oued Draâ tant par la superficie de son bassin versant et la longueur du cours que par le volume d'eau qu'il transporte au cours de l'année.

La vallée du Dadès emprunte la dépression qui sépare le Haut-Atlas des montagnes du Sarhro et de l'Ougnate. Dans ce couloir, se sont accumulées à l'ère tertiaire, de grandes épaisseurs de grès et de conglomérats que l'érosion quaternaire a découpé en plateaux allongés appelés « Kelaâ ». Sous ces grès et ces alluvions, le fond rocheux disparaît. Le Dadès draine les contre-forts Sud-Est du Haut-Atlas situés entre les bassins versants de l'Oum-Er-Rebia et de l'oued Rhéris. Le Dadès a ses origines sur les versants du Jbel Assameur Irhil et du Jbel Arhem-bou N'Ououzz dont l'altitude dépasse 3 000 m. Les pentes sur le cours supérieur sont fortes et proches de 5 % alors que la pente moyenne générale est de 1 %. L'oued Dadès ne tarit jamais : c'est un cours d'eau pérenne. En aval du confluent avec le M'goun, le Dadès reçoit plusieurs affluents moins importants à savoir : l'oued Imassine, l'Asif Tamezrite, l'Asif Toundoute, l'Asif Imi N'Tazarht et finalement, avant le confluent avec l'Ouarzazate il reçoit l'oued Tzeki. Tous ces oueds, contrairement au Dadès et à l'oued M'goun tarissent au cours de la période estivale.

#### b) Oued Ouarzazate :

L'Ouarzazate est d'après son importance, le deuxième affluent de l'oued Draâ. C'est un oued très court formé du Mellah, l'Imini et l'Iriri-Tidili.

Le mellah prend sa source près du col du Tichka ; sur son cours supérieur il a de très fortes pentes atteignant parfois 10 %. Il tarit en été de sorte qu'au cours de l'année, le ruissellement est observé durant 5 à 6 mois seulement.

L'origine de l'oued Imini se trouve sur le versant du Jbel Ourioul (3 573 m). C'est également un oued semi-permanent avec de très fortes pentes. L'Iriri-

Tidili est formé de 2 bras : l'Iriri né sur le versant du jbel Siroua (3 304 m) et Tidili qui recueille les eaux du Jbel Tidili (3 905 m). Les 2 bras confluent pour former ensuite avec l'Asif Imini et l'Asif Mellah, l'oued Ouarzazate. Les eaux de celui-ci sont peu abondantes en été du fait du régime de ses affluents.

#### c) L'oued Draâ

Le Draâ est formé du Dadès et de l'Ouarzazate dont la confluence a lieu près de la ville de Ouarzazate. Il coule dans sa section supérieure suivant une direction Nord-Ouest-Sud-Est séparant Anti-Atlas et Sarhro, puis change de direction en Aval de Zagora où il coule du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Jusqu'aux environs d'Agdz. Le Draâ ne tarit jamais. Au cours des années humides il peut osciller entre Agdz et Zagora tandis qu'à M'hamid il ne coule qu'en cas de crues. Exceptionnellement les eaux peuvent atteindre l'océan lors de très fortes crues, ce qui est très rare.

La pente moyenne du Draâ sur le parcours entre Ouarzazate et Agdz varie de 3 à 5 %, entre Agdz et M'hamid entre 2 à 2,5 %. Dans sa partie centrale le Draâ reçoit de nombreux affluents dont les apports ne sont pas abondants. Les plus importants sont : l'oued Tamsift arrivant en rive gauche près d'Agdz ; l'oued Tasminest également affluent de rive gauche, l'Asif N'bou Ourti et l'oued Bou Tious.

## 2) Climatologie

### a) Températures.

• Températures moyennes maxima : (moyennes sur 37 années). L'analyse des valeurs des maxima moyens montre que le bassin de l'oued Draâ est une région où les températures sont très élevées. Les valeurs moyennes des maxima dépassent en juillet 42°C au Sud d'Agdz (39,5° à Ouarzazate). Au Nord de cette localité elles s'abaissent progressivement tout en restant assez élevées. Les plus hautes valeurs des températures maxima moyennes se produisent en juillet dans tout le bassin. Les températures maxima d'hiver restent au-dessus de 12° en montagne et croissent vers le sud atteignant la valeur de 20,5° à Zagora.

### • Températures maxima absolues

Elles sont très élevées : elles dépassent 41°C à l'altitude 2 000 m et atteignent au sud 50°C à Tagou-nite.

A la station de Ouarzazate, la température maxima absolue est de 26,4° en janvier et de 46,4° en juillet.

- Températures moyennes minima : (37 années d'observation).

L'analyse des données relatives aux différentes stations indique que les températures moyennes minima en hiver sont au dessus du zéro sur la plus grande partie du bassin du Draâ, sauf les hautes régions montagneuses où elles atteignent des valeurs négatives. En été les températures minima sont assez élevées et varient entre 17,1° au Nord du Bassin à 26,7° au Sud, au cours du mois de juillet.

- Températures minima absolues :

Les données des températures minima absolues des différentes stations montrent qu'il peut geler d'octobre à mai dans les régions montagneuses et de novembre à février au sud d'Agdz. La température « minimum minimorum » s'observe généralement au mois de décembre dans tout le bassin du Draâ et oscille entre -23°c dans les régions montagneuses et -5°c au sud d'Agdz.

Le nombre de jours de gel par année ne dépasse pas en moyenne le chiffre de 50 dans les régions de hautes montagnes et varie entre 3 et 5 au sud du bassin. A la station de Ouarzazate la température minima absolue est de -8,6° en décembre et de 11,4° en juillet.

- Températures moyennes mensuelles :

L'analyse des données des températures moyennes mensuelles montre que celles-ci ne descendent pas au-dessous du zéro au cours de l'année et que l'amplitude annuelle oscille entre 20,8°c et 22,8°c. A la station de Ouarzazate la température mensuelle la plus faible est celle de janvier (9,3°), la plus forte est celle d'août (30°). La température moyenne annuelle à Ouarzazate est de 19,2°c.

#### b) Précipitations

Le nombre de postes pluviométriques est insuffisant et leur répartition dans le bassin est peu satisfaisante. Les postes sont groupés dans les vallées, tandis que sur les crêtes de l'Atlas il n'existe aucune station.

Les auteurs de l'étude ont présenté les valeurs mensuelles des précipitations exprimés en pourcents par rapport à la valeur annuelle ce qui permet de voir la répartition de la pluviométrie annuelle car ces valeurs relatives ont la particularité d'être constantes pour une grande partie du bassin ce qui n'est pas le cas pour les valeurs réelles.

La moyenne des différentes stations donne les résultats suivants :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
%	7,4	4,3	8,2	6,5	4,7	3,4	1,4	5,2	16,0	15,2	17,9	10,7	100

Aussi on constate que la période septembre-novembre est la saison pluvieuse pendant laquelle il tombe environ 50 % de la hauteur annuelle des précipitations.

#### Définition du régime de l'oued Draâ et de ses affluents :

##### a) Régime annuel :

Deux saisons humides et deux saisons sèches caractérisent la répartition des apports du Draâ et de ses affluents au cours de l'année agricole.

Les crues d'automne se produisent dans l'intervalle septembre-octobre. Elles résultent de fortes averses automnales ; elles arrivent très brusquement avec des pointes très aiguës.

Les crues printanières sont le plus souvent causées par les pluies et la fonte des neiges. Leur durée est plus longue, leurs maxima aussi très forts. Elles ont lieu à partir du mois de février jusqu'au mois de mai.

Les deux saisons sèches sont aussi caractéristiques pour le régime du bassin du Draâ. En fait il y a une saison relativement peu humide d'hiver (janvier-février) et une saison sèche à minimum important en été (de juin à septembre).

— Quelques valeurs du débit fictif continu :

- Oued Dadès à la station Aït Moutade :  
 $Q_m = 4,19 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Oued M'Goun à la station d'Ifre :  
 $Q_m = 6,18 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Oued Dadès à la station Zaouia N'Ourbaz :  
 $Q_m = 9,25 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Oued Ouarzazate à la station Tifoultout :  
 $Q_m = 3,28 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- » » » Zaouia N'ourbaz :  
 $Q_m = 4,92 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Oued Draâ à la station Zaouia n'ourbaz :  
 $Q_m = 15,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

b) Régime interannuel :

La station de Zaouia N'Ourbaz sur l'oued Draâ est la seule station sur l'ensemble du bassin avec une longue période d'observation continue. La période de 1936/37 - 1966/67 a fourni suffisamment de données permettant de tirer certaines conclusions sur le régime interannuel du Draâ.

La première caractéristique à remarquer est l'irrégularité des débits moyens annuels qui varient énormément d'une année à l'autre ; ce qui caractérise d'ailleurs tous les cours d'eau de la zone saharienne. Il était souhaitable de relier ces débits par une loi faisant apparaître leur variabilité interannuelle. Les auteurs de l'étude se sont servi pour cela de la loi de Pearson III, dont l'application a permis de voir qu'elle est la probabilité qui correspond à un débit annuel déterminé, ou inversement quel est le débit qui correspond à une probabilité donnée.

c) Quelques comparaisons entre les régimes du Dadès et de l'Ouarzazate.

En dépit de la très courte période d'observation aux droits des stations de jaugeage sur le dadès et sur l'Ouarzazate et la médiocrité des données anciennes, on peut constater avec certitude que

- Le Dadès contrairement à l'oued Ouarzazate ne tarit jamais.
- La contribution du dadès dans les apports de l'oued Draâ est beaucoup plus importante que celle de l'Ouarzazate.

L'analyse des résultats pour les années 1963/64-1966/67 met en évidence que les apports du Dadès sont presque 2 fois plus importants que ceux de l'oued Ouarzazate. Le débit fictif continu pour la période mentionnée est :

- Au droit de la station Zaouia N'Ourbaz, oued Dadès :  
 $Q_m = 9,25 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Au droit de la station Zaouia N'Ourbaz, oued Ouarzazate :  
 $Q_m = 4,92 \text{ m}^3/\text{s}$ .

On pourrait ne pas s'attendre à une telle différence étant donné que les superficies des bassins versants du Dadès et de l'Ouarzazate sont proches et qu'il n'y a pas de grandes différences entre les précipitations moyennes annuelles des 2 bassins :

- Station de Zaouia N'Ourbaz sur le Dadès :  
 $S = 7132 \text{ km}^2$ ,       $P = 202 \text{ mm}$
- Station de Zaouia N'Ourbaz sur l'Ouarzazate :  
 $S = 7462 \text{ km}^2$ ,       $P = 186 \text{ mm}$

Ces différences s'expliquent par les conditions d'écoulement sur les 2 bassins qui sont différents :

Le sol karstique du haut bassin du Dadès et surtout du M'goun diminue les pertes des eaux précipitées. Le karst, capable d'absorber une bonne partie des eaux de surface, alimente en été les cours par l'intermédiaire des sources. En outre, les neiges qui sont abondantes surtout sur le bassin du M'goun et qui ne sont point mesurées, jouent un rôle important et ne peuvent être négligées.

Pour ces raisons on peut bien expliquer le régime assez régulier du haut Dadès et le coefficient d'écoulement élevé à la station d'Ifre sur l'oued M'goun (CE = 0,72) et d'aït Moutade sur le Dadès (CE = 0,44).

Par contre, les conditions géologiques du bassin de l'Ouarzazate contribuent à une bonne concentration des eaux ; les terrains sont rhyolitiques et argileux. Les pentes, très fortes, accélèrent l'écoulement. Pour ces raisons, l'Ouarzazate et surtout ses affluents tarissent en été. Leur régime est très irrégulier ; leurs crues, aux pointes très accentuées, sont de plus courte durée que celles du Dadès.

d) Relation entre pluviométrie annuelle et lame d'eau écoulée :

Une longue période d'observation sur le profil de Zaouia N'ourbaz sur le Draâ a permis d'établir une corrélation entre la pluie annuelle sur le bassin et la lame d'eau écoulée et qui a pour expression

$$L.E.E._{(mm)} = 0,00955 P_{(mm)}^{1,484}$$

Renseignements sur les crues enregistrées :

Les premières observations hydrologiques datent de 1937 en même temps que les premières données sur les crues. Cependant, jusqu'à 1953 ces données sont médiocres parce qu'elles ne permettent pas d'obtenir les différentes caractéristiques des hydrogrammes de crue. A partir de 1953 les données sur les hauteurs d'eau journalières et les hauteurs d'eau maxima sont plus complètes et plus certaines que celles des périodes précédentes.

C'est seulement à partir de 1962, que les variations du niveau d'eau pendant les crues sont observées toutes les heures. L'équipement de la station de Zaouia N'Ourbaz sur le Draâ et sa proximité du centre régional a permis d'effectuer les observations et les mesures dans de très bonnes conditions. Aux autres stations, les lacunes sont nombreuses et les détails manquent justement aux moments les plus intéressants de l'évolution d'une crue en raison des difficultés d'accès et de l'éloignement.

Au cours de la période 1937/38 - 1967/68 à la station de Zaouia N'ourbaz sur le Draâ plusieurs crues extrêmes ont été enregistrées à savoir :

- le 13 avril 1949 : H = 9,25 m Q = 3 900 m<sup>3</sup>/s
- le 7 décembre 1949 : H = 6,92 m Q = 2 250 m<sup>3</sup>/s
- le 8 octobre 1950 : H = 7,13 m Q = 2 400 m<sup>3</sup>/s
- le 3 février 1965 : H = 6,30 m Q = 1 950 m<sup>3</sup>/s
- le 6 novembre 1965 : H = 6,95 m Q = 2 250 m<sup>3</sup>/s
- le 15 novembre 1965 : H = 9,00 m Q = 3 600 m<sup>3</sup>/s

#### Etude statistique sur les débits instantanés maxima

Nous indiquerons dans ce chapitre la méthode qui a été employée pour obtenir les données nécessaires pour la connaissance du régime de l'oued Draâ. Cette méthode est généralisée à l'étude du régime des oueds présahariens.

La série de 29 débits instantanés maxima pour la période de 1937/38 1967/68 où manquent les données pour les deux années agricoles : 1943/44-1944/45 a servi de base pour le calcul de la probabilité des crues à la station de Zaouia N'ourbaz sur le Draâ. Les auteurs de l'étude ont appliqué la loi de Pearson III qui s'avère bien adaptée aux données observées.

Les paramètres de la courbe sont :

$$Q_m = 962 \text{ m}^3/\text{s} : \text{moyenne des débits instantanés maxima annuels}$$

$$C_v = 1,22, \text{ coefficient de variation}$$

$$C_s = 2,5, \text{ coefficient d'assymétrie.}$$

Les résultats sont les suivants :

$$Q \ 0,1 \% = 8\ 700 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \ 0,2 \% = 7\ 700 \text{ «}$$

$$Q \ 1 \% = 5\ 460 \text{ «}$$

$$Q \ 2 \% = 4\ 400 \text{ «}$$

$$Q \ 10 \% = 2\ 500 \text{ «}$$

Pour éviter les données peu certaines des quelques premières années d'observation, le même calcul selon la loi de Pearson III a été établie pour la période de 1948/49 à 1967/68.

Les paramètres de l'équation sont alors :

$$Q_m = \frac{\sum Q \text{ max.}}{20} = 1\ 222 \text{ m}^3/\text{s.}$$

$$C_v = \sqrt{\frac{(K-1)^2}{n-1}} = 1,05$$

$$C_s = \frac{2 \ C_v}{1-K \text{ min.}} = 2,80$$

Les débits maxima probables sont quelque peu plus élevés que les valeurs précédentes :

$$Q \ 0,1 \% = 9\ 150 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \ 0,2 \% = 8\ 200 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \ 1 \% = 5\ 970 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \ 2 \% = 4\ 900 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q \ 10 \% = 2\ 860 \text{ m}^3/\text{s}$$

Mais les différences ne sont pas importantes.

Le débit spécifique maximum au droit du profil de la station de Zaouia N'ourbaz sur le Draâ, si l'on se base sur la crue millénaire de  $Q \text{ max.} = 9\ 000$

$$\text{m}^3/\text{s} \text{ serait } q \text{ max} = \frac{9\ 000}{15\ 000} = 0,60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2.$$

Les stations sur les affluents du Draâ ne disposent pas de données suffisantes pour qu'on puisse déterminer les crues d'après les méthodes statistiques. A titre de contrôle les débits maxima millénaires ont été déterminés aux droits de ces stations selon la formule de Creager :

$$q = 46. C. S (0,894 S^{-0,048} - 1) f^3/\text{s}/\text{mi}^2$$

$$(s \ \text{mi}^2 = 2\ 599 \text{ km}^2 \text{ et } 1 \ f^3/\text{s} = 0,0283 \text{ m}^3/\text{s})$$

La constante c de la formule de Creager varie de 30 à 100. Par substitution des valeurs correspondant à la station de Zaouia N'ourbaz sur le Draâ dans la formule de Creager, soit :

$$\text{Superficie du bassin } S = 15\ 000 \text{ km}^2$$

$$\text{Débit spécifique maxim. } q \text{ max.} = 0,60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$$

On obtient la valeur de  $c = 42$

Cette même valeur a été adoptée pour le calcul des débits maxima probables aux affluents de l'oued Draâ.

Les résultats sont les suivants :

STATION	OUED	S km <sup>2</sup>	q m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> 0,1 %	Q m <sup>3</sup> /s 0,1 %
Zaouia N'Ourbaz .....	Dadès	7 132	0,98	7 000
Aït Moutade .....	Dadès	1 547	2,35	3 600
Ifre .....	M'Goun	1 248	2,65	3 300
Zaouia N'Ourbaz .....	Ouarzazate	7 460	0,94	7 000
Tifoultout .....	Ouarzazate	3 520	1,06	3 700

— Relation entre la lame d'eau écoulée et la hauteur d'eau tombée pendant les crues :

Les auteurs de l'étude ont choisi 25 crues enregistrées depuis 1953 à la station de Zaouia N'Ourbaz sur le Draâ pour établir une relation entre la lame d'eau écoulée pendant les crues et la pluie qui les précède.

Sous la forme d'une relation simple, l'équation L.E.E. = f (P) exprimant la lame d'eau en fonction de la pluie ne semble pas satisfaisante. En effet, pour une période très courte (durée de la crue), la relation entre la lame d'eau et la pluie doit comprendre au moins un paramètre en plus : celui de l'état du bassin (humide ou sec). Comme on ne dispose pas de renseignements sur l'état du sol avant les crues, on a essayé d'introduire dans la première relation le paramètre Q<sub>0</sub>, ou débit initial de l'oued, ce qui donne : L.E.E. = f (P, Q<sub>0</sub>).

Le paramètre Q<sub>0</sub> témoigne indirectement de l'état où se trouve le bassin au moment de la crue.

Si le débit Q<sub>0</sub> est proche de 1 m<sup>3</sup>/s il est bien probable que le sol soit sec. Par contre l'accroissement du débit Q<sub>0</sub> montre qu'il y a eu précédemment des pluies et que le sol est plus ou moins humide.

Les auteurs de l'étude ont proposé la formule : L.E.E. = AP<sup>b</sup> Q<sub>0</sub><sup>c</sup>. A, b, c, sont des constantes qui ont été estimées par la méthode des moindres carrés.

L'équation obtenue est la suivante :

$$\text{L.E.E. (mm)} = 0,064 P^{0,987} Q_0^{0,425}$$

Elle représente une famille de courbes pour différentes valeurs du débit initial Q<sub>0</sub> = constante, qui sont de forme parabolique. Mais comme l'exposant 0,987 est très proche de 1, l'équation ci-dessus peut être considérée comme une fonction linéaire de la pluie. Par conséquent le coefficient d'écoulement L.E.E./P ne dépendrait que de l'humidité du sol.

## 8. — LE TAFILALT — OUED ZIZ ET RHERIS

### Présentation générale

La plaine du Tafilalt est la vallée commune des oueds Ziz et Rhéris.

Elle est située au S.E. du Maroc dans la zone présaharienne. L'altitude varie de 700 à 850 m.

### GEOMORPHOLOGIE

La plaine du Tafilalt est essentiellement une dépression d'érosion résultant du déblaiement au cours du quaternaire de la couverture secondaire et tertiaire et de l'épigénie du Ziz - Rhéris dans le substratum primaire dans lequel est sculpté un relief appalachien. Au cours du quaternaire moyen et récent, le fond de la cuvette a été recouvert par les alluvions mêlés du Ziz et du Rhéris.

### BASSIN VERSANT

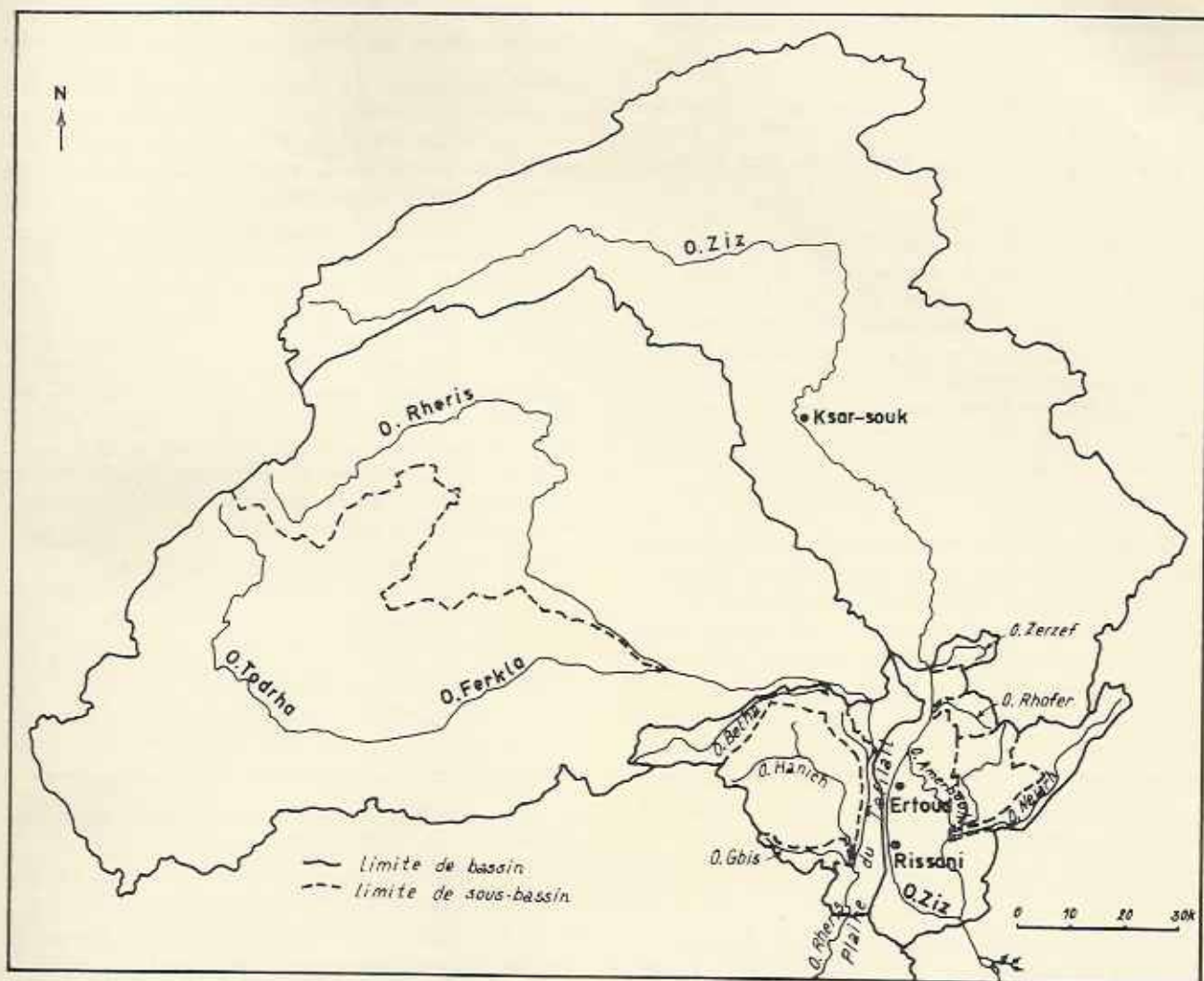
L'ensemble des bassins versants intéressant la plaine du Tafilalt s'étend sur plus de 20 000 km<sup>2</sup> dont 44 % dans le Haut Atlas. Le bassin du Rhéris est plus étendu que celui du Ziz mais est plus hétérogène, moins bien arrosé et plus dégradé.

Le Ziz représente sans conteste le plus important des bassins dominant la plaine.

Les indices pluviométriques, moyens sont pour les bassins considérés en amont de la plaine :

Rhéris :	161 mm
Ziz :	223 mm

Pour l'ensemble de la plaine et de son impluvium maximal l'indice pluviométrique moyen est de 180 mm.



BASSINS VERSANTS DU ZIZ ET DU RHERIS DOMINANT LA PLAINE DU TAFILALT

**HYDROGRAPHIE :**

Le caractère le plus frappant du réseau hydrographique de la plaine est le rapprochement sans confluence des deux artères majeures du bassin : Ziz et Rhéris.

Cette anomalie actuelle est commandée par l'évolution morphologique récente et le modelé final de la plaine, tel qu'il résulte des derniers dépôts généralisés (Soltanien). Vient s'ajouter à ce phénomène la complexité d'un réseau d'irrigation constituant un secteur de divergences artificielles entre les deux oueds.

La ligne de partage des eaux entre le Ziz et le Rhéris dans la plaine est donc difficile à définir : elle est dans les palmeraies déterminée par la structure du réseau d'irrigation. Il est donc malaisé de dé-

brouiller l'évolution d'un réseau hydrographique où se sont superposées de multiples influences perturbatrices, naturelles ou artificielles, agissant en sens contraires ou identiques, mais également complexes.

Les pentes moyennes dans la plaine sont les suivantes :

Ziz	4,16/1 000
Rhéris	1,67/1 000

Cependant les profils des deux oueds sont très irréguliers et les pentes varient très fort localement ce qui témoigne de la jeunesse des lits actuels de ces oueds qui n'ont pas encore atteints un profil d'équilibre.

Les lits du Ziz et du Rhéris sont presque partout encaissés dans la plaine entre les berges limoneuses abruptes et en particulier le lit du Rhéris.

Il semblait indispensable de présenter cette particularité de la plaine du Tafilalt drainée par deux rivières parallèles.

Cependant, étant donné l'importance relative des crues du Ziz par rapport à celles du Rhéris et des problèmes qu'elles posent, seul le Ziz sera présenté plus en détail.

Il reste que la caractéristique principale de ces rivières situées sur le versant Sud de l'Atlas est d'être des rivières hallogènes, dont les débits moyens sont relativement faibles comparés aux débits de crues et dont les eaux se perdent sans arriver à la mer. Le problème de la régulation des eaux de crues sur ces oueds est donc fondamental d'une part pour assurer la protection des palmeraies et habitations d'autre part pour constituer une réserve d'eau d'irrigation. Il en est de même pour l'oued Draa.

L'aspect purement économique des aménagements conduirait sans doute à les retarder pour favoriser des investissements plus rentables qui pourraient être destinés à des travaux localisés au Nord d'une ligne Agadir-Marrakech-Oujda. Schématiquement on peut en effet considérer qu'au Nord de cette ligne les équipements sont intéressants, au Sud, ils sont chers. Une récente étude donne en effet comme coût de l'équipement rapporté à un hectare dont les besoins en eau sont garantis 2 000 DH  $\pm$  1 000 DH au Nord de la ligne Agadir-Oujda.

5 000 DH  $\pm$  1 500 DH au Sud.

Cette ligne économique correspond d'ailleurs à une limite climatologique qui sépare une zone semi-aride de type Syrien au Sud, de la zone nord de type Portugais selon la terminologie de De Martone.

Le fait économique trouve son origine dans cette distinction climatologique — besoins en eau plus élevés à l'ha (évapotranspiration plus forte) — ressources en eau plus aléatoires, avec des ouvrages conçus pour emmagasiner les eaux de crues, les apports des autres périodes de l'année étant insuffisants, ce qui conduit à rechercher les sites assurant des retenues importantes par rapport aux superficies irriguées.

L'attention doit donc être attirée sur cet aspect de la réalité marocaine, les problèmes de protection contre les crues et d'aménagements hydro-agricoles ne peuvent pas être vus et ne le sont pas, sous le seul angle économique. L'aspect social de ces aménagements, l'attention que porte l'état à améliorer le sort de populations plus déshéritées emportent la décision pour les projets particuliers.

### Caractéristiques du bassin versant

a) *Situation* : Le bassin versant de l'oued Ziz couvre une superficie de 8 146 km<sup>2</sup>. Plus de 45 % sont situés dans le Haut Atlas. Son bassin est situé au S.E. du Maroc sur le versant de l'Atlas et s'étend vers la zone présaharienne.

b) *Topographie* : La majeure partie du bassin est située en terrain montagneux. Sa limite au Nord et à l'Ouest dans le Haut Atlas, a une altitude moyenne de plus de 3 000 m allant jusqu'à près de 3 400 à 3 700 m. Sa limite au S.O. se trouve aussi dans les montagnes, mais moins élevées, à environ 2 800 m d'altitude moyenne. La grande partie Est centrale du bassin (autour de Rich) est un plateau coupé par de basses collines, d'altitude variant entre 1 400 et 1 700 m. Cette région moins élevée s'étend jusqu'aux bords de la plaine du Tafilalt qui sont marqués par des collines basses.

Les pentes dans la plaine sont faibles (2,16 % pente moyenne). Bien que l'oued soit le plus souvent encaissé entre les berges abruptes creusés dans le limon, c'est là que sont situés les risques d'inondations.

c) *Géologie* : La plaine du Tafilalt se situe de part et d'autre de l'axe de la chaîne anti-atlasiqne.

5 zones principales peuvent être distinguées :

— la couverture infra-cénomaniennne, à prolongement régulier vers le Nord ;

— le synclinorium du Tizimi (Dévonien et Viséen) à bordure ouest relevée et fracturée.

— l'anticlinorium fracturé des Ouled-Zohra et du Jbel Erfoud ordovicien - Gothlandien) incluant quelques synclinaux de dévoniens et Dinantien.

— le synclinorium du Tafilalt (Dévonien et Dinantien) qui se referme à l'Ouest mais s'élargit à l'E. et au S.E. ;

— la bordure nord du massif de l'Adrar : anticlinorium faillé - (ordovicien à Dinantien).

d) *Végétation* : Il y a peu de végétation permanente dans le bassin sauf sur les hauteurs où il y a assez de précipitations pour des conifères et sur les bords de l'oued, dans la plaine où l'eau saisonnière sert à irriguer palmeraies et jardins. Dans les autres parties, quelques plantes fleurissent après des pluies et disparaissent ensuite pendant les mois secs, laissant le sol à nu.

e) *Le climat*

— *Les précipitations*

Les précipitations moyennes sont très variables d'une région à l'autre et s'accroissent en général du Sud au Nord, et des plus basses aux plus hautes régions.

Elles varient de 70 mm (plaine du Tafilalt à 750 mm dans le Haut Atlas au Nord du bassin versant).

Dans la plaine plus que les totaux annuels et leurs moyennes, importent la répartition au cours de l'année et l'amplitude des variations interannuelles.

Deux saisons pluvieuses bien distinctes se trouvent localisées en automne et au printemps avec un maximum en automne (octobre).

Mais dans ce climat semi-aride, l'irrégularité est encore insuffisamment exprimée par les moyennes mensuelles puisque la chute maximum de l'année en 24 heures peut couramment atteindre 25 à 30 % du total annuel.

A cette irrégularité annuelle des pluies s'ajoute celle non moins grande du régime hyperannuel.

Les totaux annuels varient en effet dans les proportions de 1 à 13 ce qui enlève évidemment beaucoup de valeur aux moyennes annuelles.

De toutes façons, les chutes de pluie directes sur la plaine sont d'une très faible utilité pour l'agriculture et de peu d'intérêt pour les oueds en raison de l'infiltration. Les chutes de pluie ne doivent entraîner aucun ruissellement ni infiltration et le débit du Ziz n'est donc pas (ou dans des cas extrêmement rares et pour une part négligeable) influencé par la pluviométrie de la plaine. Son débit est donc essentiellement fourni par les précipitations de l'amont dans la partie montagneuse de son bassin versant.

#### — La température

Le Tafilalt est la région du Maroc la moins soumise aux influences maritimes.

C'est une des régions les plus chaudes du Maroc (t° moyenne annuelle à Rissani : 21,7°).

Les écarts sont importants (moins de 0° plus de 50°). La saison chaude, définie comme la période pendant laquelle la moyenne des maxima dépasse 30° dure cinq mois (mai à septembre).

#### — Aridité :

La plaine du Tafilalt appartient à la zone climatique pré-saharienne. Le bilan hydrique y est fortement déficitaire, l'évapotranspiration joue un rôle fondamental dans le bilan. La très faible couverture végétale favorise lors des périodes de fortes pluies ou des orages un ruissellement important qui conduit à de fortes crues quasi instantanées.

#### Régime de l'oued Ziz au Tafilalt

Des jaugeages réguliers sont effectués depuis avril 1954 seulement à la station du radier de la route 21 en amont du barrage d'El Borouj.

Des jaugeages moins précis sont également effectués plus en amont (près de Ksar Es Souk) depuis 48-49.

Une difficulté importante d'estimation des débits à partir des hauteurs d'eau recueillies réside dans le fait que le lit de l'oued se creuse ou se remplit de graviers pendant chaque crue. Il a donc fallu opérer des corrections difficiles pour une nouvelle interprétation des rapports entre débits et niveaux de l'oued.

Devant ces difficultés et en raison de la courte période d'observation dont on dispose, on ne peut déduire une connaissance complète du régime de l'oued.

Quelques conclusions provisoires sont cependant déjà très intéressantes.

Les régimes mensuels et annuels se caractérisent par de très grandes variations. Les volumes annuels d'apport au droit du barrage du Ziz varient d'un minimum de 51,6 millions de m<sup>3</sup> (61-62) à 482 millions m<sup>3</sup> (en 50-51) (rapport 9,35).

Les variations de débit mensuel sont encore beaucoup plus grandes. Des débits de zéro ont été constatés en huit mois différents pendant la période des mesures et le volume du mois maximum (octobre 1950) a dépassé de 16 % le volume moyen annuel.

Une autre caractéristique du régime de l'oued est l'importance des débits solides véhiculés.

Dans une région où la couverture végétale est très restreinte, ce phénomène a posé des problèmes importants au niveau de l'établissement d'un ouvrage de protection contre les crues et de retenue pour l'irrigation.

A titre indicatif on peut signaler que :

Une corrélation a été mise en évidence (étude publiée dans les « Transactions of the American Geophysical Union en 1950) entre précipitations annuelles et apport des débits solides, et que le maximum de débits solides par unité de surface d'un bassin est obtenu, lorsque les précipitations moyennes annuelles sont dans l'ordre de 250 à 350 mm.

Une grande partie du bassin versant de l'oued Ziz a ces moyennes de précipitations.

Un nombre limité d'observations de débits solides en suspension a été effectué en 61-62 près du site du barrage de Foum Rhiour. Aucune corrélation ne peut être mise en évidence entre la teneur en matière solide exprimé en gr. par litre et le débit total observé.

L'estimation a donc été faite par comparaison avec les débits solides emmagasinés dans des retenues du S.O. des U.S.A. (conditions climatiques semblables)

Les résultats donnent des dépôts moyens de  $460 \text{ m}^3/\text{an}/\text{km}^2$  soit pour la retenue considérée (bassin du Ziz à l'amont de la retenue  $4385 \text{ km}^2$ ) un apport de 2 millions de  $\text{m}^3/\text{an}$ .

Les études d'exploitation de la retenue supposent un emmagasinement total de 100 millions de  $\text{m}^3$  dans la retenue ce qui correspondrait à une vie utile de 50 ans.

On a ainsi une idée grossière des difficultés rencontrées lorsqu'on essaie d'apporter des solutions dans les régions aussi désertées.

#### Les crues :

Les pics des crues de l'oued Ziz ont tendance à durer peu de temps, et même les plus grandes crues connues se lèvent et s'abattent en moins de 24 h.

Ce caractère particulier des crues s'explique par la topographie et l'absence presque totale de couverture végétale d'une part, par le fait que les précipitations intenses (souvent des orages) qui produisent les crues influent seulement sur une petite partie du bassin versant dans un temps donné d'autre part.

Des crues se sont produites chaque mois de l'année mais les plus importantes l'ont été de septembre à décembre et de mars à juin.

On possède une liste des crues établie depuis 1933. A partir de 1954 cette liste devient plus précise et se complète d'évaluations quantitatives.

Nombre de jours de crue du Ziz à Erfoud (1933-1959)

(cf. tableau).

#### Les débits et volumes

Les crues du Ziz atteignent couramment des débits de plusieurs centaines de  $\text{m}^3/\text{sec}$ .

Or on peut considérer que le Ziz est en crue à Ksar Es Souk dès que son débit dépasse  $10 \text{ m}^3/\text{sec}$ . (350 jours sur une période de 7 ans).

Les crues sont dites « moyennes » jusqu'à  $100 \text{ m}^3/\text{sec}$  fortes au-dessus. Une crue de  $1000 \text{ m}^3/\text{sec}$  est nettement exceptionnelle.

Dans la plaine du Tafilaït où l'apport pérenne est presque nul, on peut considérer que le Ziz est en crue faible dès que son débit dépasse  $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ .

Le débit est le plus souvent maximal au début de la crue et décroît plus ou moins rapidement.

(La succession de crues moyennes ou fortes peut maintenir un débit élevé pendant un à plusieurs mois).

On voit ainsi que la durée n'est pas proportionnelle au débit de pointe atteint. L'existence d'une « queue de crue », prolongée rend malaisée la fixation de la durée.

Il s'avère donc que plus que la connaissance des débits de pointe, les volumes écoulés sont les véritables caractéristiques de ces crues.

En une année moyenne comme 1949-1950, 15 jours de crue du Ziz à Ksar Es souk ont totalisé près de  $40.10^6 \text{ m}^3$  soit 64 % du volume écoulé annuel.

En une année exceptionnelle comme 1950-51,  $197.10^6 \text{ m}^3$  soit 86 % du volume annuel se sont écoulés en 75 jours.

On peut estimer qu'en moyenne, les crues représentent la moitié environ du volume total écoulé du Ziz.

Vingt sept crues du Ziz observées pendant la période 1948 à 1955 à Targa, se répartissent ainsi du point de vue des volumes écoulés :

15 crues de moins de	$1.10^6 \text{ m}^3$	(0,14 à $0,74 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ )
5 « « « «	1 à $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
2 « « « «	2 à $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
2 « « « «	5 à $10^6 \text{ m}^3$	
1 « « « «	$15,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
1 « « « «	$23,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	
1 « « « «	$35,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	

Les écarts de ces volumes écoulés sont donc aussi importants que ceux des débits de pointe, aussi la moyenne arithmétique de cette série ( $3,95 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) n'a-t-elle aucune signification.

La plus grande crue observée (estimée être la crue de 100 ans) fut celle des 5 et 6 novembre 1965.

Débit de son pic  $3200 \text{ m}^3/\text{sec}$   
de son volume  $93,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (50 % du volume annuel moyen).

Elle provoqua des dégâts considérables.

La vitesse des fronts de crue peut atteindre 7 à 10 km/h pour les plus fortes crues, ce qui risque de provoquer des pertes en vies humaines si un système d'alerte sérieux n'est pas mis en place.

NOMBRE DE JOURS DE CRUE DU ZIZ A ERFOUD (1935-1959)

ANNEES	MOIS												TOTAUX
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1933									4	3	9	1	17
1934		8			10	4			13	2	5		42
1935			7							3			10
1936										1	9		10
1937					2	3		7	1	17	21	7	58
1938				2	4				6	10			22
1939									2	3	1		6
1940			1						7			2	10
1941			1							1	8		10
1942									1	2	11	3	17
1943		1	3	6		1		4	4	2		1	18
1944					1			1	1		4	1	7
1945					1	1				1			3
1946	1			1					3		5		14
1947		1	1		2	3	3	4		15		1	27
1948				20	30	10		1		13			74
1949			2	19	17			1	4	1		2	42
1950	1									31	15		81
1951									4	2	3	2	12
1952									10	6			19
1953					3				5	1	5	7	18
1954				3	2	2			1	10	23	15	45
1955				5	15	2			3	3	1	16	49
1956		1	17	2	5				2	2		2	35
1957				4	1	1					1	2	9
1958		1										2	5
1959			6		2			4		1			13
Totaux (27 années)	5	12	38	62	95	22	8	15	103	130	121	62	673
Moyennes ..	0,18	0,4	1,4	2,3	3,5	0,8	0,3	0,5	3,8	4,8	4,5	2,3	24,9

**DEBITS MENSUELS ET ANNUELS DE L'OUED ZIZ A AIT ATHMANE**  
(en mètres cubes par seconde)

Année Hydrologique	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Moyenne annuelle
1948 - 49 ..	0,00	24,20	0,33	0,06	0,06	3,01	4,41	41,86	36,75	10,02	3,56		10,50
1949 - 50 ..	2,95	3,83	1,72	5,42	3,87	2,28	1,93	0,00	0,00	0,00	0,00	28,80	4,23
1950 - 51 ..	46,22	78,85	24,75	5,64	4,75	5,43	7,97	5,11	2,57	1,28	0,60	0,05	15,27
1951 - 52 ..	6,12	2,09	4,91	2,85	2,19	1,30	0,93	0,06	2,27	0,00	0,00	0,00	1,89
1952 - 53 ..	11,66	3,83	0,00	0,00	0,52	1,27	4,27	7,18	4,12	1,37	1,12	0,62	3,00
1953 - 54 ..	5,87	2,56	7,16	7,88	7,77	10,40	15,86	14,22	6,33	1,63	0,04	7,24	7,25
1954 - 55 ..	0,00	0,32	8,13	8,13	2,34	7,28	3,24	4,79	3,77	6,38	2,42	1,44	4,06
1955 - 56 ..	3,40	14,45	4,54	26,23	12,59	9,95	20,71	19,87	24,57	10,90	7,85	5,34	6,12
1956 - 57 ..	11,34	8,81	7,25	5,87	7,84	8,36	2,25	8,65	3,03	5,22	2,11	2,77	13,37
1957 - 58 ..	3,58	6,49	6,74	3,69	6,25	11,32	9,24	3,48	1,65	3,06	2,52	3,88	5,40
1958 - 59 ..	0,00	1,51	10,26	4,70	9,92	2,51	13,01	5,62	4,45	4,32	3,15	5,43	4,91
1959 - 60 ..	9,10	3,76	2,95	2,80	3,91	7,20	7,85	2,65	2,35	14,50	3,60	2,65	5,47
1960 - 61 ..	0,00	0,34	1,49	0,84	1,54	3,62	4,62	3,72	2,52	8,10	0,57	0,06	2,29
1961 - 62 ..	0,45	0,65	5,89	1,04	0,46	0,27	1,09	4,45	3,73	1,56	0,13	0,25	1,65
1962 - 63 ..	7,93	3,51	2,12	1,57	1,66	1,70	0,91	3,41	32,82	18,80	3,07	0,68	6,54
1963 - 64 ..	2,69	0,51	1,19	3,53	2,78	2,58	1,62	3,77	2,54	1,87	0,75	0,53	2,09
1964 - 65 ..	5,39	0,02	0,42	0,46	1,66	18,41	5,54	10,85	2,38	4,17	1,39	1,47	4,35
1965 - 66 ..	4,61	19,05	43,60										
Moyenne (1948-65) ..	6,86	9,20	5,29	4,80	4,12	5,70	6,21	8,21	7,96	5,48	1,95	3,66	5,79

**VOLUMES MENSUELS ET ANNUELS DE L'OUED ZIZ A AIT ATHMANE**  
(en millions de mètres cubes)

Année hydrologique:	Sept.	Oct.	Oct.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Juin	Juill.	Aout	Moyenne annuelle	
1948 - 49 ..	0,00	64,82	0,86	0,16	0,19	7,23	11,81	108,50	98,43	25,79	9,54	4,69	332,25
1949 - 50 ..	7,59	10,26	4,46	14,52	10,37	5,52	5,17	0,00	0,00	0,09	77,14	0,09	135,03
1951 - 52 ..	119,80	211,19	64,15	15,11	12,72	13,14	21,35	13,25	6,88	3,32	1,61	0,13	482,65
1952 - 53 ..	15,86	5,60	12,72	7,63	5,87	3,26	2,65	0,00	6,08	0,00	0,00	0,00	59,68
1953 - 54 ..	30,22	10,26	0,00	0,00	1,39	3,07	11,44	18,61	11,04	3,55	3,00	1,66	94,24
1954 - 55 ..	15,22	6,86	18,56	21,11	20,81	25,16	42,48	36,86	16,95	4,23	0,11	19,39	227,74
1955 - 56 ..	0,00	0,86	21,07	23,28	6,27	17,61	8,68	12,18	10,10	16,54	6,48	3,86	126,93
1956 - 57 ..	8,81	38,05	11,77	70,25	33,72	24,93	55,47	51,50	65,81	28,25	21,03	14,30	424,50
1957 - 58 ..	29,39	23,60	18,79	15,72	21,00	20,22	6,03	22,42	8,12	13,53	5,65	7,42	191,89
1958 - 59 ..	9,28	17,33	17,47	9,88	26,57	27,39	24,75	9,02	2,51	7,93	7,55	9,05	169,08
1959 - 60 ..	0,00	4,64	26,59	12,50	10,47	6,07	34,85	14,57	11,92	11,20	8,44	14,54	155,28
1960 - 61 ..	23,59	10,07	7,65	7,50	16,74	18,04	21,03	6,97	6,29	37,58	9,64	7,10	172,10
1961 - 62 ..	0,00	0,91	3,86	2,26	4,13	8,76	12,37	9,64	6,75	21,00	1,53	0,16	71,36
1962 - 63 ..	1,12	1,74	15,27	2,79	1,23	0,65	2,92	11,53	9,99	4,04	0,35	0,01	51,64
1963 - 64 ..	20,56	10,21	5,50	4,21	4,45	4,11	2,44	8,84	87,91	48,73	8,22	1,77	206,95
1964 - 65 ..	6,97	2,44	3,03	10,26	7,45	6,46	4,34	9,77	6,80	4,85	2,01	1,42	65,85
1965 - 66 ..	13,97	0,05	1,09	1,23	4,45	44,54	14,84	28,12	6,38	10,51	3,72	3,94	133,14
1965 - 66 ..	11,95	51,50	113,00										
Moyenne (1948-65)	17,79	24,64	13,70	12,85	11,05	13,89	16,62	21,28	21,31	14,21	5,23	9,50	182,37

## Le barrage du Ziz

Le barrage du Ziz dont la construction a été terminée en 1971 joue un rôle très important pour le contrôle des crues.

L'écrêtement des crues y est obtenu sans aucune disposition spéciale, la retenue étant exploitée pour l'irrigation, et étant partiellement vide durant 93 % du temps.

En simulant la gestion fictive du barrage sur la période d'observation des crues on a constaté que la plupart des crues auraient été complètement emmagasinées et notamment celle des 5 et 6 novembre 1965.

Seules 2 crues annuelles excédant 200 m<sup>3</sup>/sec seraient arrivées pendant que la retenue était rem-

plie : celle d'Août 1949 (1530 m<sup>3</sup>/sec) — celle d'octobre 1950 (1100 m<sup>3</sup>/sec).

Pourtant, même quand la retenue est remplie jusqu'au niveau du déversoir, le fonctionnement de celui-ci aurait largement réduit ces crues par laminage de la tranche de la retenue au-dessus du niveau du déversoir.

On a calculé que si la crue max. observée de 3 200 m<sup>3</sup>/sec était arrivée quand la retenue était remplie, le débit instantané aurait été réduit à un débit de sortie de moins de 500 m<sup>3</sup>/sec.

La retenue est donc extrêmement efficace contre les crues même sans aucune disposition prise spécialement dans ce but.

## 9. — LE RESEAU D'ANNONCE DES CRUES AU MAROC

En raison de la défektivité de fonctionnement des liaisons téléphoniques en période de crue (mauvais temps, accès difficile des sites d'observation éloignés des postes téléphoniques) un réseau de transmission radio a été récemment mis en place.

Le 1er réseau à l'être, fut celui de la Moulouya en 1960. Son but était d'avertir de la formation et de l'évolution des crues susceptibles de perturber le chantier de construction du barrage de Mechra-Klila, et de laisser aux responsables le temps nécessaire pour prendre des mesures d'évacuation du matériel et du personnel.

Un second réseau équipe le bassin du Sebou depuis 1962. Il est principalement destiné à protéger la vie et les biens des riverains du Sebou et des populations de la plaine du Rharb contre les inondations.

Le réseau radio s'est depuis largement étendu et touche pratiquement toutes les stations du réseau hydrométrique National dont les renseignements sont utiles soit pour la protection des agglomérations, des populations et de leurs biens, soit pour la sécurité des ouvrages hydrauliques soit pour la protection de chantiers d'aménagement.

Les stations hydrométriques choisies, transmettent par radio, en plus des observations de hauteur d'eau, des données sur la pluviométrie, la température, l'humidité du sol, la nébulosité, la force du vent et sa direction, la visibilité.

Ces renseignements sont transmis aux postes principaux des réseaux secondaires qui les communiquent au service central à Rabat. Celui-ci les interprète et les utilise pour dégager les divers éléments

d'appréciation permettant de déclencher l'alerte en cas de danger de crue.

### Objectifs poursuivis :

Du simple réseau d'annonce de crue, suffisant pour renseigner sur l'évolution et la propagation de la crue, l'objectif est de passer progressivement à la réalisation d'un réseau hydro-pluviométrique et même hydro-météorologique de prévision proprement dit.

La prévision du phénomène et de son évolution est en effet basée sur la connaissance approfondie de la relation entre précipitations et ruissellement et sur l'étude du mécanisme de la formation des crues.

Elle nécessitera la réalisation de modèles hydrologiques simplifiés donnant une information approchée sur l'importance des débits à prévoir deux ou trois jours à l'avance dans diverses hypothèses de répartition et d'intensité des précipitations.

Ces renseignements seront exploités à partir de petits modèles mathématiques. Les temps de concentration devront être mieux connus.

Sur certains bassins montagneux, des renseignements sur l'enneigement et sur la température seront notés pour permettre d'apprécier la rétention et la fusion nivaies.

Il sera alors possible de se servir du réseau d'annonce des crues et des prévisions que l'on obtiendra à partir des modèles mathématiques pour établir un programme rationnel d'exploitation des ressources en eau régularisées par les barrages de retenue.

## Plan de développement

Le réseau actuel est conçu dans sa presque totalité pour protéger les ouvrages hydrauliques existants et les chantiers en cours.

Seuls deux réseaux (Sebou et Loukkos) sont destinés à l'alerte contre les inondations.

Pour un bassin donné, les stations sont de deux types :

— Stations de pré-alerte : ce sont les stations éloignées situées le plus souvent en régions montagneuses sur le haut bassin du fleuve et de ses principaux affluents.

— Stations d'alerte : stations où les crues observées ne risquent pas de subir de transformations notables, leur influence sur le débit à l'exutoire du bassin pouvant être considérée comme certaine.

Un premier stade du développement consistera à augmenter la densité des postes d'observation.

Seront équipés en priorité les bassins versants dominant des zones particulièrement sensibles aux inondations.

Ensuite équipement systématique des grands aménagements hydrauliques.

Le système hertzien peut-être ainsi conçu à deux étages :

— Sur le plan régional : collecte des renseignements.

— Sur le plan national : regroupement et traitement des renseignements — Point de la situation — alerte éventuelle.

## CONCLUSIONS :

Il apparaît à la lecture des objectifs poursuivis par les services de l'hydraulique pour installer le réseau d'annonce des crues et à l'examen des résultats et données rassemblés dans cette enquête, qu'une connaissance plus satisfaisante de l'hydrologie

des oueds marocains passe d'abord par un renforcement des stations d'observation et par l'interprétation des données qui y sont obtenues.

Les progrès dans cette connaissance ne peuvent être que relativement lents ; toute théorie dans le domaine de l'hydrologie devant s'étayer sur des observations qui portent sur des périodes importantes.

Il n'en reste pas moins vrai que les bases essentielles sont d'ores et déjà acquises et constituent un outil de base pour ceux qui ont à résoudre les problèmes, de vulgariser ces données et de sensibiliser l'opinion aux difficultés rencontrées par ceux qui sont chargés de ce travail.

La protection contre les crues constitue une préoccupation importante des responsables du Maroc.

Nous avons esquissé les solutions qui sont apportées dans certaines grandes régions et celles qui sont à l'étude pour d'autres.

Il faudrait y ajouter les travaux à réaliser à l'échelle régionale et même locale, pour résoudre les multiples problèmes créés par des crues sur de petits oueds.

Sans avoir l'ampleur des véritables catastrophes causées par le débordement du Sebou, du Loukkos, de la Moulouya ou du Ziz, les crues de ces oueds qui touchent souvent des populations parmi les plus déshéritées, détruisent elles aussi récoltes, routes, habitations.

Les solutions à apporter sont souvent très coûteuses et leur rentabilité mal établie si on se place du strict point de vue de l'économiste.

Notre souhait, à l'issue de cette enquête, est qu'elle aura permis, d'une part, de mieux faire connaître les difficultés rencontrées par ceux qui sont chargés de cet aspect fondamental de la mise en valeur du Maroc, d'autre part d'aider à la diffusion des données recueillies sur l'hydrologie des oueds marocains.

Dooms Paul  
Ingénieur du Génie Rural AIGx.  
Dép. du Génie Rural  
Institut Agronomique Hassan II

Lamrani  
Etudiant de 6ème année  
Section Génie Rural  
Institut Agronomique Hassan II.

## OUVRAGES ET ETUDES CONSULTÉS

- Dossiers du projet Sebou :
  - Elément d'hydrologie — Rabat avril 1968
  - Hydraulique : hydrologie naturelle du bas-Sebou — Rabat mars 1968
  - Rapport général. Annexe 3. Aménagement hydraulique — Rabat mars 1968
  - Hydraulique — avant projet de by-pass — Rabat mars 1968
  - Economie fascicule 5. Les dégâts des inondations — mars 1968
  - Rapport général. Annexe 2. Hydrographie — climatologie — hydrologie — mars 1968
- Etude hydrologique de l'oued Draâ par Mme Jivcovic
  - Ministère des travaux publics et des communications.
  - Direction de l'hydraulique.
  - Division des Ressources en eau.
  - Service de l'hydrologie.

Rabat 1969
- Résumé de l'étude hydrologique du bassin versant de la moulouya par M. Combe.
  - idem
  - Rabat le 20 août 1968
- Ressources en eau du bassin du Souss. Résultats des études et travaux en cours du projet Souss.
  - idem
  - Rabat le 20 mars 1971
- Etude hydrologique de l'Oued Moulouya M. Lazarevic.
  - idem
  - Rabat 1969
- Bassin de l'Oum-Er-Rbia
  - Etude du régime de l'Oued Oum-Er-Rbia et de ses affluents.
  - Rapport de synthèse
  - Mme Jivcovic
  - idem
  - Rabat 1970
- Aménagements hydro-agricoles Marocains
  - Comparaison et réflexion sur leurs coûts et leur utilité unitaire
  - Ministère des travaux publics et des communications
  - Direction de l'hydraulique
  - Service des études
- Etude de préinvestissement sur l'aménagement du bassin de l'Oum-er-Rbia Vol. 1 et 2
  - Alpinconsult
  - pour le Ministère des travaux publics et des communications et le ministère de l'agriculture et de la réforme agraire mars 1971.
- Aménagement de l'Oued Loukkos
  - Electro-Watt
  - pour le Ministère des travaux publics et des communications. Direction de l'hydraulique.
  - Octobre 1970
- Projet du barrage sur l'oued Massa
  - Etablissements de l'avant projet sommaire
  - TAMS
  - pour le Ministère des travaux publics et des communications. Direction de l'hydraulique.
  - Septembre 1968.
- Projet du barrage sur l'oued Zis Rapport général. Note de synthèse.
  - TAMS
  - Pour commission interministérielle du barrage du Zis. Office de Mise en Valeur Agricole-septembre 1966.
- Mémoire explicatif de la carte hydrogéologique au 1/50 000 de la plaine du Tafilalt par J. Margat. Editions du service géologique du Maroc — Rabat 1962.
- Annuaire hydrologiques du Maroc.
- Hommes - Terre et Eaux n° 2
  - « Le Gharb d'aujourd'hui et de demain »
  - par Lahlou A.
  - ANAFID - Rabat. Février 1972.
- Géographie du Maroc
  - J. Martin ; H. Jover ; J. Lecoz ; G. Mau ; D. Noin.
  - Hatier 1967.
- Atlas général du Maroc.

ANNEXE  
**FORMULAIRE PRELIMINAIRE POUR LA PUBLICATION  
PROJETÉE PAR L'ICID**

« MAITRISE DES CRUES - UNE REVUE MONDIALE »

**P A Y S :**

courbe de probabilité ou un tableau. Indiquer également la fonction statistique utilisée dans ce calcul.

**1. Description générale des rivières et caractéristiques de leurs crues.**

a) *Renseignements d'ordre général sur le pays*

(I) Superficie, environnement et topographie.

(II) Traits géologiques, météorologiques, climatiques et hydrologiques affectant le régime des crues des rivières principales. Répartition éventuelle de la superficie en régions selon certaines caractéristiques spécifiques locales affectant les crues.

(III) Rivières principales et affluents, leurs bassins hydrographiques caractéristiques des bassins versants et fréquence des crues et possibilité de synchronisation des crues des rivières.

b) *Etude particulière du régime et des crues des rivières.*

(I) Dimensions principales des bassins hydrographiques et leurs caractéristiques (grandeur, pentes, tapis végétal, nature du sol et du sous-sol, etc...), leurs conditions géographiques, météorologiques et hydrologiques.

(II) Régime des rivières, y compris les caractéristiques des crues et le rôle des affluents dans le développement des crues.

(III) Décrire les traits particuliers des crues des rivières étudiées (telles que celles résultant des précipitations de pointe, des averses torrentielles, etc...). Indiquer les caractéristiques des précipitations en précisant l'intensité, la durée, la fréquence, le taux de crue par unité de surface ( $m^3/s/km^2$  ou mètre cube/seconde/mille mètres carrés) ; moyenne annuelle. totale écoulement de crue ( $m^3/10^6$  ou acre-pied).

(VI) Dans le cas du calcul de probabilité se rapportant à la rivière et/ou ses affluents, par exemple, possibilités de crue, établir une

**2. Systèmes principaux de maîtrise des crues et historique sommaire de l'installation des ouvrages de maîtrise des crues dans le pays**

a) Grandeur de la superficie exposée aux risques de crues des rivières. Superficie des champs d'inondation protégés par les ouvrages de maîtrise des crues.

b) Système ou mesure de maîtrise des crues — emmagasinement ou rétention des crues, dérivations des crues, protection par levées ou digues le long des rivières, aménagement des bassins versants, etc...

c) Les divers aspects des ouvrages de maîtrise des crues des systèmes divers de maîtrise des crues et leur efficacité. Les limites de la protection normalement prévues et celles effectivement atteintes par rapport à la fréquence des crues dans les régions rurales et urbaines.

d) Historique sommaire de l'évolution des mesures de maîtrise des crues dans le pays.

**3. Statistiques relatives à la maîtrise des crues**

a) Coût par unités de surface protégée correspondant aux diverses périodes d'application des mesures de protection contre les crues.

b) Calcul du temps comme facteur influant sur les dégâts causés par les crues, et limites des superficies protégées pendant les périodes considérées depuis la mise en place des ouvrages de maîtrise des crues.

**4. Exemples de problèmes particuliers de maîtrise des crues dans le pays**

a) Manque de dépôts de limon fertilisant dans des régions protégées après la mise en place des ouvrages de maîtrise des crues.

- b) Changements de niveaux d'eau souterraine.
- c) Augmentation des niveaux des crues ou élévation des crues causées par la maîtrise des crues par levées en terre. Changement d'élévation du lit de la rivière. Changement de régime des rivières, en amont et en aval des ouvrages de maîtrise des crues.
- d) Crues avec couverture de glace.
- e) Propreté des rivières et leur pollution.

**5. Etude détaillée des méthodes de protection contre les crues y compris les projets de développement de la protection contre les inondations dans le pays**

- a) *Calcul du débit des crues nominales et des niveaux des crues.*  
Méthodes utilisées dans le choix des crues nominales (ou rivières particulières) - optimisation économique et/ou facteurs sociaux, résultats des expériences précédentes, importance relative des structures, etc... Préciser les recommandations spéciales et les normes éventuellement appliquées dans le choix des crues nominales de même que les usages et les notions particuliers se rapportant aux modèles mathématiques.
- b) Emmagasinement des crues et son influence sur l'ampleur et la période du débit des crues. Citer l'expérience du pays dans la combinaison de la maîtrise des crues avec d'autres fonctions du projet, notamment, l'hydro-électrique, l'irrigation, la navigation, le contrôle de la qualité des eaux et d'autres domaines.
- c) Classification des ouvrages de protection contre les crues.
- d) Dessin des digues de défense contre les crues.
- e) Construction des digues. Méthode et techniques, et problèmes traités.
- f) Méthodes de défense contre les crues et organisation.
- g) *Prévisions des crues.*

(I) Méthodes de prévision.

(II) Travaux de recherche sur les prévisions et expérience sur l'application des méthodes de prévision utilisées dans le pays, notamment en ce qui concerne les données de prévision (niveaux maxima, durée) obtenues par rapport aux données observées.

(III) Citer l'expérience éventuellement faite dans la prévision des volumes et des points résultant des crues de fonte de neige à partir des hauteurs de neige et la teneur en eau.

**h) Systèmes d'alerte et de prévention des crues.**

(I) Système uniforme ou différents d'alerte utilisés dans les divers bassins hydrographiques, les principes fondamentaux et les résultats pratiques et les garanties offertes.

(II) Mode de diffusion d'alertes.

(III) Mesures de sécurité - plan d'évacuation immédiate et du transport de personnes et d'objets de valeurs, etc...

**6. Aspects juridique, administratif, économique et financier des ouvrages de protection**

- a) Points principaux de la réglementation administrative, ordonnances etc... concernant les crues et la régulation ou l'aménagement du champ d'inondation.
- b) Organisation mise en place pour les ouvrages de maîtrise des crues et aménagement du champ d'inondation.
- c) Evaluation économique des ouvrages de maîtrise des crues.
- d) Financement du coût d'investissement, coûts d'entretien et d'exploitation des ouvrages de maîtrise des crues.

**7. Recherches en vue d'améliorer la défense contre les crues**

Exposé sommaire des résultats importants obtenus et des recherches projetées. La recherche doit comprendre l'hydrologie scientifique pour de meilleures prévisions des crues nominales de même que la construction des ouvrages de maîtrise des crues propres à accroître l'efficacité et la Sécurité des ouvrages.

**8. Coopération avec les pays voisins en matière d'alerte et de protection**

- a) Listes des accords.

**9. Autres précisions importantes sur la maîtrise des crues non fournies aux points 1 à 8 ci-dessus.**

# L'EAU ET LE SEL DANS L'AGRICULTURE MAROCAINE

## SOMMAIRE

- Introduction
- Le cadre marocain
- Irrigation et salinité
- Premier exemple : la plaine du Gharb
- Deuxième exemple : la plaine des Beni-Amir (Tadla)
- Troisième exemple : le sud-est marocain
- Conclusions
- Bibliographie
- Glossaire

Enquête réalisée par  
F. Mougnot

## INTRODUCTION

Dans les pays soumis à un climat chaud et sec, le développement économique passe obligatoirement par la mise en place d'une agriculture irriguée intensive : le Maroc qui offre toutes les variantes du climat méditerranéen n'échappe pas à cette règle. Mais le développement de l'agriculture irriguée et l'utilisation intensive des ressources en eau entraînent à leur suite une série de problèmes parmi lesquels la salinité n'est pas des moindres.

Bien sûr, ce problème n'atteint pas au Maroc une acuité et une extension comparables à celles que l'on peut rencontrer dans d'autres pays méditerranéens, mais il n'empêche que ce problème existe et qu'il est amené à prendre de l'ampleur au fur et à mesure de l'extension des superficies irriguées. Il y a donc un intérêt économique évident à s'en préoccuper et à adopter à son égard une attitude préventive plutôt que curative. Les responsables de la mise en valeur sont bien conscients de ce fait et depuis plusieurs années déjà, les problèmes de salinité sont à l'étude et ont justifié l'installation de champs expérimentaux dans plusieurs régions du Maroc. Il est encore trop tôt pour faire le bilan de ces études, de sorte qu'à l'heure actuelle, nous ne disposons pas de normes spécifiquement marocaines dans ce domaine. L'établissement de telles normes constitue par ailleurs un travail de longue haleine car la réalité marocaine est caractérisée par une extrême diversité. Il s'avère donc indispensable de rassembler et de coordonner les éléments de cette réalité en procédant à une enquête ayant pour objet de localiser et de définir tous les problèmes qui se posent ou risquent de se poser au Maroc. L'occasion de pareille enquête vient de nous être fournie, fort à propos, par l'ICID (International Commission on Irrigation and Drainage)

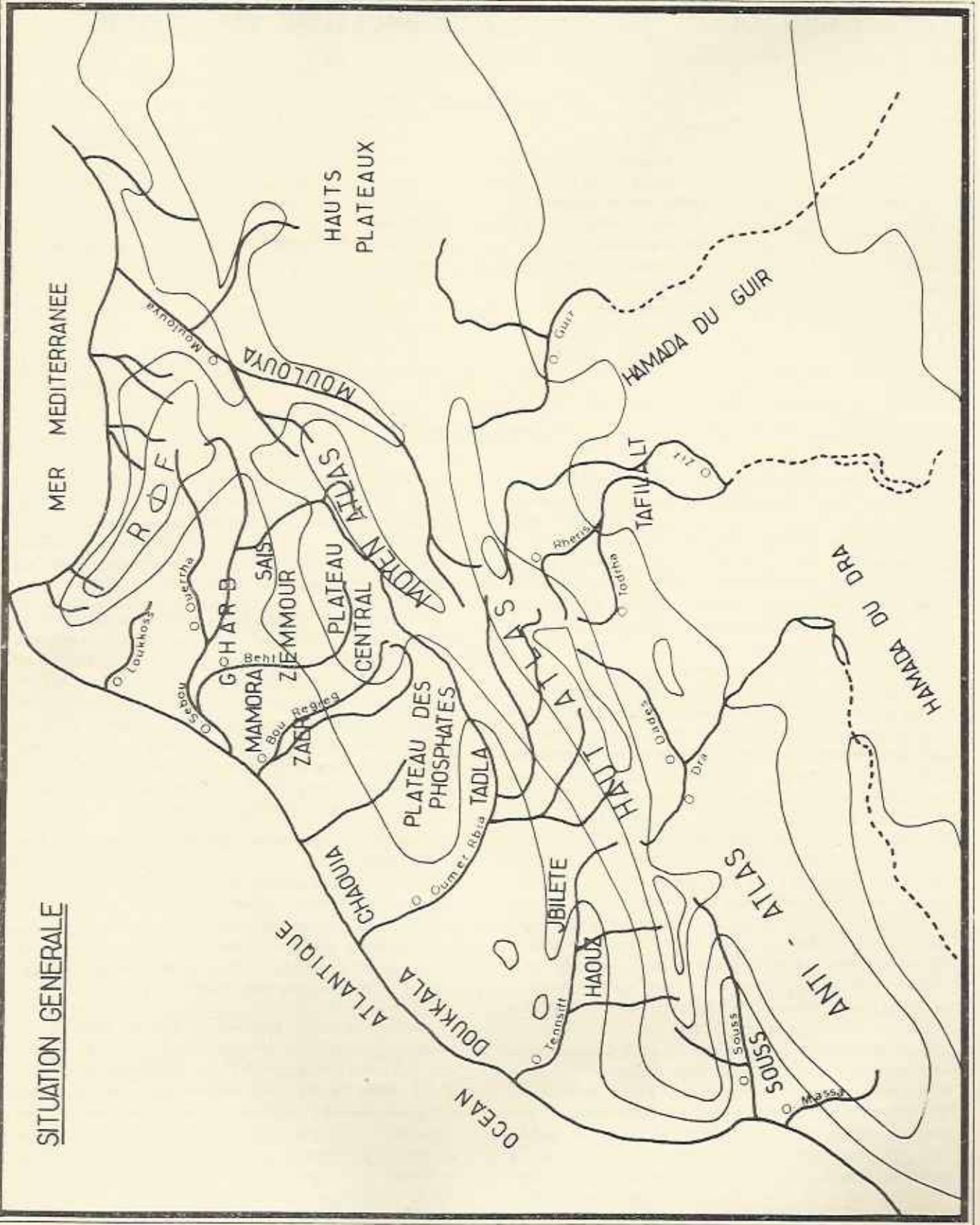
qui depuis un an, rassemble tous les éléments d'une étude mondiale sur le sujet. Cette initiative internationale s'est concrétisée au niveau marocain par la rédaction d'un premier rapport dont on a jugé utile de publier ici les lignes essentielles, mais ce rapport n'est ni complet ni définitif.

Au Maroc, la plupart des problèmes ne peuvent en effet être abordés que dans leur contexte régional. A la base de toute compréhension de la réalité se trouve le fait géographique. Celui-ci a modelé le pays et conditionné son évolution au point d'en faire un ensemble de régions très distinctes ; c'est à l'intérieur de ces cadres régionaux que s'est faite l'évolution de l'agriculture, sous la pression de multiples facteurs parmi lesquels le fait sociologique et humain occupe une place non négligeable.

Une étude valable ne peut donc se concevoir que si elle s'appuie sur le cadre géographique et aboutit à son objet en passant, au besoin, par la compréhension des facteurs humains et sociaux. Il en est des problèmes de salinité comme du reste, ce qui explique notamment la difficulté d'établir des normes et le fait qu'on ait généralement recours à des normes inadaptées à la plupart des cas concrets.

Dans une telle optique, le travail présenté ici ne peut être que fort restreint. Nous avons opté pour une présentation sommaire du cadre national suivi d'une étude de régions, cas par cas, mais les délais qui nous étaient imposés ne nous ont pas permis d'étendre notre enquête à toutes les régions irriguées du Maroc et même dans le cas des régions étudiées, de nouvelles informations viendraient utilement compléter ou corriger celles que nous avons pu rassembler.

SITUATION GENERALE



Beaucoup plus qu'un bilan, ceci constitue donc une amorce et une invitation à poursuivre un travail dont l'achèvement pourrait être concrétisé par la publication d'une monographie sur la salinité au Maroc. Il va de soi que cet aboutissement ne sera atteint que grâce à la collaboration des chercheurs et offices de mise en valeur, collaboration que nous espérons voir s'établir sur la base de ce premier rapport.

## LE CADRE MAROCAIN

Le relief du Maroc est dominé par deux formations montagneuses : le Rif situé en bordure de la Méditerranée et l'Atlas qui traverse le pays en diagonale. L'Atlas se compose lui-même d'une chaîne principale, le Haut Atlas d'où se détachent deux chaînes secondaires, le Moyen et l'Anti-Atlas. Aux pieds du Rif, se trouve la plaine du Gharb (Oued Sebou) limitée au sud par un ensemble de collines, plateaux et glacis (Saïs, Zemmour, Mamora et Zaër). Ceux-ci forment la bordure nord du Plateau central et du Plateau des phosphates. Entre ce dernier et le Moyen Atlas, vient s'enclaver la longue plaine du Tadla (Oued Oum er Rbia) tandis que, plus au sud, Haut Atlas et Jbilet délimitent la plaine du Haouz (Oued Tensiff). Toutes ces plaines sont ouvertes vers le nord-ouest et rejoignent le littoral atlantique. La plaine du Souss sépare Haut Atlas et Anti-Atlas (Oued Souss), tandis qu'au sud de ces montagnes s'étalent de vastes plateaux peu découpés où coulent trois oueds sahariens (Dra, Ziz et Guir). Vers l'est, le Haut Atlas se prolonge par l'immense haut plateau oriental ; ils sont séparés du Moyen Atlas par le cours de la Haute Moulouya tandis que le cours inférieur de cet oued forme la plaine qui s'étend entre le Rif et le Plateau oriental. Dans ce cadre, on retrouve toutes les variantes du climat méditerranéen. La température oscille entre des minima inférieurs à 10°C et des maxima supérieurs à 30°C avec une amplitude moyenne de 25 à 35°C. Les précipitations moyennes varient de 25 à 200 mm et ont une distribution très irrégulière dans le temps et dans l'espace. D'une année à l'autre la pluviosité peut varier dans un rapport de 1 à 3. La quantité d'eau qui tombe sur le pays en année moyenne est estimée à 120 milliards de m<sup>3</sup>, soit un débit fictif continu de 4 000 m<sup>3</sup>/seconde. Mais le maximum régularisable, utile pour l'agriculture est estimé à 400 m<sup>3</sup>/s, de sorte qu'en se basant sur une consommation moyenne de 10 000 m<sup>3</sup>/ha/an, la superficie maximale irrigable est de 1 200 000 ha ce qui équivaut, à peu près, au quart des terres actuellementensemencées.

Les étages bioclimatiques sont localisés comme suit :

- saharien : plateaux du sud.
- aride : Souss et Anti-Atlas, Haouz, Tadla et sud du Plateau des phosphates, Plateau oriental et haute Moulouya.
- semi-aride : plaine littorale au sud de la Mamora, nord du Plateau des phosphates, Mamora, Zaër, Zemmour, Saïs, Gharb et basse Moulouya.
- sub-humide : parties basses du Haut et Moyen Atlas et du Rif, bande côtière du Gharb.
- humide : sommets du Rif et du Moyen Atlas.
- haute montagne : sommets du Haut Atlas.

Du point de vue de leur utilisation, les 41 millions d'hectares du Maroc se répartissent comme suit :

- zone improductive (42 %) : Sahara et haute montagne.
- parcours et cultures extensives associées (22 %) : étage aride plus la partie de l'étage semi-aride située en montagne.
- forêts (10 %) : Atlas, Rif, Plateau central et Mamora.
- zone alfatière (6,8 %) : nord du Plateau oriental et haute Moulouya.
- zone agricole : elle couvre 19,2 % de la superficie totale et se répartit en 11,6 % de terres ensemencées, 1,5 % de vignobles et vergers et 6,1 % de jachères temporaires ; elle occupe le Souss, le versant nord de l'Atlas et le versant sud du Rif, la plaine littorale, les Zaër, le Zemmour, le Saïs, le Gharb et la basse Moulouya, plus des terres irriguées en zone aride.

Les superficies cultivées se répartissent comme suit :

— Céréales .....	89,3 %
— Légumineuses .....	5,8 %
— Maraîchage .....	2,2 %
— Cultures fourragères .....	0,7 %
— Divers .....	0,8 %

## IRRIGATION ET SALINITE

Sur le plan de l'agriculture irriguée, le Maroc est en plein développement. En 1970, on estime à 150 000 ha la superficie irriguée dans les grands périmètres et à 250 000 ha la superficie des installations isolées. Les grands périmètres sont situés dans

la basse Moulouya, le Gharb, le Tadla, le Haouz, les Doukkala, le Tafilalet et le Draâ (1) ; quant aux installations isolées on en trouve dans diverses régions mais surtout dans le sud (2) : Tafilalt (oued Ziz), Draâ et Haouz, où l'agriculture irriguée traditionnelle a atteint un niveau remarquable. Ces superficies sont en extension constante ; on a vu qu'en régularisant les débits, on peut les porter à un maximum de 1 200 000 ha (3). Les travaux en cours visent à étendre ou à moderniser les périmètres existants et à en créer de nouveaux. Ce sont l'équipement complet du Gharb, l'équipement du Loukkos, du Souss-Massa, du Tafilalt, du Draâ et l'extension des périmètres du Tadla, du Haouz, des Doukkala et de la basse Moulouya (1).

Les problèmes de salinité, très répandus, se présentent sous des aspects très différents. On distinguera les problèmes dus à la salinité ou à l'alcalinité, celle-ci pouvant être sodique ou magnésienne. La source du sel peut être le substrat, la nappe ou l'eau d'irrigation. Les dangers peuvent provenir de l'un de ces éléments mais aussi de pratiques dangereuses telles que la décharge d'une nappe en contact avec l'eau de mer ou, au contraire, l'alimentation excessive d'une nappe profonde. Dans la plupart des cas, plusieurs facteurs se combinent : ainsi en est-il de l'irrigation par eau salée d'un sol mal drainé. Enfin des facteurs tels que la poussée démographique associée à l'insuffisance des ressources en eau doivent également être pris en considération, de même que l'inexpérience de certains agriculteurs en matière d'agriculture intensive. Cette dernière cause peut en effet donner lieu à des pratiques dangereuses telles que le recyclage de l'eau de drainage.

On n'en finirait plus d'évoquer les problèmes et leurs causes ; quant à la lutte contre la salinité elle devra se faire sur des plans très différents et souvent même sur plusieurs plans simultanément. Nous reviendrons sur ceci dans les exemples qui suivent :

Les méthodes d'étude de la salinité sont universellement connues, il suffit de se référer aux publications de l'U.S. Salinity Laboratory de Riverside. L'extraction des sels solubles se fait à saturation ou à divers rapports sol/eau, généralement 1/5, tandis qu'au contraire l'extraction des éléments échangeables se fait au moyen de solutions d'acétate, les méthodes variant selon que le sol est calcaire ou non.

Le dosage des sels totaux dans une eau ou un extrait de sol se fait par pesée du résidu sec ou par conductimétrie respectivement. Les anions  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont dosés par acidimétrie,  $\text{Cl}^-$  par argentimétrie et  $\text{SO}_4^{2-}$  par gravimétrie ou complexométrie. Les cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  sont dosés par spectrophotométrie de flamme et  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  par complexométrie ou parfois par spectrophotométrie d'absorption atomique.

Il n'existe aucune norme universelle pour exprimer la salinité d'un sol ou d'une eau : elle est donnée indifféremment en gr/Kg ou gr/l, en meq/100 gr ou meq/l, ou encore en mmhos/cm. Autrefois, la seule méthode analytique utilisée en routine était le dosage de  $\text{Cl}^-$  par argentimétrie. Le résultat était exprimé en gr de NaCl par Kg de terre ou par litre de solution en supposant que  $\text{Cl}^-$  est associé à  $\text{Na}^+$ . Bien que cette expression soit tout à fait insatisfaisante, on est souvent obligé d'y recourir lorsqu'on désire faire des comparaisons avec des résultats anciens.

L'expression de l'alcalinité sodique est, par contre, normalisée. On a défini :

$$\text{SAR}^{(1)} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

et le taux de sodium échangeable dans un sol en équilibre avec une solution de SAR donné est déduit au moyen de la formule :

$$\text{ESP}^{(2)} = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})}{1 + (-0,0126 + 0,01475 \text{ SAR})}$$

Le danger d'alcalinisation étant également lié à la présence de carbonate dans l'eau d'irrigation, on utilise également la formule du carbonate résiduel.

$$\text{RC} = (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca} + \text{Mg})$$

Dans toutes ces formules, les concentrations sont exprimées en meq/l. Il n'existe aucune formule pour exprimer l'alcalinité magnésienne ; c'est un cas flagrant d'inadaptation des normes internationales à la réalité marocaine.

L'interprétation des résultats se fait selon diverses classifications. Pour les sols, on définit cinq classes de salinité.

(1) Cf. Hommes, Terre et Eaux, n° 1, nov. 71. Situation de la Mise en Valeur etc...

(2) Cf. Hommes, Terre et Eaux, n° 2, 1<sup>er</sup> trim. 72. La petite et moyenne hydraulique au Maroc.

(3) dont 700 000 ha dans les grands périmètres.

(1) Cf. Hommes, Terre et Eaux, n° 1, déjà cité.

(1) S.A.R. = Sodium Absorption Ratio.

(2) E.S.P. = Exchangeable Sodium Percentage.

CLASSE	1	2	3	4	5
mmhos/cm — à saturation ..	max. 2	2 à 4	4 à 8	8 à 20	20 et plus
mmhos/cm — rapport 1/5 ..	> 0,6	0,6 à 1,2	1,2 à 2,4	2,4 à 6	6 > >
meq/100 gr .....	> 3	3 à 6	6 à 12	12 à 30	30 > >

et six classes d'alcalinité

CLASSE	1	2	3	4	5	6
E.S.P. ....	max. 2	2 à 10	10 à 20	20 à 40	40 à 60	60 et plus

Les eaux d'irrigation sont classées sur un diagramme à deux dimensions. Cinq classes de conductivité sont définies et disposées sur un axe logarithmique :

CLASSE	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
mmhos/cm .....	max. 0,25	0,25 à 0,75	0,75 à 2,25	2,25 à 5	5 et plus

Les limites des classes d'alcalinité varient en fonction de la conductivité :

CLASSE	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>
SAR à 0,1 mmhos/cm .....	max. 10	10 à 18	18 à 26	26 et plus
SAR à 5 mmhos/cm .....	max. 2,5	2,5 à 6,5	6,5 à 11	11 et plus

Les eaux sont classées selon les deux paramètres ; par exemple l'oued Oum er Rbia est en classe C<sub>3</sub>S<sub>3</sub>. C'est surtout dans la classification des eaux que les normes s'avèrent inadaptées à la plupart des cas concrets. En effet, dire comme le fait la définition de ces classes qu'une eau C<sub>3</sub> est très salée et dangereuse et que son emploi doit être aussi limité que possible est un non sens lorsqu'on sait d'autre part que les seules ressources dont on dispose pour irriguer l'immense plaine du Gharb ou le grand périmètre des Beni-Amir sont des eaux C<sub>3</sub>.

Quant aux règles pratiques à observer pour combattre la salinisation ou l'alcalinisation d'un sol, elles dépendent fortement des situations locales. Les fac-

teurs qui doivent être pris en considération sont très variables :

- sous-sol : danger de remontée de nappe
- sol : texture, structure, perméabilité, aptitude au drainage
- cultures : tolérances et effet sur la structure du sol
- pratiques culturales : travail du sol, mode d'irrigation, fumure
- eau : composition chimique
- climat : pluviosité évapotranspiration, etc...

Il est donc vain de vouloir établir des règles générales valables pour l'ensemble du pays. Quant aux principes fondamentaux, ils sont extrêmement simples : les sels doivent être lessivés et les ions alcalinisants doivent être combattus au moyen d'amendements puis lessivés. Dans les cas d'alcalinité, on utilisera également toute méthode susceptible d'améliorer la structure du sol.

### PREMIER EXEMPLE : LA PLAINE DU GHARB

La plaine du Gharb est située au nord-ouest du pays, ses limites naturelles sont les collines de Lalla Zohra au nord, le pré-Rif à l'est, le glacis de la Mamora au sud et l'Atlantique à l'ouest. Elle est de forme triangulaire et presque sans relief : outre la plaine proprement dite, on distingue de vastes dépressions, les « merja », des levées alluviales le long des oueds et le glacis du Zrar qui s'élève en pente douce vers le sud-est. A l'exception des levées alluviales, plus limoneuses, le fond argileux apparaît partout (1).

Deux étages bioclimatiques partagent cette région : l'étage subhumide, le long de la côte et l'étage semi-aride ailleurs. La température moyenne se situe aux alentours de 18°C avec des minima hivernaux de 5 ou 6°C et des maxima estivaux de 33 ou 34°C.

Les pluies sont assez abondantes : la pluviosité annuelle, supérieure à 500 mm est concentrée sur la saison froide. Le degré hygrométrique, assez élevé sur la côte devient très bas à l'intérieur. Le problème le plus grave est constitué par les débordements fréquents et catastrophiques de l'oued Sebou (2). Ils suivent des chenaux d'inondation en direction des parties les plus basses de la plaine et sont accompagnés de phénomènes d'alluvionnement et d'exhaussement des berges qui maintiennent le réseau hydrographique en perpétuelle évolution. La majeure partie du Gharb est encore cultivée en sec. Les premières irrigations remontent à 1932 ; le premier périmètre, situé sur l'oued Beth et alimenté par le barrage d'El Kansera, couvre une superficie de 30 000 ha. Sur l'ensemble de la plaine (540 000 ha) on estime à 325 000 ha la superficie dominable. Une importante étude a été réalisée par le Projet Sebou (UNDP-FAO) dans le but de mettre la plaine en valeur et actuel-

lement, tous les efforts portent sur la première tranche d'irrigation, la PTI, qui couvre 40 000 ha. A part le problème des inondations qui conditionne la mise en valeur du Gharb, la principale difficulté rencontrée est due à la texture très fine et à la faible perméabilité des sols (1). Sur l'ensemble de la plaine, 35,5 % seulement n'offrent pas de difficulté particulière au drainage. Dans de pareilles conditions, il est normal de rencontrer des problèmes de salinité. Sur 90 000 ha représentatifs de la plaine (qui constituent la première zone de développement), 51 % des terres sont salées ou très salées et 34 % sont alcalins ou très alcalins.

En outre, l'oued Sebou et l'oued Beth qui sont actuellement les deux sources d'eau d'irrigation sont tous deux classés en C<sub>3</sub>S<sub>1</sub>. Si l'alcalinité ne constitue donc pas un danger pour le Gharb, la salinité des eaux, associée à la mauvaise perméabilité des sols, nécessite d'importantes et coûteuses mesures de protection. La présence dans le Gharb d'un périmètre irrigué depuis plusieurs décennies nous permet, par comparaison avec des terres identiques, non encore irriguées, d'évaluer les effets de l'eau salée sur la nappe, les sols et les cultures.

En zone non irriguée, la nappe se situe généralement à plus de deux mètres dans les « dess » ainsi que dans certains « tirs » ou « merja » où des horizons limoneux ou sablonneux situés vers deux ou trois mètres font office de drains naturels. Par contre dans les parties basses et mal drainées, la nappe peut affleurer pendant la saison pluvieuse.

Les irrigations ont pour effet général de faire remonter la nappe jusqu'à moins de un mètre, ce qui, à la longue, provoque une concentration des sels par évapotranspiration.

En règle générale, on constate que les nappes profondes sont peu salées (moins de 5 gr/l) et que les irrigations salent la nappe dans les zones à faible perméabilité. La précaution à prendre dans ces sols est donc l'installation d'un bon réseau de drainage.

La même conclusion s'impose lorsqu'on examine l'évolution des sols. Le tableau suivant nous donne la proportion des sols salés en zone non irriguée (S) et en zone irriguée (I) pour chaque type de sol rencontré dans le Gharb.

(1) Cf. Hommes, Terre et Eaux, n° 2. « Le drainage dans le Gharb ».

(2) Cf. « Le Gharb d'aujourd'hui et de demain », Hommes, Terre et Eaux, n° 2.

(1) Le drainage dans le Gharb in T.H.E., n° 2, 1<sup>er</sup> trim. 72.

SOL	Importance de ce sol dans le Gharb %	% de la superficie de ce sol dans lequel on trouve un taux de NaCl supérieur à			
		1 gr/Kg		2,5 gr/Kg	
		S	I	S	I
dess léger .....	12	6	46	0	8
dess lourd .....	5	13	75	0	18
ferchech .....	17	32	100	3	60
hamri .....	36	30	100	0	8
firs .....	24	54	95	10	38
merja .....	6	—	100	63	68

Il ressort clairement de ce tableau que l'irrigation sale les sols. On constate en outre que la salure n'évolue pas dans les sols à nappe profonde mais qu'elle augmente là où la nappe monte et qu'elle diminue là où une nappe haute a été rabattue.

A cela s'ajoute un autre phénomène constaté sur le périmètre du Beth. L'irrigation gravitaire combinée aux labours à la charrue à disques provoque une modification de structure qui se traduit par la formation d'une semelle de labour de 5 à 10 cm. Cette semelle compacte et peu perméable, donc dangereuse, est particulièrement marquée sous les sillons d'arrosage. Dans ce cas, outre les mesures à prendre en vue d'améliorer le drainage, une attention particulière devra être donnée au travail du sol.

Pour ce qui est des cultures, l'influence du sel est partiellement masquée par d'autres facteurs limitants tels que l'hydromorphie, l'engorgement et la carence en azote. On peut cependant affirmer que la salinité n'atteint nulle part un niveau tel qu'elle interdise toute culture. Dans les zones salées, l'agrumiculture est exclue et la culture principale est celle des céréales dont la récolte intervient bien avant que la salinité n'ait atteint son niveau maximum. Il faut également signaler l'incidence de la salinité sur une industrie agricole : la betterave sucrière résiste très bien au sel mais l'accumulation du sodium dans la racine pose de sérieux problèmes au moment du raffinage.

On peut donc conclure que dans le Gharb, la salinité joue un rôle non négligeable. La qualité de l'eau d'irrigation affecte la nappe et les sols et intervient dans le choix des cultures possibles. La solution générale à ce problème semble être l'amélioration du drainage et les rapports du Projet Sebou sont très optimistes en ce qui concerne les rendements que l'on peut obtenir dans cette région.

#### DEUXIEME EXEMPLE : LA PLAINE DES BENI-AMIR (TADLA)

Limité au nord-ouest par le Plateau des phosphates, au nord par le Plateau central, à l'est et au sud par le Moyen Atlas, le Tadla est une vaste plaine située à 400 m d'altitude et traversée par l'oued Oum er Rbia qui sépare la plaine des Beni-Amir au nord de celle des Beni-Moussa, au sud.

De topographie régulière et en pente douce, le Tadla est issu d'un vaste lac où s'est accumulée une forte épaisseur de dépôts marneux alternant avec des bancs de calcaire lacustre. Ces dépôts ont été recouverts par des limons quaternaires moyens dont l'épaisseur ne dépasse pas 10 m et à certains endroits par des limons quaternaires récents qui ne dépassent pas 2 m d'épaisseur. La majeure partie des Beni-Amir est constituée de sols isohumiques tropicaux avec, par endroits, d'importantes bandes de sols calcomagnésimorphes. Située dans l'étage bioclimatique aride, la plaine du Tadla connaît une température élevée : 19 à 20°C en moyenne. Elle oscille entre 0 et 38 à 42°C et les écarts diurnes-nocturnes sont supérieurs à 20°C. La pluviosité est irrégulière dans le temps et dans l'espace ; elle se situe entre 323 et 346 mm, répartis sur 45 à 50 jours durant la saison froide. L'hygrométrie moyenne varie de 50 % en été à 70 % en hiver avec les minima et maxima normaux de 20 et 96 %. En hiver, les vents dominants sont du nord (secs et froids) et du sud-ouest (pluie), en été, ils sont du sud-est et d'est (secs et chauds).

L'équipement hydraulique des Beni-Amir a débuté en 1922 ; de 1930 à 1947 les ouvrages principaux ont été exécutés et 18 000 ha ont été équipés. De 1947 à 1950 on assiste à des remontées de nappe dangereuses, un réseau de drainage par fossés est installé.

De 1950 à 1960, l'extension des irrigations se poursuit, une nouvelle tranche de 10 000 ha est équipée et le réseau de drainage est étendu et approfondi mais la nappe, stabilisée pendant quelque temps continue à monter.

Actuellement, sur 51 000 ha du périmètre, 29 000 sont équipés et 23 800 sont effectivement irrigués mais la situation est peu brillante et l'Office Régional de Mise en Valeur du Tadla a procédé à une étude fouillée en vue de moderniser le périmètre et d'y adjoindre de nouvelles extensions (23 000 ha).

Les difficultés rencontrées sont imputables à plusieurs facteurs : les marnes du sous-sol qui ralentissent l'écoulement de la nappe vers l'Oum er Rbia, la suralimentation de celle-ci par les pertes du réseau réalisé en majeure partie en terre et le manque d'expérience des agriculteurs de cette région qui, avant l'installation des périmètres était une zone pastorale. La totalité du périmètre des Beni-Amir est irriguée à partir de l'Oum er Rbia dont les caractéristiques actuelles sont un débit irrégulier, une salinité élevée et variable et une alcalinité forte. Ses eaux sont classées en C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> valeur qui ne sera pas diminuée par l'ouvrage de régularisation prévu en amont de la prise d'eau.

Avant l'installation du périmètre, la nappe se situait à 50 m de profondeur dans les parties hautes et à 15 m dans les parties basses de la plaine. La majorité des canaux secondaires et tout le tertiaire étant réalisés en terre, des pertes importantes se manifestent qui ont pour effet de faire remonter la nappe. Actuellement, le niveau de celle-ci se situe à moins de 1 m sur 3 ou 4000 ha et à moins de 2 m sur 20 000 ha : situation qui ne tend pas à s'améliorer, car insuffisamment dotés en eau, des agriculteurs de l'aval construisent des batardeaux dans les fossés de drainage afin d'y puiser leur eau d'irrigation.

Cette remontée de la nappe alimentée en eau salée a été naturellement accompagnée de phénomènes d'évaporation et de concentration des sels, phénomènes qui sont en outre accentués par le recyclage de l'eau de nappe (pompages et batardeaux). Cette évolution apparaît nettement sur trois cartes réalisées en 1947, 1961 et 1968.

De 1947 à 1961, l'augmentation est générale, le minimum passe de 55 à 128 mgr/l de Cl<sup>-</sup> et le maximum de 873 à 1260 mgr/l, ensuite, on distingue des zones où la nappe a atteint son équilibre (concentration égale ou inférieure à 1000 mgr/l) et le reste du périmètre où la salinité continue à croître. Le minimum est donc stationnaire tandis que le maximum monte à 6 462 mgr/l. En général, la corrélation entre hauteur de nappe et concentration est positive et très élevée. Conséquence logique de cette situation, les

horizons qui sont en contact avec la nappe se salent. Mais étant donnée la bonne perméabilité de ces sols, le lessivage des sels est très facile, de sorte que la salure de l'horizon superficiel est pratiquement négligeable. La seule raison qui empêche le lessivage complet du profil est la proximité de la nappe et on pense qu'un rabattement efficace rendra nuls les risques de salure du sol. Quant à l'alcalinité de l'eau d'irrigation, elle affecte directement les sols puisque l'ESP du complexe varie entre 12 % en surface et 18 % en profondeur. Cependant, ce taux élevé semble sans effet sur la structure, bien que celle-ci soit généralement peu stable et on explique cela par le pouvoir tampon du calcaire actif, très abondant dans ces sols.

Pour ce qui est des cultures on ne peut guère parler des effets de l'irrigation par eau salée. En effet, actuellement, l'agriculture est caractérisée par la place importante des cultures en sec et la prépondérance de l'olivier, même sur les meilleures terres. En outre, les rendements obtenus en général sont très faibles. Ces phénomènes peuvent être attribués à l'insuffisance des dotations en eau, insuffisance causée par les pertes dans le réseau. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'estimer l'incidence de la salinité et on doit se borner à constater que la seule culture interdite dans les Beni-Amir est celle des agrumes.

Les auteurs de l'étude pour la modernisation des Beni-Amir estiment que la réalisation des canaux secondaires et tertiaires d'irrigation en béton ainsi que le curage, l'extension et l'approfondissement du réseau de drainage constituent la clé du développement de ce périmètre. En éliminant les pertes, en rabattant la nappe, en améliorant la dotation en eau, en confinant les oliveraies sur les terres de troisième classe et la céréaliculture en sec sur la quatrième classe et en introduisant des assolements intensifs sur les meilleures terres, on espère produire des rendements élevés et éliminer tout problème de salinité. La seule exclusion reste l'agrumiculture qui de toutes façons ne supporterait pas les hautes teneurs en calcaire et pour laquelle les sols sont trop peu profonds.

Bien entendu, les mesures techniques devront être accompagnées de campagnes d'information et d'éducation auprès des agriculteurs, afin de faire disparaître les pratiques dangereuses.

#### TROISIEME EXEMPLE : LE SUD-EST MAROCAIN

La province sud-orientale est divisée en deux bassins de 40 000 km<sup>2</sup> chacun, ceux de la Daoura (oueds Ziz, Rheris et Maïder) et de la Saoura (oueds Guir et Bouanane). Orientés dans le sens nord-sud, ils sont limités au nord par le Haut-Atlas et latéralement par les plateaux issus de ce dernier ; au sud, ils sont ouverts vers le Sahara.

Par leur constitution, les deux bassins peuvent être divisés chacun en trois régions. La première est située dans le Haut-Atlas à plus de 1 500 m d'altitude, la seconde est constituée des plateaux et vallées de piedmont et la troisième est formée de plaines dont l'altitude est inférieure à 1 000 m.

Dans l'Atlas et les vallées de piedmont, les sols sont généralement peu profonds, légers, perméables et riches en calcium, alors que ceux des plaines, plus profonds et de texture moyenne, ont une capacité de rétention assez élevée ; ils sont également riches en calcaire.

Actuellement les superficies cultivées varient énormément d'une année à l'autre car les apports d'eau sont très irréguliers mais les superficies cultivables après les travaux de mise en valeur sont estimées à 35 000 ha pour chacun des deux bassins.

Mises à part certaines zones situées en haute montagne qui appartiennent à l'étage bioclimatique aride, toute la région est située dans l'étage saharien. Le climat varie en continu du nord au sud. La température moyenne passe de 10 à 21°C avec des extrêmes de -5 et 50°C dans le bas-Ziz et la pluviosité moyenne va de 200 à 100 mm avec des maxima supérieurs à 500 mm dans le Haut-Atlas et des minima qui peuvent descendre jusqu'à 25 mm dans la plaine. Dans le Ziz, les vents dominants sont du nord en hiver et du sud en été, alors que dans le Guir ils sont généralement d'est ou d'ouest. A l'exception de celui du nord, ces vents sont très secs et contribuent ainsi largement à l'évaporation qui peut atteindre 2 500 mm/an sur plan d'eau. En outre dans certaines régions du sud, les vents contribuent également à la formation de dunes et à l'ensemblement des terres cultivées.

Malgré des conditions naturelles très défavorables, l'agriculture irriguée traditionnelle s'est implantée là depuis près de 2000 ans et on ne peut manquer d'être frappé par la prodigieuse adaptation de l'homme à son milieu. Le manque de moyens techniques des agriculteurs n'a d'égal que leur ingéniosité et leur acharnement à tirer le maximum de leur terre.

Les ressources en eau de surface étant très limitées et irrégulières, on est obligé de recourir à l'exploitation de la nappe ; celle-ci se fait par pompage ou au moyen de puits situés à proximité des parcelles mais la nappe peut également être captée à longue distance et amenée sur place par des galeries souterraines, les « rhattara ». Cette dernière méthode permet d'amener en zone salée de l'eau de nappe moins chargée.

La qualité des eaux souterraines varie fortement d'un endroit à un autre de la classe C1 à la classe C5. A titre d'exemple, l'eau de pompage de la station de Tabouassamt dans le bas Ziz est en C5 S3.

L'utilisation d'une eau aussi dangereuse ne peut manquer de poser de gros problèmes. Pour y remédier, les agriculteurs pratiquent le dessalage par eaux de crue. Les débits en surface sont très irréguliers, celui du Ziz par exemple varie entre 0 et 3 200 m<sup>3</sup>/sec et le rapport entre année maximum et minimum pour cet oued vaut 10. Il a en moyenne 11 crues par an qui se produisent en automne et au printemps.

La qualité des eaux de crue varie entre C1 et C3 ou 4. Souvent moins salées que les eaux de nappe, elles apportent également dans les plaines de grandes quantités de limon fertile.

On les capte au moyen de barrages de dérivation et elles sont conduites vers les parcelles par des « séguia » de terre. Le réseau traditionnel est très développé : dans le Ziz, on ne compte pas moins de 20 barrages de dérivation et 2000 puits, auxquels s'ajoutent des dizaines de Km de « rhattara » et des centaines de Km de « séguia ».

En outre l'exploitation de l'eau est réglementée par un droit coutumier élaboré par les agriculteurs eux-mêmes. Citons par exemple, la priorité de l'amont sur l'aval lors des crues normales, priorité qui est renversée lorsque, en période de grande sécheresse et en vertu d'un privilège spécial, les agriculteurs du Tafilalt (bas Ziz) demandent à ceux de la montagne de fermer leurs prises de façon à provoquer une petite crue artificielle.

Quant aux parcelles cultivées, elles sont souvent placées sous le couvert des palmiers et se présentent sous forme de petits bassins rigoureusement plats, que l'on irrigue par submersion. Très souvent, elles sont entourées de murets provenant du décapage de l'horizon de surface ; cette pratique a pour but d'empêcher l'exhaussement du niveau du sol, suite au dépôt du limon de crue mais elle permet également l'élimination du dépôt de sel superficiel et l'emmagasinement de grands volumes d'eau de crue. En outre, elle a pour effet de freiner le dessèchement des sols par les vents et d'empêcher l'ensablement.

Bien que l'on s'accorde à dire que la culture en sec doit être impraticable dans cette région, on trouve néanmoins d'importantes superficies de terres « bour » dans le bassin du Guir : cela vaut surtout pour les terres de montagne plus favorisées par les précipitations. Les cultures principales sont le blé dur, l'orge, le maïs, la fève et quelques légumes ainsi que la luzerne, principale culture fourragère de la région. En arboriculture, le dattier constitue la ressource la plus importante du Ziz ; par contre, l'olivier prédomine dans le Guir.

Tous les rendements sont très faibles, en raison du manque d'eau et du caractère rudimentaire des pratiques culturales. Il n'est donc pas possible d'évaluer les effets du sel sur les cultures. Des essais sur parcelles expérimentales ont toutefois clairement montré l'existence d'un problème qui ne peut manquer de prendre de l'ampleur après l'amélioration des pratiques culturales et la régularisation des ressources en eau.

Par contre, on peut facilement se faire une idée de l'incidence des irrigations sur l'évolution de la nappe et des sols.

La nappe peut être divisée en zones de dilution et zones de concentration ; sa salure globale varie entre moins de 2 gr/l et plus de 15 gr/l. Comme son écoulement se fait vers le sud c'est en aval des plaines, là où l'évaporation est la plus intense que l'on rencontre les concentrations maximales.

Dans le Ziz, la nappe semble parvenue à un certain équilibre, probablement parce que depuis des siècles, les pratiques d'irrigation n'ont pas été sensiblement modifiées. Les pompages et l'écoulement continu dans les « rhattara » la maintiennent à un niveau suffisant, hors de la zone où les évaporations deviendraient catastrophiques. L'alternance des irrigations et dessalages maintient une composition chimique stable.

Quant aux sols, leur évolution dépend des apports et du chimisme de l'eau d'irrigation. Etant généralement assez légers, les problèmes de drainage y sont limités et les dangers de l'alcalinisation ne s'y posent pas de façon cruciale. Dans les zones où la nappe est extrêmement salée et peu profonde, le dépôt de sel dans les sols prend des proportions considérables ; c'est le cas de l'aval du Tafilalt où la quantité de sel déposée est estimée à 50 000 tonnes par an.

Des parcelles expérimentales ont été mises en place pour suivre l'évolution de la salure dans les sols irrigués à l'eau de nappe exclusivement; les résultats en sont encore au stade du dépouillement de sorte qu'il est trop tôt pour parler de bilan mais il semble bien que l'expérience soit peu encourageante notamment en ce qui concerne le dessalage par eau très salée (1).

En outre d'importantes études ont été réalisées en vue de mettre en valeur les deux bassins du sud-est marocain. Cette tâche est rendue indispensable par la poussée démographique mais elle présente des risques énormes car la rupture de l'équilibre actuel aurait des conséquences graves.

Les travaux entrepris ont pour but d'augmenter les superficies cultivables en exploitant au maximum

les ressources en eau. L'aménagement du Ziz est en cours : construction d'un barrage, installation de nouvelles stations de pompage, nettoyage et revêtement des « rhattara », construction de « séguia » en béton, assainissement du sud du Tafilalt par drainage, etc... Ces travaux n'étant pas terminés, il est trop tôt pour évaluer leurs effets ; il est en tout cas certain qu'ils entraîneront d'importantes reconversions dans les pratiques d'irrigation. Pour ce qui est du Guir, trois types de mesures sont envisagés : mesures administratives, agro et zootechniques, interventions en petite hydraulique, interventions en grande hydraulique.

Dans tous les cas les limitations imposées par la quantité maximale d'eau disponible sont telles qu'on ne doit pas envisager l'irrigation des moins bonnes terres. L'eau restera toujours le facteur limitant principal mais, avec l'amélioration des pratiques culturales, la salinité deviendra probablement le second facteur limitant dans cette région.

## CONCLUSIONS

Cette enquête a été limitée à l'étude de trois cas concrets. Néanmoins, certaines conclusions peuvent en être dégagées. Tout d'abord, il existe un problème de salinité au Maroc, ou plus exactement des problèmes qui se posent de façon très différente d'une région à l'autre. Il est donc vain de rechercher une méthode d'étude et une solution type pour l'ensemble du pays.

D'autre part, le problème posé est généralement complexe et la solution recherchée aura à tenir compte de plusieurs facteurs simultanément sous peine d'être vouée à l'échec.

Enfin on constate que les problèmes se développent avec le temps et en cela on peut donc affirmer que s'ils sont actuels dans certaines régions ils sont encore lourds de conséquences à venir pour ces régions mais aussi pour d'autres.

De tout ceci ressort la nécessité de poursuivre les études déjà entreprises, de créer de nouveaux essais et de rassembler une documentation aussi complète que possible.

Vue sous cet angle la collaboration internationale ne manque certainement pas d'intérêt et il est souhaitable de la voir s'intensifier. Bien sûr la salinité ne constitue pas le seul problème lié à l'agriculture irriguée mais elle fait partie intégrante du développement et de la mise en valeur des régions marocaines et tous ceux qui ont des responsabilités dans ce domaine doivent en être bien conscients.

(1) Cf. H.T.E., n° 3 « Optimisation du dessalage par eau saumâtre des sols au Tafilalt ».

## BIBLIOGRAPHIE

Cette enquête a été réalisée au moyen des n° 24 et 25 des Cahiers de la Recherche Agronomique (INRA) et des rapports de mise en valeur suivants :

- Projet Sebou (UNDP-FAO)
- Modernisation du périmètre des Beni-Amir (DMV-ORMVA Tadla) ;
- Aménagement de la région du Tafilalt (DMV-ORMVA Tafilalt) ;
- Aménagement de la région du Guir (DMV-ORMVA Tafilalt).

Certains renseignements viennent également de la « Contribution à l'étude des sols salés du Tafilalt » par Bernard Ruet (thèse présentée en décembre 1967 à l'Ecole Nationale d'Agriculture de Meknès) ou nous ont été donnés oralement à la DMV.

## GLOSSAIRE

- Bour : terre cultivée en sec.
- Dess : sol alluvial limoneux ou argileux (dess léger ou lourd)
- Ferchech : sol alluvial argileux.
- Hamri : vertisol bien drainé.
- Merja : vertisol très hydromorphe, à engorgement presque constant.
- Oued : cours d'eau.
- Rhettara : galerie souterraine servant à capter l'eau de nappe en un point pouvant être distant de plusieurs kilomètres du lieu d'utilisation.
- Seguia : canal d'irrigation.
- Tirs : vertisol ayant une tendance à l'engorgement.



## SOCIETE MAROC ETUDES

### INTERVENTIONS :

ETUDES PRELIMINAIRES — AVANT-PROJET — CONTROLE DES TRAVAUX

### DOMAINES :

IRRIGATION — REMEMBREMENT — PEDOLOGIE — AGRONOMIE — ROUTES  
GENIE CIVIL — ASSAINISSEMENT — ADDUCTION D'EAU — TOPOGRAPHIE  
ETUDES ECONOMIQUES — PLANIFICATION REGIONALE ET SECTORIELLE  
ASSISTANCE TECHNIQUE

S O M E T

2, rue Pégoud

RABAT

## ANNEXE

### CONSEILS PRATIQUES POUR L'EXPERIMENTATION ET L'UTILISATION DU MODELE DE SIMULATION DU MOUVEMENT DES SELS DANS LE SOL

#### L'EXPERIMENTATION

La qualité des résultats expérimentaux étant la première garantie de succès, l'expérimentation devra être préparée et conduite avec soin. On prévoira un nombre suffisant de répétitions : ce nombre sera fonction de l'hétérogénéité du sol et les mesures seront faites sur des échantillons moyens bien homogénéisés.

Avant les irrigations on effectuera un certain nombre de prélèvements à différentes profondeurs (6 ou 7 pour un profil de 2 m). Ces prélèvements serviront à déterminer la densité apparente, la salure initiale et la capacité de rétention.

En cours d'expérience on déterminera l'humidité du sol avant chaque irrigation de même que le volume et la teneur en sels de chaque dose appliquée.

Enfin, on procédera également à des mesures de salinité (4 ou 5) après différentes irrigation.

Ces mesures qui serviront à la mise au point du programme seront effectuées sur extrait à saturation ou sur un extrait à rapport sol/eau élevé (1/1 par exemple).

On voit que la charge expérimentale est assez réduite et le soin apporté aux essais se trouve emplement justifié lorsqu'on sait la quantité de renseignements qu'il est possible d'en tirer ensuite.

#### PRESENTATION DES DONNEES

Eien que le programme proposé ne soit valable à priori que pour traiter un profil subdivisé en couches expérimentales de même épaisseur, ceci ne constitue pas une contrainte pour l'expérimentateur. Les résultats des différentes répétitions serviront à calculer des moyennes et ces moyennes seront mises en graphique. On établira ainsi un profil de densité apparente, un profil de salure initiale, un profil de capacité de rétention et un profil hydrique avant chaque irrigation. Ces profils seront subdivisés en tranches égales et au milieu de chaque tranche on lira sur la courbe les valeurs à introduire dans l'ordinateur.

Ces valeurs devront être exprimées dans un système d'unité cohérent. Le système proposé prend comme base le dm et le Kg. :

- Epaisseur des couches de sol en dm
- densité apparente en Kg/dm<sup>3</sup>
- salinité en gr/Kg ou en meq/Kg
- hauteur d'eau appliquée à l'irrigation en dm
- concentration de l'eau d'irrigation en gr/l ou en meq/l

Deux valeurs d'humidité sont nécessaires pour l'exécution du programme : la capacité à saturation et le déficit d'humidité par rapport à la capacité de rétention. La première est estimée selon la méthode décrite dans le paragraphe suivant et la seconde s'obtient par différence entre capacité de rétention et humidité avant irrigation.

Ces valeurs seront exprimées en fraction gravimétrique (Kg/Kg ou l(l)/Kg ou %/100) ; la conversion en unités de hauteur d'eau (dm) est prévue dans le programme.

Toutes ces données seront mises sur cartes perforées et introduites dans l'ordre suivant.

- une carte pour le nombre de couches expérimentales, le nombre de subdivisions théoriques, le nombre d'irrigations et l'épaisseur des couches expérimentales (I3, I3, I3, F8. 4)
- une carte pour chaque valeur de densité apparente (F8. 4)
- une carte pour chaque valeur de capacité à saturation (F8. 4)
- une carte pour chaque valeur de salinité initiale (F8. 4)

Pour chaque irrigation, un jeu de cartes comprenant :

- une carte pour chaque valeur de déficit d'humidité (F8. 4)
- une carte pour le volume et la teneur en sel de l'eau d'irrigation (F8. 4)

I3 et F8. 4 sont les « FORMAT » utilisés pour la lecture des cartes.

## MISE AU POINT

La première phase des calculs consiste à déterminer les valeurs de la capacité à saturation par approximations successives. On prendra comme point de départ les valeurs de la capacité de rétention, valeurs qui seront multipliées par un facteur constant. On fera tourner plusieurs fois le programme en variant le facteur constant d'une fois à l'autre jusqu'à ce que l'accord entre résultats théoriques et expérimentaux soit aussi bon que possible. C'est pour cette raison qu'on doit disposer de profils salins après une ou plusieurs irrigations.

Bien entendu, la validité de cette approche ne peut être établie que si l'accord obtenu est reproductible pour toutes les valeurs expérimentales. Notons que la capacité de saturation devrait être comprise entre 1,5 et 2,5 fois la capacité de rétention.

## SIMULATION

Une fois la mise au point terminée, il est possible de simuler n'importe quelle expérience.

Comme paramètres de base on gardera la densité apparente, la capacité à saturation et la salinité initiale qui ne changent pas et on jouera sur le nombre de doses, leur volume et si cela présente un intérêt pratique, la qualité de l'eau d'irrigation. Comme il ne s'agit plus de tester le modèle mais de l'exploiter, les déficits d'humidité avant chaque irrigation seront estimés. On se basera pour cela sur l'expérience, le temps qui sépare deux irrigations successives et l'évapotranspiration potentielle.

Si les irrigations sont déclenchées à déficit constant, le problème se simplifie puisque c'est l'expérimentateur qui fixe les valeurs d'humidité avant irrigation.

## PRESENTATION DU PROGRAMME

Initialement, le modèle présenté dans cet article était écrit en FORTRAN 4 et de ce fait, il était inutilisable sur un petit ordinateur du Type IBM 1620.

Il nous a semblé utile de fournir aux chercheurs intéressés une version de ce modèle susceptible d'être utilisée à Rabat : c'est ce programme qui est présenté ici.

Il peut être appliqué à un profil subdivisé en un maximum de 70 couches théoriques et les variables principales sont

- NCEX : nombre de couches expérimentales
- NDIV : nombre de subdivision théoriques par couche expérimentale
- NIRRI : nombre d'irrigations.

- EEX : épaisseur des couches expérimentales
- NCTH : nombre de couches théoriques
- ETH : épaisseur des couches théoriques
- D (I) : densité apparente de la ième couche théorique
- H (I) : capacité de rétention de la ième couche théorique
- S (I) : salinité de la ième couche théorique
- E (I) : déficit en eau de la ième couche théorique
- Q : quantité d'eau d'irrigation
- C : teneur en sels de l'eau d'irrigation

Les autres variables rencontrées sont des intermédiaires de calcul. Le programme prévoit l'impression de toutes les valeurs expérimentales interpolées à chaque couche théoriques et évidemment, les valeurs de salinité après chaque irrigation plus le volume et la concentration de l'eau drainée au bas du profil.

C SIMULATION DU MOUVEMENT DES SELS  
C DANS LES SOLS SELON BRESSLER (SOIL  
C SCI. 1967. PROGRAMME ECRIT PAR FRAN-  
C ÇOIS MOUGENOT ET TESTE AU CENTRE DE  
C CALCUL DE L'ECOLE MOHAMEDIA D'INGE-  
C NIEURS AVEC LE CONCOURS DU PROFES-  
C SEUR DOYEN (EMI)

C  
C DIMENSIONS ET LISTE DES FORMATS  
DIMENSION IND (10), D (70), H (70),  
S (70), E (70)

1 FORMAT (I3, I3, I3, F8. 4)

3 FORMAT (F8. 4, F8. 4)

4 FORMAT (7H NCEX = ,I3/7H EEX =  
F8. 4/7H NCTH = ,I3/7H ETH =  
F8. 4)

5 FORMAT (2H I,12 X, 7H DENSITE, 10X,  
8H HUMIDITE, 10 X, 8H SALINITE/)

6 FORMAT (I3, 10X, F8. 4, 10X, F8. 4, 10X,  
F8. 4)

7 FORMAT (/15H IRRIGATION NO ,I3/4H  
Q = F8.4/4H C = F8.4/)

8 FORMAT (2H I, 9X, 13H BESOIN EN  
EAU, 7X, SALINITE/)

C

C LECTURE DES PARAMETRES CONSTANTS

C NCEX EEX NDIV NIRRI ET CALCUL DU  
 C NOMBRE ET DE L'ÉPAISSEUR DES COUCHES  
 C THEORIQUES

READ 1, NCEX, NDIV, NIRRI, EEX  
 NCTH = NCEX\*NDIV  
 RLO = NDIV  
 ETH = EEX/RLO

C  
 C DEFINITION D'UN INDICE MOBILE IND (I)  
 C TEL QUE SI LES COUCHES EXPERIMENTA-  
 C LES SONT NUMEROTEES 1, 2, 3, ETC... CET  
 C INDICE PREND LA VALEUR CORRESPON-  
 C DANT AU MILIEU DE CES COUCHES EXPE-  
 C RIMENTALES (EX. 6 17 23 ETC... SI NDIV =  
 C 11)

IND (I) = (NDIV + 1)/2  
 NX1 = NCEX + 1  
 DO 11 I = 2, NX1  
 11 IND (I) = IND (I - 1) + NDIV

C  
 C LECTURE ET INTERPOLATION LINEAIRE  
 C DES VALEURS EXPERIMENTALES. LES VA-  
 C LEURS TRAITEES SUCCESSIVEMENT SONT  
 C D (I), H (I), S (I) ET E (I) POUR CHAQUE  
 C IRRIGATION. L'INDICE K PREND SUCCESSI-  
 C VEMENT LES VALEURS 1, 2, 3, ET 4  
 C CE PROGRAMME A ETE TIRE DE LA SU-  
 C BROUINE INTRL DE IBM

K = 1  
 12 DO 13 I = 1, NCEX  
 L = IND (I)  
 13 READ 3, E (L)  
 NIN = NCEX - 1  
 DO 100 M = 1, NIN  
 IX1 = IND (M)  
 IX2 = IND (M + 1)  
 NX1 = IX1 + 1  
 NX2 = IX2 - 1  
 RLO = IX2 - IX1  
 DO 100 I = NX1, NX2  
 RL1 = IX2 - I  
 RL2 = I - IX1  
 100 E (I) = (E (IX1)\*RL1 + E (IX2)\*RL2)/RLO  
 NX1 = IND (I) - 1  
 IX1 = IND (I)  
 IX2 = IND (I + 1)  
 RLO = IX2 - IX1  
 DO 200 I = 1, NX1  
 RL1 = IX2 - I  
 RL2 = I - IX1

200 E (I) = (E (IX1)\*RL1 + E (IX2)\*RL2)/RLO  
 NX1 = IND (I) + 1  
 IX1 = IND (I - 1)  
 IX2 = IND (I)  
 RLO = IX2 - IX1  
 DO 300 I = NX1, NCTH  
 RL1 = IX2 - I  
 RL2 = I - IX1

300 E (I) = (E (IX1)\*RL1 + E (IX2)\*RL2)/RLO

C  
 C TRI DES VALEURS INTERPOLEES ET CON-  
 C VERSION DES UNITES DE H ET S. LORSQUE  
 C K = 1 E = DENSITE APPARENTE D, LORS-  
 C QUE K = 2 E = CAPACITE DE SATURATION  
 C LORSQUE K = 3 E = SALURE INITIALE  
 C (CONVERSION DES UNITES) ET LORSQUE  
 C K = 4 PASSER A LA SEQUENCE SUIVANTE  
 IF (K - 2) 14, 16, 18  
 14 DO 15 I = 1, NCTH  
 15 D (I) = E (I)  
 K = 2  
 GO TO 12  
 16 DO 17 I = 1, NCTH  
 17 H (I) = E (I)  
 K = 3  
 GO TO 12  
 18 IF (K - 3) 19, 19, 24  
 19 DO 20 I = 1, NCTH  
 S (I) = E (I)/H (I)  
 20 H (I) = H (I)\*D (I)\*ETH

C  
 C IMPRESSION DES RESULTATS D H ET S  
 C INTERPOLES

PRINT 4, NCEX, EEX, NCTH, ETH  
 PRINT 5  
 M = 0  
 L = 1  
 DO 23 I = 1, NCTH  
 RLO = S (I)\*H (I)/(D(I)\*ETH)  
 IF (IND (L) - I) 21, 21, 22  
 21 PRINT 6, M, D (I), H (I), RLO  
 L = L + 1  
 GO TO 23  
 22 PRINT 6, I, D (I), H (I), RLO  
 23 CONTINUE

C  
 C INITIALISATION DU PROCESSUS DE SIMU-  
 C LATION J = 1, K = 4  
 C CONVERSION DES UNITES DE E  
 J = 1  
 K = 4  
 GO TO 12

24 DO 25 I = 1, NCTH  
25 E (I) = E (I) \* D (I) \* ETH

C

C LECTURE DE Q ET C. SIMULATION COUCHE  
C PAR COUCHE

READ 3, Q, C  
PRINT 7, J, Q, C  
DO 29 I = 1, NCTH  
IF (Q - E (I) - 2. \* H (I) ) 26, 26, 27

26 IF (Q - E (I) ) 40, 41, 41

40 Q = E (I)

41 A = (2. \* Q \* C + (2. \* H (I) - Q + E (I) )  
\* S (I) ) / (2. \* H (I) + Q - E (I) )

C = (S (I) + A) / 2.

GO TO 28

27 A = Q \* C / (Q - E (I) )

C = (H (I) \* S (I) + (Q - E (I) - H (I) )  
\* A) / (Q - E (I) )

28 S (I) = A

Q = Q - E (I)

IF (Q) 30, 30, 29

29 CONTINUE

C

C IMPRESSION DES RESULTATS ET TEST  
C SUR J

30 PRINT 8

L = 1

DO 33 I = 1, NCTH

RLO = S (I) \* H (I) / (D (I) \* ETH)

IF (IND (L) - I) 31, 31, 32

31 PRINT 6, M, E (I), RLO

L = L + 1

GO TO 33

32 PRINT 6, I, E (I), RLO

33 CONTINUE

PRINT 7, J, Q, C

IF (J - NIRRI) 35, 34, 34

34 STOP

35 GO TO 12

END

# SOCEA

## SOCIÉTÉ EAU ET ASSAINISSEMENT

B.P. 121

51, avenue Allal-Ben-Abdallah

RABAT

BÉTON CENTRIFUGÉ PRÉCONTRAIT CONDUITES FONTE ET ACCESSOIRES  
DES FONDERIES PONT-A-MOUSSON

# OPTIMISATION DU DESSALAGE PAR EAU SAUMATRE DES SOLS DE TAFILALT

*Ce travail a été réalisé par le Département des Sciences du Sol de l'Institut Agronomique Hassan II avec la collaboration de l'Université de Louvain sur la base de données recueillies par le Centre des Expérimentations de la Direction de la Mise en Valeur à la station de Rissani dans le Tafilalt.*

L'agriculture des régions arides du Sud du Maroc repose sur des techniques empiriques d'irrigation et de dessalage que des siècles d'expérience ont raffinées et qui permettent une exploitation du sol et de l'eau malgré des contraintes très sévères. Ces contraintes sont de nature climatique, diverses pratiques culturales permettent d'y faire front : culture sous palmier, construction de murs pour réaliser un microclimat plus favorable ; elles sont aussi liées à la qualité des eaux de la nappe souvent chargées en sel : l'agriculteur y remédie par l'irrigation par des eaux de crue en fin de période pour lessiver les sols, le paillage pour éviter les remontées de sel, la culture sur billons, etc... Les contraintes sont également liées aux propriétés physico-chimiques des sols : les phénomènes d'alcalisation y sont rapides mais des amendements naturels calcaires peuvent être apportés. L'ensemble de ces techniques a permis à une agriculture intensive de se maintenir à un niveau de productivité relativement élevé pendant des siècles.

L'augmentation de la pression démographique dans ces régions remet en question ces pratiques. En effet, l'augmentation de la consommation d'eau d'irrigation entraîne une salure croissante des terres et la technique de dessalage par eau de crue ou surconsommation d'eau de nappe puisée par puits, rhattara ou station de pompage ne pourra y remédier très longtemps.

Il importe donc d'étudier en quelle mesure une eau de qualité marginale peut être utilisée pour lessiver les sels qui se seraient concentrés dans les couches superficielles du profil.

Il importe d'optimiser les quantités d'eau utilisées à cette fin pour éviter une salure exagérée de la nappe et les conséquences qui en découleraient lors des remontées. Les observations de Margat ont montré que la concentration en sel était plus élevée dans les régions d'utilisation intensive d'eau de nappe que la moyenne de la région (3 à 5 g/l contre 2 à 3 g/l). La concentration en sel de l'eau de nappe peut atteindre 10 g/l ce qui limite l'extension des cultures et même 15 g/l ce qui limite l'extension de la palmeraie.

L'optimisation de la quantité d'eau d'irrigation ne peut se faire que par une combinaison de l'expérimentation en champ et des méthodes modernes de simulation digitale par utilisation d'un modèle mathématique du mouvement des sels dans le profil. Lorsque la validité d'un tel modèle a été vérifiée par la concordance de ses prédictions avec les résultats expérimentaux, il peut être utilisé pour simuler un très grand nombre d'expériences où l'on aurait varié la dose et la fréquence de l'irrigation, la consommation d'eau entre irrigations, la salure de l'eau, etc...

L'application des méthodes de la programmation linéaire au modèle mathématique permet en outre d'optimiser le processus en fonction des contraintes que l'on impose en ce qui concerne le degré de salure à ne pas dépasser sur une certaine profondeur.

Le but de cette note est de démontrer l'utilisation de ces méthodes dans l'interprétation d'expériences de dessalage des terres effectuées par la Division de la Mise en valeur dans le Tafilat au cours de 1965.

### Méthode expérimentale

Deux études de dessalage ont été effectuées de façon très systématique dans le Tafilat, l'une à Sidi Boubeker à cinq km au Nord de Rissani, l'autre à Tabouassant à 5 km au S.W. de Rissani. A Sidi Boubeker les agriculteurs avaient salé leurs terres en utilisant pour l'irrigation de l'eau de nappe fournie en abondance par une station de pompage suivant les méthodes classiques utilisées pour les eaux de crue. La station de Tabouassant était représentative de la situation normale au Tafilat où les sols sont irrigués soit à l'eau de crue soit à l'eau saumâtre (3 à 6 g/l) de la nappe, toutefois la salure des terres au début de l'expérience était très peu importante et les résultats de l'essai sont sans intérêt en ce qui nous concerne.

Le principe de l'essai consistait à apporter des doses massives d'eau d'irrigation salée pour entraîner par dissolution le maximum de sel. Les essais ont été réalisés suivant un schéma parcellaire comprenant des unités de 5 X 5 m séparées par des diguettes ; six répétitions sont utilisées pour chaque dose d'irrigation. A Sidi Boubeker, quatre doses d'irrigation ont été utilisées : (a) une dose unique de 150 mm (b) une dose de 300 mm appliquée en deux doses de 150 (c) une dose de 450 mm appliquée en 3 doses et finalement (d) une dose de 600 mm appliquée en 4 doses successives de 150 mm. Les doses étaient appliquées au début de l'année (1er trimestre 1965).

L'application des doses successives dans les traitements qui devaient en recevoir plusieurs se faisait dès l'infiltration de la dose précédente. Toutes les parcelles ont reçu 150 mm le 9 mars 1965, les 3/4 des parcelles ont reçu une seconde dose de 150 mm le 13 mars, la moitié a reçu une troisième dose le 19 et le quart une quatrième dose le 23. Les prélèvements d'échantillons ont débuté dès le ressuyage des sols, soit environ 10 à 15 jours après l'application de la dernière dose d'eau d'irrigation et se sont poursuivis pendant une cinquantaine de jours. Un échantillonnage avait été fait avant l'application de la première dose d'eau d'irrigation.

Parmi les déterminations effectuées sur ces échantillons nous ne retiendrons que celles qui ont porté sur le profil hydrique et la teneur en sels mesurée soit sur l'extrait de la pâte saturée soit sur la suspension de rapport 1 : 5.

Nous comparons l'évolution du profil hydrique de la moyenne des six déterminations effectuées sur chacune des répétitions. Comme la sole était homogène et le nombre de répétitions suffisant on peut comparer sans hésiter les effets de doses variables d'eau d'irrigation sur des ensembles de parcelles différents.

La concentration en sel de l'eau d'irrigation a été déterminée, elle varie de 3 à 4 g/l et se constitue essentiellement de chlorure de sodium.

### Résultats expérimentaux

La figure 1, A à D reproduit l'évolution des profils hydriques observés après les diverses doses d'eau d'irrigation. Comme les parcelles ne portaient aucune végétation, l'allure de l'évolution de la teneur en eau des diverses couches est particulièrement simple : l'échantillonnage a débuté lorsque le sol s'est ressuyé et que par conséquent la capacité en champ était atteinte ou légèrement dépassée ; une évolution lente ultérieure est causée d'une part par l'évaporation des couches superficielles, d'autre part, par un mouvement descendant de l'eau sous l'influence de la pesanteur.

La différence entre le profil hydrique avant les irrigations et les profils hydriques après irrigation nous permet de calculer la quantité d'eau nécessaire pour porter l'ensemble des couches du profil à une teneur en eau suffisante pour provoquer la percolation. La première dose d'irrigation (150 mm) ne suffit pas à humecter le profil au-delà du premier mètre puisque la valeur moyenne de la capacité en champ de 0 à 100 cm de profondeur est environ 22 %, soit pour une densité apparente de 1,35 pour ce sol, 160 mm de capacité en eau. L'écart des profils hydriques avant et après irrigation après une seule dose d'irrigation montre bien que le déficit de saturation persiste en-dessous de 1 m de profondeur.

Il n'en est évidemment plus de même après la seconde irrigation qui peut réaliser la saturation du profil jusqu'à la capacité en champ sur une profondeur de 2 mètres. Les profils hydriques observés dans chacune des 24 parcelles n'étaient évidemment pas significativement différents, pour cette raison un seul profil hydrique représentant la moyenne des 24 déterminations effectuées avant l'irrigation est présenté à la figure 1 de A à D. Il en sera évidemment de même pour les profils hydriques observés après 2, 3 ou 4 irrigations, puisque la saturation de la capacité en champ du profil est assurée après la 2<sup>ème</sup> irrigation.

Afin d'obtenir une estimation plus sûre de la capacité en champ, nous avons effectué le calcul des profils hydriques des 18 parcelles ayant reçu 2, 3 ou 4 irrigations après 13 ou 53 jours de ressuyage. Les profils ainsi obtenus sont présentés à la figure 2.

Les observations sur la salure du profil sont présentées à la figure 3. Pour la même raison que précédemment nous avons utilisé une valeur commune pour la salure avant l'irrigation résultant de la moyenne sur les déterminations effectuées sur les 24 parcelles.

La variation de la salure des divers horizons échantillonnés au cours du temps après les irrigations ne semble pas significative. Des fluctuations s'observent autour de la valeur moyenne sans qu'il soit possible de dégager une tendance générale. On aurait pu croire que le mouvement de l'eau observé au cours de la période d'échantillonnage aurait conduit à une diminution de la salure. Le calcul de la différence entre les profils hydriques observés 10 ou 50 jours après l'irrigation montre que la perte d'eau correspondante ne correspond qu'à 34 mm sur 1,80 m de profondeur, ce qui est peu par rapport aux doses d'utilisation appliquées. Pour cette raison nous avons utilisé comme valeur de la teneur en sel après irrigation la moyenne des 5 déterminations effectuées au cours du temps sur chacune des 6 parcelles du traitement. Chacun des points expérimentaux de la figure 3 est donc la moyenne de 30 déterminations séparées.

On y a également porté la droite d'équation  $y = 5 \text{ mmho.cm}^{-1}$  correspondant à la conductivité électrique moyenne de l'eau d'irrigation. Il est clair que, comme il fallait s'y attendre, la partie supérieure du profil de salinité se rapproche de cette droite. La zone de concentration maximale en sel se déplace vers le bas tout en perdant considérablement de sa netteté.

Ce dernier fait est probablement dû à la dispersion hydrodynamique liée au passage d'un volume d'eau considérable dans un sol de perméabilité relativement élevée.

L'intégration graphique des profils de salure permet de calculer la quantité totale de sel présente dans le sol de 0 à 100 cm ou de 0 à 200 cm.

Pour ce faire, la valeur moyenne de la conductivité de l'extrait à saturation est multipliée par le facteur 1,5 puisque la salure est essentiellement due au NaCl. Cette valeur est à son tour multipliée par la valeur moyenne du pourcentage de saturation, on obtient ainsi la quantité de sel en g par kg. Comme la densité apparente de ce sol est en moyenne 1,3, il est alors aisé de calculer le tonnage de sel par ha. Ces données calculées avant la première puis après chacune des 4 irrigations successives figurent au Tableau I.

TABLEAU I — QUANTITE DE SEL PRESENTE DE 0 A 100 CM ET DE 0 A 200 CM  
(En tonnes par ha).

Avant irrigation		Après irrigation							
		N° 1		N° 2		N° 3		N° 4	
0-100	0-200	0-100	0-200	0-100	0-200	0-100	0-200	0-100	0-200
93	138	91	139	69	132	68	122	49	107

L'irrigation cause une élimination de sel du premier m,ha de l'ordre de 93-49, soit 44 tonnes. Puisque la concentration en sel de l'eau d'irrigation est de l'ordre de 3.0 g/l et que la capacité en champ vaut 300 mm pour le premier m soit 3 000 m<sup>3</sup>/ha, l'eau utilisée pour le dessalage contribue pour 9 tonnes à la quantité de sel encore présente. Dans le cas d'un déplacement non miscible dans le sol des 600 mm d'eau d'irrigation appliquée, on aurait eu une réduction de la salure à 9 T : ha, le rendement au dessalage est par conséquent

$$\text{de } \frac{93 - 49}{93 - 9} \times 100 = 52 \%$$

Nous avons fait figurer au dénominateur de cette expression la quantité maximale de sel qui peut être éliminée et au numérateur la quantité effectivement éliminée.

C'est précisément ce rendement au dessalage qu'il s'agit d'optimiser en ajustant les concentrations en sel de l'eau, des doses et fréquences d'eau d'irrigation, ce sera là l'utilisation principale du modèle mathématique que nous décrivons dans la section suivante.

#### Modélisation du processus

L'établissement d'un modèle mathématique valable pour les expériences qui nous occupent est relativement aisé puisque l'écoulement de l'eau se faisant en milieu saturé pendant le dessalage, le mécanisme unique à prendre en considération est le transport convectif des sels en solution. Les phénomènes de diffusion sont négligeables et le processus de dispersion hydrodynamique peut être inclus implicitement dans le modèle choisi comme nous le verrons ci-dessous.

Nous avons choisi le modèle décrit par Bresler (Soil Science, 104 : 227, 1967) et dont les traits essentiels sont les suivants : on applique à une couche de sol d'épaisseur suffisamment petite le principe de la conservation de la masse de sel.

La quantité de sel apportée par l'eau d'irrigation moins celle qui est enlevée par le drainage doit être égale à la variation de concentration en sel de l'eau dans la couche considérée multipliée par la quantité d'eau qu'elle contient au moment du drainage.

$$VC - V_d C_d = (C_1 - C_0) \lambda \Delta X$$

où V est la lame d'irrigation de concentration C appliquée à la couche d'épaisseur  $\Delta X$  et de teneur volumétrique en eau  $\lambda$  et où  $C_1$  et  $C_0$  sont les concentrations en sel après et avant l'irrigation,  $V_d$  et  $C_d$  sont les lames et la concentration en sel de l'eau drainée de la couche considérée.

L'utilisation pratique de cette formule suppose que l'on connaisse  $\lambda$  la teneur en eau de la couche à laquelle s'est fait le drainage dans la couche inférieure. Il est également nécessaire de connaître la teneur en eau au moment de l'irrigation puisqu'avec  $\lambda$  et V elle nous permettra de calculer  $V_d$  le volume d'eau drainée. Nous verrons que le calcul de  $\lambda$  ne présente pas de difficulté majeure. Il n'en est pas de même pour  $C_d$  la concentration en sel de l'eau drainée d'une couche à la suivante. Il est nécessaire de faire une hypothèse sur la relation entre  $C_d$ ,  $C_1$  et  $C_0$ .

Il est clair que la concentration de l'eau de drainage sera comprise entre  $C_0$  et  $C_1$ . En effet pour  $V_d \ll \lambda \Delta X$ , on a  $C_d \approx C_0$  et pour  $V_d \gg \lambda \Delta X$ , on a  $C_d = C_1$ .

On peut supposer que :

$$C_d = \frac{C_0 + C_1}{2}$$

pour autant que le volume d'eau d'irrigation qui a traversé la couche ne soit pas trop grand. Si l'eau d'irrigation déplaçait devant elle la solution du sol sans mélange avec celle-ci, à la manière d'un piston, on aurait après le passage d'une quantité d'eau  $V_d = \lambda \Delta X$ , l'égalité  $C_d = C_1$ .

Il n'en est évidemment pas ainsi et les phénomènes de dispersion hydrodynamique font qu'une quantité d'eau supérieure à  $\lambda \Delta X$  doit être déplacée avant que la concentration de la solution du sol ne devienne égale à celle de l'eau d'irrigation. On choisit comme limite  $V_d = 2 \lambda \Delta X$ . On a ainsi :

$$C_d = \frac{C_0 + C_1}{2} \quad \text{pour } V_d \leq 2 \lambda \Delta X$$

$$C_d = C_1 \quad \text{pour } V_d > 2 \lambda \Delta X$$

Le calcul peut maintenant se faire en tenant compte du fait que  $V_d = V - E$  où  $E$  est la différence entre la teneur en eau du sol au moment du drainage et sa teneur au moment de l'irrigation.

$$VC - (V - E) \frac{C_0 + C_1}{2} = (C_1 - C_0) \lambda \Delta X \quad (V - E \leq 2 \lambda \Delta X)$$

ou bien :

$$VC - 2 \lambda \Delta X \frac{C_0 + C_1}{2} - (V - E - 2 \lambda \Delta X) C_1 = (C_1 - C_0) \lambda \Delta X \quad (\text{pour } V - E > 2 \lambda \Delta X)$$

On supposera que  $V - E = 0$  si  $V < E$ . On a supposé implicitement qu'il n'y avait pas d'interaction entre le sel et le sol au cours du mouvement et que les phénomènes de dissolution ou de précipitation étaient négligeables.

Ce modèle peut être schématisé comme le montre la fig. 4 où l'on a assimilé la couche de sol à un réservoir qui se vide rapidement dès que la capacité  $\lambda$  est atteinte, plus lentement lorsque son contenu est compris entre  $\lambda$  et la capacité en champ et qui contient une certaine quantité d'eau inférieure ou égale à la capacité en champ et une quantité de sel  $C_0 \times \lambda \times \Delta X$ . On voit qu'il est nécessaire de faire une hypothèse au sujet de la capacité du réservoir et de la concentration en sel de la solution qui en déborde.

Les deux équations ci-dessus peuvent être appliquées à un très grand nombre de couches théoriques en lesquelles on a divisé le profil aux fins du calcul.

On utilisera l'indice  $i$  pour la profondeur de la couche et  $j$  pour les irrigations successives,  $C_{i,j}$  sera ainsi la concentration en sel de la couche  $i$  après la  $j^{\text{me}}$  irrigation.

$V_j$  et  $C_j$  représenteront la lame d'eau apportée à la  $j^{\text{me}}$  irrigation dont la concentration en sel avait la valeur  $C_j$ .  $E_{i,j}$  représentera le déficit par rapport à la capacité en champ avant l'irrigation  $j$  dans la couche  $i$ .

La teneur à laquelle une couche « déborde » dans la suivante aura le symbole  $\lambda(i)$  et pourra donc varier d'une couche à une autre étant donné l'hétérogénéité du profil.

On a ainsi pour :

$$V_d(i, j) \leq 2 \lambda(i) \cdot \Delta X$$

$$\begin{aligned} V_i C_i - (V - \sum_{k=1}^i E_{k,i}) \frac{C_{i,i-1} + C_{i,i}}{2} \\ = \sum_{k=1}^i (C_{k,i} - C_{k,i-1}) \lambda(k) \Delta X \end{aligned}$$

Si l'on a d'autre part :

$$V_d(i, j) > 2 \lambda(i) \cdot \Delta X$$

on écrira :

$$\begin{aligned} V_i C_i - 2 \lambda(i) \Delta X \frac{C_{i,i-1} + C_{i,i}}{2} - V_i - \sum_{k=1}^i E_{k,i} \\ - 2 \lambda(i) \Delta X C_{i,i} = \sum_{k=1}^i (C_{k,i} - C_{k,i-1}) \lambda(k) \Delta X \end{aligned}$$

Ces deux formules sont des relations de récurrence qui permettent de calculer  $C(i, j)$ , on initialise le calcul en se donnant  $C_j$  la concentration en sel de l'eau d'irrigation et la teneur en sel de chaque couche avant la première irrigation. Si l'on connaît les doses et la fréquence des irrigations, l'évapo-transpiration entre chaque irrigation, on pourra calculer le progrès du processus de dessalage.

La validité du modèle pourra aisément être contrôlée en comparant ses prédictions quant à l'évolution du dessalage avec les résultats expérimentaux.

Si le profil hydrique après saturation et ressuyage est connu, on pourra estimer à quelle teneur en eau se fait le drainage d'une couche vers la couche

inférieure. On peut aisément prévoir que puisque le profil hydrique après ressuyage fournit une estimation de la capacité en champ, la saturation sera approximativement égale à deux fois cette valeur.

C'est effectivement ce que montre la fig. 5 où nous avons fait figurer en A, B, C, et D les profils de salure avant et après quatre applications de 150 mm chacune auxquels nous avons superposé (en trait continu) le profil théorique de salure calculé à partir de quatre valeurs distinctes pour la teneur en eau à laquelle se fait le drainage : en A : 1.5 fois, en B : 1.75 fois, en C : 2.0 et en D : 2.25 fois la capacité en champ. Il est clair que le choix d'un facteur aisément prévisible pour la relation entre la capacité en champ et la capacité à saturation nous donne un accord assez bon entre les valeurs expérimentales et la courbe théorique.

Nous pouvons donc procéder au calcul du profil théorique de salure après une, deux, trois ou quatre irrigations et les comparer aux profils expérimentaux, c'est ce que montre la figure 6 où nous avons séparé les profils en deux groupes pour plus de clarté. Il est évident que l'allure générale du dessalage est parfaitement reproduite par le modèle.

La différence entre la valeur expérimentale pour la partie supérieure du profil et la prédiction du modèle est aisée à expliquer : il n'a pas été tenu compte de l'évaporation à partir des couches superficielles du profil et de la concentration des sels de l'eau d'irrigation qui en résulte. Il est évident que l'écart observé ne justifie guère la complication accrue du modèle qui résulterait de l'introduction de ce facteur.

On peut toutefois penser que la détermination de la capacité en champ à partir du profil hydrique mesuré après une dizaine de jours de ressuyage a conduit à une sous-estimation de la capacité en champ dans les couches supérieures du profil. Par conséquent, l'estimation de la teneur en eau au moment du drainage aurait pu être inférieure à la réalité.

Pour cette raison, nous avons procédé au calcul du profil théorique de salure après 4 irrigations sur la base du profil de salure initial, en ajustant la valeur de la teneur en eau au moment du drainage ( $\lambda$ ) de façon à assurer une concordance aussi bonne que possible entre les données expérimentales et la courbe théorique. La fig. 7 montre que l'accord qu'il est possible d'obtenir par cet ajustement est aussi bon qu'on pourrait le souhaiter.

Cet accord pourrait sembler ne résulter que de l'ajustement arbitraire d'un paramètre.

La vérification de la validité du modèle présenté ci-dessus consistait à calculer le profil de salure après la 4<sup>ème</sup> irrigation connaissant le profil de salure

avant la première et à comparer le profil expérimental au profil théorique.

Comme nous disposons des données expérimentales après chacune des quatre irrigations nous pouvions calculer les profils théoriques après l'une ou l'autre des quatre irrigations à partir des données expérimentales obtenues avant l'irrigation considérée ou bien calculer le profil théorique après deux irrigations successives quelconques à partir des données expérimentales obtenues avant la première. La fig. 8 montre l'accord qu'il est possible d'obtenir pour 4 des combinaisons possibles.

La vérification du modèle ainsi terminée nous permet de procéder à un premier calcul qui complète l'expérience : manifestement quatre irrigations de 150 mm chacune n'ont pas suffi à dessaler le premier mètre du profil. Quand ce résultat aurait-il été obtenu si l'on avait continué à apporter des doses successives d'eau d'irrigation après la quatrième ?

La fig. 9 montre que le dessalage complet du premier mètre ne s'obtient qu'après la huitième application de 150 mm. A ce moment la salure du profil est celle qui correspond à celle de l'eau d'irrigation.

#### Optimisation du processus

Nous avons vu que le processus de dessalage tel qu'il fut utilisé dans l'expérience décrite n'enlevait au sol que la moitié des quelques 90 tonnes de sel qu'il contenait dans le premier mètre-ha.

On peut évidemment se poser la question de savoir qu'elle aurait été la technique la plus efficace pour enlever le maximum de sel par m<sup>3</sup> d'eau employée. On peut approcher ce problème d'une façon purement empirique en simulant sur ordinateur un grand nombre d'expériences de dessalage dans lesquelles on variera la dose apportée, la fréquence de l'apport ou la concentration en sel de l'eau d'irrigation. Cette façon de faire suppose évidemment que l'on dispose d'un modèle mathématique dont la validité aura été éprouvée par la comparaison de ses prédictions avec une expérience effectivement réalisée. La supériorité de cette approche consiste évidemment en ce qu'elle permet de récolter rapidement et à bon compte une très grande quantité d'informations.

Une autre approche à l'optimisation du processus consistera à se fixer un certain nombre de contraintes et à calculer à partir du modèle la combinaison qui réalisera le but assigné de la façon soit la plus économique soit la plus efficace soit la plus rapide possible.

Cette façon de procéder est plus abstraite et bien que plus directe beaucoup plus éloignée de la démarche expérimentale qui nous est familière.

Pour cette raison ce qui suit sera consacré essentiellement à des essais de simulation d'expériences analogues à celle qui a été effectivement réalisée de façon à obtenir les conditions de dessalage qui assurent l'optimisation du processus.

La série d'expériences la plus simple que l'on puisse simuler sur ordinateur consiste évidemment à refaire l'expérience réelle mais avec de l'eau d'irrigation de concentration en sel différente de celle qui a été effectivement utilisée soit environ 3 g/l.

Nous avons fait figurer les résultats de ces essais de simulation à la fig. 10 où nous avons porté la salure de l'extrait à saturation en fonction de la salure de l'eau d'irrigation appliquée en 4 doses successives de 150 mm chacune.

Nous y avons fait figurer une droite horizontale (a) représentant la moyenne de la teneur en sel du premier mètre avant l'irrigation, la moyenne de la teneur en sel du premier mètre après l'irrigation est représentée par (b). La diagonale donne évidemment le lieu des points où la concentration de l'extrait à saturation est identique à celle de l'eau d'irrigation. Dans les conditions de l'expérience l'application d'eau de salure inférieure à 14 g/l entraînera une diminution de la concentration moyenne en sel du premier mètre du profil. Ceci montre que l'on aurait pu employer pour le dessalage de l'eau de beaucoup plus mauvaise qualité encore que celle qui a été utilisée.

La droite c représente le lieu des points où la salure de l'extrait à saturation est égale à la moitié de celle de l'eau d'irrigation. Comme la capacité en champ vaut la moitié du pourcentage de saturation, cette droite représente le dessalage maximum qui peut être effectué suite au remplacement total de l'eau contenue à la capacité en champ par de l'eau d'irrigation.

Le rapport  $(a-b)/(a-c)$  donne donc l'efficacité du dessalage. Ce rapport est indiqué sur la même figure en fonction de la concentration en sel de l'eau d'irrigation. Il s'annule évidemment pour la concentration de 14 g/l citée plus haut et est maximum pour de l'eau ne contenant pas de sel, pour alors dépasser sensiblement 80 %. Dans les conditions de l'expérience l'efficacité au dessalage diminue rapidement au-delà de 10 g/l.

La seconde série d'expériences simulées consistait à fractionner la dose totale d'eau d'irrigation apportée soit 600 mm de diverses façon.

On a réalisé des expériences où les fréquences d'apport variaient de 1 dose de 600 mm à 10 doses de 60.

L'efficacité du dessalage a été calculée comme indiqué ci-dessus. Elle s'accroît rapidement de quel-

que 50 % pour une application à 70 % pour 5 et progresse plus lentement ensuite pour arriver à un maximum de 75 à 80 % à 10 applications. Compte tenu de l'évaporation il n'y a donc aucun intérêt à fractionner la dose appliquée plus de 5 fois.

Il nous reste à examiner l'effet de la dose globale, son fractionnement restant le même que dans l'expérience réelle de même que la concentration en sel.

Nous avons réalisé une expérience où 5 doses globales de 400, 800, 1 200, 1 600 et 2 000 mm d'eau sont apportées en 4 fractions égales. Comme il fallait s'y attendre, la figure 11 montre que la salure moyenne du premier mètre décroît avec la quantité d'eau totale apportée à chaque irrigation. La décroissance est rapide jusqu'à un apport global de 800 mm.

Il n'y a guère d'avantage à augmenter la dose totale au-delà de cet apport. De même l'efficacité au dessalage définie précédemment augmente d'abord rapidement avec la dose globale de 100 à 300 mm puis ne progresse pratiquement plus.

Dans les trois expériences précédentes, nous n'avons fait varier qu'un facteur à la fois en gardant les autres facteurs identiques à ce qu'ils étaient dans l'expérience réelle. Nous avons ainsi examiné tour à tour l'effet de la concentration en sel, du fractionnement de la dose globale et de l'importance de cette dose globale.

Il peut être instructif de réaliser des expériences où plus d'un facteur est varié. C'est le cas de l'essai décrit ci-dessous où nous avons réalisé 30 traitements portant sur le nombre d'apports, les doses apportées à chaque irrigation et la concentration en sels. Nous avons admis qu'il était logique dans une expérience de dessalage d'appliquer d'autant plus d'eau d'irrigation qu'elle avait moins de valeur, c'est-à-dire qu'elle était plus salée. C'est ainsi que nous avons combiné factoriellement le nombre d'apports d'eau d'irrigation : 4, 8 ou 12, la dose apportée à chaque irrigation : 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 et 500 mm, la teneur en sel étant liée à la dose apportée par la relation : dose en mm = salure en g/l  $\times$  50.

On a porté en graphique à la fig. 12 la salure moyenne du premier mètre du profil en fonction de la concentration de l'eau d'irrigation utilisée. Comme la salure est exprimée en g par l d'extrait à saturation la diagonale est le lieu des points où eau d'irrigation et extrait à saturation ont la même concentration.

On voit que la salure moyenne obtenue auprès l'un des traitements tend asymptotiquement vers celle qui correspond à l'eau d'irrigation. La salure moyenne atteint un minimum pour une valeur donnée de

la salure d'eau d'irrigation. D'autre part, la décroissance de la salure est d'autant plus rapide que les quantités globales appliquées sont plus importantes sauf si la salure de l'eau augmente. On voit qu'au-delà d'un certain seuil de salinité, il y a un intérêt évident à réduire le nombre d'applications, par exemple pour une eau contenant 4 g/l. 8 ou 12 irrigations donneront le même dessalage et en pratique 4 applications auraient suffi.

### Conclusions

Les conclusions de ce travail peuvent être tirées sur deux plans très différents : tout d'abord en ce qui concerne l'expérience proprement dite et ensuite sur la méthodologie de l'expérimentation future.

L'expérience de dessalage d'un sol a prouvé une fois de plus que les accidents de salure qu'entraînaient une maîtrise insuffisante de la technique d'irrigation exigeaient des mesures de reconstitution coûteuses.

On a vu que le dessalage du premier mètre du profil aurait exigé plus de 1 000 m d'eau apportés

en 8 fois, ce qui est une opération coûteuse et poserait des problèmes au sujet de l'évacuation des eaux de lavage si elle était pratiquée sur de grandes surfaces. On aurait pu rendre cette opération plus efficace et consommer moins d'eau, ce qui aurait simplifié le problème de drainage, si l'on avait fractionné davantage la dose appliquée.

Il eut été infiniment plus simple de ne pas saler le sol en utilisant des quantités exagérées d'eau de qualité marginale dans des conditions d'évapo-transpiration particulièrement élevées.

L'utilité de modèle du genre de celui que nous avons exposé ici devrait surtout consister à programmer la technique de l'irrigation pour éviter que les investissements des barrages et des périmètres d'irrigation ne conduisent à transformer des sols normaux en sols salés. Fort heureusement pour le Maroc, les problèmes de salure des terres n'ont pas encore pris un caractère de gravité extrême, pour qu'il en reste ainsi au fur et à mesure que se poursuit l'intensification de l'agriculture par la technique de l'irrigation, une attention constante aux problèmes de salure et de drainage sera indispensable.

# SOCIÉTÉ D'ETUDES ET TRAVAUX

Société Anonyme au capital de 550 000 dirhams

ENTREPRISE GENERALE DE TRAVAUX PUBLICS

BETON ARME — GENIE CIVIL

290, bd Mohammed-V - RABAT

Tél. 336-40

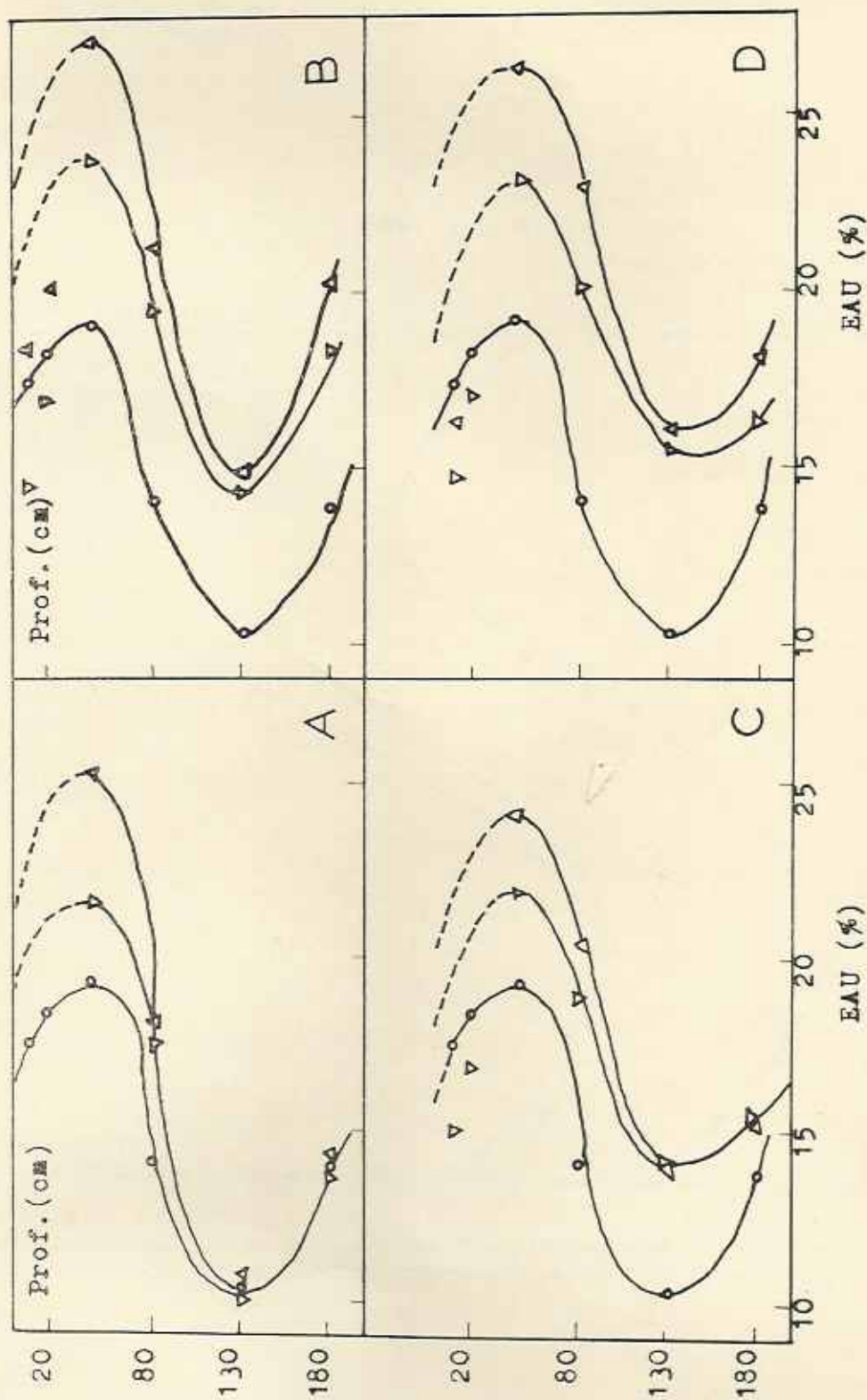


Fig. 1. — Evolution des profils hydriques après l'application de 150 mm (A), 300 mm (B), 450 mm (C) et 600 mm (D).  
 Profil hydrique avant l'irrigation — — —  
 Profil hydrique après ressuyage (10 jours) — Δ —  
 Profil hydrique après 50 jours — ○ —

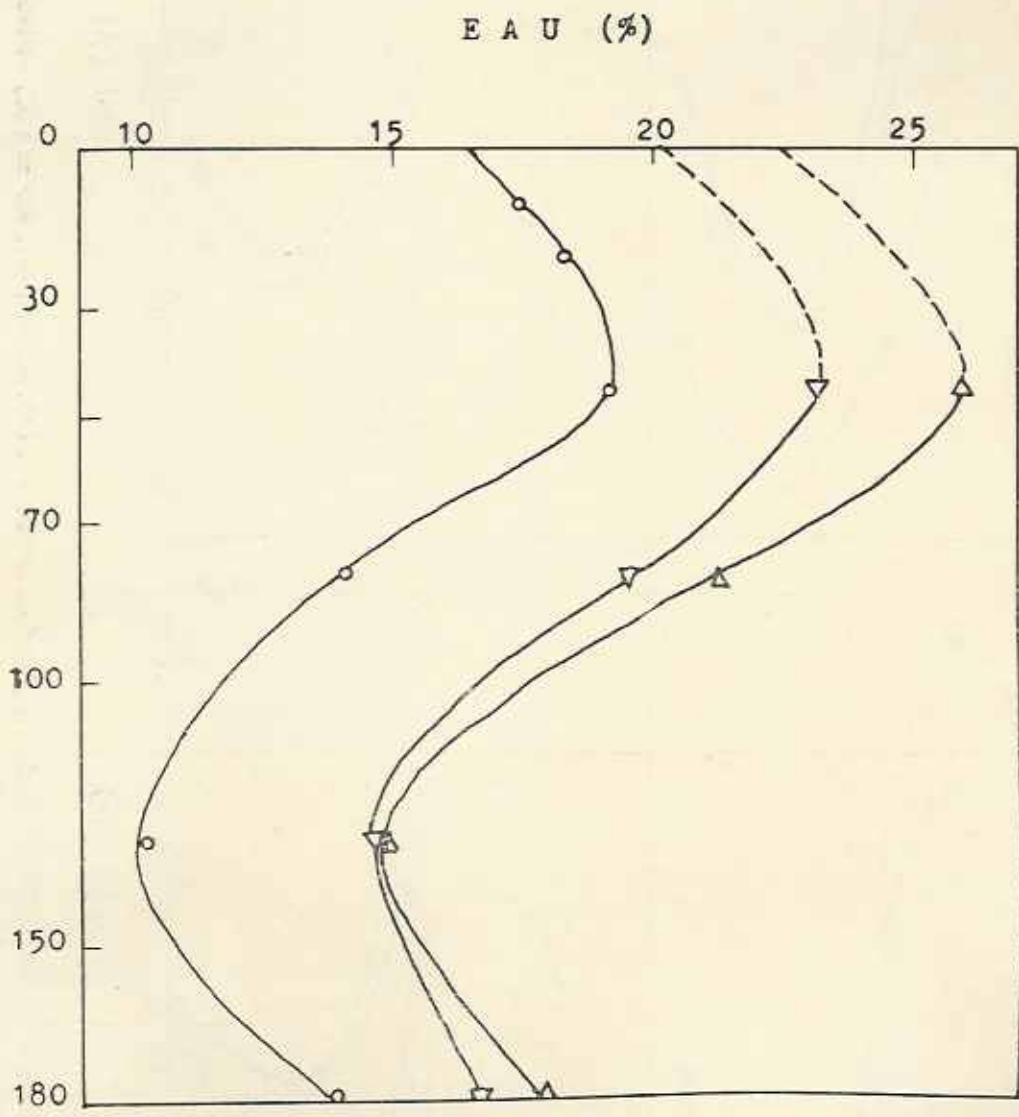
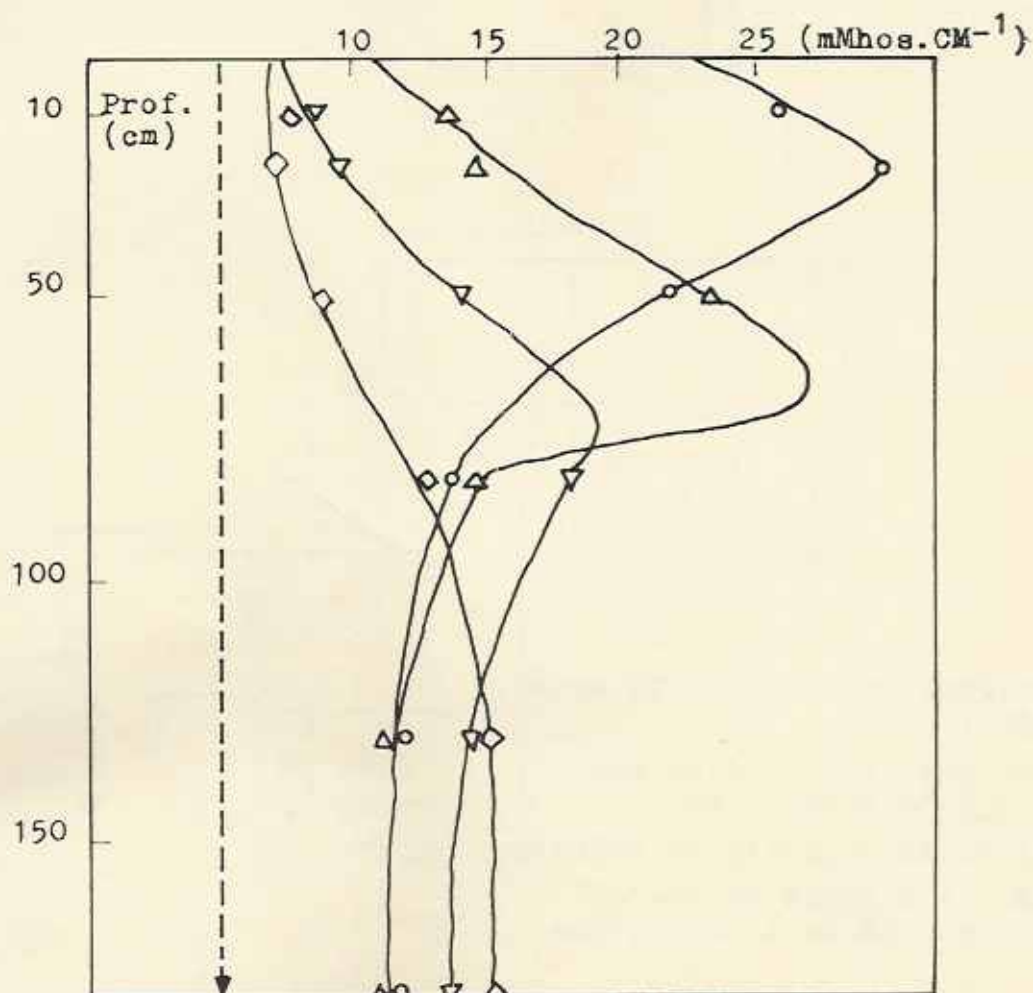


FIG. 2. — Profils hydriques moyens des 18 parcelles ayant reçu au moins deux irrigations. Signification des symboles identiques à la fig. 1.

Conductivité électrique de l'extrait à saturation



Conductivité  
de l'eau d'irrigation

FIG. 3 — Profils expérimentaux de salure avant la première irrigation (—o—), après la première (—Δ—), après la deuxième (—▽—) et après la quatrième (—◇—).

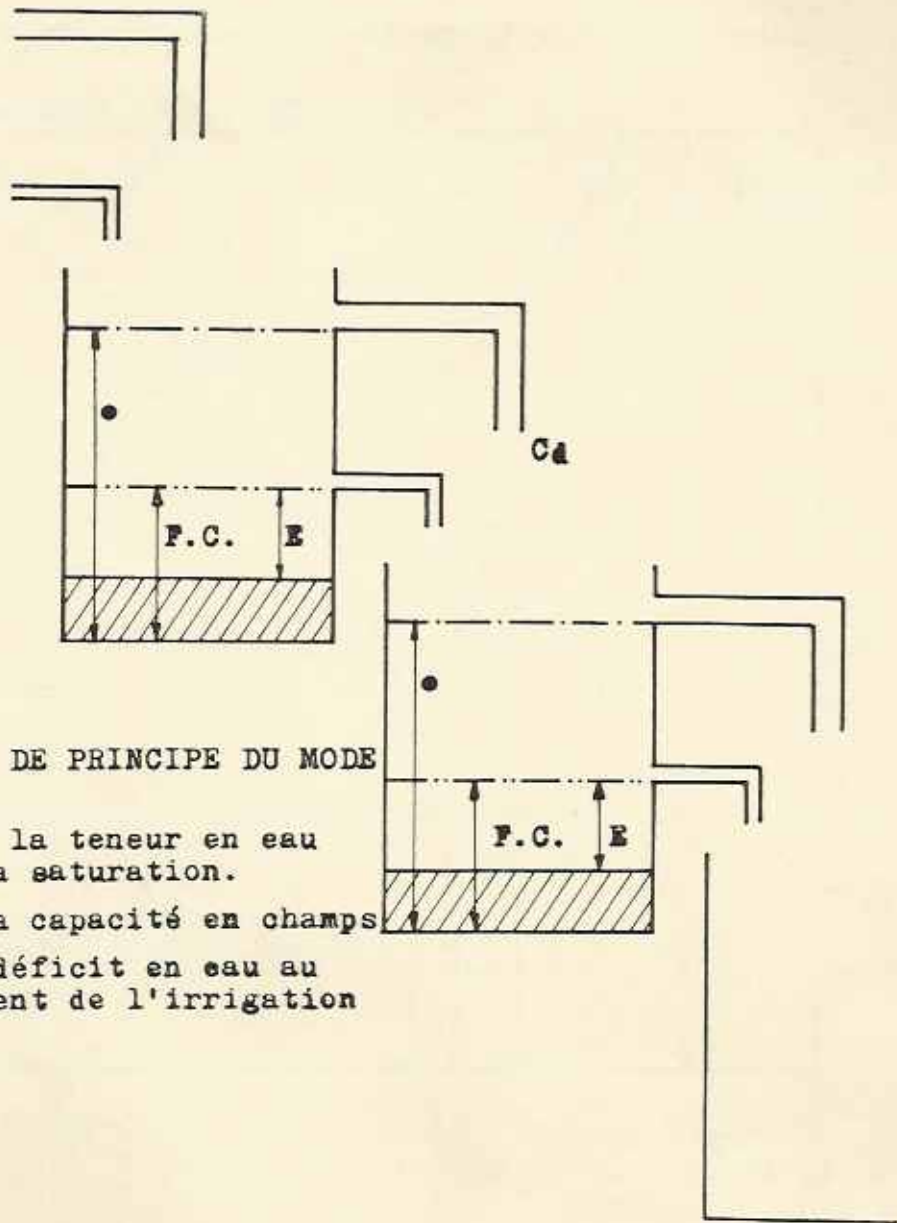


FIG. 4 — Schéma de principe du modèle de dessalage suivant Bresler.

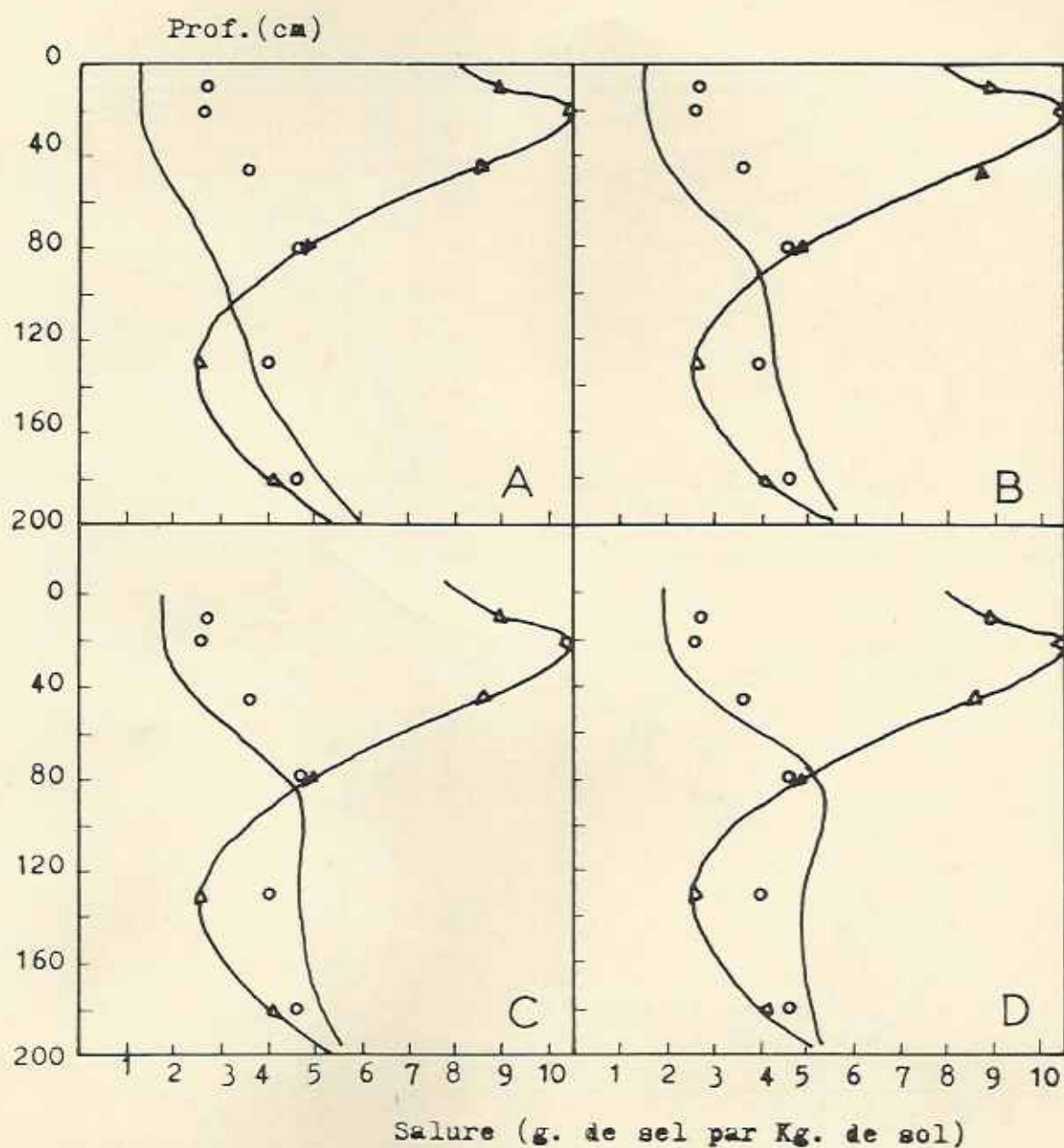


FIG. 5. — Profil de salure expérimental avant la première irrigation (— △ —) et après la quatrième (— ○ —) comparée au profil théorique calculé pour une teneur en eau à la saturation égale à 1,5 fois (A), 1,75 fois (B), 2,0 fois (C) et 2,25 fois (D); la capacité en champ estimée par le profil hydrique après ressuyage.

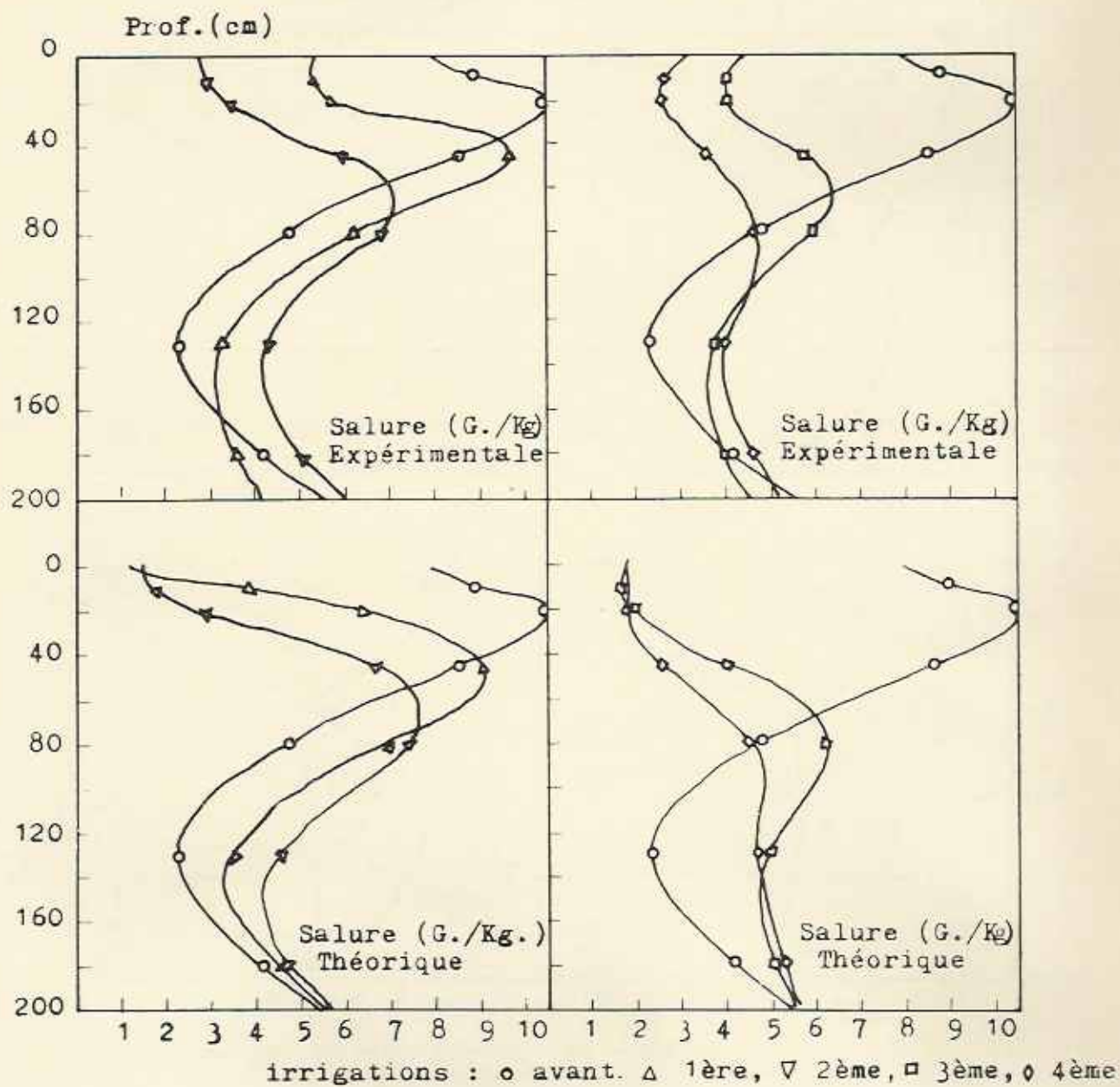


FIG. 6. — Comparaison du profil expérimental (haut) et théorique (bas) de la salure avant irrigations et après une et deux (gauche) ou trois et quatre (droite) irrigations.

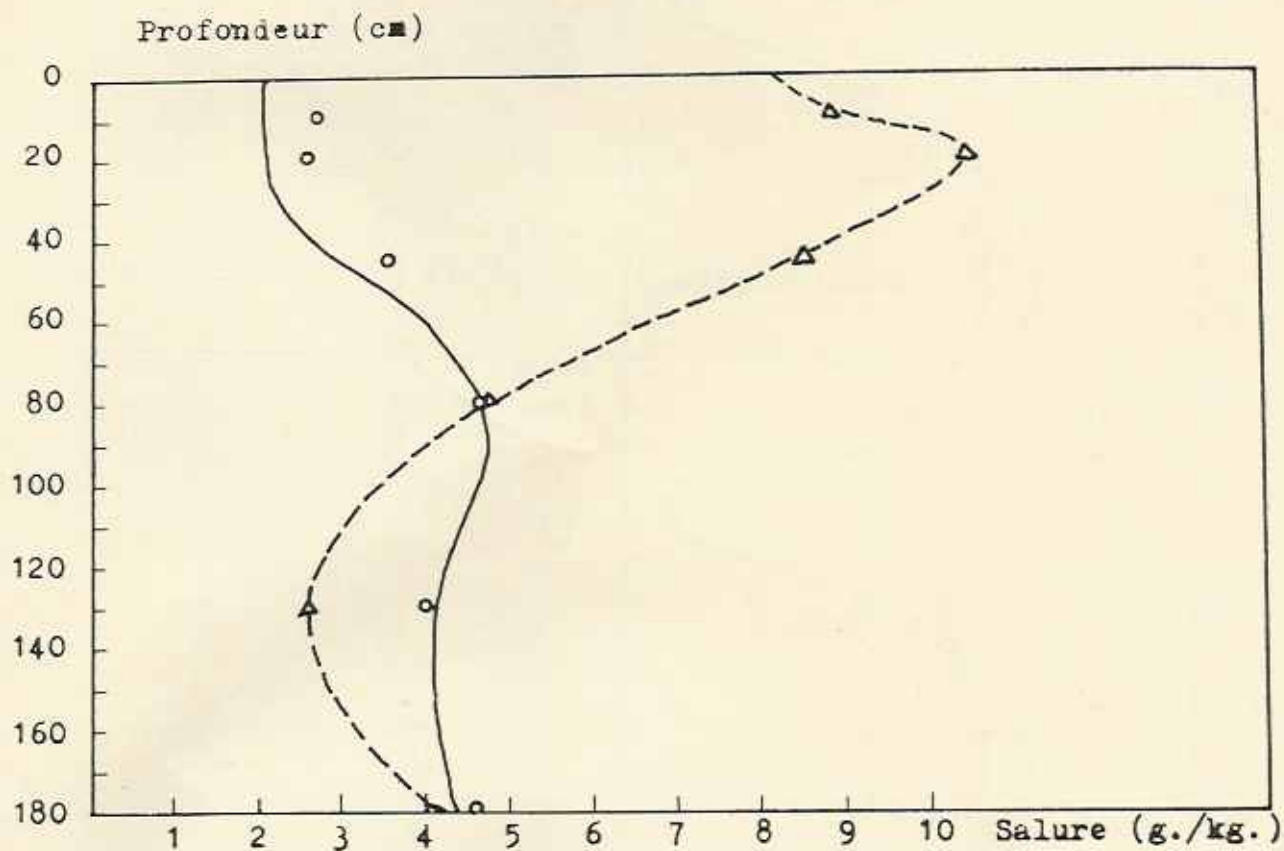


FIG. 7. — Comparaison entre le profil théorique de salure après la 4ème irrigation et le profil expérimental après ajustement du paramètre 0 (i). Le calcul se fait à partir du profil de salure observé avant la 1ère irrigation.

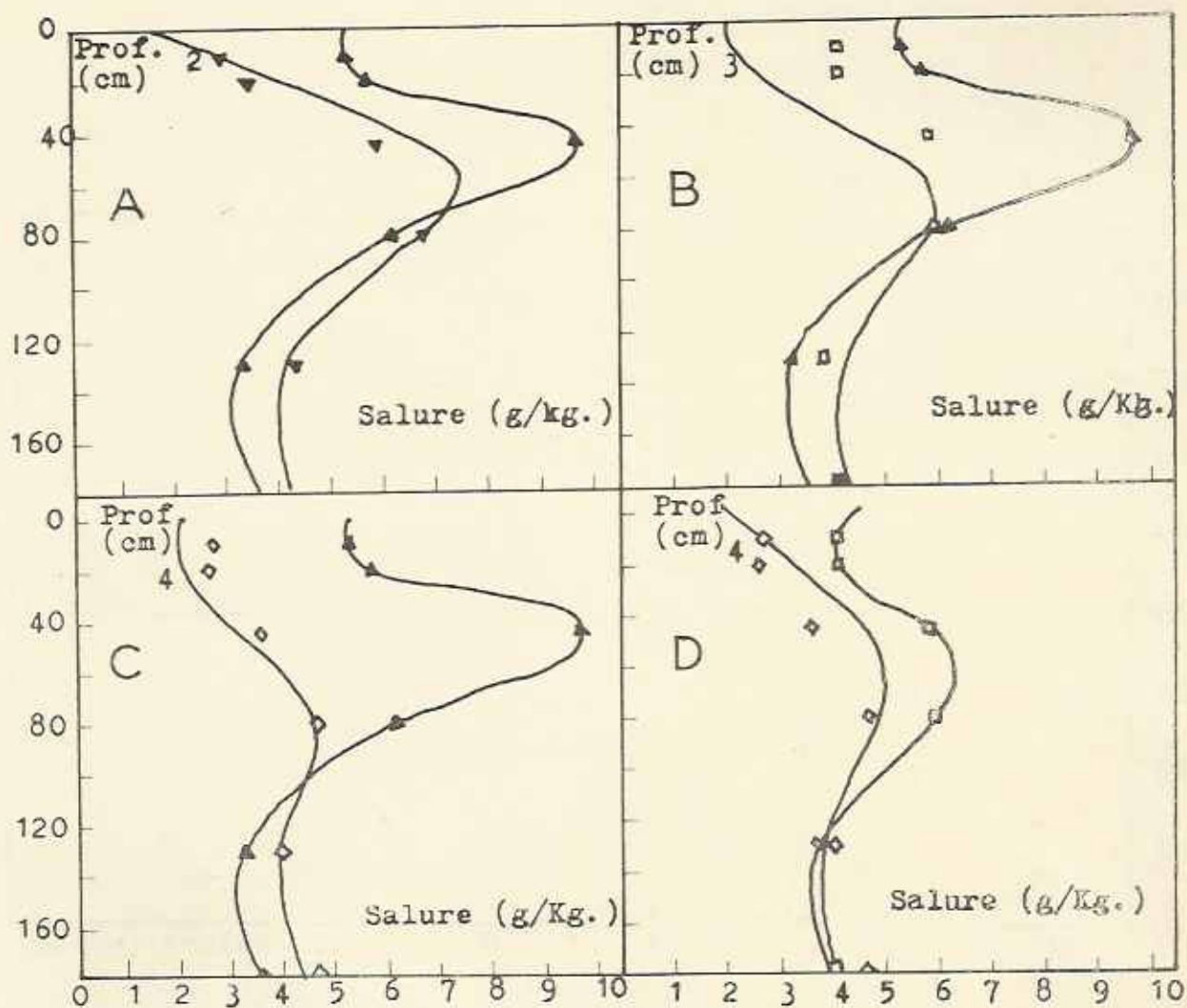


FIG. 8. — Vérification du modèle par comparaison des salures calculées et observées.  
 A : Salure après la 2ème irrigation calculée à partir des données après la première.  
 B : Salure après la 3ème, calculée à partir des données après la première.  
 C : Salure après la 4ème, calculée à partir des données après la première.  
 D : Salure après la 4ème, calculée à partir des données après la troisième.

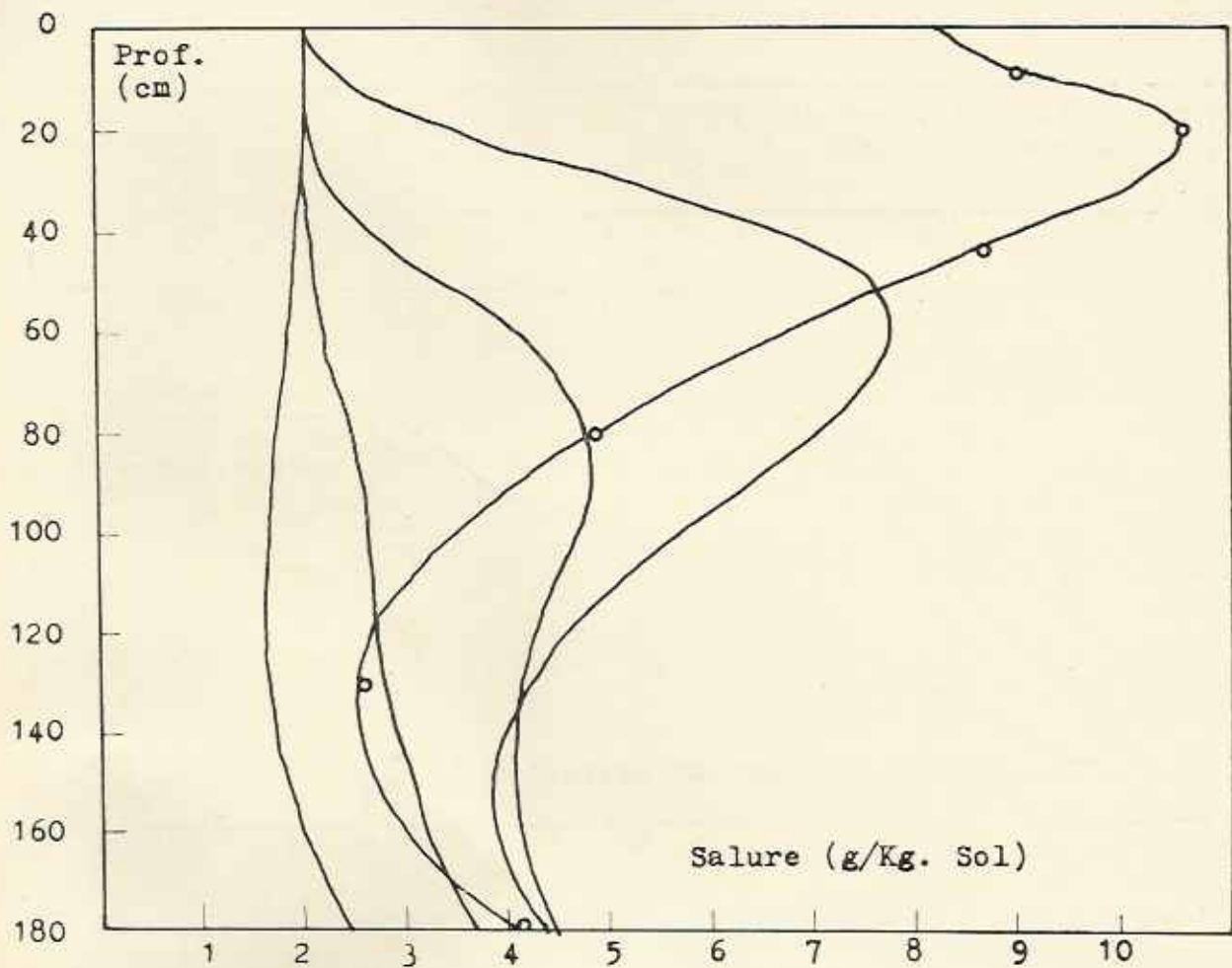


FIG. 9. — Evolution du profil de salure 2, 4, 6 et 8 irrigations à partir du profil de salure initial.

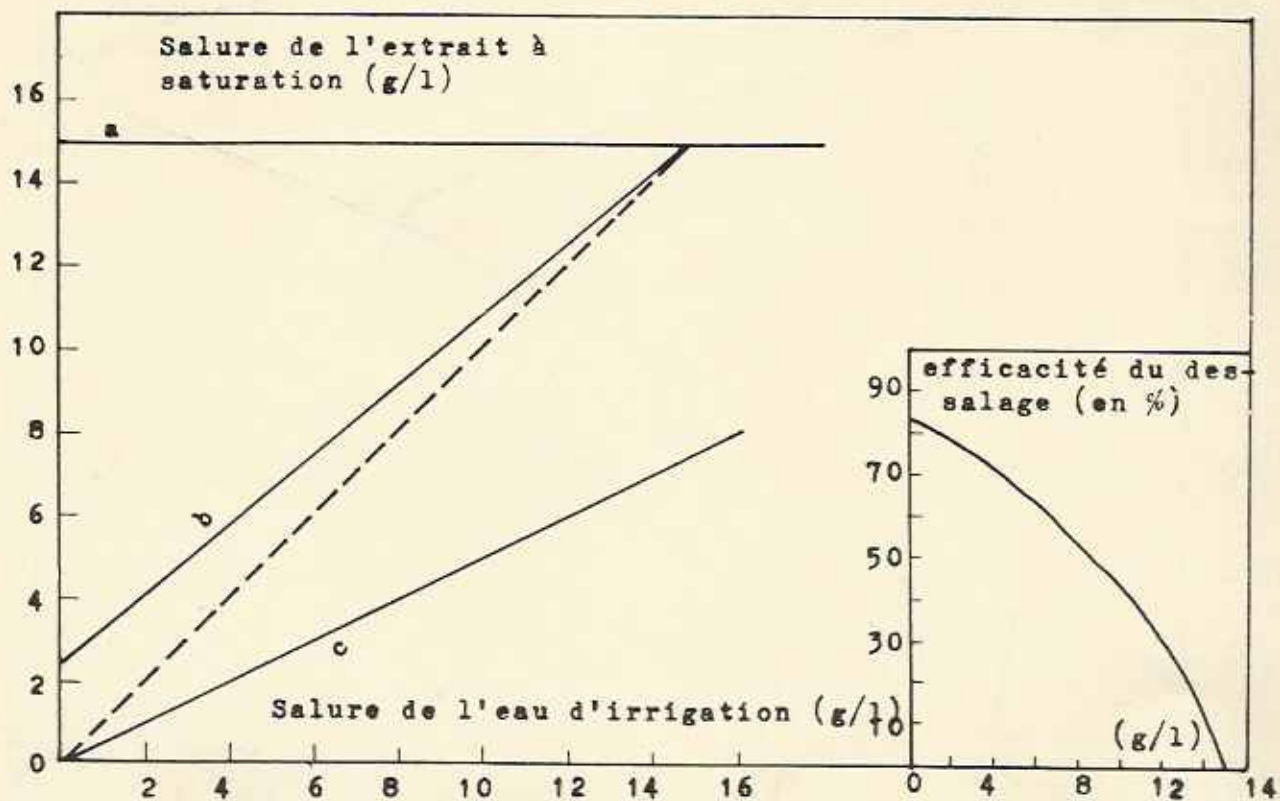


FIG. 10 — Effet de la concentration de l'eau d'irrigation sur la salure moyenne du premier mètre du sol (b).  
 Moyenne de la salure initiale du sol (a).  
 Salure moyenne minimale pouvant être obtenue dans ces conditions (c).

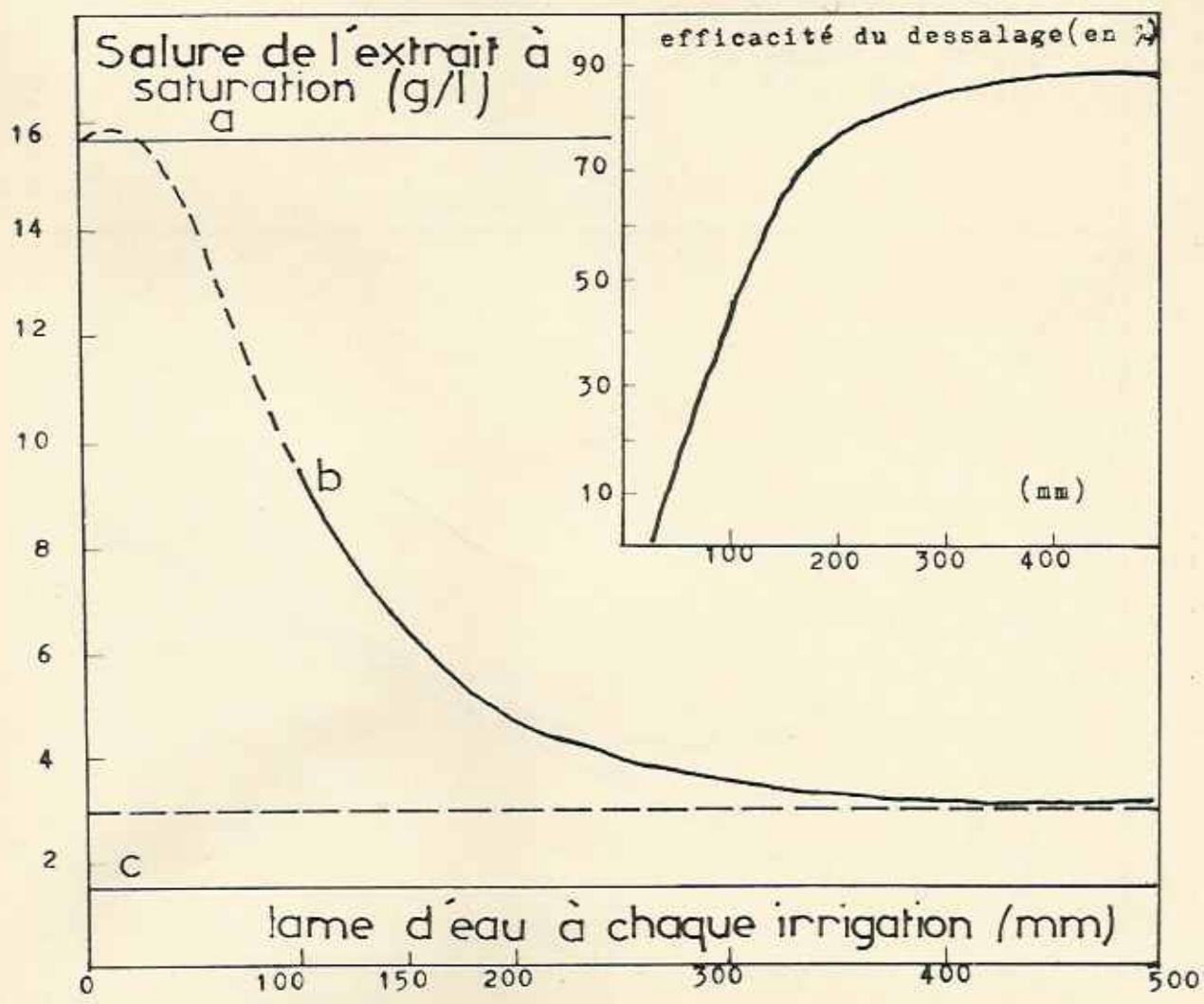


FIG. 11. — Effet de la lame d'eau par irrigation sur la salure moyenne finale du premier mètre (b).  
 Moyenne de la salure initiale du sol (a).  
 Salure moyenne minimale pouvant être obtenue dans ces conditions (c).

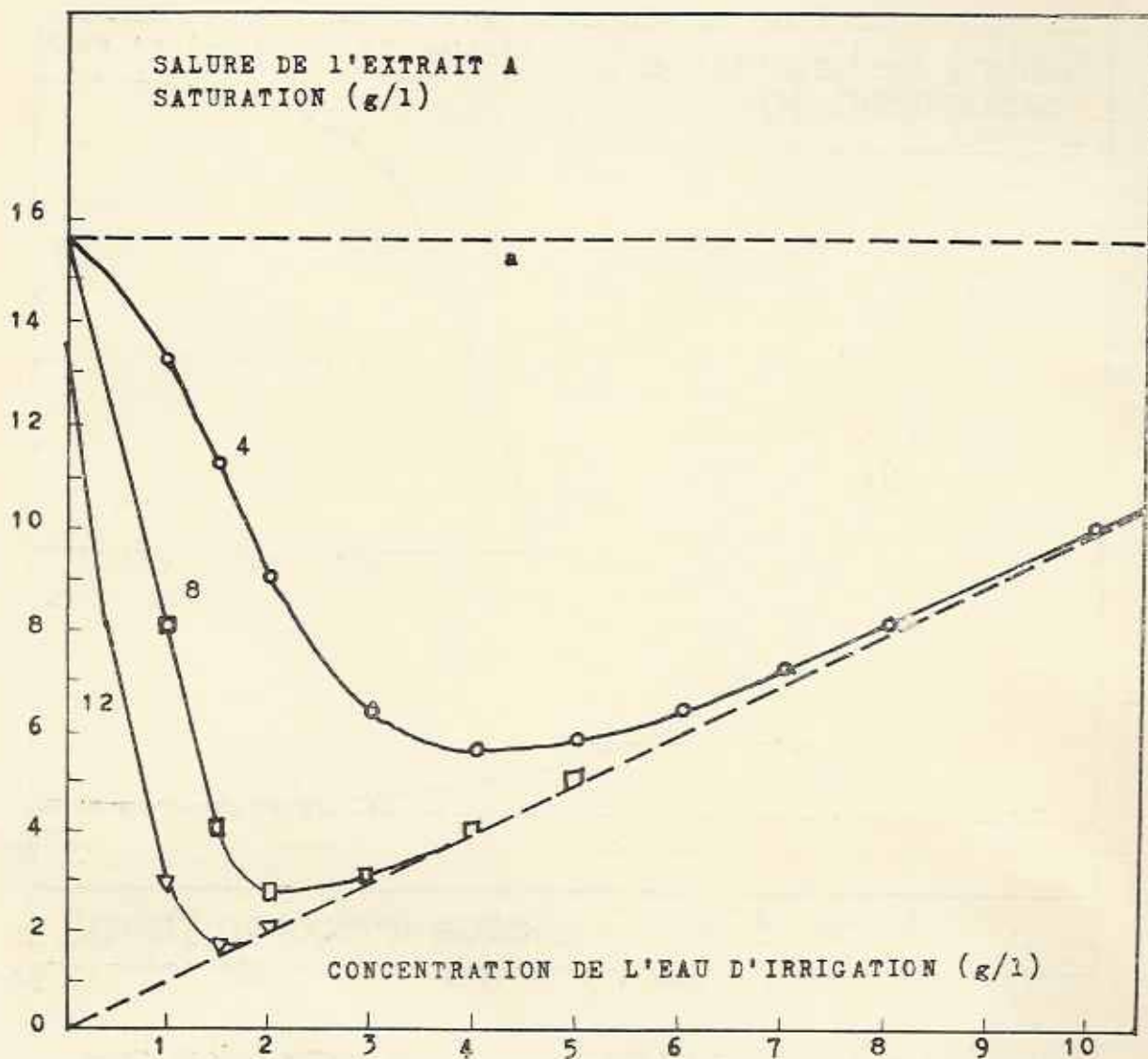


FIG. 12. — Effet de la concentration en sel et du nombre d'irrigations, à dose variable et proportionnelle à la salure d'eau d'irrigation. (a) salure moyenne initiale du premier mètre.

L'ordonnée donne la salure moyenne du premier mètre.

## COLLOQUE SUR LE DRAINAGE AU MAROC

L'Institut Agronomique Hassan II et l'ANAFID se proposent d'organiser un colloque sur les problèmes de drainage au Maroc. Celui-ci se déroulerait vers la fin de l'année 1972 ou au printemps 1973.

Les études et les techniques de drainage n'ont connu jusqu'à maintenant que peu d'applications dans notre pays et, à une exception près, n'ont fait l'objet d'aucune expérimentation dans le passé. Or ces techniques sont susceptibles d'être appliquées sur des surfaces importantes. Leur intérêt est d'autant plus grand que l'évacuation des eaux excédentaires est liée au maintien d'un taux de salinité supportable par les cultures. A ce titre en particulier, le drainage devrait souvent être complémentaire de l'irrigation.

Par ailleurs il s'agit là d'un domaine où l'expérience acquise sur d'autres sols, sous d'autres climats que les nôtres risque de ne pas être facilement transposable.

Faute de précédents, l'équipement déjà réalisé ou en cours de réalisation n'a pu être basé sur des données spécifiques. Le colloque envisagé permettrait de bénéficier de l'expérience d'experts internationaux qui auront accepté d'étudier ce problème (un dossier leur sera préalablement communiqué dans ce but).

Les modalités de déroulement du colloque seront déterminées à l'issue des contacts qui pourront être pris avec les spécialistes présents au congrès de Varna.

# BULLETIN D'ADHESION A L'A.N.A.F.I.D

NOM ET PRENOM OU ORGANISME : .....

QUALITE ET PROFESSION : .....

ADRESSE : .....

Après avoir pris connaissance des statuts de l'A.N.A.F.I.D. et de son règlement intérieur (1) désire adhérer à cette association.

Je joins à la présente demande un chèque bancaire de (2) ..... DH  
représentant le montant de ma cotisation au titre de l'année 1972.

Signature :

(1) Ces documents peuvent vous être envoyés sur simple demande adressée à l'A.N.A.F.I.D.

(2) 240 DH pour les personnes morales.  
50 DH pour les personnes physiques.

Ce bulletin d'adhésion est à retourner à : l'A.N.A.F.I.D., B.P. 704 — RABAT.

# BULLETIN D'ABONNEMENT A «HOMMES, TERRE ET EAUX»

NOM ET PRENOM OU ORGANISME : .....

ADRESSE : .....

Désire souscrire ..... abonnements (1) au bulletin de l'A.N.A.F.I.D. « HOMMES, TERRE ET EAUX ».

L'abonnement est valable pour un an (4 numéros) et pour les numéros spéciaux éventuels.

Je joins à la présente un chèque bancaire de ..... DH.

## TARIFS :

MAROC 20 DH - Etudiants 10 DH

ETRANGER 50 DH

Ce bulletin d'abonnement est à retourner à : l'A.N.A.F.I.D., B.P. 704 — RABAT.

N.B. — Pour les adhérents de l'A.N.A.F.I.D., l'abonnement au bulletin est compris dans la cotisation.

(1) Indiquer le nombre d'abonnements désirés.