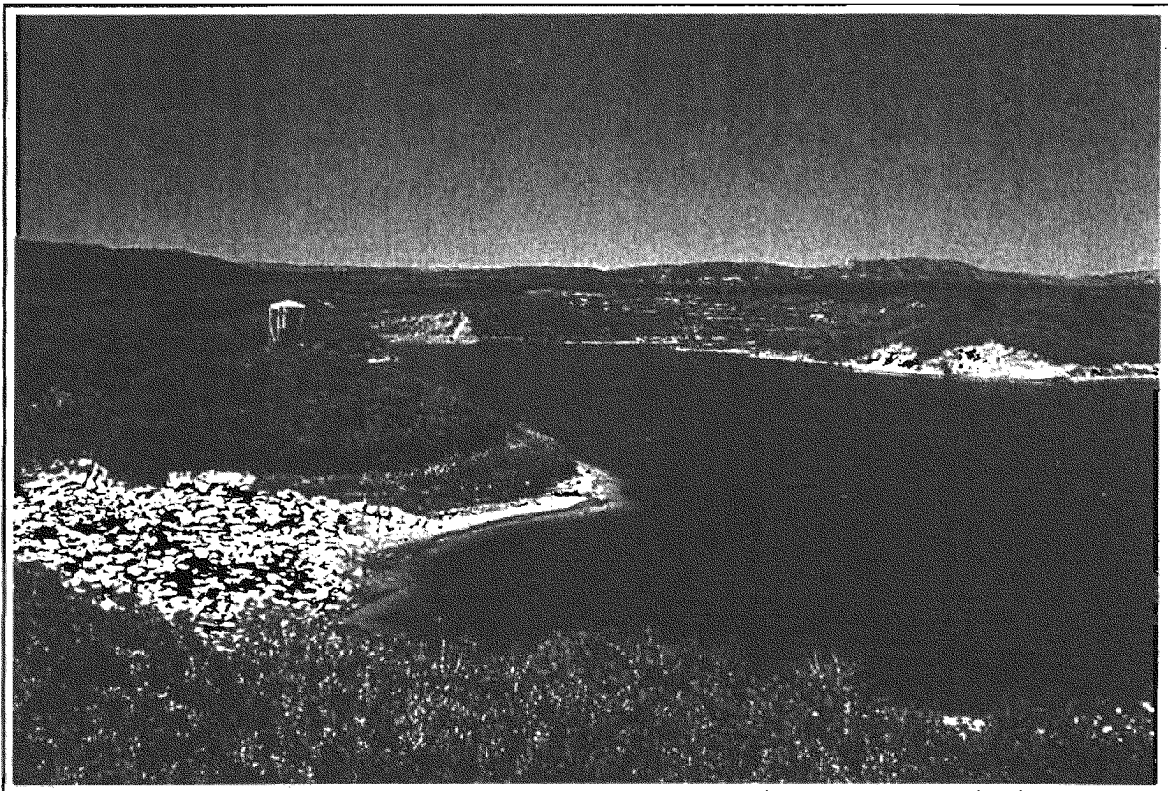
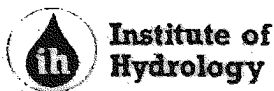




**1<sup>er</sup> Rapport d'avancement**  
**Hydromed**  
**ERBIC 18 CT 960091**



Tunis, Juin 1997



## SOMMAIRE

Introduction .....	3
Action de coordination .....	4
1 <sup>ere</sup> Réunion de coordination .....	4
L'organisation du programme et les équipes de recherche .....	5
Equipe de coordination, ORSTOM .....	5
Equipe scientifique ORSTOM .....	6
Equipe scientifique INGREF .....	6
Equipe scientifique IH de Wallingford .....	6
Equipe scientifique DWRE Lund – Suède .....	7
Equipe scientifique du CSIC IRNASE .....	7
Equipe scientifique de l'IAV .....	7
Equipe scientifique de l'ACSAD .....	7
Missions du coordinateur .....	8
Actions de coordination à venir .....	8
Action 1 : Synthèse préliminaire .....	9
Etude bibliographique .....	9
Choix des sites pilotes .....	10
<b>Action 2 : Eau - Sol – Environnement et Action 3 : Agro-économie - Gestion sociale de l'eau et de l'érosion.</b> .....	11
Bilan hydrologique des lacs collinaires .....	11
Etude de l'érosion des bassins versants et sédimentation des lacs .....	12
Qualité des eaux et transferts des polluants dans les sols .....	12
Usage de l'eau .....	12
Action de formation .....	12
Production scientifique .....	13
Conclusion .....	14
Annexe 1 : Rapport d'activité ORSTOM – INGREF .....	15
Annexe 2 : Rapport d'activité IAV .....	15
Annexe 3 : Rapport d'activité IH Wallingford .....	15
Annexe 4 : Rapport d'activité Université de Lund .....	15
Annexe 5 : Rapport d'activité Université de IRNASE (Séville) .....	15

## INTRODUCTION

Ce premier rapport d'avancement, rédigé 6 mois après la signature du contrat, présente essentiellement le démarrage du projet. Il relate de la 1<sup>ère</sup> réunion de coordination tenue du 6 au 10 janvier 1997 et des travaux en cours.

Les objectifs du programme Hydromed - Programme de recherche sur les lacs collinaires dans la zone semi-aride du pourtour méditerranéen - se résument comme suit :

1. Connaissance de la ressource en eau des bassins versants de lacs collinaires:
  - analyse des potentialités en eau disponible et de leurs variations spatio-temporelles (quantité et qualité),
  - évaluation des principaux traits du fonctionnement géochimique (en particulier pour le phosphore), biologique (production primaire et réseau trophique) des lacs collinaires,
  - analyse du risque hydrologique,
  - analyse de l'impact des aménagements sur le cycle de l'eau et sur les transports solides,
  - modélisation du bilan hydrologique et sédimentaire.
2. Connaissance de l'aménagement lac collinaire :
  - état de diversité et variabilité du fonctionnement technique,
  - impact sur les dynamiques agraires locales,
  - problématique d'usage de la ressource.
3. Représentation théorique de fonctionnement et d'évaluation :
  - modèles techniques d'ordre hydrologique, hydraulique et agro-climatologique,
  - modèles d'usage et de gestion de la ressource,
  - validation micro et macro-économique.

Pour atteindre ces objectifs le programme a été décomposé en quatre actions de recherches

- Action 1 : Synthèse des travaux existants dans chaque pays.
- Action 2 : Eau - Sol - Environnement.
- Action 3 : Agro-économie - Gestion sociale de l'eau et de l'érosion.
- Action 4 : Pérennité du lac collinaire et son intégration dans le développement durable.

Parallèlement à ces actions de recherche, le programme prévoit une action de formation à la recherche par la recherche et une action de coordination.

Le calendrier des travaux, accepté dans le contrat, fixe l'accomplissement de l'action 1 dans la première année du projet et le démarrage des deux suivantes. Dans le cadre de la formation, il prévoit l'accueil d'un post-doctorant en sciences sociales et agronomiques, la définition des sujets de thèses et le choix des candidats, l'accueil de stagiaires. L'action de coordination comprend une réunion de coordination au cours de la première année et une mission du coordinateur sur chaque terrain.

La réunion de coordination du 6 au 10 janvier 1997 à Tunis fixait la première échéance. Il était demandé à chaque partenaire de présenter son équipe de recherche et une première analyse des travaux à mener. La seconde échéance était ce rapport d'avancement pour lequel les partenaires se sont engagés à faire le point sur leur travaux en cours, à présenter les sites pilotes choisis, à rendre compte d'une revue bibliographique, à présenter leur plan de formation.

Les rapports d'avancement rédigés par chaque partenaire sont annexés à celui du coordinateur.

## ACTION DE COORDINATION

### 1<sup>ère</sup> Réunion de coordination

Tenue du 6 au 10 janvier 1997, deux mois après la signature du contrat Hydromed, cette réunion a permis :

- A tous les partenaires de se rencontrer,
- De visiter les sites expérimentaux des lacs collinaires équipés pour le suivi des bilans en eau et en matières transportées, en Tunisie,
- D'organiser les travaux pour la première année du projet et de répartir les tâches entre partenaires,
- De présenter le projet Hydromed aux institutions tunisiennes oeuvrant dans des programmes de recherche et/ou de développement concernant les lacs collinaires.

L'INGREF<sup>1</sup> (Tunisie) était le partenaire hôte de cette réunion qu'il a organisée en étroite collaboration avec l'ORSTOM<sup>2</sup>, coordinateur du projet.

Les deux journées de terrain ont été l'occasion de mieux faire connaissance, de montrer le concept du lac collinaire en Tunisie, de visiter des installations expérimentales pour le suivi hydrologique, de discuter, sur cas concret, des problèmes d'érosion et de sédimentation, de partager l'expérience de chacun.

Les sites visités ont été ceux choisis comme sites pilotes en Tunisie. Ils font partie du réseau de surveillance hydrologique de 26 lacs collinaires suivis par la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols (CES) du Ministère de l'Agriculture et par l'ORSTOM. Chacun de ces lacs est équipé d'appareils d'acquisition de données : pluviométrie, limnimétrie, évaporation depuis 1993. Différents travaux de cartographie des bassins versants sont en cours. La qualité des eaux est suivie. Des piézomètres ont été installés en aval sur les rives de l'un d'entre eux pour le suivi de la nappe.

Les protocoles d'enquêtes sur l'utilisation de l'eau, l'organisation des usagers et les impacts socio-économiques ont été discutés. Ces enquêtes sont en cours depuis 1993 également.

A chaque visite de lac, une équipe régionale de la CES a rejoint les chercheurs et a donné toutes les informations sur le choix du site, la construction du barrage, les aménagements amont et sur les périmètres irrigués.

La réunion entre partenaires, qui a duré un jour plein, avait pour objectifs de faire le point des actions déjà engagées par les uns et les autres, de voir l'état de la réflexion sur la thématique proposée, d'établir un organigramme du programme (dans certaines équipes, des chercheurs proposés dans le projet ont été appelés à d'autres fonctions et ont été remplacés) et de proposer un mode de fonctionnement et une répartition des tâches pour la première année.

Conformément à la demande de Me Kayamanidou de la Commission Européenne DGXII / B4, lors de la négociation des contrats, cette réunion de coordination a comporté une journée ouverte vers les institutions nationales oeuvrant dans des programmes de recherche et/ou de développement concernant la ressource en eau et la législation de l'eau.

A l'invitation de l'INGREF, Monsieur le Secrétaire d'Etat auprès du Ministre de l'Agriculture Chargé des Ressources Hydrauliques, M. Horchani, nous a fait l'honneur d'ouvrir cette réunion.

<sup>1</sup> INGREF : Institut National de recherche en Génie Rural et Eaux et Forêts (Tunisie)

<sup>2</sup> ORSTOM : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

Une quarantaine de participants travaillant dans divers instituts de recherche, d'enseignement et de développement liés à la mobilisation de l'eau ont également répondu à cette invitation. Dr. Rejeb, Directeur de l'INGREF, a présenté les équipes Hydromed et les principaux invités. Il a résumé les objectifs d'Hydromed. Des discussions ont fait suite permettant d'envisager de nombreuses collaborations.

Un rapport de cette réunion de coordination a été rédigé et expédié aux partenaires et à la DG 12 de la Commission Européenne.

## L'organisation du programme et les équipes de recherche

Conformément à la proposition et au contrat, les collaborations mises en places sont les suivantes :

- L'ORSTOM assure la collaboration du projet .
- L'INGREF a la responsabilité des travaux en Tunisie et collabore essentiellement avec l'équipe ORSTOM en poste à Tunis et le DWRE<sup>3</sup> de Lund.
- L'IAV<sup>4</sup> a la responsabilité des travaux au Maroc et collabore essentiellement avec l'équipe ORSTOM de Montpellier et l'IRNASE CSIC<sup>5</sup>.
- L'ACSAD<sup>6</sup> a la responsabilité des travaux au Moyen-Orient et collabore essentiellement avec l'IH<sup>7</sup> de Wallingford et l'équipe ORSTOM de Tunis.
- Les échanges Sud - Sud s'organiseront suivant les spécialités des instituts. Le Maroc aura un rôle de conseil en matière de spatialisation des données, SIG et télédétection. La Tunisie apportera son expérience en matière de réalisation technique, d'hydrologie et en sciences sociales.
- L'expérience Tunisienne est la plaque tournante du programme. Les jeux de données déjà acquises servent à la mise au point de modèles et à leur calibrage.

Les équipes sont présentées par institut dans les tableaux suivants :

### Equipe de coordination, ORSTOM

Nom	Fonction	Rôle
Jean ALBERGEL	Directeur de recherche	Coordination et animation scientifique
Jacques CLAUDE	Représentant de l'ORSTOM en Tunisie	Relations entre les partenaires et avec la Commission à Bruxelles
Jean Claude LEPRUN	Responsable du programme « Petits barrages de l'ORSTOM »	Conseiller scientifique

<sup>3</sup> DWRE : Department of Water Resources and Engineering

<sup>4</sup> IAV : Institut Agro-Vétérinaire Hassan II (Rabat)

<sup>5</sup> IRNASE CSIC : Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla Consejo Superior de Investigaciones Científicas

<sup>6</sup> ACSAD : the Arab Center for the Studies of Arid zones and Dry lands

<sup>7</sup> IH : Institute of Hydrology

### Equipe scientifique ORSTOM

Nom et prénom	Titre	Domaine d'intérêt	Interventions
Albergel Jean	Directeur de recherche Tunis	Hydrologie	Coordination et hydrologie Tunisie / Moyen orient
Le Moalle Jacques	Directeur de recherche Montpellier	Hydrochimie	Tunisie
Roose Eric	Directeur de recherche Montpellier	Agronomie / Pédologie	Maroc
De Noni George	Chargé de recherche Montpellier	Géographe	Maroc
Vacher Jean	Chargé de recherche	Agronomie / Bioclimatologie	Tunisie
Selmi Salah	Chercheur en Post-doc	Agro-économie / Socio- économie	Tunisie / Moyen orient
Rahaingomanana Nathalie	Thèse (MRT)	Géochimie	Tunisie
Zante Patrick	Ingénieur d'étude	Pédologie	Tunisie
Guiguen Noël	Ingénieur d'étude	Hydrologie	Tunisie / missions d'installation matériel
Pépin Yannick	Ingénieur	Hydrologie	Tunisie / missions d'installation matériel
Ben Younes Mohamed	Ingénieur	Hydrologie	Tunisie
Mansouri Taoufik	Thèse Fac des Sciences Tunis	Hydrologie / SIG	Tunisie

### Equipe scientifique INGREF

Nom & prénom	Titre	Domaine d'intérêt
Nasri Salah	Attaché de recherche	CES - Hydrologie
Amami Hassib	Ingénieur principal	Agro-économie
Bahri Akissa	Chargée de recherche	Salinité - Drainage
Chaabouni Zouhaier	Directeur de labo.	Physique des sols
Zain Abdelaziz	Chargé de recherche	Agronomie - Irrigation

### Equipe scientifique IH de Wallingford

Nom & prénom	Titre	Domaine d'intérêt
Ragab - Ragab	Agro-hydrologue	Gestion de la ressource en eau
Barney Austin	Hydrologue	Spécialiste des barrages, modélisation hydrologique

L'IH de Wallingford a nommé un comité de suivi de ce projet.

### Equipe scientifique DWRE Lund – Suède

Nom & prénom	Titre	Domaine d'intérêt
Berndtsson Ronny	Professeur associé	Variations spatiales des phénomènes hydrologiques, physique des sols
Larson Magnus	Hydrologue	Processus hydrologiques en z. semi-aride
Iritz Laszlo	Hydrologue	Modélisation - Gestion de l'eau
Persson Hans	Phd Student	Hydrochimie - physique des sols
Niemczynowicz Jazusz	Hydrologue	Hydrologie
Zhang Tielin	Hydrologue	Infiltration

### Equipe scientifique du CSIC IRNASE

Nom & prénom	Titre	Domaine d'intérêt
Moreno Félix	Coordinateur ; S.R. Scientist	Physique des sols, eau/sols/solutés
De la Rosa D.	S.R. Scientist	Système expert « gestion des sols et de l'eau »
Cabrera F.	S.R. Scientist	Qualité de l'eau, salinisation
Fernandez J.E.	R. Scientist	Agro-climatologie / modélisation
Andreu L.		Spécialiste Irrigation / drainage - Périmètres

### Equipe scientifique de l'IAV

Nom & prénom	Titre	Institution	Domaine d'intérêt
Merzouk Abdelaziz	Professeur / Coordinateur	IAV Dpt. Sc. Sol	Hydrologie /CES
Mejjati Alami	Professeur	IAV Dpt. Ecologie	Gest. Res. Nat. / Pastoralisme
Houssa Rachida	Docteur/ Chercheur	IAV Dpt. Sc. Sol	Sc. Sol. Télédétection
Abdellaoui Benyounes	Etudiant 3 <sup>ème</sup> cycle	IAV Dpt. Sc. Sol	Hydrogéologie
Sabir Mohamed	Professeur	ENFI / Salé	Aménagement des bassins versants
Boukil Ahmed	Ingénieur des Eaux et Forêts	Eaux et Forêts	Aménagement des bassins versants
En cours de recrutement	Maître assistant	Fac. Lettres Kénitra	Sociologie rurale

### Equipe scientifique de l'ACSAD

Nom & prénom	Titre	Institution	Domaine d'intérêt
Khoury Jean	Coordinateur	ACSAD	Gest. Res Eau
Droubi Abdallah	Docteur/ Chercheur	ACSAD	Hydrogéologie / Qualité des eaux
Roufai Nabil	Docteur/ Chercheur	ACSAD	Modélisation
Brahim Yasser	Docteur/ Chercheur	ACSAD	SIG
Abbass Yad	Etudiant 3 <sup>ème</sup> cycle	ACSAD	MNT / Topographie
Ghrébé Abderahmane	Docteur/ Chercheur	ACSAD	Sc. Sol
En cours de recrutement	Consultant		Agro-économie

## Missions du coordinateur

Le coordinateur a réalisé une mission au Maroc du 22 Avril au 7 Mai. Dr. A. Merzouk, Directeur du Laboratoire de Sciences du Sol de l'IAV Hassan II et son équipe ont reçu les principaux acteurs du programme Hydromed au Maroc : Eric Roose de l'ORSTOM (Montpellier), Felix Moréno de l'IRNASE (Séville) et Jean Albergel ORSTOM (Tunis) coordinateur. Des séances de travail, des réunions avec les services techniques de l'administration de l'hydraulique et des visites de terrain ont été organisées dans le but de choisir les terrains pilotes du projet et de mieux définir les activités scientifiques de chacun.

Cette mission correspondait aux dates de la V<sup>ème</sup> Assemblée scientifique de l'AISH<sup>8</sup> à Rabat. Plusieurs chercheurs d'Hydromed participaient à cette conférence. L'équipe tunisienne a présenté une communication orale et un diaporama dans l'atelier 4 « Flow forecasting under conditions of limited data - Convenor Dr. J.C. Olivry ». Il avait pour titre : « Analyse des régimes hydrologiques des rivières et torrents non pérennes à partir d'observations sur les retenues artificielles. Exemple du semi-aride tunisien » et pour auteurs : J. Albergel, A. Smaoui, H. Habaieb, S. Nasri.

Jean Albergel a rédigé un rapport de cette mission qui a été diffusée. Eric Roose a envoyé un rapport de mission au coordinateur et à l'IAV.

Une mission du coordinateur auprès de l'ACSAD sera réalisée par le coordinateur dans la première semaine de juillet. Elle a pour objectif d'arrêter le choix des sites pilotes et de discuter de la prochaine réunion de coordination qui se tiendrait à Damas.

## Actions de coordination à venir

Dans le cadre de l'initiative Avicenne de l'Union Européenne, une conférence internationale sur l'Eau en Méditerranée aura lieu en Novembre 1997.

L'équipe de coordination y sera représentée par Jean Albergel et Jacques Claude. Elle favorisera la participation des partenaires d'Hydromed.

Une réunion de coordination, prévue par le contrat, aura lieu début 1998 pour faire le point sur une année de fonctionnement. Elle devrait se tenir à Damas.

Des fonds pour un atelier Hydromed qui se tiendrait à Lund en Mai 1998, ont été demandés à l'institut de coopération Suédois Sarec. Sarec décidera vers fin 1997 de l'attribution de ces fonds. Le programme de cet atelier serait le suivant :

- Collectes de données : instrumentations, données climatiques, hydrologiques, agronomiques et économiques.
- Techniques collectes des eaux de surface.
- Gestion des réservoirs et modélisation hydrologique.
- Qualité de l'eau et problèmes de pollution.

Cet atelier comprendrait 3 jours de séminaires et quatre jours de visite de laboratoires et de formation sur logiciels.

---

<sup>8</sup> AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques



## **ACTION 1 : SYNTHESE PRELIMINAIRE**

Les tâches inscrites pour la première année sont :

- Une revue bibliographique qui fait le point sur les réalisations et projets de chaque pays en matière de « lacs collinaires » et sur les méthodologies susceptibles d'être mises en œuvre pour leur étude. Elle doit évaluer la part des lacs collinaires dans la mobilisation des eaux des pays et identifier les contraintes au développement de la petite et moyenne hydraulique.
- Choix des sites pilotes et leur équipement. Ce choix est réalisé en concertation : coordination et partenaires, mais reste en dernier ressort du domaine du responsable local du programme.

### **Etude bibliographique**

La réunion de coordination avait fixé comme délais de présentation de l'étude bibliographique : Novembre 1997 pour pouvoir rédiger un « état de l'art ».

Les instituts des pays hôtes des sites pilotes se sont engagés à étudier la bibliographie relative à la construction et la gestion des ouvrages réalisés dans leur pays : programme de constructions de lacs collinaires, études de faisabilité et de réalisation, rapport des ministères, rapport d'universitaires ou d'étudiants. Ils doivent réaliser, sur tableur une liste des lacs collinaires avec un minimum d'informations sur la localisation (géographie, climat, géologie, sol), sur l'ouvrage (dimensions, objectifs, gestion), sur son bassin versant (dimension, relief, occupation du sol), sur l'utilisation de l'eau.

Les instituts européens doivent mener une recherche bibliographique plutôt d'ordre méthodologique dans leur domaine de compétence et relater de leurs expériences dans les zones semi-arides.

Ces travaux bibliographiques sont bien avancés.

La Tunisie a analysé 21 titres concernant les réalisations de lacs collinaires, des études socio-économiques et des travaux relatifs aux bilans hydrologiques et à la qualité des eaux. Cette liste de référence est donnée dans le rapport ORSTOM-INGREF. Une liste de 230 lacs collinaires avec leurs principales caractéristiques a été élaborée (sur environ 400 lacs existants).

Au Maroc, l'analyse bibliographique est également bien engagée. Toute la littérature technique sur les réalisations du pays a été réunie. Trois ouvrages publiés par l'administration de l'hydraulique font le point sur les réalisations de petites et moyennes hydrauliques en 1990. Le laboratoire des sols réalise une saisie informatique des caractéristiques des barrages et de leur bassin versant en vue d'une présentation statistique des réalisations. Il cherche à mettre à jour la liste des ouvrages existants avec les renseignements pris à l'Hydraulique.

Un ouvrage en trois tomes présentent les études et les techniques de réalisations. Il date de 1984 mais la démarche du choix du site à la réalisation en passant par les études a peu changé.

Le laboratoire des sols dispose également d'une importante bibliographie sur la recherche anti-érosive. Il a lui même produit de nombreux articles qui m'ont été remis. Une méthodologie intéressante a été mise au point pour étudier la production de sédiments d'un bassin versant en zone méditerranéenne et son accroissement en relation avec la régression du matorral. Un article publié au congrès de l'ISCO 1996 à Bonn montre l'adaptation de l'équation de pertes en sols révisés (RUSLE) aux conditions méditerranéennes.

L'IH a présenté dans son rapport d'avancement une revue bibliographique des modèles hydrologiques adaptés aux lacs collinaires et une revue des expériences dans les zones semi-arides du Commonwealth. 133 références scientifiques ont été réunies et une étude

d'applicabilité des modèles a été réalisée. Elle se présente comme un cours sur la modélisation hydrologique appliquée aux petits réservoirs des zones semi-arides. Elle décrit les modèles simples de bilans, les modèles conceptuels, les modèles distribués et les modèles déterministes décrivant chaque phase du cycle de l'eau. Elle termine avec une étude sur les modèles de prédétermination des volumes en eau disponibles dans les retenues collinaires.

L'université de Lund a envoyé plusieurs articles et travaux à la coordination.

L'équipe de l'ORSTOM Montpellier prépare une bibliographie sur la gestion des ressources en sols et la lutte contre l'érosion.

## Choix des sites pilotes

En Tunisie, la DCES<sup>9</sup> et l'ORSTOM ont mis en place depuis 1993-94 un réseau de 26 bassins versants représentatifs du milieu semi-aride, pour suivre les bilans hydrologiques, la qualité de l'eau de retenues collinaires et les différents impacts des petits barrages, sur la ressource en eau, sur l'environnement et sur le niveau de vie des agriculteurs riverains. Ce réseau a été financé par l'UE DG1. En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 26 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observations et de surveillance des lacs collinaires et de leurs bassins versants. Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant varie de quelques centaines d'hectares à quelques dizaines de km<sup>2</sup>. Elles sont aussi représentatives du gradient pluviométrique de la zone semi-aride entre 250 mm à 500 mm de précipitation inter-annuelle.

Chaque lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits.

Les données acquises sur ce réseau sont informatisées au fur et à mesure de leur élaboration et publiées sous forme d'annuaires à la fin de chaque année hydrologique.

Cinq de ces sites ont été choisis comme sites pilotes du programme Hydromed :

- Lac de KAMECH : Dépendant du CRDA de Nabeul, ce lac est situé au Nord du Cap-Bon.
- Lac de ES SENEGA : Dépendant du CRDA de Kasserine, ce lac est situé dans la partie aride de la dorsale, dans la vallée de Sbiba.
- Lac de EL GOUAZINE : Proche de la ville d'Ousseltia, ce lac a un grand bassin versant de 18 km<sup>2</sup> réparti en terres agricoles (55%), forêts (35%).
- Lac de MRICHET EL ANSE. Au pied du Jebel Bargou, ce petit lac d'une capacité de 40 000 m<sup>3</sup> est alimenté par un petit bassin versant de 158 ha composé essentiellement de terres agricoles céréalières.
- Lac de FIDH ALI dans le bassin versant du Merguélill. Ce lac a été choisi essentiellement pour les problèmes géochimiques qu'il pose.

La description de ces sites pilotes est donnée dans le rapport ORSTOM – INGREF.

---

<sup>9</sup> DCES : Direction de la Conservation des Eaux et des Sols (Ministère de l'Agriculture, Tunisie)

La première proposition de choix de sites avait été faite au cours de la première coordination. Une mission réunissant les professeurs Merzouk et Mejjati Alami de l'Université de Beyrouth, Jean Albergel de la coordination, Eric Roose de l'équipe ORSTOM de Montpellier et Moreno de l'IRNASE a visité différents terrains. En fonction des priorités scientifiques et des possibilités financières le choix s'est porté sur l'équipement lourd d'un seul site : un lac collinaire dans le Tangérois. Deux autres sites seront étudiés de manière plus légère.

Une convention d'études avec l'administration de l'hydraulique pour le suivi de ces travaux a été signée. Le rapport d'avancement de l'IAV décrit les sites retenus et donne les résultats des travaux de caractérisation.

En Syrie et au Liban, la notion de lac collinaire n'est pas aussi bien définie qu'au Maghreb. Les ouvrages d'ouvrages de rétention des eaux de surface les classent suivant leur dimension.

Le choix des sites ne pouvait se faire qu'après négociations avec les partenaires nationaux. L'ACSAD a identifié au Liban : l'Université Américaine de Beyrouth, l'Université de Beyrouth et le Ministère de l'Agriculture et de l'Irrigation et en Syrie : les Universités de Damas et d'Alep et le Ministère de l'Agriculture et de l'Irrigation avec qui un accord est en cours pour l'échange de données et la réalisation d'un SIG agro-climatique du pays.

En préparation à la réunion de coordination, l'ACSAD a réfléchi aux régions favorables au développement des lacs collinaires et où pourraient être choisis les sites pilotes.

Au Liban, la frange côtière est très karstique et pas favorable à l'installation de barrages. Un projet de construction de lacs collinaires dans la vallée du fleuve Litani et auquel participait l'ACSAD a été abandonné au début de la guerre du Liban et n'a pas été repris depuis. Le versant continental des montagnes du Liban est le plus propice au développement des lacs collinaires et Hydromed devrait trouver facilement un site pilote parmi les barrages déjà construits, la pluviométrie est d'environ 500 mm et la géologie favorable.

En Syrie, plusieurs barrages qui ressemblent aux lacs collinaires du Maghreb ont été construits dans les montagnes de Palmyre. Ces montagnes au milieu du désert ne reçoivent qu'une pluviométrie comprise entre 100 et 250 mm. Du point de vue des usages de l'eau et vu la difficulté d'observations hydrologiques en raison de l'aléa des événements pluvieux, cette région ne se prête pas à un site pilote. Il existe de nombreux barrages de petite dimension dans les montagnes de l'Anti-Liban. Plus proche de Damas et avec une pluviométrie de 200 à 500 mm, cette région est favorable à l'accueil d'un site Hydromed. Beaucoup de petits barrages ont été également édifiés sur le plateau basaltique Syrien, très peuplé et au climat semi-aride. La géologie ne permet pas une ressource en eau par forages et les petits barrages sont appelés à se développer en raison des besoins croissants de la population.

Un premier choix de sites a été réalisé, Jean Albergel les visitera au cours d'une mission fixée dans la première semaine de Juillet 1997.

## **ACTION 2 : EAU - SOL - ENVIRONNEMENT ET ACTION 3 : AGRO-ECONOMIE - GESTION SOCIALE DE L'EAU ET DE L'EROSION.**

Ces deux actions prévues surtout en année deux et trois sont déjà bien avancées en Tunisie et au Maroc.

### **Bilan hydrologique des lacs collinaires**

L'équipe de Tunisie a mis au point un modèle de bilan hydrologique basé sur l'équation de la conservation des volumes. Appliqué au pas de temps journalier, il permet de reconstituer les apports au lac collinaire, de comparer les apports annuels à la capacité du réservoir et d'estimer la part de l'infiltration et de la recharge des nappes. Appliqué au pas de temps de cinq minutes, il est utilisé à la reconstitution des crues entrant dans la retenue et à la simulation des hauteurs

d'eau en amont de la digue pour des crues types. Il sert au calcul de la probabilité de submersion de la digue en fonction de la cote du plan d'eau avant l'occurrence de la crue.

Cette modélisation a été appliquée à 26 lacs collinaires équipés de stations limnimétriques, pluviographiques et de mesure de l'évaporation.

Une note technique décrivant différentes installations expérimentales possibles et les paramètres auxquelles elles donnent accès a été rédigée par l'équipe tunisienne.

L'équipe de l'IH de Wallingford a calé et validé un modèle de calcul de probabilité d'assèchement d'un lac collinaire pendant un mois à partir des données d'un site pilote de Tunisie. Ce modèle a fait l'objet d'une communication orale au congrès de l'EGS (European Geophysical Society) à Vienne en Avril 1997.

### **Etude de l'érosion des bassins versants et sédimentation des lacs**

Une note technique sur la mesure de l'envasement d'un lac collinaire a été rédigée. Le suivi de la sédimentation des lacs collinaires existe en Tunisie.

L'équipe de l'IAV au Maroc a réalisée une étude multirate de l'érosion sur un bassin versant de 18000 ha dans le Tangérois dont l'exutoire est constitué par le barrage collinaire d'Ibn Batouta. Les rendements en sédiments calculés à partir d'un modèle distribué utilisant l'équation universelle des pertes en sols dans sa version révisée (RUSLE) sont validés par les mesures de sédiments accumulés dans le réservoir du barrage. Ce travail a été soumis à publication dans un ouvrage de l'ISCO par A. Merzouk et H. Dham.

En Tunisie, une autre forme de l'équation universelle des pertes en sols (MUSLE) a été testée et validée pour le calcul du transport solide. Une recherche sur l'estimation de ses paramètres à partir de la logique floue est en cours. Ce travail fait l'objet d'un mémoire de DEA.

La caractérisation des sols des bassins des sites pilotes de Tunisie a débuté en vue de modèles spatialisés du ruissellement et de l'érosion.

### **Qualité des eaux et transferts des polluants dans les sols**

Deux opérations sont en cours en Tunisie. La première consiste en le suivi des évolutions géochimiques de lacs collinaires avec une attention particulière aux échanges du phosphore entre les eaux et les sédiments. Elle fait l'objet d'une thèse d'Université.

La seconde opération cible les risques de pollution à partir du ruissellement et de l'infiltration sur les versants d'un lac collinaire. Elle a fait l'objet du mémoire de Master de deux étudiants de Lund et sera poursuivie dans le cadre d'une thèse (Cf. Rapport de Lund). Un travail méthodologique sur la mesure de flux et de soluté dans la zone non saturée des sols est également en cours à Lund.

### **Usage de l'eau**

En Tunisie, les enquêtes agronomiques, sociales et économiques ont débuté sur les cinq sites pilotes. La responsabilité de ce volet est confié à Salah Selmi embauché sur le contrat (post-doc) et à Amami Hassib de l'INGREF.

## **ACTION DE FORMATION**

Les plans de formation sont indiqués dans les rapports des instituts partenaires annexés. Hydromed a accueilli dans ces 6 premiers mois d'existence :

- Un post-doctorant en agro-économie
- Trois doctorants

- Un mémoire de DEA
- Deux mémoires de Master of Sciences
- Quatre mémoire de fin d'étude d'écoles d'ingénieurs

## PRODUCTION SCIENTIFIQUE

A ce jour la production scientifique d'Hydromed peut se résumer comme suit :

- Deux articles soumis pour publication dans des revues internationales de rang A (Equipe de Lund)
- Un compte rendu à l'Académie d'Agriculture (Equipe ORSTOM – INGRES).
- Deux publications dans des ouvrage collectifs sur l'érosion, la première dans un ouvrage de l'ISCO (Equipe de l'IAV), la seconde dans le bulletin de Réseau Erosion (Equipe ORSTOM – INGRES).
- Deux notes techniques d'intérêt général (Equipe ORSTOM).
- Dix communications dans des congrès, colloques et séminaires dont sept seront publiés dans des actes et trois n'ont fait l'objet que de communications orales.

ALBERGEL J. & REJEB N. (à paraître) Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. Compte Rendu A l'Académie d'Agriculture de France. Présentée sous forme de diaporama à l'Académie le 16 Mars 1997.

ALBERGEL J., GUIGUEN N., PEPIN Y. (1997). Comment faire le suivi hydrologique d'un petit barrage ? ORSTOM. Note technique.

ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAÏEB H., NASRI S. (1997) Analyse des régimes hydrologiques des rivières et torrents non pérennes à partir d'observations sur les retenues artificielles. Exemple du semi-aride tunisien. Vème assemblée scientifique de l'AISH de Rabat.

HABAÏEB H., LARBI A, ALBERGEL J. (1997). Reconstitution des crues. Application au Lac d'EL GOUAZINE. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

MERZOUK A. and DHMAN H. (1997) Shifting land use and its implication on sediment yield in the Rif mountains (Morocco). ISCO, Post Conference Book. 9<sup>th</sup> conference in Bonn Germany (in press)

NASRI S., ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAÏEB H. (1997) Hydrologie des lacs collinaires en Tunisie. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

ONIBON H., ALBERGEL J., BARGAOU, Y. PEPIN (1997) Modélisation des transports solides sur les bassins versants des lacs collinaires. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

PEPIN Y. (1996). Méthode utilisée pour les mesures de l'envasement d'un lac collinaire en Tunisie. CES / Ministère de l'Agriculture. ORSTOM. Note technique.

PERSSON, M. (1997). Soil solution electrical conductivity measurements under transient conditions using time domain reflectometry. Soil. Sci. Soc. Am. J. (in press).

PERSSON, M., & R. BERNDTSSON. (1997). Soil texture and electrical conductivity effects on temperature dependency of TDR measurements. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* (submitted).

RAGAB R., SENE K., AUSTIN B. (1997) A decision support system for hill reservoirs in the semi-arid zone of the Mediterranean periphery, EGS meeting in Vienna, Austria, April 21-25, 1997

RAHAINGOMANANA N. (1997). Qualité de l'eau des lacs collinaires de la Tunisie Centrale. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

SELMI S. (1997). Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien (Résumé de thèse en 10 pages). A paraître dans le Bulletin du Réseau Erosion n° 17, juillet 1997.

SELMI S. (1997). Une méthodologie d'évaluation des lacs collinaires. In. Les journées scientifiques de l'INGREF - Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. Monastir, 25-27 mars 1997.

SELMI S., ALBERGEL J., NASRI S. (1997). Quelques outils de gestion pour une allocation optimale d'une ressource aléatoire : l'eau des lacs collinaires en Tunisie. In. Séminaire International « Agriculture et Développement Durable en Méditerranée. Montpellier, 10 - 12 mars 1997. AGROPOLIS INTERNATIONAL.

SELMI S., AUCLAIR L., ZEKRI S. (1997). Evolution de la politique de conservation des ressources naturelles et de lutte anti-érosive en Tunisie. In Troisième Séminaire de Géographie. Université des Lettres (Tunis I). Faculté des Lettres de Manouba. Département de Géographie le 10-12 avril 1997.

SELMI S., BACHTA M. S. (1997). L'accumulation du capital humain : un déterminant essentiel des stratégies familiales d'exploitation des lacs collinaires en Tunisie semi-aride. Accepté pour présentation aux VI journées démographiques de l'ORSTOM : régulations démographiques et environnement. Paris, 22-24 septembre 1997.

## CONCLUSION

Les échéances du contrat sont respectés malgré le léger retard de parution de ce rapport qui s'explique par des délais importants de réception des rapports particuliers.

La notion de lac collinaire n'étant pas aussi précise au Machrek qu'au Maghreb, l'équipe de l'ACSAD a dû mener une réflexion complémentaire après la réunion de coordination et mieux cibler les acteurs syriens et libanais. Cette phase a permis également de choisir les sites pilotes. Le coordinateur se rendra sur le terrain début juillet et l'équipe de Wallingford en octobre prochain.

Suite à un effort important de présentation des premiers résultats dans des séminaires nationaux ou internationaux, Hydromed a tissé des liens avec de nombreuses équipes de recherche.

Hydromed apparaît comme un catalyseur pour l'obtention de crédits complémentaires. En soutien de ce programme, l'ORSTOM a financé un matériel de nivellement Laser et un matériel de mesure de l'humidité des sols. L'ORSTOM a également financé l'accueil de stagiaires. Une allocation est demandée pour un thésard et un contrat à durée déterminée pour faire suite au contrat post-doc de l'agro-économiste. Le premier travail de recherche sur les risques de pollutions par ruissellement et infiltration a été entièrement cofinancé par l'Université de Lund, l'INGREF et l'ORSTOM. L'Université de Lund a demandé le financement d'un atelier à la coopération suédoise (SAREC).

La formation à la recherche par la recherche apparaît équilibrée entre les instituts européens et ceux des pays tiers méditerranéens. Deux étudiants suédois ont trouvé le cadre de leur Master of Sciences dans Hydromed, l'un d'entre eux poursuivra en thèse. Parmi les travaux de thèse engagés on remarquera une étudiante française co-encadrée par l'ORSTOM et l'INGREF, un étudiant tunisien et un chercheur de l'INGREF. Un étudiant Béninois présentant un DEA à l'ENIT<sup>10</sup> a été accueilli par Hydromed en Tunisie.

La production scientifique est honorable. On remarquera, cependant, un effort plus important pour produire dans des colloques et séminaires que dans des revues scientifiques. La coordination devra encourager la publication dans les revues et demander encore plus fermement la co-publication entre chercheurs européens et chercheurs des pays tiers méditerranéens. Les notes techniques sont un produit tourné à la fois vers les chercheurs et à la fois vers les services techniques de l'administration ou vers d'autres acteurs du développement.

**ANNEXE 1 : RAPPORT D'ACTIVITE ORSTOM – INGREF**

**ANNEXE 2 : RAPPORT D'ACTIVITE IAV**

**ANNEXE 3 : RAPPORT D'ACTIVITE IH WALLINGFORD**

**ANNEXE 4 : RAPPORT D'ACTIVITE UNIVERSITE DE LUND**

**ANNEXE 5 : RAPPORT D'ACTIVITE UNIVERSITE DE IRNASE (SEVILLE)**

**Fait à Tunis le 15 Juin 1997**

**Le coordinateur d'Hydromed**

**Jean ALBERGEL**

---

<sup>10</sup> ENIT : Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis

# Hydromed Tunisie- ERBIC 18 CT 960091

## Rapport d'avancement Mai 1997

---

### Introduction

En Tunisie, les premières actions dans le cadre du contrat INCO DC : Hydromed ont pu débuter en septembre 1996. Trois équipes sont particulièrement impliquées : ORSTOM<sup>1</sup> Mission de Tunisie, INGRES<sup>2</sup>, Université de Lund. L'équipe de l'IH<sup>3</sup> Wallingford a également mené un travail de modélisation sur des données acquises sur l'un des sites pilotes tunisiens (El Gouazine).

La première réunion de coordination de l'ensemble du projet s'est tenue du 6 au 10 janvier 1997 à Tunis.

Conformément au plan d'action de première année, le projet a choisi ses sites pilotes, a établi une revue bibliographique et a entrepris les premières expérimentations dans les thèmes suivant :

- Bilan hydrologique des lacs collinaires,
- Etude de l'érosion des bassins versants et sédimentation des lacs,
- Qualité des eaux et transferts des polluants dans les sols,
- Usage de l'eau.

Les chercheurs travaillant sur ce projet ont présenté leurs premiers résultats à des séminaires nationaux (Journée Scientifique de l'INGREF, Monastir ; 3<sup>ème</sup> Séminaire de Géographie de la Faculté des lettres de la Manouba, Tunis) et internationaux (Séminaire Internationale Agriculture et Développement Durable en Méditerranée Agropolis & Ademe. Montpellier ; 5<sup>ème</sup> Assemblée scientifique de l'AISH<sup>4</sup> à Rabat). Jean Albergel (ORSTOM) et Najib Rejeb (INGREF) ont été invité à présenter le programme Hydromed à l'Académie Française d'Agriculture.

Deux notes techniques ont été rédigées sur la mise en œuvre et les protocoles de mesures pour le suivi hydrologique des lacs collinaires et pour le calcul de l'envasement. Elles ont été transmises à l'IAV<sup>5</sup> Maroc et le seront à l'ACSAD<sup>6</sup> lors de la visite du coordinateur en juillet prochain.

---

<sup>1</sup> ORSTOM : Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération

<sup>2</sup> INGRES : Institut National de recherche en Génie Rural et Eaux et Forêts (Tunisie)

<sup>3</sup> IH : Institut d'Hydrologie de Wallingford (G.B.)

<sup>4</sup> AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques

<sup>5</sup> IAV : Institut Agro-Vétérinaire Hassan II (Rabat)

<sup>6</sup> ACSAD : the Arab Center for the Studies of Arid zones and Dry lands



Sur le plan de la formation, Hydromed Tunisie a mis en route deux travaux de doctorat, a reçu en stage deux étudiants de l'Université de Lund et a donné le cadre aux mémoires de fin d'études à deux étudiants de l'ESIER<sup>7</sup>, deux étudiantes de l'INAT<sup>8</sup> et à un mémoire de DEA d'un étudiant de l'ENIT<sup>9</sup>. Hydromed Tunisie a participé au cours du CIHEAM<sup>10</sup> organisé à Tunis le 12 Mai 1997 : « Land management and optimization of water resources under Mediterranean conditions ». L'ORSTOM organise, en juin 97, une session de formation professionnelle sur la topographie automatique laser. L'ORSTOM a conforté, sur ses fonds propres, le programme par l'acquisition d'un tachéomètre laser et de logiciels de topographie.

## Choix des sites pilotes

En 1993-94, la DCES<sup>11</sup> et l'ORSTOM ont mis en place un réseau de 26 bassins versants représentatifs du milieu semi-aride, pour suivre les bilans hydrologiques, la qualité de l'eau de retenues collinaires et les différents impacts des petits barrages sur la ressource en eau, sur l'environnement et sur le niveau de vie des agriculteurs riverains. Ce réseau a été financé par l'UE DG1. En Tunisie centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 26 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observations et de surveillance des lacs collinaires et de leurs bassins versants. Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant varie de quelques centaines d'hectares à quelques dizaines de km<sup>2</sup>. Elles sont aussi représentatives du gradient pluviométrique de la zone semi-aride entre 250 mm à 500 mm de précipitation inter-annuelle.

Chaque lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits.

Les données acquises sur ce réseau sont informatisées au fur et à mesure de leur élaboration et publiées sous forme d'annuaires à la fin de chaque année hydrologique.

Cinq sites ont été choisis comme sites pilotes du programme Hydromed :

- Lac de KAMECH : Dépendant du CRDA<sup>12</sup> de Nabeul, ce lac est situé au Nord du Cap-Bon. Son bassin versant est de 245 ha dans des collines de marne et de calcaire ; 75% de sa surface est occupée par des terres agricoles et il n'y a pas d'aménagements CES. Le volume du lac est d'environ 140 000 m<sup>3</sup> pour une digue longue de 125 m. Ce bassin est situé dans la frange humide du semi-aride et sa position sur la presqu'île du Cap-Bon lui confère un climat tempéré par la mer. L'utilisation de l'eau est très forte et se partage en un usage pour des cultures industrielles avec une irrigation au goutte à goutte ( $\approx 12$  ha de tomates et piments) et un autre pour des cultures maraîchères traditionnelles irriguées à la raie. Ce barrage est également utilisé comme site pilote d'un programme de recherche en agro-climatologie menée par l'INAT sur l'irrigation avec une ressource incertaine (projet ICARDA). Hydromed et ce projet se sont mis d'accord pour une aide réciproque sur ce terrain et un échange des données.
- Lac de ES SENEGA : Dépendant du CRDA de Kasserine, ce lac est situé dans la partie aride de la dorsale, dans la vallée de Sbiba. Son bassin versant a une superficie de 363 ha dans des collines très dénudées dont 66% sont des parcours. Il est partiellement aménagé en travaux de CES. D'une capacité d'environ 80 000 m<sup>3</sup>, ce lac alimente en eau un grand périmètre d'arboriculture (pommiers) et plusieurs parcelles de maraîchages.

<sup>7</sup> ESIER : Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural

<sup>8</sup> INAT : Institut National d'Agronomie de Tunis

<sup>9</sup> ENIT : Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis

<sup>10</sup> CIHEAM : Centre International des Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes

<sup>11</sup> DCES : Direction de la Conservation des Eaux et des Sols (Ministère de l'Agriculture, Tunisie)

<sup>12</sup> CRDA : Commissariat Régional de Développement Agricole

- Lac de EL GOUAZINE : Proche de la ville d'Ousseltia, ce lac a un grand bassin versant de 18 km<sup>2</sup> réparti en terres agricoles (55%), forêts (35%). D'importants aménagements de CES ont été réalisés. La pluviométrie inter-annuelle est de l'ordre de 400 mm. La capacité du réservoir est de 230 000 m<sup>3</sup>. A la mise en service de ce barrage, on a assisté à une très importante remontée de l'eau dans les puits en aval (environ 30 m). Les terres agricoles dans la vallée, en aval du barrage ont vu leur prix être multiplié par dix. Un réseau piézométrique a été installé pour suivre les relations nappe phréatique / lac.
- Lac de MRICHE EL ANSE : Au pied du Jebel Bargou, ce petit lac d'une capacité de 40 000 m<sup>3</sup> est alimenté par un petit bassin versant de 158 ha composé essentiellement de terres agricoles céréalières. Le lac, dont le bassin hydrogéologique est plus étendu que celui du réseau hydrographique profite d'une alimentation souterraine importante. Malgré sa petite taille, il conserve un bon remplissage toute l'année. Un reboisement en acacia a pu être mis en place, grâce à cette ressource en eau. Le lac est peu utilisé et l'on observe qu'un petit verger récemment installé sur sa rive droite. Ce site fait partie d'un observatoire sur la dynamique de la population et son action sur l'environnement, où de nombreuses données démographiques, économiques, états de dégradation des sols sont disponibles. Il est aussi le terrain de thèse de Me Lamia Laajili Ghezal, enseignant chercheur à l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne (ESAM).
- Lac de FIDH ALI : Il appartient au bassin versant du Merguélill. Ce lac est choisi essentiellement pour les problèmes géochimiques qu'il pose. Il est situé entre Ousseltia et Haffouz, il a une capacité initiale de 135 000 m<sup>3</sup> pour un bassin versant de 413 ha. Malgré une eau très chargée et un faible remplissage de la retenue, la mise en valeur agricole est importante.

Chacun de ces lacs est équipé d'appareils d'acquisition de données : pluviométrie, limnimétrie, évaporation depuis 1993. Différents travaux de cartographie des bassins versants sont en cours. La qualité des eaux est suivie. Des piézomètres ont été installés en aval sur les rives de l'un d'entre eux pour le suivi de la nappe. Les enquêtes sur l'utilisation de l'eau, sur l'organisation des usagers et sur les impacts socio-économiques sont également en cours depuis 1993. Des installations expérimentales pour le suivi des aménagements de CES sont en cours. L'annexe 1 donne les fiches signalétiques de ces cinq sites.

## Etude bibliographique

Une étude bibliographique générale a été réalisée. Vingt-quatre ouvrages ont été analysés. Ils sont présentés en annexe 2. Chaque référence est répertoriée de la façon suivante :

- Auteur, date, titre de l'ouvrage, description.
- Mots clés : les mots clés ont été choisis parmi les plus couramment utilisés dans les bases de données de bibliographie francophone.
- Type du document : cette rubrique distingue les articles scientifiques, les travaux universitaires, les rapports administratifs, les rapports de bureau d'études, les guides et les annuaires ou recueils de données.
- Thème : il s'agit de donner en quelques mots le thème du document.
- Intérêt pour Hydromed : classé en trois classes, fort, moyen ou faible.
- Doc : Il s'agit de l'endroit où peut être consulté le document.
- Résumé : un résumé en quelques lignes présente le document.

Une autre recherche bibliographique a été confiée à un étudiant de quatrième année de l'ESIER, elle concerne toutes les formules empiriques utilisées en région méditerranéenne pour :

- Prédéterminer l'écoulement annuel sur petits bassins versants (en vue de dimensionner la capacité de l'ouvrage).
- Prédéterminer les paramètres des crues exceptionnelles (en vue de dimensionner les déversoirs).
- Prédéterminer les transports solides (en vue de connaître une durée de vie probable des ouvrages).

Cet étudiant cherchera également à valider ces formules sur les observations réalisées sur le réseau de la DCES. Cette étude sera disponible après sa soutenance prévue pour le 15 juin 1997.

## Avancement dans les différentes thématiques

### *Bilan hydrologique des lacs collinaires*

Sur un intervalle de temps  $t$ , l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle de l'application du principe de la conservation des volumes d'eau. Elle peut s'écrire :

$$\Delta V = (V_r + Vecs + V_p + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u) \quad (1)$$

- $\Delta V$  : étant la variation de stock dans la retenue. Elle est connue très précisément à partir de l'enregistrement limnigraphique et la courbe de cubature de la retenue (1 donnée toutes les 5 minutes pour une variation de hauteur de 1 cm du plan d'eau).
- $V_r$  : les apports en provenance du ruissellement des versants.
- $Vecs$  : les apports souterrains.
- $V_p$  : les apports des précipitations tombant directement sur la retenue. Ils sont connus précisément à partir des enregistrements pluviographiques et de la courbe hauteur/surface de la retenue.
- $V_f$  : les apports dus à la fonte des neiges. Ils sont nuls pour la plupart des retenues étudiées. Ils existent en hiver pour les lacs d'altitude mais représentent à l'échelle annuelle une quantité souvent négligeable.
- $V_{ev}$  : le volume d'eau évaporé. Il est connu en multipliant l'évaporation journalière par la surface moyenne de la retenue le même jour.
- $V_d$  : le volume d'eau sortant de la retenue par déversement. Il est connu avec une bonne précision lorsque le déversoir est étalonné. Pour la plupart des lacs, on se contente d'appliquer une formule de déversoir adaptée à sa géométrie.
- $V_{vi}$  : le volume sortant par la vanne de vidange. Il est connu par l'intermédiaire des observateurs qui notent les cotes de début et de fin de vidange ainsi que la durée de la vidange.
- $V_i$  : les pertes par infiltration, les infiltrations à travers la digue sont estimées à partir de mesures ponctuelles des débits, les infiltrations vers les nappes sont connues par bouclage du bilan.
- $V_u$  : le volume d'eau prélevé pour divers usages. Il est estimé à partir d'observations simples : observation des temps de pompage ou estimation à partir des surfaces cultivées.

L'application de ce bilan hydrologique à l'échelle mensuelle permet de comparer l'écoulement annuel au volume de la retenue, le rapport entre ces deux grandeurs donne une idée sur le remplissage au cours de l'année. Elle permet également d'apprécier les volumes d'eau s'infiltrant vers la nappe. Ces derniers sont confrontés au rehaussement du niveau piézométrique observé dans quelques puits villageois.

### Reconstitution des apports immédiats au cours d'un événement pluvieux

De l'équation 1, on tire la quantité  $V_r + Vecs$  qui représente l'écoulement naturel de l'oued à l'entrée de la retenue :

$$V_r + Vecs = \Delta V - V_p - V_f + V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_u \quad (2)$$

Les apports les plus importants aux retenues se font par le ruissellement direct des eaux de pluies sur les versants. Ils constituent des crues concomitantes aux averses. Ces crues sont bien définies sur l'hydrogramme de la retenue. Elles durent quelques heures. Pendant la durée de la crue, l'équation de bilan peut se simplifier de la façon suivante :

$$V_r = \Delta V - V_p + V_d + V_{vi} \quad (3)$$

En dérivant l'équation 3 par rapport au temps on obtient :

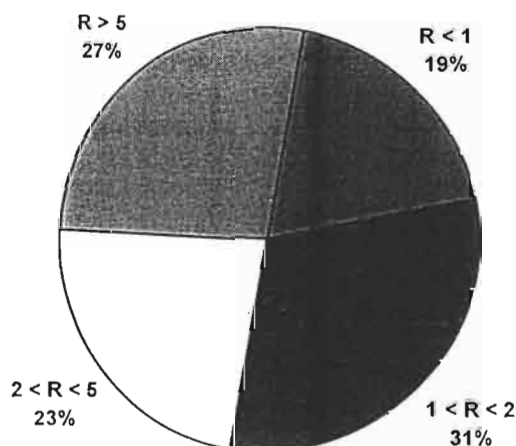
$$Q_e = d\Delta V/dt - dV_p/dt + Q_s + dV_{vi}/dt \quad (4)$$

Avec :  $Q_e$  = débit entrant dans la retenue en  $l.s^{-1}$  ;  $d\Delta V/dt$  = la différence de volume stockée pendant le temps  $t$  (ici 5 min) et rapporté au milieu de l'intervalle de temps ;  $dV_p/dt$  = la différence de volume précipitée pendant le temps  $t$  et rapporté au milieu de l'intervalle de temps ;  $Q_s$  = débit sortant par le déversoir et calculé à partir de la formule hydraulique du seuil ;  $dV_{vi}/dt$  = la différence de volume évacué par la vanne de vidange pendant le temps  $t$  et rapporté au milieu de l'intervalle de temps.

Cette méthode permet de reconstituer les crues naturelles entrant dans le réservoir. Elle permet également la simulation des crues exceptionnelles sur un réservoir pour différentes cotes du plan d'eau et estimer le risque de débordement sur la digue.

Ces bilans ont été réalisés sur les 26 lacs collinaires suivis dans le cadre du réseau pilote de la DCES. La figure 1 compare l'écoulement sur l'année hydrologique 1995-1996 à la capacité des retenues.

Figure 1 : Rapport volume écoulé / volume de la retenue :



La figure 2 montre l'application du bilan hydrologique au petit pas de temps 5 minutes pour reconstituer les crues entrant dans la retenue et les débits transitant au-dessus du déversoir sur le site de El Gouazine pendant la période orageuse du 20 au 26 septembre 1995. Toutes les crues ont pu ainsi être reconstituées sur la période 1993 à 1996 pour les 26 barrages. Ces chroniques de crues devront servir à la constitution de crues types par zone géographique et par nature du bassin versant.

Un modèle de simulation des variations du plan d'eau à l'arrivée d'une crue a été bâti. Une cote origine du lac est prise avant l'arrivée de la crue. La crue est découpée en pas de temps de 5 minutes. Tant que la retenue ne déverse pas chaque volume de crue fait augmenter la cote du lac suivant sa courbe hauteur - volume. Dès que la cote du déversoir est atteinte, un volume d'eau évacué par le déversoir est calculé pendant le pas de temps de 5 minutes à partir de la courbe hauteur - débit du déversoir et retranché au volume de la retenue. La cote du déversoir est alors recalculée à partir du volume restant. On réitère cette série d'opérations pour tous les pas de temps de 5 minutes jusqu'à la fin de la crue.

Ce modèle est basé sur deux hypothèses, le pas de temps choisi, 5 minutes, est assez court devant la durée totale de la crue pour être considéré comme une valeur instantanée. L'onde de crue n'est pas (ou faiblement) amortie dans le réservoir lorsque le déversement commence. Vu la petite dimension des retenues, cette seconde hypothèse est justifiée.

Il a été possible de simuler les hauteurs du plan d'eau sur chacune des 26 retenues en faisant l'hypothèse que la crue la plus forte arrivait sur un lac plein : cote du plan d'eau égale à celle du point le plus bas du déversoir. La figure 3 montre le résultat de cette simulation pour le lac de Mrira. On remarquera que sans la

rectification de hauteur de digue, cette crue survenant dans le barrage plein aurait débordé au-dessus de la digue.

Figure 2 : Reconstitution des crues entrant dans le réservoir

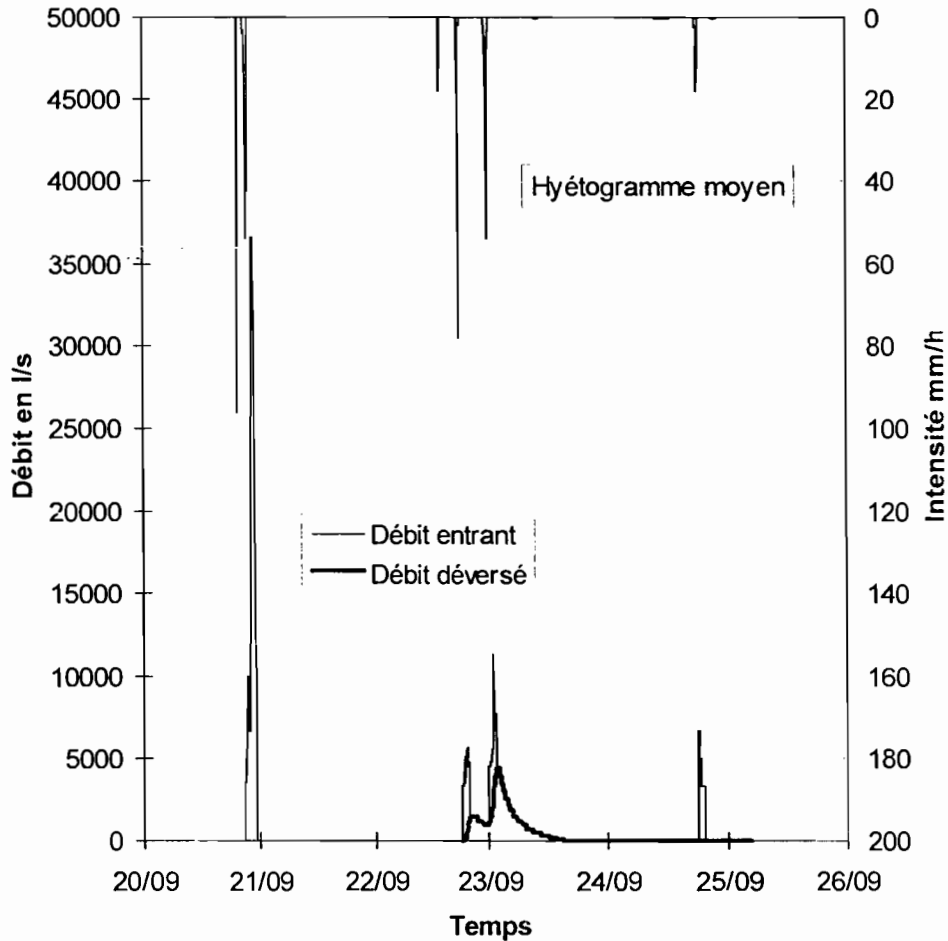
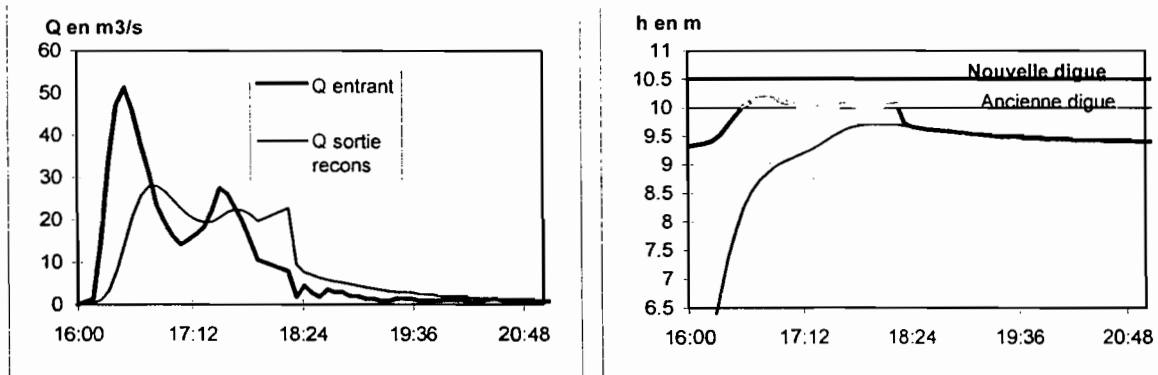


Figure 3 : Simulation des cotes dans le barrage de Mira

Mira crue maximale reconstituée

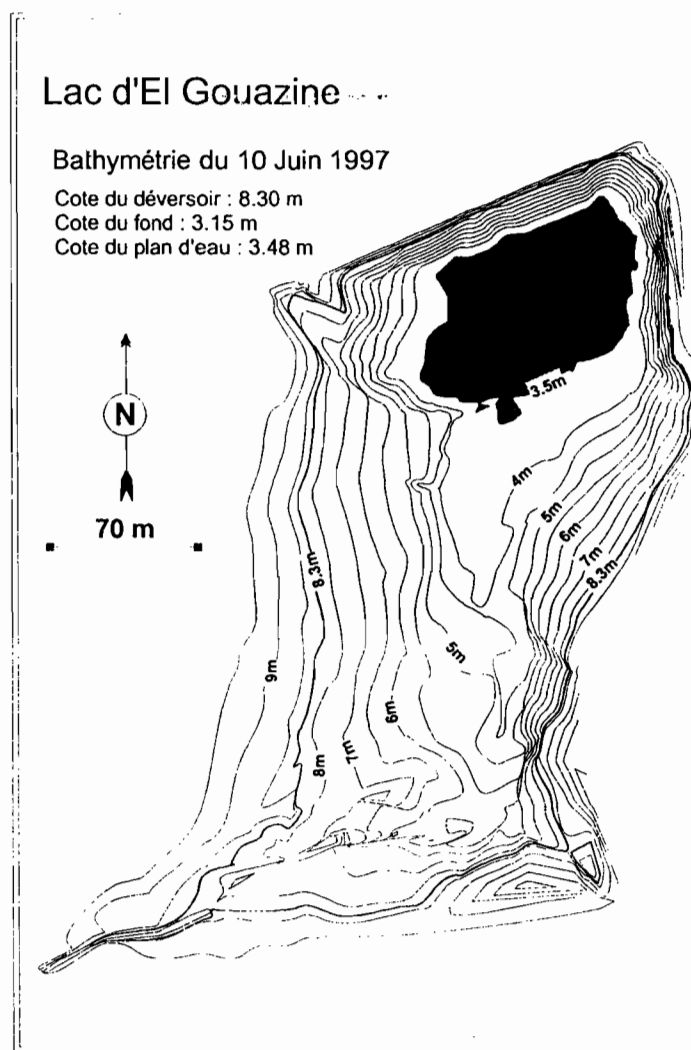


Etude de l'érosion des bassins versants et sédimentation des lacs

Des mesures systématiques de bathymétrie ont été réalisées. La bathymétrie de la retenue se fait par sondages ponctuels du fond de la retenue suivant des transversales matérialisées par un câble tendu entre

les deux rives. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de recollement de la retenue. Chaque point sondé (environ 500 par lacs) est défini par trois coordonnées cartésiennes (situation et profondeur). Le volume de vase est établi par différence des volumes utiles d'une année à l'autre. La retenue se comporte comme un piège à sédiments et lorsqu'elle n'a pas déversé, le volume de vase correspond au transport solide total produit par le bassin. En cas de déversement, on attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage. La figure 4 montre un exemple de bathymétrie effectuée sur le lac d'El Gouazine.

Figure 4 : Bathymétrie du lac d'El Gouazine au 10 Juin 1997



Un travail de modélisation du transport solide crue par crue a été entrepris dans le cadre d'un DEA avec l'ENIT. La reconstitution des transports solides, crue par crue, assimilés à l'érosion globale du bassin, utilise une forme de l'équation universelle des pertes en terres développée en 1975 par Williams et présentée par Hadley & al en 1985. Cette équation s'écrit :

$$A = \alpha(Vq_p)^P K(LS)C$$

Où A représente l'apport en tonnes de sédiments ; V, le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir en  $m^3$  ;  $q_p$ , le débit de la pointe de crue en  $m^3s^{-1}$  ; K le facteur d'érodibilité du sol (il se mesure sur parcelle de référence et n'a pas d'unité) ; (LS), le facteur exprimant la longueur et le degré d'inclinaison de la pente ; C, le facteur de couverture végétale ; P, le facteur des pratiques conservatrices effectuées sur les versants ;

$\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui, dans le système international d'unité, prennent respectivement les valeurs  $\alpha = 11.8$  et  $\beta = 0.56$ .

Une méthode expert d'évaluation des paramètres K, LS, C, P utilisant les propriétés de la logique floue a été testée dans le cadre d'un travail de DEA. Ce travail bien avancé doit faire l'objet d'une soutenance le premier juillet 1997.

### ***Qualité des eaux et transferts des polluants dans les sols***

Cette thématique scientifique se subdivise en deux opérations.

La première menée par l'INGREF et l'ORSTOM est constituée par un suivi régulier de la qualité des eaux des 26 lacs observés. Elle est le cadre d'une thèse d'Université en cours. Les premiers résultats d'analyse des eaux montrent que la salinité de 80% des échantillons prélevés est inférieure à 1.5 g/l mais avec une concentration maximale observée de 5.9 g/l. La dominance des lacs collinaires à faciès sulfaté - calcique ou mixte apparaît en raison de la prévalence des sulfates dans les terrains rencontrés. Les lacs les moins contaminés par le sel présentent un faciès plutôt bicarbonaté - calcique. L'évolution de la qualité des eaux suit la dynamique hydrologique des retenues : des facteurs d'augmentation de la salinité de 1.2 à 9.6 ont été observés, les amplitudes de variation des concentrations étant plus importantes pour les eaux bicarbonatées qui voient leur faciès évoluer vers le chloruré - sodique.

La seconde opération menée par L'université de Lund, l'INGREF et l'ORSTOM s'intéresse au risque de pollutions des eaux des lacs par ruissellement ou infiltration. Dans le cadre du mémoire de Master of sciences de 2 étudiants de Lund, une expérimentation a été conduite sur le bassin versant de M'Richet El Anze. Les protocoles de mesures sont décrits dans le rapport de Lund. Il donne aussi les premiers résultats. Ce travail devra être soutenu courant juin 1997 à Lund. L'expérimentation ayant été programmé au mois d'octobre, elle a été financée hors contrat, par les trois instituts participants.

### ***Usage de l'eau***

Deux opérations ont été mises en route. La première, confiée au post-doctorant embauché dans le cadre du contrat consiste en une évaluation des retombées économiques et sociales des lacs collinaires. La seconde est une étude fine du terroir du bassin versant de Kamech et de l'intégration de l'irrigation dans le système de production. Elle fait le cadre du mémoire d'une étudiante de 6<sup>ème</sup> année de l'INAT qui devrait soutenir en septembre 1997.

Nous donnerons ici quelques résultats et perspectives de la première opération.

L'objectif de la recherche en agro-socio-économie est de contribuer à l'évaluation et au suivi d'une opération d'aménagement de moyenne hydraulique : les lacs collinaires dans le milieu montagneux et semi-aride. Ces zones géographiques sont caractérisées par la pauvreté des populations locales et l'éloignement des marchés et des centres d'approvisionnement et de communication. Elles souffrent d'un déficit hydrique saisonnier et annuel et ont des difficultés à assurer les besoins en eau domestique et pour l'abreuvement du cheptel. Les activités économiques et sociales ne peuvent être maintenues que par une amélioration des conditions de vie de ces populations. L'exploitation rationnelle des réserves d'eau créées par les lacs collinaires constituent pour cela souvent la seule alternative.

### **Résultats acquis**

Les thèmes déjà étudiés et développés ont statué sur :

- l'évaluation économique et financière des aménagements collinaires,
- la pertinence du choix des sites aménagés,
- l'analyse de la diversité des situations des lacs déjà aménagés qui a abouti à une typologie des lacs collinaires,
- l'analyse du fonctionnement agro-économique des unités de production directement concernées par l'aménagement et l'accès à la nouvelle ressource,

- l'étude des incidences et impacts de la création des ressources sur les systèmes de production agricole et auprès des populations locales.

Une thèse de doctorat et deux mémoires d'ingénieur ont été soutenus depuis 1994.

### **Perspectives**

L'étude des aspects agro-socio-économiques des lacs collinaires se poursuit en mettant l'accent sur l'utilisation de l'eau et l'intégration du lac collinaire dans l'économie locale et régionale.

A partir des résultats de typologies des lacs et des exploitations agricoles potentiellement bénéficiaires de l'eau, les recherches futures concerneront quelques sites pilotes (du réseau de l'équipe hydrologie) représentatifs du semi-aride.

L'objet central est l'analyse des changements du comportement des exploitants agricoles et des transformations et évolution des systèmes de production des zones locales du semi-aride où sont aménagées les retenues collinaires. Il s'agit d'analyser :

- les stratégies des producteurs face à l'évolution des contextes institutionnels (AIC, groupements d'agriculteurs, etc.) et macro-économiques (désengagement de l'état, amélioration générale des conditions de vie, etc.),
- les atouts et les difficultés environnementales, d'ordre technique et socio-économique, qui peuvent directement ou indirectement influencer les possibilités d'usages des ressources en eau créées en milieu rural et ainsi contribuer au développement des zones pauvres,
- les décisions prises par les populations et les familles rurales concernant la gestion des ressources et les pratiques de production.

La transformation des systèmes de production qui s'opère dans les petites et moyennes exploitations autour et dans le bassin versant des lacs collinaires ne peut trouver son explication exclusivement dans l'intervention de l'Etat. Autrement dit, elle est fonction à la fois des conditions objectives d'accès à la ressource et des modèles de comportements et de stratégies qui déterminent les objectifs des exploitants.

L'identification au sein de chaque système de production, des gammes de stratégies et d'adaptations auxquelles recourent les différents groupes de producteurs agricoles, est d'une grande utilité pour l'explication des voies d'évolution et de transformation des unités de production.

### **Travaux techniques**

L'équipe d'hydrologues de Tunisie a cherché à communiquer son expérience sur les installations expérimentales des lacs collinaires et sur les protocoles de mesures en rédigeant deux notes techniques.

La première note technique décrit les procédures de mesures de l'envasement des lacs collinaires, la gestion informatique des données recueillies et un modèle de calcul de l'envasement à partir des mesures de bathymétrie du lac et de topographie des berges.

La seconde note technique montre différentes installations possibles pour suivre les bilans hydrologiques des lacs collinaires et les variables auxquelles elles donnent accès. L'installation et la gestion des différents enregistreurs limnigraphiques et pluviographiques sont décrits.

### **Formation**

#### ***Formation post-doctorale***

Conformément au contrat, la formation à la recherche par la recherche est un volet important du programme. En Tunisie, la participation d'étudiants est essentielle au déroulement des actions scientifiques.



Sur le contrat ORSTOM, Dr Selmi Salah a été embauché pour 12 mois. Il est titulaire d'une thèse d'agro - économie, soutenue en juillet 1996 à l'ENSA de Montpellier :

Selmi S., 1996 - Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Thèse de doctorat d'université (ENSA - Montpellier), 417 p + annexe photographique.

Ce travail de thèse se proposait de procéder à une évaluation globale des impacts de l'intervention de l'Etat tunisien dans sa conception et mise en œuvre de lacs collinaires en Tunisie, une des composantes les plus importantes de la stratégie nationale et décennale (1990-2000) en matière de conservation des eaux et des sols. L'analyse a été faite sur trois gouvernorats de la zone semi-aride : Siliana, Kasserine et Kairouan et a porté sur une cinquantaine de retenues, construites au début de la stratégie et d'une capacité théorique dépassant 50 000 mètres cubes, et sur 203 exploitations agricoles potentiellement bénéficiaires des ressources ainsi créées. Il s'agissait le plus souvent de petites unités familiales œuvrant dans des circonstances désavantageuses et dans un contexte général de pauvreté.

Deux hypothèses principales étaient avancées :

- il y a divergence entre les objectifs de l'Etat investisseur et les stratégies paysannes,
- la création d'une ressource rare n'est pas une condition suffisante pour son allocation optimale.

Pour argumenter et tester le bien-fondé de ces deux postulats, une analyse de la diversité des aménagements et des exploitations agricoles a été réalisée sur la base d'enquêtes.

La grille d'analyse a été construite sur une articulation de raisonnements issus de concepts empruntés à l'Economie Publique, l'Economie des Ressources Naturelles, la théorie de la Croissance Endogène et à la théorie micro-économique liée à l'analyse des comportements sociaux et économiques des exploitants agricoles.

La première partie de la thèse permet de comprendre les enjeux agricoles, politiques et financiers de l'intervention de l'Etat dans la gestion des ressources naturelles. La seconde partie est consacrée à l'évaluation des lacs collinaires au niveau national et régional. Dans la troisième partie, les incidences de la création des ressources sur les systèmes de production agricoles et auprès des populations locales sont analysées.

L'opportunité de ce post-doc permettra à Dr Selmi de procéder à des analyses plus fines sur les sites pilotes d'Hydromed. Il comparera également ses résultats à ceux des autres pays.

### ***Formation doctorale***

Trois travaux de thèse se rattachent à Hydromed Tunisie.

Le premier est bien avancé et devrait être soutenue courant 1998. Il est réalisé par Mlle Nathalie Rahaingomanana. Il concerne la géochimie des lacs collinaires. Mlle Rahaingomanana est encadrée par Jacques Lemoalle, Directeur de recherche à l'ORSTOM et Me Akissa Bah'i, chercheur à l'INGREF. Après deux années passées en Tunisie pour effectuer la partie terrain, Mlle Rahaingomanana est accueillie au laboratoire GAMET de Montpellier pour la rédaction.

La première phase réalisée, correspond à l'étude de l'ensemble des retenues du réseau hydrologique. Des échantillons de sols des bassins versants et de sédiments exondés des retenues ont initialement été prélevés, puis analysés. On a réalisé des mesures physico-chimiques (O<sub>2</sub> dissous, température, pH, conductivité électrique) et des prélèvements d'eau pour l'analyse des ions majeurs et du phosphore par campagne trimestrielle couplée à celle du réseau hydrologique. Les équilibres thermodynamiques ont été déterminés à l'aide du modèle d'équilibre « Espresso ». Ponctuellement pour quelques lacs, la structure verticale de la colonne d'eau (transparence, conductivité, température, O<sub>2</sub> dissous) a été déterminée et des sédiments ont été prélevés au milieu du lac pour l'analyse des formes du phosphore. Ceci a permis d'obtenir un aperçu global de la qualité de l'eau des retenues, de sa variabilité selon les sites et de son évolution au

cours d'une année. Les cinq retenues, sites pilotes d'Hydromed, représentant la diversité des situations rencontrées, ont ainsi été choisies afin poursuivre l'étude un peu plus fine du fonctionnement des retenues.

Mansouri Taoufik, université de Tunis prépare une thèse sur la modélisation spatialisée des fonctionnements hydrologique et sédimentaire des bassins versants des lacs collinaires. Ce travail a débuté en février 1997 avec la demande d'une allocation de recherche adressée à l'ORSTOM.

Slah Nasri, chercheur à l'INGREF prépare une thèse sur l'impact des aménagements CES sur les différents bilans des lacs collinaires (co-encadrement ORSTOM – Université de Lund).

### **Formation Master of sciences, DEA et écoles d'ingénieurs**

Au cours de cette première année du programme Hydromed, sept étudiants réalisent leur mémoire de fin d'années sur des sujets entrant dans la problématique « lacs collinaires » :

Nom	Formation	Encadrement	Soutenance	Thème
O. Tullberg	Master Lund	Lund - ORSTOM - INGREF	Juin 97	Infiltration et transport de soluté sur une toposéquence de versant de lac collinaire.
O. Palmquist	Master Lund	Lund - ORSTOM - INGREF	Juin 97	Infiltration et transport de soluté sur une toposéquence de versant de lac collinaire.
H. Onibon	DEA ENIT	ENIT- ORSTOM - CES	Juillet 97	Modélisation de l'érosion et de l'envasement.
A. Larbi	6 <sup>ème</sup> année INAT	INAT- ORSTOM - CES	Juillet 97	Pluviométrie dans la zone semi-aride et remplissage mensuel des retenues.
M. Insaf	6 <sup>ème</sup> année INAT	INAT- ORSTOM - CES	Septembre 97	Agriculture irriguée et système de production sur le BV de Kamech.
I. Mouelhi	5 <sup>ème</sup> année ESIER	ESIER- ORSTOM - CES	Juin 97	Revue des formules empiriques de prédétermination de l'écoulement, des crues et de l'érosion.
M.N. Chtara	5 <sup>ème</sup> année ESIER	ESIER- ORSTOM - CES	Juin 97	Etude de l'impact d'un aménagement en cordons pierreux sur le ruissellement et l'érosion

### **Production scientifique**

ALBERGEL J. & REJEB N. (à paraître) Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. Compte Rendu A l'Académie d'Agriculture de France. Présentée sous forme de diaporama à l'Académie le 16 Mars 1997.

ALBERGEL J., GUIGUEN N., PEPIN Y. (1997). Comment faire le suivi hydrologique d'un petit barrage ? ORSTOM. Note technique.

ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAÏEB H., NASRI S. (1997) Analyse des régimes hydrologiques des rivières et torrents non pérennes à partir d'observations sur les retenues artificielles. Exemple du semi-aride tunisien. Vème assemblée scientifique de l'AISH de Rabat.

HABAIEB H., LARBI A., ALBERGEL J. (1997). Reconstitution des crues. Application au Lac d'EL GOUAZINE. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

NASRI S., ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAIEB H. (1997) Hydrologie des lacs collinaires en Tunisie. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

ONIBON H., ALBERGEL J., BARGAOUI, Y. PEPIN (1997) Modélisation des transports solides sur les bassins versants des lacs collinaires. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

PEPIN Y. (1996). Méthode utilisée pour les mesures de l'envasement d'un lac collinaire en Tunisie. CES / Ministère de l'Agriculture. ORSTOM. Note technique.

RAHAINGOMANANA N. (1997). Qualité de l'eau des lacs collinaires de la Tunisie Centrale. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997

SELMI S. (1997). Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien (Résumé de thèse en 10 pages). A paraître dans le Bulletin du Réseau Erosion n° 17, juillet 1997.

SELMI S. (1997). Une méthodologie d'évaluation des lacs collinaires. In. Les journées scientifiques de l'INGREF - Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. Monastir, 25-27 mars 1997.

SELMI S., ALBERGEL J., NASRI S. (1997). Quelques outils de gestion pour une allocation optimale d'une ressource aléatoire : l'eau des lacs collinaires en Tunisie. In. Séminaire International « Agriculture et Développement Durable en Méditerranée. Montpellier, 10 - 12 mars 1997. AGROPOLIS INTERNATIONAL.

SELMI S., AUCLAIR L., ZEKRI S. (1997). Evolution de la politique de conservation des ressources naturelles et de lutte anti-érosive en Tunisie. In Troisième Séminaire de Géographie. Université des Lettres (Tunis I). Faculté des Lettres de Manouba. Département de Géographie le 10-12 avril 1997.

SELMI S., BACHTA M. S. (1997). L'accumulation du capital humain : un déterminant essentiel des stratégies familiales d'exploitation des lacs collinaires en Tunisie semi-aride. Accepté pour présentation aux VI journées démographiques de l'ORSTOM : régulations démographiques et environnement. Paris, 22-24 septembre 1997.

## **ANNEXE 1 : fiches descriptives des sites pilotes**

## **ANNEXE 2 : étude bibliographique Hydromed**

## Sommaire

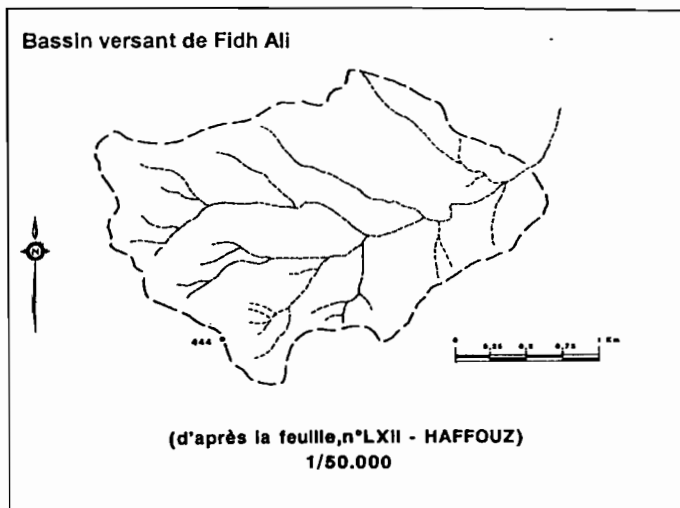
Introduction .....	1
Choix des sites pilotes.....	2
Etude bibliographique.....	3
Avancement dans les différentes thématiques .....	4
Bilan hydrologique des lacs collinaires .....	4
Etude de l'érosion des bassins versants et sédimentation des lacs.....	6
Qualité des eaux et transferts des polluants dans les sols.....	8
Usage de l'eau .....	8
Résultats acquis.....	8
Perspectives.....	9
Travaux techniques .....	9
Formation .....	9
Formation post-doctorale .....	9
Formation doctorale.....	10
Formation Master of sciences, DEA et écoles d'ingénieurs.....	11
Production scientifique .....	11
ANNEXE 1 : fiches descriptives des sites pilotes .....	14
ANNEXE 2 : étude bibliographique Hydromed .....	19

# Lac collinaire de Fidh Ali

Station : Fidh Ali Bassin : Oued Merguellil  
 Latitude Nord : 35°42'40" Longitude Est : 9°36'13"  
 CRDA : Kairouan Délégation : Haffouz

## Caractéristiques du bassin versant

Surface (A) en ha 412.5  
 Périmètre (P) en km 8.6  
 Indice de compacité C= 1.19  
 Longueur du rectangle (L) en km 2.86  
 Largeur du rectangle (l) en km 1.44  
 Altitude maximale en m 444  
 Altitude minimale en m 335  
 Indice de pente (I<sub>g</sub>) en m/km 38  
 Indice de Roche (I<sub>p</sub>)  
 Dénivelée (D) en m 109  
 Classe de relief (Rodier) 4  
 Occupation des sols parcours : 88%  
 Aménagements CES début



## Caractéristiques de la retenue

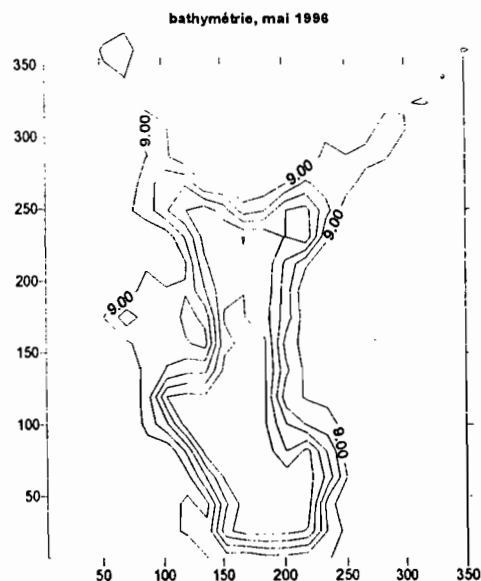
Année de construction 1991  
 Volume de la retenue au déversement (V<sub>i</sub>) en m<sup>3</sup> 134 710  
 Surface de la retenue au déversement (S<sub>i</sub>) en ha 4.499  
 Rapport V<sub>i</sub>/S<sub>i</sub> en m 2.99  
 Volume d'envasement (V<sub>e</sub>) en m<sup>3</sup> 23/05/96 29 640  
 Capacité Utile (V<sub>u</sub>) en m<sup>3</sup> 23/05/96 105 070  
 Rapport V<sub>u</sub>/S<sub>i</sub> en m 23/05/96 2.34  
 Hauteur de la digue en m 11  
 Longueur de la digue en m 98  
 Nature du déversoir béton  
 Hauteur du déversoir en m 9  
 Largeur du déversoir en m 20  
 Diamètre de la conduite en mm 400  
 Utilisation de l'eau sans

## Caractéristiques de la station

Début des observations 27/01/93  
 Hauteur repère/échelle en m 13.6  
 Code HYDROM échelle 27/01/93 1486188040  
 Code PLUVIOM OEDIPE 27/01/93 1486188120  
 Code PLUVIOM pluviomètre  
 Adresse ARGOS sans

## Barèmes hauteur / surface / volume

H m	S <sub>i</sub> m <sup>2</sup>	V <sub>i</sub> m <sup>3</sup>	23/05/96 V <sub>2</sub> m <sup>3</sup>
0.00	130	7	0
0.50	904	266	0
1.00	1 585	886	0
1.50	2 349	1 855	0
2.00	3 640	3 303	0
2.50	5 185	5 498	0
3.00	6 613	8 422	0
3.50	8 828	12 259	0
4.00	10 846	17 118	0
4.50	12 848	23 012	176
5.00	14 730	29 807	3 721
5.50	17 061	37 649	9 791
6.00	19 452	46 648	17 405
6.50	22 135	56 888	26 431
7.00	25 140	68 538	37 153
7.50	28 837	81 764	50 282
8.00	33 091	97 043	65 953
8.50	37 772	114 452	84 225
9.00	44 987	134 709	105 075
9.50	56 975	159 511	127 424



# Lac collinaire Es Senega

Station : Es Senega Bassin : Oued Zeroud  
 Latitude Nord : 35°29'21" Longitude Est : 9°06'18"  
 CRDA : Kasserine Délégation : Sbiba

## Caractéristiques du bassin versant

Surface (A) en ha 363  
 Périmètre (P) en km 8.475  
 Indice de compacité C= 1.25  
 Longueur du rectangle (L) en km 3.05  
 Largeur du rectangle (l) en km 1.19  
 Altitude maximale en m 883  
 Altitude minimale en m 618  
 Indice de pente (I<sub>g</sub>) en m/km 87  
 Indice de Roche (I<sub>p</sub>)  
 Dénivelée (D) en m 265  
 Classe de relief (Rodier) 5  
 Occupation des sols parcours : 66%  
 Aménagements CES oui

## Caractéristiques de la retenue

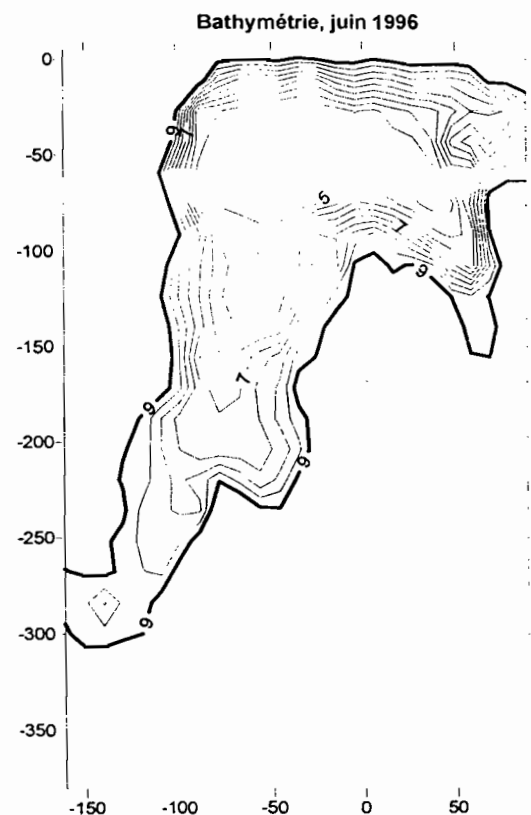
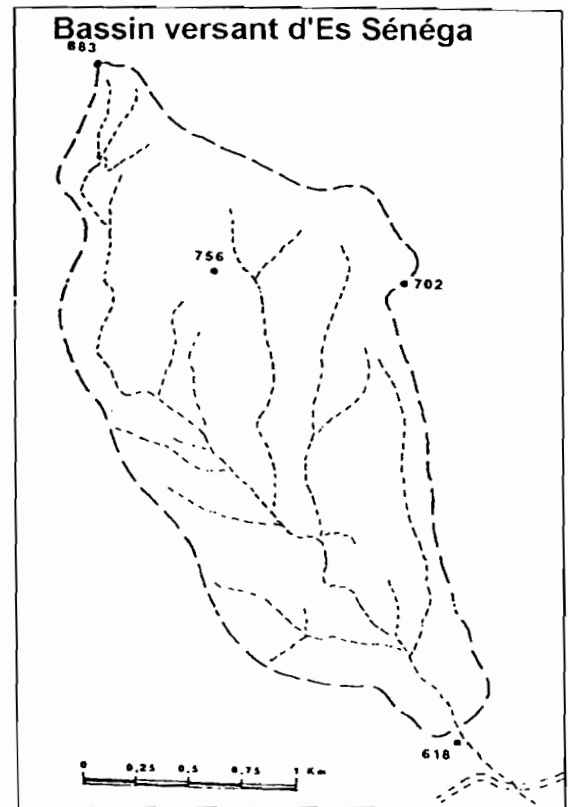
Année de construction 1991  
 Volume de la retenue au déversement (V<sub>i</sub>) en m<sup>3</sup> 86 420  
 Surface de la retenue au déversement (S<sub>i</sub>) en ha 3.451  
 Rapport V<sub>i</sub>/S<sub>i</sub> en m 2.51  
 Volume d'envasement (V<sub>e</sub>) en m<sup>3</sup> 06/06/96 11 850  
 Capacité Utile (V<sub>u</sub>) en m<sup>3</sup> 06/06/96 74 570  
 Rapport V<sub>u</sub>/S<sub>i</sub> en m 06/06/96 2.16  
 Hauteur de la digue en m 10  
 Nature du déversoir Béton rectangulaire  
 Longueur de la digue+devers en m 153  
 Hauteur du déversoir en m 9.13  
 Largeur du déversoir en m 18  
 Diamètre de la conduite en mm 300  
 Utilisation de l'eau maraichages+arboriculture

## Caractéristiques de la station

Début des observations 10/11/93  
 Hauteur repère/échelle en m 10/11/93 10  
 Code HYDROM échelle 10/11/93 1486388068  
 Code PLUVIOM OEDIPE 10/11/93 1486388200  
 Code PLUVIOM pluviomètre  
 Adresse ARGOS sans

## Barèmes hauteur / surface / volume

H m	S <sub>i</sub> m <sup>2</sup>	V <sub>i</sub> m <sup>3</sup>	06/06/96
			V <sub>2</sub> m <sup>3</sup>
0.00	0	0	0
1.50	0	0	0
2.00	8	0	0
2.50	260	62	0
3.00	1 031	339	0
3.50	2 599	1 270	0
4.00	4 378	2 975	0
4.50	6 213	5 653	0
5.00	7 700	9 106	1 498
5.50	9 954	13 534	4 896
6.00	11 739	18 917	9 523
6.50	13 875	25 238	15 478
7.00	17 422	32 960	22 627
7.50	20 589	42 378	31 432
8.00	24 475	53 517	42 059
8.50	28 598	66 677	54 711
8.95	32 822	80 400	68 327
9.00	33 274	82 038	70 005
9.50	38 020	99 702	87 889



# Lac collinaire d'El Gouazine

Station : El Gouazine Bassin : Oued Nebhana  
 Latitude Nord : 35°54'30" Longitude Est : 9°42'13"  
 CRDA : Kairouan Délégation : Ousselita

## Caractéristiques du bassin versant

Surface (A) en ha 1810  
 Périmètre (P) en km 25.85  
 Indice de compacité C= 1.70  
 Longueur du rectangle (L) en km 11.33  
 Largeur du rectangle (l) en km 1.60  
 Altitude maximale en m 575  
 Altitude minimale en m 376  
 Indice de pente (I<sub>g</sub>) en m/km 18  
 Indice de Roche (I<sub>p</sub>)  
 Dénivelée (D) en m 199  
 Classe de relief (Rodier) 4  
 Occupation des sols  
 Terres agricoles : 55%,  
 forêts : 35%  
 Aménagements CES banquettes 30%

## Caractéristiques de la retenue

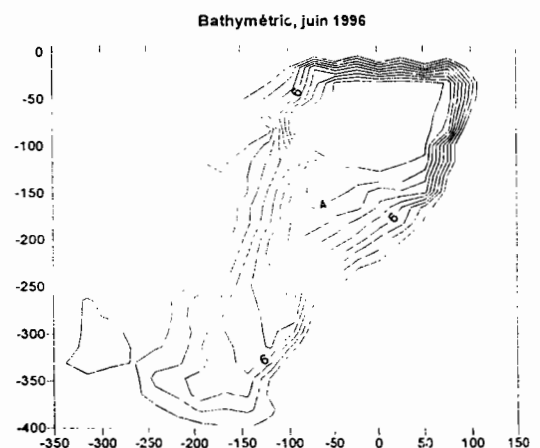
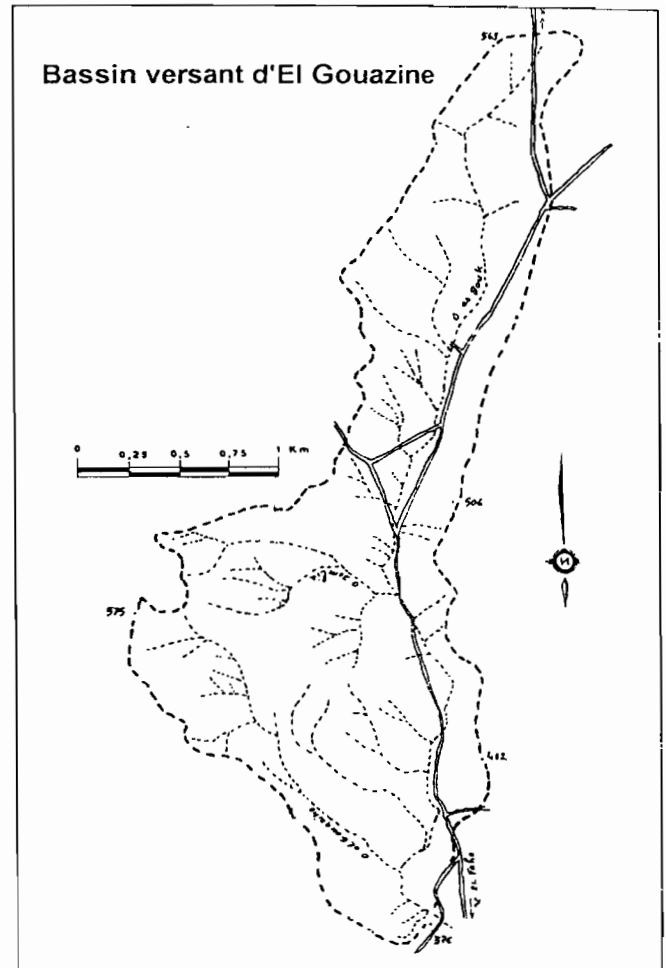
Année de construction 1990  
 Volume de la retenue au déversement (V<sub>i</sub>) en m<sup>3</sup> 233 370  
 Surface de la retenue au déversement (S<sub>i</sub>) en ha 9.597  
 Rapport V<sub>i</sub>/S<sub>i</sub> en m 2.43  
 Volume d'envasement (V<sub>e</sub>) en m<sup>3</sup> 13/06/96 16 810  
 Capacité Utile (V<sub>u</sub>) en m<sup>3</sup> 13/06/96 216 560  
 Rapport V<sub>u</sub>/S<sub>i</sub> en m 13/06/96 2.26  
 Hauteur de la digue en m 10.63  
 Longueur de la digue en m 232  
 Nature du déversoir Béton, trapézoïdal  
 Hauteur du déversoir en m 8.28  
 Largeur du déversoir en m 20.6  
 Diamètre de la conduite en mm 400  
 Utilisation de l'eau irrigation

## Caractéristiques de la station

Début des observations 12/10/93  
 Hauteur repère/échelle en m 10  
 Code HYDROM échelle 12/10/93 1486088056  
 Code PLUVIOM OEDIPE 12/10/93 1486088140  
 Code PLUVIOM pluviomètre 27/04/95 1486088145  
 Code PLUVIOM bac évaporation 27/04/95 1486088760  
 Adresse ARGOS 12978

## Barèmes hauteur / surface / volume

H m	S <sub>i</sub> m <sup>2</sup>	V <sub>i</sub> m <sup>3</sup>	13/06/96 V <sub>2</sub> m <sup>3</sup>
0.00	0	0	0
0.50	0	0	0
1.00	0	0	0
1.50	0	0	0
2.00	152	6	0
2.50	4 614	1 075	0
3.00	10 479	4 853	0
3.50	15 048	11 278	2 776
4.00	18 820	19 755	9 688
4.50	24 138	30 450	16 146
5.00	29 753	43 863	31 361
5.50	36 563	60 354	46 999
6.00	46 041	80 705	65 799
6.50	54 145	105 771	88 986
7.00	62 646	134 828	117 111
7.50	72 605	168 491	151 115
8.00	86 318	207 782	190 846
8.32	97 353	237 031	220 233
8.50	106 232	255 222	238 556



# Lac collinaire de M'Richet El Anse

Station : M'Richet El Anse Bassin : Oued Nebhana  
 Latitude Nord : 36°05'37" Longitude Est : 9°35'41"  
 CRDA : Siliana Délégation : Bargou

## Caractéristiques du bassin versant

Surface (A) en ha 158  
 Périmètre (P) en km 5.5  
 Indice de compacité C= 1.23  
 Longueur du rectangle (L) en km 1.93  
 Largeur du rectangle (l) en km 0.82  
 Altitude maximale en m 730  
 Altitude minimale en m 590  
 Indice de pente (I<sub>g</sub>) en m/km 72  
 Indice de Roche (I<sub>p</sub>) 0.254  
 Dénivelée (D) en m 140  
 Classe de relief (Rodier) 4  
 Occupation des sols Terres agricoles : 92%  
 Aménagements CES sans

## Caractéristiques de la retenue

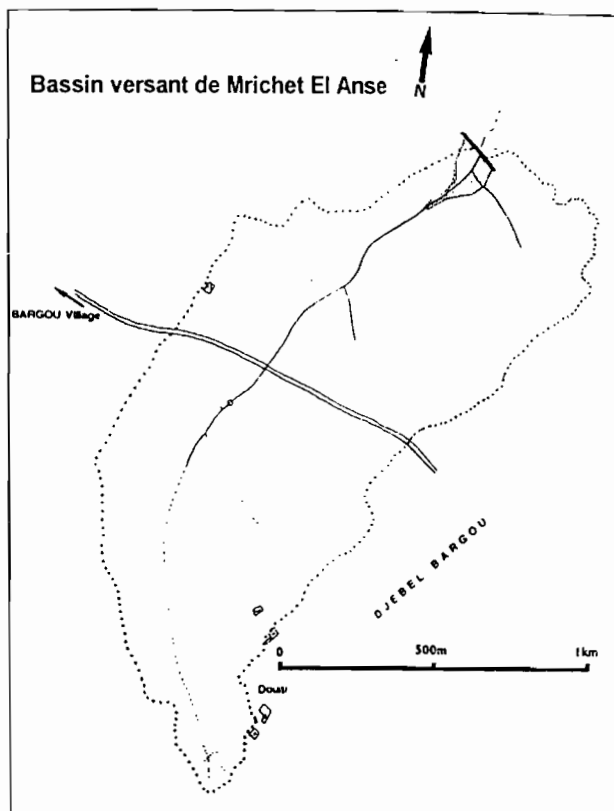
Année de construction 1991  
 Volume de la retenue au déversement (V<sub>i</sub>) en m<sup>3</sup> 41 780  
 Surface de la retenue au déversement (S<sub>i</sub>) en ha 2.017  
 Rapport V<sub>i</sub>/S<sub>i</sub> en m 2.07  
 Volume d'envasement (V<sub>e</sub>) en m<sup>3</sup> 29/05/96 5 000  
 Capacité Utile (V<sub>u</sub>) en m<sup>3</sup> 29/05/96 36 780  
 Rapport V<sub>u</sub>/S<sub>i</sub> en m 29/05/96 1.82  
 Hauteur de la digue en m 10  
 Longueur de la digue en m 163  
 Nature du déversoir béton rectangulaire  
 Hauteur du déversoir en m 7.16  
 Largeur du déversoir en m 17.4  
 Diamètre de la conduite en mm 300  
 Utilisation de l'eau arboriculture

## Caractéristiques de la station

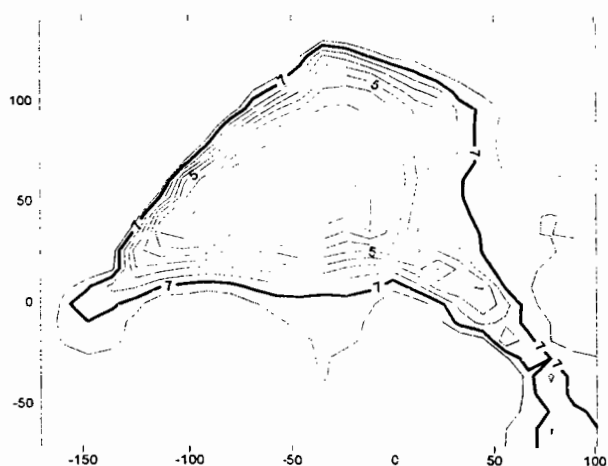
Début des observations 21/09/93  
 Hauteur repère/échelle en m 8  
 Code HYDROM échelle 21/09/93 1486088054  
 Code PLUVIOM OEDIPE 21/09/93 1486088130  
 Code PLUVIOM pluviomètre 05/09/95 1486088135  
 Code PLUVIOM bac évaporation 05/09/95 1486088750  
 Adresse ARGOS 12980

## Barèmes hauteur / surface / volume

H m	S <sub>i</sub> m <sup>2</sup>	V <sub>i</sub> m <sup>3</sup>	29/05/96 V <sub>2</sub> m <sup>3</sup>
0.0	0	0	0
0.5	0	0	0
1.0	0	0	0
1.5	0	0	0
2.0	191	23	0
2.5	985	292	0
3.0	2 289	1 085	0
3.5	3 725	2 571	617
4.0	5 469	4 861	2 429
4.5	7 212	8 010	5 343
5.0	9 254	12 096	9 064
5.5	11 344	17 240	13 627
6.0	13 311	23 350	19 188
6.5	15 963	30 603	25 754
7.0	19 090	39 286	33 728
7.16	20 170	42 403	37 538
7.5	22 734	49 631	44 247
8.0	26 761	61 889	59 445



Bathymétrie, mai 1996





# Lac collinaire de Kemech

Station : Kemech Bassin : Cap Bon  
 Latitude Nord : 36°52'18" Longitude Est : 10°52'08"  
 CRDA : Nabeul Délégation : El Haouaria

## Caractéristiques du bassin versant

Surface (A) en ha 245.5  
 Périmètre (P) en km 7.25  
 Indice de compacité C= 1.30  
 Longueur du rectangle (L) en km 2.72  
 Largeur du rectangle (l) en km 0.90  
 Altitude maximale en m 203  
 Altitude minimale en m 95  
 Indice de pente (I<sub>g</sub>) en m/km 40  
 Indice de Roche (I<sub>p</sub>)  
 Dénivelée (D) en m 108  
 Classe de relief (Rodier) 4  
 Occupation des sols Terres agricoles : 75%  
 Aménagements CES non

## Caractéristiques de la retenue

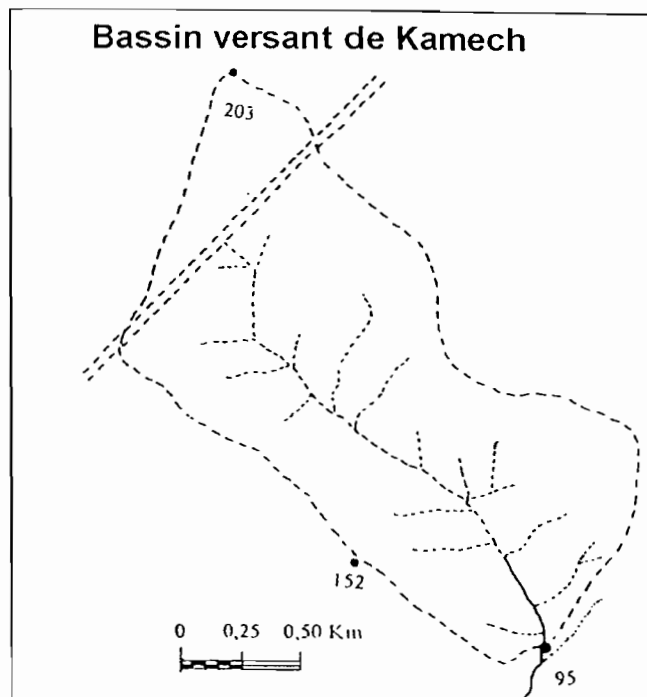
Année de construction 1993  
 Volume de la retenue au déversement (V<sub>i</sub>) en m<sup>3</sup> 142 560  
 Surface de la retenue au déversement (S<sub>i</sub>) en ha 4.466  
 Rapport V<sub>i</sub>/S<sub>i</sub> en m 3.19  
 Volume d'envasement (V<sub>e</sub>) en m<sup>3</sup> 31/07/96 11 380  
 Capacité Utile (V<sub>u</sub>) en m<sup>3</sup> 31/07/96 131 180  
 Rapport V<sub>u</sub>/S<sub>i</sub> en m 31/07/96 2.94  
 Hauteur de la digue en m 10  
 Longueur de la digue en m 125  
 Nature du déversoir béton triangulaire  
 Hauteur du déversoir en m 8.71  
 Largeur du déversoir en m 8.85  
 Dia: mètre de la conduite en mm 300  
 Utilisation de l'eau irrigation

## Caractéristiques de la station

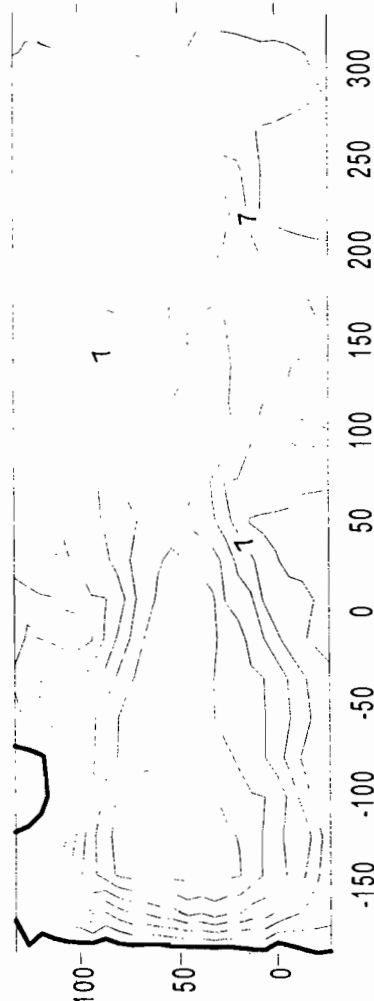
Début des observations 09/03/94  
 Hauteur repère/échelle en m 9.9  
 Code HYDROM échelle 09/03/94 1484088086  
 Code PLUVIOM OEDIPE 09/03/94 1484088310  
 Code PLUVIOM pluviomètre 23/08/95 1484088315  
 Code PLUVIOM bac évaporation 23/08/95 1484088830  
 Adresse ARGOS 13234

## Barèmes hauteur / surface / volume

H m	S <sub>i</sub> m <sup>2</sup>	V <sub>i</sub> m <sup>3</sup>	31/07/96 V <sub>2</sub> m <sup>3</sup>
0.0	8	0	0
0.5	570	128	0
1.0	1 328	599	0
1.5	2 274	1 479	0
2.0	3 720	2 967	0
2.5	5 396	5 204	4
3.0	7 149	8 292	995
3.5	9 620	12 432	3 205
4.0	12 623	17 937	7 217
4.5	15 423	24 896	12 965
5.0	18 547	33 319	20 662
5.5	21 579	43 284	30 283
6.0	24 421	54 710	41 805
6.5	27 102	67 480	55 235
7.0	29 847	81 582	69 480
7.5	32 888	97 104	85 146
8.0	36 401	114 218	102 435
8.5	42 042	133 526	122 043
8.7	44 521	142 099	130 715
9.0	48 618	155 932	144 699
9.5	57 470	182 034	171 149
10.0	89 835	216 583	207 639



## Bathymétrie, juillet 1996



## BIBLIOGRAPHIE HYDROMED

01

**SELMI S., 1996 - Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien.** Thèse de doctorat d'université (ENSA - Montpellier), 417 p + annexe photographique.

**Mots clés :**

LAC ET RETENUE COLLINAIRE, EVALUATION, INTERVENTION DE L'ETAT, GESTION COLLECTIVE, RESSOURCES NATURELLES, GROUPEMENT D'AGRICULTEURS, SYSTEME DE PRODUCTION, IRRIGATION, DEVELOPPEMENT, COLLECTIVITE LOCALE, PAYSANNERIE, EXPLOITATION AGRICOLE, ENQUETE, TYPOLOGIE, ZONE SEMI-ARIDE, TUNISIE.

**Type :** Thèse

**Thème :** Politiques agricoles / évaluation économique / systèmes de production / usages de l'eau et développement rural

**Intérêt pour Hydromed:** Fort. Données de base sur 4 des cinq sites pilotes d'Hydromed. Méthodologie de l'étude d'impacts socio-économiques.

**Doc. :** INRA - ESR - Montpellier / ORSTOM - Paris, Montpellier et Tunis.

**Résumé**

Ce travail de recherche se propose de procéder à une évaluation globale des impacts de l'intervention de l'Etat tunisien dans sa conception et mise en œuvre de lacs collinaires en Tunisie, une des composantes les plus importantes de la stratégie nationale et décennale (1990-2000) en matière de conservation des eaux et des sols. L'analyse est faite sur trois gouvernorats de la zone semi-aride : Siliana, Kasserine et Kairouan et a porté sur une cinquantaine de retenues, construites au début de la stratégie et d'une capacité théorique dépassant 50 000 mètres cubes, et sur 203 exploitations agricoles potentiellement bénéficiaires des ressources ainsi créées. Il s'agit le plus souvent de petites unités familiales œuvrant dans des circonstances désavantageuses et dans un contexte général de pauvreté.

Deux hypothèses principales sont avancées :

- il y a divergence entre les objectifs de l'Etat investisseur et les stratégies paysannes,
- la création d'une ressource rare n'est pas une condition suffisante pour son allocation optimale.

Le but est d'argumenter et de tester le bien-fondé de ces deux postulats. Le support méthodologique de base est une analyse de la diversité des aménagements et des exploitations agricoles, sur la base d'enquêtes.

Notre grille d'analyse est construite sur une articulation de raisonnements issus de concepts empruntés à l'Economie Publique, l'Economie des Ressources Naturelles, la théorie de la Croissance Endogène et à la théorie micro-économique liée à l'analyse des comportements sociaux et économiques des exploitants agricoles. La première partie permet de comprendre les enjeux agricoles, politiques et financiers de l'intervention de l'Etat dans la gestion des ressources naturelles. La seconde partie est consacrée à l'évaluation des lacs collinaires au niveau national et régional. Dans la troisième partie, les incidences de la création des ressources sur les systèmes de production agricoles et auprès des populations locales sont analysées.

02

**TALINEAU J.-C., SELMI S., ALAYA K., 1994.- Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. Pour un choix plus pertinent des sites à aménager.** In Sécheresse n° 4, vol. 5, décembre 1994.

**Mots-clés :**

TUNISIE; LAC ET RETENUE COLLINAIRE; STRATEGIE; GEOGRAPHIE; SITUATION SITE

**Type :** Article scientifique

**Thème :** Economie / Géographie

**Intérêt pour l'étude :** moyen

**Doc :** Sécheresse n° 4, vol. 5, décembre 1994

**Résumé :**

L'opération lac collinaire, une des composantes de la stratégie nationale et décennale en matière de conservation des eaux et des sols en Tunisie, est décrite dans ses objectifs, son organisation et la réalité concrète des premières réalisations. Une description du programme de recherche qui se déroule conjointement avec deux principales composantes - hydrologie et socio-économie a été faite. La discussion porte sur un examen critique des objectifs de nature à reconsidérer les critères de choix des sites à aménager. Pour conclure on estime que la réussite de l'opération reposera au moins autant sur des perspectives réelles de développement local que sur la seule et simple fonction de conservation des ressources naturelles.

03

**SELMI S., TALINEAU J.-C., 1994 .- Des lacs collinaires pour un développement durable en Tunisie semi-aride.** In Les cahiers de la Recherche Développement n° 37, pp 33-46, 1994.

**Mots-clés :**

TUNISIE; LAC ET RETENUE COLLINAIRE; TYPOLOGIE; ENQUETE; DEVELOPPEMENT. EXPLOITATION AGRICOLE; USAGE DE L'EAU.

**Type :** Article scientifique

**Thème :** Economie / Géographie

**Intérêt pour l'étude :** fort

**Doc :** Les cahiers de la Recherche Développement n° 37, pp. 33-46, 1994 / ORSTOM / CIRAD - Montpellier

**Résumé :**

Ce texte propose une analyse critique des objectifs de ce projet, présentés de manière trop formelle et non hiérarchisée. Les premiers résultats des observations d'un échantillon d'une cinquantaine d'ouvrages conduisent à la présentation d'une typologie fondée sur l'utilisation de la ressource hydrique qui est encore peu développée.

---

04

**SELMI S., TALINEAU J.-C., 1997.- Diversité et problématique de la gestion collective des lacs collinaires tunisiens.** In. La ruralité dans les pays du Sud à la fin du XX siècle. Colloque à Montpellier les 2 et 3 avril 1996.

**Mots-clés :**

EAU, LAC COLLINAIRE, GESTION COLLECTIVE, GESTION PRIVEE, ASSOCIATION, DEVELOPPEMENT RURAL, ZONE PAUVRE, SEMI-ARIDE, TUNISIE.

**Type :** Communication dans un colloque

**Thème :** Socio-économie / Gestion

**Intérêt pour l'étude :** fort

**Doc :** Les actes du colloque / ORSTOM - Montpellier

**Résumé :**

Dans le semi-aride tunisien, l'eau est un sujet de regroupement et de cohésion sociale des populations. La création des lacs collinaires, une forme nouvelle d'intervention de l'Etat en milieu rural, constitue souvent la seule alternative de développement des zones pauvres et déshéritées. En l'absence d'une réglementation définissant la gestion adéquate de l'eau, les quelques associations d'intérêts collectifs récemment créées, en majorité par initiative privée, doivent, pour fonctionner, faire face à plusieurs handicaps d'ordre technique, économique et social.

---

05

**SELMI S., TALINEAU J.-C., 1997.- Stratégie étatique face aux réalités paysagère et paysanne : aménagement et développement autour des lacs collinaires.** In numéro (spécial) de la Revue Tunisienne de Géographie.

**Mots-clés :**

EAU, LAC COLLINAIRE, BARRAGE; IMPACT; RECHARGE; PROTECTION; DEVELOPPEMENT, TUNISIE.

**Type :** Communication dans un colloque

**Thème :** Socio-économie / Gestion

**Intérêt pour l'étude :** fort

**Doc :** Revue Tunisienne de Géographie (1997).

**Résumé :**

Dans cet article, à partir de l'étude du cas du bassin versant de Nebhana, il a été démontré que les objectifs prioritaires attribués aux lacs collinaires sont assez mineurs devant l'enjeu d'un véritable développement local autour de ces aménagements de petite et moyenne hydraulique. Les réelles propositions qui sont faites en touchant à une majorité des aspects de la dimension développement, sont de nature à aider les responsables et les décideurs dans l'évaluation et faisabilité de cette nouvelle entreprise de valorisation des lacs collinaires.

---

06

**Journées Nationales d'Etudes - Petits barrages. AFEID - CFGB, Bordeaux - France, 1993.**

**Mots-clés :**

PETITS BARRAGES ; EAU ; EDF; BARRAGES EN TERRE; HYDROLOGIE, RIVIERE, CRUE; DEMANDE, IMPACTS; ETAT; SUBVENTIONS; GEOLOGIE; QUALITE DE L'EAU, EUTROPHISATION, ENVIRONNEMENT

**Type :** Colloque (journées nationales)

**Thème :** Petits barrages / France

**Intérêt pour Hydromed :** Moyen

**Doc :** CEMAGREF - EDITIONS 1994.

**Résumé :**

4 thèmes sont traités :

- Intérêts des petits barrages
- Gestion et sécurité
- Conception et réalisation
- Qualité de l'eau et impacts sur l'environnement

Ce colloque organisé par le Comité Français des Grands Barrages (CFGB) et l'Association Française pour l'Etude des Irrigations (AFEID) est consacré aux barrages de hauteur inférieure à une trentaine de mètres. Mise à part deux communications concernant l'expérience marocaine, il a étudié exclusivement les petits barrages français. L'ouvrage est composé de 37 communications écrites et concernent d'une part tous les types de barrage, mais surtout ceux en terre, et d'autre part ceux dont la hauteur se situe entre 5 et 30 mètres; toutefois, certains ouvrages plus grands sont également traités.

Cette étude a comme principal intérêt de considérer les petits barrages sous différents aspects. Du point méthodologique, certaines communications sont très importantes bien qu'il existe des particularités, dans la conception, la réalisation et la gestion des ouvrages, entre l'expérience française et celle des pays du sud de la Méditerranée. Une bonne bibliographie existe à la fin de chaque communication.

07

**HAMDI S., 1996.- Dynamique des systèmes agraires autour des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien : Application à la délégation de Makthar. Mémoire d'ingénieur du CNEARC- Montpellier, 1996, 89 p + annexe.**

**Mots-clés :**

LAC ET RETENUE COLLINAIRE, RESSOURCES NATURELLES ET HYDRAULIQUE, SYSTEME DE PRODUCTION, SYSTEME AGRAIRE, SYSTEME DE CULTURE, DEVELOPPEMENT DURABLE, EXPLOITATION AGRICOLE, ENQUETE, TYPOLOGIE, ZONE SEMI-ARIDE, TUNISIE.

**Type :** Mémoire

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen.

**Doc :** CNEARC - France, D/CES - Tunisie.

**Résumé**

Ce travail se propose d'étudier l'évolution des systèmes agraires autour de trois lacs collinaires situés dans le semi-aride supérieur tunisien (délégation de Makthar dans le gouvernorat de Siliana). Ces lacs ont une capacité théorique moyenne de 80 milles mètres cubes et sont gérés par des associations d'intérêts collectifs. Le nombre total d'exploitations sujet à une typologie de système de production est de 64.

08

**BERGMANN H., BOUSSARD J.-M., 1976.- Guide de l'évaluation économique des projets d'irrigation (version révisée). OCDE - Paris.**

**Mots-clés :**

EVALUATION; SYSTEME DE PRODUCTION, IRRIGATION; AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE; METHODOLOGIE; EFFETS; ETUDE DE CAS.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen. (méthodologie)

**Doc :** ORSTOM - CNEARC - INRA - France..

**Résumé :** Il s'agit d'une sorte de manuel d'école. Quelques études de cas concernant essentiellement l'Afrique noire sont présentées.

09

**OSTROM E., 1992.- Crafting institutions for self-governing irrigation systems.** ICS Press, Institute for Contemporary Studies, San Francisco, California, 111 p.

**Mots clés :**

INSTITUTIONS; IRRIGATION; PRIVATE; COLLECTIVE; ORGANIZATION; SOCIAL CAPITAL; PROJECT; CONFLICT; RULE.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen. (méthodologie)

**Doc :** ORSTOM

**Résumé :**

The work is composed with five chapters :

- Irrigation, institutions, and development
- Institutions as Rules -in-use
- Crafting Institutions
- Design Principles of Long-Enduring, Self-Organized Irrigation Systems
- Applying Design Principles.

All questions about private and public irrigation institutions are debated and many examples are discussed.

---

10

**FUNEL J.-M., LAUCCOIN G., 1981.- Politiques d'aménagements hydro-agricoles.** P.U.F Paris. 164 p. + annexes.

**Mots-clés :**

AMENAGEMENT HYDRO-AGRICOLE; METHODOLOGIE; ETUDE DE CAS; SYSTEME DE PRODUCTION, IRRIGATION; POLITIQUE; SENEGAL; NIGER.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen. (méthodologie)

**Doc :** P.U.F - Paris / ORSTOM - CNEARC - INRA -France.

**Résumé**

Cette étude propose une approche de la problématique générale des aménagements hydro-agricoles. Les auteurs essayent de répondre aux deux questions suivantes : Quels sont les problèmes rencontrés dans la mise en œuvre de l'irrigation? et quelles sont les réponses apportées dans le cadre des politiques d'aménagement?. Cette étude ne présente pas un bilan exhaustif des politiques d'aménagement. Elle s'appuie sur des études de cas qui ont été choisies en fonction de leur degré de représentativité. Il a été principalement retenu les aménagement existant sur les vallées du Sénégal et du Niger.

---

11

**GAUTHIER G., THIBAUT M., 1993.- L'analyse coûts - avantages : défis et controverses.** Economica. Paris 505 p. (Documents collectifs).

**Mots-clés :**

ANALYSE COÛTS - AVANTAGES. METHODOLOGIE; THEORIE; EAU; ACTUALISATION; ECONOMIE; GESTION; POLITIQUE; PROJET.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen (méthodologie)

**Doc :** Economica - Paris / ORSTOM - INRA -France.

**Résumé**

Il s'agit d'un recueil de textes traitant de la méthodologie de l'analyse coûts-avantages qui trouve des applications dans tous les secteurs d'intervention publique comme les transports, la rénovation urbaine, l'éducation, l'énergie, la réglementation, l'eau, etc.. Certains de ces articles sont le fait d'économistes francophones, la plupart sont des traductions d'auteurs américains et britanniques considérés spécialistes dans le domaine. L'article (chapitre) 12: l'analyse économique de l'eau, pp. 373 - 478, est très intéressant du point de vue théorique. Les auteurs YOUNG R. A.; HAVEMAN R. H. essayent de répondre à la question : comment les concepts économiques peuvent s'appliquer à l'étude de la consommation, de l'approvisionnement et de la répartition des ressources en eau.

---

12

**YUNG J.-M., ZASLAVSKY J., 1992.- Aperçu sur les stratégies des producteurs et les organisations paysannes dans le delta du fleuve Sénégal.** Montpellier, France, CIRAD-SAR, 72 p.

**Mots-clés :**

STRATEGIES; PAYSANS; AFRIQUE SUBSAHARIENNE; AGRICULTEURS; ETAT.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen (méthodologie)

**Doc :** Economica - Paris / ORSTOM - INRA -France.

**Résumé**

L'approche systémique appliquée à l'analyse des systèmes agraires dans le delta du fleuve Sénégal a permis, à travers des études de cas, de se prononcer sur les stratégies des agriculteurs et de dégager les facteurs socio-économiques et institutionnels qui régissent les changements dans les comportements des groupes de paysans qu'ils soient individuels ou organisés.

---

13

**BENYOUNES O. C., 1985.- La gestion des retenues : les lacs collinaires au Maroc.** In. **Ouvrages d'irrigation- Retenues collinaires** (Sophia-Antipolis), 13 février - 5 mars 1985.

**Mots-clés :**

RETENUE; LAC, ELEVEURS, ABREUUREMENT, ATLAS, MAROC.

**Type :** article

**Intérêt pour Hydromed:** fort

**Doc :** INGRES - Montpellier - France.

**Résumé**

Après avoir montré l'utilité des retenues collinaires dans les hauts plateaux, l'auteur présente quelques études de cas qui les situe dans le contexte de l'aménagement hydro-agricole du pays. Il présente enfin de l'exposé les principaux enseignements tirés de l'exploitations de ces ouvrages dits « rdir ».

---

14

**CARBONNIERES R., 1969.- Importance technique et économique des retenues collinaires. Bilans et perspectives.** In. L'EAU n° 10, pp. 427-437.

**Mots-clés :**

RETENUE COLLINAIRE, HISTORIQUE, TECHNIQUE, CONSTRUCTION, GESTION, ITALIE.

**Type :** article

**Intérêt pour Hydromed:** moyen

**Doc :** INGRES - Montpellier - France.

**Résumé**

L'auteur présente au début une historique brève des retenues collinaires dans le monde et en Italie. L'expérience italienne d'avant 1969 est très bien étudiée.

Dès le premier siècle après J. C., les Yéménites avaient construit un grand nombre de petits ouvrages dans les vallées et en avaient même creusé le long des pentes. En Europe, de telles infrastructures sont très répandues en Italie et en France dans les coteaux de Gascogne et les marges pyrénéennes d'une façon générale. Le principe de la construction des lacs collinaires est né en Italie du Nord vers l'année 1951.

---

15

**MONTGOLFIER J., NATALI J.-M., 1987.- Le patrimoine du futur : approches pour une gestion patrimoniale des ressources naturelles.** Economica, Paris, 247 p.

**Mots-clés :**

PATRIMOINE. RESSOURCES NATURELLES; ENVIRONNEMENT; METHODOLOGIE; THEORIE; EAU; FORET; GESTION; ACTEUR.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Fort (méthodologie)

**Doc :** Economica - Paris / ORSTOM - INRA -France.

**Résumé**

Plusieurs études de cas (essentiellement français) et les outils d'analyses qui ont servi à ceux-ci sont présentés.

---

16

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Direction de la CES, 1993.- Stratégie nationale de la CES (1990-2000).**  
Copie revue et modifiée.

**Mots-clés :**

BILAN, PREVISIONS, PROGRAMME, OBJECTIFS, CONSERVATION, EAU, SOL, TUNISIE.

**Type :** Rapport

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen

**Doc :** Ministère de l'agriculture - Tunisie.

**Résumé**

La stratégie de conservation des eaux et des sols est complémentaire de celle de la mobilisation des eaux. Elle prévoit, par la réalisation de divers aménagements de petite et de moyenne hydraulique (notamment 1000 lacs collinaires) prévues dans les différentes stratégies, réduire, de réguler et de stocker pour des usages différés la plus grande partie des eaux de ruissellement. Cette stratégie a pour objectif principal de protéger puis de restaurer des énormes surfaces menacées par l'érosion hydrique et éolienne. Le souci de faire, avec les agriculteurs, des ouvrages efficaces et beaucoup plus durable de conservation des eaux et des sols s'affiche beaucoup plus clairement qu'auparavant.

En général, on a conservé les mêmes objectifs déjà communément assignés aux travaux de CES il y a plus de 20 ans. Il s'agit de maintenir et améliorer la fertilité des sols, d'améliorer le taux de mobilisation des ressources en eau notamment celles difficilement mobilisables par des ouvrages classiques, et de protéger les infrastructures (barrages, routes, agglomérations).

Pour répondre à ces objectifs qui restent assez globaux, l'Etat, de plus en plus conscient de l'importance du rôle des exploitants agricoles dans la réussite des projets de CES, fait l'effort dans cette stratégie de rechercher les conditions de leur implication et association aux travaux et aménagements de lutte contre l'érosion.

---

17

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Direction de la CES, 1995. Guide de conservation des eaux et du sol.**  
Projet PNUD/FAO TUN/86/020. 274 p.

**Mots-clés :**

TECHNIQUE, CONSERVATION, EAU, SOL, TUNISIE.

**Type :** Ouvrage

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen

**Doc :** Ministère de l'agriculture - Tunisie.

**Résumé**

Cet ouvrage élaboré par une équipe multidisciplinaire de consultants tunisiens a pour objectif de répondre aux besoins d'initiations des techniciens de CES à la réalisation, l'évaluation et le suivi des différents aménagements de conservation des ressources naturelles (eau et sol). Les différents aménagements et ouvrages de CES sont étudiés (technique de construction, utilités, coût, etc.).

---

18

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Direction de la CES, 1995. Code de la CES. Journal Officiel de la République Tunisienne n° 59 et 87.**

**Mots-clés :**

LOIS, CONSERVATION, EAU, SOL, TUNISIE.

**Type :** Recueil de textes de lois.

**Intérêt pour Hydromed:** faible

**Doc :** Ministère de l'agriculture - Tunisie.

**Résumé**

C'est un ensemble de lois regroupées en sept chapitres intitulés :

- dispositions générales,
  - des mesures de conservation des eaux et du sol,
  - du conseil national de la conservation des eaux et du sol,
  - des groupements régionaux de conservation des eaux et du sol,
  - des associations de conservation des eaux et du sol,
  - de l'encouragement de l'Etat à la conservation des eaux et du sol,
  - des infractions et des sanctions.
-

19

**Molle F. & Cadier E. (1992)** Manual do pequeno Açude. Construir, conservar e aproveitar pequenos açudes no Nordeste brasileiro. SUDENE - ORSTOM - TAPI, Recife. 511 p.

**Mots-clés :**

BRESIL, NORDESTE, AÇUDES, AMENAGEMENT, AGRICULTURE

**Type :** Manuel

**Intérêt pour Hydromed:** fort

**Doc :** ORSTOM, SUDENE, TAPI.

**Résumé :**

Ce manuel réunit des propositions méthodologiques détaillées permettant de construire, entretenir et mettre en valeur des petits et moyens barrages collinaires. Une méthode hydrologique, élaborée à partir de données régionales, établit des normes précises pour le dimensionnement des réservoirs. Trois principaux axes de mise en valeur sont abordés de façon détaillée : les cultures de décrue, la pisciculture semi-intensive et l'irrigation, ce dernier aspect étant particulièrement développé, afin d'aborder de façon plus globale divers thème comme celui, par exemple, de la salinisation.

20

**Nouvelot J.F. (1993)** Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH/ORSTOM/CEMAGREF/FAO. Montpellier. 540 p.

**Mots-clés :**

PETITS BASSINS VERSANTS, MESURES HYDROLOGIQUES, ANALYSE DES DONNEES

**Type :** Guide

**Intérêt pour Hydromed:** fort

**Doc :** ORSTOM, CIEH.

**Résumé :**

Les pratiques hydrométriques sur des bassins de petite superficie à des fins d'aménagement ou de recherche exigent un nombre de paramètres élevé à mesurer. Ce guide décrit en détail la densité des postes de mesure, leur fréquence et leur protocole. Il donne les indications indispensables pour que la logistique et l'organisation des mesures soient préparées avec rigueur et minutie pour éviter toute défaillance matérielle et humaine et par là supprimer tout risque de perte d'information.

L'équipement et les protocoles expérimentaux pour le suivi hydrologique d'un lac collinaire sont décrits avec précision.

21

**Swarn Lata Arya, Samra J.S. (1995)** Socio-Economic Implications and Participatory. Appraisal of Integrated Watershed. Management Project at Bunga. Chandigarh India Bull N° T-27 / C-6. 112p.

**Mots-clés :**

INDE, LACS COLLINAIRES, ANALYSE HYDROLOGIQUE, SOCIO-ECONOMIE, AMENAGEMENT INTEGRE DE BASSIN VERSANT

**Type :** Pub. Sc.

**Intérêt pour Hydromed:** moyen

**Doc :** ICAR.

**Résumé :**

Ce travail réalisé dans le Nord de l'Inde décrit l'aménagement intégré d'un bassin versant basé sur des petites structures hydrauliques de rétention d'eau. L'intérêt de cet ouvrage réside en la perception du lac collinaire comme un élément clé de l'aménagement intégré mais non unique. Il fait le bilan économique de ce type d'aménagement et montre comment peuvent être réglés les conflits amont - aval.

22

**MINISTERE DE L'AGRICULTURE. Direction de la CES, / ORSTOM 1996.** Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 140 p.

**Mots-clés :**

Tunisie, lac collinaire, annuaire hydrologique.

**Type :** Recueil de données

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen

**Doc :** Ministère de l'agriculture - Tunisie.

**Résumé :**

Recueil des données observées pendant l'année hydrologique 1994-1995. Fiches caractéristiques de 26 lacs appartenant au réseau de surveillance pilote des lacs collinaires tunisien. Présentation de méthodes d'analyse des bilans.



23

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE. Direction de la CES, / ORSTOM 1997. Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 180 p.

**Mots-clés :**

Tunisie, lac collinaire, annuaire hydrologique.

**Type :** Recueil de données

**Intérêt pour Hydromed:** Moyen

**Doc :** Ministère de l'agriculture - Tunisie.

**Résumé :**

Recueil des données observées pendant l'année hydrologique 1995-1996. Fiches caractéristiques de 26 lacs appartenant au réseau de surveillance pilote des lacs collinaires tunisien. Présentation de méthodes d'analyse des bilans.

---

24

LARAQUE, A. (1991) Comportements hydrochimiques des « Açudes » du Nordeste brésilien semi-aride. Evolution et prévisions pour un usage en irrigation. Thèses de Doc., USTL Montpellier. 324 p.

**Mots-clés :**

BRESIL, NORDESTE, HYDROCHIMIE DES BARRAGES.

**Type :** Thèse de doctorat

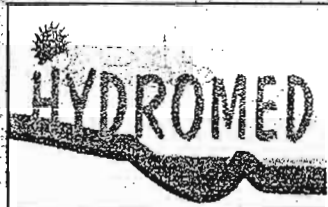
**Intérêt pour Hydromed:** Fort

**Doc :** ORSTOM, Université Montpellier

**Résumé :**

Cette thèse appréhende la complexité des processus de fonctionnement et de gestion des retenues collinaires soumises à des contraintes souvent contradictoires : besoin en eau des cultures en fonction de leur cycle végétal, conservation d'une réserve hydrique pour la pisciculture, l'alimentation du bétail et l'usage domestique face à une forte évaporation. Elle explique pourquoi certaines retenues se salinisent plus rapidement et plus intensément que d'autres. Elle donne des règles simples de préventions de ce préjudice qui entraîne trop souvent l'abandon des retenues.

---



## **HYDROMED-MAROC**

*Programme de Recherche sur les Lacs Collinaires dans  
la zone semi-aride du pourtour méditerranéen.*

# **Site pilote N°1: Barrage SABOUN**

**Pr. Merzouk Abdelaziz , Coordinateur Hydromed-Maroc**  
(hydrologie et conservation des eaux et du sol)

**Mr. Abdellaoui Benyounes**  
(géomorphologie/érosion/GIS)

**Dr. Rachida Houssa**  
(Hydrologie/modélisation de l'érosion/téledétection)

**Pr. Méjjati Alami Mohammed**  
(pastoralisme/dynamique de la végétation)

Juin 1997

*Département des Sciences du Sol/ Laboratoire de Physique et de Conservation des sols  
BP : 6202-Instituts-Rabat, Maroc. Tél. et Télécop.: 212-7-771285, CE : merzouk@mtds.com*

**SITE PILOTE HYDROMED-Maroc :**  
**Barrage Saboun, Tangerois**

**SOMMAIRE**

I. INTRODUCTION.....	3
II. CRITÈRES DE SÉLECTION DU SITE PILOTE HYDROMED.....	4
III. BARRAGE COLLINAIRE SUR OUED SABOUN .....	5
IV. BASSIN VERSANT OUED SABOUN.....	8
V. CONCLUSION.....	13

# SITE PILOTE HYDROMED-Maroc :

## Barrage Saboun, Tangerois

### I. Introduction

Dans le cadre de sa mission de formation, de recherche et de participation au développement, l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV) s'est associé en Décembre 1996 à l'Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (ORSTOM) au programme international de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen intitulé **HYDROMED**. Ce programme parrainé par la Commission Européenne (Programme INCO/DC, Contrat n° IC18-CT96-0091 ; DG 12 – MUYS) constitue une action de recherche concertée entre huit pays et le Centre arabe pour l'études des zones arides (ACSAD). Les partenaires d'Hydromed sont :

<b>France</b>	: ORSTOM-France et ORSTOM-Tunis ( <u>COORDINATEUR</u> )
<b>Tunisie</b>	: Institut National de Recherche en Génie Rural et Eaux et Forêts, Tunis
<b>Royaume Uni</b>	: Institute of Hydrology, Natural environment Resaerch Council de Wallington
<b>Espagne</b>	: Institut des Ressources Naturelles et d'Agrobiologie de Séville, (IRNASE)
<b>Suède</b>	: Institut de Technologie de Lund, Lund University
<b>Syrie</b>	: Damscus University ; Ministry of Agriculture and Agrarian Reform and Ministry of Irrigation (Directorate of Small and Medium Dams)
<b>Liban</b>	: Ministry of Agriculture ; Ministry of Water and Electric Resources
<b>ACSAD</b>	: Centre Arabe d'Etudes des Zones Arides et des Régions Sèches, ACSAD, Syrie
<b>Maroc</b>	: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Département des Sols ; Laboratoire de Physique et Conservation des eaux et du sol.

L'IAV Hassan s'est engagé dans ce programme en visant l'objectif fondamental d'amélioration des connaissances sur l'hydrosystème composé par le petit bassin versant, le lac/barrage collinaire, les aménagements de versants, la nappe phréatique et le petit périmètre irrigué en aval. De ce fait l'étude s'insère dans le cadre de ce programme de recherche fondamental sur le cycle de l'eau et sur les cycles géochimiques associés avec les objectifs spécifiques suivants:

- Le développement d'outils d'estimation et de précision des transferts liquides et solides des petits bassins versants (< 20 Km<sup>2</sup>), en amont des lacs/barrages

collinaires. Pour ce, deux sites expérimentaux seront installés (un à Oued Saboun et l'autre à Rommani (Aarid)).

- La simulation du bilan hydrologique et de la qualité des eaux d'un lac collinaire en fonction du degré d'aménagement du bassin versant.
- La recherche d'indicateurs du milieu en vue d'une typologie de petits bassins versants méditerranéens, fondée sur les variables explicatives propres aux événements pluvieux, aux caractéristiques géomorphologiques, aux types d'écoulements et aux changements dans l'utilisation et l'occupation des terres des bassins versants.
- Les aspects sociologiques de l'érosion / lutte anti-érosive en amont et de l'impact du lac en aval. La position des paysans-éleveurs vis à vis de l'environnement, de l'érosion et des méthodes anti-érosives sera clairement identifiée. Les coûts et les moyens de financer la lutte anti-érosive (en amont et en aval du lac collinaire) seront étudiés.

Quelques sites pilotes seront choisis dans les pays du sud de la Méditerranée pour la conduite de ces actions de recherche selon les critères données ci-après. Le présent rapport livre une description sommaire du premier site marocain (Barrage Saboun) qui doit faire l'objet d'un suivi hydrologique et d'envasement plus poussé, d'autres sites seront retenus pour couvrir la diversité agro-écologique du pays avec le suivi d'un certain nombre de paramètres. Le barrage collinaire de Oued Kourima ( $1.1 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>) qui est situé à 20 Km au Sud de Rabat sera lui suivi, à titre d'exemple, pour la qualité de l'eau.

## II. Critères de sélection du Site Pilote Hydromed

Les sites qui seront retenus dans les pays du Sud de la Méditerranée doivent représenter l'écorégionalité de la zone semi-aride méditerranéenne et feront l'objet des mêmes études de caractérisation et de suivi. Des analyses plus fines pourront être conduites sur des sites spécifiques selon les objectifs et les compétences des différents partenaires. L'ensemble des sites couvriront les thématiques annoncées et certains d'entre eux, bien équipés, pourront devenir après le projet, des sites ateliers pour une recherche nationale à plus long terme. C'est bien le cas pour le barrage collinaire de Oued Saboun dans le Rif occidental retenu par l'IAV et qui satisfait aux critères HYDROMED suivants :

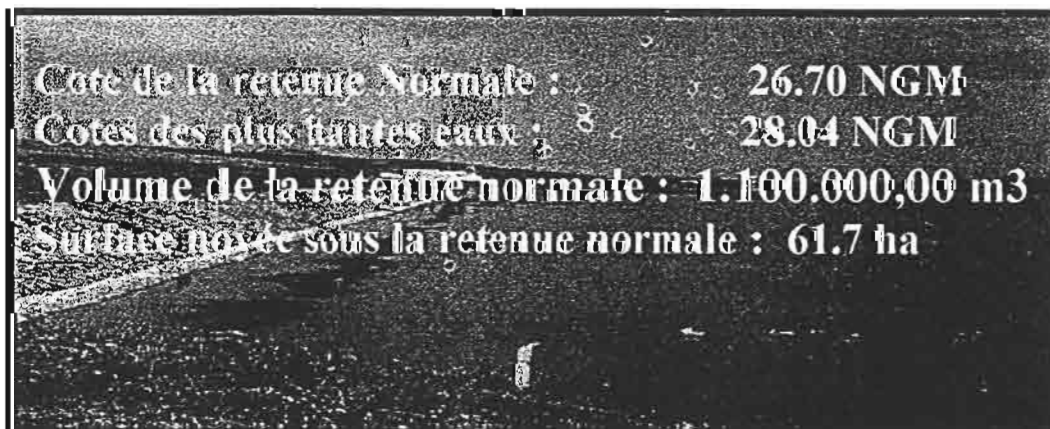
- Il existe un Lac collinaire avec un volume de retenue inférieur 1 000 000 m<sup>3</sup>. La hauteur du barrage est inférieur à 10 m. Le barrage est bien fait, le déversoir est correctement réalisé.

- La superficie du bassin versant est comprise entre 1 et 20 km<sup>2</sup>. Il se trouve en climat méditerranéen semi-aride entre 150 et 700 mm de pluviométrie interannuelle.
- Le site es accessible à toutes les époques de l'année et les équipes peuvent s'y rendre facilement et travailler en sécurité.
- Il existe une station météorologique dans les environs avec une chronique des paramètres du climat (au moins 20années).
- Le site fait l'objet de suivis hydrologiques et les cartes de bases sont disponibles (topographie, sols, végétations ...)
- Les populations locales utilisent effectivement l'eau. Il existe une action participative des individus à l'exploitation de la retenue et à un programme d'aménagement anti-érosif.

L'IAV Hassan II en collaboration avec l'Administration de l'Hydraulique (DH) et les Directions Provinciales d'Agriculture (DPA) a entamé depuis Janvier 1997 une recherche des sites satisfaisant au maximum ces critères. Le barrage collinaire de oued Saboun a été classé en premier lieu et retenu comme site pilote majeur.

### III. Barrage Collinaire Sur Oued Saboun

1. **Localisation** : Le barrage collinaire Saboun a été construit et mis en service en 1991 sur Oued Saboun qui constitue un affluent de Oued Mharhar (bassin du Tangérois). Le site du barrage est à environ 15 km au sud de la ville de Tanger et à 3 km en aval du grand barrage Ibn Battouta (figure 1.). De point de vue administratif le barrage est localisé dans la commune rurale d'Aouma qui se rattache au Cercle d'El Fahs de la province de Tanger.
2. **Objectifs** : Le barrage Saboun a été construit pour irriguer un petit périmètre en aval et aider à l'abreuvement du cheptel.
3. **Hydrologie** : Apports moyen annuel : 1.929.000,00 m<sup>3</sup>  
 . Crue decamillénaire : 171,50 m<sup>3</sup>/S  
 . Pluviométrie moyenne annuelle : 756 mm
4. **Retenue**



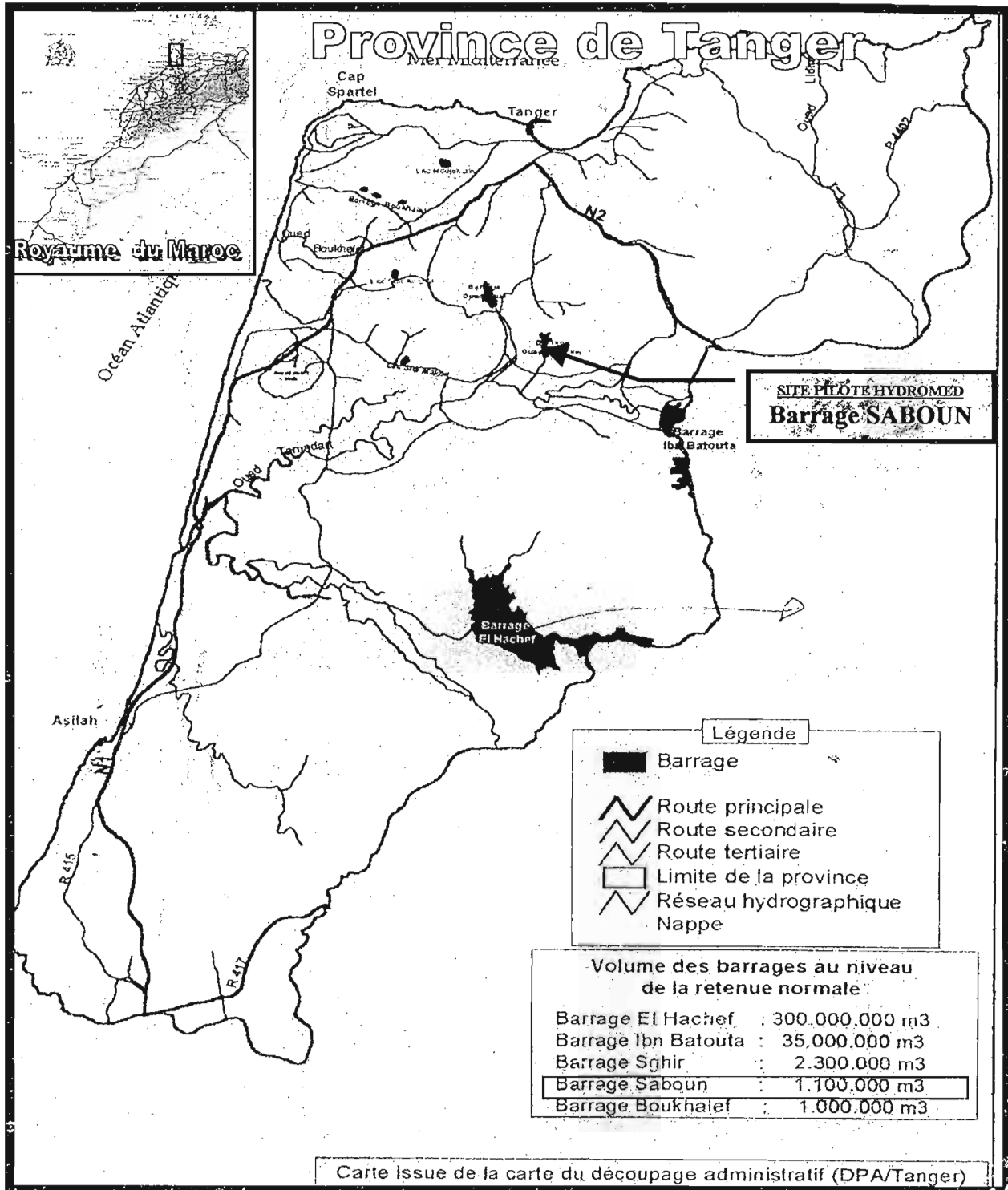
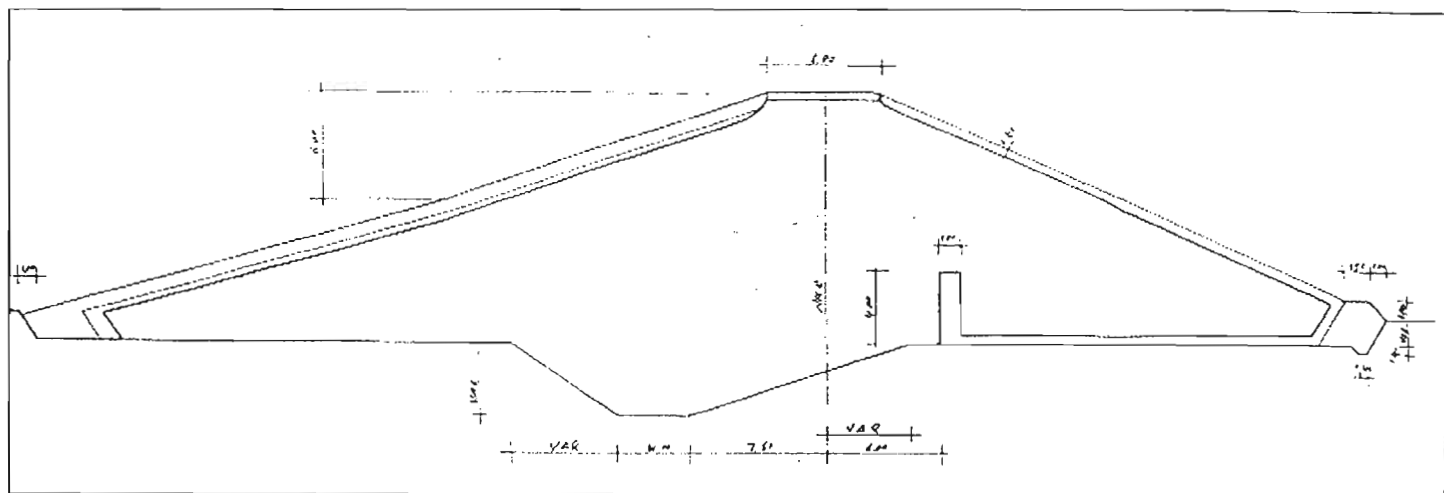


Figure 1: Carte de situation du barrage Saboun, Tangérois.

## 5. Digue principale :



Type	: en terre homogène
Hauteur sur fondation	: 15.00 m
Hauteur sur TN	: 12.00 m
Longueur en crête	: 443.00 m
Cote de couronnement	: 30.00 NGM
Volume de remblais	: 90.000,00 m <sup>3</sup>
Pente du talus amont	: 3/1
Pente du talus aval	: 2.25/1

## 6. Ouvrages Annexes :



**Vidange de Fond : Conduite métallique**

**Prise d'eau : Conduite métallique**



## IV. Bassin Versant Oued Saboun

Le bassin versant de oued Saboun couvre une superficie de 702 Ha , et fait partie de grand bassin versant de Oued Maharhar qui se déverse dans l'océan atlantique. Géographiquement il est situé dans la partie occidentale de la chaîne rifaine entre 4°39 / 5°02 de latitude Nord et 35°39 / 35°42 de longitude Ouest (figures 1 et 2).

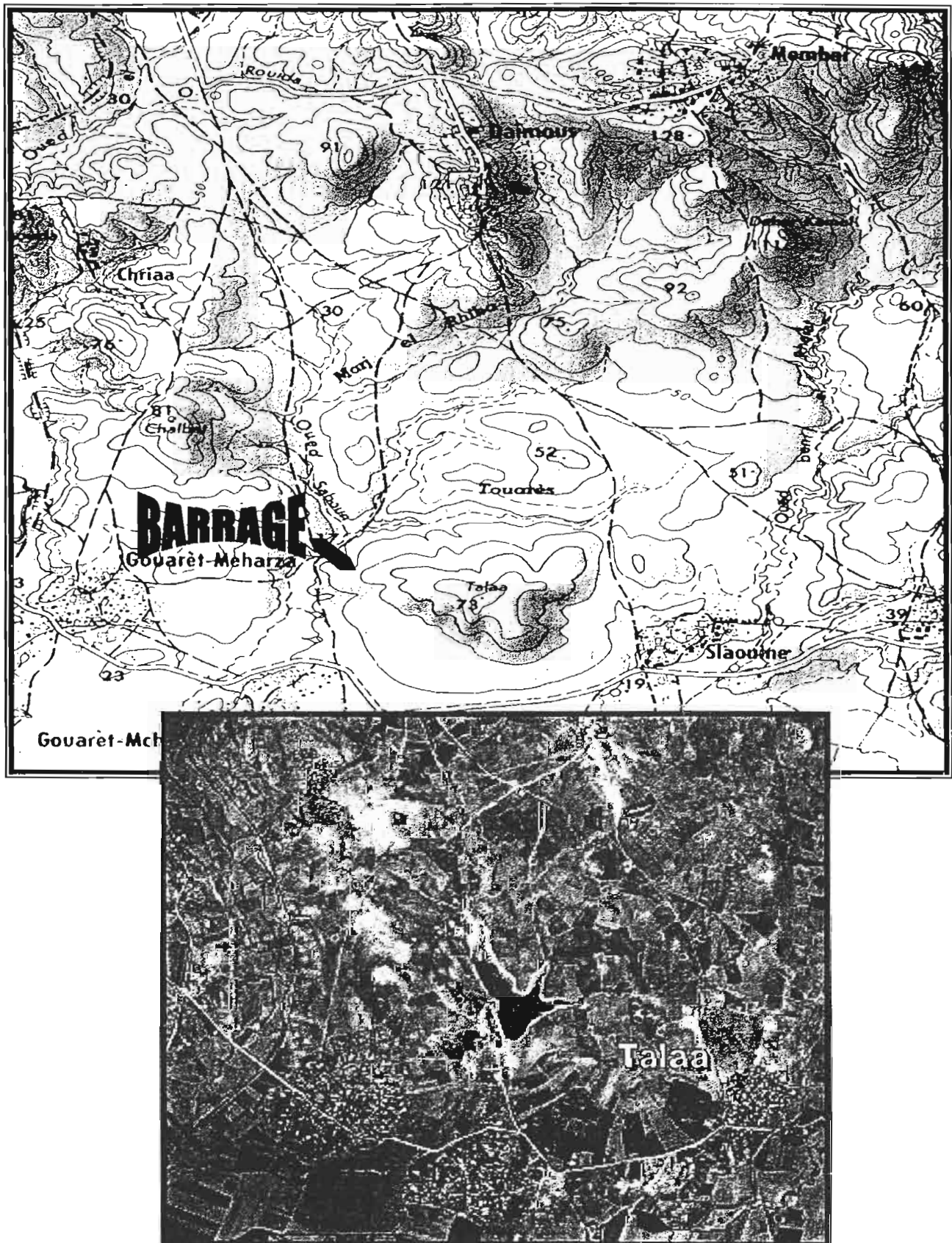
Le bassin de oued Saboun appartient a la chaîne rifaine. Le schéma structural de la carte géologique de la feuille de Manzla-Tanger (1/50.000), montre que le bassin de oued Saboun fait partie de l'unité de Tanger (Domaine du Rif externe ), qui est formé essentiellement de marnes schisteuses et marno-calcaire d'âge crétacé supérieur. La couverture pédologique développée sur ces formations est dominée par la classe des sols peu évolués d'érosion et colluviaux sur marnes , des parvertisols et vertisols au pieds de versants et dans les bas-fonds. Les classes de textures argileuse et limono-argileuse dominant et expliquent la grande susceptibilité des terres aux processus de ruissellement et d'érosion.

La pluviométrie moyenne annuelle au niveau du site du barrage est de **756 mm**. Mais comme pour le reste du pays la variabilité inter-annuelle est assez forte et impose à la région des épisodes d'années sèches assez contraignantes. La dernière sécheresse qu'a connu la région de Tanger au début de cette décade et ses pénuries en eau potable pour la ville de Tanger avait suscité un intérêt et une mobilisation nationale envers une politique plus poussée de stockage et d'utilisation des eaux pluviales dans cette région rifaine.

La topographie du bassin versant est typique d'un paysage marneux des collines du Fahs avec ses croupes et ondulations (altitudes allant de 25 à 130m) conférant aux versants des pentes moyennes . L'analyse du modèle numérique du terrain et des cartes de pentes dérivées montre que 55% des versants ont une pente >5%. Les pentes > 5% sont déjà assez importantes pour la genèse et l'accentuation des processus de ruissellement et de détachement du sol (Figures 3 ,4 &5).

L'utilisation des terres est dominée par l'agriculture pluviales avec un biennal céréales/légumineuses. Le système d'élevage est assez intégré à celui de production végétale et le peu des terres de matorral et erme (doums) qui résistent encore sur le sommet des versants sont utilisées comme terrain de parcours. En aval du barrage, les terrasses de Oued Mharhar sont irriguées en partie et connaissent une intensification et une modernisation des techniques culturales et d'irrigation. Le barrage Saboun a pu mobiliser et fournir l'eau nécessaire à ce petit périmètre irrigué.

Figure 2 : Barrage et Bassin Versant Saboun extrait de la carte Topographique (1/50000) et photographie aérienne d'octobre 1992 (échelle non respectée)



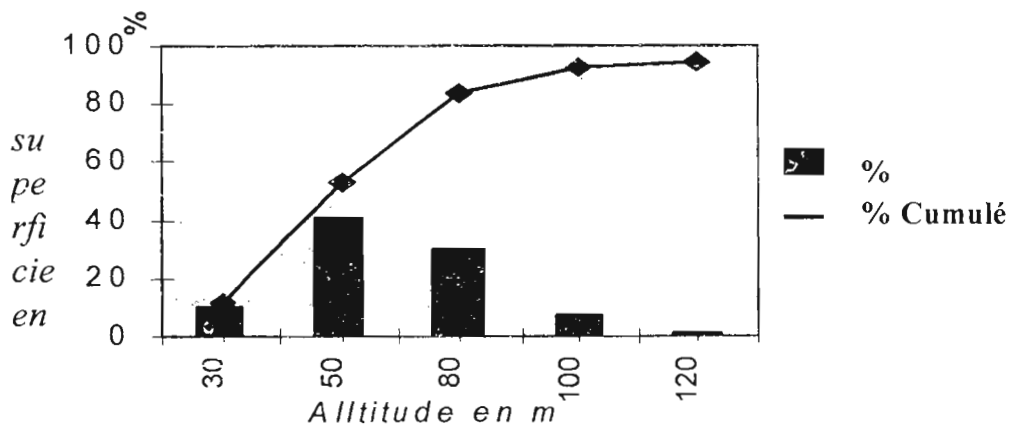
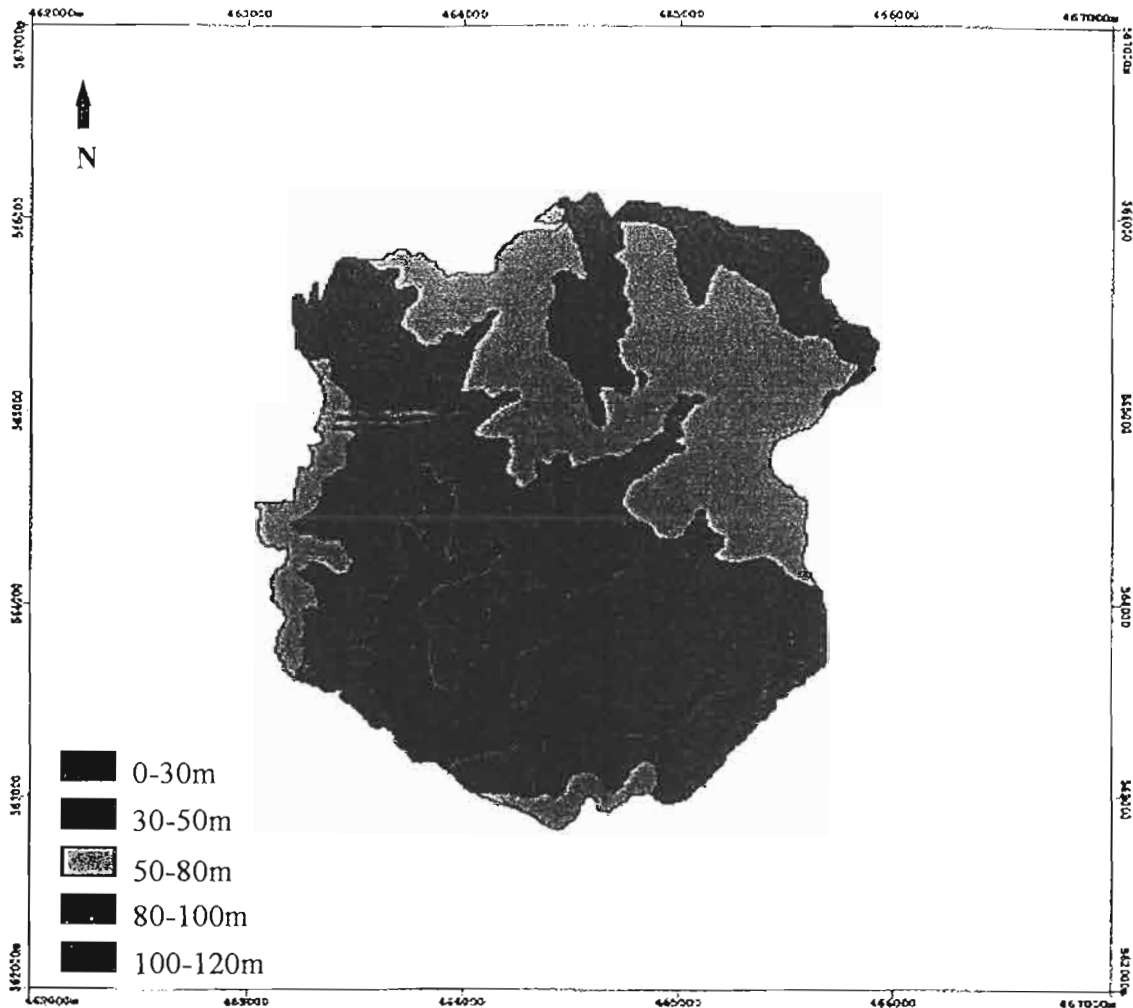


Figure. 3 : Carte et repartition d'altitude de bassin versant de Oued Saboun

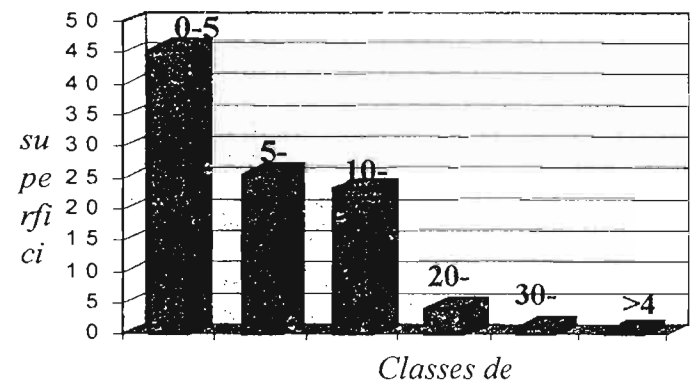
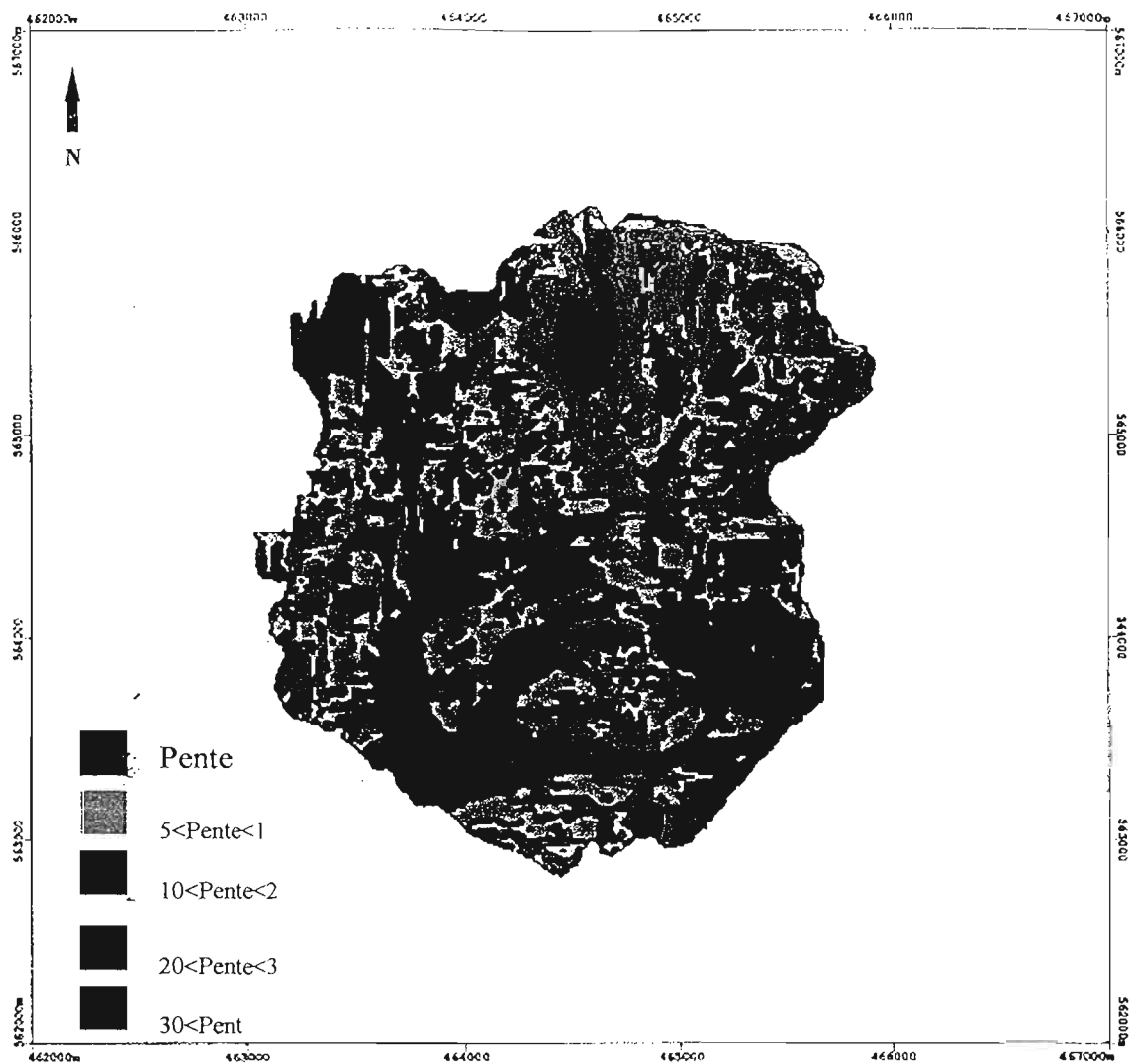


Figure 4 : Carte et répartition des classes de pente de bassin versant de Oued Saboun

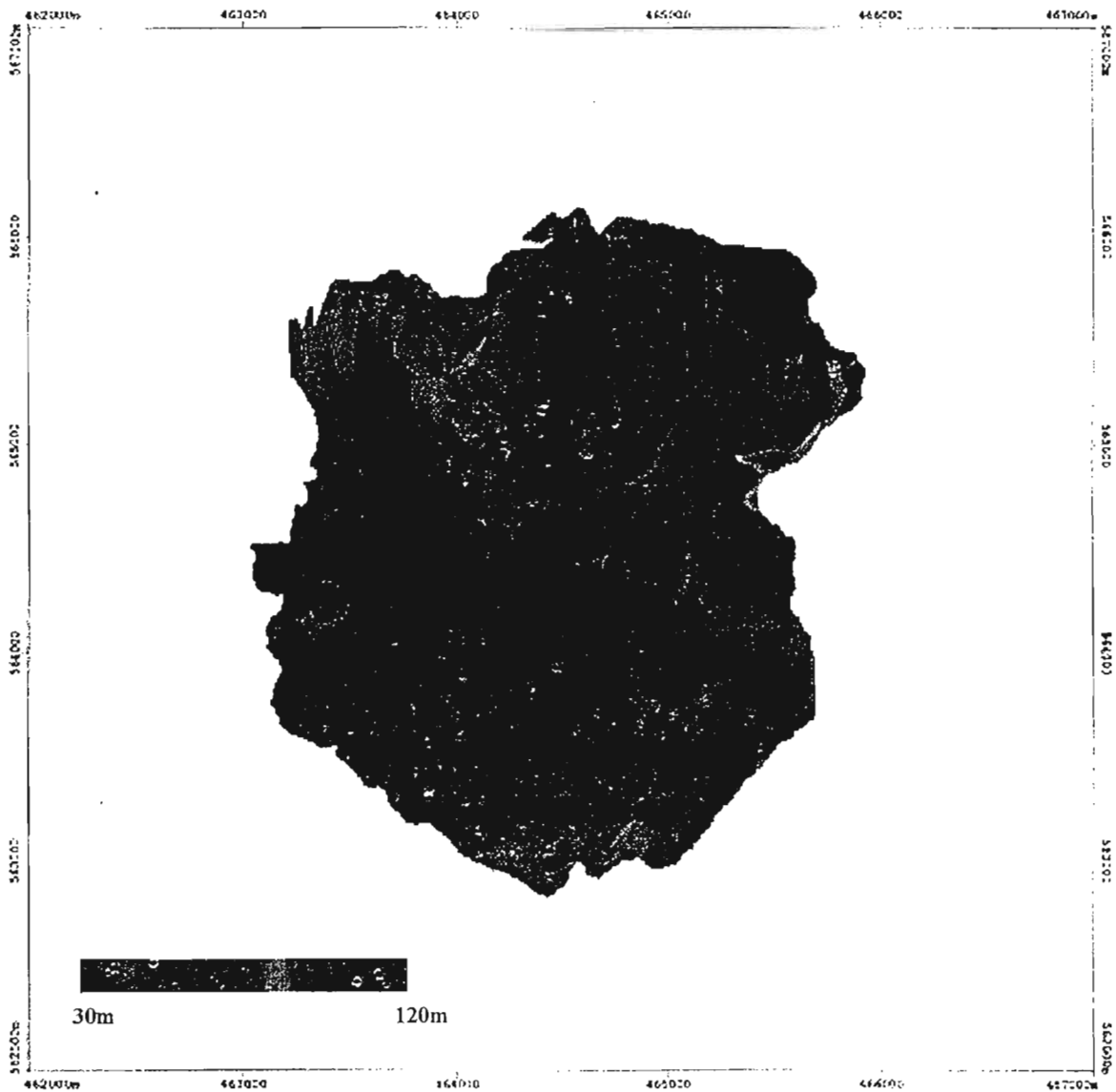


Figure. 5 : Modèle numérique d'altitude MNA de bassin versant de Oued Saboun

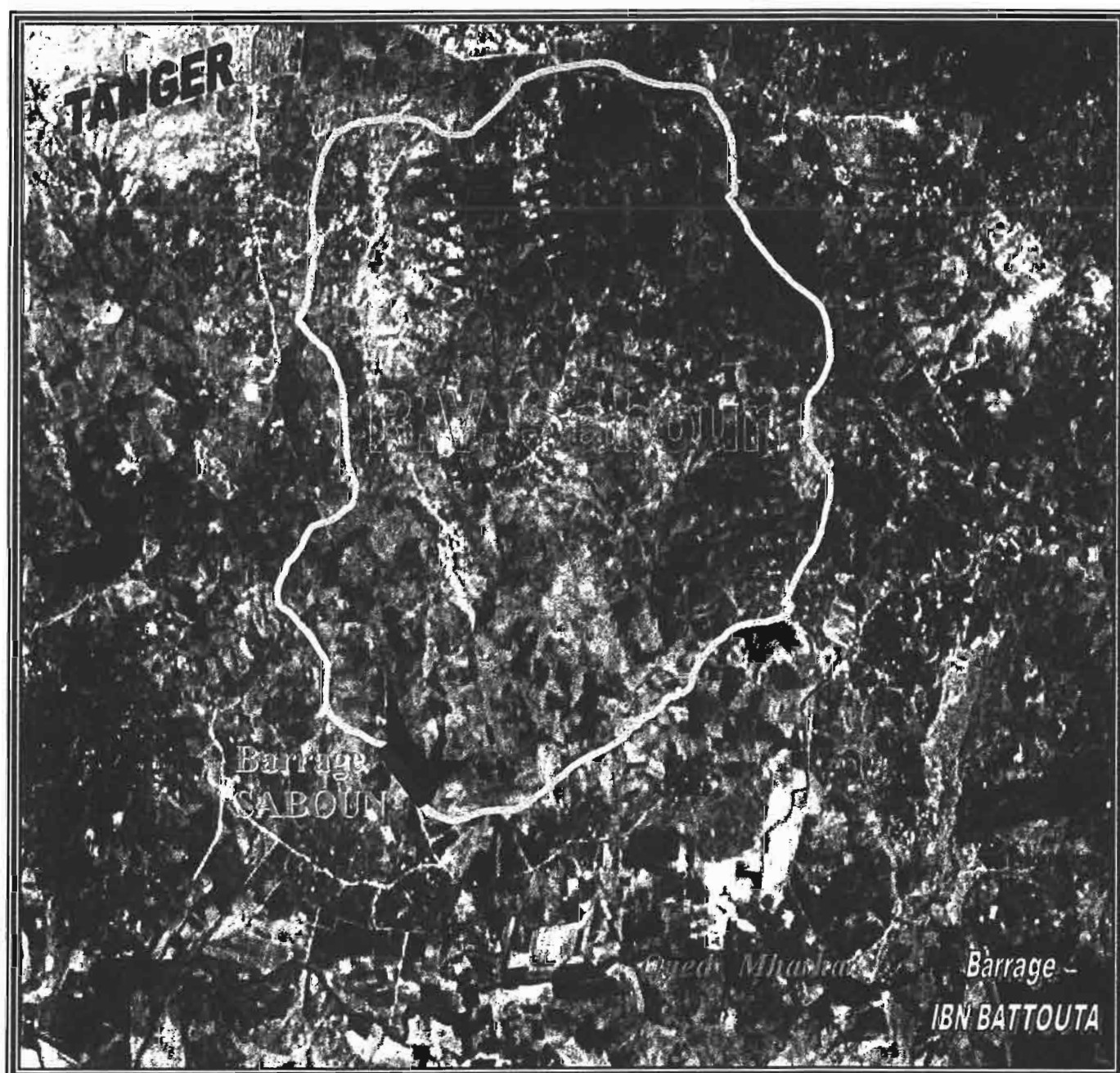
## V. Conclusion

Le site pilote Saboun, répond presque à tous les critères de sélection établis pour l'étude de HYDROMED à l'exception des conditions climatiques (756mm/an) . En effet, il se situe à la limite supérieure des conditions des sites Tunisiens (semi-arides) mais, il présente l'avantage de garantir aux chercheurs hydrologues un menu de données (avers/crués) pour la compréhension de l'hydrosystème (lac/bassin versant) . La durée très limitée (hydrologiquement parlant !)de l'étude (3ans), pose une contrainte pour l'explication du comportement hydrologique des petits bassins arides et semi-arides. Il faut rappeler qu'Hydromed-MAROC a déjà choisi d'autre sites en zones semi-arides (lac de l' Arid près de Roumani à 452 mm/an) et Lac Kouraima près de Rabat (560mm/an) désignés pour un suivi sélectif ( qualité des eaux, précipitation/ ruissellement, traitements anti-érosifs, etc.. ).

Le site Saboun sera donc équipé d'appareils automatiques (limnigraphe, pluviographe, bac d'évaporation, ) pour le suivi hydrologique et de transport solide. Sur le bassin versant le suivi de l'humidité du sol et des paramètres de ruissellement seront suivi en fonction de l'occupation des sols. Le site servira aussi de bassin pédagogique pour nos étudiants et chercheurs dans le Rif occidental. Le bassin Saboun est adjacent à celui de Telata (180 km<sup>2</sup>) qui a été suivi par l'IAV depuis 1977 pour sa dynamique érosive et sa production en sédiments . La région du Rif occidental est bien connue pour sa dégradation spécifique alarmante ( 40t/ha/an ).Le barrage Saboun a aussi l'avantage d'être à côté de l'aéroport de Tanger qui dispose d'une série très longue de données climatiques et fait lui même l'objet d'un suivi depuis 1991 par la Province de Tanger.

L'équipe de l'IAV avec ses partenaires entamera cet été l'installation des équipements suite aux autorisations nécessaires de la part des autorités locales. Il faut rappeler que pour le suivi hydrologique, l'IAV travaillera en étroite collaboration avec la Direction des ressources en eaux (Administration de l'Hydraulique, Rabat). Une convention cadre de collaboration est en cours d'établissement.

# Image SPOT (18/8/96) du Bassin Versant du Barrage Collinaire Saboun



**HYDROMED - Program of Research  
on Hill Reservoirs in the  
Semi-Arid zone of the  
Mediterranean Periphery.**

**Progress Report on activities carried out between  
November 1996 and April 1997**

**R. Ragab. and B. N. Austin**

Institute of Hydrology  
Wallingford, Oxon  
OX10 8BB  
UK

Tel. 01491-838800  
Fax: 01491-692424

April, 1997



## CONTENTS

1. INTRODUCTION
2. PLANNING MEETING IN TUNISIA, JANUARY 6-13, 1997 .
3. LITERATURE REVIEW ON HYDROLOGICAL PROCESSES AND HYDROLOGICAL MODELS IN SEMI-ARID REGIONS.
4. DATA COLLATION , ANALYSIS AND PRELIMINARY RESULTS OF DATA OF EL-GOUAZINE RESERVOIR SITE IN TUNISIA.
5. CONTRIBUTION TO EUROPEAN GEOPHYSICAL SOCIETY, EGS MEETING IN VIENNA, AUSTRIA, APRIL, 1997.
6. PLAN OF WORK FOR 1997-1998.

ANNEX 1

## **1. INTRODUCTION**

This report reflects the progress of work carried out by the Institute of Hydrology IH, Wallingford, UK over the last 6 months from November, 1996 until April 1997. Most of the work reported here has been carried out after the first planning meeting in the second week of January, 1997. In line with IH commitments, the work included conducting a literature review on the hydrological processes and hydrological models for semi-arid regions, collating and analyzing data from Tunisian sites and participation of IH in European Geophysical Society EGS, meeting in Vienna, Austria, April 1997. In addition, the IH plan of work during the 1997-1998 has been outlined. In the following sections brief description of each task is given.

## **2. HYDROMED PLANNING MEETING IN TUNISIA, JANUARY 6-13, 1997.**

Ragab Ragab and Barney Austin from the Institute of Hydrology, attended the meeting. Ragab Ragab described the IH structure, IH involvement in other EU funded projects, IH-Instruments and how IH operates in terms of staff time allocation. He also outlined the IH contribution and commitments to HYDROMED. Barney Austin demonstrated IH software which has been developed to study hill reservoirs in Botswana and might be useful for HYDROMED Project. During the meeting, it has been agreed that IH will help in choosing pilot sites in Syria and Lebanon and will advise on instrumentation. In principle, mutual supervision of Ph.D student(s) from Syria/Lebanon has been agreed between IH and ACSAD. In addition, it has been agreed that Ragab will go to Syria/Lebanon in May, 1997 on a mission with Jean Albergel ( Project Coordinator) to select pilot sites and Barney will follow up the progress on instrumentation and data collection later on in the year (Sept./October).

IH welcomed cooperation with Dr. M. Bergaoui of IIRESA and his team. Dr. Bergaoui is a Team leader with extensive experience in developing / application of Hydrological models linked to GIS under Tunisian conditions. This cooperation will be beneficial to the HYDROMED project.

## **3. LITERATURE REVIEW ON HYDROLOGICAL PROCESSES AND MODELS FOR SEMI - ARID REGIONS.**

An extensive review has been conducted to cover different aspects of the project. This included:

- i) The dominant hydrological processes such as rainfall interception, evapotranspiration, infiltration, surface runoff, soil water movement, plant water uptake, groundwater recharge and evaporation from reservoirs.
- ii) The hydrological models which include simple, conceptual / lumped and distributed models.
- iii) The Reservoir's associated issues which include: reservoirs life time dependence on flooding and siltation, multiple reservoirs and combined reservoir systems and reservoirs. yield analysis.

In the conclusion, It was suggested that the model (to be developed) complexity will depend on the dominant hydrological processes and to a large extent on the data availability and suitability.

The literature review is included as ANNEX 1 of this report.

#### 4. DATA COLLATION, ANALYSIS AND SOME PRELIMINARY RESULTS F EL - GOUAZINE RESERVOIR SITE IN TUNISIA.

Data on the Tunisian reservoirs which ORSTOM have instrumented were taken back to the UK following our visit in January. FORTRAN programs have been written to decode the data in the various formats in which they were presented. Data from all the stations (on all reservoirs) have been decoded and imported into spreadsheets for graphical display and manipulation as well as for simple water balance calculations. When a hydrological model has been developed for estimating the runoff, the coding will no doubt be in FORTRAN.

It has become obvious from the brief inspection of the Tunisian data that the temporal extent of the data will be marginal for model calibration. Hopefully by the end of the study there will be sufficient. Additional data sought includes soil (texture/class), DTMs or topographic maps and any information on reservoir abstraction/irrigation.

There are (at present) insufficient data to perform reservoir yield or probability of failure analysis. This is particularly true as none of the reservoirs appears to have reached a plausibly "steady state" (even when accounting for the effect of siltation). Probability failure analysis is further hampered by the fact that there seem to be very little information on the volumes and timing of abstractions from the reservoirs. At a future date it will prove useful to liaise with the sociologists and geographers involved with the project to try to estimate these values. At the very least we need to know how many pumps are being used on each of the reservoir sites, what type of crops are being grown and what the areal extent of irrigation is. These information have probably already been collected by ORSTOM and incorporated into their water balance models.

During our visit to the Tunisian water authorities on the last day of the January meeting, the need for a reservoir yield estimation technique was identified. As discussed, this needs more data than those readily available from the ORSTOM loggers. Several researchers have praised the benefits of regionalisation techniques for this sort of work, but it is not known if there are any similar gauged catchments in Tunisia. These will perhaps be identified at a later date.

There are other possible sources of data such as the climate data available on the CRU World Climate Disc (of which IH hold a copy) contains various climatic information including monthly rainfall for 9 stations in Tunisia. These are:

- Ain Draham
- Djerba Mellita
- Gabes
- Gafsa
- Jendouba
- Kairouan
- Medenine
- Sfax El-Maou
- Tunis-Carthage

Some of these raingauge stations have been in operation since the start of the century. Catchment and reservoir characteristics are provided in the ORSTOM information sheets. Reservoir volume, daily rainfall, spillway flow and evaporation have been collected and provided on diskette. A number of authors (identified in the literature review) state that, in semi-arid conditions, the runoff is most often Hortonian. With this in mind, it was decided to take the World Climate Disc rainfall data for Kairouan and assume that the same rainfall pattern occurred at El Gouazine (see Figure 1). This assumption only was made in order to illustrate the temporal distribution rather than to obtain absolute quantities.

With an appropriate loss factor and percent runoff, it is possible to make the long term average annual inflow to El Gouazine the same as it was for the 1994 - 1995 period as recorded by ORSTOM (see Figure 2). Monthly evaporation is known and a pattern of abstraction from the reservoir for irrigation is assumed. These are sufficient information to calculate the probability of failure from drought of the reservoir. Parks *et al.* (1982)

described the benefits of the Gould probability matrix method on semi-arid catchments. This method has been applied in step by step as follows:

1. Decide on abstraction quantities and any releases that may be required. These may need to be modified (and taken into account in the program) if the reservoir falls below a certain level.
2. Determine the net evaporation from the reservoir as a function of its contents (and therefore surface area) and time of year.
3. Set up a tally sheet to construct the transition matrix (a 2-dimensional array in the computer program). This is done by dividing up the reservoir into 20 (or more) equal volume zones (including exactly empty and exactly full).
4. Apply the continuity equation (see below) for reservoir balance starting the reservoir in each of the 20 zones and for each of the years of monthly data available and tally the number of time the reservoir "ends up" in each of the zones. Divide each column by  $N \times K$  where  $N$  is the number of years of data and  $K$  is the number of zones.

$$V(t+1) = V(t) + Q_{in}(t) - Abs(t) - \Delta E_{net}(t)$$

5. Count the number of times (and number of months) the reservoir fails for each of the starting zones. Divide each entry by  $12 \times N$ .
6. Compute the steady state matrix of the first matrix by any technique. The "power up" technique has been chosen whereby the matrix is multiplied by itself until it reaches steady state. An alternative is to solve by simultaneous equations (not as easy in FORTRAN).
7. The multiplication of the two matrices (arrays) derived gives the probability of failure of the reservoir.

#### Limitations and benefits of the Gould Probability Matrix Method

1. This method assumes that the annual serial correlation of flow is zero. This is probably true for most semi-arid catchments.
2. The method produces slightly different results depending on the month in which the simulation starts. This uncertainty can be avoided by starting the simulation at the end of the dry season (July/August in the El Gouazine/Kairouan case).
3. The procedure samples all years of data without reference to the sequence and therefore is particularly suitable for catchments with patchy data.
4. Results are independent of the initial reservoir conditions.
5. The method assumes stationarity in both climate and reservoir conditions such as sitiation (which may not be a good idea for our catchments) and abstraction policies.

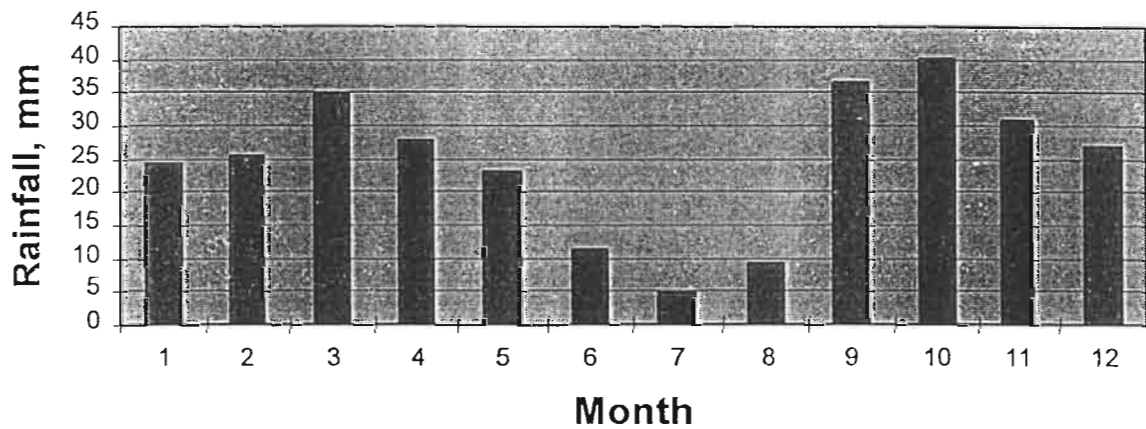
The calculation program is written in FORTRAN code and runs on a monthly time step. The program ( FORTRAN Code) is freely available for HYDROMED project members.

Using this data and applying the program, the probability of failure for a hypothetical reservoir similar to El Gouazine was determined to be 0.012 ie a failure only once in approximately 80 years due to drought. This of course does not take into account the effect of siltation of the reservoir, and it is quite likely that a figure much too low (underestimation) has been used for the abstraction. The second is very easy to change, but the first is a limitation of the Gould method - the simulation assumes stationarity. It of

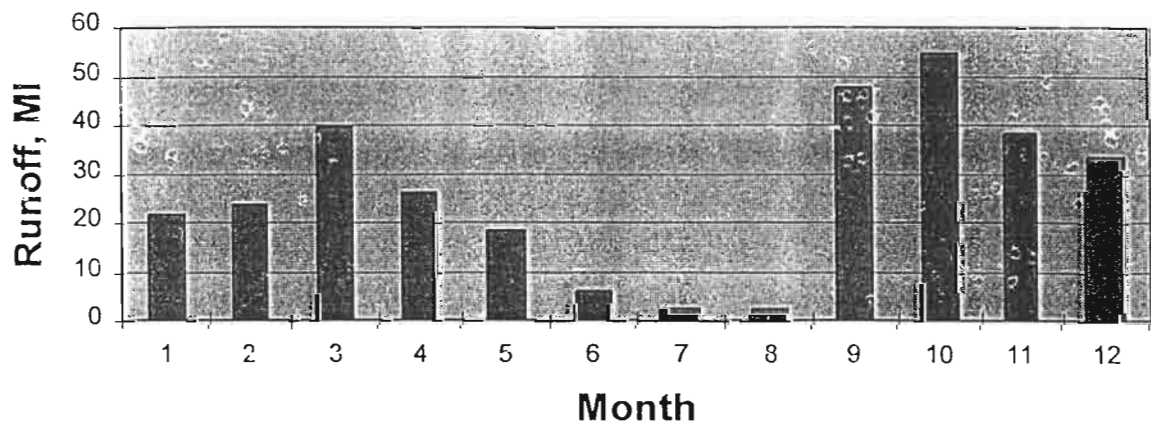
course does not allow for a very large event which might wash out the spillway and cause the reservoir to fail as well. This analysis should (and can) be done separately.

It is envisaged that the same method will be applied to catchments in Syria and Lebanon and the others in Tunisia. The Gould method is usually used before construction of the reservoir in order to test the suitability of a site, rather than afterwards as has been done here (and this may already have been done). This can be done knowing the contours of the valley where the reservoir is intended to be and estimates of both the intended abstractions and evaporation from the surface.

**Figure 1 - Average Monthly Rainfall at Kairouan**  
(1900-1989, World Climate Disc data)



**Figure 2 - Estimated Monthly Runoff at El Gouazine**  
(from Kairouan rainfall)



## REFERENCES

Parks, Y.P., Farquharson, F.A.K. & Plinston, D.T. 1989. Use of the Gould probability matrix method of reservoir design in arid and semi-arid regions. Anonymous The State-of-the-Art of Hydrology and Hydrogeology in the Arid and Semi-Arid Areas of Africa. pp 234-41. IWRA.

### 6. **IH CONTRIBUTION TO THE EUROPEAN GEOPHYSICAL SOCIETY EGS, MEETING IN VIENNA, AUSTRIA, APRIL 21-25, 1997.**

The European Geophysical Society holds annual meetings in different countries in Europe. These meetings bring many Scientists from all over the world together to exchange ideas and update their knowledge. IH is contributing this year an oral presentation in the Hydrological Science session. The contribution has been submitted as abstract and accepted for oral presentation (Barney Austin is giving the presentation). A copy of the abstract is given here under.

### **A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR HILL RESERVOIRS IN THE SEMI-ARID ZONE OF THE MEDITERRANEAN PERIPHERY**

R.Ragab, K.Sene and B.Austin  
Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, OX10 8BB, UK

In the Tunisian State, it is proposed to build a thousand small hill reservoirs (10 000 to  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>) by the year 2000. There are currently 250 such reservoirs. Benefits of these reservoirs are seen in the form of flood protection of cities and infrastructure downstream and increased availability of water for humans, livestock and agriculture which in turn promotes the economy.

This project, which is funded by the European Union, will attempt to develop a decision support system for the construction and efficient management of these types of reservoirs which in turn requires a sound hydrological study of the region. Hydrological models accounting for Sediment transport, rainfall-runoff, infiltration, evapotranspiration, groundwater recharge and evaporation from reservoirs will be developed bearing in mind the availability of data. Working with EU partners, several experimental sites will be chosen and a data collection scheme instigated. It is expected that results of the project will be useful to Mediterranean policy and decision makers, hydrologists and farmers.

### 7. **IH PLAN OF WORK FOR 1997-1998**

IH contribution in 1997-1998 will cover the following activities:

1. Taking part in pilot sites selection in Syria and Lebanon. This task will include short visits to both countries.
2. Advise on instrumentation, data collection and training.
3. Collating existing data from test sites in Tunisia, Syria and Lebanon. This task will be associated with establishing IH- data bank for HYDROMED.
4. Analyze data, identifying gaps and formatting for model calibration.
5. Initiate model development and possibly preliminary calibration.

**Annex 1**

**Hydrology of semi-arid  
Mediterranean catchments with  
hill reservoirs**

**An overview of hydrological models and  
processes**

1 H 0



## Executive Summary

Mediterranean countries could make a better use of their water resources by constructing small hill reservoirs. Indeed countries such as Tunisia, Algeria, Morocco, Syria and Lebanon are known world wide for their water harvesting techniques, have a large number of small dams, with many more planned for the years to come. Gaining more understanding of the dominant hydrological processes operating in such environment will help in construction as well as in sustainable water use of these reservoirs. These goals can be achieved by conducting field observations and modelling studies. After being validated, models can be used as a management tool. Indeed, this is one of the main objectives of HYDROMED project.

Given the fact that, the hydrology of semi-arid is different from humid and sub-humid regions, one would expect that models developed for humid regions are not necessarily applicable to other climatic regions. The semi-arid region of the Mediterranean basin has specific climatic conditions associated mainly with very erratic pattern of rainfall with respect to time, duration, intensity and amount. Conceptual as well as physically-based models have been briefly described. Probability Distributed Model PDM, PITMAN model, MODHYDROLOG model, are given as examples of conceptual models while TOPMODEL, SHE, IHDM, IHC and PATTERN models are given as examples of physically-based distributed models. PATTERN model which has been developed under EFEDA programme (EU funded) for semi-arid Mediterranean basin has been highlighted. The hydrological processes operating in catchment with hill reservoirs were described in physical and mathematical terms. These processes included, rainfall variability, rainfall interception by crops, grass and trees, evapotranspiration, evaporation from lake reservoirs, infiltration, surface runoff, water movement in the root zone / vadose, root water uptake and groundwater recharge. In addition, some other issues related to the reservoirs such as life time dependence on flooding and siltation, storage capacity and safe yield, water abstraction for irrigation and other activities and construction of small single reservoirs or combined big reservoir are discussed.

The degree of complexity of hydrological models depends to a large extent on the complexity of the hydrological processes included in the model. The hydrological processes mentioned in this report are described by several approaches ranging from very simple to very complex. These different approaches would help in developing a suitable model for the region under investigation. Simple or complex representation of the processes and consequently the model will depend largely on data availability and suitability. Data under collection from different sites in Tunisia, Syria, and Lebanon are being assessed and model development is expected to commence. The model development will greatly benefit from this review of the hydrological processes and existing models. Its degree of complexity will be determined by the availability and suitability of the past and present data of the test sites.

# Contents

## EXECUTIVE SUMMARY

1. INTRODUCTION
  2. RESERVOIR WATER BALANCE
    - 2.1 Simple water balance models
    - 2.2 Unit hydrographs
    - 2.3 Conceptual models
      - 2.3.1 The Pitman model
      - 2.3.2 The PDM model
      - 2.3.3 MOHYDROLOG
    - 2.4 Physically-based distributed models
      - 2.4.1 The PATTERN model
    - 2.5 The hydrological processes
      - 2.5.1 Rainfall and Rainfall variability
      - 2.5.2 Rainfall interception
      - 2.5.3 Infiltration
      - 2.5.4 Surface runoff
      - 2.5.5 Evapotranspiration
      - 2.5.6 Evaporation from reservoirs
      - 2.5.7 Water transport in soil
      - 2.5.8 Water uptake and transpiration
      - 2.5.9 Groundwater recharge
    - 2.6 Choice / developing a hydrological model: simple versus complex model
  3. RESERVOIR YIELD ANALYSIS
    - 3.1 Critical period techniques
    - 3.2 Probability matrix methods
    - 3.3 Using stochastically generated flow sequences
    - 3.4 Crop water requirement and irrigation
    - 3.5 Multiple reservoir systems
    - 3.6 Combined systems
    - 3.7 Reservoir life time
      - 3.7.1 Flooding
      - 3.7.2 Siltation
  4. CONCLUSIONS
- REFERENCES

# 1. Introduction

It is proposed that many Mediterranean countries could make better use of their water resources by constructing small hill reservoirs. Indeed countries such as Tunisia are known world wide for their water harvesting techniques, have a large number of small dams, with many more planned for the years to come (Prinz, 1995). Gomer (1996) presented research carried out on similar catchments in Algeria. A very broad view of integrated rural water management throughout the world is presented by FAO (1993). A study of a Mediterranean hill reservoir in Greece is presented in a paper by Ghini and Tsoumanis (1995).

The proposal in Tunisia is to build a thousand hill reservoirs by the year 2000. At present, 250 have already been constructed. During the course of the HYDROMED project, a number of pilot sites will be chosen amongst the participating Mediterranean countries and the catchment and reservoir dynamics modelled. A dam and reservoir should already exist on each of the pilot sites with a dyke. The reservoir volume should be less than 1 Mm<sup>3</sup>. The climate should be consistent with the existing sites (semi-arid with annual rainfall between 150 and 700mm). In the ideal case, a hydrological record will exist for the chosen site. Any additional data renders the exercise more likely to succeed.

During the first HYDROMED meeting in Tunis, in January 1997, it was decided that each European organisation involved should carry out a brief literature review of models and recent progression in research into semi-arid hill reservoirs, each organisation being responsible for their field of expertise. It was proposed that the Institute of Hydrology should be involved with rainfall-runoff modelling. Simple extrapolation from humid-zone hydrological models to arid and semi-arid catchments is not likely to work, the most important components of the model being different and the model validation carried out no longer applicable (Loague and Freeze, 1985). While obviously linked to the hydrology, the subject of erosion is only touched on lightly as it is expected that the expertise at ORSTOM will tackle these issues.

It is hoped that the expertise of the various organisations involved in this project together with a review of work carried out by other organisations and the data collected will assist in the choice of site, construction, maintenance and operation of hill reservoirs in the member countries. The following is a review of suitable hydrological models, experience in their application to semi-arid catchments, and the different approaches to simulate each hydrological process.

## 2. Reservoir Water Balance

Concentrating on the hydrology, the components of water balance of a reservoir and its associated catchment is visualised in Figure 1. If we look more specifically at the reservoir itself, the change in volume of water,  $\Delta V$ , contained over a given period of time can be written as :

$$\Delta V = Q_{in} + P_{lat} + R - Q_{out} - Abs - Leak - E \quad (1)$$

where

$Q_{in}$	=	Reservoir inflow.
$Q_{out}$	=	Spillway outflow (all forms of reservoir release).
Abs	=	Abstraction or pumping.
Leak	=	Water lost through leakage to the aquifer or through the dam.
$P_{lat}$	=	Water entering the reservoir through groundwater flow.
R	=	Rainfall on the reservoir.
E	=	Actual evaporation from the reservoir surface.

Probably the most important variable in determining the water balance of a reservoir is the reservoir inflow,  $Q_{in}$ . The reservoir inflow is usually the catchment surface runoff, and for this it is necessary to know something about the physical characteristics of the contributing catchment. Occasionally a reservoir is filled by a local spring and in this case a hydrogeological study of the region is necessary.

Of the various types of surface runoff models available to hydrologists, the physically-based model where parameters in the model are determined by measurable features of the catchment needs more data, but the data relates to real, measurable catchment characteristics and the model usually only requires moderate calibration. The conceptual model, where some of the parameters may be loosely related to catchment characteristics demands less input data, but may require extensive calibration.

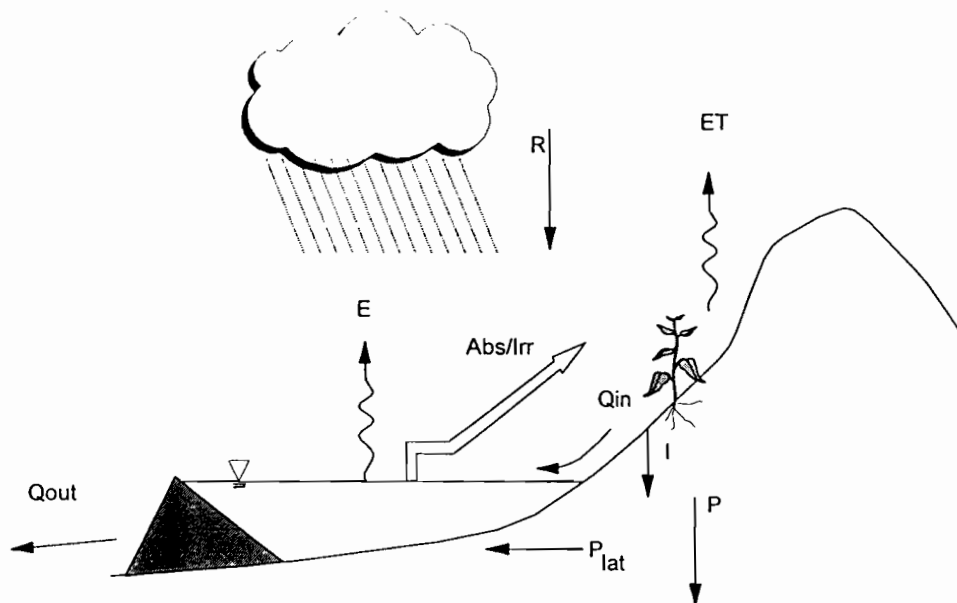


Figure 1 The components involved in estimating the water balance of a reservoir.

## 2.1 SIMPLE WATER BALANCE MODELS

In many cases it is not necessary to model the catchment surface runoff because adequate rainfall, evaporation and reservoir release, abstraction and volume records exist. In this case the system can be modelled using a simple spreadsheet, and straight-forward statistics used to estimate the frequency of reservoir failure and any change in abstraction or release policy. No attempt is made to model the physical processes such as infiltration, and the model is not able to predict runoff very effectively. Most of the UK water companies use simple spreadsheet water balance models for the day to day operation of their water supply reservoirs.

Choosing the appropriate time step is important - too small a value does not yield any additional information and a time step too large results in the reservoir being poorly modelled (for example the case where the reservoir goes from full to empty within one time step). It might be appropriate to model the water balance of a reservoir on a daily time step and to model the finer effects of surface runoff on a 5 minute time step, not necessarily linking the two.

## 2.2 UNIT HYDROGRAPHS

The Unit Hydrograph (UH) method whereby the runoff is assumed to be a linear response to rainfall and a unit of effective rainfall is constructed from observed flow data is probably the simplest method. Jakeman *et al.* (1990) describe the IHACRES computer package which constructs an instantaneous unit hydrograph (or a linear convolution of one) from a rainfall and streamflow record. The package determines the excess rainfall and separates streamflow into quick and slow response components.

Where flow data are not available, a synthetic unit hydrograph (SUH) can be constructed using the methods of the UK Flood Studies Report (FSR), US Soil Conservation Service (SCS), Snyder (1938), Nash (1959) or others based on catchment characteristics. DeLaine

(1970) proposed a method in which knowledge of the rainfall is not necessary, assuming instead that for two independent events, there is a common UH. When the timing of the flood hydrograph is not important, the SCS method also provides a simple equation for determining the daily runoff from daily rainfall. This is calculated as a function of the rainfall and parameters relating to the soil type and soil moisture condition (tabulated values).

The main weakness of any UH model lies in preprocessing. It is necessary to determine the effective rainfall (ie that part which has not infiltrated) and the baseflow component. In addition, although the issue is often debated, it appears that the rainfall-runoff process may not be linear for semi-arid catchments (see Binley *et al.*, 1989, Ye *et al.*, 1997 and discussion in Karnieli and Ben-Asher, 1993) thus making use of the UH inappropriate.

The UH method, or derivatives of, are usually used in situations where it is important to know the peak flow rate or flow at a given instant. In the UK where dam and spillway design are under intense scrutiny, the UH method is the recommended procedure. On the other hand, frequency of failure (drought) studies are usually performed using a simple spreadsheet model and statistics. This is discussed in later sections.

## 2.3 CONCEPTUAL MODELS

The rainfall-runoff process is a complex one but can be thought of as a series of linked processes and reservoirs. Conceptual models attempt to model these processes mathematically - not always based on measurable variables and have been used for more than 30 years. The earliest and simplest models include the O'Donnell model (based on four well-defined storages) and the HYRRM model, developed at IH, based on only nine parameters.

Each of the many conceptual models commercially available are structured slightly differently using different configurations of processes and storages and mathematical equations to derive them. The following is a description of three conceptual models currently used in semi-arid regions.

### 2.3.1 The Pitman model

The Pitman (1973) model (Figure 2) is used where catchment information is scarce. Monthly runoff in this model is determined as a function of the catchment absorption rate ( $Z$ ) and the maximum moisture parameter ( $ST$ ).  $ST$  is depleted by evaporation and drainage using a non-linear soil moisture runoff formulation. A daily version of the Pitman model is also available for smaller catchments. The model has been successfully applied to South African catchments (Pitman, 1973, Hughes, 1995 and Görgens, 1983), and in Botswana (Meigh, 1992). Mostert *et al.* (1993) reported problems in arid regions due to the great temporal variability of rainfall - a very wet year promotes vegetation to such an extent that the runoff potential is reduced for up to three years. The problem is compounded for ephemeral catchments; when there is no streamflow, there is no information on soil moisture status unless directly measured, (although Pilgrim (1988) suggests that in the semi-arid case, infiltration and therefore runoff, is somewhat easier to estimate. This is because the high probability that soil water stores will be empty at the beginning of a regime of storm events will often decrease the impact of errors in estimating soil water losses between storms). The model proposed by Mostert *et al.* (1993) (a slight variation of the Pitman model) includes an additional antecedent weighting factor for calculating the runoff relating to the rainfall in previous seasons. The Pitman model is widely used in Southern Africa.

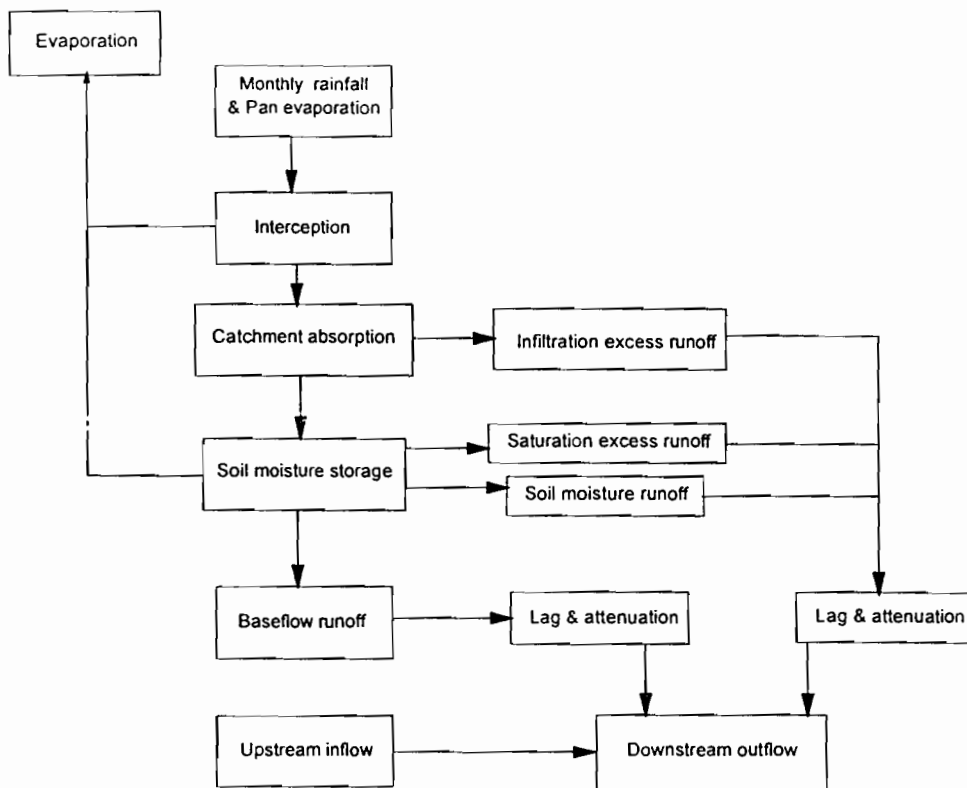


Figure 2 Schematic of the functioning of the Pitman model (adapted from Hughes, 1994)

### 2.3.2 The PDM model

The Probability Distributed Model (Moore, 1991) is a general conceptual rainfall-runoff model, developed at IH, which transforms rainfall and evaporation data to flow at a catchment outlet. A probability-distributed store model is used to partition the water into surface runoff, groundwater recharge and soil moisture storage. Direct runoff is routed through a "fast response system" which is meant to represent overland and channel flow and a "slow response system" which represents groundwater movement and other slow flow paths. Both routing systems can be defined by a non-linear storage reservoir or a cascade of two linear reservoirs. Groundwater demand can be built into the recharge process. Background flow such as reservoir releases can be built in if required. The model is specifically designed for real-time forecasting of flow and can be updated using recent measurements of water balance, however it can be calibrated on a single, or multiple events. A large-scale distributed model which uses the PDM algorithms is described in Meigh *et al.* (1997). The PDM model is used extensively for various hydrological studies at the Institute of Hydrology, although admittedly not often on semi-arid catchments.

### 2.3.3 MODHYDROLOG

The Australian conceptual daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG (Figure 3) is used extensively in Australia on a range of different catchments (Chiew and McMahon, 1994). It is a modification of the more simple HYDROLOG model designed by McMahon at Monash University in 1976. Both models require as input potential evapotranspiration and rainfall, and runoff (to calibrate the model). Sensitivity studies on the relative importance of the parameters in both models have been carried out by Chiew and McMahon (1990) for semi-arid catchments using the HYDROMOD model and by Chiew and McMahon (1994) on a range of different catchments using the MODHYDROLOG model. Chiew *et al.* (1993) find that MODHYDROLOG generally performs better than simple or complex daily time series

models (with empirical equations relating runoff to the rainfall time series). Weeks and Hebbert (1980) find that HYDROLOG generally performs better than other commonly used conceptual models such as the Stanford (Crawford and Linsley, 1966), Sacramento (Burnash *et al.*, 1973) and Boughton (1966) models for a selection of Australian catchments. The advantage of these Australian models is that they have been tried and tested on semi-arid catchments, and that many of the parameters are related to physical and climatic characteristics of the catchments. The main disadvantage is that MODHYDROLOG requires 19 parameters to be defined. Some, but not all of these parameters may be measured. Chiew and McMahon (1994) suggest that a few of these are not very sensitive and may be set to constants, and the same paper shows how other parameters correlate well (or not so well) with physical characteristics of the catchment (such as soil texture class, vegetation cover, stream length, catchment slope and stream-aquifer interaction - see Appendix of Chiew and McMahon (1994) for more details). It seems likely that the model would work effectively with only 6 or 7 variables. Further details of this model have been requested from the authors.



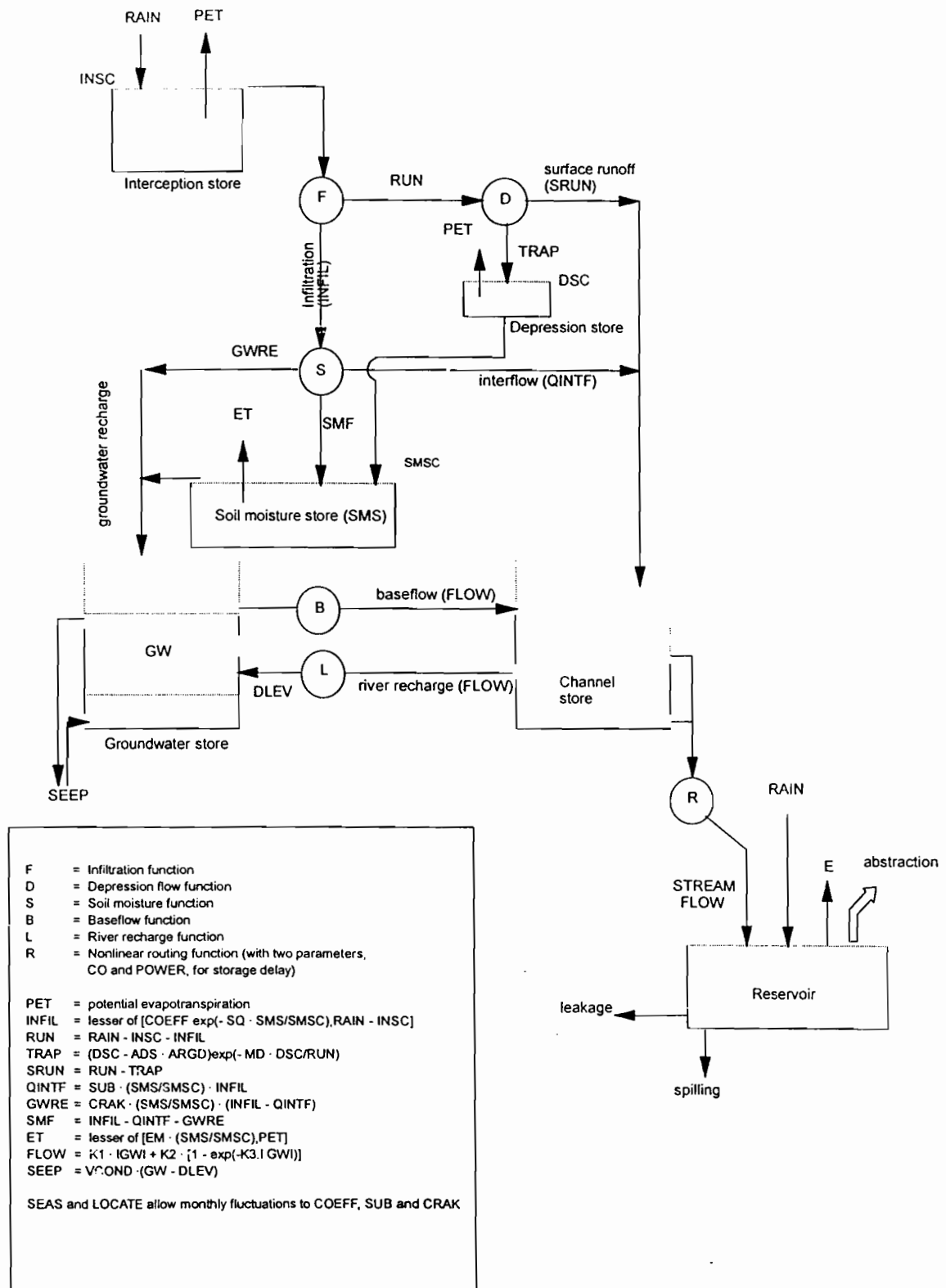


Figure 3 Schematic representation of the MODHYDROLOG daily rainfall-runoff model (adapted from Chiew et al, 1993)

## 2.4 PHYSICALLY-BASED DISTRIBUTED MODELS

If concerned with modelling the distributed nature of a catchment, then choice of type of model is important. TOPMODEL and SHE are examples of distributed models which are widely used in Europe. Distributed models divide catchments on either a grid basis, according to hydrologically homogeneous regions or into subcatchments. Subcatchments are linked by channel routing equations (incorporating the high channel losses which may be present in arid and semi-arid catchments). Models such as TOPMODEL attempt to predict the hillslope flowpaths using digital terrain models. Quinn *et al.* (1991) discuss the accuracy of such models. Grid-based models usually use the slope of the land to predict overland flow rates, but models which lump hydrologically homogeneous regions often misplace the timing of the runoff.

Lumped conceptual models such as the Boughton or Pitman models may work on a catchment basis, but make no allowance for the variability of characteristics within the catchment. Physically-based distributed models such as SHE (see Abbot *et al.* 1986 for general structure and and Bathurst, 1986 for performance of this model on upland catchments) and IHDM (Beven *et al.*, 1987) attempt to model the spatial variability of parameters and processes and in addition, attempt to relate measurable catchment characteristics to parameters in the model. As such, a much better understanding of the physical processes is required.

### 2.4.1 The PATTERN Model

The PATTERN model (Mulligan, 1996) is a physically - based hydrology and plant growth model developed for semi-arid Mediterranean basin to simulate the effect of climatic variability and climatic change on plant growth and hydrological exchanges between soil vegetation and atmosphere for variable soil and surface cover types over landscape positions. The model consists of a weather generator and a hydrology-plant growth model. The model can run as a grid based representation of spatial distribution of soil and vegetation properties for a particular slope segment, with the grid cells connected by overland flow and as a non distributed model with no X, Y spatial components with unconnected cells. The schematic diagram shows the spatial distribution for range of soils and vegetation within landscape (Figure 4).

The hydrology components of the PATTERN model simulates infiltration, detention storage, overland flow, Evaporation from bare soil and transpiration from vegetation canopy. The hydrological equations are integrated at sunrise and sunset and at a bucket tip resolution during precipitation. The bucket type model considers the effect of horizontal, but not vertical , spatial variation in soil depth, bulk density and stone content on soil moisture capacity. Surface cover is represented as fractional vegetation cover and soil surface stone cover which influences the infiltration and soil evaporation processes as shown in Figure 5.

The model has been developed under EFEDA Project (EU - funded) and applied on the Upper Gudian catchment in Spain.

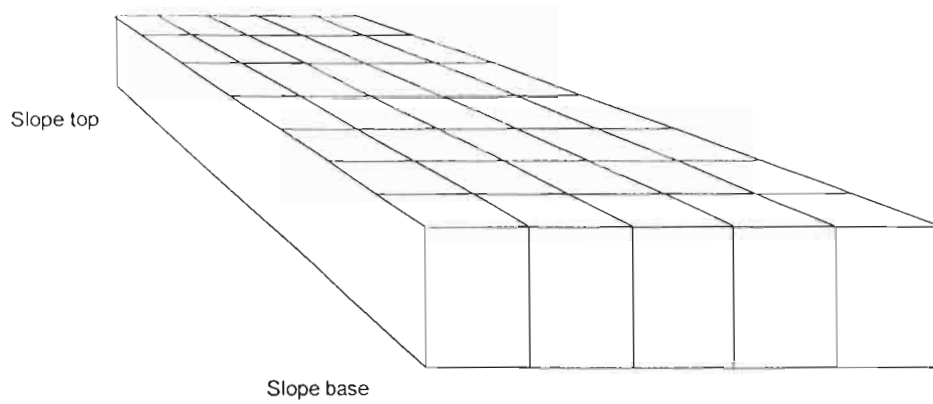


Figure 4 Spatial distribution for range of soils and vegetation within lanscape (adapted from Mulligan, 1996)

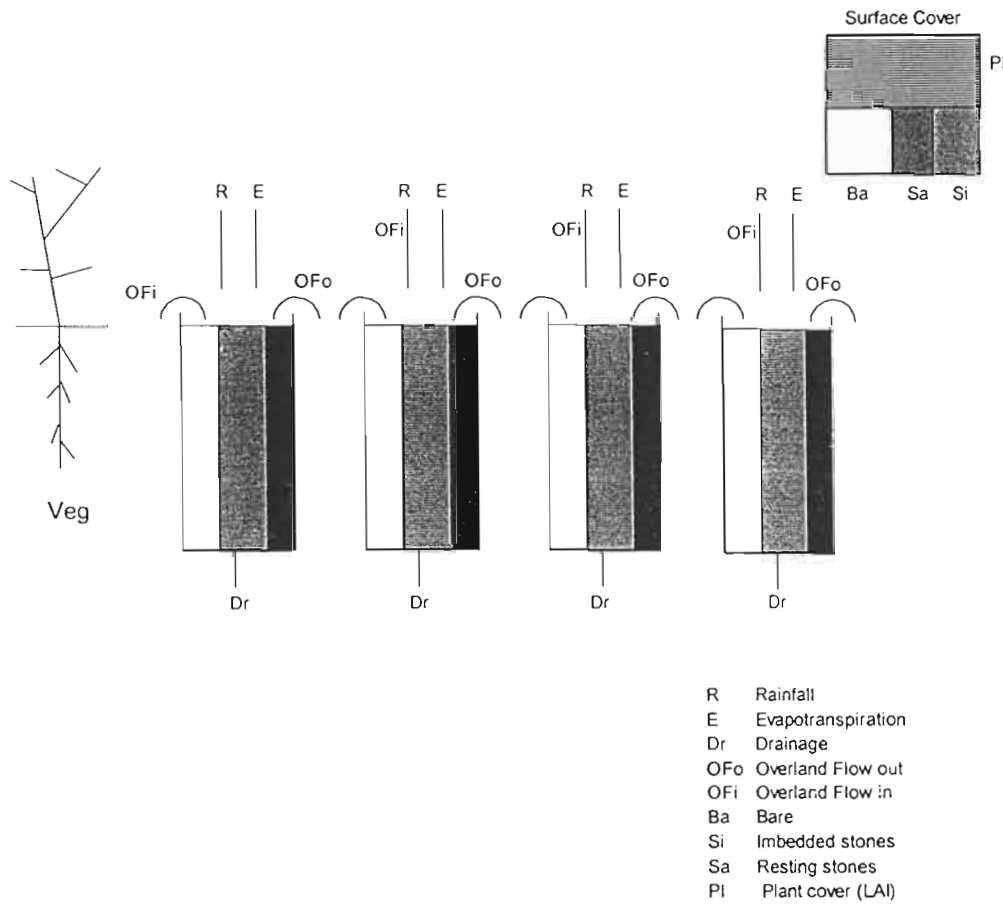


Figure 5 Hydrological components of the PATTERN model

## 2.5 THE HYDROLOGICAL PROCESSES

The different hydrological processes operating in catchment with small reservoir are illustrated in the schematic diagram of "HYDROMED", Figure 6. In the following sections, the hydrological processes are described in simple (conceptual) as well as in complex (physically - based) approaches.

### 2.5.1 Rainfall and Rainfall variability

Vegetation cover affects the actual evaporation rate, increases the rainfall interception and probably reduces the overland flow. Rainfall itself is highly variable both temporally and spatially and one raingauge on the catchment is often insufficient to predict the catchment average (Seed and Austin, 1990 and Duncan *et al.*, 1993). This variability is more notable in mountainous areas where orographic enhancement or rain shadows may occur (Basist *et al.* (1994) and Garen *et al.* (1994)). Pilgrim *et al.* (1988) suggest that both the temporal and spatial variability of rainfall is higher for arid and semi-arid catchments than in humid regions. The spatial variability problem can be overcome to some extent by the installation of more raingauges on the catchment. The temporal variability issue is addressed when choosing the appropriate type of raingauge. Tipping bucket raingauges, distrometers, acoustic sounders and radars all measure the change in rainfall intensity to varying degrees of accuracy. The tipping bucket raingauge is widely used, but this still requires choosing an appropriate sized "bucket". A bucket too large will not measure the subtle changes in rainfall intensity (perhaps important for soil erosion studies) and a bucket too small risks overflow thereby underestimating the rainfall.

The longer term variability of rainfall, as we might see with climate change, is perhaps beyond the scope of this project, but has been investigated by other researchers for some Mediterranean countries. Chbouki *et al.* (1995) discussed the spatio-temporal patterns of drought in Morocco. Albergel (1987) suggested that in Burkina Faso, prolonged dry periods promote more favourable conditions for runoff, making up for the rainfall deficit. If this is true for the countries involved in HYDROMED, then perhaps the issue is not so important.

### 2.5.2 Rainfall Interception:

Not all precipitation measured by rain gauges effectively infiltrates through the soil surface. The effective rainfall is usually less than what has been recorded due to the interception by the canopy. The intercepted water evaporates back to the atmosphere at a potential rate.

For grass and field crops, this rate can be assigned a fixed value or calculated as a function of the precipitation rate and the vegetation cover or the leaf area index, LAI. An example, is the regression equation obtained by Von Hoyningen-Huene (1981):

$$E_i = -0.42 + 0.245P + 0.2LAI - 0.0111P^2 + 0.0271P.LAI - 0.0109(LAI)^2 \quad (2)$$

Where  $E_i$  is the evaporation flux of the intercepted water by plant leaves,  $m s^{-1}$ ,  $P$  is precipitation rate,  $mm d^{-1}$  and LAI in  $m^2$  leaves per  $m^2$  soil.

A second Example is given by Belmans *et al.* (1983):

$$E_i = aP^{(b-cP)} S_c \quad (3)$$

Where  $a$ ,  $b$  and  $c$  are regression coefficients and  $S_c$  is the fraction of soil covered with vegetation (ranges from 0 to 1).

Over woodlands, the rainfall interception can be described according to the model of Gash *et al.* (1995). The model considers rainfall to occur as a series of discrete events. Each event includes a period of wetting up when rainfall,  $P_G$  is less than the threshold value necessary to saturate the canopy,  $P'_G$  (No rainfall enters the trunk store when  $P_G$  is less than  $P'_G$ ), a period of saturation and a period of drying out after rainfall ceases. The forest structure is described by two parameters, a canopy capacity,  $S$ , defined as the amount of water left on the canopy in zero evaporation conditions when rainfall and through fall have ceased, and a free through fall coefficient,  $p$ , which determines the amount of rain which falls directly to the forest floor without touching the canopy ( $p$  is often assumed equal to  $(1 - \text{canopy cover})$ ). Evaporation from the trunks is described in terms of a trunk storage capacity,  $S_t$ , and the proportion of the rainfall diverted to stem flow,  $p_t$ . The mean evaporation rate during the rainfall,  $\bar{E}_i$  and the mean rainfall rate,  $\bar{R}$  for saturated canopy conditions, are also required. The separate components of interception loss ( $\lambda E_i$ ) are calculated as follows:

For “m” small storms, insufficient to saturate the canopy:

$$c \sum_{j=1}^m P_{G,j} \quad (4)$$

where  $c$  is the canopy cover ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ).

Wetting up the canopy, for “n” storms greater than  $P'_G$  which saturate the canopy:

$$ncP'_G - ncS_c \quad (5)$$

where  $S_c$  is the canopy capacity per unit area of cover.

Evaporation from saturation until rainfall ceases:

$$(c\bar{E}_c / \bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{G,j} - P'_G) \quad (6)$$

Evaporation after rainfall ceases:

$$ncS_c \quad (7)$$

Evaporation from trunks, for  $q$  storms greater than  $S_t / p_t$ , which saturate the trunks.

$$qS_t + p_t \sum_{j=1}^q P_{G,j} \quad (8)$$

As a result, the interception by trees can be calculated as follows:

$$E_i = \text{Equations (5 + 6 + 7 + 8)} \quad (9)$$

### 2.5.3 Infiltration

Infiltration rates for semi-arid catchments can vary enormously even within a few metres as described by Berndtsson and Larson (1987) and Hoogmoed (1991). Flitcroft *et al.* (1991) even found no correlation between infiltration characteristics of sites between years.

The Green-Ampt (1911) infiltration model based on the Darcy equations has been used extensively for infiltration studies in semi-arid areas (Agnihotri and Yadov (1995) and Al-Hassoun and Al-Turbak (1993) are examples, and these papers refer to other studies). The original form was intended for use where infiltration results from excess water.

Mein and Larson (1973) modified the Green-Ampt approach for the case of a steady rainfall input and Chu (1978) demonstrated the applicability of this model for the unsteady rainfall case. Seyfried (1991) discusses problems using the Green-Ampt approach on semi-arid rangeland soil finding that the soil cover type strongly affects the infiltration rate and contrasting argillic soil horizons appear to inhibit water movement. In short, subsoil properties not taken into account in the Green-Ampt equations may dominate the infiltration rates during large rainfall events.

The Horton model (1935) defines an infiltration curve as a function of an initial and equilibrium infiltration capacity and a rate of decrease (Equation 2). The model in its original form does not allow for the change in infiltration with changing soil moisture, rather as a function of time from the onset of the event. An integrated form of Horton's equation, which adjusts for this deficiency is described in Viessman (1989) and applied in the Storm Water Management Model (SWMM (and updated version), 1981), with some success. There is little documented work on the use of the Horton model on semi-arid catchments, however many researchers describe infiltration as "Hortonian" and apply a slight variation of this model (see for example Michaud and Sorooshian (1994), Loague and Freeze (1985), Pilgrim *et al.* (1988) and El-Hames and Richards (1993)).

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (10)$$

where

$f_p$  = the infiltration capacity (depth/time) at some time  $t$  (mm/s)

$f_c$  = a final or equilibrium capacity (mm)

$k$  = a constant representing the rate of decrease in  $f$  capacity

$f_0$  = the initial infiltration capacity (mm)

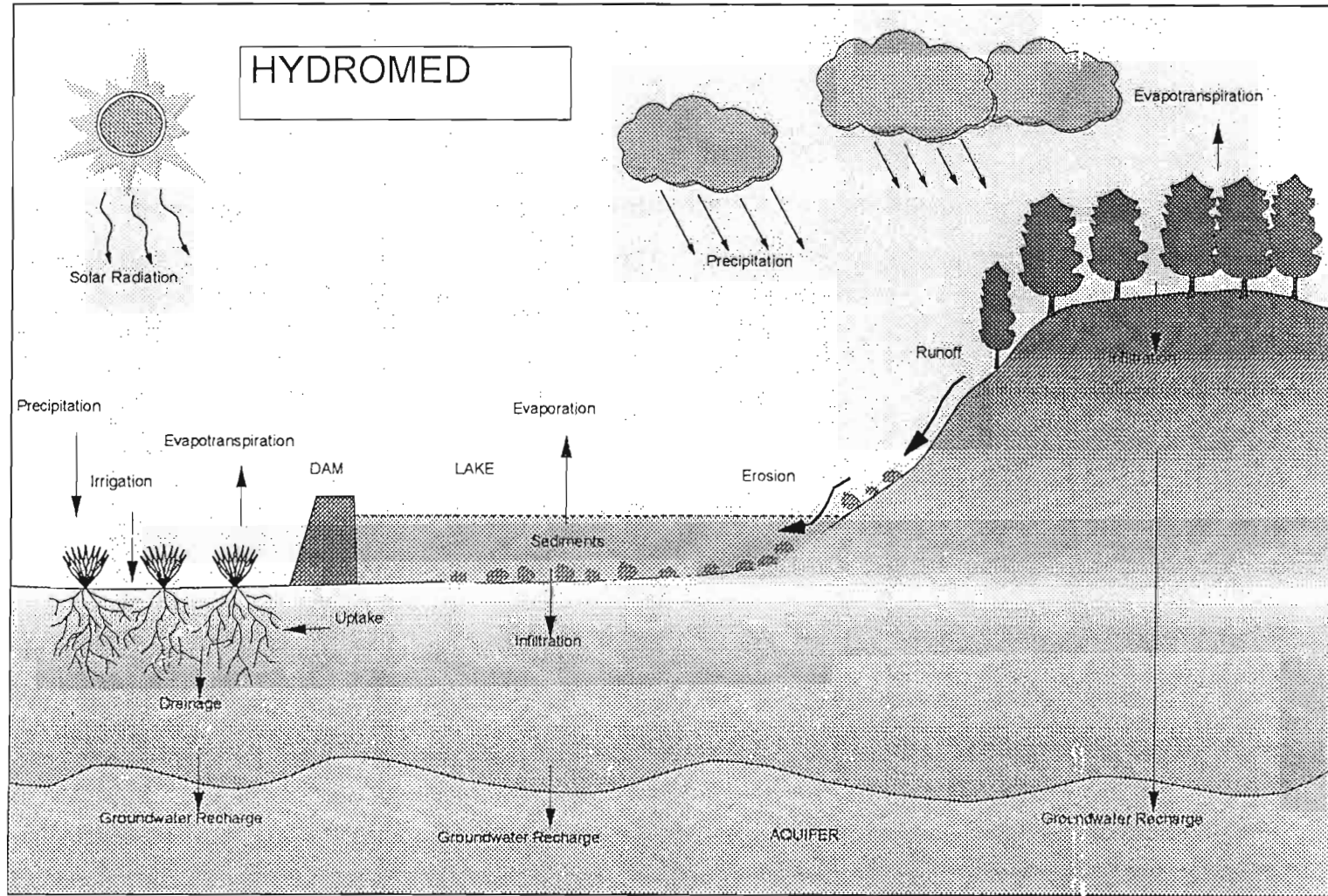


Figure 6 Schematic representation of the different hydrological processes operating in catchments with hill reservoirs.

When choosing an infiltration model, it is important to choose the one which models the dominant factors governing the infiltration on that soil. On semi-arid land, Karnieli and Ben-Asher (1993) suggested that these factors would be the presence of crust-formation, the soil water content and the soil texture. Casenave and Valentin (1992) suggested that vegetation cover is at least as important with this together with the faunal activity and intensity of surface crusting accounting for 84% of the variance of the infiltration ratio. Cordery *et al.* (1983) and Pilgrim *et al.* (1988) described the considerable effect of vegetation (as affected by climate, grazing and human activity) on runoff. Infiltration capacity is often higher around vegetation, and conversely, vegetation may only grow where the infiltration is relatively high. On cultivated plots, the intensity and depth of furrow, and any anti-erosion practices will affect the infiltration rate and of course the depression storage which needs to be allowed for.

Infiltration rates can be measured directly using a number of techniques such as the double ring infiltrometer or the rain simulator (see Touma and Albergel (1992) for a comparison of these two methods). Unfortunately, the different methods available to measure infiltration do not always produce the same results. Hoogmoed (1987) showed that on a sandy loam in Mali, there is a large difference in infiltration rates between low and high-energy infiltrometers. This is thought to be due to the surface sealing effect (crusting) and thus realistic sized (and distribution) drops should be produced by the rainfall simulator. The rainfall simulator should be placed at such a height that the drops reach terminal velocity. Hoogmoed (1991) pointed out that while rainfall simulators form a more realistic test of the infiltration rate, they cannot reproduce the range, and quickness of change of intensities typical of rainstorms. In addition, it is difficult to cover a large areas with a rainfall simulator.

An interesting discussion by Binley *et al.* (1989) suggested that while physical infiltration models may work well for samples of soil in a laboratory, and may be conceptually pleasing, there is little reason to assume that these derived parameters will be applicable to the catchment as a whole - at least for the non-linear cases. There is little evidence that large scale soil heterogeneity can be lumped into a single effective parameter.

Distributed models, whereby the spatial variability of inputs and physical characteristics is modelled often require a better understanding and parameterization of the infiltration process. Infiltration rates are not the only rainfall-runoff model input likely to be highly variable for the study catchment. There is often very little difference in infiltration rates between flat and steep catchments (Flitcroft *et al.* (1991) and Casenave and Valentin (1992)), however there can be high spatial variability of infiltration rates within a catchment. Infiltration rate variability can cause the case of partial area runoff where runoff is not occurring everywhere on the catchment. This cannot be easily modelled using the lumped approach. However, if spatial variability is not taken into account in the model, there is no reason why catchments can not be divided into subcatchments and the model calibrated for each. This is a problem in cases where no gauges are available on each of the subcatchments and thus calibration of each the subcatchment models is not possible.

#### 2.5.4 Surface Runoff

Surface run off varies considerably depending on the rainfall intensity, soil surface conditions (roughness, storage capacity, infiltrability etc.) the vegetation cover, soil moisture status and the slope. In arable lands it can range from zero to as high as 20%. Under good soil and water management it could be a negligible fraction. When the effective rainfall or water supply at the soil surface exceeds the maximum infiltration rate, the excess water accumulates until it exceeds the surface storage then, it runs off. There are different ways of modelling the process. The simplest way is to assume that the run off is a certain fraction of the rainfall. Another approach is to use the saturated hydraulic conductivity as the maximum infiltration rate at soil surface, and any water in excess of that will contribute to the surface pool and later on to the run off as in SOIL model, Jansson (1991).



The US department of agriculture, Soil conservation Service, SCS (1972), has developed a technique which has been used by many modellers as in EPIC (Williams *et al.*, 1984) and CREAMS (Knisel, 1980) models. In these models, the runoff is predicted using the SCS equation which relates the runoff to a retention parameter related to the soil water content in the root zone, the upper limit of soil water storage in the root zone and a maximum value for retention. In these models the run off is predicted using the SCS equation as follows :

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.85S)} \quad (11)$$

Where Q is the daily run off mm d<sup>-1</sup> and S mm is a retention parameter related to the soil water content in the root zone, the upper limit of soil water storage in the root zone and a maximum value for retention. The S value varies with soils, land use, management, slope and time (because of the change in soil water content). It can be obtained from tables and curves for different conditions.

In ACRU model, Schulze (1995) Used a refined form of the SCS equation which has been adopted for this study. In the refined form, the rainfall interception, the potential maximum retention of the soil and the critical soil depth were accounted for as follows:

$$Q = P_n - D_c(\theta_s - \theta(D_c)) \quad (12)$$

Where Q is the surface runoff (mm), P<sub>n</sub> is the net rainfall (mm), D<sub>c</sub> is the critical depth (mm), θ<sub>s</sub> is the volumetric water content of the critical soil depth at saturation (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) and θ(D<sub>c</sub>) is the volumetric soil moisture content of the critical soil depth, (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).

The term between brackets in the equation represents the potential maximum retention of the soil conceived as a soil water deficit. The latter is taken here as a difference between the water retention at porosity (saturation) and actual soil water content just prior to the rainfall event after the total evaporation for the day has been abstracted. In the ACRU model, the rainfall event occurs at the end of the day.

The critical soil depth for which the soil water deficit is calculated for storm flow generation is a variable depending on the different dominant runoff producing mechanisms prevailing in different climates, catchment conditions and the soil type and condition. For example, for short vegetation with shallow rooting depth one would consider the soil water deficit of the topsoil horizon, for arid soils with surface crust the critical soil depth is very shallow while in humid areas rich in surface litter and organic matter with high infiltrability the critical depth is relatively deeper. A table of critical soil depth under different climatic, rainfall intensity, land use and soil conditions is given in Schulze (1995).

### 2.5.5 Evapotranspiration:

Evapotranspiration refers to water loss at the soil surface and water extraction from the root zone and subsequent loss of water through the plant stems and leaves into the atmosphere. The two processes have been always considered together as a single process. When water is in surplus and plant grows under no water stress the evapotranspiration is controlled by the atmospheric conditions and the evapotranspiration is said to be at its potential. When water become less available to the plant, the potential evapotranspiration will be reduced to an actual level and will be controlled by plant and soil hydraulic properties. In other words by the ability of soil to transmit water to the surface. Perhaps to a lesser extent, the actual and potential evaporation varies over the catchment. Open water evaporation is higher, but can be measured more easily using an evaporation pan. Larger versions of the same concept (lysimeters), where a plot of land with its vegetation is isolated from the surrounding soil to calculate the evaporation from crops have been used extensively in the Sudano-Sahelian zone; some Nigerian projects are discussed in Owunubi *et al.* (1991).

Different approaches have been developed over the last few decades. They range from very simple to very complex. Examples of these simple models are the temperature based models of Thornthwaite (1948), Blaney and Criddle (1950) and Jensen and Haise (1963). The general form of these equation is:

$$ETp = c1DT(c2 - c3RH) \quad (13)$$

Where ETp is the potential evapotranspiration rate mm d<sup>-1</sup>, c1, c2 and c3 are empirically derived constants, D is day length in hours, T is the mean daily temperature and RH is the relative humidity. These equations are more suitable for seasonal patterns rather than daily evapotranspiration values.

A physically based and widely used equation is the one of Penman (1948):

$$ETp = E_o k_c \quad (14)$$

Where E<sub>o</sub> is the open water evaporation, mm d<sup>-1</sup> and K<sub>c</sub> is crop coefficient. The open water evaporation is calculated as follows:

$$E_o = \frac{\delta \frac{R_n}{L} + \gamma E_a}{\delta + \gamma} \quad (15)$$

Where E<sub>a</sub> is calculated as:

$$E_a = 0.026(0.54U + 0.5)(e_a - e_d) \quad (16)$$

Where U is the wind velocity at 2 m height m s<sup>-1</sup>, e<sub>a</sub> is the saturated vapour pressure in m.bars and e<sub>d</sub> is the prevailing vapour pressure, m.bars. The net radiation can be calculated as:

$$R_n = (1 - 0.06) R_s - \sigma T^4 (0.47 - 0.067\sqrt{e_d})(1 - 0.08cf) \quad (17)$$

Where R<sub>s</sub> is the short wave radiation w m<sup>2</sup>, F is Stefan Boltzman constant (F = 5.67 E-8 w m<sup>2</sup> K<sup>-4</sup>), T is air temperature K and cf is the degree of cloudiness. Feddes *et al.* (1978) obtained the following relation for Netherlands:

$$R_n = 0.649 R_s - 23 \quad (18)$$

The equation of Penman has been subjected to some improvements, based on the following reasons:

1. Plant reflection coefficient for solar radiation is about 25 while for water surface is about 0.06.
2. The plant has a biological control on evapotranspiration through the stomata.
3. The plant surface has a roughness length depending on height and wind speed and therefore a diffusion resistance,  $r_a$  which is different from that of water.

Taking into account these differences between the water surface and canopy surface evaporation, Monteith (1965) arrived at:

$$ET_p = \frac{(\delta + \gamma)}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} E_w \quad (19)$$

Where :

$$E_w = \frac{\sigma R_n + C_p \rho \left(\frac{ea - ed}{r_a}\right)}{(\sigma + \gamma)L} \quad (20)$$

Where  $E_w$  is evapotranspiration of a wet canopy surface  $m s^{-1}$ ,  $r_s$  is stomata resistance  $s m^{-1}$ ,  $r_a$  is the aerodynamic resistance  $s m^{-1}$ ,  $D_a$  is air density  $kg m^{-3}$ ,  $C_p$  is specific heat of air at constant pressure  $J kg^{-1} K^{-1}$ . The aerodynamic resistance can be calculated as follows:

$$r_a = \frac{\ln \frac{(z-d)}{z_m} \ln \frac{(z-d)}{z_v}}{(K^2 U)} \quad (21)$$

Where  $z$  is the height of the wind speed measurements,  $z_m$  (0.123 height) and  $z_v$  ( $0.2 z_m$ ) are roughness lengths for momentum and water vapour respectively,  $K$  is Von Karman's constant (0.4) and  $d$  is 0.67 of the height. Rijtema (1965) proposed a simpler equation for  $r_a$  :

$$r_a = \frac{\epsilon \rho \alpha}{10 P_a} \left( f(1) 1.15 U^{0.75} \right)^{-1} \quad (22)$$

Where  $\epsilon$ , is the ratio of molecular weight of water vapour to dry air,  $P_a$  is the atmospheric pressure kpa,  $U$  is the wind speed at 2 m height  $m s^{-1}$  and  $f(1)$  is a function depends on plant height  $m^2 . s^2$ . Feddes *et al.* (1978) has published  $r_a$  values for different crop heights and wind velocities.

Under potential non-advective and non air saturated conditions, Priestley and Taylor (1972) proposed a simplified equation where the evapotranspiration is proportional to the net radiation with a constant of proportionality which replaces the aerodynamic term as follows:

$$ET_p = \alpha \frac{\delta}{\delta + \gamma} R_n \quad (23)$$

Where  $\alpha = 1.35 \pm 0.10$

There are a large number of equations to obtain the ET<sub>p</sub> which can be found in literature. They are either simple as Thonhwaite or Blaney Criddle or intermediate such as Priestley and Tayler or as complex as Penman-Monteith equation.

Partitioning the evapotranspiration into potential soil evaporation, ES<sub>p</sub> and potential transpiration, T<sub>p</sub> can be done if ET<sub>p</sub> and T<sub>p</sub> or ES<sub>p</sub> are known, i.e T<sub>p</sub> can be calculated as:

$$T_p = ET_p - ES_p \quad (24)$$

The potential soil evaporation can be obtained according to Ritchie (1972) as:

$$ES_p = \frac{\delta}{\delta + \gamma} R_n \exp(-0.39LAI) \quad (25)$$

While Belmans *et al.* (1983), proposed the following equation:

$$ES_p = ET_p \exp(-0.6LAI) \quad (26)$$

The potential transpiration rate is reduced to an actual level by a reduction factor that depends on the soil water status in the root zone. This decrease is a logarithmic one according to Jensen *et al.* (1971):

$$T_a = T_p \ln \frac{[(\frac{SWS}{AW})100 + 1]}{\ln 101} \quad (27)$$

Where SWS is the water stored in the root zone and AW is the total available water taken as a difference between field capacity and wilting point.

The decrease could also be a linear one as reported by many authors and usually takes the following form:

$$T_a = T_p \left( \frac{SWS}{AW} \right) \quad (28)$$

It is well known that, evaporation from the soil surface follows three stages. In the first stage the soil water can evaporate at its potential level and this is usually the case after rainfall. The soil water in this case is able to meet the atmospheric demand and the evaporation rate is controlled by the atmospheric conditions. As the soil dries out the second stage with no rainfall starts and the evaporation drops below the potential level. Its actual level will depend on the ability of the soil profile to transmit water to the soil surface fast enough to meet the atmospheric demand. As the soil continues to dry out, both the hydraulic conductivity and the hydraulic gradient decrease and the soil water no longer evaporates at potential level. In this stage the evaporation is "soil profile controlled". As the dry period continues the evaporation will continue until it reaches a minimum value at which the water is held under high adsorption forces on the negatively charged soil particles (hygroscopic water). This steady state is the third stage in the evaporation process.

Black *et al.* (1969) proposed the following relation for the second stage:

$$ES_a = \lambda \sqrt{t+1} - \lambda \sqrt{t} \quad (29)$$

Where  $\lambda$  is a soil dependant parameter and  $t$  is the time after the dry period started.

Ritchie (1972) used a critical amount of cumulative evaporation, counted from the beginning of stage 1 to define the beginning of stage 2. As long as the cumulative soil evaporation is below the critical value, soil evaporation is in stage 1 and at its potential rate. The values for  $\lambda$  range from 3 to 5 mm d<sup>0.5</sup> and for the critical cumulative soil evaporation from 6 to 12 mm. High values of both parameters are associated with high clay contents.

The evaporation would continue during stage 2 till a minimum allowed water content or pressure at the soil surface has been attained. The minimum allowed pressure head under air dry conditions at the soil surface is given by Feddes *et al.* (1978).

Assuming that the pressure head at soil surface is at equilibrium with the atmosphere, the minimum pressure head,  $h_{min}$  can be calculated from the following relationship:

$$h_{min} = \frac{RT}{Mg} \ln RH \quad (30)$$

Where  $R$  is the universal gas constant, J mole<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>,  $T$  is the absolute temperature, K,  $g$  is the gravity acceleration, m s<sup>-2</sup>,  $M$  is the molecular weight of water, kg mole<sup>-1</sup> and  $RH$  is the relative humidity of the air, fraction.

The Institute of Hydrology were recently involved in a project in the south of Niger where measurements of the actual evaporation over savannah were conducted using the HYDRA device. The advantage of this device over the Penman equation is that it measures more directly the turbulent fluxes of water vapour, and measures over an area rather than at a point. Wallace (1991) described how the HYDRA functions and summarised results of its application in hot, semi-arid, Niger.

### 2.5.6 Evaporation from reservoirs

In the UK, general practice is to neglect the evaporation from the reservoir surface as the amount of direct precipitation is normally of the same order. In semi-arid countries the same assumption cannot be made. Use of an evaporation pan, as seen at the sites in Tunisia, which is measured and topped up on a daily basis is a direct method of estimating evaporation from the reservoir surface. Care must be taken where the surface area varies appreciably with the volume contents of the reservoir.

The standard class A pan, built of unpainted, galvanised iron, or stainless steel is probably the type of evaporation pan most commonly used and the simplest method of estimating the evaporation from an open surface. It is 4 feet in diameter and 10 inches deep and is mounted

12 inches above the ground on a wooden frame. Relations developed between pan and actual evaporation from large bodies of water such as lakes and reservoirs indicate that a multiplying factor of 0.70 to 0.75 gives the equivalent lake evaporation (Viessman *et al.* 1989).

Where pan evaporation data is not available, there are a number of techniques for estimating the evaporation. Simple empirical equations have been around for more than 150 years with little improvement on them in that time (Penman, 1948). These take the form of Viessman *et al.* (1989) equation :

$$E_a = (e_o - e_a)^{0.88} (0.42 + 0.0029u_p) \quad (31)$$

where

$E_a$  is the class A pan evaporation in mm per day.

$e_o - e_a$  is the vapour pressure difference in millibars.

$u_p$  is the wind speed at 150 mm above the rim of the pan in km per day.

The vapour pressure deficit term can be determined using the following equation :

$$e_o - e_a = 33.86[(0.00738T_o + 0.8072)^8 - (0.00738T_d + 0.8072)^8] \quad (32)$$

where

$T_o$  is the air temperature (°C)

$T_d$  is the dew point temperature (also in °C and derived from the relative humidity).

These equations assume that the air and water temperature are the same.

Aerodynamic methods consider the airflow to be neutrally stable and that convective effects over the water can be ignored. This idealisation gives a good approximation to the actual airflow and yields the form of the so-called bulk transfer equation (Sene *et al.* 1991). Energy balance methods use the heat balance of the surface layer of the water to estimate evaporation and can be simplified to an equation where only the heat flux and net radiation flux need be determined. Where the surface temperature of the lake is not known, a combination of the above methods may be used, but further assumptions must be made. Where the body of water is very large, the seasonal heat content change becomes more important. The Australian Water Resources Council (AWRC, 1970) provides a very good breakdown of the methods available for estimating evaporation from water storages and the best method to use depending on various conditions and availability of data and expertise at the site.

Acreman *et al.* (1993) presented a study where the water balance of Lake Toba, Indonesia was determined with knowledge of inflows, outflows and rainfall. The evaporation was calculated using the Penman equation for an open surface and compared to results using the HYDRA station described in previous sections. The methods compared very well. The problem with the Penman empirical method is that there are a number of coefficients which, to obtain the best results, need to be calibrated to local conditions (Acreman *et al.* 1993). The Hydra does not work when it is raining, but the evaporation is likely negligible during these conditions.

### 2.5.7 Water transport in soil

Soil water movement is usually described by one of the two approaches, the capacity approach or the Darcy's law approach.

#### 1. The capacity approach:

In this approach, the inflow and outflow of water are related to the soil water content at field capacity which is the highest water content that can be attained. The inflow to the first layer is from the rainfall. If the amount of water exceeds the storage capacity in the first layer, it drains down to the second layer of the profile until the infiltration is dissipated within the root zone. Water is extracted from a layer by transpiration and evaporation. This approach usually uses a long integration time step of one day and commonly used in the absence of a shallow ground water level. The travel time through a layer is calculated as:

$$T = \frac{PO - FC}{Ks} \quad (33)$$

Where PO is the porosity, mm and FC is the field capacity in mm and Ks is the saturated hydraulic conductivity mm hr<sup>-1</sup> for a particular layer. Water losses due to evapotranspiration

are distributed over the layers (storages) and each layers contribution is modelled as upward flow. The top layer contribute considerably more than the bottom layer, Penning de varies *et al.* (1989). If more water enters the deepest layer than it can retain, the excess is lost as deep percolation to the groundwater..

## 2. The Darcy's law approach:

The water flow in soils can be described mathematically with the well known Richard's equation. It is a partial non-linear differential equation, partial in time and space. It is based on two soil physical principals, first is the Darcy's law and second is the mass continuity. The Darcy's law reads:

$$q = -K(h) \frac{\delta H}{\delta Z} \quad (34)$$

Where  $q$  is the flux in  $m s^{-1}$ ,  $K(h)$  is the hydraulic conductivity in  $m s^{-1}$  as a function of soil water pressure head,  $Z$  is the vertical coordinate directed positive upwards with its origin at soil surface, and  $H$  is the hydraulic head which is the sum of the gravity head,  $Z$  and the pressure head,  $h$ , thus :

$$H = h + Z \quad (35)$$

The continuity equation reads:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = -\frac{\delta q}{\delta Z} - S \quad (36)$$

Where  $q$  is Darcy's flux,  $m s^{-1}$ ,  $\theta$  is the volumetric soil moisture content,  $m^3 m^{-3}$ ,  $t$  is time,  $s$  and  $S$  is the water uptake term, i.e volume of water taken up by the roots per unit volume of soil in unit time. By combination of the Darcy and continuity equation one arrives at:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = -\frac{\delta}{\delta Z} \left( K \frac{\delta h}{\delta Z} + 1 \right) - S \quad (37)$$

It is non-linear partial differential equation of first order in  $t$  and second order in  $Z$ .

This what so called, the general flow equation known as Richard's equation, (Richards, 1931). In any case, two relations are needed to solve the flow equation. The unsaturated hydraulic conductivity as a function of either soil moisture or pressure head and the relation between the soil moisture and soil pressure head, pF curve. This approach uses a fairly small time steps, so that the prediction can follow closely the continuous change in the soil water status under a natural dynamic system. These two relations are obtainable by field measurements, laboratory measurements and by predictive methods. The latter are regression equations obtained over large number of soil samples of different soil types. An example of these predictive methods is the one of Rawls and Brakensiek, (1989). The input to these equations is readily available soil survey data collected as part of the routine work i.e % sand, % silt, %clay, % organic matter, bulk density and soil porosity. The predictive methods offers an attractive alternative to field and laboratory methods (Ragab and Cooper, 1993 ). They use simple parameters, easily obtained or available from routine soil survey. It should be noted that, these models does not take into account soil structure explicitly; however they use the soil bulk density or porosity which are structure dependent. Many of these models have been derived from regression analysis of data obtained from soils of a limited region; therefore using these models for prediction in other areas is not always reliable and should be verified, Ragab *et al.*(1981 &

1982). The different methods to obtain these characteristics were surveyed by Ragab and Cooper (1990).

### 2.5.8 Water uptake and transpiration

Water uptake occurs only where there are roots. Moisture availability to the plant therefore depends on the rooting depth. The transpiration is usually balanced by water uptake from the soil root zone. Water in the plant tissues represents the difference between the water uptake and the losses by transpiration. In the microscopic approach, the rate of extraction of water from a unit volume of soil according to Hillel (1977), can be calculated as a difference between the total water potential of soil and plant divided by the total resistances of soil and plant to water flow.

The macroscopic approach is more simpler approach, Feddes *et al* (1978), Penning de vries (1989) where the actual water uptake rate depends on soil water potential / content and the maximum extraction rate. Water uptake is reduced if prevailing water content or water potential drops below a specified critical value of either. The water uptake at its maximum level at or above this critical value. As the soil dries out the uptake decreases until it ceases at wilting point.

### 2.5.9 Groundwater recharge

Groundwater recharge rate can be estimated from the water flux leaving the bottom layer of the root / vadose zone. The flux leaving the bottom of the root zone can be considered potentially available for groundwater recharge if one assumes that there is no lateral flow taking place, Ragab *et al.* (1997). The flux can be calculated from either the capacity or the Darcy's law approaches mentioned in section 2.5.7.

## 2.6 CHOICE / DEVELOPING A HYDROLOGICAL MODEL: SIMPLE VERSUS COMPLEX MODEL

When choosing a model, it is important to bear in mind that model complexity is not synonymous with the accuracy of the results. Michaud and Sorooshian (1994) showed that simple models perform better than complex ones for mid-sized, semi-arid catchments. Loague and Freeze (1985) in a comparison of hydrological models for small, upland catchments, show that simpler, less data intensive models provide as good or better predictions than physically based models. Beven (1989) suggests that 3 to 5 parameters are sufficient to reproduce most of the information in a hydrological record. The whole issue of over-parameterization is discussed in detail in a paper by Jakeman and Hornbecker (1993). The same authors suggested that the content in a rainfall-runoff record is sufficient to support models of only very limited complexity. Models which have many more parameters likely have parameters which are highly correlated with others. Some models work well for the wrong reasons or only work well within a limited range of calibration events. El-Hames and Richards (1994) discussed the issue of choice of model for semi-arid catchments suggesting that the decision is highly related to the availability of data *ie* that a complex distributed model should not be used when the available data do not support it. The same authors suggest that when data is plentiful, physically based semi-distributed models perform very well on their semi-arid Saudi Arabian catchments.

The best test of a hydrological model is its effectiveness in estimating measured flow. Hopefully the data already collected from the sites in Tunisia and any additional data which will be obtained from the other Mediterranean countries will help to decide the most appropriate approaches to use. Development of a model tailored to our specific needs will then commence.



### 3. Reservoir yield analysis

The design of a reservoir is concerned with determining the storage capacity required to maintain a yield with a given probability of failure. Presence of a reservoir does not equate to accessibility of water when and where it is needed. The probable flow regime of a catchment and stream must be known before a crop can be selected and planted. Adequate management of the crops and water must be planned and carried out. It is quite possible that water will only be available in the reservoir for a few weeks or months in the year during and following the wet season. In drier regions, or regions with high variability, the probability of reservoir failure (becoming empty) must be balanced with the economic benefits of non-failure.

There are three broad methods for the design procedure (Parks and Gustard, 1982). The "critical period technique" is an analysis of the events where yield exceeds demand. The "probability matrix method" is where the probability of the reservoir reaching a given storage condition from a previous condition is analysed. The third method uses stochastically generated flow data for assessing the error in assessing capacity. Storage yield methods are described in the very informative book by McMahan and Mein (1978).

High evaporation rates and low, sporadic rainfall rates in semi-arid regions make the calculations more difficult (and important), and as with any statistical analysis, a lack of data results in a lack in confidence of the results.

#### 3.1 CRITICAL PERIOD TECHNIQUES

In reservoir terminology, a critical period is the period during which the reservoir goes from full to empty without spilling in the intervening period. The critical period technique for reservoir yield analysis involves the use of the historical inflow record and projected demand to simulate the volumetric behaviour of the reservoir. The method uses the mass storage equation (a slight variation of Equation 1 so that the equation gives the volume at time  $t$  rather than the change in volume,  $\Delta V$ ). The method requires the historical inflows (streamflow,  $P_{iat}$  and rain), outflows (including evaporation, spillage and any other losses) and an assumed active storage capacity. Provided that a sufficiently long record is available, the simulation is run and the number of failures (reservoir becoming empty) are counted. The simulation is then re-run using a different active storage assumption or demand scenario until an acceptable balance is achieved between active storage required, demand and probability of failure.

#### 3.2 PROBABILITY MATRIX METHODS

The Moran probability matrix method (Moran, 1959) treats time and water as discrete variables. The reservoir volume is subdivided into a number of zones thus creating a system of equations which approximate the integral equations. The analysis is then carried out with the initial reservoir contents at each of the zones and using each year of input data thus making use of all available data. In this method, the period of time is divided into a wet season (all inflows, no outflows) followed by a dry season (all outflows and no inflows), though a simple modification of this procedure (described by McMahan and Mein, 1978) allows inflows and outflows to occur simultaneously.

A further modification to the Moran method is suggested by Gould (1961). His method allows for simultaneous inflows and outflows, seasonality of flows and serial correlation of inflows. This was done by using a transition matrix of yearly time period, but accounting for within-year flows by using behavioural analysis. This method allows for the use of non-continuous flow records sampling all years of data regardless of the historical sequence and is thus much less demanding on the data. Perhaps more importantly, the computed storage estimates are independent of the initial starting contents of the reservoir (a major problem with simulation analysis).

The Gould probability matrix method has been applied successfully in many regions of Africa. Parks *et al.* (1989) outlined some practical considerations to its application which are summarised here :

1. The inflow series should not be correlated otherwise a correction is required to the solution, though annual serial correlation is often negligible in semi-arid and arid regions. Gould (1961) provides a table of suitable corrections to correlated data. Experience in South Africa and also the Nile basin shows that serial correlation can be quite high.
2. The method can produce very different results for seasonal flow regimes (dependent on the starting month of the analysis). This is avoided by starting the analysis towards the end of the dry season.
3. Care should be taken that the method does not “double account” when failures occur *after* the wet season.

Parks *et al.* (1989) apply the Gould method to catchments in Botswana for estimating the effect of rationing on the probability of failure of a reservoir.

Vedula and Kumar (1996) provide a good description of the linear and stochastic dynamic programming required to maximise the yield and optimise allocation of water from a reservoir in India where a number of different crops are grown on heterogeneous soil. The important issues of volume and capacity sharing of a reservoir's contents are discussed. There are many papers available on this subject.

### 3.3 USING STOCHASTICALLY GENERATED FLOW SEQUENCES

The third group of storage estimation techniques is used when there is insufficient streamflow records to run an adequate simulation. The method involves the generation of a synthetic flow sequence with the same statistical properties as the historical record. When no record is available at all, the engineer would normally turn to regional analysis studies, or use data from an adjacent catchment. There are many papers available on the generation of synthetic flows, mostly based on the assumption that flow consists of four components as in equation of McMahon and Mein (1978):

$$Q_t = T_t + S_t + K_t + \varepsilon_t \quad (38)$$

where (all components are dimensionless) :

$T_t$	= trend component of the streamflow process
$S_t$	= seasonal component of the streamflow process
$K_t$	= correlation component
$\varepsilon_t$	= random components

Once the flow is generated, one of the first two methods described can be used.

### 3.4 CROP WATER REQUIREMENT AND IRRIGATION

Increasing irrigation system efficiency and rationing can often save large amounts of water (of course this is only strictly true if the lost water does not return to the reservoir or aquifer). Measures to increase irrigation efficiency from 20-50% to 80-90% in Cyprus are discussed in a paper by Chimonides (1995). Measures to maximise crop yield on a semi-arid Mediterranean plot hinge on (Voron and Fang, 1995) :

- a) deciding how large an area can be irrigated at the beginning of the season and
- b) applying the right amount of water to a crop appropriate to its growth stage

The same authors describe software which models the crop growth, crop water requirements and reservoir contents in an economic environment designed especially for water shortage cases. There are many papers on this subject with several publications by the FAO.

### 3.5 MULTIPLE RESERVOIR SYSTEMS

Milutin and Bogardi (1995) discuss a similar approach on a 7-reservoir system (reservoirs both in series and in parallel) in Tunisia. The method they use relies on a decomposition of the multi-reservoir system into a set of single reservoir sub-systems thus allowing the simple inclusion or exclusion of systems or sub-systems. The effect of chosen abstraction policy and policy violation is compared to reservoir levels and the projected water demand target. Work on this model was sponsored by the Tunisian project EAU2000 (Agrar-und Hydrotechnik 1993). Further literature on this project should be available in Tunisia.

Meigh (1995) discussed the impact of large numbers of small reservoirs on the water balance of a much larger reservoir downstream. He showed a simple relationship between the capacity of reservoirs upstream and the runoff and yield from the major reservoir downstream. The software that was produced through this project was demonstrated during the first HYDROMED meeting in Tunis in January 1997. There is a lot of information and literature available on this subject.

### 3.6 COMBINED SYSTEMS

Where there exists a supply of groundwater (and the groundwater is accessible), this needs to be built into the water balance optimisation. In general, groundwater levels fluctuate much less than surface water supplies and thus are particularly important in times of drought (porosity, capacity, depth and yield of the aquifer need to be determined). Most soil water balance models include a component of "loss" to the aquifer and this can be built into the overall water balance of the catchment. Giakoumakis *et al.* (1995) apply such a model on a catchment in Greece. Interestingly, they have opted for a fully areally distributed surface water model combined with a lumped groundwater model. Results of the simulation were inconclusive because of lack of sufficient data.

The important point about combined water supply systems is that, when properly managed, the joint yield can be greater than the sum of the yields from the individual parts.

### 3.7 RESERVOIR LIFE TIME

The life time of a reservoir is very important both for economic balancing of the costs and gains and for safety reasons. A reservoir can never be made 100% safe even if it has been designed to withstand the estimated Probable Maximum Flood (PMF). Similarly, a reservoir will never last indefinitely even if there are no visible signs of deterioration. In practice, for small agricultural reservoirs, it is not practical to design a dam for the PMF and siltation is always present to a certain extent. In the UK, Category D dams where no loss of life can be foreseen by failure of the dam and limited flood damage will be caused, dams are designed to withstand the 150 year flood (ICE, 1989).

#### 3.7.1 Flooding

Design of the dam and spillway requires knowledge of the flood frequency of the region. It is assumed that the spillway design is an engineering problem and beyond the scope of this study. Estimating the n-year event for design of a spillway requires an adequate series of data from that site. For small catchments, this is rarely the case and thus records from adjacent catchments are often adopted and modified. The Flood Studies Report (NERC, 1975) present regionalized flood frequency curves for catchments in the UK based on a vast

data archive. Farquharson *et al.* (1992) presented GEV and PWM fitted flood frequency curves for semi-arid areas, including North Africa and the Middle East, based on 162 stations with annual basin rainfall below 600 mm. The paper also discusses problems with flow data including gauging problems and treatment of low or zero annual maxima, particular to semi-arid and arid flood frequency analysis.

### 3.7.2 Siltation

The erosion component of a reservoir feasibility study can be very important and often dictates the lifetime of a reservoir. The probable lifetime of the reservoir must be high enough to make its construction economically viable. Erosion is very difficult to model, and probably just as difficult to measure, at least before it has entered the reservoir. A number of factors affect the erosion rate - the rainfall intensity and soil texture being only two of many. For a selection of large dams in Syria, the silt content of inflow water can be as high as 20 kg m<sup>-3</sup> however most rivers are no higher than 5 kg m<sup>-3</sup> (ICOLD, 1993). For many catchments, the wind erosion component may be just as important. The EPIC model (USDA-ARS, 1990) contains a routine for estimation of soil erosion from rainfall energy or overland flow energy. Use of the EPIC model for soil erosion estimates (albeit the European case) is discussed by Klaghofer and Summer (1990). The same authors make the interesting note that (in their case study) only 1% of the measured eroded soil actually reached the river. The impact of anti-erosion barriers such as those we have seen in Tunisia will certainly need to be discussed, not only for their effect on reducing soil erosion, but also in their ability to retain water. Bergaoui and Camus (1995) have already addressed the issue. Whether or not the erosion component will be built into the rainfall-runoff model will presumably be discussed later. All reservoirs lose capacity over the years through siltation unless remedial action such as dredging takes place. Occasionally, a very intense rainfall event causes the complete loss of a reservoir either through sedimentation or dam overtopping. In most cases of siltation, the economic cost of dredging outweighs the benefits and the reservoir is abandoned in favour of a dam in another location.

## 4. Conclusions

This brief literature review highlights a number of issues and important points to consider when attempting to model the hydrology of a small semi-arid catchment. The most important of these appears to be the applicability of hydrological models to semi-arid Mediterranean catchments which have been designed for humid, temperate climates. Some models which have been designed for semi-arid catchments in Australia, Southern Africa and Spain are discussed briefly in this review.

The different hydrological processes are described both in simple and complex way. The complexity of the model will depend on the complexity of the hydrological processes involved. The degree of complexity will depend to a large extent on the availability of data. If data allows, a complex model could be developed for our test catchments. However, an attempt will be made to run the model in comprehensive and limited data set modes. In any case we should avoid situation where the model is more complex than the data warrants.

At this stage, assessment of data: availability, accuracy, format, duration and accessibility is vital for model development. A start has been made using the data collected by ORSTOM in Tunis. Further investigations will be carried out on the data of Syria and Lebanon test sites.

## References

- Abbot, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. 1986. An Introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique European, "SHE", 1: History and philosophy of a physically - based, distributed modeling system. *J. of Hydrology*, 87: 45-59.
- Acreman, M.C., Meigh, J.R., Sene, K.J. 1993. Modelling the decline in water level of Lake Toba, Indonesia. *Advances in Water Resources*, 16, 207-222.
- Agnihotri, R.C. & Yadav, R.C. 1995. Effects of different land uses on infiltration in ustifluent soil susceptible to gully erosion. *Hydrological Sciences Journal*, 40 (3), 395-406.
- Al-Hassoun, S.A. & Al-Turbak, A.S. 1993. Infiltration in two sand dune areas in Saudi Arabia. Anonymous *Engineering Hydrology*. pp 43-8. ASCE,
- Albergel, J. 1987. Secheresse, desertification et ressources en eau de surface - Application aux petits bassins du Burkina Faso. Anonymous *The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. pp 355-65. IAHS,
- Ambroise, B Beven, K and Freer, J. 1996. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity. *Water Resources Research*, 32 (7), 2135-2145.
- AWRC/Australian Water Resources Council. 1970. Evaporation from Water Storages. Hydrological series No. 4. Canberra.
- Basist, A., Bell, G.D. & Meentemeyer, V. 1994. Statistical relationships between topography and precipitation patterns. *Journal of Climate*, 7 (September), 1305-15.
- Bathurst, J.C. 1986. Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique European for an upland catchment. *Journal of Hydrology*, 87 103-23.
- Belmans, C., Wesseling, J. G. and Feddes, R. A. 1983. Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *J. Hydrol.* 63:271-286.
- Bergaoui, M. & Camus, H. 1995. Impact des travaux anti-erosifs sur les crues et le transport solide en Tunisie centrale. In: Pontanier, R., M'Hiri, A., Akrimi, N., Aronson, J. & LeFloc'h, E. (Ed.), *L'homme peut-il refaire ce qu'il a defait?* pp. 113-26. John Libbey Eurotext, Paris.
- Berndtsson, R., Jinno, K., Kawamura, A., Larson, M. & Niemczynowicz, J. 1994. Some Eulerian and Lagrangian statistical properties of rainfall at small space-time scales. *Journal of Hydrology*, 153 339-55.
- Berndtsson, R. & Larson, M. 1987. Spatial variability of infiltration in a semi-arid environment. *Journal of Hydrology*, 90 117-33.
- Beven, K. 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105 157-72.
- Beven, K., Calver, A. & Morris, E.M. 1987. *The Institute of Hydrology Distributed Model*. Report series. Institute of Hydrology, Wallingford.

- Binley, A., Beven, K. & Elgy, J. 1989. A physically based model of heterogeneous hillslopes. 2. Effective hydraulic conductivities. *Water Resources Research*, **25** (6), 1227-33.
- Black, T, A., Gardner, W. R. and Thurtell, G. W. 1969. Prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. *Soil sci. Am. Proc.*,33:655-660.
- Blaney, H. F. and Criddle, W. D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. US Dep. Agr. Soil Conserv. Serv., SCSTP 96. pp48.
- Boughton, W.C. 1966. A mathematical model for relating runoff to rainfall with daily data. *Civil Eng. Trans., I.E.Aust.* **CE8** (1), 83-93.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L. & McGuire, R.M. 1973. *A generalised streamflow simulation system - conceptual modelling for digital computers*. Sacramento, California.
- Burman, R. & Pochop, L.O. (eds). 1994. Evapotranspiration and climatic data. Developments in atmospheric Science, 22. Elsevier, Amsterdam. pp 105-171.
- Casenave, A. & Valentin, C. 1992. A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of West Africa. *Journal of Hydrology*, **130** 231-49.
- Chbouki, N., Stockton, C.W. & Myers, D.E. 1995. Spatio-temporal patterns of drought in Morocco. *International Journal of Climatology*, **15** 187-205.
- Chiew, F.H.S. & McMahon, T.A. 1990. Estimating groundwater recharge using a surface watershed model : sensitivity analyses. *Journal of Hydrology*, **114** 305-25.
- Chiew, F.H.S. & McMahon, T.A. 1994. Application of the daily rainfall-runoff model MODHYDROLOG to 28 Australian catchments. *Journal of Hydrology*, **153** 383-416.
- Chiew, F.H.S., Stewardson, M.J. & McMahon, T.A. 1993. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. *Journal of Hydrology*, **147** 1-36.
- Chimonides, S.J. 1995. Irrigation management under water shortage conditions. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 73-8. Balkema, Rotterdam,
- Chu, S.T. 1978. Infiltration during unsteady rain. *Water Resources Research*, **14** (3), 461-6.
- Cordery, I., Pilgrim, D.H. & Doran, D.G. 1983. Some hydrological characteristics of arid western New South Wales. Anonymous pp 287-92. Inst. Engrs. Australia, National Conference,
- Crawford, N.H. & Linsley, R.K. 1966. *Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV*. Stanford University.
- DeLaine, R.J. 1970. Deriving the unitgraph without using rainfall data. *Journal of Hydrology*, **10** 379-90.
- Duncan, M.R., Austin, B., Fabry, F. & Austin, G.L. 1993. The effect of gauge sampling on the accuracy of streamflow prediction for rural catchments. *Journal of Hydrology*, **142** 445-76.

- El-Hames, A.S. & Richards, K.S. 1994. Progress in arid-lands rainfall-runoff modelling. *Progress in Physical Geography*, 18 (3), 343-65.
- FAO. 1993. Integrated Rural Water Management. Anonymous *Proceedings of the Technical Consultation on Integrated Rural Water Management*.
- Farquharson, F.A.K., Meigh, J.R. & Sutcliffe, J.V. 1992. Regional flood frequency analysis in arid and semi-arid areas. *Journal of Hydrology*, 138 487-501.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J. & Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs. Center for agricultural publishing and documentation, PUDOC, Wageningen, The Netherlands, pp 189.
- Flitcroft, I.D., Dugdale, G. & Milford, J.R. 1991. Spatial aspects of the seasonal soil water budget in a semiarid grassland. Anonymous *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. pp 363-73. IAHS,
- Garen, D.C., Johnson, G.L. & Hanson, C.L. 1994. Mean areal precipitation for daily hydrologic modeling in mountainous regions. *Water Resources Bulletin*, 30 (3), 481-91.
- Gash, J.H.C. & Stewart, J.B. 1977. The evaporation from Thetford Forest During 1975. *Journal of Hydrology*, 35:385-396.
- Gash, J.H.C., Lloyd, C.R. & Lachaud, G. 1995. Estimating sparse rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 170:79-86.
- Ghini, M., Tsoumanis, P. & Tsihidis, S. 1995. Analysis of integrated water resources management : Pilot study for Epiros water district in Greece. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 293-303. Balkema, Rotterdam,
- Giakoumis, S., Dimou, N., Migardou, A. & Tsakiris, G. 1995. Estimating surface and groundwater resources in a Mediterranean island environment. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 103-9. Balkema, Rotterdam,
- Gomer, D. 1996. *Ecoulement et erosion dans des petits bassins-versants a sols marneux sous climat semi-aride mediterraneen*. Projet Pilote d'Aménagement Integre du Bassin-Versant de l'Oued Mina, Eschborn.
- Gorgens, A.H.M. 1983. Reliability of calibration of a monthly rainfall-runoff model : the semiarid case. *Hydrological Sciences Journal*, 28 (4), 485-98.
- Gould, B.W. 1961. Statistical methods for estimating the design capacity of dams. *Journal of the Institution of Engineers, Australia*, 33 (12), 405-16.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. & McMahon, T.A. 1992. Physically based hydrologic modelling. 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*, 26 (10), 2659-66.
- Green, W.H. & Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4 11-24.
- Hansen, V.E., Israelsen, O.W., & Stringham, G.E. (Eds.). 1979. Irrigation principles and practices, John Wiley & Sons, New York. pp145-170.
- Hillel, D. (Ed.) 1977. Computer simulation of soil-water dynamics. A compendium of recent work. International Development Research Center, IDRC-082e, Ottawa, Canada. pp214.



- Hoogmoed, W.B. 1987. Some aspects of crust formation on soils in semi-arid regions. Anonymous *Alfisols in the Semi-Arid Tropics, a Consultants' Workshop*. pp 127-35. ICRISAT, India.
- Hoogmoed, W.B., Klaij, M.C. & Brouwer, J. 1991. Infiltration, runoff and drainage in the Sudano-Sahelian zone. Anonymous *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. pp 85-98. IAHS,
- Horton, R.E. 1935. *Surface runoff phenomena: Part I, Analysis of the hydrograph*. Edwards Bros, Horton Hydrol. Lab. Ann Arbor, MI.
- Hughes, D.A. 1994. Soil moisture and runoff simulations using four catchment rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, **158** 381-403.
- Hughes, D.A. 1995. Monthly rainfall-runoff models applied to arid and semiarid catchments for water resources estimation purposes. *Hydrological Sciences Journal*, **40** (6), 751-69.
- ICE. 1989. *Floods and Reservoir Safety : An Engineering Guide*. Institution of Civil Engineers, London.
- ICOLD. 1993. *Water from Dams in Syria*. ICOLD, Paris.
- Jakeman, A.J. & Hornberger, G.M. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, **29** (8), 2637-49.
- Jakeman, A.J., Littlewood, I.G. & Whitehead, P.G. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, **117** 275-300.
- Jansson Per - Erik. 1991. Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the SOIL model. Report 165. Swedish University of agricultural sciences, Department of soil Sciences, UPPSALA, SWEDEN. pp72.
- Jensen, M. E., Wright, J. L. and Pratt, B. S. 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Trans. Am. Soc. Agr. Engr.* **14**:954-959.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Amer. Soc. Civ. Eng., Proc.* **89** (IR4) : 15-41.
- Karnieli, A. & Ben-Asher, J. 1993. A daily runoff simulation in semi-arid watersheds based on soil water deficit calculations. *Journal of Hydrology*, **149** 9-25.
- Klaghofer, E. & Summer, W. 1990. Estimation of soil erosion from a lower Alpine catchment. Anonymous *Hydrology in Mountainous Regions. II - Artificial Reservoirs; Water and Slopes*. pp 67-73.
- Knisel, W.G. (Ed.) 1980. CREAMS: A field-scale model for Chemicals, Run-off and Erosion from Agricultural Management System. U.S. Department of Agricultural, Conservation Research Report No.26. pp 640.
- Langsholt, E. & Gottschalk, L. 1989. To the problem of water balance modelling under semi-arid conditions. Anonymous *The State-of-the-Art of Hydrology and Hydrogeology in the Arid and Semi-Arid Areas of Africa*. pp 137-48. IWRA,
- Lascano, R.J. 1991. Review of models for predicting soil water balance. Anonymous *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. pp 443-58. IAHS,

- Loague, K.M. & Freeze, R.A. 1985. A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchments. *Water Resources Research*, 21 (2), 229-48.
- McMahon, T.A. & Mein, R.G. 1978. Reservoir capacity and yield. In: Chow, V.T. (Ed.), *Developments in water science*. Elsevier,
- Meigh, J. 1995. The impact of small farm reservoirs on urban water supplies in Botswana. *Natural Resources Forum*, 19 (1), 71-83.
- Meigh, J.R., McKenzie, A.A., Austin, B.N., Bradford, R.B. & Reynard, N.S. 1997. *Assessment of Global Water Resources - Phase II - Estimates of present and future water availability for Eastern and Southern Africa. A report to the ODA*. Institute of Hydrology, Wallingford.
- Mein, R.G. & Larson, C.L. 1973. Modelling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9 384-97.
- Michaud, J. & Sorooshian, S. 1994. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed. *Water Resources Research*, 30 (3), 593-605.
- Milutin, D. & Bogardi, J.J. 1995. Reliability criteria in the assessment of a multiple-reservoir operational strategy under Mediterranean conditions. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 265-71. Balkema, Rotterdam,
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and environment. In G. E. FOGG (ED.) Proc. Symp. Soc. Exp. Biol. 19: 205-234. Univ. College of Swansea. 8-12 Sept. 1964. Cambridge Univ. Press, London
- Moore, R.J. & Jones, D.A. 1991. A river flow forecasting system for region-wide application. Anonymous *MAFF Conference of River and Coastal Engineers, 1991*. Loughborough University,
- Moran, P.A.P. 1959. *The theory of storage*. Methuen, London.
- Mostert, A.C., McKenzie, R.S. & Crerar, S.E. 1993. A rainfall/runoff model for ephemeral rivers in an arid or semiarid environment. Anonymous *Sixth South African National Hydrological Symposium*. pp 219-24.
- Mulligan, M. 1996. Modelling hydrology and vegetation change in a degraded semi-arid environment. Ph.D Thesis. King's College, University of London.
- Nash, J.E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*, 64 (1), 111-5.
- NERC/National Environment Research Council. 1975. Flood Studies Report. In five volumes and supplementary reports in 18 parts. London.
- Niemczynowicz, J. 1989. Some examples of important problems connected to rainfall-runoff modelling in semi-arid zone. Anonymous *The State-of-the-Art of Hydrology and Hydrogeology in the Arid and Semi-Arid Areas of Africa*. pp 149-59. IWRA,
- Owonubi, J.J., Abdulmumin, S., Malgwi, W.B. & Muazu, S. 1991. Review of soil water balance studies in the Sudano-Sahelian zone of Nigeria. Anonymous *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. pp 329-38. IAHS,
- Parks, Y.P., Farquharson, F.A.K. & Plinston, D.T. 1989. Use of the Gould probability matrix method of reservoir design in arid and semi-arid regions. Anonymous *The State-of-*

*the-Art of Hydrology and Hydrogeology in the Arid and Semi-Arid Areas of Africa*. pp 234-41. IWRA,

Parks, Y.P. & Gustard, A. 1982. A reservoir storage yield analysis for arid and semiarid climates. Anonymous *Optimal Allocation of Water Resources*. pp 49-57. IAHS,

Penning, F.W.T. de Vries., Jansen, D.M., Berg, H.F.M. ten & Bakema, A. 1989. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Simulation monographs 29. PUDOC, Wageningen, The Netherlands. pp 271.

Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc.Roy.Soc. London A 193:120-145.

Pilgrim, D.H., Chapman, T.G. & Doran, D.G. 1988. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33 (4), 379-400.

Pitman, W.V. 1973. *A mathematical model for generating monthly river flows from meteorological data in South Africa*. Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, Hydrological Research Unit.

Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface flux and evaporation using large-scale parameters. Month. Weather Rev. 100:81-92.

Prinz, D. 1995. Water harvesting in the Mediterranean environment - It's past role and future prospects. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 135-44. Balkema, Rotterdam,

Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. & Planchon, O. 1997. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5 59-79.

Ragab R., and Cooper, J.D. 1990. Obtaining soil hydraulic properties from field, laboratory and predictive methods. Safety Studies Nirex Radioactive Waste Disposal, NSS/R226 pp.83.

Ragab, R. Feyen, J. and Hillel, D. 1981. Comparative study of numerical and laboratory methods for determining the hydraulic conductivity of a sand. Soil Science 131:375-388.

Ragab R., Feyen, J. and Hillel, D. 1982. Comparison of experimental and simulated infiltration profiles in sand. Soil Science 133:61-64.

Ragab, R. & Cooper, J.D. (1993) Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for Hydrological Modelling. 1 - *In situ* measurements. J. of Hydrology. 148: 109-131.

Ragab, R. & Cooper, J.D. (1993) Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for Hydrological Modelling. 2 - Predicted versus *In situ* measurements and evaluation of methods. J. of Hydrology. 148: 132-147.

Ragab, R., Cain, J.D., Harding, R. and Hough, M. 1997. IHC - Institute of Hydrology distributed hydrological model for catchment scale with aggregated input parameters. I. The hydrological processes and general structure. (ready for submission).

Ragab, R., Finch, J. & Harding, R. 1997. Estimation of groundwater recharge to chalk and sandstone aquifers using simple soil models. J. of Hydrology. (In press).

Ragab, R. & Batchelor, C.H. 1995. A simple soil water balance model for operational use in tactical and strategic models for management of limited irrigation water. Annual report. "Management of limited water resources", EU funded project CAMAR-8001-CT91-0109. Institute of Hydrology, Wallingford, UK. pp 23.

- Rawls, W.J. & Brakensiek, D.L. 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: MOREL-SEYTOUX, H. J.(ED.) Unsaturated flow in hydrologic modeling theory and practice, NATO ASI series C: Mathematical and Physical Science. The Netherlands. 275:275-300.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids in porous medium. *Physics* 1: 318-333.
- Rijtema, P. E. 1965. An analysis of actual evapotranspiration. *Agric. Res. Rep.* 659. PUDOC, Wageningen, The Netherlands. pp107.
- Ritchi, J. T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*. 8(5):1204-1213.
- Schulze, E.R. 1995. Hydrology and Agrohydrology. A text to accompany the ACRU 3.00 Agrohydrological Modeling System. Dept. Of Agric. Eng. Univ. Of Natal, Pietermaritzburg, South Africa. pp AT10.2-AT10.4
- Seed, A.W. & Austin, G.L. 1990. Sampling errors for raingauge-derived mean areal daily and monthly rainfall. *Journal of Hydrology*, **118** 163-73.
- SEISMIC, User Manual. Soil Survey and Land Research Centre, School of agriculture, Food and Environment, Cranfield University, Silsoe, Bedford, UK. pp 108.
- Sene, K.J., Gash, J.H.C., McNeil, D.D. 1991. Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. *Journal of Hydrology*, **127**, 193-217.
- Seyfried, M.S. 1991. Infiltration patterns from simulated rainfall on a semiarid rangeland soil. *Soil Science Soc. Am. J.* **55** 1726-34.
- Snyder, F.F. 1938. Synthetic unit-graphs. *Transactions of the American Geophysical Union*, **19** (1), 447-54.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geog. Rev.* **38**(1):55-94.
- Touma, J. & Albergel, J. 1992. Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments : a comparison. *Journal of Hydrology*, **135** 73-86.
- Erosion/Productivity Impact Calculator (EPIC) [computer program]. USDA-ARS. Temple, Texas: USDA-ARS; 1990;
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook, Hydrology, Washington DC. Section 4, pp 548.
- Vedula, S. & Kumar, D.N. 1996. An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. *Water Resources Research*, **32** (4), 1101-8.
- Viessman, W.J., Lewis, G.L. & Knapp, J.W. 1989. *Introduction to Hydrology*. (3rd ed.). Harper and Row,
- Von-Hoyningen Huene, J. 1981. Die Interzeption des Niederschlages in landwirtschaften pflanzenbesanden. *Arb. Dtsh. Verb. Wasserwirt. Kulturbau*, DVWK. **57**:1-53.
- Voron, B. & Fang, Z.X. 1995. The design and development of an irrigation water management tool that can be used in semi-arid zones (management of water shortage). Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 99-101. Balkema, Rotterdam,
- Wallace, J.S. 1991. The measurement and modelling of evaporation from semiarid land. Anonymous *Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone*. pp 131-48. IAHS,

Williams, J.R., Jones, C.A. and Dyke, P.T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129-144.

Weeks, W.D. & Hebbert, R.H.B. 1980. A comparison of rainfall-runoff models. *Nordic Hydrology*, 11 7-24.

Wurbs, R.A. 1993. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119 (4), 455-72.

Wurbs, R.A. & Yerramreddy, A. 1994. Reservoir/river system analysis models: Conventional simulation versus network flow programming. *Water Resources Development*, 10 (2), 131-41.

Ye, W., Bates, B.C., Viney, N.R., Sivapalan, M. & Jakeman, A.J. 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33 (1), 153-66.

Yeh, W.W. 1985. Reservoir management and operations models : A state-of-the-art review. *Water Resources Research*, 21 (12), 1797-818.

# HYDROMED – Progress Report on activities carried out between November 1996 and May 1997

Lunds Universitet, Institutionen för Technisk Vattenresurslära

## *Contents*

1. Summary of M.Sc. diploma work
2. Summary of a TDR studies
3. Summary of ongoing work
4. Planning of workshop in Lund

## **1. Summary of M.Sc. diploma work**

A M. Sc. diploma work within the Hydromed by two Swedish students were completed in May, 1997. The students, Olof Tullberg and Ola Palmquist, performed field studies in one of the Hydromed experimental catchment (M'Richet el Anze catchment) during September to December, 1996. The study was financed by Orstom, Ingref, and the Swedish International Development Agency. Below is given an abstract of the work and a table of contents.

### **AN EXPERIMENTAL STUDY OF POLLUTANT TRANSPORT AND EROSION SUSCEPTIBILITY IN TUNISIA - A STUDY WITH RAINFALL SIMULATION AND DYE IN THE M'RICHET EL ANZE CATCHMENT**

#### ***Abstract***

The purpose of the study was to investigate the effects of heavy rain storms on the clayey soils in the watershed of M'Richet el Anze, Tunisia. The study included an investigation and visualization of the preferential flowpaths, different ways to determine the relationship between runoff and infiltration, an approximate measurement of erosion effects, and a discussion according to pollutant transport through the unsaturated zone to the groundwater. Six rainfall simulations were carried out. The rainfall water was colored with dye, Brilliant Blue (4 g/l). Afterwards, the plots were excavated in 2.5 cm thick vertical slices. Every slice was photographed. The photos were scanned, digitized, and plotted in three dimensions. Soil samples for determination of soil water contents were collected before rainfall, immediately after rainfall, and just before excavation. Sediment samples were collected to investigate erosion effects. Infiltration was measured and calculated using three different methods.

We found that preferential flow existed and that a great deal of the infiltrated water passed through root-channels, cracks, and macro-pores. At site 1 the infiltration had a maximum depth of 1.5 m, which implies that pollutants may reach directly to the groundwater after heavy rainfall. At the other two sites the maximum penetration was 73 cm (site 2) and 1.35 m (site 3).

Key words: rainfall simulator, dye tracer, preferential flow, graphic visualization

## CONTENTS

1. SUMMARY	1
2. INTRODUCTION	2
2.1 Background and preliminary description	2
2.2 Objectives	3
3. MATERIAL AND METHODS	5
3.1 Experimental conditions	5
3.1.1 Climate	5
3.1.2 Experimental site	5
3.1.3 Pedology	7
3.1.4 Geology	9
3.1.5 Land use	10
3.2 The experiments	11
3.2.1 Dye tracer	13
3.2.2 The rainfall simulator and the simulated rainfall intensities	14
3.2.3 Excavation, photograph and graphics processing	18
3.2.4 Soil samples	21
4. RESULTS AND DISCUSSIONS	24
4.1 Rainfall- and runoff patterns	24
4.2 Accumulated rainfall and runoff	26
4.3 Sediment transport	29
4.4 Infiltration rates measured from the rainfall simulations	32
4.5 Infiltration rates determined from soil samples	32
4.6 Other results from soil samples	37
4.7 Dye- and rainfall observations	38
4.8 Infiltration rates measured from the graphics processing	42
5. CONCLUSIONS	50
REFERENCES	51

## 2. Summary of TDR studies

A part study of a doctoral thesis has been completed by Magnus Persson. The studies have involved field and laboratory experiments by use of time domain reflectometry (TDR). The TDR is an accurate non/disturbing instrument to investigate soil water content and solute concentration. The TDR is planned to be used in the Hydromed experimental catchments to monitor shallow surface soil water content (for erosional susceptibility) and field solute concentrations. Magnus will work within Hydromed as a resource person for this.

### **Abstract**

To model solute transport in the unsaturated zone is a complex problem. Experimental data with high spatial and temporal resolution can improve understanding of the processes involved in the unsaturated zone. This understanding is essential in order to develop better predictive models. Using time domain reflectometry (TDR) as described in this thesis allows reliable data for future modeling work to be obtained.

The TDR is an accurate instrument for water content and electrical conductivity measurement. The highest precision and accuracy of water content measurement was found in soils with low organic matter and clay content combined with low electrical conductivity. Temperature dependent errors exist in TDR measurements, but they can be accounted for using the corrections presented in this thesis. The change in the water content measurements with temperature is lower in fine-textured soils. High electrical conductivity in combination with fine-textured soils leads to an opposite temperature dependence for the soil water content measurements.

By using the direct calibration approach and relating the bulk soil electrical conductivity ( $\sigma$ ) to soil solution electrical conductivity ( $\sigma_w$ ) using different models found in the literature, ( $\sigma_w$  measurements can be made for

transient conditions with varying water contents. If a high degree of accuracy is needed, a fourth-order polynomial equation can be used. This method was tested for both disturbed and undisturbed soil columns.

The results presented in this thesis show that TDR measurements of solute concentrations can be made for both steady-state and transient conditions. Thus, TDR can be a very useful tool for understanding water and solute transport in the unsaturated zone.

## ***Table of Contents***

Preface	i
Acknowledgments	iii
Abstract	v
1. Background and Problem Statement	1
2. Literature Review	5
2.1 Water Content Measurement with TDR	7
2.2 TDR Measurements of Solute Transport	8
2.2.1 Indirect Calibration	8
2.2.2 Direct Calibration	9
2.2.3 Comparison of Calibration Methods	10
2.3 Temperature Dependent Errors in TDR Measurements	11
2.4 TDR Probes	12
2.5 Field and Laboratory TDR Measurements	13
2.6 Automated TDR Systems	14
3. Methodology	15
3.1 The SUIKO Model	15
3.2 TDR Theory	15
3.2.1 Concepts of Dielectrics	15
3.2.1 TDR for Measuring Electrical Conductivity	17
3.3 Solute Transport Measurements with TDR	19
3.3.1 Determination of the $(w-\alpha)$ Relationship	19
4. Experimental Set-up	21
4.1 TDR System	21
4.2 TDR Probe Calibration	21
4.3 Measurements in a Disturbed Soil Column	22
4.4 Measurements in an Undisturbed Soil Column	23
5. Results	25
5.1 Model Results	25
5.2 Accuracy of TDR Measurements	27
5.3 Temperature Dependent Errors in TDR Measurements	28
5.4 Solute transport Measurements	30
5.4.1 Determination of the $(w-\alpha)$ Relationship	30
5.4.2 Measurements in a Disturbed Soil Column	31
5.4.3 Measurements in an Undisturbed Soil Column	32
6. Discussion	37
7. Summary and Conclusion	39
8. References	41

## ***Appended Papers***

1. Lidström, V., J. Olsson, and M. Persson. 1995. Modelling of solute transport through the unsaturated zone. Dept. of Water Resour. Eng. Report 3189.
2. Persson, M. 1997. Soil solution electrical conductivity measurements under transient conditions using time domain reflectometry. Soil. Sci. Soc. Am. J. (in press).
3. Persson, M., and R. Berndtsson. 1996. Soil texture and electrical conductivity effects on temperature dependency of TDR measurements. Soil. Sci. Soc. Am. J. (submitted).



### 3. Summary of ongoing work

Ongoing work has partly been directed towards summarizing the above TDR studies and the M. Sc. experimental data. Initial laboratory experiments have been started to explore the feasibility of using TDR for solute transport monitoring in Tunisia. This has been done by using three undisturbed field soil columns (0.25 m in diameter and 0.3 m long). Initial problems have also been encountered by the high salinity level in the soils. The doctoral student Magnus Persson will work together with Ingref (Mr. Slah Nasri) and Orstom (Mr. Patrick Zante) for development of the TDR system for Tunisian soil conditions.

During the summer 1997, techniques for determining shallow soil water contents by the use of TDR will be developed through field studies. These studies will be performed in Sweden. Later on, verifying work will be in done in Tunisia.

The data collected by the above M. Sc. students will be further analyzed within a doctoral study. The doctoral study has been announced but it has not yet been decided who will continue with these studies. The new doctoral student will work closely together with Ingref and Orstom.

Another Swedish doctoral scholarship has been applied for from the Sarec (Swedish Agency for Research and Economic Cooperation). The possible new Swedish doctoral student will work closely together with Ingref and Orstom. At the end of 1997 it will be decided if it is possible to start this doctoral study.

### 4. Planning of workshop in Lund

Funds for a workshop in Lund during May, 1998, have been applied for from the Swedish Sarec. Sarec will decide at the end of 1997 if it funds will be granted. The tentative program of the workshop is as follows:

Expert meeting (7 days; 3 days seminar and 4 days study visits and study tours) Sweden in May 1998 (tentative title: Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semi- arid areas). Tentative contents:

- Data collection, processing for small watersheds with surface impounding; climatic hydrology agronomic and socio economic data; instruments, data banks and software,
- rainwater harvesting; surface impounding;
- GIS applications for natural resources management on small watersheds with surface impounding;
- reservoir management and modeling; rainfall-runoff relationships and modeling, sediment
- transport, pollution transport, water uses,

---

Ronny Berndtsson  
Dep. of Water Resources Engineering  
Lund University  
Box 118  
S-221 00 Lund  
Sweden

Tel: +46-46-222 89 86  
Fax: +46-46-222 44 35

Email: Ronny.Berndtsson@tvrl.lth.se

Homepage: <http://aqua.tvrl.lth.se/ROBHOME.HTM>

## First Report of the participating group of IRNASE (CSIC)

The work carried out by the Spanish group from 1st November 1996 consisted:

1) Participation in the first coordination meeting of the HYDROMED project. During this meeting the representant of IRNASE (CSIC) was Dr. F. Moreno. Due to an unexpected and grave family problem Dr. Moreno was obligated to return to Seville after the first session of the meeting. During his participation presented the group of the IRNASE and the role of this group in the present project, and also the participation of the group in other research programs of the European Union. The group is integrated by the following scientists:

- Dr. F. MORENO, Senior Research Scientist. Specialist in Soil Physics, in particular water and solute transport in soils and soil-plant-atmosphere relationships.
- Prof. Dr. D. de la ROSA, Senior Research Scientist. Specialist in Land Evaluation by using information and knowledge engineering (Expert systems "management of soils and water").
- Dr. F. CABRERA, Senior Research Scientist. Specialist in Soil and Water Chemistry, in particular soil salinity and water quality.
- Dr. J.E. FERNANDEZ, Research Scientist. Specialist in Crop Water Relations and the Use of Mathematical Models.
- Dr. L. ANDREU, Research Scientist. Specialist in Irrigation and Drainage, in particular in salt-affected soils and the use of simulation models.

2) The IRNASE group is revising the literature related with expert systems for the evaluation of water management in the surrounding areas of the small reservoirs. Other aspects of the revision of the literature refer to the impact of these reservoirs on the environment (soil salinity, ground water contamination, etc).

3) The main interaction of IRNASE is with the partners of Morocco and Tunis. During April 1997, the experimental sites were chosen in Morocco for the determination of water balance and transport of water and solutes. Collection of soil and climate data and information on agricultural practices from the experimental sites in previous years to be used in the expert systems. The results will be compared with those generated in the next three experimental years.