



Septième rapport d'avancement  
Hydromed  
ERBIC 18 CT 960091



Tunis, Mars 2001



# Septième rapport d'avancement Hydromed ERBIC 18 CT 960091

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION .....   | 2  |
| ACTION 1 : SYNTHESE PRELIMINAIRE ET CHOIX DES SITES PILOTES.....         | 3  |
| ACTION 2 : EAU - SOL - ENVIRONNEMENT .....                               | 3  |
| ACTION 3 : AGRO-ECONOMIE - GESTION SOCIALE DE L'EAU ET DE L'EROSION..... | 4  |
| ACTION 4 : PERENNITE ET INTEGRATION DU LAC COLLINAIRE.....               | 5  |
| ACTION DE COORDINATION.....  | 6  |
| REDACTION DES RAPPORTS CONTRACTUELS .....                                | 7  |
| REUNION DE COORDINATION DE MONTPELLIER .....                             | 7  |
| ACTION DE FORMATION .....  | 8  |
| PRODUCTION SCIENTIFIQUE (DEPUIS LE DEBUT DU PROGRAMME).....              | 8  |
| CONCLUSION .....   | 20 |

### Annexe 1 : Contribution équipe de Tunisie IRD / INRGREF pour rapport final

1. Note de synthèse "eau - sol environnement"
2. Note de synthèse "Qualité des eaux"
3. Note de synthèse "Agronomie - bio climatologie"

### Annexe 2 : Rapport d'avancement INRGREF

### Annexe 3 : Rapport d'avancement IAV

### Annexe 4 : Rapport d'avancement ACSAD

### Annexe 5 : Rapport d'avancement IRNASE

### Annexe 6 : Rapport d'avancement LUND

### Annexe 7 : Rapport d'avancement IH

Photo couverture *J. Albergel, Janv. 2001* : Mesure du bilan hydrique dans une parcelle cultivée en fèves à Kamech : pluviomètre, parcelle de ruissellement, tensiomètres Watermark, et sonde à neutrons.

## INTRODUCTION

Ce septième rapport, présente l'état d'avancement du projet après sa quatrième année d'existence. Il fait suite aux 6 rapports contractuels publiés tous les semestres. Il récapitule les principales actions réalisées au cours de la dernière année du contrat. A notre demande, la périodicité annuelle du rapport d'activité est acceptée conformément à ce qui se fait dans les nouveaux contrats du 5ème PCRD (Réunion des coordinateurs, Bruxelles Juin 2000). Il s'agit donc du dernier rapport d'avancement avant le rapport final prévu dans un délai de 6 mois après la fin du contrat (Avril 2001).

Les différentes actions du projet se sont poursuivies sur l'ensemble des sites Marocains, Syriens et Tunisiens.

Cette dernière année a été marquée par :

- L'acceptation d'une prolongation de 6 mois du contrat HYDROMED qui a permis de poursuivre les observations de terrains jusqu'à la fin de l'année hydrologique 1999-2000 et d'en exploiter les résultats et de préparer un séminaire final au programme.
- Décembre 1999 : Réunion de coordination à Rabat. Visite du bassin versant pilote de Saboune et des régions pré rifaines.
- Mars 2000 : Atelier sur les lacs collinaires par la DCES et l'IRD à Nabeul dans le cadre de la Convention UR D-CES. Il a été l'occasion de faire le point sur le réseau de surveillance des lacs collinaires, sur les résultats de la recherche qui peuvent être transférés vers le développement.
- Juin 2000 : soumission d'un projet de tenue de séminaire sur les petits barrages dans le monde méditerranéen.
- Septembre 2000 : Soutenance du DEA de Mlle ABIDE KARAYE J. : Modélisation de l'évapotranspiration, de la température et des échanges énergétiques d'une culture de tomate. DEA INAT / IRD
- Octobre 2000 : Dernière réunion de coordination à Montpellier et visite des bassins versants de Roujan qui seront un site particulier de l'Unité de Recherche AMBRE.
- Octobre 2000 : Organisation conjointe d'un séminaire sur l'hydrologie méditerranéenne à Montpellier avec le programme FRIENDAMHY (UNESCO). Ce séminaire tenu sous les auspices de l'IRD, de l'AISH, de la région du Languedoc et du département de l'Hérault a réuni une centaine de spécialistes de l'hydrologie méditerranéenne. Le programme HYDROMED a proposé trente communications dont 12 ont été choisies par le comité scientifique pour une communication orale et publication dans les cahiers de l'UNESCO. Les autres ont été présentées sous forme de poster.
- Octobre 2000 : Remise par l'IH de Wallingford du modèle HYDROMED qui est actuellement en cours de test en Tunisie et au Maroc.
- Novembre 2000 : Evaluation conjointe par l'IRD et le SERST<sup>1</sup> des activités du programme en Tunisie. Cette évaluation a été réalisée par 4 experts, deux français, nommés par l'IRD et deux Tunisiens nommés par le SERST.

---

<sup>1</sup> SERST : Secrétariat d'Etat à la Recherche Scientifique et Technologique de Tunisie.

- Décembre 2000 : acceptation de la mesure d'accompagnement, lancement d'autres demandes de financements complémentaires et préparation du séminaire.

## ACTION 1 : SYNTHESE PRELIMINAIRE ET CHOIX DES SITES PILOTES

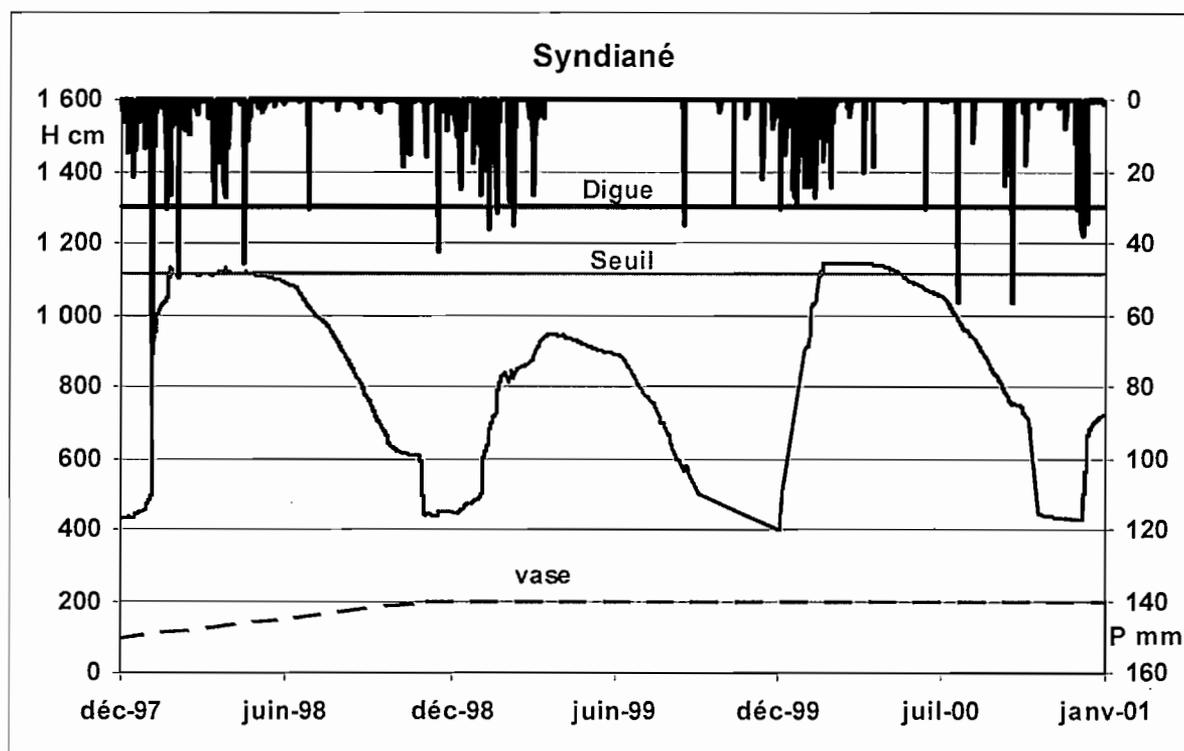
Pour mémoire, cette action est achevée depuis la fin du second semestre du projet. Les principaux résultats sont relatés dans les deux premiers rapports d'avancements. Plusieurs synthèses sectorielles ont été publiées.

## ACTION 2 : EAU - SOL - ENVIRONNEMENT

### Acquisition des données hydrologiques sur les retenues artificielles

Les observations de terrain se poursuivent sur tous les sites pilotes. Les stations hydrologiques sont toutes fonctionnelles et les mesures sont poursuivies avec des financements propres. Les mesures de bilans hydrologiques et sédimentaires sont assurées en continu et sans problème. Les valeurs observées qui seront exploitées dans le rapport final seront celles obtenues jusqu'à la fin de l'année hydrologique 2000.

Figure 1 : données exploitées sur le site de Syndiané



Après la sécheresse très importante qu'a connu tout le Moyen Orient durant l'année agricole 1998-1999, l'année 1999 - 2000 est redevenue normale comme le montre l'état de remplissage du barrage du site de Syndiané (figure 1).

L'Institut Hydrologique de Wallingford a fourni le modèle HYDROMED (une copie par institution membre du programme).

## **Bilan hydrique des sols de versants**

Les dispositifs au Maroc et en Tunisie sont encore en place et la banque de donnée est alimentée.

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

- Les observations de l'érosion à différentes échelles se sont poursuivies en Tunisie et au Maroc : échelle du bassin versant avec la mesure de la sédimentation dans les barrages, échelle du versant avec le suivi des ravines et de l'érosion sur parcelle avec simulation de pluies.
- Un modèle de prédétermination de l'érosion à partir du croisement des cartes a été mis au point en Tunisie.

Une note de synthèse a été rédigée sur les travaux réalisés en Tunisie sur les problèmes d'érosion des versants et de bilan hydrique des sols par Jean Collinet et Patrick Zante (Annexe 1, a)

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

- Sous action terminée. Les actions menées depuis la soutenance de la thèse de Mlle Rahaigomanana en 1998 ont été synthétisées dans une note présentée par Jean Pierre Montoroi et annexée à ce rapport (Annexe 1, b).

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

### **Agronomie**

Les études de bio-climatologie dans le cadre du contrat sont achevées. Les deux stations agroclimatologiques pour l'acquisition de données permettant la détermination de l'Evapotranspiration réelle (ETR) basée sur le rapport de Bowen sont restées en fonctionnement et permettront l'initiation de deux nouvelles thèses qui débutent :

- MEKKI I., Variation spatiale des réserves en eau des sols et de la demande des cultures dans un petit bassin versant montagneux du Cap-Bon. Inscrite cette année à l'Université de Montpellier. Une bourse a été accordée à la candidate par l'IRD pour 3 ans.
- ABIDE KARAYE J., Thèse sur les programmes HYDROMED et MERGUSIE sur les besoins en eau des plantations à grand écartement avec cultures irriguées intercalaire. Inscrite à l'ENSAM, une bourse a été demandée à l'IRD.

Jean Vacher, chargé de recherche, responsable de ce volet de l'étude a quitté le programme, nommé, Directeur de l'IFEA<sup>2</sup> à Lima (PEROU). Il a produit un rapport de synthèse qui servira au rapport final (Annexe 1, c).

---

<sup>2</sup>IFEA : Institut Français des Etudes Andines

## Usage de l'eau

Les observations ont été arrêtées et les données sont en cours d'exploitation. M. Salah Selmi, responsable de l'opération rédige un document de synthèse.

### ACTION 4 : PERENNITE ET INTEGRATION DU LAC COLLINAIRE

A partir de l'expérience acquise sur les sites pilotes il a été construit un logiciel d'aide à la décision permettant de faire une étude de faisabilité pour un barrage collinaire.

BALIEU PRO 1.0 est un logiciel expert d'aide à la décision en vue de la création d'une petite retenue collinaire. Il permet, par le traitement de données simples, physiques et socio-économiques recueillies sur le terrain et sur carte, de réaliser l'étude de pré-faisabilité de la retenue. Il a été programmé par Joel Idt dans le cadre d'un mémoire de stage de l'Ecole Centrale de Lille.

Pour un site donné ce système expert permet de donner des appréciations quantifiées sur la faisabilité d'un aménagement et sur les objectifs que l'on peut raisonnablement lui assigner. Ce système expert est organisé en trois modules, dont voici la description :

Le module **Bas-Fond** crée un modèle numérique de terrain (MNT) à partir des données topographiques soit, recueillies par le levé topographique du site effectué sur le terrain par tachéomètre, soit à partir de cartes suffisamment précises. En fonction de la précision des données topographiques disponibles, il est possible de choisir 2 méthodes d'extrapolation géostatistique, par krigeage ou par inverse de la distance. La grille ainsi créée servira de base de calcul aux sous-modules suivants.

Le module **Tracé du bas-fond** permet de visualiser le MNT du site (sous forme de dessin des courbes de niveau géoréférencées) et, à l'aide de la souris, de choisir l'emplacement de la digue de la retenue et de faire son tracé. Après avoir entré sa hauteur et ses paramètres, il est ensuite possible d'afficher le profil en long de la digue ainsi créée, afin d'en modifier le tracé jusqu'à satisfaction. Les contours du lac formé quand il est rempli jusqu'au déversoir sont tracés sur le dessin du site. Les calculs des volumes de digue et des volume et surface des lacs, du rapport Volume/surface et du rendement topographique s'affichent pour chaque position définie à la souris. Ces calculs permettent par tâtonnement le meilleur choix d'emplacement. Lorsque le choix est fait le logiciel donne les coordonnées des deux extrémités de la digue en fonction de trois points fixés à priori sur le terrain ou sur la carte.

Le module **Bassin Versant** permet de rentrer les données relatives au bassin versant, qui seront ensuite utilisées pour le calcul des volumes de ruissellement, d'envasement, des débits de pointe selon différentes formules hydrologiques. Il est ensuite possible de rentrer la courbe hypsométrique du bassin, afin de pouvoir le comparer avec d'autres bassins étudiés. La saisie des paramètres climatiques (paramètres pluviométriques, paramètres d'évaporation, zone géographique) permet de comparer le bassin d'étude avec des bassins déjà étudiés.

Le sous module **Bassins versants similaires** détermine, au sein d'une même zone climatique, les bassins versants les plus proches du bassin d'étude selon les critères suivants : débit de pointe et volume de la crue maximale, envasement et volume ruisselé interannuel. Ce module permet d'exploiter la base de données sur les bassins versants étudiés par l'IRD (en obtenant des éléments de comparaison) pour la prédétermination du comportement hydrologique du bassin de projet.

Le sous module **Résultats Techniques** calcule les paramètres hydrologiques de la retenue de projet, à partir du MNT et des données saisies ou créées dans les modules précédemment décrits.

Le **troisième module** s'intéresse à une évaluation du projet selon des critères qui permettent de tenir compte de l'impact de la retenue sur les populations concernées et de lui fixer un objectif.

Un premier **sous-module** permet d'évaluer la réponse du projet aux objectifs de conservation des eaux et du sol est évaluée par une note sur 50. Il s'agit de la protection des infrastructures en aval, l'aménagement intégré du bassin versant, la recharge des nappes phréatiques, la lutte contre l'envasement des barrages en aval. On rentre des réponses codées d'une enquête à réaliser auprès des services CES et DGRE du CRDA concerné.

Le **second sous-module** permet d'évaluer le projet pour les objectifs de développement rural : participation des agriculteurs, réponse à une difficulté d'approvisionnement, possibilité de pratiquer l'irrigation et de trouver un débouché sur les marchés locaux, organisation des utilisateurs potentiels en associations. Une note est obtenue après avoir rentré des réponses codifiées d'une enquête simple à réaliser auprès des agriculteurs.

## **ACTION DE COORDINATION**

Durant la période Octobre 1999 à Décembre 2000, les actions de coordinations se résument aux points suivants :

- Mars 2000 : Organisation d'un séminaire national DCES / l'IRD à Nabeul sur les petits barrages et lacs collinaires en Tunisie. Ce séminaire tourné vers les équipes des services régionaux de la direction de la conservation des eaux et des sols en Tunisie a permis le transfert des résultats des recherches menées conjointement dans le cadre du programme HYDROMED et de la convention : "Lacs collinaires" entre la DCES et l'IRD. Ce séminaire financé par la DCES et l'IRD a réuni 120 personnes. Un CD rom des présentations a été réalisé.
- Avril 2000 : Réunion UE DG Recherche pour le programme HYDROMED, Bruxelles, 17 Avril 2000. Jean Albergel, coordinateur du programme et Jacques Claude, conseiller scientifique ont été reçus par la nouvelle équipe : Me Palmerini et Mr Brown. Ont été discutés : la prolongation du contrat HYDROMED et la possibilité de répondre à l'appel d'offres : "Mesures d'accompagnement" pour organiser un séminaire de fin de programme et envisager la création d'un réseau de recherche sur la petite et moyenne hydraulique. Il a été accepté de passer la périodicité semestrielle des rapports scientifiques à une périodicité annuelle.
- Avril 2000 : Diffusion de la lettre du programme Hydronews 5.
- Avril 2000 : Aqua Expo. Exposition / Conférences organisées par la cité des sciences, Paris La Villette, 9 – 11 Avril 2000 . Le programme HYDROMED a été invité à donner une conférence et à participer à un débat sur la gestion de l'eau en Méditerranée organisé par la cité des sciences de Paris La Villette dans le cadre de son exposition annuelle AQUA EXPO.
- Juin 2000 : Participation du coordinateur au séminaire "Petits barrages du Nord Mexique", Gomes Palacio. Atelier de fin de programme, restitution des données du chantier Nord Mexique du GP 623. Financement IRD entièrement.
- Juin 2000 : Réunion des coordinateurs des programmes UE DG recherche sur l'eau : programme STD4 et STD5, Bruxelles du 26 au 28 Juin 2000. Présentation du programme HYDROMED. J'ai été très intéressé par la démarche du programme MEDAQUA et j'ai réalisé les pages Web de présentation de HYDROMED dans le site : <http://www.MedAqua.org>
- Septembre 2000 : Diffusion de la lettre du programme Hydronews 6.
- Octobre 2000 : Dernière réunion de coordination à Montpellier et visite des bassins versants de Roujan. Cette réunion de coordination a eu pour objectif de faire un dernier point sur le

programme et de préparer le rapport final en profitant de la présence de représentants de toutes les équipes au séminaire sur l'hydrologie des zones méditerranéennes à Montpellier

- Octobre 2000 : Organisation conjointe d'un séminaire sur l'hydrologie méditerranéenne à Montpellier : HYDROMED & FRIENDAMHY (UNESCO). Ce séminaire tenu sous les auspices de l'IRD, de l'AISH, de la région du Languedoc et du département de l'Hérault a réuni une centaine de spécialistes de l'hydrologie méditerranéenne. Coorganisateur du séminaire : Eric Servat & Jean Albergel.
- Novembre 2000 : Evaluation conjointe par l'IRD et le SERST<sup>3</sup> des activités du programme en Tunisie. Cette évaluation a été réalisée par 4 experts, deux français, nommés par l'IRD et deux Tunisiens nommés par le SERST. Un compte rendu de cette évaluation a été porté à la connaissance des chercheurs d'HYDROMED dans hydronews 7.
- Décembre 2000 : Diffusion de la lettre du programme Hydronews 7.

### **Rédaction des rapports contractuels**

Le coordinateur a rédigé ce septième rapport d'avancement. Il a également rédigé le rapport annuel financier envoyé à la Commission en Décembre 00.

### **Réunion de coordination de Montpellier**

The coordination meeting of HYDROMED held before the seminar, allowed us to have a last workshop before the HYDROMED international seminar and to discuss about the final report. This final report will be written following the different themes studied in the program and not by gathering the contributions of the different teams. Main writers have been designed. Each principal writer will ask for contributions to each team. We hope to have two versions of the final report, one in French and one in English. An Arabic version could be written.

At this time the main chapters will be :

1. Context, justification and interest of the program. Goals. (Main writer : Jean Albergel)
2. State of the art and selection of the HYDROMED pilot sites. (Main writer : ?)
3. Water, soil and environment
  - a. Experimental equipment, data collection and data base (Main writer : Jean Albergel)
  - b. Hydrology modelling (Main writer : Ragab Ragab)
  - c. Small dams water quality and evolution (Main writer : Jean Lou Job)
  - d. Impact of small dams on the water table (Main writer : Slah Nasri)
  - e. Water and solute transport in soils, pollution problems (Main writer : Ronny Berndtsson)
  - f. Soil mapping and soil degradation in the watershed (Main writer : Jean Collinet)

---

<sup>3</sup> SERST : Secrétariat d'Etat à la Recherche Scientifique et Technologique de Tunisie.

- g. Soil erosion and dams siltation (Main writer : Abdel Aziz Merzouk)
- h. Soil conservation management on hill slope (Main writer : Slah Nasri)
- 4. Agronomy, agricultural economy - social management of water and erosion
  - a. Agro climatology and crops production, micro irrigation (Main writer : Raoudha Mougou)
  - b. Cattle breeding, role of small dams (Main writer : Mohamed Alami Mejatti)
  - c. Users organisations and water use (Main writer : Salah Selmi)
  - d. Social and economic impacts at the local and regional scale of the small dams (Main writer : Salah Selmi)
- 5. Sustainability of the hill reservoir and its integration in the durable development of marginal regions.
  - a. Expert systems (Main writer : Felix Moreno) :
    - i. For building a new small dams
    - ii. For developing agriculture around the lake
  - b. Place of small dams in the surface water mobilisation (Main writer : Slah Nasri)
  - c. Small dams in the water policies of the different Mediterranean countries. (Main writer : Salah selmi?)
- 6. Capacities building, training program (Main writer : Jean Khouri)
- 7. Program production from the beginning (Main writer : Jean Albergel) It has been decided to have a second volume gathering all the references and an extended abstract of all papers and reports produced by the program. I already did it for Tunisian works and will be very pleased to receive the contributions of the other teams.

I hope that each target researcher will react to this proposition discussed in Montpellier and to have more volunteers for contribution. Each contribution will be done in the more practical tongue for the writer and the coordination will do the translation.

## **ACTION DE FORMATION**

La formation à la recherche par la recherche reste le volet prioritaire du programme Hydromed. L'année qui vient de s'achever a vu la soutenance de DEA et de plusieurs mémoires de fin d'études et l'avancée de travaux de thèse (Cf production Scientifique)

## **PRODUCTION SCIENTIFIQUE (DEPUIS LE DEBUT DU PROGRAMME)**

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

- Treize articles publiés dans des revues internationales à comité de lecture et 7 soumis.
- Quatre ouvrages et thèses de doctorat.
- Sept logiciels
- 73 communications dans des congrès, colloques et séminaires.

- Quatre notes techniques d'intérêt général.
- 30 mémoires de fin d'études, DEA, MASTER, 5<sup>ème</sup> ou 6<sup>ème</sup> Année d'école d'ingénieurs. Dont 2 étudiants de Suède, 14 des pays méditerranéens et 1 du Bénin.
- des rapports divers.
- Vingt Posters.

#### **Publications dans des revues de rang :**

##### **PRODUCTION HYDROMED**

#### **Publications dans des revues de rang :**

##### Publiés ou à paraître

ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104.

PERSSON M. & BERNDTSSON R. (1998) : Estimating transport parameters in an undisturbed soil column using time domain reflectometry and transfer function theory, J. Hydrol., 205, 232-247.

PERSSON M. & BERNDTSSON R. (1998) : Noninvasive water content and electrical conductivity laboratory measurements using time domain reflectometry, Soil Sci. Soc. Am. J., 62, 1471-1476.

PERSSON M. & BERNDTSSON R. (1998) : Texture and electrical conductivity effects on temperature dependency in time domain reflectometry. Soil. Sci. Soc. Am. J. Vol 62 July August 1998 pp 887-893.

PERSSON M. (1997) : Soil solution electrical conductivity measurements under transient conditions using time domain reflectometry. Soil. Sci. Soc. Am. J. vol 61 n°4 July August 1997 pp. 997-1003.

PERSSON, M., R. BERNDTSSON, J. ALBERGEL, Y., S. NASRI, A. BAHRI, P. ZANTE, (1998) : A non-invasive approach for measurements of near-surface water content, Annal. Geopys., 16, Suppl. II, C483.

PERSSON, M., R. BERNDTSSON, Y. UMEGAKI, S. NASRI, J. ALBERGEL, P. ZANTE, (2000), Solute transport and water content measurements in clay soils using time domain reflectometry. Hydrological sciences Journal, 45(6) pp 833 - 846

SELMI S. & SAI M.B. (1998) : La gestion collective de l'eau d'irrigation en Tunisie : Particularités des AIC des oasis. In. Sécheresse n° 2, vol. 9, juin 1998.

SELMI S. (1998) : Quels leviers de développement dans les zones collinaires du Centre - Ouest tunisien. In Géographie et Développement (Revue de l'association des géographes tunisiens), Dix-septième année, Numéro 14, pp. 119-133.

SOMOGYI P., R. BERNDTSSON, J. ALBERGEL, Y., S. NASRI, A. BAHRI, P. ZANTE, (1998) : Préférentiel flow as indicated by brilliant blue, Annal. Geopys., 16, Suppl. II, C480.

OHSTROM P., PERSSON M., ALBERGEL J., ZANTE P., NASRI S., BERNDTSSON R. (accepté) Field scale variation of preferential flow indicated from dye coverage. AISH Journal

##### Soumis ou en préparation

ALBERGEL J., BARGAOUI Z., ONIBON H. PEPIN Y. (Soumis). Applying MUSLE with fuzzy parameters. WRR journal.

GRUNBERGER O., MONTOROI J.P. Evaluation by stable isotopes of groundwater recharge induced by a hill reservoir. En préparation.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in central tunisia. Soumis pour publication dans *Applied Geochemistry*.

NASRI S, ALBERGEL J, BERNDTSSON R. (soumis) Water balance changes due to introduction of a traditional water harvesting system. Journal of Hydrology

NASRI S., GRUNBERGER O., MONTOROI J.P. Hydrogeological impact of hill reservoir in a Mediterranean environment, Central Tunisia. En cours de rédaction.

PERSSON M, YASUDA H, ALBERGEL J., BERNDTSSON R., ÖHRSTRÖM P., NASRI S., ZANTE P., (in prep) Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model.

HAMED Y., BERNDTSSON R., PERSSON M., NASRI S., ALBERGEL J., ZANTE P., EL-NIAZY M., BALAH M., EL-SHISHTAWY A. (soumis) Spatial variation of soil water content and electrical conductivity influenced by surface leveling. AISH Journal

#### **Logiciels**

ALBERGEL J., BOHBOT H. (1997) : HYDROX Utilitaire de calcul pour reconstituer les crues. Programmé en DELPHI

ONIBON H., BARGAOUI Z., ALBERGEL J. (1998) FUSLE Utilitaire de calcul de l'USLE, formule de Williams avec logique floue. Programmé en Qbasic

VACHER J., MOUGOU R. & DEROUICH C. (1998) RESERV\_HYD Calcul de bilan hydrique d'une culture à l'échelle journalière et décadaire, méthode de Penman modifiée par Monteith et adaptée au semi-aride. Programmé en Vbasic

NASRI S., GRUNBERGER O. (1998). Modèle bidimensionnel d'écoulement d'une nappe avec potentiel imposé par un lac collinaire. Programmé en Vbasic

NASRI S., DUCHESNE (1999). Fonctionnement Hydraulique d'une cascade de banquettes mécaniques. Programmé en Vbasic

RAGAB R. (2000) HYDROMED Model. Modèle "pluie débit" et de remplissage d'un petit barrage, calcul de la probabilité de défaillance d'un ouvrage en fonction de sa capacité initial, des demandes en eau et d'un taux d'envasement. Programmé en Qbasic. Logiciel professionnel.

IDT J., ALBERGEL J. (2000) BALIEUPRO. logiciel expert d'aide à la décision pour la construction d'un petit barrage. Programmé en Vbasic. Logiciel professionnel.

#### **Ouvrages, thèses :**

BERNDTSSON R., (Editor, 1999) : Proceedings of International Seminar on Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semi-arid areas, an expert meeting with the EU-INCO collaboration HYDROMED (Program for Research on hill reservoirs in the semi-arid zone of the Mediterranean periphery), Rep. 3222, Dep. Of water Resour. Eng., Lund Univ., Lund, 1-316.

PERSSON M. (1999) : Conceptualization of solute transport using time domain reflectometry, a combined laboratory and field study, D. Sc. Thesis, Rep. No. 1025, Dep. of Water Resour. Eng., Lund Univ., Lund, pp. 1-60 + 8 append.

RAHAINGOMANANA N. (1998) : Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Thèse de doctorat en Hydrologie, Université Montpellier I, 311 p.

SELMI S. (1996) : Interventions de l'état 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 en économie du Développement Agricole, Agro-alimentaire et Rural, Ecole nationale Supérieure Agronomique de Montpellier.

#### **Publication dans des actes de séminaires :**

##### **1997**

ALBERGEL J. & CLAUDE J. (1997) : Small dams in the dry Mediterranean area : Stakes, constraints and prospects. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.

ALBERGEL J., HABAIEB H., EL FALEH J., RAHAINGOMANANA N. (1997) : Qualité des eaux dans les lacs tunisiens. Enjeu d'un développement durable de la petite hydraulique dans le semi-aride. In Water resources and irrigation water management. Int. Conf. On Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region. Vol. III « Water resources and irrigation water management ». AIIA, WWC, CIHEAM/MAI-B. 22-26 Sept 1997, Bari. Pp. 55-63.

ALBERGEL J., SMAOUI A., 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. V<sup>ème</sup> assemblée scientifique de l'AISH de Rabat.

BELLIER G., GAALOUL N., JOB J.O, MONTOROI J.P., ZANTE P., 1997 Interprétation pédologique de données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale). Colloque géophysique des sols et des formations superficielles (GEOFCAN), Orstom-Bondy, 11-12/9/1997, p17-22.

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. (1997) : Hydrological Survey on hill reservoirs in the semi-arid Tunisia. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.

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., BARGAOUI, PEPIN Y. (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.

RAGAB R., AUSTIN B.N., ALBERGEL J. (1997) : Hydrology of semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs : an overview and some preliminary results from a Tunisian catchments. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.

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. & SAI B. (1997) : La gestion collective de l'eau d'irrigation en Tunisie : particularités des AIC des Oasis. In Mutation des sociétés rurales et développement durable dans les pays de la rive Sud de la Méditerranée. Centenaire de l'INAT. Tunis. 15-16 Décembre.

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. pp. 455-470. Colloques et séminaires. ORSTOM éditions.

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). In Bulletin du Réseau Erosion n° 17, juillet 1997, pp. 176-185.

SELMi 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.

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, 10-12 avril 1997.

#### 1998

ALBERGEL J. & PEPIN Y. (1998) : Modeling small dam's siltation with MUSLE. In Seminar International: Rain Water harvesting and management of small reservoirs. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

ALBERGEL J., BOUFAROUA M., PEPIN Y. (1998) : Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en climat semi-aride tunisien. Bulletin Réseau Erosion n°18, pp. 67- 75.

ALBERGEL J., LOUATI M.B.Y., PEPIN Y. (1998) : L'hydrologie dans le projet : bilan des lacs et barrages collinaires ; bassins versants de Chaffaï. Présentation orale. Atelier de Kasserine (Tunisie) : Aménagements et valorisation agricole B.V. du Haut Mellègue. CRDA de Kasserine, ESAK, IRD, FIDA - 12 novembre 1998.

ALBERGEL J., NASRI S., BOUFAROUA M. (1998) : Small dams water balance : experimental conditions, data processing and modeling. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

ALBERGEL J., NASRI S., PEPIN Y., VACHER J. (1998) : Gestion d'un lac collinaire pour des périmètres irrigués, exemple du lac Kamech dans le Cap Bon. In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

ALBERGEL J., PEPIN Y., NASRI S., BOUFAROUA M. (1998) : Modeling small dams siltation with MUSLE. in International seminar Rain Water harvesting and management of small reservoirs. In Rain Water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas. Editor Ronny Berndtsson. LUTVDG/(TVVR-3222)/1-316/1999 pp. 197-203. Atelier HYDROMED de Lund, 29 June - 4 July 1998.

BEN MECHLIA, N., MEKKI, I., and ZANTE, P. (1998) : Spatialisation de l'activité agricole et de l'occupation du sol dans une région au relief accidenté. Anonymous Anonymous INAT/TUNIS: Colloque international (Satellite-Based observation: A tool for the study of mediterranean basin).

BOUFAROUA M., ALBERGEL J., FARHAT H. (1998) : Suivi et surveillance des lacs collinaires dans la zone semi-aride de la Tunisie. In Colloque EURISY, Athènes, 19 - 20 octobre 1998.

CHEN C. (1998) : Remote sensing applications for the management of small catchments in arid and semiarid areas. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

EL AMAMI H. & OUESLATI B. (1998) : Impact socio-économique de la pénurie en eau. Cas des lacs collinaires. In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

GRUNBERGER O., MONTOROI J. P., NASRI S., ALBERGEL J., PEPIN Y., RAHAINGOMANA N. (1998) : Water chemistry of a small reservoir catchments in Central Tunisia. In Séminaire International : Rain Water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

HOYBYE J. (1998) : Deterministic versus stochastic hydrological modeling, uncertainties and decisions. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

JABER B. & SAAD F. (1998) : Lebanese hydrology & needs for water storage. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

MEKKI I., ZANTE P., MASMOUDI M., BEN MECHLIA N. (1998) : Dynamique de l'utilisation de l'eau d'un lac collinaire pour l'irrigation. In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

MEKKI, I., ZANTE, P., MASMOUDI, M., and BEN MECHLIA, N. (1998) : Utilisation du GIS pour caractérisation hydrique d'un bassin versant. Anonymous Anonymous INAT et ORSTOM/TUNIS: Colloque international (Satellite-based observation: A tool for the Study of mediterranean basin. (CNES).

MERZOUK A. (1998) : Land use transformation impact on reservoir siltation in Morocco : the need for better assessment tools. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

NASRI S., GRUNBERGER O., ALBERGEL J. (1998) : Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple de l'oued El Gouzine (Ousseltia - Kairouan). In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

NASRI S., GRUNBERGER O., ALBERGEL J. (1998) : Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple de l'oued El Gouazine (Ousseltia - Kairouan). In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

NASRI S., ZANTE P., (1998) : The use of TDR for soil moisture measurements in soil erosion and conservation practices in small watersheds. Proceedings of the International Seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration HYDROMED. Department of water resources engineering, Lund Institut of Technology, LUND, Suède. 29/6 au 3/7/98.p165-189.

PERSSON M. (1998) : Solute transport and water content measurements in arid soils using Time Domain Reflectometry. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

PERSSON M., BERNDTSSON R., ALBERGEL J., NASRI S., BAHRI A., ZANTE P. (1998) : A non-invasive approach for measurements of near-surface water content, *Annal. Geophys.*, 16, Suppl. II, C483.

PRINZ D. (1998) : Water harvesting in the Mediterranean environment. It's past role and future prospects. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

RAHAINGOMANA N. (1998) : Water chemistry in small reservoirs of the semiarid Tunisia. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

RAHAINGOMANA N., BAHRI A., LEMOALLE J. (1998) : Prédiction d'évolution de la qualité de l'eau des lacs collinaires en période sèche à l'aide du modèle EXPRESSO. In les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

SELMI S. & SAI M. B. (1998) : La gestion collective de l'eau d'irrigation en Tunisie : Particularités des AIC des oasis. In. *Sécheresse* n° 2, vol. 9, juin 1998.

SELMI S. & SAI M. B. (1998) : La gestion collective de l'eau d'irrigation en Tunisie : particularités des AIC des oasis. In. *Sécheresse* (Numéro spécial Oasis) 1998 ; 9 (2) : pp. 111-115.

SELMI S. (1998) : La gestion collective des lacs collinaires en Tunisie : Vide juridique et pouvoir social important. In. Colloque SFER / Irrigation et gestion collective de l'eau en France et dans le Monde, Montpellier - Agropolis, 19-20 novembre 1998.

SELMI S. (1998) : Quels leviers de développement dans les zones collinaires du Centre Ouest tunisien : Kasserine, Siliana et Kairouan. In. *Géographie et Développement* (Revue de l'association des géographes tunisiens). Dix-septième année, Numéro 14, Janvier 1998, pp. 119-133.

SOMOGYI P., BERNDTSSON R., ALBERGEL J., NASRI S., BAHRI A., ZANTE P. (1998) : Preferential flow as indicated by brilliant blue, *Annal. Geophys.*, 16, Suppl. II, C480.

ZHU K., HUI C., ZHANG L., BERNDTSSON R. (1998) : Disinfection and fresh-keeping of rainwater in small scale cisterns. In arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.

## 1999

ALBERGEL J. & CLAUDE J. (1999) *Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen Euromed Safe Naples 28 - 30 Octobre 1999*

ALBERGEL J., MANSOURI T., PEPIN Y., SEGUIS L. (1999) : Reconstitution des crues sur les bassins versants des lacs collinaires en Tunisie Centrale et au Cap-Bon. (Atelier sur l'estimation des crues et des étiages. ENIT - INRS-eau Université du Québec - Aupelf Uref. Tunis, 16-17 février 1999.

ALBERGEL J., MANSOURI T., PEPIN Y., SEGUIS L. (1999) : Reconstitution et analyse des crues sur les bassins versants des lacs collinaires de Tunisie Centrale et du Cap-Bon. Atelier ENIT «Estimation des crues et des étiages». Tunis, 16 & 17 février 1999.

GRUNBERGER O., MONTOROI J.P. ALBERGEL J. (1999) : Evaluation par bilan isotopique de la recharge d'un aquifère induite par le fonctionnement d'une retenue collinaire : Premiers résultats sur le sit d'El Gouazine (Tunisie Centrale). Colloque International en hommage à la mémoire de J. Ch. Fontes Apport de la géochimie isotopique dans le cycle de l'eau. Hammamet (Tunisie) 6-8 avril 1999.

MANSOURI T., ALBERGEL J., PEPIN Y., ABDELJAOUED S. (1999) : Couplage d'un modèle spatialisé avec un modèle de prévision des risques pour les lacs collinaires dans la zone semi-aride tunisienne. Séminaire «6èmes Journées Nationales sur les Résultats de la Recherche Agronomique», Nabeul 6-7 décembre 1999.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O. NASRI S., (1999) : Geochemical groundwater -soil interactions in a small reservoir catchment of Central Tunisia. Preliminary Results. In J BECH (Ed.) " Soils with Mediterranean Type of Climate. 6<sup>th</sup> int. meeting, Barcelona, Spain, 4-9 Juillet 1999. Un. De Barcelone pp 123-125.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., (1999) : Water chemistry of a small reservoir catchment in central Tunisia. Preliminary results of water-soil-rock interactions. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden)*". ORSTOM/HYDROMED-SAREC-NFR-Lund University, Lund, Report 3222: 107-121.

SELMI, S., ALBERGEL, J., and NASRI, S. (1999) : Gérer au mieux les lacs collinaires. *Afrique Agriculture* 269:29.

## 2000

ALBERGEL J. & CLAUDE J. (2000) : Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

ALBERGEL J., BOUFAROUA M, NASRI S., PEPIN Y. (2000) : Etude de l'érosion des petits bassins versants à partir de la mesure de l'envasement de petits barrages. Exemple du semi aride tunisien. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

ALBERGEL J., SELMI S., BALIEU O. (2000) : Les petits barrages dans les régions semi-arides du sud méditerranéen. Mobilisation d'une ressource au profit de l'environnement et des populations. Coll Int. Medenpop. IRD, Djerba du 25 au 28 octobre 2000

BOUFAROUA M., ALBERGEL J., PEPIN Y. (2000) : Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne. 5ème conférence internationale sur la géologie du Monde Arabe. Le Caire, du 21 au 24 février 2000.

GAY D., ALBERGEL J., GRUNBERGER O. MICHELOT J.L, MONTOROI J.P. (2000) : Approche géochimique et isotopique des relations hydrologiques entre lac de retenue et aquifères. Cas du lac collinaire de Kamech, Tunisie. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

GRUNBERGER O., REYES V., MONTOROI J.P., ALBERGEL J., 2000 : Chemical erosion assessment by rainfall simulation of a gully head above a gypsic Mediterranean soil: Fidh Ali watershed, Central Tunisia. In "*Hydrologie des régions méditerranéennes, Résumés, 11-13 octobre 2000*", IRD, Montpellier, p. 19 (*en cours de publication dans les actes du séminaire*).

KHOURI J. (2000) : Integrated management of water resources in the arid and semi-arid regions of the Mediterranean basin. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

MANSOURI T, ALBERGEL J., SEGUIS L. (2000) : Modélisation hydrologique spatialisée de petits bassins versants en contexte semi-aride méditerranéen. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

MONTOROI J.P., BELLIER G., GRUNBERGER O., (2000) : Recharge d'un aquifère alluvial par un lac collinaire de Tunisie centrale : approche pluridisciplinaire. In : "*18<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Paris, 17-20 avril 2000*", SGF/Collectif Rech. en Ile-de-France, Thème A, p. 200.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., (2000) : Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. In C. BURGERS and M. FEY : "*5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geochemistry, Abstracts, 24/29 April 2000, Cape Town, South Africa*", University of Cape Town, p. 18.

NASRI S, ALBERGEL J., DUCHESNE J. (2000) : Application d'un modèle géomorphologique pour la simulation d'une crue exceptionnelle arrivant dans un petit barrage. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000

PERSSON M., YASUDA H., ALBERGEL J., BERNDTSSON R. (2000) : Fractal model to simulate unsaturated transport properties. Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

RAGAB R. (2000) : HYDROMED model and its application on semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

ROOSE E. (2000) : Traditional strategies for soil and water conservation in mediterranean areas. Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

#### **Notes techniques :**

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

GUIGUEN N. (1998) : L'acquisition numérique et autonome de données hydro-pluviométriques. L'expérience d'un réseau pilote tunisien de 1992 à 1998. "Suivi des barrages en zone semi-aride". CES / Ministère de l'Agriculture. ORSTOM. Note technique.

JENHAOUI Z., (1999) : Méthodes d'observation et de mesure de la pluie et de l'évaporation sur les lacs collinaires. CES / Ministère de l'Agriculture. ORSTOM. Note technique.

JENHAOUI Z., (1997) : Surveillance des lacs collinaires dans la zone semi-aride de la Tunisie par satellite ARGOS. ORSTOM/Tunis:ORSTOM/Tunis. :1-31.

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.

VACHER J. (1998) : Un modèle agro-météorologique simple de détermination du bilan hydrique d'une culture. Document interne IRD Tunisie. 12 p.

#### **Mémoires d'étudiants :**

##### **1996**

LALLAHEM, S. (1996) :Caractérisation des zones sensibles a l'érosion a l'aide d'un SIG. Application au Bassin versant du lac collinaire d'EL GOUAZINE région d'Ousseltia Tunisie centrale. Esier/Orstom:1-62

##### **1997**

LAMRANI O. (1997) : Estimation des Qmax pour l'étude d'exécution de lacs collinaires. Projet de fin d'étude, 3ème année génie civil ENIT. Tunis, juillet 1997. (Tunisie).

LARBI A. (1997) : Analyse temporelle et spatiale des pluies mensuelles. Application à la gestion des lacs collinaires. Mémoire de fin d'étude du cycle de spécialisation, INAT. Tunis, novembre 1997. (Tunisie).

MOUELHI I. (1997) : Etude comparative des formules empiriques d'estimation des apports liquides et solides ainsi que les débits de crues (cas de la dorsale tunisienne). Mémoire d'ingénieur, filière hydraulique et aménagement, ESIER. Medjez El Bab, Juin 1997. (Tunisie).

ONIBON H.G. (1997) : Analyse statistique de l'envasement des lacs collinaires à partir des caractéristiques géomorphologiques. DEA de modélisation en hydraulique et environnement de ENIT. Tunis, juillet 1997. (Tunisie).

PALMQUIST O. & TULLBERG O. (1997) : A experimental study of pollutant transport and erosion susceptibility in Tunisia. A study with rainfall simulation and dye in the M'Richet El Anse catchments. Master of Science Thesis, Dep. Of Water Resour. Eng., Inst. Of Techn., Univ. of Lund, pp. 1-56.

PERSSON M. (1997) : Non-destructive measurements of solute transport in the unsaturated zone using time domain reflectometry. Lic. Sc. Thesis, Rep. No. 3212, Dep. of Water Resour. Eng., Inst. of Techn., Lund Univ., Lund, 1997. (Suède)

ROMDHANE A. (1997) : Risque sanitaire des lacs collinaires. Projet de fin d'étude, INAT, Département de génie Rural, Eaux et Forêts. Tunis, juillet 1998. (Tunisie).

## 1998

CHIKHAOUI M. (1998) : Fonctionnement hydrologique et risque d'envasement de barrage Saboun (Tangérois). Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, IAV Hassan II. Rabat, 1998. (Maroc).

HICHAM E. (1998) : Comparaison de trois modèles d'érosion en utilisant les techniques Géomatiques et SIG. Mémoire d'ingénieur d'état, option sciences du sol, IAV Hassan II. Rabat, septembre 1998. (Maroc).

PERNIN C. (1998a) : Géochimie des lacs collinaires. Etude bibliographique et mission de terrain en Tunisie (Avril - Mai 1998) . Rapport de Stage. Multigr. INA PG/ ORSTOM Bondy, 31 p.

PERNIN C. (1998b) : Règles de gestion de l'eau d'irrigation des lacs collinaires tunisiens. Rapport de Stage. Multigr. INA PG/ ORSTOM Bondy, 14p + An.

TRABELSI, Y. (1998) : Diagnostic socio-économique des exploitations agricoles autour de trois lacs collinaires (Kamech, El Gouazine, Es Sénéga). Tunis:1-38.

## 1999

GAY D. (1999) : Géochimie isotopique des relations hydrologiques entre lac de retenue et aquifère. Petit barrage collinaire de Kamech (Tunisie). DEA, Université ORSAY / PARIS XI. (France).

MEKKI I. (1999) : Etude intégrée du bassin versant d'un lac collinaire et de l'exploitation de l'eau collectée pour l'irrigation. Mémoire de fin d'étude du cycle de spécialisation, INAT. Tunis, février 1999. (Tunisie).

MOUSSA I. & TRAORE F. (1999) : Rapport de stage du mois d'août 1999. IRD / ESIER. (Tunisie).

REYES GOMEZ V. M. (1999) : Dissolution interne d'un sol gypseux. Cas des têtes de ravine d'un bassin versant en milieu méditerranéen. Petit barrage collinaire de Fidh Ali (Tunisie). DEA, Université Montpellier II. (France). (Stagiaire mexicain sur la simulation des pluies à Fidh Ali).

REZIGUE M. (1999) : Etude de l'utilisation agricole d'un lac collinaire (Kamech) pour l'irrigation goutte à goutte d'une culture de tomates. IRD / ESH Chott Mariem. (Tunisie).

TRABELSI, Y (1999) : Etude de l'offre et modélisation de la demande en eau : Cas des lacs collinaires de KAMECH (Nabeul), El GOUAZINE (Kairouan) et ESSENEGA (Kasserine). ESA/CES/IRD:1-64,

## 2000

ABIDE KARAYE J. (2000) : Modélisation de l'évapotranspiration de la température et des échanges énergétiques d'une culture de tomate. DEA INAT / IRD Tunis 64 p

BATITA, N. (2000) : Contribution à l'étude des comportements hydrologiques et érosifs du bassin versant d'un lac collinaire. INGREF/TUNIS:INGREF/TUNIS. :1-74+annexes.

HERMASSI T. (2000) : Analyse des Facteurs Conditionnels de l'Ecoulement et de l'Erosion dans des Petits Bassins Versants de la Dorsale Tunisienne. PFE INAT / IRD 58 p + an.

IDT (2000) : Balieupro 1.0 logiciel expert d'aide à la décision pour la construction d'un petit barrage. Rapport de stage Ecole centrale de Lille. Logiciel + Manuel.

LASSERE G. (2000) : Conception et dimensionnement de trois stations de mesure de débits et du transport solide dans le bassin versant de Kamech. Rapport de stage 4<sup>ème</sup> année INSA de Renne. IRD TUNIS

LESCURE F. (2000) : Cartographie et mise en place d'un Système d'Information Géographique sur le bassin versant El Ogla – Détermination des zones sensibles à l'érosion. Rapport de stage Licence EGIDE Bordeaux IRD Tunis 29 p+ ann + cartes

TRUCHET N. (2000) : Etude de l'érosion ravinatoire sur un petit bassin versant argileux de Tunisie. Rapport de stage DESS Université Louis Pasteur de Strasbourg. IRD / Tunis 61 p + an

## Posters :

ALBERGEL J. (1999) : HYDROMED Research program on hill reservoirs in the semi arid Méditerranean periphery (English, French and German) Launch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

ALBERGEL J., COLLINET J., ZANTE P. (1999) : Hydromed Action 2: Eau-sol-environnement Launch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

COLLINET J., ZANTE P (1998) : Infiltrabilité des sols bruns calcaires du bassin versant de M'Richet El Anse. Congrès International des sciences de sol Montpellier Août, 1998.

COLLINET J., ZANTE P., ALBERGEL J. (2000) : Détenion hydrique superficielle de sols à argiles gonflantes de Tunisie (quantification, dynamique) Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

DEBEBRIA A., BEN YOUSSEF M., BEN YOUNES LOUATI M., JENHAOUI Z., PEPIN Y. (2000) : Réseau de surveillance des lacs collinaires en Tunisie Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

DROUBI A., IBRAHIM Y, KAYAT S, EL SOUKI M. (1999) : A preliminary evaluation of water budget (Syndiane lake - Syria) Laouch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

LARBI-MESSAI A., ALBERGEL J., HABAIEB H., PEPIN Y., SLIMANI M. (1997) : Analyse Spatio-temporelle des pluies dans la Tunisie des lacs Collinaires. Centenaire de l'INAT, séminaire ressources naturelles, Tunis, 11-13 novembre 1997.

MANSOURI T., BOUSSEMA R., ALBERGEL J. (2000) : Application de la géomatique pour l'étude de l'érosion à l'extrême Nord de la Tunisie. Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

MEKKI I., ZANTE P., MASMOUDI M., BEN MECHLIA N. (1999) : Caractérisation hydrique du bassin versant Kamech. Laouch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

MEKKI, I., ZANTE, P., MASMOUDI, M., BEN MECHLIA, N. (1998) : Utilisation du G.I.S.pour la caractérisation hydrique d'un bassin versant. Poster au Colloque International: L'observation spatiale, un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunis, 13-27 nov. 1998.

MERZOUK A., BENYOUNES A., CHIKHAOUI M., MEJJATTI ALAMI M., ALBERGEL J., MORENO F., ROOSE E. (1999): Fonctionnement hydrologique et risques d'envasement du barrage collinaire SABOUN (Tangérois) Laouch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

MONTOROI J.P., BELLIER G., GRUNBERGER O., (2000) : Recharge d'un aquifère alluvial par un lac collinaire de Tunisie centrale : approche pluridisciplinaire. Poster présenté à la "18<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre", 17-20 avril 2000, Paris (France), HYDROMED-IRD.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O. (2000) : Geochemical effects of a hill reservoir leakage above downstream alluvial aquifer (watershed of El Gouazine, Central Tunisia). Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., (2000) : Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. Poster présenté au "5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geochemistry", 24-29 April 2000, Le Cap, (Afrique du Sud), HYDROMED-IRD.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., (1999) : Alluvial aquifer recharge of a small hill reservoir in central Tunisia. Poster présenté à "Conference to launch the 5<sup>th</sup> Framework Programme of the European Commission", 25-26 February 1999, Essen (Germany), HYDROMED-INRGREF-IRD.

MORENO, MERZOUK, de la ROSA, ALAMI (2000) : Measurement and development of a database of soil hydraulic properties for the watershed of Saboun (Morocco). Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000.

NASRI S (1999) : Agroclimatological research on hill reservoirs in the semi arid zone of the mediterranean periphery. Laouch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

NASRI S. (2000) : Impacts hydrologiques des banquettes mécaniques. Exemple de l'Oued El Gouazine (Ousseltia - Kairouan Tunisie Centrale). Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

NASRI S. (2000) : Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple de l'Oued El Gouazine (Ousseltia - Kairouan Tunisie Centrale). Seminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" IRD, Montpellier dui 11 au 13 oct. 2000

SELMI S. & ZEKRI S. (1999) : Le lac collinaire d'El Gouazine (Kairouan) - Un exemple d'avantages au profit de la collectivité locale. Laouch of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

SELMI S. (1999) : Lacs collinaires en Tunisie semi-aride - des enjeux pour l'environnement et le développement agricole Laouach of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999.

ZANTE P., COLLINET J., TRUCHET N., PEPIN Y. (2000) : Mesure de l'érosion ravinaire des sols argileux de Tunisie. Séminaire int. "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" AISH, IRD, Agropolis-Montpellier, Montpellier du 11 au 13 oct. 2000.

### **Diaporamas électroniques, Pages Web, CD Rom**

ALBERGEL J. (1998) : Hydromed : Programme de recherche sur les lacs collinaires en zone semi-aride du pourtour méditerranéen. <http://www.bondy.ird.fr/gp> 623

LAGASQUIE M. P. & BERNIER S. (1999) : Définition des paramètres d'entrée d'un modèle hydrologique spatialisé dans le cadre de l'analyse spatiale du processus d'érosion en Tunisie. CD Rom. ENGREF.

RAGAB R., AUSTIN B.N., ALBERGEL J. (1999) : Hydrology of semi arid mediterranean catchments with hill reservoirs : An overview and some preliminary results from a Tunisian catchment. slides 33. Laouach of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999

RAHAINGOMANANA N. (1999) : Water Chemistry in small reservoir of the semi-arid Tunisia. Power Point Diaporama , slides 33. Laouach of the 5<sup>th</sup> Framework Programm. Essen 25-26 Fev. 1999

ALBERGEL J. & BOUFAROUA M. (2000) : Convention d'application, conservation des eaux et des sols. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 18 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

ALBERGEL J. (2000) : Le réseau pilote de surveillance des lacs collinaires, banques de données et annuaires. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 18 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

ALBERGEL J. (2000) : Modélisation du bilan hydrique des lacs et applications. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 18 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

BOUFAROUA M., ALBERGEL J., PEPIN Y. (2000) : Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la dorsale tunisienne. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 22 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

DEBRABRIA A., BEN YOUNES LOUATI M., BEN YOUSSEF M., PEPIN Y. (2000) : Gestion des plates formes d'acquisition et de transmission des données hydrologiques. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 15 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

KARIM Y. & JENHAOUI Z. (2000) : L'espace au service de l'hydrologie. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 16 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

MANSOURI T., ALBERGEL J., SEGUIS L. (2000) : Modélisation hydrologique spatialisé du bassin versant de El Gouazine. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 20 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

MOUGOU R. (2000) : Agro-climatologie des lacs collinaires de Tunisie. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 19 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

PEPIN Y., BEN YOUNES LOUATI M., DEBRABRIA A., BEN YOUSSEF M. (2000) : Suivi de l'envasement dans les lacs collinaires. In Atelier «Suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien». 19 diapositives. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

### **Rapports**

#### **1996**

CES - IRD Annuaire Hydrologiques Parus : 1994-95, 1995-96, 1996-97, 1997-1998, 1998-1999.

#### **1997**

GUIGUEN N. & LOUATI M.B.Y (1997) : Rapport de mission au Maroc. 3-10 Novembre 1997. ORSTOM IAV.

HYDROMED (1997) : Compte rendu de la première réunion de coordination.

HYDROMED (1997) : Premier et second rapports d'avancements.

HYDROMED (1997, 98) : Hydronews 1, Hydronews 2, Hydronews 3, Hydronews 4

KARA DAMOUR S. & MISKI A. F. (1997) : Small dams and hill reservoirs in Syria. ACSAD.

PEPIN Y. & LOUATI M.B.Y (1997) : Equipement des sites pilotes syriens. Rapport de mission en Syrie. Du 27 novembre au 4 décembre 1997. ORSTOM - ACSAD.

ROOSE E. (1997) : Protection des terres et gestion du ruissellement à l'amont d'un lac collinaire en zone méditerranéenne semi-aride. Etude Bibliographique pour le projet Hydromed. ORSTOM Montpellier.

SELMI S. & NASRI S (1997) : Synthèse préliminaire sur les lacs collinaires de Tunisie. INGRES-ORSTOM Tunis.

ZANTE P., (1997) : Lac collinaire de Kamech. Les caractéristiques physiques et biologiques du bassin versant. 12p. IRD Tunis.

#### 1998

COLLINET J., ZANTE P., (1998) : Gestion conservatoire des eaux et des sols. Rapport d'activité du programme HYDROMED. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., MANSOURI T., (1998) : Compte Rendu de mission sur le Bassin Versant de Fidh Ali, reconnaissance du système de ravines et protocole des mesures. 17- 19 novembre 1998, 6 p. IRD Tunis.

HYDROMED (1998) : Troisième et Quatrième rapport d'avancement

MANSOURI T. (1998) : Etat d'avancement des travaux de recherche. Période du 1/1/97 au 30/10/97 ORSTOM, Université de Tunis II.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., LAMACHERE J.M., CECCHI P., ALBERGEL A., (1998) : Compte-rendu de la réunion du programme 623 "Petits barrages en milieu semi-aride" (Bondy, 26-27 mars 1998). Multigr., ORSTOM, Bondy, 9 p.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., PERNIN C., (1998) : Rapport de mission en Tunisie (11 au 25 mai 1998). Multigr., ORSTOM, Bondy, 8 p.

PEPIN Y. & LOUATI M.B.Y (1998) : Rapport de mission en Syrie. Du 8 au 17 décembre 1998. ORSTOM - ACSAD.

PERNIN C. (1998) : Règles de gestion de l'eau d'irrigation des lacs collinaires tunisiens. Rapport IRD/INAPG. 65 p.

SELMI S. (1998) : Rapport sur le lac Syndiana. ORSTOM - ACSAD.

#### 1999

AGREBAOUI S., COLLINET J., DRIDI B., ZANTE P., (1999) : Simulation de pluie sur deux sites du bassin versant de Fidh Ali, premiers résultats, avril 1999, 6 p.

ALBERGEL J., CLAUDE J., JOB J.O. (1999) : Rapport de mission en Syrie et au Liban, du 29/1 au 2/2/99. IRD, Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., (1999) : Carte pédologique du bassin versant de Fidh-Ali (Tunisie), présentation, utilisation, Tunis, février 1999, 6 p + 1 carte.

COLLINET J., ZANTE P., BEN YOUNES M., (1999) : Compte Rendu de mission sur le Bassin Versant de Fidh Ali, reconnaissance pédologique et bornage des sites 26-28 janvier 1999 10 p. IRD Tunis.

HYDROMED (1999) : Cinquième rapport d'avancement.

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., GAY D., REYES V., (1999) : Rapport de mission en Tunisie (15 mars au 10 avril 1999). Multigr., ORSTOM, Bondy, 19 p.

#### 2000

ALBERGEL J., COLLINET J., PEPIN Y.,(2000) : Expertise sur cinq sites de lacs collinaires dans le Gouvernorat du Kef (Tunisie) pour Min. Agri. Tunisie CRDA du Kef et Agence Française Coopération. Janvier 2000, 41p. 17fig. .

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., (2000) : Caractérisation chimique et isotopique des eaux et des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique de la campagne de mesures 1998. Multigr., IRD/DCES/INRGREF, Bondy, 90 p. + annexes

## **CONCLUSION**

Les échéances du contrat sont respectées et l'avancement des travaux suit le rythme prévu. Ce rapport scientifique a pris un peu de retard. Le volume de l'information à traiter a été légèrement sous estimé et malgré les demandes répétées dans les deux courriers HYDRONEWS 6 et 7, l'ensemble des éléments n'est arrivé que récemment au coordinateur.

La production scientifique conserve un rythme honorable. Plusieurs projets de co-publication sont en cours. Un effort particulier sur les publications des résultats et sur la sortie des thèses en cours devra être menée durant les derniers mois du programme.

La dernière réunion de concertation du programme HYDROMED s'est tenu à Montpellier le 10 octobre 2000. Un plan a été proposé pour le rapport final.

Le séminaire international sur : "l'hydrologie des régions méditerranéennes" - co-organisé par les programme FRIEND AMHY et HYDROMED et parrainé par l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH), l'Institut de Recherche pour le développement (IRD), le Programme Hydrologique International de l'UNESCO, l'Université de Montpellier II et les instances régionales du Languedoc Roussillon - a été l'occasion d'une première discussion de nos résultats à l'échelle internationale.

**Le coordinateur d'Hydromed**



**Jean ALBERGEL**

### **Annexe 1 : Contribution équipe de Tunisie IRD / INRGREF pour rapport final**

- 1. Note de synthèse "eau - sol environnement"**
- 2. Note de synthèse "Qualité des eaux"**
- 3. Note de synthèse "Agronomie - bio climatologie"**

**Annexe 2 : Rapport d'avancement INRGREF**

**Annexe 3 : Rapport d'avancement IAV**

**Annexe 4 : Rapport d'avancement ACSAD**

**Annexe 5 : Rapport d'avancement IRNASE**

**Annexe 6 : Rapport d'avancement LUND**

**Annexe 7 : Rapport d'avancement IH**

**Note de synthèse**  
**des activités « eau- sol- environnement » du programme "HYDROMED"**  
**-- contributions Jean Collinet (ii), Patrick Zante (i), pédologues --**  
**IRD Tunis, novembre 2000**

*(i) P. Zante: affectation mi 1996 sur IRD Tunis dans le cadre d'une collaboration IRD - CES. Il lui fut demandé de travailler dans le domaine de la reconnaissance des sols des bassins versants du réseau de surveillance des lacs collinaires, de mener des études spécifiques sur la sensibilité des sols à l'érosion en amont des retenues et de s'intéresser à la mise en valeur par irrigation des terres voisines des retenues collinaires. Avec l'accord cadre IRD - IRESA il lui fut également demandé diverses actions de recherches et de formation coïncidant avec la thématique précédente, cette fois dans le cadre de la convention IRD - INRGREF et pour le programme HYDROMED, dans son action n°2 "eau - sol - environnement".*

*(ii) J. Collinet: affectation mi 1998 sur IRD Tunis dans le cadre de la convention IRD - INRGREF, pour le programme "Petit barrage" de l'ORSTOM puis dans HYDROMED Tunisie où sa collaboration fut souhaitée dans l'action "eau - sol - environnement", donc dans le cadre de la même thématique que précédemment.*

*Pour ces deux agents des taches d'encadrement et formation avec les autres Instituts tunisiens impliqués dans HYDROMED sont également requises.*

### **Cadre physique et objectifs scientifiques**

Notre objectif général est une analyse et un suivi des comportements hydrodynamiques et érosifs des versants de petits bassins équipés de retenues collinaires en zone méditerranéenne semi-aride .

### **Cadre**

Le cadre général est le semi-aride cultivé de Tunisie. Dans cet ensemble, des bassins ont été retenus parmi les quelque trente BV du réseau pilote étudiés par nos collègues hydrologues. Ce choix fut guidé par des représentativités physiques, climatiques ainsi que par leurs utilisations agricoles. Parmi ces bassins, quatre supportent différentes expérimentations menées à l'aide de dispositifs mobiles ou fixes, ce sont:

#### **- Kamech**

Presqu'île du Cap Bon. Gouvernorat de Nabeul. Limite des bioclimats sub humides et semi-arides méditerranéens. P # 500mm avec des années humides de # 1000mm. BV de 245 ha. Lac collinaire de 140000m<sup>3</sup>. Ke moyen 1996 / 97 / 98 : 44 / 4 / 20%. Erosion spécifique: 15 / 15 / 18 m<sup>3</sup>/ha/an. Marnes dominantes donnant des sols limono-argileux à argiles actives. 75% de céréalicultures + légumineuses + maraichage irrigué. Ravinement et mouvements de masse.

#### **- El Gouazine**

Dorsale tunisienne, SE du massif du Bargou. Gouvernorat de Kairouan. Bioclimat semi-aride continental. Versant SE sec du massif du Bargou. P # 400mm, forte variabilité. BV de 1810ha. Lac

collinaire de 230000m<sup>3</sup>. Ke moy.: 5 / 1 / 3%. Erosion spécifique: 1,5 / 1 / 1,3 m<sup>3</sup>/ha/an. Calcaires dominant donnant des sols limono-sableux, forte charge en EG en amont et rive droite. 50% de céréaliculture. Versant rive gauche et partie amont très aménagés (banquettes). Maraichage et fruitiers irrigués en aval du barrage. Faible érosion en nappe.

- Mrichet el Anze

Dorsale tunisienne. Gouvernorat de Kairouan. Bioclimat semi-aride continental. NO arrosé du massif du Bargou. P # 450mm, années humides à 1000mm. BV de 158ha. Lac de retenue de 42000m<sup>3</sup>. Ke moy.: 4 / 7 / 2%. Erosion spécifique: 6 / 6 / 8 m<sup>3</sup>/ha/an. Calcaires et marnes équivalentes donnant des sols limono-sableux à limono argileux à argiles actives (vertisols). 75% de céréaliculture et légumineuses, maraichage et fruitiers irrigués en aval. Début aménagement en aval (banquettes). Erosion en nappe et rigoles moyenne.

- Fidh Ali

Limite dorsale tunisienne - plaine de Kairouan. Gouvernorat de Kairouan. Bioclimat limite semi-aride et aride. P # 300mm, forte variabilité. BV de 412ha. Retenue de 135000m<sup>3</sup> (lac) Ke moy.: 5 / 1 / 3%. Erosion spécifique: 14 / 18 / 16 m<sup>3</sup>/ha/an. RM = alternance calcaires et marnes gypseuses dominantes donnant des sols limono-argileux à argiles actives. Occupation: 75% céréales. Ravinement fort et bad lands en amont.

- Essenaga

Situé dans la partie SO de la Dorsale tunisienne, dans le bassin versant de l'oued Zeroud. Gouvernorat de Kasserine. Bioclimat semi-aride inférieur à hivers frais . P # 350 mm, forte variabilité (250-450 mm). Altitude de 618 à 880 m. BV de 363ha, retenue de 86 420 m<sup>3</sup>, Ke moy. : 7.4/11.0/6.2 % Erosion spécifique : 6.53/ 10.93. m<sup>3</sup>/ha/an. RM = alternances de grès et de marnes à nummulites incrassatus du Bartonien supérieur dans la partie aval et de calcaires blancs du Campanien en bancs redressés dans la partie amont. Occupation : parcours (70%) essentiellement dans la moitié amont, céréales et arboriculture à l'aval. Roche affleurante sur la plus grande partie du bassin, ravinement fort dans les marnes.

## Objectifs

L'application de l'équation générale du bilan hydrologique sur ces retenues permet de connaître les écoulements par événements pluvieux efficaces et les écoulement moyens annuels. La bathymétrie réalisée chaque année par nos collègues hydrologues, donne des volumes de terre sédimentées donc une érosion spécifique annuelle du BV. Il n'est évidemment pas envisageable, ce serait d'ailleurs "a-scientifique", de multiplier de tels dispositifs sur la totalité des retenues déjà construites (572) ou prévues (1000). Il faut donc développer des modèles prédictifs de comportements en relation avec une typologie des bassins, cette typologie étant fondée sur des variables explicatives inhérentes aux événements pluvieux, aux caractéristiques morphopédologiques du BV et aux variations des occupations, usages, voire aménagements CES.

Notre contribution pédologique dans l'action « eau - sol - environnement » est la recherche d'informations permettant cette typologie. Cette recherche consiste ainsi à connaître les processus en jeu, établir tous liens possibles avec le contenant physique du système, synthétiser ces séries de relations sous la forme d'indicateurs comportementaux pertinents.

Pratiquement il faut identifier le contenant physique (cartographie) et analyser son contenu fonctionnel (dynamique actuelle).

S'agissant de l'analyse du fonctionnement du système nous nous préoccupons plutôt de travailler aux échelles des parcelles et portions de versant , notre activité étant un suivi de la formation des écoulements et de la mobilisation des terres sur les mosaïques des parcelles du versant pour différents évènements pluvieux et sous différentes situations sols/occupations/techniques culturelles.

Les transferts, et stockages, de flux liquides plus ou moins chargés sur les versants et vers l'exutoire sont plutôt traités par nos collègues hydrologues.

Cette dichotomie est artificielle car elle résulte plus d'un partage des tâches en relation avec des compétences que d'une disjonction de fonctionnelle, surtout lorsqu'il s'agit de traiter des problèmes d'érosion. Nous pouvons déjà dire que nous retrouverons dans un prochain programme (AMBRE) de nouvelles occasions d'activités transdisciplinaires.

## **Organisation de la recherche: 8 actions en 2 opérations**

Notre travail de pédologie s'effectue au sein de quelque 8 actions de recherches que l'on peut regrouper en deux opérations :

1) Cartographie (des risques): identification, représentation des sols des petits bassins versants, identification, représentation et suivi des usages des terres agricoles dans l'espace et dans le temps, combinaison de ces informations avec d'autres « nappes » d'informations pour créer des cartes d'isorisques de dégradation. Ces inventaires cartographiques semi-détaillés pour une évaluation des risques érosifs sont réalisés sur 6 bassins, cette opération se prolongera sur environ 8 autres.

2) Dynamique actuelle (des agrosystèmes): compréhension du fonctionnement des agrosystèmes identifiés, combinaison d'observations et expérimentations établissant des relations entre facteurs (énergie pluies, débit d'écoulements) et effets dégradants, voire, cela peut arriver, agrasant, pour toutes situations.

A court terme (HYDROMED), le produit est une connaissance de l'hydraulicité et de la susceptibilité à l'érosion des versants cultivés, ou diversement réaménagés, ceci débouchant, entr'autres choses sur l'origine des sédiments comblant les retenues collinaires.

Sur le moyen terme (HYDROMED - AMBRE), comme cela a été envisagé précédemment, on peut prétendre atteindre l'identification d'indicateurs comportementaux des terres dans le contexte du méditerranéen semi-aride,

Sur le long terme (AMBRE) et avec un renfort en chercheur(s?) l'interpolation à partir de quelques BV plus intensément étudiés confortera une typologie de BV ou de paysages agraires, de là partiront des extrapolations sur grands BV donc des préconisations de méthodes de gestion et de conservation des eaux et des sols,

## **Méthodes et résultats**

### *Avertissements préliminaires...*

Les 8 actions contenues dans les 2 opérations mentionnées précédemment sont menées simultanément à des périodes de l'année les plus propices à l'obtention de résultats « réalistes ». Les résultats partiels obtenus sur les unes pouvant guider le déroulement, voire réorienter les autres, en plus, elles sont fortement interconnectées.

Nous n'avons manifesté aucun a priori dans le choix des méthodes en début de programme considérant que le terrain et son évolution guidait notre choix. Les innovations méthodologiques, que nous nous sommes efforcés de ne pas confondre avec de la recherche, ont toutes recherché la rapidité et la précision. Nous avons priorisé des méthodes "légères" permettant d'obtenir des

informations suffisantes sur de nombreuses situations plutôt que d'installer des dispositifs lourds, inamovibles, et fournissant des informations, éventuellement plus précises, mais non extrapolables et non réadaptables aux processus dont on s'efforce de suivre le déroulement et de quantifier les intensités.

Nous avons ainsi pu ne pas prolonger plus que nécessaire, des actions dès lors qu'elles nous avaient donné une information suffisante pour la compréhension du ou des processus analysés.

## 1) Opération « cartographie des risques »

### 1.1. cartographie des sols

Il s'est agi de dresser des cartes de prévisions des risques de dégradation physique des bassins versant, dégradations liées aux érosions hydriques (échelles > 1:50000). L'inventaire cartographique est mené selon les procédures pédologiques classiques (cf. diagramme de la figure 1) mais la taxonomie s'exprime plus en termes de facteurs influençant ruissellements et érosions et beaucoup moins en termes classificatoires qui seraient ici peu informatifs.

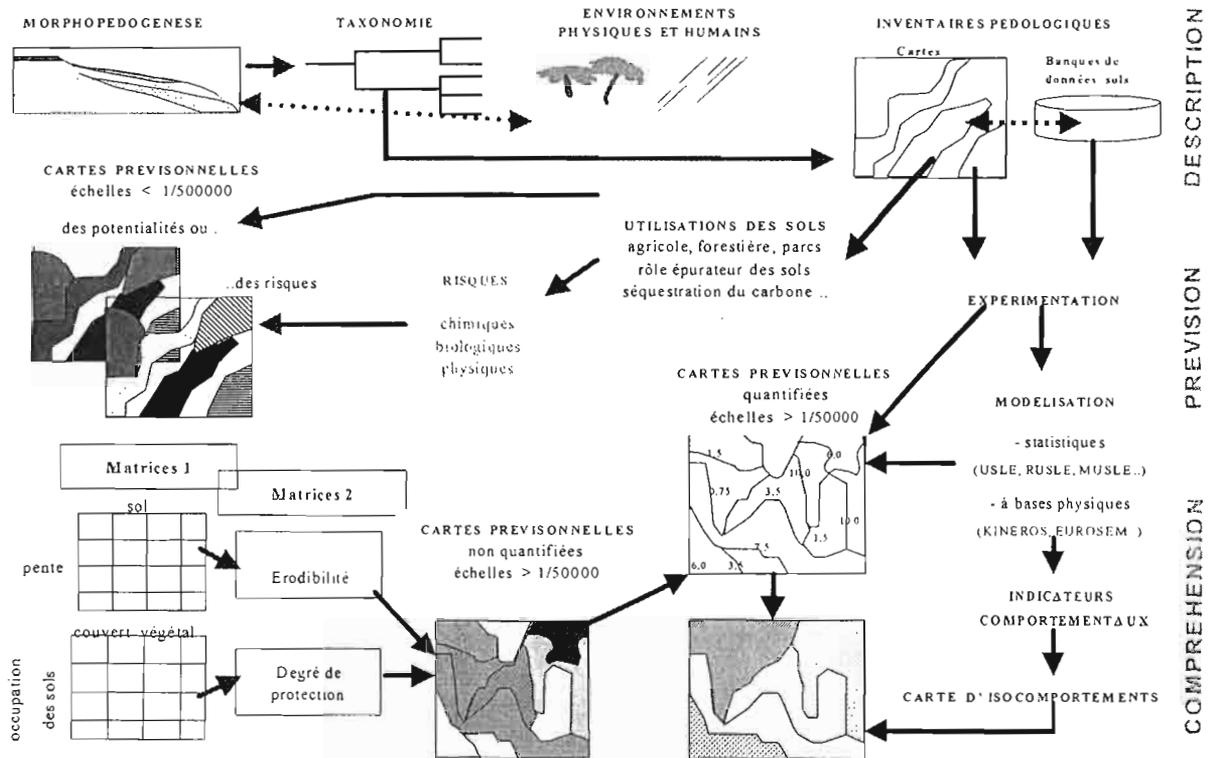


Figure 1: Identification, compréhension et représentation des dégradations du milieu - exemple de l'érosion hydrique

### 1.2. cartographie des occupations des sols



### Figure 3: empilement des informations pour une quantification des risques érosifs

La seconde génération de cartes ( Figure 3) fournira une quantification des risques. Si le principe d'empilement d'informations reste identique au cas précédent, on combine ici l'utilisation des modèles statistiques (MUSLE et autres) et d'un S I G (Arcview) en prenant la précaution de diagnostiquer les types de dégradation que peuvent seulement révéler les modèles utilisés.

## 2 ) Opération « dynamique actuelle des agrosystèmes »

L'analyse du fonctionnement des systèmes est réalisée soit par l'observation du terrain, aidée ou non d'appareillage, soit par l'expérimentation.

Dans le premier cas il s'agit de tous travaux portant sur la morphométrie des surfaces (états des surfaces, rugosité) ou la géométrie de volumes comparés à différentes époques (tachéométrie laser pour différents types d'érosion).

L'expérimentation, quant à elle, concerne soit l'évolution de profils hydrométriques (sondes T D R), soit les conductivités hydrauliques des surfaces et l'érodibilité des sols (simulation de pluies).

Ces actions concourent toutes à suivre des fonctionnements sous l'influence de facteurs extérieurs (énergie des pluies et, ou, abrasion du flux) et sous l'influence de transformations que ces facteurs imposent aux systèmes: deux exemples.. (i) effondrement de structures naturelles ou construites par dissipation de l'énergie des pluies, (ii) mouvements de masses par sursaturations hydriques profondes sur des terrains en pente...). Ces exemples montrent que toutes les actions sont indissociables car elles participent toutes d'un continuum de connaissances nécessaires pour pouvoir articuler causes et effet(s). Les 6 actions qui suivent et leurs résultats ne sont présentées séparément que par souci de clarté.

### 2.1. Etats des surfaces (description et rugosité)

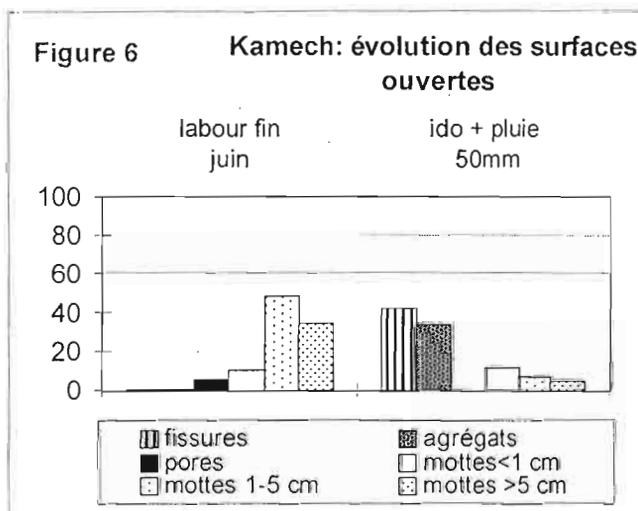
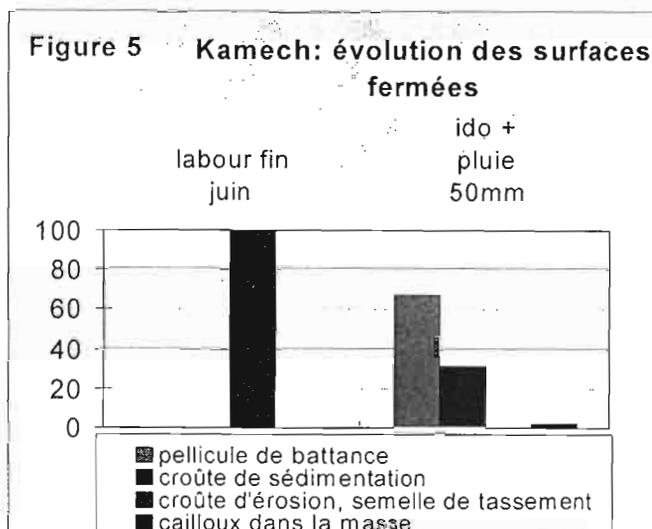
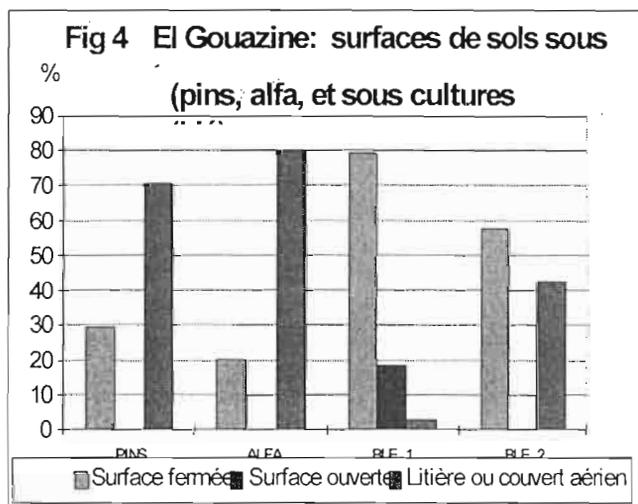
Identifier un état de surface consiste à voir et décrire un instantané des organisations structurales de l'extrême surface du sol. C'est un excellent indicateur de la conductivité hydraulique saturée des surfaces donc d'une part importante de l'infiltrabilité générale du sol. Des études antérieures d'équipes travaillant sur le sujet depuis plus de vingt ans ont fourni des codes descriptifs stricts et sûr de ces organisations superficielles. Leurs évolutions dans le temps étant fortement dépendantes du cumul des énergies des pluies, des réorganisations structurales naturelles ou artificielles ainsi que des couverts végétaux, on conçoit que leurs suivis puissent informer sur la genèse des écoulements et des érosions.

La conductivité diminue fortement sur « surfaces fermées » expression résumant les colmatages liés aux pellicules de battance, aux croûtes de décantation, aux croûtes de tassement, aux éléments grossiers partiellement inclus dans la surface, etc... Cette conductivité est nettement moins contrôlée par des croûtes structurales. Les cailloux posés en surface, les fissures, les terriers et galeries béantes en surface et toutes litières ou couverts aériens interceptant l'énergie des pluies augmentent fortement la conductivité, limitent ainsi les ruissellements et par conséquent l'érosion, ces organisations sont résumées par le terme « surfaces ouvertes ».

Les exemples présentés ici concernent des états de surface sous différentes situations (El Gouazine) ou évoluant sous différentes contraintes (Kamech)

Le graphique de la figure 4 ci contre montre deux situations: a) relativement « filtrante » sous pin et alfa grace aux litières et couverts herbacés, b) peu perméable sous céréales sauf sur « BLE 1 » ou 18% de surfaces ouvertes correspondent au piétinement du bétail cassant la pellicule de battance.

Les figure 5 et 6 montrent des évolutions d'organisations structurales superficielles sur labour après l'intervention d'une pluie de 50mm.



Sur la figure 5, la perméabilité du champ diminue puisque les mottes simplement émoussées par les fines pluies précédentes se désagrègent en fournissant leurs éléments pour construire des pellicules de battance, et de sédimentation, tandis que cette « fusion » fait réapparaître des éléments grossiers.

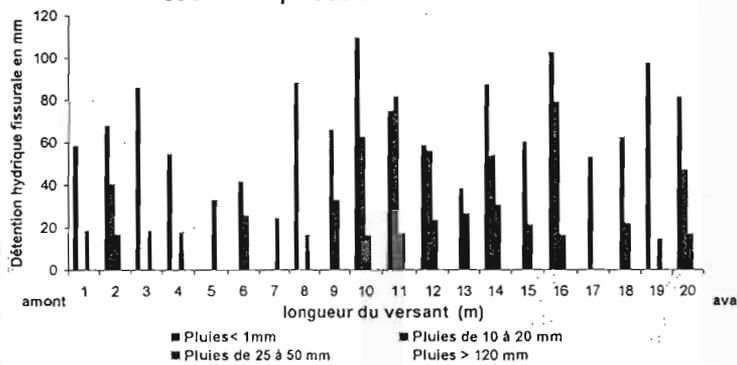
Sur la figure 6 on met en évidence une diminution générale des diamètres des mottes de labour résiduelles mais aussi un ensemble fissures + nouveaux agrégats qui prouve une certaine activité des argiles; ces nouvelles organisations contribuent à maintenir la conductivité sur ces sols à argile gonflante, on y

reviendra dans ce qui suit.

Cette modification des surfaces est aussi mesurée par les coefficients de leurs rugosités que l'on suit tout au long de l'année. Les mesures sont faites soit de façon "rustique" à la chaînette, soit de façon plus "high tech." avec un distancemètre laser coulissant sur une poutrelle au dessus d'un champ. Ce coefficient est mis très efficacement en relation avec la déstructuration des surfaces et son effet sur le ruissellement et la mobilisation des terres lors des expériences de simulation de pluies.

## 2.2. Fissuration de sols à argiles actives et détentions hydriques superficielles

**Figure 7 Evolution des détections hydriques superficielles liées aux fissurations de fin de saison sèche sur pélosols du BV de KAMECH**



**Méthode :** La détection hydrique fissurale fut évaluée à partir de quelque 200 mesures de la géométrie des fentes sur des placettes de  $1\text{ m}^2$  sur un versant de 30 à 40 % de pente. La géométrie et le volume du réseau fissural et l'extension des dépressions sont évalués par la mesure de leurs longueurs, largeurs et profondeurs.

**Résultats :** Les résultats obtenus portent sur: a) une quantification de la détection fissurale locale et instantanée des surfaces, b) la dynamique de fermeture des fissures:

a) l'histogramme de la figure 7 représente les valeurs médianes des détections fissurales de l'amont vers l'aval de la parcelle de  $200\text{ m}^2$  et ce, pour 4 cumuls de pluies correspondant à l'installation de la saison pluvieuse. Les ouvertures maximales des fentes, en fin de saison sèche, permettent de stocker, en moyenne,  $70\text{ mm}$  de pluie. On constate aussi un effet topographique avec un "élargissement" de la fissuration vers les plus fortes pentes à partir de la mi versant.

b) les courbes de la figure 8 représentent huit exemples de dynamiques de fermeture des fentes avec le cumul des précipitations. Sur cette situation des pélosols de Kamech, on peut estimer que le réseau de fentes est complètement effacé pour un cumul de  $200\text{ mm}$  de pluies. Il faut évidemment considérer que le processus étudié produit un effet hystérétique et que l'on ne peut utiliser les mêmes courbes pour illustrer le processus inverse lié à la dessication.

### 2.3. Dynamique des stocks hydriques

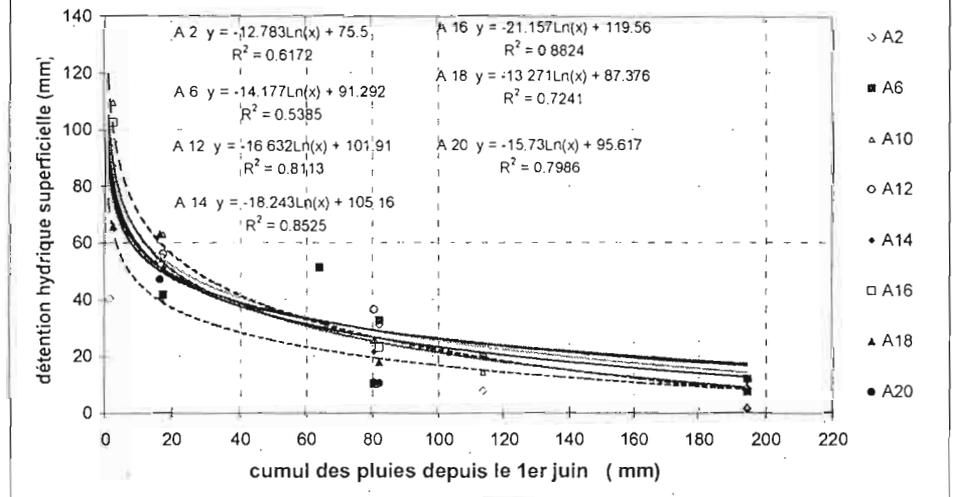
Deux thèmes furent abordés qui concernent:

- l'impact de banquettes de terres sur la rétention de l'eau dans les sols du bassin versant d'El Gouazine,
- le suivi humidimétrique des sols à argile gonflante de Kamech pour la détection de saturation des altérites augmentant le risque de mouvement de masse.

#### a) Banquettes d'El Gouazine

Certains bassins versants sont, pour une bonne partie de leur superficie, constitués de sols à argiles gonflantes et, en fin de saison sèche, ces sols sont abondamment fissurés. Ces fissures sont suffisamment larges et profondes pour constituer un réservoir hydrique temporaire susceptible de jouer un rôle non négligeable dans le stockage des premières pluies de septembre ou octobre.

**Figure 8 Dynamique de fermeture des fissures sur pélosols du BV de Kamech**



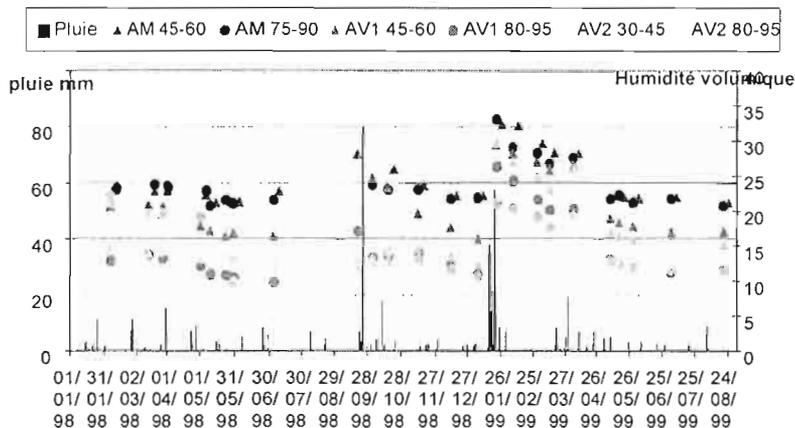
Pour aborder cette recherche nous avons équipé une parcelle située sur sol brun calcaire du bassin versant d'El Gouazine avec des sondes TDR situées à 2 profondeurs, vers -40 et -90cm, et réparties sur 3 stations, l'une à l'amont du canal de la banquette (AM), une autre à 5 m à l'aval (AV1) et la dernière à 20 m à l'aval (AV2).

L'exemple de la figure 9 montre l'effet sur les trois profils de deux événements pluviométriques importants: une pluie de 80 mm le 23/9/98 et une séquence de 146 mm distribuée du 15 au 20/1/99. L'humidité du sol est toujours plus importante à l'amont de la banquette, même en saison sèche, les teneurs en eau restant peu différentes entre la surface et la profondeur.

L'humidité en profondeur est sensiblement équivalente pour les deux stations aval mais

Figure 9

El Gouazine: effet d'une banquette sur l'humidité



l'accroissement du stock d'eau suite aux deux grosses pluies est toujours plus élevé pour la station située à proximité de la banquette (AV1) ce qui laisse supposer un effet impluvium de la banquette et la possibilité d'apport latéral en provenance du canal de cette banquette.

La pluie de 80 mm a provoqué la rupture de la banquette par création d'un tunnel laissant environs 50 cm d'eau dans le canal, cette pluie a eu peu d'effet sur les mesures faites sur AV2.

Par contre la banquette a bien résisté à la séquence moins agressive de janvier 1999 qui a rempli le sol même en profondeur. Un meilleur stockage en aval de la banquette apparaît nettement surtout en 1999 année plus humide et s'y prolonge jusqu'en saison sèche.

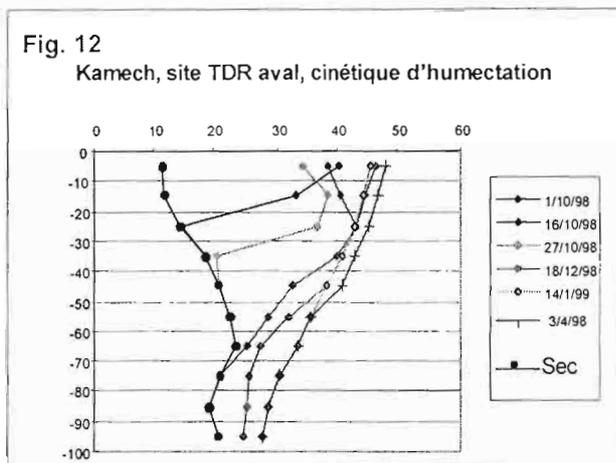
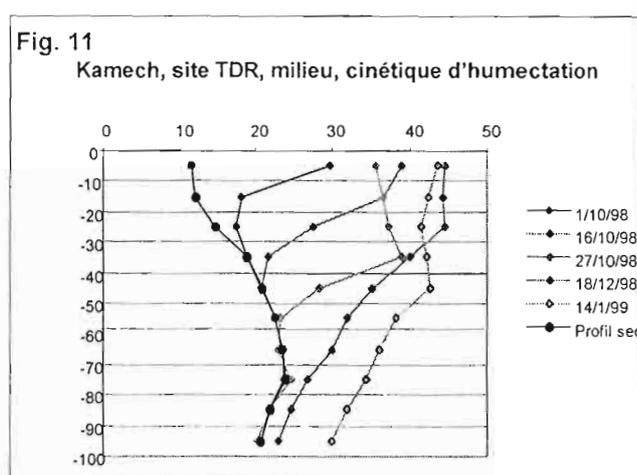
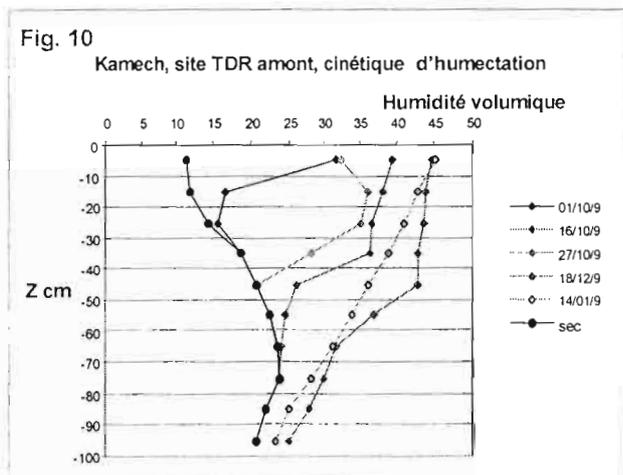
| Humidité volum. % | AM 45-60 | AM 75-90 | AV1 45-60 | AV1 80-95 | AV2 30-45 | AV2 80-95 | Pluie  |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| 09/01/99          | 22,1     | 23       | 17        | 12,1      | 13,3      | 11,6      |        |
| 26/01/99          | 32,4     | 34,2     | 30,5      | 27,4      | 30,6      | 22,2      |        |
| Stocks mm         | 10,3     | 11,2     | 13,5      | 15,3      | 17,3      | 10,6      |        |
| Stock 0-50 cm     | 51,5     |          | 67,5      |           | 86,5      |           |        |
| Stock 50-100 cm   |          | 56       |           | 76,5      |           | 53        |        |
| Stock 0 -100 cm   |          | 107,5    |           | 144       |           | 139,5     | 146 mm |

Le tableau ci-dessus montre que l'accroissement de stock d'eau sur 1 m de sol correspond au moins à l'intégralité de la pluie pour AV1, la saturation est atteinte en amont de la banquette (AM)

b) Humidimétrie des sols à argile gonflante de Kamech

Un versant de KAMECH a été équipé de sondes TDR dès 1998 pour y suivre les profils humidimétriques depuis la surface jusqu'aux altérites situées entre 50cm (amont) et #110cm (aval). Les sondes TDR ont connu quelques déboires dans ces sols très argileux. Installées au centre des polygones de dessiccation qui apparaissent en saison sèche, elles ne prétendent donner que les variations de stocks dans ces volumes supposés homogènes. Ceci étant, les cinétiques observées montrent une distribution hétérogène du stockage et des mouvements selon la profondeur et la pente. La dynamique de l'eau le long du versant semble fortement influencée par le réseau de fentes de dessiccation non refermées et qui sont interconnectées. Ceci crée un réseau de drains le long de la

penne et une alimentation en eau de l'aval plus important que celle correspondant à la pluie tombée. Des sursaturations hydriques peuvent temporairement se produire et entraîner des modifications des caractéristiques mécaniques de quelques centimètres d'horizons profonds, ce que prouvent les « arrachages pelliculaires » que l'on voit en bas des versants. Les cinétiques d'humectation, présentées dans les figures 10 à 12, illustrent le comportement hydrique de ces sols qui peuvent stocker environ 200mm sur le premier mètre profondeur. En pleine saison des pluies et au delà de -10cm, la saturation de la capacité au champ est très proche de la porosité totale dans des horizons massifs, limono-argileux.



En saison intermédiaire soit de septembre à novembre (pluies cumulées de 150 à 200mm) les interprétations sont compliquées par la macroporosité fissurale capable de stocker en valeur médiane 70mm des premières pluies. Sa disparition par gonflement des argiles dépend des fréquences et hauteurs des averses qui vont déterminer soit une humectation progressive des drains fissuraux, soit un colmatage de leurs débouchés superficiels par fusion des mottes périphériques. Si l'on peut imaginer divers scénarios simplifiés, il est rares que les preuves expérimentales puissent en rendre exactement

compte. On peut seulement dire que le colmatage superficiel de ce réseau, avec les conséquences hydriques évoquées ci-dessus, est favorisé par une instauration brutale de la saison des pluies et ceci est un indicateur comportemental pertinent sur ces sols à argiles actives.

#### 2.4. Infiltrométrie et érodibilité des terres sous pluies simulées à l'échelle de la parcelle

Afin de quantifier les ruissellement et érosions des unités d'isorisques identifiées précédemment (& 1.1. à 1.3.) on a re-traité les résultats d'expérimentations de simulations de pluies effectuées dans toute la Tunisie semi-aride depuis 1987 (IRD-Direction des Sols). Là où l'information manquait on a refait des campagnes d'expérimentation en 1999 et en 2000 (Fidh'Ali et Kamech).

Nous ne reprendrons pas ici les principes de cette méthode très connue et utilisée par l'IRD depuis 1975. Nous insisterons par contre sur ce qu'elle peut apporter de nouveau dans le cadre d'HYDROMED et de l'UR AMBRE qui suivra. Rappelons que l'appareil installé sur des sols dont on veut tester les comportements fournit, en cours de pluies, des informations hydrodynamiques

(enregistrement limnigraphique des intensités de ruissellement) et des évolutions de la mobilisation en terre (échantillons d'eaux chargées en sédiments).

L'utilisation conjointe des informations fournies par les relations « intensité du ruissellement à régime constant en fonction de l'intensité de la pluie simulée (( $R_x(I_m)$ )) » et « évolution des charges solides en fonction des intensités du ruissellement (( $C_S(R)$ )) » est une approche intéressante pour connaître les risques de pertes en terres de chaque portion de versant en fonction des situations et des événements pluvieux. La transcription de ces informations pour des pluies naturelles est facilement réalisable à la condition de disposer de données pluviographiques dans la zone considérée et d'une analyse statistique sur les différentes périodes de récurrence des hauteurs et intensités des pluies.

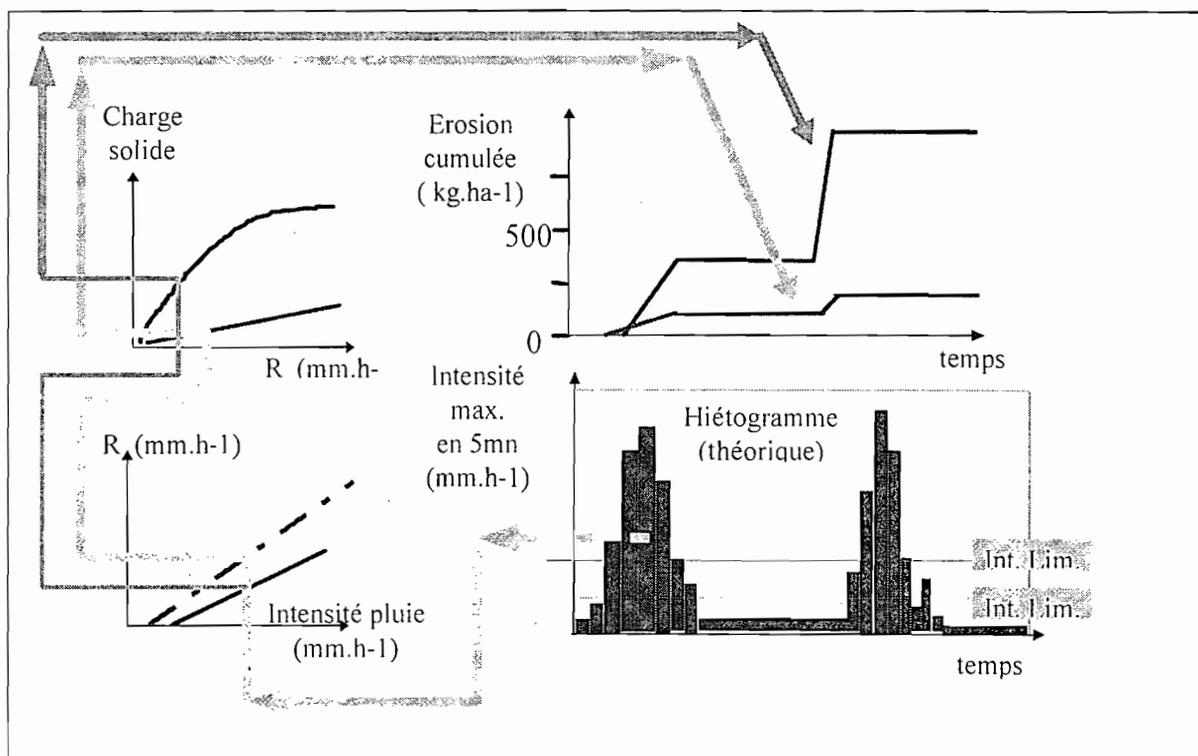


Figure 13: Prévision de l'érosion (phase mobilisation initiale) par intégration des données expérimentales et naturelles (M O B I L)

L'ensemble de cette procédure permet de construire un modèle prédictif des érosions, plus exactement des mobilisations de terres au niveau de la parcelle (cf. Figure 13).

Sur cette figure on a représenté divers graphes et leurs interconnexions pour aboutir à l'érodigramme final, ce sont...

- au départ un exemple de hyétoigramme de pluie efficace,
- ensuite... $R_x(I)$ , l'intersection des droites de régression avec l'abscisse donne l'intensité limite de la pluie pour les premiers ruissellements, la pente de la droite de régression informe sur l'évolution des conductivités,
- puis... $C(R)$ , l'évolution des charges solides en fonction des intensités de ruissellement qui traduit les évolutions probables des champs selon leurs situations culturales. Deux évolutions y sont schématisées: (i) la courbe bleue illustre une situation dangereuse sur sol à structure (trop) stable où l'on a une exacerbation de l'abrasion avec l'écoulement et ce, avec des charges en asymptote dépassant souvent 100 g/l. (ii) la courbe rouge, tirée d'essais sur sols à structure fragile illustre une abrasion plus faible; dans certains cas de sols à encroûtement rapide (structures encore plus fragiles) cette charge diminue avec l'intensification des écoulements.

- enfin le report des données au travers ces différentes équations permet de chiffrer des masses de terre érodées pour une averse (érodigramme).

Compte tenu de l'exiguïté des parcelles, nous ne prétendons mesurer que la seule mobilisation initiale des terres et non pas l'érosion linéaire, même si l'on en détecte les prémices, ni de même la possibilité d'abandons de sédiments sur le versant.

Une autre partie de l'information devra donc venir d'autres modèles physiques aptes à démontrer les effets d'un flux de ruissellement compte tenu d'une partition entre sa capacité d'abrasion, sa capacité de transport et l'abandon ou la reprise des charges initialement transportées. On contribue cependant au calage des modèles prédictifs de l'érosion à bases physiques sur bassins versants.

## 2.5. Erosions aréolaires à l'échelle du versant ou de la portion de versant

Deux sites de mesures ont été aménagés dans le BV de la retenue collinaire d'El Gouazine: El Gouazine I sur sols bruns calcaires relativement épais dans la zone moyen - aval, El Gouazine II sur sols peu évolués et rendzines sur calcaires en partie moyen - amont du bassin versant. Tous deux sont aménagés en banquettes de terre de quelque 1,5 m de hauteur, au tracé isohypse et à espacement variant avec la pente topographique.

La *méthode* consiste à considérer la surface inter-banquette comme une vaste parcelle de ruissellement et d'érosion la collecte des eaux et des terres mobilisées dans le champ s'opérant au niveau du chenal de la banquette aval. On effectue à différentes périodes de l'année des nivellements précis (tachéomètre laser) dans différents profils en travers positionnés dans le chenal de la banquette (Figure 14)

*Résultats:* la comparaison des profils nivelés génère des sections représentant des pertes (abrasion du chenal) ou des gains en terre (sédimentation de terres érodées), l'extension latérale de cette information fournit des volumes de terres mobilisées, puis des masses. Sur El Gouazine n° I, l'érosion en nappe d'une jachère, emblavée l'année précédente, fut de 6,06 t.ha-1.an-1 en 1998. Les travaux se poursuivent sur les deux sites.

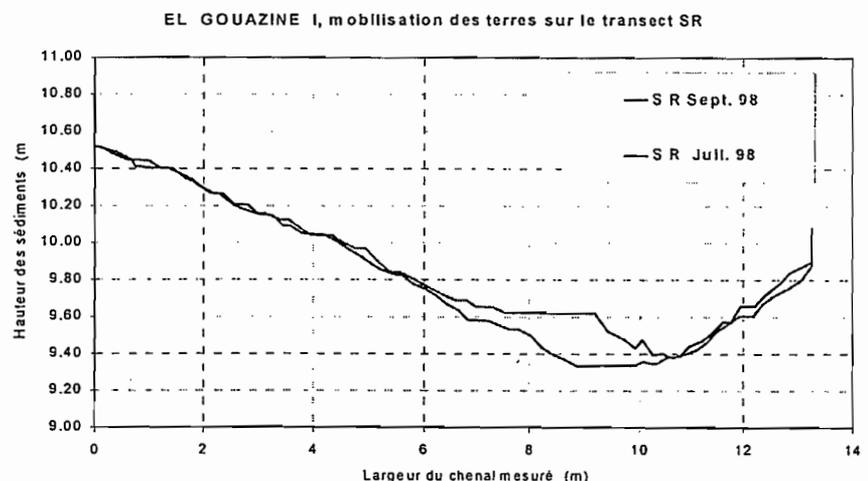
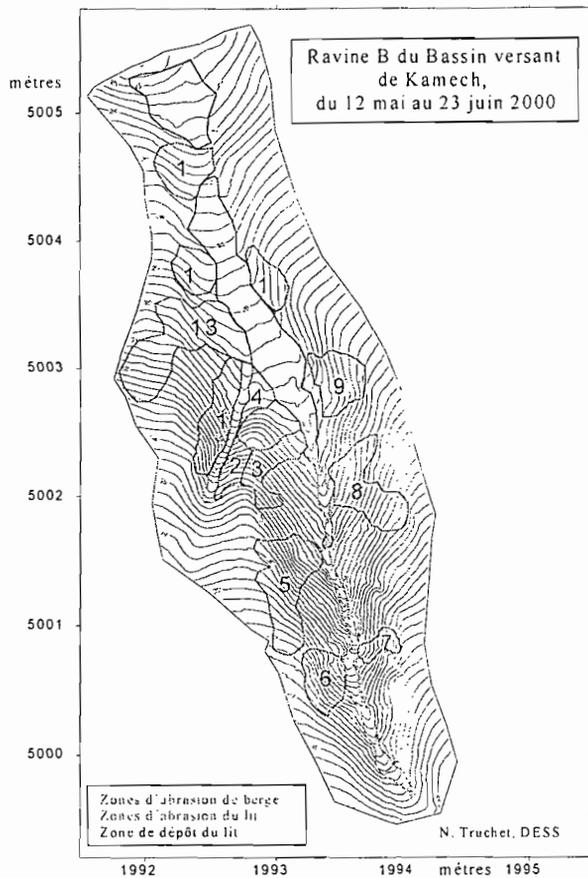


Figure 14: comparaison de deux profils en travers d'un canal de banquette sur El Gouazine I

## 2.6. Erosions linéaires à l'échelle du versant ou de la portion de versant

Alors que l'érosion en nappe à l'échelle des champs ne devrait pas dépasser les 10t.ha-1.an-1, il en va tout autrement des dégradations issues du ravinement dépassent fréquemment les centaines de t.ha-1.an-1 en Tunisie semi-aride. Il était donc primordial d'évaluer sur deux BV représentatifs ces autres types de risques érosifs.

Des sites d'observation ont été retenus sur le BV de Fidh Ali et le BV de Kamech.



Sur Fidh ben Ali, l'exacerbation du ravinement a développé en rive droite un paysage de bad-lands très caractéristique. Les dégâts se limitent encore à un réseau de ravins et ravines en rive gauche où deux sites sont observés (distance-mètre laser).

Sur Kamech, une étude récente menée par Nicolas Truchet (étudiant DESS ULP Strasbourg) a permis de quantifier les érosions ravinaires particulièrement actives en rive droite de ce bassin.

La *méthode* a consisté en un nivellement intensif sur trois ravines représentatives, de ce nivellement sont sortis (Figure 15):

- (i) une description codifiée des flancs et fond de ravine ceci permettant d'élaborer une typologie du système ravinant,
- (ii) un MNT où les superpositions des surfaces courbes des profils relevés entre différents événements pluvieux efficaces ont permis de sortir abrasions et dépôts.

Conjointement une dizaine de ravins du BV ont été décrits et caractérisés à l'aide de la typologie précédente ce qui a permis une extension des résultats obtenus sur les 3 ravines étudiées plus profondément.

**Figure 15: Superposition de deux couches d'informations, détermination des érosion et dépôts (SURFER)**

#### Les résultats

L'abrasion du système ravinant, lui-même, remanie entre plusieurs dizaines et plusieurs centaines de tonnes de terres/ha/an. L'ampleur de cette fourchette est liée à la proportion de berges avivées par système ravinant. Cet avivement résulte de la conjonction: pente topographique de la berge + apports hydriques des champs en amont donc finalement d'un état d'équilibre entre couvert "végétal - stabilité structurale - pluviométrie". Ce ravinement est un phénomène "à seuil" lié aux pluviométries exceptionnelles

| Tableau II BV de KAMECH exportation de versant et sédimentation de lac |                               |                              |                                |                                |                  |               |                    |
|--|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------|--------------------|
| Isocomportement  | Exportation en année "humide" |                              |                                | Exportation en année "normale" |                  |               |                    |
|  | moyen (t/ha/an)               | pondér 1 surface BV(t/ha/an) | pondér 2 Vers le lac (t/ha/an) | moye (t/ha/                    | pondér surface " | pondér (t/ha/ | Vers le lac (t/ha/ |
| 1 (rav. 6, 7)  | 4.50                          | 0.43                         | 1.94                           | 0.50                           | 0.43             | 0.22          | ---                |
| 2 (rav. 1, 2, 5)   | 32.67                         | 0.46                         | 15.03                          | 3.67                           | 0.46             | 1.69          |                    |
| 3 (rav. 3, 4)  | 171.0                         | 0.11                         | 18.81                          | 30.00                          | 0.11             | 3.30          |                    |
|  |                               |                              | 35.77                          |                                |                  |               | 5.20               |

*Rappel* l'envasement du lac de Kamech, exutoire d'un BV de 245,5ha, est donné pour 15,4 m<sup>3</sup>/an/ha. sur la période 1996-1997 et pour 12,10 m<sup>3</sup>/ha/an sur la période 1997-1998.

Mais aux échelles du versant et du BV il faut considérer ce qu'exportent réellement ces systèmes ravinaires (Tableau II):

(i) en année à pluviométrie normale, la majorité des terres mobilisées sur le versant y restent, (exportations < 5 t/ha/an),

(ii) en année exceptionnellement humide ces stocks des années précédentes + la production ravinaire du moment, se combinent pour donner des exportations voisines de 35 t/ha/an.

Ces résultats sont cohérents avec les sédimentations mesurées dans le lac.

Les sols et paysages du BV de KAMECH sont représentatifs d'un ensemble paysagique plus vaste de la dorsale tunisienne (Tell + partie des Hautes Steppes). Les informations de cette étude valent donc pour de nombreux autres milieux caractérisés par une érosion ravissante sur marnes. Elles peuvent être utilisées pour le calage de modèles physiques ou mathématiques et, parmi ces derniers, elles peuvent faciliter le choix des fonctions de transfert dans les modèles distribués.

## Formations, encadrements et publications dans le cadre HYDRMED 1996-2000

### REVUES, CONGRES, SEMINAIRES:

BELLIER G., GAALOUL N., JOB J.O, MONTOROI J.P., ZANTE P., 1997

Interprétation pédologique de données électromagnétiques et électriques. Application au bassin versant d'El Gouazine (Tunisie centrale). Colloque géophysique des sols et des formations superficielles (GEOFCAN), Orstom-Bondy, 11-12/9/1997, p17-22.

NASRI S., ZANTE P., 1998

The use of TDR for soil moisture measurements in soil erosion and conservation practices in small watersheds. Proceedings of the International Seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration HYDROMED. Department of water resources engineering, Lund Institut of Technology, LUND, Suède. 29/6 au 3/7/98.p165-189.

PERSSON M., BERNDTSSON R., ALBERGEL J., NASRI S., BAHRI A., ZANTE P., 1998

A non-invasive approach for measurements of near-surface water content, Annal. Geophys., 16, Suppl. II, C483.

SOMOGYI P., BERNDTSSON R., ALBERGEL J., NASRI S., BAHRI A., ZANTE P., 1998

Preferential flow as indicated by brilliant blue, Annal. Geophys., 16, Suppl. II, C480.

BEN MECHLIA N., MEKKI I., ZANTE P., 1998

Spatialisation de l'activité agricole et de l'occupation du sol dans une région au relief accidenté. Communication au Colloque International: L'observation spatiale, un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunis, 13-27 nov.

MEKKI I., ZANTE P., MASMOUDI M., BEN MECHLIA N. 1998

Utilisation du G.I.S. pour la caractérisation hydrique d'un bassin versant. Poster au Colloque International: L'observation spatiale, un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunis, 13-27 nov. 1998.

PEARSSON M., BERNTSSON R., ALBERGEL J., ZANTE P., NASRI S., BAHRI A. 1999

In situ calibration of solute transport measurements using Time domain Reflectometry. Civil and Environmental Engineering conference, New Frontiers and Challenges, 8-12 november 1999, 12p.

PERSSON M., BERNDTSSON R., UMEGAKI Y., NASRI S., ALBERGEL J., ZANTE P., 1999

Solute transport and water content measurements in clay soils using time domain reflectometry, paper, sub to hydrol. Sci. J..

PERSSON M., YASUDA H., ALBERGEL J., BERNDTSSON R., ÖHRSTRÖM P., NASRI S., ZANTE P., 2000

Modelling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model (en prep.

PERSSON M., OLSSON J., ALBERGEL J., ZANTE P., NASRI S., YASUDA H., BERNDTSSON R., ÖHRSTRÖM P., 2000

Fractal theory to simulate unsaturated transport properties. Séminaire International Hydrologie des régions méditerranéennes, AISH, IRD, Agropolis-Montpellier, 11-13 octobre 2000.

ÖHRSTRÖM P., PERSSON M., ALBERGEL J., ZANTE P., NASRI S., BERNDTSSON R., 2000

Field scale variation of preferential flow indicated from dye coverage., soumis

## POSTERS:

COLLINET J., ZANTE P., 1998

Infiltrabilité des sols bruns calcaires du bassin versant de Mrichet El Anze. Congrès International des Sciences du Sol, Montpellier, 20-26 août 1998.

MEKKI, I., ZANTE, P., MASMOUDI, M., BEN MECHLIA, N. 1998

Utilisation du G.I.S. pour la caractérisation hydrique d'un bassin versant. Poster au Colloque International: L'observation spatiale, un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunis, 13-27 nov. 1998.

ALBERGEL J., COLLINET J., ZANTE P., 1999

Hydromed action 2: Eau-sol environnement La launch of the Framework Programm. Essen, 25-26 fév. 99.

MEKKI, I., ZANTE, P., MASMOUDI, M., BEN MECHLIA, N. 1999

Caractérisation hydrique du Bassin versant de Kamech. La launch of the Framework Programm. Essen, 25-26 fév. 99.

ZANTE P., COLLINET J., TRUCHET N., PEPIN Y., 2000

Mesure de l'érosion ravinatoire des sols argileux de Tunisie. Séminaire International Hydrologie des régions méditerranéennes, AISH, IRD, Agropolis-Montpellier, 11-13 octobre 2000.

COLLINET J., ZANTE P., ALBERGEL J., 2000

Détention hydrique superficielle de sols à argiles gonflantes de Tunisie (quantification, dynamique). Séminaire International Hydrologie des régions méditerranéennes, AISH, IRD, Agropolis-Montpellier, 11-13 octobre 2000.

## RAPPORTS

ZANTE P., 1997

Lac collinaire de Kamech. Les caractéristiques géologiques et morpho-pédologiques du bassin versant. 12p. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., MANSOURI T., 1998

Compte Rendu de mission sur le Bassin Versant de Fidh Ali, reconnaissance du système de ravines et protocole des mesures. 17- 19 novembre 1998, 6 p. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., 1998

Gestion conservatoire des eaux et des sols. Rapport d'activité du programme HYDROMED. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., MANSOURI T., 1999

4<sup>ème</sup> rapport d'avancement. HYDROMED, chapitre « gestion conservatoire des eaux et des sols » p 18-38. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., BEN YOUNES M., 1999

Compte Rendu de mission sur le Bassin Versant de Fidh Ali, reconnaissance pédologique et bornage des sites 26-28 janvier 1999 10 p. IRD Tunis.

COLLINET J., ZANTE P., 1999

Carte pédologique du bassin versant de Fidh-Ali (Tunisie), présentation, utilisation, Tunis, février 1999, 6 p + 1 carte. .

AGREBAOUI S., COLLINET J., DRIDI B., ZANTE P., 1999

Simulation de pluie sur deux sites du bassin versant de Fidh Ali, premiers résultats, avril 1999, 6 p. .

ALBERGEL J., COLLINET J., PEPIN Y., 2000

Expertise sur cinq sites de lacs collinaires dans le Gouvernorat du Kef (Tunisie) pour Min. Agri. Tunisie CRDA du Kef et Agence Française Coopération. Janvier 2000, 41p. 17fig.

## FORMATION

### STAGES

#### 1996

PALMQUIST Ola, TULLBERG Olof : Master of Science Thésis, Minor Field Study, LUND University of technology, Sweden. Expérimentation de simulation de pluie avec eau colorée sur le bassin versant de Mrichet el Anze, nov. 1996, mission de J. Asseline, IRD Montpellier. Mémoire : « 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. Lund, may 1997.

#### 1997

MEKKI Insaf : stage de fin d'études du cycle de spécialisation en agronomie et amélioration des plantes. INAT Tunis. 1997 et 1998. Mémoire : « Etude intégrée du bassin versant d'un lac collinaire et de l'exploitation de l'eau collectée pour l'irrigation ». 57p. 1999.

#### 1998

SCHIELE Suzanne, KIRMES Klaudia : Ingénieurs en environnement de l'université de Berlin. Stage en juillet-août 1998 dans le cadre de l'international Association for the Exchange of Students for Technical Experience. Cartographie des fentes de retrait sur versant à argiles gonflantes (BV de Kamech).

#### 1999

REYES GOMEZ Victor Manuel : stage de DEA partie expérimentation sur le bassin versant de Fidh ali, avril 1999. Mémoire sous la direction d'O. Grünberger, IRD Bondy: « dissolution interne d'un sol gypseux . cas des têtes de ravines d'un bassin versant en milieu méditerranéen. Petit barrage collinaire de Fidh ali (Tunisie) », 92 p. 7 annexes.

## 2000

BATITA Nabil : stage de fin d'études du cycle de spécialisation en hydraulique et aménagement rural. INAT Tunis. Mars-juin 2000. Mémoire : Contribution à l'étude des comportements hydrologiques et érosifs du bassin versant d'un lac collinaire. Juin 2000.

TRUCHET Nicolas : stage de DESS en sciences de l'environnement, Université Louis Pasteur, Strasbourg. Avril à septembre 2000. Mémoire : « Etude de l'érosion ravinatoire sur petit bassin versant argileux de Tunisie », sept 2000.

DRIDI Becim : stage de formation en simulation de pluie chez J. Asseline, IRD Montpellier. Mise en application avec le nouveau simulateur sur le bassin versant de Kamech lors du stage de Batita N.

## MEMOIRES

PALMQUIST Ola, TULLBERG Olof : 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. Master of Science Thesis, Minor Field Study, LUND University of technology, Sweden. Lund, may 1997.

MEKKI Insaf : Etude intégrée du bassin versant d'un lac collinaire et de l'exploitation de l'eau collectée pour l'irrigation. Mémoire de spécialité d'ingénieur. 57p. INAT Tunis 1999.

BATITA Nabil : Contribution à l'étude des comportements hydrologiques et érosifs du bassin versant d'un lac collinaire. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation en hydraulique et aménagement rural. INAT Tunis Juin 2000.

TRUCHET Nicolas : Etude de l'érosion ravinatoire sur petit bassin versant argileux de Tunisie, mémoire de DESS en sciences de l'environnement, université Louis Pasteur, Strasbourg. sept 2000.

## SEMINAIRES CONGRES :

- Séminaire international Hydrologie des régions méditerranéennes, AISH, IRD, Agropolis-Montpellier, 11-13 octobre 2000. 2 Posters : « Mesure de l'érosion ravinatoire des sols argileux de Tunisie », Zante P., Collinet J., Truchet N., Pepin Y., et « Détention hydrique superficielle de sols à argiles gonflantes de Tunisie (quantification, dynamique).» Collinet J., Zante P., Albergel J. .

- Atelier suivi des lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Nabeul, 28-29/3/2000. Zante P., Collinet J.,: Caractérisation morphopédologique des bassins versants et suivi de l'érosion.

- 3<sup>ème</sup> réunion de coordination Hydromed, Rabat, Maroc 2-4/12/1999,. Collinet J.: Présentation des actions de recherche 1999 en Tunisie, stockage hydrique en réservoir à capacité variable, étude du ravinement.

- L'observation spatiale : un outil pour l'étude du bassin méditerranéen, CNES CNT, Tunis 23-27 novembre 1998  
communication : Ben Mechlia N., Mekki I., Zante P., Spatialisation de l'activité agricole et de l'occupation du sol dans une région au relief accidenté.  
Poster : Mekki I., Zante P., Masmoudi M., Ben Mechlia N., Utilisation du GIS pour la caractérisation hydrique d'un bassin versant.
- Réunion HYDROMED de Lund (Suède) 29/6 au 3/7/98 communication : Zante P., Nasri S. :The use of TDR for soil moisture measurements in soil erosion and conservation practices in small watersheds.
- Congrès mondial des sols, Montpellier, 20-26 août 1998 : Préparation de l'excursion en Tunisie: choix et description des profils présentés lors de l'arrêt sur le bassin versant de Mrichet El Anze. Poster présenté par J. Collinet: « Infiltrabilité des sols bruns calcaires du bassin versant de Mrichet El Anze. » J. Collinet P. Zante.

## **Compte-rendu d'activités en Tunisie 1998-2000**

### **dans le cadre du programme « Petits barrages en milieu semi-aride »**

---

#### **Thématique**

Etude du fonctionnement géochimique du bassin versant de lacs collinaires.

#### **Objectifs**

Caractériser géochimiquement les eaux du système bassin versant-retenu (eaux d'écoulement, de retenue et souterraine) à une époque donnée de l'année (en saisons sèche et humide).

Décrire et analyser les formations superficielles pour expliquer physiquement les pertes par infiltration de la retenue.

Identifier des traceurs géochimiques pour comprendre les modes de circulation des eaux dans les formations superficielles du bassin versant et quantifier la recharge de l'aquifère alluvial.

Modéliser les changements de faciès chimique (eau d'écoulement-eau de retenue en amont et eau de retenue-eau souterraine en aval) en prenant en compte les interactions eaux-sols-roches.

Analyser et quantifier l'importance de l'érosion chimique au niveau des têtes de ravine pour estimer l'effet sur l'alimentation de la retenue.

#### **Sites étudiés**

Trois sites pilotes du programme Hydromed-Tunisie ont été étudiés, à savoir les lacs collinaires d'El Gouazine, Fidh Ali et Kamech, au cours de deux missions (11 au 25 mai 1998 et 15 mars au 10 avril 1999).

#### **Méthodes**

##### **A l'échelle du bassin versant et de la retenue (El Gouazine et Kamech)**

- . Prélèvements d'échantillons d'eaux de nappe et de surface.
- . Prélèvement de sols, de roches (calcaires, marnes, grès) et de sédiments (période d'assèchement à El Gouazine).
- . Sur le terrain, mesures de divers paramètres (CE, pH, température, O<sub>2</sub> dissout...) et analyses chimiques à l'aide d'un spectrophotomètre portable.
- . Au laboratoire, analyses chimiques et minéralogiques : éléments majeurs, isotopiques et traces pour les eaux ; diffractométrie RX, granulométrie, éléments majeurs et traces pour les matériaux.

##### **A l'échelle de la parcelle expérimentale (Fidh Ali)**

- . Simulation de pluies sur deux parcelles, avec et sans suffosion (dissolution du gypse et formation de cavités souterraines).
- . Prélèvements d'échantillons d'eau (ruissellement, drainage) et de sol.
- . Sur le terrain, description des sols, nivellement par tachéométrie laser, mesures de divers paramètres (CE, pH, température, conductivité hydraulique, densité apparente, teneur en eau, microtopographie) et analyses chimiques à l'aide d'un spectrophotomètre portable.

- . Au laboratoire, analyses chimiques, physiques minéralogiques : éléments majeurs pour les eaux ; extraits saturé et dilué, diffractométrie RX, rétractométrie, densité réelle pour les sols.

## Résultats

### ❖ Lac collinaire d'El Gouazine

Les mesures de CE, réalisée lorsque la retenue était quasiment asséchée, montrent qu'il n'y a pratiquement pas de concentration des eaux du lac en fin de phase évaporatoire ce qui indiquerait une perte par infiltration d'eau peu évaporée.

La caractérisation chimique des eaux d'un bassin sédimentaire pendant la période sèche montre que :

- les 3 types d'eau souterraine peu profonde (bicarbonaté calcique, chloruré sodique, sulfaté calcique) sont d'origine météorique, infiltrent le sol et le substrat géologique, et sont fortement liés à la lithologie par dissolution et/ou par formation de minéraux ;
- l'eau souterraine météorique et l'eau du réservoir évaporée se mélangent.

Plusieurs traitements de données préexistantes (tracage chimique en phase évaporatoire ou suivi temporel des variations du volume de la retenue) montrent que le réservoir perd de l'eau par infiltration, cette perte variant au cours du temps lorsque le niveau d'eau franchit la cote 4,5 m : au dessus de cette cote, l'infiltration journalière varie entre 200 et 300 m<sup>3</sup>, tandis qu'en dessous, elle est comprise entre 50 et 150 m<sup>3</sup>. Les modélisations hydrologique et isotopique affinent l'estimation en montrant que les apports souterrains sont de 50 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup> et les pertes en eaux de la retenue sont de 300 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup> en hautes eaux (cote > 4,5 m) ou de 170 m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup> en basses eaux (cote < 4,5 m).

Des observations pédologiques, réalisées au voisinage et dans les sédiments du réservoir, expliquent les pertes par infiltration et leurs variations dans le temps. La recharge de l'aquifère alluvial en aval du réservoir est due à un niveau sableux hydrauliquement conducteur. Ce niveau est formé par l'altération d'un affleurement gréseux qui, depuis la rive gauche amont jusqu'à la digue, traverse les sédiments du réservoir. Sa cote topographique est en accord avec la cote-seuil estimée par le calcul.

A l'échelle du bassin versant, les relations entre les eaux souterraines et les structures géologiques ont été esquissées. Les caractérisations chimique et minéralogique des formations superficielles du bassin versant définissent 5 roche-mères : calcaire, marne, marne gypseuse, argile gypseuse et grès (contenant un feldspath potassique et sodique). Les aquifères calcaires alimentent la nappe alluviale et la diluent, cet effet étant également produit par le réservoir. En revanche, les matériaux argileux riches en minéraux solubles concentrent la nappe alluviale.

### ❖ Lac collinaire de Fidh Ali

Le fonctionnement hydrodynamique et les indices chimiques montrent que le sol non soumis à la suffosion a un comportement hydrodynamique actif qui ne concerne que les premiers 40 cm, alors qu'à proximité d'une zone de suffosion, un drainage interne d'environ 10 mm h<sup>-1</sup> subsiste à saturation au-delà de 60 cm.

Les eaux de drainage très concentrées, de faciès sulfaté calcique en surface et sulfaté calcisodique en profondeur, présentent de faibles variations temporelles et des capacités élevées de dissolution du gypse. Le bilan massique, basé sur les extraits de sol, fait apparaître, pour les deux parcelles, une lixiviation des chlorures supérieure à 600 g m<sup>-2</sup> entre 0 et 72 cm, alors que les estimations, basées sur les teneurs des eaux de drainage, indiquent, pour l'horizon 0-20 cm, une lixiviation des sulfates supérieure à 200 g m<sup>-2</sup>.

L'analyse des capacités de retrait des sols montre d'importantes discontinuités de comportement disposées en fonction de la profondeur et de l'éloignement à la ravine. La suffosion se déclencherait par l'installation de circulations préférentielles liées à l'hétérogénéité de ces capacités de retrait. Un modèle de genèse des cavités de dissolution et d'érosion des fronts de ravine est proposé. L'érosion chimique viendrait renforcer l'érosion physique qui se traduit par le front d'érosion de la ravine.

La teneur en chlorure de la retenue à son remplissage maximal est similaire à celle de l'eau de ruissellement, ce qui signifie que la dissolution des minéraux chlorurés par les eaux de drainage est négligeable. En revanche, en considérant les teneurs en sulfate dans les différents écoulements, la contribution des eaux de drainage au mélange de la retenue est comprise entre 24 et 30%, la dissolution du gypse étant le processus moteur.

#### ❖ **Lac collinaire de Kamech**

Les eaux du bassin versant sont concentrées et présentent un faciès sulfaté/chloruré-calcique/sodique, tandis que l'eau de la retenue plus diluée est plus chloruré-sodique.

Les teneurs en isotopes stables de l'eau reflètent directement celles des précipitations hivernales, sans que l'évaporation ait eu le temps de les affecter significativement.

La retenue est alimentée, au niveau du talweg, par un écoulement souterrain retardé, directement lié à la pluie du mois précédent et donc temporaire : elle n'est pas soutenue par un aquifère régional.

On ne met pas en évidence avec certitude une participation significative de la retenue à l'alimentation de l'aquifère aval. En revanche, un aquifère latéral alimenterait l'écoulement de surface en aval.

### **Perspectives**

Les résultats d'El Gouazine seront comparés à ceux acquis lors d'une mission du même type, réalisée en mars 1999 durant la phase de remplissage de la retenue (période hivernale). Ils permettront de mieux affiner les modélisations et de conforter les hypothèses émises sur le fonctionnement hydrochimique du bassin versant.

Par ailleurs, des opérations futures devront être menées pour mieux connaître les caractéristiques géométriques des aquifères alluviaux, notamment par l'apport de la géophysique (imagerie 2D par panneaux électriques). Les approches mises en oeuvre au cours de la recherche à El Gouazine pourront être appliquées à d'autres réservoirs infiltrants.

### **Bibliographie**

#### ❖ **articles publiés dans des revues à comité de lecture :**

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in central tunisia. Soumis pour publication dans *Applied Geochemistry*.

GRUNBERGER O., MONTOROI J.P. Evaluation by stable isotopes of groundwater recharge induced by a hill reservoir. En préparation.

NASRI S., GRUNBERGER O., MONTOROI J.P. Hydrogeological impact of hill reservoir in a Mediterranean environment, Central Tunisia. En cours de rédaction.

#### ❖ **articles publiés dans les actes de manifestations scientifiques :**

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999. Water chemistry of a small reservoir catchment in central Tunisia. Preliminary results of water-soil-rock interactions. In R. BERNDTSSON (Ed.) : "*Proceedings of the international seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas*, 29

❖ **articles « résumé » publiés à des manifestations scientifiques (résumés courts et étendus) :**

- GAY D., ALBERGEL J., GRUNBERGER O., MICHELOT J.L., MONTOROI J.P., 2000. Approche géochimique et isotopique des relations entre lac collinaire et aquifères : cas du bassin de Kamech, Tunisie. In "*Hydrologie des régions méditerranéennes, Résumés, 11-13 octobre 2000*", IRD, Montpellier, p. 18 (*en cours de publication dans les actes du séminaire*).
- GRUNBERGER O., MONTOROI J.P., ALBERGEL J., 1999. Evaluation par bilan isotopique de la recharge d'un aquifère induite par le fonctionnement d'une retenue collinaire. Premiers résultats sur le site d'El Gouazine (Tunisie centrale). In K. ZOUARI : "*Colloque international, Apport de la géochimie isotopique dans le cycle de l'eau, Hammamet (Tunisie), 6-8 avril 1999*". Volume des abstracts, ENIS, Sfax, 52-53.
- GRUNBERGER O., REYES V., MONTOROI J.P., ALBERGEL J., 2000. Chemical erosion assessment by rainfall simulation of a gully head above a gypsic Mediterranean soil: Fidh Ali watershed, Central Tunisia. In "*Hydrologie des régions méditerranéennes, Résumés, 11-13 octobre 2000*", IRD, Montpellier, p. 19 (*en cours de publication dans les actes du séminaire*).
- GRUNBERGER O., MONTOROI J.P., NASRI S., ALBERGEL J., PEPIN Y., RAHAINGOMANANA N., 1998. Water chemistry of a small reservoir catchment in central Tunisia. Preliminary results. In : Pre-proceedings "*Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas*". ORSTOM/HYDROMED-SIDCA-Lund University, Lund (Sweden), 29 June - 2 July 1998, Extended abstract, 2 p.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. In C. BURGERS and M. FEY : "*5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geochemistry, Abstracts, 24/29 April 2000, Cape Town, South Africa*", University of Cape Town, p. 18.
- MONTOROI J.P., BELLIER G., GRUNBERGER O., 2000. Recharge d'un aquifère alluvial par un lac collinaire de Tunisie centrale : approche pluridisciplinaire. In : "*18<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Paris, 17-20 avril 2000*", SGF/Collectif Rech. en Ile-de-France, Thème A, p. 200.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999. Geochemical groundwater-soil interactions in a small reservoir catchment of Central Tunisia. Preliminary results. In J. BECH (Ed.) "*Soils with Mediterranean Type of Climate. 6<sup>th</sup> International Meeting, Barcelona (Spain), 4-9 July 1999. Extended abstracts*". Universitat de Barcelona, 123-125.
- NASRI S., GRUNBERGER O., ALBERGEL J., 1998. Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple de l'oued El Gouazine (Ousseltia - Kairouan). In : "*Les journées scientifiques de l'INRGREF, Hammamet (Tunisie), 29-30 octobre 1998*".

❖ **posters**

- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Groundwater geochemistry of a small reservoir catchment in Central Tunisia. Poster présenté au "5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geochemistry", 24-29 April 2000, Le Cap, (Afrique du Sud), HYDROMED-IRD.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., 2000. Geochemical effects of a hill reservoir leakage above downstream alluvial aquifer (El Gouazine watershed, Central Tunisia). Poster présenté au Séminaire international "Hydrologie des régions méditerranéennes", 11-13 octobre 2000, Montpellier (France), HYDROMED-IRD.
- MONTOROI J.P., BELLIER G., GRUNBERGER O., 2000. Recharge d'un aquifère alluvial par un lac collinaire de Tunisie centrale : approche pluridisciplinaire. Poster présenté à la "18<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre", 17-20 avril 2000, Paris (France), HYDROMED-IRD.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 1999. Alluvial aquifer recharge of a small hill reservoir in central Tunisia. Poster présenté à "Conference to launch the 5<sup>th</sup> Framework Programme of the European Commission", 25-26 February 1999, Essen (Germany), HYDROMED-INRGREF-IRD.

❖ **rapports administratifs**

- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., LAMACHERE J.M., CECCHI P., ALBERGEL A., 1998. Compte-rendu de la réunion du programme 623 "Petits barrages en milieu semi-aride" (Bondy, 26-27 mars 1998). Multigr., ORSTOM, Bondy, 9 p.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., PERNIN C., 1998. Rapport de mission en Tunisie (11 au 25 mai 1998). Multigr., ORSTOM, Bondy, 8 p.
- MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., GAY D., REYES V., 1999. Rapport de mission en Tunisie (15 mars au 10 avril 1999). Multigr., ORSTOM, Bondy, 19 p.

❖ **rapports scientifiques**

MONTOROI J.P., GRUNBERGER O., NASRI S., 2000. Caractérisation chimique et isotopique des eaux et des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique de la campagne de mesures 1998. Multigr., IRD/DCES/INRGREF, Bondy, 90 p. + annexes.

## Participation à des colloques et séminaires

### ❖ Nationaux :

18<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre, 17-20 avril 2000, Paris (France) : présentation d'un poster en anglais.

### ❖ Internationaux :

International seminar « *Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas* », 29 June - 2 July 1998, Lund (Sweden) : présentation d'une communication en anglais.

Colloque international « *Apport de la géochimie isotopique dans le cycle de l'eau* », 6-8 avril 1999, Hammamet (Tunisie) : présentation d'une communication.

6<sup>th</sup> International Meeting « *Soils with Mediterranean Type of Climate* », 4-9 July 1999, Barcelona (Spain) : présentation d'une communication en anglais.

5<sup>th</sup> International Symposium « *Environmental Geochemistry* », 24-29 April 2000, Le Cap, (Afrique du Sud) : présentation d'un poster et d'une communication en anglais.

Séminaire international « *Hydrologie des régions méditerranéennes* », 11-13 octobre 2000, Montpellier (France) : présentation d'un poster en anglais et de 2 communications.

## Formation universitaire

### ❖ Participation à l'encadrement de stagiaires :

Charles PERNIN (INA 2<sup>ème</sup> année, Paris) à Bondy et à Tunis (collaboration avec l'équipe Hydromed), du 15 avril au 15 septembre 1998.

Déborah GAY (DEA « *Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique, Géochimie isotopique* », Université Paris XI-Orsay) à Bondy et à Tunis (collaboration avec l'équipe Hydromed), du 15 janvier au 30 juin 1999.

Victor Manuel REYES GOMEZ (DEA « *Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental* », Université Montpellier II) à Bondy et à Tunis (collaboration avec l'équipe Hydromed), du 15 février au 15 septembre 1999.

Slah NASRI (Thèse, INRGREF, Tunis) à Bondy, du 10 au 16 décembre 1999.

### ❖ Mémoires de stage

GAY D., 1999. Géochimie isotopique des relations hydrologiques entre lac de retenue et aquifère. Petit barrage collinaire de Kamech, Tunisie. Mémoire DEA, Univ. Orsay-Paris XI, Multigr., 54 p. + annexes.

PERNIN C., 1998a. Géochimie des lacs collinaires : étude bibliographique et mission de terrain en Tunisie (avril-mai 1998). Rapport de stage. Multigr., INA-PG/ORSTOM, Bondy, 31 p.

PERNIN C., 1998b. Règles de gestion de l'eau d'irrigation des lacs collinaires tunisiens. Rapport de stage. Multigr., INA-PG/ORSTOM, Bondy, 14 p + annexes.

REYES GOMEZ V.M., 1999. Dissolution interne d'un sol gypseux. cas des têtes de ravine d'un bassin versant en milieu méditerranéen. Petit barrage collinaire de Fidh Ali, Tunisie. Mémoire DEA, Univ. Montpellier II, Multigr., 92 p. + annexes.

## Participation à des expositions/salons

Conference to launch the « *5<sup>th</sup> Framework Programme of the European Commission* », 25-26 February 1999, Essen (Germany) : présentation d'un poster en anglais.

## Participation à des activités d'information scientifique

Construction et gestion du site Web « <http://www.bondy.orstom.fr/gp623/> » (O. Grunberger et I. Giffard).

Fait à Bondy, le 8 novembre 2000

## +Quelques résultats des recherches en agroclimatologie dans le programme HYDROMED

L'utilisation agricole de l'eau des lacs est un objectif important de la mise en place des lacs collinaires en Tunisie. Cette usage présente cependant des difficultés d'analyse et de gestion qu'elle soit stratégique ou tactique. En effet la zone d'étude se caractérise par une très grande variabilité spatio-temporelle des précipitations, un large éventail de système de culture et de techniques d'irrigation et une large gamme de lacs collinaires. Pour cela notre étude de la valorisation agricole des lacs collinaires se fera selon une démarche à plusieurs échelles, de l'échelle régionale à l'exploitation agricole en passant par le bassin versant et en considérant des systèmes de plus en plus complexes.

### 1. Caractérisation agroclimatique de la zone d'étude.

En complément des études en hydrologie sur les bilans hydriques des lacs collinaires, l'étude agroclimatique se basera principalement sur une analyse fréquentielle des déficits des cultures et ainsi sur les besoins en eau. Il s'agit de pouvoir préciser en terme fréquentielle quelles sont les nécessités en eau d'irrigation selon les différents choix des agriculteurs en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale des besoins et des ressources hydriques. Pour estimer les déficits hydriques des cultures il faut d'une part déterminer leur évapotranspiration selon un régime de pluie et un type de sol donné et d'autre part évaluer leurs besoins en eau pour une croissance et une production maximale.

#### 1.1 Evapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>)

Pour les besoins en eau des cultures nous avons calculé l'évapotranspiration de référence (ET<sub>0</sub>) selon la méthode de Penman-Monteith et utilisé la formule proposée par la FAO (1998). Cette formule est complexe mais par sa base physique solide elle est la plus précise pour estimer les phénomènes d'évapotranspiration dès le pas de temps de la journée. Elle correspond à l'évapotranspiration théorique d'un couvert végétal totalement couvrant et d'une hauteur réduite et présentant une résistance stomatique et aérodynamique faible.

Elle est de la forme :

$$ET_0 = [0.48 \Delta (R_n) + \gamma (900/(T+273))U_2 (e_s - e_a)] / [\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)]$$

Avec  $R_n$  = rayonnement net (il peut être estimé à partir de  $R_g$  le rayonnement global)

$\Delta$  pente de la courbe de pression maximale pour  $T_a$  (2m)

$\gamma$  constante psychrométrique

$U_2$  vitesse du vent à 2m

es-ea déficit de pression de vapeur d'eau.

Nous avons fait le choix d'une estimation précise des besoins en eau des cultures mais exigeante en données météorologiques d'entrée plutôt que d'utiliser des formules plus simples et donc aux points de mesure plus nombreux mais dont la validité dans les climats méditerranéens et au pas de temps inférieur à la décade est assez faible.

Pour le calcul de l'ET<sub>0</sub> à partir des données de la météorologie le modèle IRSIS développé par la FAO a été utilisé. Dix années de données quotidiennes ont été utilisées pour le calcul de l'ET<sub>0</sub> à Kélibia (Cap Bon) et Hend Zitoun (semi-aride proche d'EL gouazine).

Comme nous le verrons plus tard à l'échelle du bassin versants des mesures micrométéorologiques précises de l'évapotranspiration des cultures nous permettrons d'analyser le poids des caractéristiques locales comme le vent et donc le problème de l'extrapolation spatiale et des mesures de références.

### **1.2 Analyse fréquentielle des risques de sécheresse pour les cultures dans la zone d'étude du programme HYDROMED.**

La détermination des risques de sécheresse se basera sur les valeurs des déficits hydriques des cultures; ces déficits seront calculés à partir d'un modèle agrométéorologique simple qui prend en compte le rôle du réservoir en eau du sol et les différents stades de développement des cultures. Nous aurions pu utiliser des modèles existants plus ou moins

complexes mais nous avons préféré construire un modèle ouvert simple aux nombreux paramètres d'entrée (sols, cultures, etc.) que l'on peut donc changer et un modèle dont les bases de calculs peuvent être facilement modifiables. Ce modèle veut être un outil simple facilement utilisable par les différents partenaires et les différentes disciplines d'Hydromed et qu'il puisse être couplé avec des modèles hydrologiques de gestion de l'eau des lacs collinaires. Un modèle de simulation de gestion de l'eau du lac couplant les bilans hydrique du lac et des cultures estivales pour kamech avaient déjà apporté des résultats fort intéressants. Ce modèle a été testé à partir des mesures d'évapotranspiration des cultures de blé à Kamech en 99.

#### *Caractéristiques générales du modèle*

- Le modèle est basé sur le bilan hydrique d'un volume de sol dont les intrants sont la pluie et l'irrigation et les sortants l'évapotranspiration, le déficit hydrique des cultures, l'évaporation du sol, le drainage et le ruissellement.
- Le modèle utilise des données météorologiques standards facilement accessibles.

- Les paramètres décrivant le sol et la culture sont simples et ne demandent pas de mesures lourdes.

- Le pas de temps du modèle est journalier pour qu'une signification agronomique existe et que la relation récurrente utilisée ait une validité.

### *Les bases du fonctionnement du modèle*

Le modèle fonctionne sur la récurrence de la relation :

$$RH_j = RH_{j-1} + P_j - ET_j - D_j - R_j + \Delta z_j$$

$RH_j$  = Réserve hydrique du sol du jour  $j$  (fin du jour  $j$ ),

$RH_{j-1}$  = Réserve hydrique du sol jour  $j-1$

$P_j$  = Précipitations du jour  $j$

$ET_j$  = Evapotranspiration de la culture le jour  $j$

$D_j$  = Drainage du sol pendant le jour  $j$

$R_j$  = Ruissellement pendant le jour  $j$

$\Delta z_j$  = Réserve hydrique supplémentaire du sol correspondant à la croissance racinaire de la culture pendant la période  $\Delta j$

La récurrence du modèle se base sur la détermination de :

- $ETR_j = f(RH_{j-1}, ETM_j)$  avec  $ETM_j$  = Evapotranspiration maximale de la culture

L'évapotranspiration de la culture se base sur la réserve hydrique du jour  $j-1$  disponible pour la culture, soit l'offre et l' $ETM_j$  soit la demande climatique. Cette hypothèse est acceptable au pas de temps journalier (Atteia et Vacher, 1987; Lhomme et Katerji, 1991) et permet l'utilisation de données météorologiques standards quotidiennes. Elle ne permet la distinction de l'occurrence de la pluie durant la journée mais reste suffisamment précise pour une analyse régionale des risques de sécheresse.

- $Dr_j = f(RU_j, RH_{j-1}, P_j)$  avec  $RU_j$  = Réserve utile du sol au jour  $j$

- $R_j = f(P_j)$

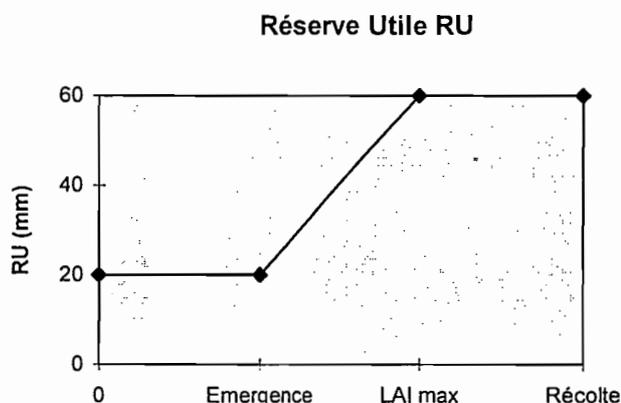
- $\Delta z_j = f(\text{culture et état initial du sol})$

### *Description du modèle*

#### **Le sol**

Dans ce modèle simple le sol est le compartiment central, il est considéré comme une entité homogène. Il se compose d'un seul réservoir dont la capacité varie avec le développement de la culture. Il est caractérisé par la réserve utile (RU), la réserve facilement utilisable (RFU) et la profondeur de sol explorée par les racines ( $z_j$ ).

La réserve utile (RU) est définie comme la différence entre la capacité au champ et la réserve en eau au point de flétrissement permanent. Elle représente la quantité d'eau maximale stockée dans le sol et disponible pour les plantes, elle est considérée homogène sur l'ensemble du sol exploré par les racines. Elle varie selon le type de sol et la profondeur des racines.



Les variations de RU selon la croissance de la culture sont les suivantes :

(T1=date de semis, T2=date d'émergence, T3=date de développement foliaire et racinaire maximal, T4= date de maturité de la culture, T5= date de récolte de la culture)

-  $T1 < j < T2$  :  $RU_j = RU_{min}$

RU min correspond à la réserve en eau de la portion de sol maxima concernée par l'évaporation du sol sans la culture, pour les horizons inférieurs il y a formation d'un mulch. Cette RU min est introduite comme paramètres, elle sera souvent de l'ordre mm. Selon Brisson (1992) et Ritchie (1972) la quantité évaporée suite à une pluie sans aucune réduction ( $E_{sol} = E_p$ ) est de l'ordre de 9mm pour les sols sableux, 10 mm pour les sols limoneux et 12 mm pour les sols argileux., ce qui correspond à des RUmin de 15 à 25 mm.

-  $T2 < j < T3$   $RU_j = RU_{min} + (RU_{max} - RU_{min}) \times ((j - T2) / (T3 - T2))$

RUmax correspond à la profondeur maximale de sol explorée par les racines ( $z_{max}$ ), la croissance racinaire détermine la RUmax. Nous ne considérons que la progression du front racinaire, il est par hypothèse caractérisé par une croissance linéaire de l'émergence au développement maximal.

-  $j > T3$   $RU_j = RU_{max}$  jusqu'à la fin de la culture.

Dans ce modèle simple les sols au début de la culture sont toujours au moins au point de flétrissement permanent, l'eau qui sera stockée sera totalement utilisable par la plante.

### Les données climatiques

Le modèle fonctionne avec les données quotidiennes de précipitations et d'Evapotranspiration de référence ETo

*- les précipitations*

Le modèle utilise les précipitations quotidiennes. La notion de pluie efficace peut être introduite au pas de temps journalier en introduisant le ruissellement, ce dernier est déterminé selon une pluie limite  $P_o$  à partir de laquelle un ruissellement se produit et un coefficient  $\alpha$  qui représente la part ruisselée.

si  $P_j > P_o$   $R_j = \alpha(P_j - P_o)$

si  $P_j < P_o$   $R_j = 0$

. Cette pluie limite  $P_o$  ainsi que le coefficient de ruissellement  $\alpha$  sont difficiles à déterminer car ils dépendent non seulement de l'intensité des précipitations mais aussi de la pente, du type de sol, de l'état de développement de la culture et des pratiques culturales. Après en avoir discuté avec des pédologues et des hydrologues nous prendrons comme références dans notre étude pour des parcelles planes un  $P_o$  de 25 mm et un  $\alpha$  de 0.3. Ces valeurs sont des paramètres d'entrée modifiables.

Si l'ensemble des données nécessaires au calcul de ETo Penman-Monteith ne sont pas disponibles nous pourrions utiliser des formules calibrées pour la Tunisie (Riou, ) et les valeurs corrigées du bac à évaporation.

**Les caractéristiques de la culture.**

La culture est définie très simplement par les dates de semis ( $T_1$ ), d'émergence ( $T_2$ ), de développement maximal du couvert ( $T_3$ ), cette date de LAI max correspond aussi à la profondeur racinaire maximale, de la maturité de la culture ( $T_4$ ) et de la récolte ( $T_5$ ). On considère donc 4 phases de développement de la culture pour lesquelles le coefficient cultural  $K_{cj}$  variera et ainsi l'évapotranspiration maximale  $ETM_j$  définie par la formule :

$$ETM_j = K_{cj} ETP$$

Selon une approche semblable à celle que nous avons adoptée pour RU les variations de  $K_c$  évolueront autour d'un  $K_{cmin}$  qui correspond au sol nu et un  $K_{cmax}$  qui correspond au développement maximal de la culture.

-  $T_1 < j < T_2$   $K_{cj} = K_{cmin}$  (évaporation du sol) cette valeur généralement de l'ordre de 0.4, 0.5 peut être proche de 0.8 lors de fréquentes irrigations.

-  $T_2 < j < T_3$   $K_{cj} = K_{cmin} + (K_{cmax} - K_{cmin}) \times ((j - T_2) / (T_3 - T_2))$

-  $T_3 < j < T_4$   $K_{cj} = K_{cmax}$   $K_{cmax}$  est fonction de la culture mais aussi de son recouvrement ; pour les céréales dans les régions semi-arides en conditions paysannes le  $K_{max}$  est plus proche de 1 que de 1,2

-  $T_4 < j < T_5$   $K_{cj} = K_{cmax} - (K_{cmax} - K_{cmin}) \times ((j - T_4) / (T_5 - T_4))$   
 Lors de la sénescence de la culture le  $K_{cj}$  diminue fortement.

### **La croissance racinaire et les réserves en eau du sol disponible pour la plante.**

La croissance racinaire est considérée comme régulière et linéaire depuis l'émergence à la phase de  $LA_{max}$ . Cette croissance racinaire permet à la plante d'explorer de nouveaux horizons du sol et donc de nouvelles réserves en eau ; cette réserve qui sera un paramètre d'entrée sera estimée selon les pluies antérieures au semis et les caractéristiques du sol.

$T_1 < j < T_2$   $z_j = 0$   $\Delta RH = 0$

$T_2 < j < T_3$   $z_j = z_{max} \times (j - T_2) / (T_3 - T_2)$

Le gain de réserve en eau :  $\Delta RH_j = \beta \times ((RU_{max} - RU_{min}) \times (1 / (T_3 - T_2)))$  avec  $\beta$  lié aux conditions initiales d'humidité du sol : soit  $\beta = 1$  ou 0.5 ou 0.7 etc..

$j > T_3$   $z_j = z_{max}$  et  $\Delta RH_j = 0$

### **Le drainage**

L'estimation du drainage pour des modèles agrométéorologiques simples est toujours délicate. Notre modèle ne considère que le volume de sol exploré par les racines, le drainage correspond donc à une perte en eau définitive pour les cultures. La construction d'un modèle multicouche est lourde et n'apparaît pas très pertinente pour une analyse agroclimatique régionale. Pour réduire les erreurs inhérentes à un modèle mono-couche il faut alors bien estimer les conditions initiales d'humidité du sol sur toute la profondeur correspondant à la croissance maximale des racines, bien définir la  $RU_{min}$  ainsi que  $\beta$  pour les conditions initiales car le remplissage des premiers horizons peut être important entre le semis et l'émergence de la culture.

A l'échelle journalière, le drainage se produit quand le sol l'apport d'eau est supérieur à la capacité de stockage du sol.

Soit  $CS_j = RU_j - RH_{j-1}$  cette capacité de stockage

si  $P_j > CS_j$   $D_j = P_j - CS_j$   $D_j = \text{drainage le jour } j$

si  $P_j < CS_j$   $D_j = 0$

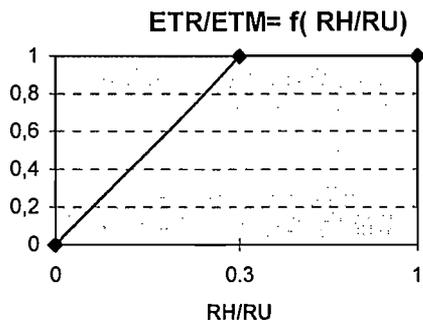
### **L'évapotranspiration des cultures**

**A**

L'évapotranspiration des cultures au jour  $j$  ( $ETR_j$ ) est fonction de l' $ETM_j$  (la demande) et  $RH_{j-1}$  (l'offre). La quantité d'eau transpirée par la culture prend en compte la quantité d'eau présente dans le sol mais aussi la capacité à extraire cette eau. Pour cela on définit un seuil,  $\phi = RFU_j / RU_j$  ( $RFU_j$  : réserve en eau facilement utilisable), seuil à partir duquel

le taux transpiratoire diminue. Cette diminution est par hypothèse linéaire. RFU est la réserve en eau dans le sol à partir de laquelle la plante n'extrait plus sans difficulté l'eau dans le sol et présente de fortes résistances à la circulation de l'eau.

Selon le type de sol et parfois de la plante  $\phi$  peut varier de 0.2 à 0.6. Dans l'exemple ci-dessous nous prendrons  $RFU=0.3 RU$



L'évapotranspiration  $ETR_j$  est déterminée de la manière suivante :

si  $RH_{j-1} > \phi RU_j$   $ETR_j = ETM_j$

si  $RH_{j-1} < \phi RU_j$   $ETR_j = ETM_j \times ((RH_{j-1}) / (\phi RU_j))$

-  $T_1 < j < T_2$  si  $RH_{j-1} > RU_{min}$   $ETR_j = K_{cmin} \times ET_{oj}$   
 si  $RH_{j-1} < RU_{min}$   $ETR_j = K_{cmin} \times ET_{oj} \times ((RH_{j-1}) / RU_{min})$

-  $T_2 < j < T_3$  si  $RH_{j-1} > \phi RU_j$   $ETR_j = K_{cj} \times ET_{oj}$   
 si  $RH_{j-1} < \phi RU_j$   $ETR_j = K_{cj} \times ET_{oj} \times ((RH_{j-1}) / \phi RU_j)$

-  $T_3 < j < T_4$  si  $RH_{j-1} > \phi RU_{max}$   $ETR_j = K_{cmax} \times ET_{oj}$   
 si  $RH_{j-1} < \phi RU_{max}$   $ETR_j = K_{cmax} \times ET_{oj} \times ((RH_{j-1}) / \phi RU_{max})$

$T_4 < j < T_5$  si  $RH_{j-1} > \phi RU_{max}$   $ETR_j = K_{cj} \times ET_{oj}$   
 si  $RH_{j-1} < \phi RU_{max}$   $ETR_j = K_{cj} \times ET_{oj} \times ((RH_{j-1}) / \phi RU_{max})$

## 1.2.2. Applications du modèle.

### Le modèle

Le modèle de bilan hydrique a été écrit en visual basic et peut être installé sur un PC. Comme variables le modèle utilise des fichiers Excel contenant les valeurs quotidiennes de pluie et de ETo.

Il comporte un module de paramètres pour la culture avec :

la date de semis ;

les durées T2-T1, T3-T2, T4-T3, T5-T4 ;

Kcmin et Kcmax ;

Zmax : la profondeur racinaire maximale en mm.

Un module de paramètres pour le sol avec :

Rumin et RU max en mm

$\phi = RFU/RU$

Un module de conditions initiales avec :

RHo = humidité dans la couche de sol concernée par RUmin,

$\beta$  qui détermine l'humidité du sol jusqu'à la profondeur racinaire maximale avant la culture, les conditions initiales sont alors  $\beta RU_{max}$ .

### **L'application du modèle à l'étude du bilan hydrique pour une culture de blé de blé pluvial dans la région du Cap Bon:**

#### *Les caractéristiques de la culture*

La culture de blé suit le calendrier phénologique suivant :

Semis le 1 décembre : T1= 334 (jour julien) ou T1= 0

Emergence T2 T2= T1+20

Phase de développement maximal T3 T3 = T2 + 90

Phase de maturité T4 = T3 + 60

Phase de sénescence avant la récolte T5 = T4 + 10

#### Les coefficients Kc

Kc min= 0.30

Kc max = 1.2

#### La profondeur racinaire

$Z_{max} = 0.80 \text{ m}$

*Le sol*

RU min = 20 mm

RU max = 80 mm

RFU = 0.4 RU soit  $\varphi = 0.4$

*Les caractéristiques climatiques*

Pour le ruissellement soit  $P_o = 25 \text{ mm}$  et  $\alpha = 0.3$

*Les conditions initiales*

RHo = 10 mm

$\beta = 0.5$

### 1.2.3 Quelques informations sur les principales cultures de la zone d'étude.

*Culture de Tomate*

.Calendrier cultural

|                             | <b>Semis</b>       | <b>Plantation</b>    | <b>Récolte</b>     |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Saison                      | 15/1 – fin février | début mars- mi-avril | mi-juin - novembre |
| Arrière saison (champ)      | 15/7 – 15/8        | 15/8 – 15/9          | novembre - février |
| Arrière saison (sous serre) | 15/8 – 15/9        | 15/9 – 15/10         | décembre - mars    |
| <i>Primeur</i>              | octobre - novembre | Novembre– mi déc.    | février - juin     |

**NB..** Dans les zones continentales, le semis se fait un peu en retard comparativement a celui des zones côtières et cela pour éviter l'effet de la gelée.

.Variétés utilisées

Les variétés indéterminées sont utilisées pour la culture de primeur, a titre indicatif on peut citer : Elcy, Ibiza, Fandamy et Vemon.

.Durée moyenne des principales phases et variation du coefficient cultural

|           | Semis - levée | Levée – LAImax | LAImax - maturité | Maturité - récolte |
|-----------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Durée (j) | 40            | 40 – 45        | 60 - 65           | 40                 |
| Kc        | 0.5           | 0.5 – 1.2      | 1.2               | 1.2 – 0.65         |

## Culture de Piment

.Calendrier cultural

|                             | Semis        | Plantation      | Récolte              |
|-----------------------------|--------------|-----------------|----------------------|
| Saison                      | 15/1 – 15/2  | 15/3 – 15/4     | juin - octobre       |
| Saison tardive              | 15/4 – 15/5  | Juin            | septembre – déc.     |
| Arrière saison (champ)      | 15/7         | Début septembre | déc.-janv./ mai-juin |
| Arrière saison (sous serre) | 15/8 – 15/9  | 15/10 – 15/11   | décembre - juin      |
| <i>Primeur</i>              | 15/9 – 15/10 | 15/11 – 15/12   | janvier - juillet    |

.Variétés utilisées

Pour la culture de saison, localisée surtout dans le cap bon et les périmètres intérieurs (Sidi Bouzid et Kairouan), on utilise des variétés importées telles, doux d'Espagne et Marconi et des variétés locales telles Korba, Zina et Cayenne

En culture de saison tardive, caractéristiques du périmètre intérieur (Kairouan et Sidi Bouzid), on utilise des variétés locales Korba, Kairouan et Sidi Bouzid

La culture d'arrière saison est pratiquée surtout dans les zones côtières. Le semis est précoce, la récolte se fait en décembre – janvier, puis on rabat les plants à 30 cm. La plante passe l'hiver ensuite on fait une deuxième récolte durant la période mai – juin.

Les variétés utilisées sont Beldi et Baklouti

Concernant la culture de primeur, les variétés utilisées sont soit locales telles, Beldi et Baklouti soit importées telles Marconi et Anaheim. Actuellement un hybride produit en Tunisie est couramment utilisé (B26).

.Durée moyenne de principales phases et variation du coefficient cultural

|       | Semis - levée | Levée - LAImax | LAImax - maturité | Maturité - récolte |
|-------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Durée | 55 - 60       | 40             | 50                | 50                 |
| Kc    | 0.4           | 0.4 – 0.8      | 1 – 1.1           | 1-0.9-0.7-0.6-0.4  |

Diminution  
chaque décade

## Culture de Pomme de terre

.Calendrier cultural

|                | Plantation      | Récolte              | Semence              |
|----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| Saison         | 15/1 – fin mars | 15/5 – début juillet | Importée             |
| Arrière saison | 15/8 – 15/10    | Novembre - février   | Locale               |
| Extra primeur  | 15/10 – 15/11   | Février – mars       | Locale               |
| Primeur        | 15/11 – 15/1    | Mars – 15/5          | Importée (monogerme) |

**NB..** Dans les zones continentales, la plantation se fait un peu en retard comparativement a celle des zones côtières et cela pour éviter l'effet de la gelée. Les principales variétés cultivées sont : Spunta, Ajax, Claustatt et Baraka).

.Durée moyenne de principales phases et variation du coefficient cultural (culture de saison)

|           | Plantation - levée | Levée - LAImax | LAImax - maturité | Maturité - récolte |
|-----------|--------------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Durée (j) | 25                 | 30             | 35                | 30                 |
| Kc        | 0.9                | 0.9 – 1.1      | 1.1               | 1.1 – 0.75         |

**NB..** Pour la culture de primeur la croissance végétative est un peu allongée comparativement à la culture de saison car les conditions climatiques notamment (température et photopériode) sont peu favorables.

## Les céréales

.Calendrier cultural

|        | Semis          | Récolte    | Variétés                  |
|--------|----------------|------------|---------------------------|
| Blé    | 15/11 – 15/12  | Fin juin   | Karim, Razzek, Khiar      |
| Orge   | 15/10 – 15/11  | Fin mai    | Rihen, Martin             |
| Avoine | Début novembre | Début juin | Avoine avon, avoine crème |

.Durée moyenne de principales phases et variation du coefficient cultural

|                | Semis - levée | Levée - LAImax | LAImax - maturité | Maturité - récolte |
|----------------|---------------|----------------|-------------------|--------------------|
| Durée (j) Blé  | 15            | 105 - 110      | 60                | 28 - 30            |
| Kc             | 0.3 – 0.4     | 0.7 – 0.8      | 1.05 – 1.2        | 0.65 – 0.75        |
| Durée (j) Orge | 10 - 12       | 95-105         | 45 - 55           | 20 - 25            |

|                  |         |           |         |         |
|------------------|---------|-----------|---------|---------|
| Kc               | -       | -         | 1.15    | 0.2     |
| Durée (j) Avoine | 10 - 12 | 100 – 110 | 50 - 60 | 25 - 30 |
| Kc               | -       | -         | 1.15    | 0.2     |

**NB..** Le Kc initial dépend de la fréquence d'irrigation et ou de la fréquence des pluies. En outre on doit corriger ce coefficient selon l'ET0 de la région et la fréquence d'irrigation.

Le 1<sup>er</sup> chiffre : Avec forte humidité (HRmin > 70%) et vent faible < 5 m/s.

Le 2<sup>ème</sup> chiffre : Avec une faible humidité (Hrmin < 20%) et vent fort > 5m/s.

## La Fève

### .Calendrier cultural

|               | Semis           | Récolte                         | Variétés              |
|---------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------|
| Semis précoce | octobre         | Décembre (en vert)              | Mateur, Malti, sévile |
| Semis tardif  | novembre – dec. | Mars (en vert) et juin (en sec) | et aquadulse          |

Etant donné que le nombre de tiges diminue en fonction du retard de la date de semis, on conseille d'augmenter la densité chaque fois qu'on retarde la date de semis.

### .Durée moyenne de principales phases et variation du coefficient cultural

|                | Semis – stade 6 feuilles | Stade 6feuilles – début floraison | Début floraison – fin floraison | fin floraison – grain laiteux |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Durée (j)      | 30                       | 40 – 45                           | 40                              | 20                            |
| Kc (ITCF 1987) | -                        | 1                                 | 1.2                             | 1.2                           |

Pour les Légumineuses à graines, on doit signaler qu'il y a un chevauchement entre la croissance végétative et la phase reproductive.

## Le Petit Pois

### .Calendrier cultural

|   | Semis                       | Récolte                                      | Variétés  |
|---|-----------------------------|--|---|
| Culture d'arrière saison (en irrigué)   | Fin août- début septembre   | mi-novembre (en vert)                        | Variétés précoces   |
| Culture de saison (généralement en sec) | novembre – mi-décembre      | En vert (mi-mars), en sec (mai - début juin) | Variétés mi-tardives et tardives (tolèrent plus le froid) |
| Culture avec complément d'irrigation    | Fin janvier.- début février | En vert (avril), en sec (fin mai et juin)    | Variétés précoces et très précoces                        |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|--|--|--|--|

Les variétés les plus pratiquées sont : Douce de Provence (précoce), petite provençal (précoce), merveille de kelvedon (tardive) linoen (tardive)

. Durée moyenne de principales phases et variation du coefficient cultural

|                 | Initiale  | Développement | Mi-saison | Arrière saison |
|-----------------|-----------|---------------|-----------|----------------|
| Durée (j)       | 20        | 30            | 35        | 15             |
| Kc (pois frais) | 0.4 – 0.5 | 0.7 – 0.85    | 1.0 – 1.2 | 1.0 – 1.15     |

## Le Pois chiche

### .Calendrier cultural

|                      | Semis                | Récolte            | Variétés                                  |
|----------------------|----------------------|--------------------|---|
| Culture d'hiver      | novembre - janvier   | juin (en sec)      | Chétoui, kasseb et 92c                    |
| Culture de printemps | février – début mars | Fin juin - juillet | Amdoun1, Kasseb et variété française (VF) |

Les durées des phases de croissance végétative et reproductive sont plus longues en semis d'hiver que celui de printemps.

## 2. Etude agroclimatique à l'échelle du bassin versant.

A l'échelle du bassin-versant deux thématiques principales ont été développées ; l'étude de l'évapotranspiration d'une culture de blé et de tomate en conditions paysannes et l'étude de l'évapotranspiration de référence.

Pour cela sur deux sites pilotes contrastés de Kamech (conditions sub-humides mais fortement venté) et El gouazine (condition semi-arides) nous avons installé des stations micrométéorologiques mesurant de façon précise et continue les composantes du bilan radiatif (rayonnement global, rayonnement net), le vent (vitesse et direction), les flux de conduction dans le sol (fluxmètre et température à différentes profondeurs), les températures de plantes et les températures de l'air et de la pression de vapeur d'eau au niveau de niveau de la culture et à 2m (pour la détermination du flux de chaleur latente). L'ensemble de ces mesures étaient faites toutes les 15 secondes et moyennés sur 30 minutes. Les données ainsi recueillies permettent de calculer sur un pas de temps de 30 minutes toutes les composantes du bilan énergétique et déterminer ainsi l'évapotranspiration des cultures et la demande climatiques.

## 2.1 Quelques premiers résultats sur l'évapotranspiration de référence (ET0)

Les résultats obtenus de janvier à début juin 99 sont les suivants ;

| Stations    | ET0 (mm et mm/j) |      | Terme radiatif |      | Terme advectif |      |
|-------------|------------------|------|----------------|------|----------------|------|
| Kamech      | 662,4            | 5,26 | 267,1          | 2,12 | 395,3          | 3,14 |
| El Gouazine | 579,2            | 4,60 | 256,8          | 2,04 | 322,5          | 2,56 |

Les résultats obtenus montrent d'une part des valeurs particulièrement élevées pour les deux sites, autour de 5mm/j de moyenne (ce qui conduit à prédire une ET0 de l'ordre de 2000 mm par an) soit des demandes climatiques très fortes pour les cultures, et d'autre part ce qui est de même assez surprenant des ET0 nettement plus élevée pour le site de Kamech dans la région du Cap Bon que pour le site d' El Gouazine dans la région de Kairouan. L'évolution de ET0 au pas de temps quotidien (graphique 1) montre une augmentation saisonnière logique des besoins en eau des cultures . Cependant des valeurs de supérieures à 4mm/j pour El Gouazine et 5mm/j pour Kamech sont atteintes dès le mois de Janvier et restent autour de ces valeurs jusqu'à fin mars pour montrer ensuite une nette croissance pour atteindre les 8 mm/j. L'analyse des composantes radiatives et convectives de l'ET0 (graphique 2 et 3) révèlent le poids déterminant des facteurs advectifs dans la première moitié du cycle des cultures pluviales et des facteurs radiatifs dans la phase de fructification et de maturité. La demande climatique liée à l'advection est souvent supérieure à 4mm/j pour Kamech et représente plus de 80% de l'ET0, elle est principalement liée pour ce site au vent extrêmement violent présente souvent des moyennes journalières à 10 m/s (graphique 4). Ce même phénomène est clairement observable pour El Gouazine en janvier et début février, il perd ensuite de son intensité, le terme advectif devient alors plus dépendant du pouvoir évaporant de l'air (pression de vapeur saturante- pression de vapeur d'eau) (graphique 5). Ces premiers résultats sont particulièrement intéressants car ils soulignent l'importance de l'évaporation pendant la période hivernale due à une vitesse de vent fréquemment très élevée et les difficultés d'extrapolation des valeurs de ET0 obtenues dans des stations proches mais aux conditions advectives fort différentes ou lorsque l'on pose l'hypothèse courante d'une moyenne de vent de 2m/s. Les erreurs introduites sont alors énormes, de l'ordre de 200 à 300% dans la période hivernale et de début de printemps, donc pendant la croissance des cultures pluviales.

Un début de comparaison à Kamech entre les valeurs de ET0 et du bac à évaporation (type colorado) (graphique 6 et graphique 7) montrent une très nette sous estimation hivernale pour le bac de janvier à avril et une légère surestimation en juin et juillet. La surestimation hivernale des formules de Type Penman-Monteith a déjà été montrée par différents auteurs mais les différences de l'ordre de 100% sont inhabituelles. La reformulation de l'estimation des coefficients d'échange selon la formule de dalton dans le terme advectif de l'ET0 semble nécessaire lorsque le vent devient supérieures à 4m/s. Ceci avait déjà étudiée par Riou mais dans des conditions moins venteuses (Mornag) et au pas de temps décennales et mensuelles. La structure du bac (semi-enterré) et

l'installation de la station de mesure sur un plateau à une certaine mais plus exposé au vent peuvent aussi tendre à expliquer ces différences. Elles souligneraient cependant la forte hétérogénéité spatiale de l'évaporation au niveau du bassin versant. L'installation d'une station micrométéorologique à l'emplacement même du bac permettra de mieux préciser et analyser ces premiers résultats.

## 2.2 Etude de l'évapotranspiration des cultures pluviales et irriguées en conditions paysannes dans la zone d'étude d'Hydromed.

L'étude de la valorisation agricole des lacs collinaires et des flux hydriques à l'échelle du bassin versant demande une connaissance relativement précise des consommations en eau des cultures. Pour cela sur des parcelles paysannes des bassins versants de Kamech et El Gouazine les évapotranspirations d'une culture de blé ont été déterminées par la méthode du rapport de Bowen. Cette méthode est fréquemment utilisée en bioclimatologie car elle nécessite seulement deux mesures de température et de pression de vapeur d'eau au niveau du couvert et au dessus du couvert ainsi que le bilan radiatif et le flux conductif dans le sol ; elle est représentative de l'ensemble des flux au niveau de la parcelle et reste peu coûteuse. Nous avons installé les stations de mesure à plus de 100 mètres du bord de la parcelle pour être en conditions de flux conservatifs.

Cette méthode est basée sur la combinaison de l'équation du bilan d'énergie et sur les fonctions de diffusion turbulente

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta) \text{ avec } \beta = \text{constante} * \Delta T / \Delta P$$

$$H = (R_n - G) \beta / (1 + \beta)$$

$R_n$  = rayonnement net,  $G$  = flux de conduction dans le sol

$LE$  = flux de chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $H$  = flux de chaleur sensible

$\Delta T$  = différence de température de l'air entre le niveau de la culture et 2m

$\Delta P$  = différence de pression de vapeur d'eau entre le niveau de la culture et 2m.

Pour les mesures sur parcelles de blé puis de tomates irriguées nous avons eu quelques problèmes techniques liés à la condensation de l'eau dans les tuyaux d'air et de poussières gênant le fonctionnement des électrovannes. Pour corriger certains jours des mesures de différences de pression de vapeur d'eau trop élevées nous avons eu recours aux estimations du flux de chaleur latente par la similitude des rapports  $H/R_n$  sur l'ensemble de la journée et à midi et par le calcul du flux de chaleur sensible par une formule de type de convection libre. En zone semi-aride l'écart de température assez élevé conduit le plus souvent à un nombre de Richardson supérieur à 0.05. Une estimation du flux de chaleur sensible à midi est alors possible (avec une erreur inférieure à 20%) à partir de la formule suivante :

$$H = \alpha [(\Delta T)]^{3/2}$$

$$\text{Avec } \alpha = (1.3 \rho C_p (g/T)^{3/2}) / (3(\Delta z^{-1/3}))^{3/2}$$

### 2.2.1 Consommation en eau d'une culture de blé dans les sites pilotes de Kamech et d'El Gouazine.

Les stations météorologiques ont été installées sur des parcelles paysannes. Le semis ont été effectués lors de la deuxième quinzaine de décembre et la récolte fin mai. Les mesures de l'évapotranspiration des cultures ont commencé début février lorsque la végétation couvrait plus de 30% du sol. Le blé à Kamech et à El gouazine présente de mi-février à mi-mai (ce qui correspond aux phases principales de développement de la plante et de la formation et du remplissage du grain des pertes en eau de 224 et 189 mm, soit une évapotranspiration journalière moyenne de 2.31 et 1.90 mm/j. Les valeurs e la consommation en eau quotidiennes des cultures durant toute cette longue phase de mesures (graphique 8 et graphique 9) restent faibles (presque toujours inférieures à 3 mm/j) et toujours très inférieures à l'ET0. Le rapport LE/ET0 est pour les deux sites est bas et ne dépasse que rarement les 50%.

A El Gouazine ces faibles évapotranspirations correspondent bien aux très faibles précipitations pendant la période de mesure (60 mm en 3 mois) et une faible densité de la culture (autour de 30 plantes/m<sup>2</sup>). Les rendements obtenus de 5 à 6 quintaux hectares sont en accord avec un rapport de LE/ET0 de l'ordre 0.3 et la faible densité.

Pour Kamech , les apports pluviométriques plus élevés se traduisent principalement sur les évapotranspirations dans le dernier mois du cycle. La densité plus élevée ainsi que des déficits hydriques moins forts conduisent à des rendements agricoles plus forts ; ils sont de 22 quintaux par hectare pour la parcelle étudiée.

Les variations de LE selon les variables météorologiques et le sol sont actuellement analysées. Il apparaît cependant que des réserves hydriques du sol ont largement participé à l'évapotranspiration du blé pendant sa première phase de croissance.

### 2.2 . Consommation en eau d'une culture de tomate irriguée à Kamech et à Grombalia.

L'étude menée a Grombalia s'est réalisée en étroite relation avec le département de bioclimatologie de l'INAT et sera l'objet d'un DEA..

Les cultures ont été installées en avril et ont été récoltées dans la première quinzaine d'août. Les tomates ont été irriguées avec un système de goutte à goutte. L'irrigation se faisait surtout la nuit et l'apport était constamment de l'ordre de 9 à 10 mm/j.

La période de mesure correspond au stade de développement maximal de la culture et à la phase de grossissement des tomates.

Les résultats obtenus (graphiques 11 et 12) montrent pour les deux sites des consommations en eau de 6 à 7 mm/j , mais avec des valeurs légèrement plus faibles pour Grombalia. Des réductions de la conductance stomatique à la mi-journée lorsque la demande climatique est très élevée ont été mesurées et peuvent induire des réductions de

transpirations. La diminution importante fin juillet août correspond à la fin du cycle mais semble liée aussi à des effets de stress thermique en particulier à Grombalia, où la température maximale de l'air approchait les 45 degrés.

### **Quelques premiers éléments de conclusion et de perspectives pour l'année à venir.**

Les outils pour l'analyse fréquentielle des risques de sécheresse et des besoins en eau des cultures ont été construits et peuvent maintenant être utilisés pour l'ensemble des stations proches des sites pilotes et surtout ils peuvent être couplés avec les modèles de simulation du bilan hydrique des lacs collinaires. Des résultats seront ainsi obtenus sur les capacités des lacs à résoudre les déficits hydriques de différentes selon différentes années climatiques et selon différentes stratégies agricoles.

Les premières résultats sur l'évapotranspiration de référence à Kamech et El Gouazine soulignent l'intensité de la demande évaporative pendant l'ensemble de l'année et avec des valeurs supérieures à 5 mm/j pendant l'hiver aux journées très ventées. Ils mettent en évidence les difficultés d'estimation de l'évaporation potentielle à partir du bac à évaporation, les problèmes d'extrapolation spatiale de ces valeurs car le vent présente une très forte variation spatiale à l'échelle régionale et locale. Des mesures complémentaires sont tout à fait nécessaires.

Les mesures de la consommation en eau des cultures de blé et de tomate ont mise en évidence l'importance des déficits hydriques pour le blé et la nécessité d'une irrigation de complémentaire pour obtenir une augmentation sensible des rendements. Les lacs collinaires pourraient, dans des zones où les déficits ne sont pas trop élevés, être utilisés pour les cultures pluviales.

Pour les cultures irriguées comme la tomate, les évapotranspirations maximales ne sont jamais atteintes et les déficits sont souvent de l'ordre de 30% malgré des apports d'eau élevés. Des problèmes d'irrigation et de stress thermique ont été observés. Ces expérimentations doivent être reconduites une année de plus afin de mieux analysés et interprétés les phénomènes mentionnés.

Figure 1: Evapotranspiration de référence (ET0Rn) à Kamech (K) et El Gouazine (G) de janvier à mai 1999

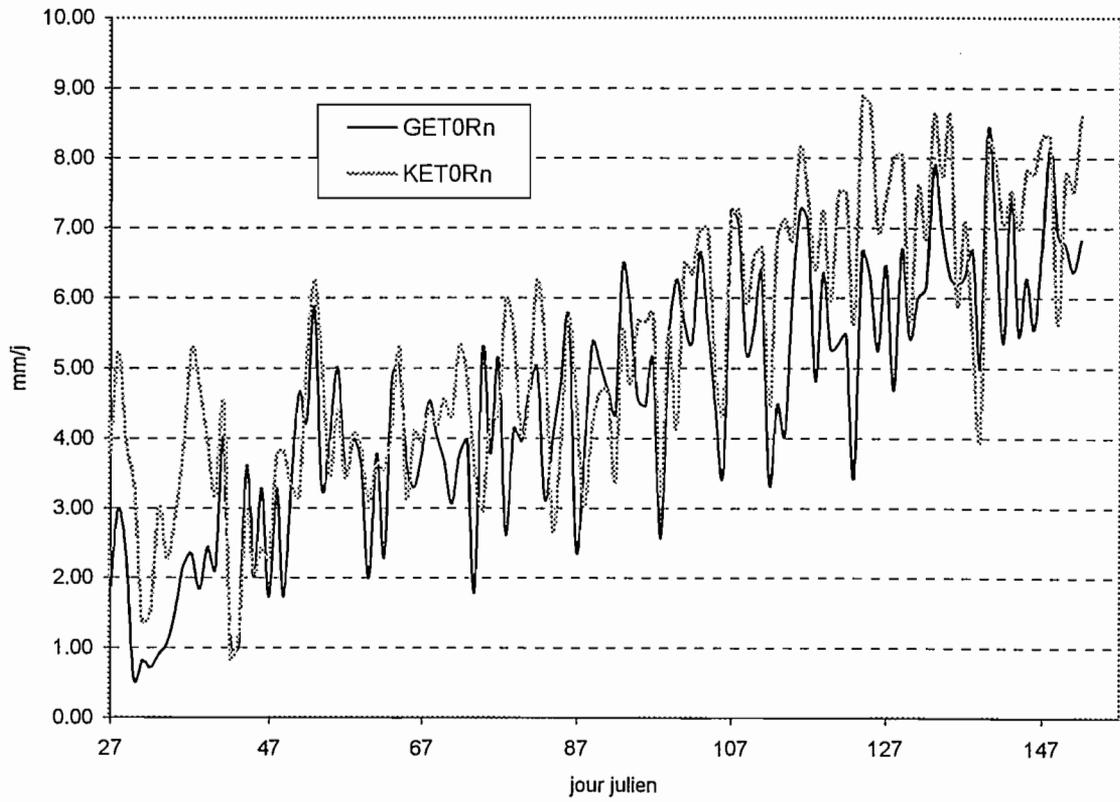


Figure 2: Terme radiatif (TRAD) de ET0Rn pour Kamech (K) et El Gouazine (G) de janvier à mai 1999

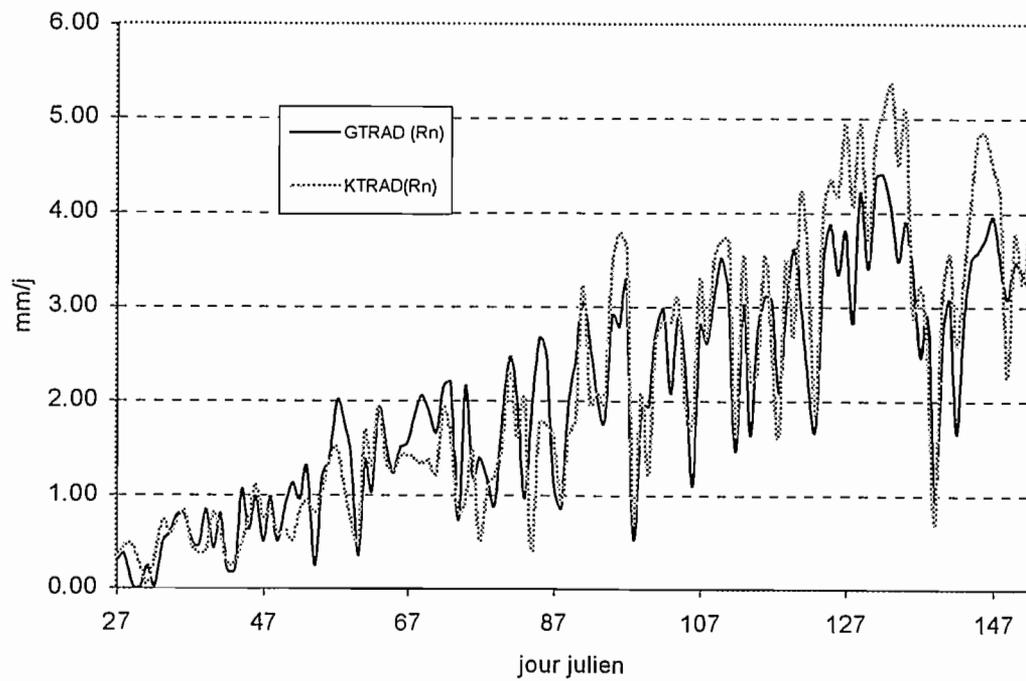


Figure 3: Terme Advectif (TADV) de ET0Rn pour Kamech (K) et El Gouazine (G) de janvier à mai 1999.

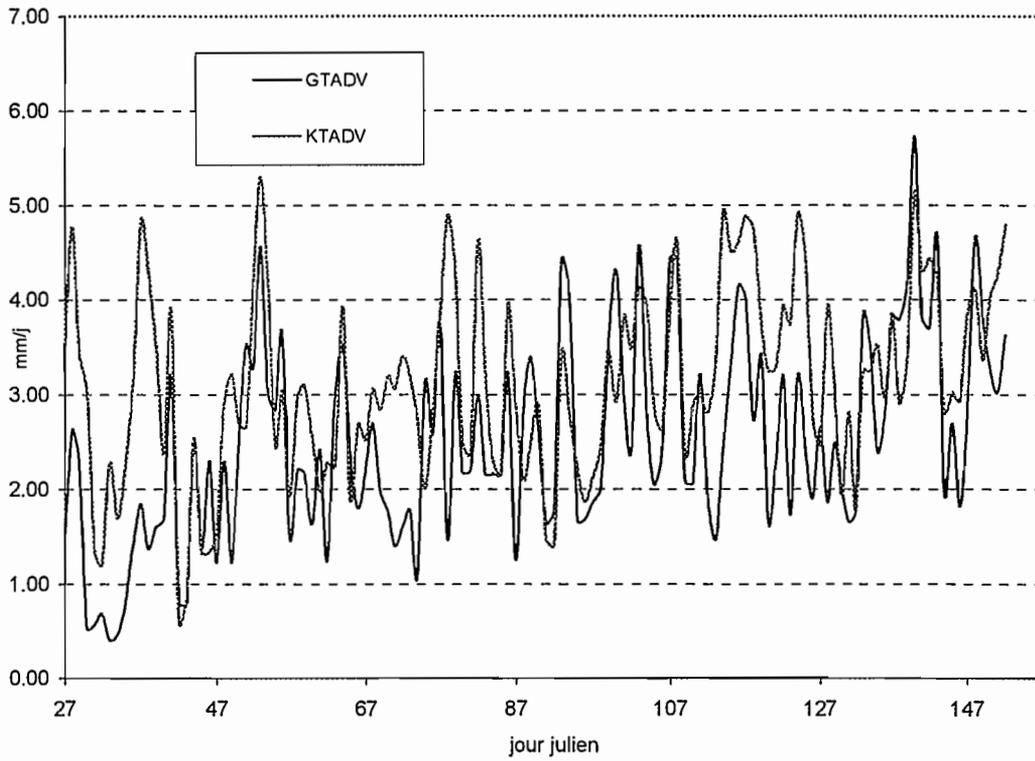


Figure 4: Vent moyen journalier (U) à Kamech (K) et El Gouazine (G) de janvier à avril 1999

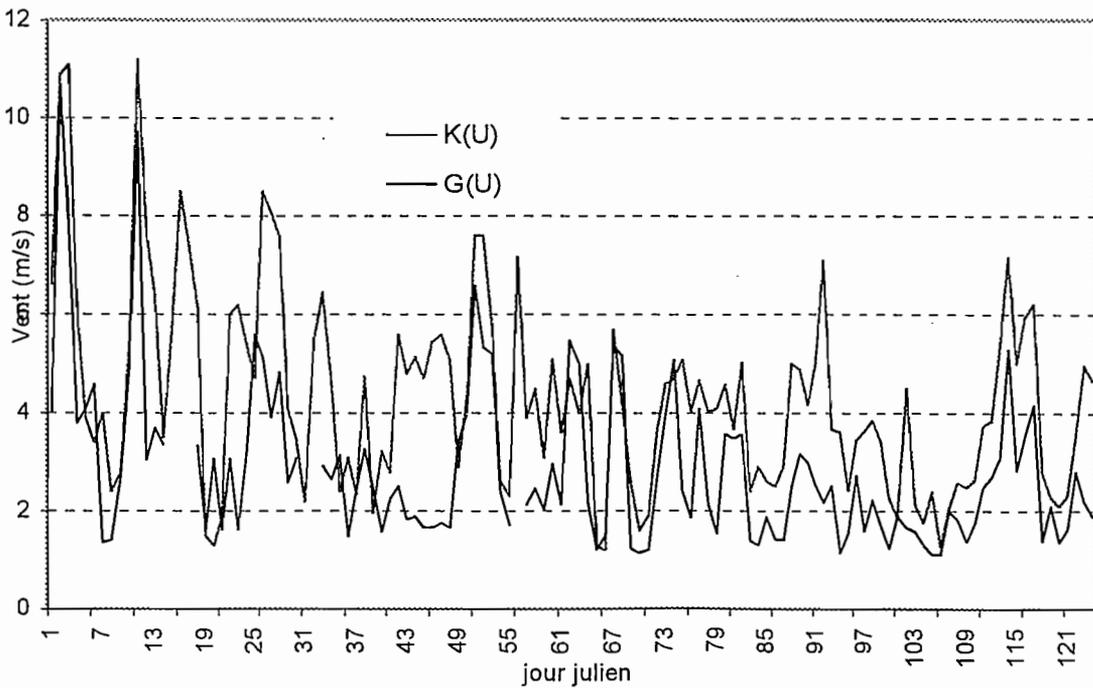


Figure 5: Deficit de vapeur d'eau (esat-evap) à Kamech (K) et El Gouazine (G) de janvier à avril 1999

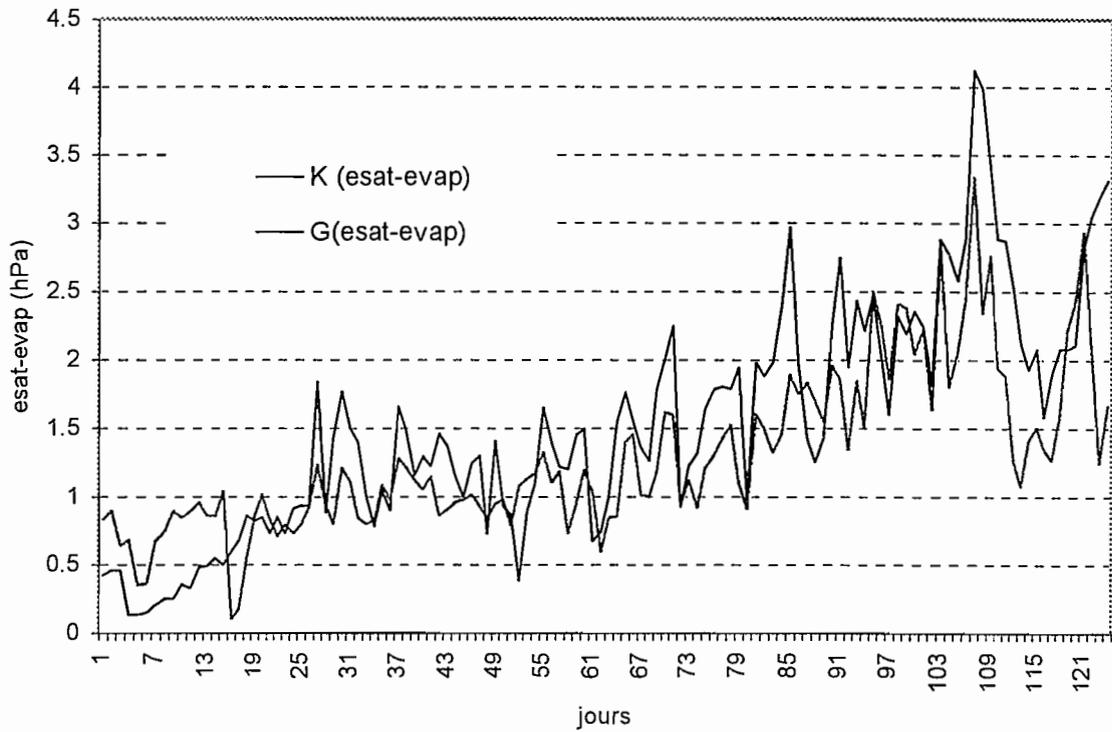


Figure 6: Evapotranspiration de référence (EToRn) et Evaporation du bac (EoBac) à Kamech de janvier à aout 1999

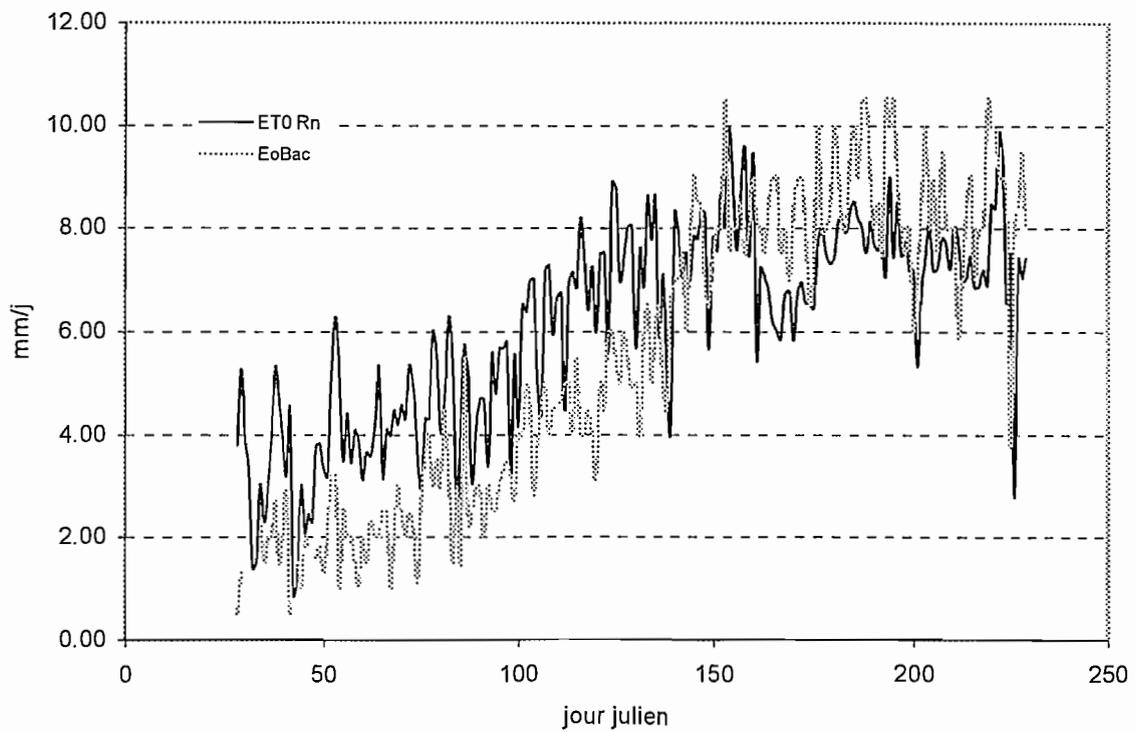


Figure 7: Evapotranspiration du bac (EoBac) selon l'évapotranspiration de référence (ET0Rn) à Kamech de janvier à aout 99

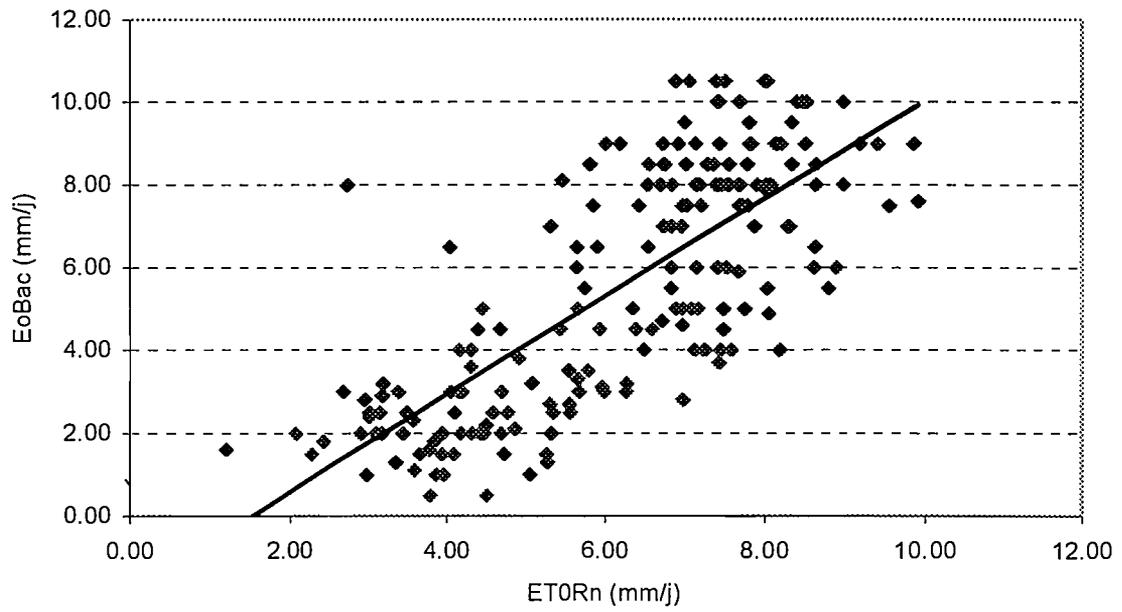


Figure 9: Evolution de l'évapotranspiration (LE) du blé et selon l'évapotranspiration de référence (LE/ET0) à Kamech de janvier à mai 1999

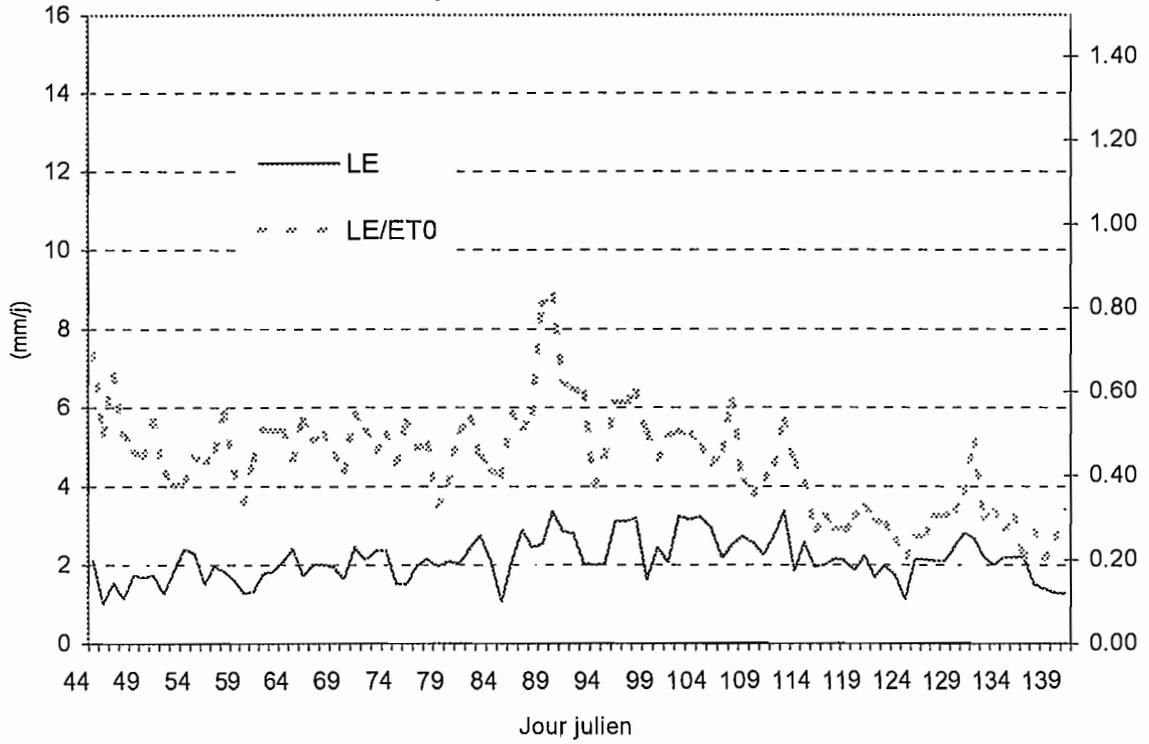


Figure 10: Evolution de l'évapotranspiration (LE) du blé et selon l'évapotranspiration de référence (LE/ET0) à EI Gouazine de janvier à mai 1999

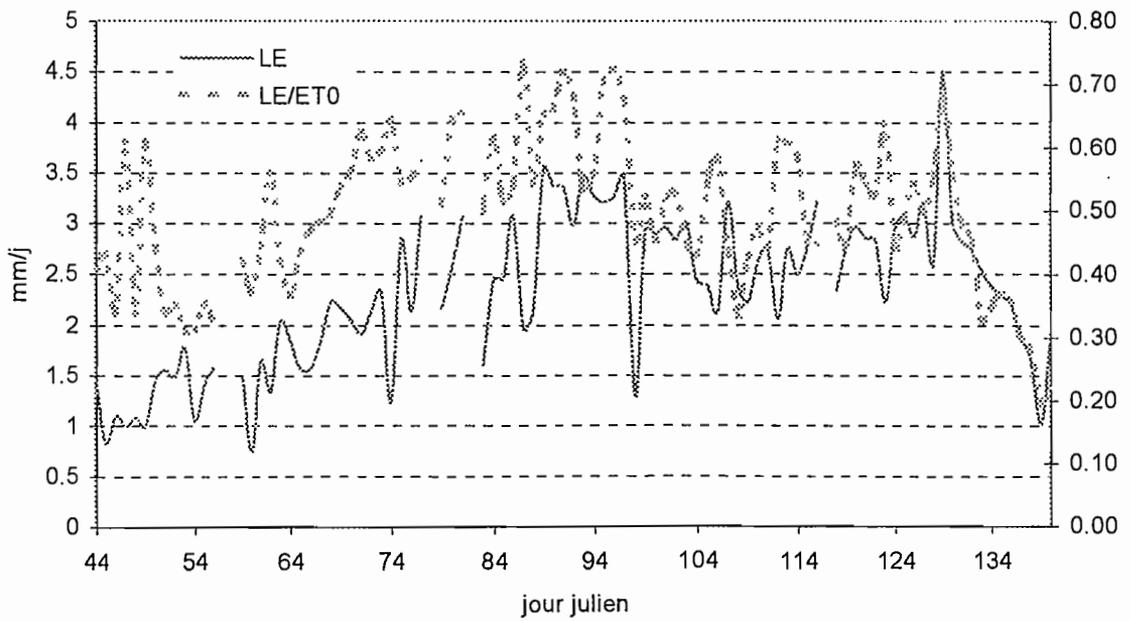


Figure 11: Evolution de l'évapotranspiration (LE) d'une culture de tomate irriguée et selon l'évapotranspiration de référence (ET0) à Kamech de juin à juillet 1999

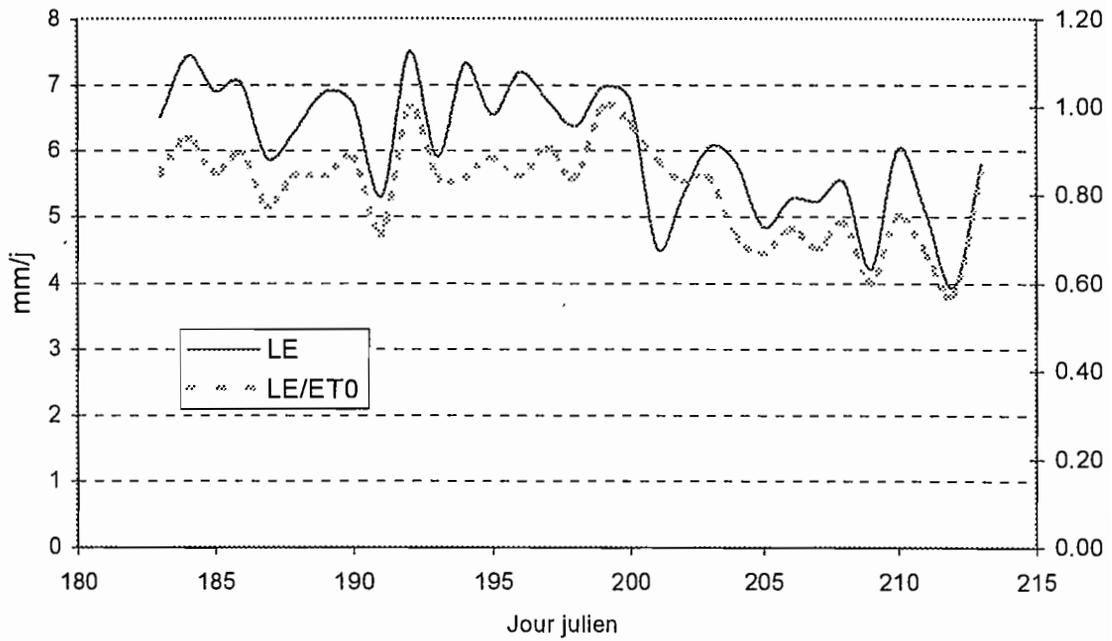
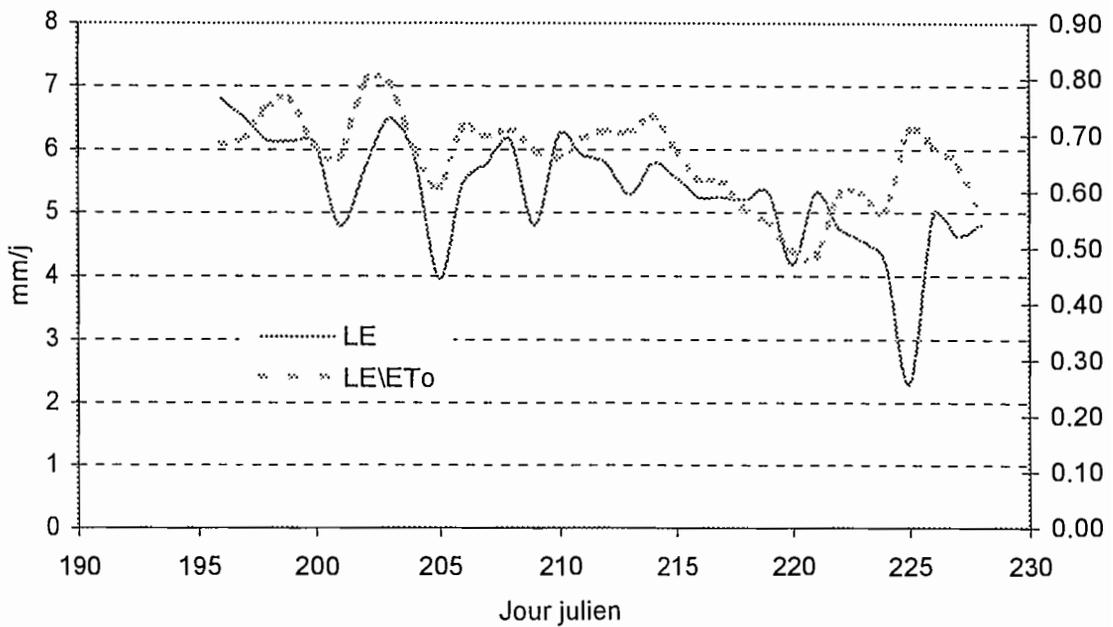


Figure 12: Evolution de l'évapotranspiration (LE) d'une culture de tomate irriguée et selon l'évapotranspiration de référence (LE/ET0) à Grombalia de juin à juillet 1999



## HYDROMED - INGRES

La fin du programme Hydromed était prévu le 30 décembre 2000. la DGXII de l'UE a accepté de prolonger la durée du programme jusqu'au 30 avril 2001.

Au cours de l'année 2000 l'activité de recherche concernant la partie Hydrologie – CES se résume dans les actions suivantes :

### **Action 1 : Recharge de la nappe :**

La nappe phréatique de l'oued El Gouazine a été prise comme exemple pour suivre et étudier l'impact d'un lac collinaire sur la recharge d'une nappe phréatique. Les enregistrements automatiques de la piézométrie au niveau de deux puits à l'aval du lac collinaire se poursuivent depuis octobre 1997.

Après avoir montré qu'il y a une alimentation directe par écoulement souterrain de la retenue vers la nappe, un modèle bidimensionnel d'écoulement d'une nappe avec potentiel imposé par un lac collinaire, programmé en visuel basic a été établi, calé et validé.

Les résultats de cette action de recherche ont été présentés dans les manifestations scientifiques suivantes :

NASRI S., GRUMBERGER O., ALBERGEL J. (1998):

Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple d'El Gouazine (Ousseltia Kairouan). Dans les journées scientifiques de l'INGREF, Hammamet 29-30 octobre 1998.

NASRI S., (1999):

Ground water recharge and modelling in an experimental catchment. In proceedings of the international Seminar Rain Water Harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration HYDROMED. Department of water resources engineering, Lund Institute of Technology, 26/6 to 3/7/98. report 3222, Lund, Sweden, pp. 257-274.

NASRI S., (2000):

Impacts des lacs collinaires sur la recharge des nappes. Atelier sur le suivi des lacs collinaires en zones semi-arides Tunisiennes. Présentation des résultats de la convention de recherche D/CES-IRD. Nabeul, les 28 & 29 mars 2000.

NASRI S., GRUMBERGER O., MONTOROI J.P. (in prep.):

Hydrogeological impact of hill reservoir in a Mediterranean environment, central Tunisia.

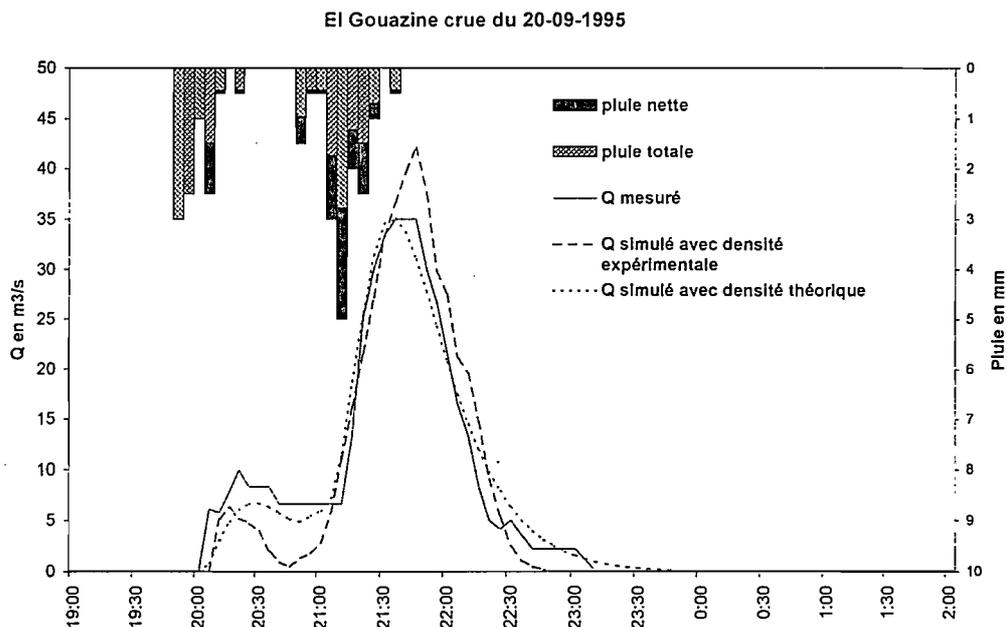
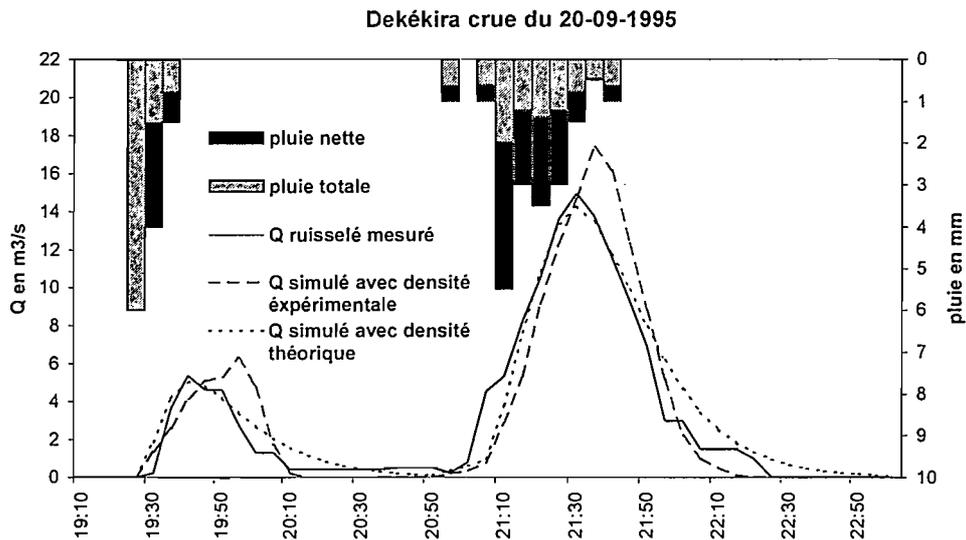
NASRI S., (2000): **(Poster)**

Recharge artificielle des nappes phréatiques par les lacs collinaires. Exemple de l'Oued El Gouazine (Ousseltia – Kairouan, Tunisie Centrale). Séminaire international « Hydrologie des Régions Méditerranéennes » IRD, Montpellier du 11 au 13 octobre 2000.

## Action 2 : Hydrologie des petits bassins versants :

Pour comprendre l'hydrologie des petits bassins versants jaugés par des lacs collinaires de la zone semi aride tunisienne, nous avons reconstitué toutes les crues enregistrées dans 8 lacs. Nous avons déterminé une fonction de production de la pluie brute en pluie nette que nous avons couplé avec le modèle géomorphologique « H2U » dont la fonction de transfert se base sur les caractéristiques du réseau hydrographique.

Les figures 5 et 6 montrent les résultats de la modélisation à Dékekira et El Gouazine pour l'événement du 20/9/95 en utilisant la fonction de densité des longueurs de réseaux expérimentales ou modélisé par une loi  $\Gamma$ .



Simulation des crues exceptionnelles : On réalise la simulation des crues en prenant les valeurs moyennes des paramètres de calage les figures 8 et 9 montrent les simulations pour les crues d'occurrence 2 ; 5 ; 10 ; 20 et 50.

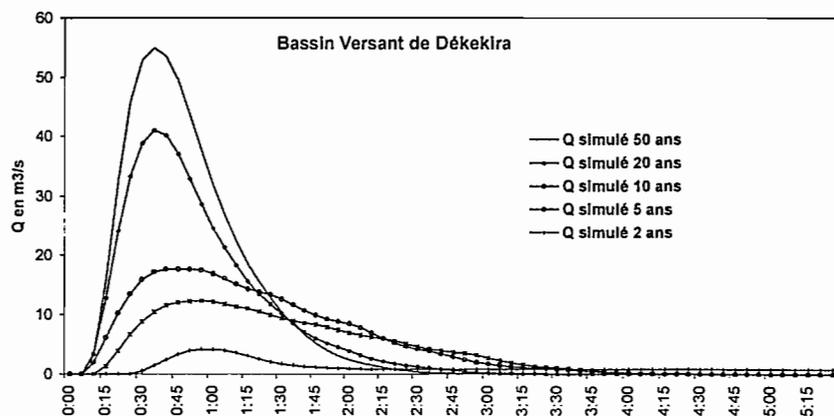


Figure 8 : Prédétermination des crues exceptionnelles à Dékékéra

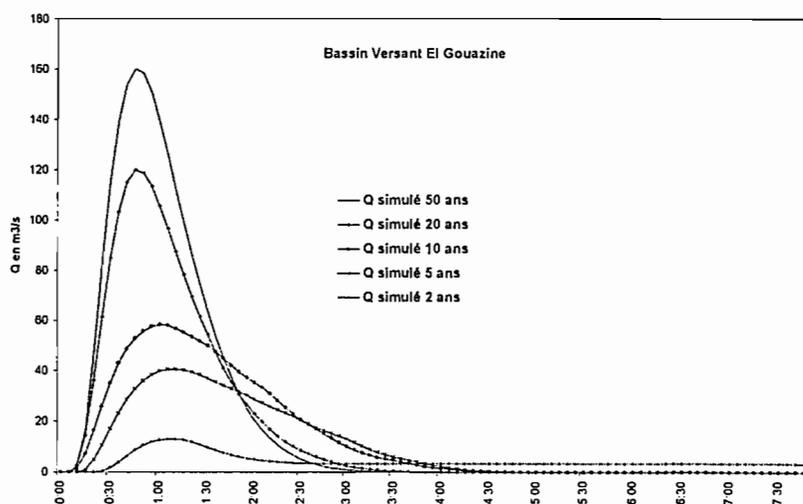


Figure 9 : prédétermination des crues exceptionnelles à El Gouazine

Les résultats de la simulation des crues exceptionnelles dans les lacs collinaires d'El Gouazine et Dékékira ont été présentés au Séminaire international « Hydrologie des Régions Méditerranéennes » IRD, Montpellier du 11 au 13 octobre 2000. les communications seront publiées dans un numéro spécial du journal des sciences hydrologiques de l'IAHS.

NASRI S., ALBERGEL J., DUCHESNE J. (2000):

Application d'un modèle géomorphologique pour la simulation d'une crue exceptionnelle arrivant dans un petit barrage. Séminaire international « Hydrologie des Régions Méditerranéennes » IRD, Montpellier du 11 au 13 octobre 2000.

### Action 3 : Impacts des aménagements CES

Une troisième opération de recherche concerne l'étude de l'impact des aménagements de CES « banquettes » sur le bilan hydrologique du lac, le retardement des écoulements.

Pour déterminer l'impact des banquettes sur le ruissellement nous avons couplé le modèle hydrologique H2U avec une fonction de production du ruissellement par le système banquettes. Cette fonction de production est donnée par un modèle Hydraulique de banquette que nous avons conçu et en cours de validation pour être publié ultérieurement.

Les premiers résultats de ce travail ont fait l'objet d'un poster qui a été présenté à Montpellier en octobre 2000.

NASRI S., (2000): **(Poster)**

Impacts hydrologiques des banquettes mécaniques. Exemple de l'Oued El Gouazine (Ousseltia – Kairouan, Tunisie Centrale). Séminaire international « Hydrologie des Régions Méditerranéennes » IRD, Montpellier du 11 au 13 octobre 2000.

Une expérimentation sur terrain pour la validation d'une loi de déversement des banquettes a été organisée fin février 2000 dans le bassin versant d'El Gouazine. Ce travail se fait en collaboration avec le Professeur Duchesne (INRA Angers, France). la figure suivante nous montre le déversement de l'eau à l'extrémité d'une banquette.



Le dépouillement des mesures de cette expérimentation sont en cours. La publication des résultats est programmée avant la fin de l'année 2001.

## **Action 4 : Usage de la ressource**

### **1. Utilisation des eaux des lacs dans l'agriculture**

L'objectif de l'utilisation des eaux des lacs dans l'agriculture est d'améliorer les revenus et les conditions de vie des agriculteurs pouvant ainsi contribuer à fixer les populations rurales sur place.

Pour connaître la réaction de la population locale face à la création d'une offre d'eau supplémentaire des enquêtes ont été effectuées auprès des agriculteurs dans plusieurs zones où sont installés les lacs collinaires ; en particulier ceux choisis dans le cadre du projet Hydromed.

Ces enquêtes laissent apparaître deux types de réaction des populations rurales face à la disponibilité d'une ressource en eau supplémentaire:

- une faible exploitation de la ressource eau et ;
- une motivation pour la gestion rationnelle de cette ressource.

**1.1. Faible exploitation de la ressource :** Les résultats des enquêtes montrent que l'exploitation limitée des ressources en eau des lacs est expliquée par la conjugaison de plusieurs éléments : appartenance agro-climatique (sub-humide, semi-aride ou aride), les dotations structurelles de l'exploitation ; tradition dans la pratique de l'agriculture irriguée et le risque sur la disponibilité de l'eau dans la retenue.

- *effet de l'étage climatique* : Il ressort des enquêtes effectuées que l'étage climatique a une influence sur le degré de la demande en eau d'irrigation par les agriculteurs. En effet, dans les étages sub-humides (cas de Bizerte) l'utilisation des eaux des lacs est observée particulièrement en été pour irriguer les cultures maraîchères telles que tomate, piment, pastèque, melon, pomme de terre de saison. Par contre dans les étages climatiques arides et semi-arides (cas de Nadhour, Oueslatia, Sbiba, Nasrallah, Jelma etc) l'eau est beaucoup plus sollicitée aussi bien en hiver qu'en été pour irriguer l'arboriculture et les cultures maraîchères.

- *Dotations structurelles des exploitations* : les dotations structurelles des exploitations telles que la taille des parcelles situées à proximité des lacs et la capacité de financement des agriculteurs jouent un rôle déterminant dans le degré de l'exploitation des lacs collinaires. En effet, la faible taille des parcelles à proximité des lacs (0.25 à 0.5 ha) due au morcellement excessif, n'encourage pas les exploitants à investir dans l'irrigation puisque la rentabilité économique avec de telles superficies ne semble pas garantie.

Les enquêtes ont montré aussi que la faible capacité de financement des agriculteurs constitue une contrainte devant l'investissement en irrigation à partir des lacs collinaires. En effet, l'irrigation nécessite un investissement considérable aussi bien en matériel et réseau d'irrigation qu'en approvisionnement des cultures en intrants.

- *Risques sur les disponibilités de l'eau dans les lacs* : Dans les lacs situés en climat aride et semi-aride, la variabilité de la disponibilité en eau dans la retenue joue pour une bonne part dans la réticence des agriculteurs vis à vis de l'investissement en irrigation.

En somme nous pouvons dire que ces trois éléments se conjuguent et agissent ensemble pour donner en définitive la situation qu'on observe actuellement en matière d'exploitation de ce type de lacs.

## **1.2. Des motivations pour la gestion rationnelle de la ressource**

Les enquêtes réalisées montrent aussi que, parallèlement à l'exploitation limitée qui caractérisent certains lacs pour les raisons déjà avancées, certains lacs tels que Kamech, Gouazine, Essenéga, Sbayhia et bien autres connaissent un développement rapide de l'agriculture irriguée au point que l'offre de la ressource s'avère dans certaines situations insuffisante pour satisfaire la demande.

Sachant que les lacs se caractérisent par une faible capacité de stockage et une variabilité des apports d'eau, la concurrence pour l'usage de la ressource peut compromettre les résultats attendus et créent des conflits sociaux. Dans ce cas une gestion rationnelle de la ressource ne peut être effectuée que dans le cadre d'une association qui a pour rôle d'internaliser toutes les externalités qui s'exercent sur le système et de protéger les producteurs contre eux mêmes particulièrement en conditions hydriques restrictives.

Pour ce type de lacs déjà exploités, l'on peut aussi penser à introduire de nouvelles technologies qui concernent le matériel d'irrigation (économie d'eau), le matériel végétal (variétés), les techniques culturales (préparation du sol, conduite et pilotage des arrosages etc) et la gestion de la ressource (collective ou privée). L'apport de ces technologies sur la valorisation de la ressource et sa répartition entre plusieurs types d'exploitants serait certain particulièrement lorsque la disponibilité de l'eau dans le lac devient insuffisante.

## **Action 5 : AGROCLIMATOLOGIE DES LACS COLLINAIRES**

Pour répondre à l'objectif de valorisation de l'eau des lacs collinaires et plus spécialement les lacs El Kamech et El Gouazine, notre travail consiste à déterminer les besoins en eau des cultures, évaluer selon les principaux systèmes de cultures adoptés par les agriculteurs, les périodes et les intensités des déficits hydriques.

La stratégie suivie dans notre étude se base sur deux approches, à savoir, une approche régionale et une approche locale.

### **APPROCHE REGIONALE.**

L'approche régionale, consiste en une caractérisation climatique des régions d'études. Cette caractérisation se base sur une étude fréquentielles des précipitations, de la demande climatique (ETP), des besoins en eau des cultures et du bilan hydrique agroclimatique relatif aux cultures stratégiques de la région d'étude.

La station de Kélibia gérée par l'Institut National de la Météorologie et celle de Hendi Zitoun, gérée conjointement par l'INRGREF et l'Institut National de la Météorologie ont été prises comme stations de référence. Notre choix a été guidé par la disponibilité et la qualité des données et par leur proximité aux lacs collinaires pris comme référence à savoir le lac El Gouazine et le lac El Kamech.

Pour l'approche régionale, l'échelle spatiale a été la station et l'échelle temporelle la décennie.

Au terme de l'étude régionale, nous avons déterminé un bilan hydrique agroclimatique simplifié relatif aux cultures de référence : la tomate de saison et le blé.

#### **- LE LAC EL GOUAZINE**

Il est situé dans la zone bioclimatique du semi-aride inférieur à pluviométrie comprise entre 300 et 400 mm. Son bassin versant est occupé à 55% de la surface par des terres agricoles et 35% par des forêts ; les terres agricoles sont essentiellement à vocation céréalière.

Pour la caractérisation de cette zone d'étude nous avons choisi la station de Hendi Zitoun qui est la station agroclimatique la plus proche du lac El Gouazine et qui dispose d'une série de données fiables.

L'étude de la pluviométrie sur une période de 28 années allant de 1971 à 1998 a montré que comme c'est le cas de toute la Tunisie et comme cela a été déjà démontré par nombreux travaux, la région de Hendi Zitoun est caractérisée par une pluviométrie très variable à l'échelle annuelle mensuelle et saisonnière.

Pour évaluer la sécheresse agroclimatique et définir les périodes de déficit hydrique et les besoins en irrigation pour la région, nous avons calculé les bilans hydriques décennaux relatifs à la culture du blé.

La formule utilisée pour le calcul du bilan décennal simplifiée est la suivante :

$$\text{Stock Initial}_{\text{décade (D)}} = \text{Stock Final}_{\text{décade (D-1)}} + \text{Pluie}_{\text{décade (D-1)}} - \text{ETR}_{\text{décade (D-1)}}$$

- ETR = (ETP \* Kc) = Evapotranspiration réelle du blé.

- Si le stock final de la décennie (D-1) est négatif, il est considéré comme nul pour la décennie (D).

- Tout ce qui dépasse la capacité de rétention (200mm pour le cas étudié), est considéré comme étant perdu pour la culture et pour le sol.

Le bilan hydrique a été calculé pour la station de Hendi Zitoun pour la période allant de 1987 à 1998 et pour la période de culture du blé, c'est à dire de novembre jusqu'à la fin mai.

L'étude du bilan a montré que, pour la période étudiée, le risque de déficit est particulièrement fréquent à partir du mois de mars, à partir duquel, la fréquence des décennales déficitaires dépasse 50% et peut même atteindre 80% pour la deuxième décennie de mai.

Il a été aussi démontré qu'en moyenne (87/98), les besoins en eau du blé ne sont satisfaits que 7 décennales sur 20, pour les 13 autres décennales du cycle cultural, presque la totalité des besoins ne sont pas satisfaits.

L'étude a montré que le nombre de décennales déficitaires peut atteindre 12 au cours de la même campagne (93/94). Il a été aussi démontré que les épisodes secs, c'est à dire déficitaires sont pour la plupart compris entre 4 et 12 décennales soit 40 et 120 jours successifs de déficit hydrique.

Une irrigation de complément bien gérée à partir de l'eau des lacs collinaires est donc nécessaire dans ces régions afin de maintenir une production minimale.

#### **- LE LAC EL KAMECH.**

Le lac El Kamech est situé au nord du Cap Bon, dans la zone humide du semi aride inférieur à pluviométrie comprise entre 400 et 500 mm. Son bassin versant est occupé à 75% par des terres agricoles à vocation surtout céréalière avec une forte utilisation du goutte à goutte ; 55% de la surface est occupée par des terres agricoles et 35% par des forêts.

La station de référence pour le Lac El Kamech est la station agrométéorologique de Kélibia qui dispose d'une longue série de données et qui est la plus proche du lac. L'étude de la pluviométrie a montré une grande variabilité annuelle, mensuelle et saisonnière.

Le bilan hydrique a été déterminé pour la période de culture de la tomate, c'est à dire du mois de mars au mois de juillet et nous avons utilisé la même méthodologie que pour le cas du blé à Hendi Zitoun avec la seule différence que nous avons travaillé pour le cas d'un sol à capacité de rétention de 80mm.

Pour le cas de la tomate de saison, l'étude du bilan a montré que, pour la période étudiée, le risque de déficit commence à se faire sentir à partir du mois d'avril, il est particulièrement fréquent à partir de la deuxième décade de mai, à partir de cette période la fréquence des décades déficitaires est comprise entre 90 et 100%.

L'étude des séquences sèches, c'est à dire des décades déficitaires successives (besoins de la tomate non satisfaits), a montré que les épisodes secs, sont pour la période étudiée, compris entre 8 et 11 décades pour une même campagne culturale. Le recours à une irrigation bien pilotées et équitable entre agriculteurs est donc indispensable.

#### **APPROCHE LOCALE**

Les résultats obtenus par l'approche régionale sur les disponibilités hydriques et sur les besoins en eau des cultures sont le point de départ de l'approche locale qui est faite suivant deux analyses, une analyse en terme de production et une analyse en terme de stratégie paysanne face à l'irrigation.

**Des mesures micrométéorologiques à l'aide d'une station du type Campbell ont été menées sur des parcelles agriculteur dans le but d'étudier sur ce site, le comportement de différentes cultures.**

**Nous pourrons ainsi déterminé la demande climatique et les besoins en eau des cultures par la méthode du rapport de Bowen.**

**Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes et sont enregistrées par un système d'acquisition Campbell. Ces stations ont été installées successivement sur tomate irriguée, sur blé en pluvial pendant deux saisons successives 1999 et 2000. Une autre campagne de mesure est encore en cours sur blé.**

L'approche locale nous a permis, entre autres, de mettre en évidence le poids des caractéristiques locales pour la détermination de la demande climatiques et des besoins en eau des cultures et la difficulté d'extrapoler d'une région à une autre.

Les résultats sont encore en cours de traitement et d'analyse.

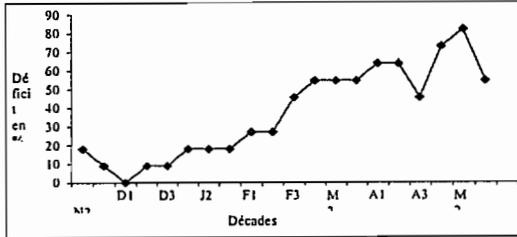


Fig 3: Pourcentage des décades déficitaires

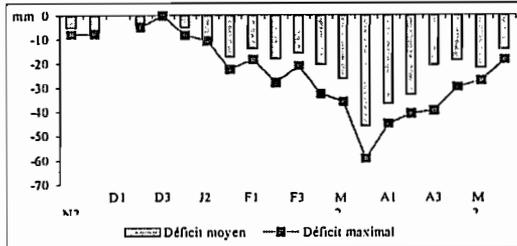
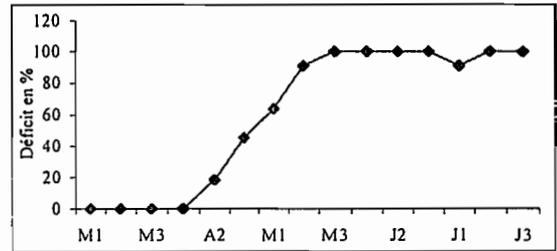


Fig 4: Déficit moyen et maximal au cours de la période de

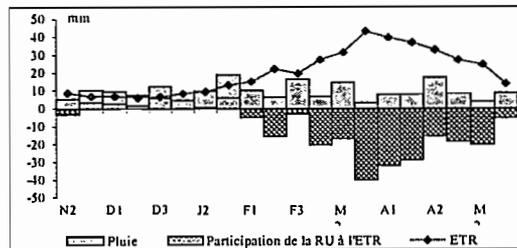
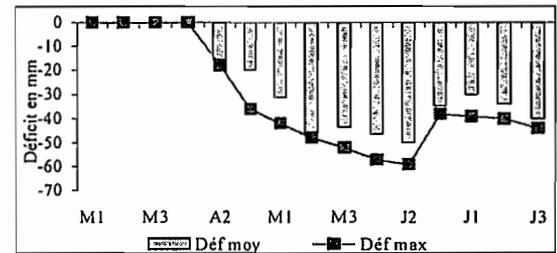


Fig 5: Déficit hydrique (P-ETR culture) au cours de la période de culture

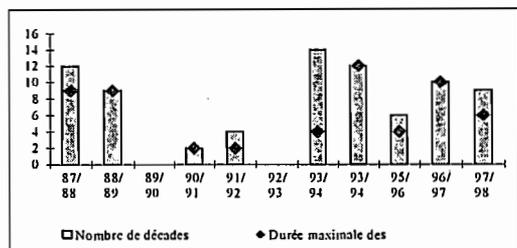
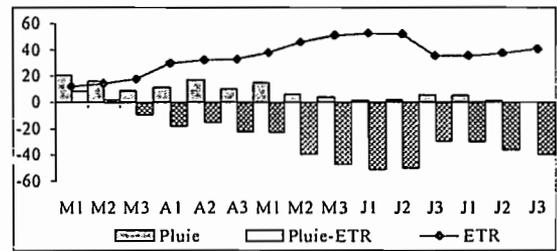
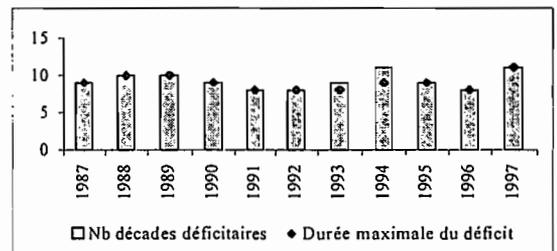
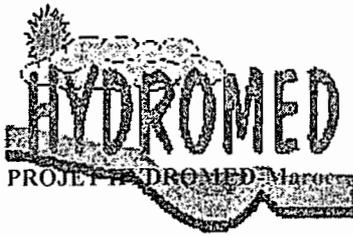


Fig 12: Durée des séquences déficitaires pour la période de culture



Cas du blé à El Gouazine

Cas de la tomate à El Kamech



## RAPPORT TECHNIQUE

Novembre 1999- Décembre 2000

### I. Introduction

Ce rapport présente l'état d'avancement du projet Hydromed entre novembre 1999 et décembre 2000. Cette année a été marquée par la consolidation et le développement de partenariat avec d'autres équipes de recherche (IRNASE-Séville), (FST deTanger et d'Errachidia), (Univ de Liège, Belgique) et (Univ Sherbrooke, Qué., Canada). Le petit bassin versant (BV) expérimental d'HYDROMED avec sa station hydrométrique installée au niveau du barrage Saboun, représente un important observatoire qui a permis le renforcement des acquis de recherche de l'équipe de Rabat. Il s'agit d'un BV expérimental unique au Maroc, qui dispose aujourd'hui d'une base de données assez riche. Le site est visité régulièrement par les étudiants de différentes Institutions universitaires et de recherche dans le cadre des activités de formation en hydrologie appliquée. Il faut rappeler que la recherche dans le domaine hydrologique et surtout en zones semi-arides s'inscrit dans la durée et dans l'accumulation d'informations et de données terrain. C'est ce qui a encouragé l'équipe marocaine à solliciter d'autres moyens de financement (AMBRE, PROTARS, OTAN, PRAD, Coopération espagnole ...), et ce dans un souci de continuité de la thématique abordée par HYDROMED et de valorisation de l'infrastructure de recherche mise en place. Le projet a ainsi assuré sa durabilité en terme de recherche scientifique et appliquée mais plus spécialement dans la consolidation du partenariat Maghreb-Europe et de mise en place de réseaux. Les ingénieurs et thésards formés dans le cadre d'Hydromed, ont pu être facilement recrutés par des Instituts de recherche ( INRA-Maroc, INRH, etc.) ou des programmes de doctorats ( Université de Sherbrooke, Qué.) et ont surtout continué à travailler dans la même ligne de recherche d'Hydromed et en collaboration avec l'équipe. Ainsi on estime que le projet Hydromed-Maroc a bien réussi ses objectifs de consolidation des acquis en assurant sa continuité et un bon « tallage » des ses activités scientifiques. La phase de prolongation de six mois (12/2000-05/2001) a été pertinente pour l'accomplissement des ses objectifs. Ce bref rapport d'activités n'a pas la prétention de donner une évaluation de l'impact du programme bien que les premiers résultats en témoignent des retombées positives.

### II. Activités Scientifiques

Le début de cette année a été principalement marquée par la tenue de la réunion de concertation de Rabat 3-5 décembre 99. Lors de la réunion de l'IAV Hassan II, une lecture a été faite des différents états d'avancement des travaux réalisés par les différents partenaires. Le coordinateur Jean Albergel a présenté l'état d'avancement du programme et une énumération des activités de coordination depuis l'atelier de Lund. Ensuite, des présentations plus détaillées par pays-ateliers ont été faites par les différents coordinateurs des programmes : Atelier marocain (Pr Merzouk) ; ateliers Syriens et Libanais (Dr Droubi) ; Atelier tunisien (Mme Mougou, MM Collinet, Semi, Nasri). Les pays du Nord,

partenaires d'Hydromed, ont aussi eu l'occasion de faire des présentations de leurs travaux : IRBASE-Séville, Dr F. Moreno) ; IH Wallingford, Dr R. Ragab) et Un Lund, Dr R. Berndtsson).

Les activités de recherche entamées cette année ont abordé des thèmes plus généralisés que l'axe principal D'HYDROMED : **Suivi et modélisation du fonctionnement hydrologique** du barrage collinaire Saboun et son BV ; qui fait l'objet du travail de thèse de Benyounes. En effet, ces thèmes ont touché d'avantage aux terres agricoles du BV et au petit périmètre irrigué par le barrage.

**L'évaluation des aptitudes des terres** et des besoins en conservation des eaux et du sol a été un thème de recherche-développement conduit par M Dieye Abdou Karim dans le cadre d'un mémoire de fin d'études de l'IAV, et ce à la demande de la Direction Provinciale d'Agriculture (DPA) de Tanger. En plus de ses aspects de recherche méthodologique, ce travail a permis de valoriser la base de données pédologiques d'Hydromed et surtout de consommer les premiers résultats de la connaissance du fonctionnement hydrologique des versants de Saboun. Ce volet de recherche a consolidé les relations et la collaboration de l'équipe de recherche avec les cadres de la DPA et surtout avec la population locale qui a bien voulu participer à l'enquête menée par Karim. Ce travail a aussi permis de lier le projet au programme nationale d'élaboration des cartes de vocation, que pilote l'INRA à travers l'intégration des caractéristiques hydrodynamiques des sols. C'est ainsi que Rachid Moussadek, un ancien mémorisant travaillant dans le cadre d'Hydromed a été recruté par l'INRA afin de continuer dans ce projet.

**L'évaluation et la spatialisation des paramètres hydrodynamiques des sols** du BV Saboun représente le thème central de cette année et qui permis beaucoup plus d'échanges avec l'équipe espagnole. Deux des publications préparées et présentées à Montpellier en témoignent de cette collaboration fructueuse. Ce premier travail de caractérisation des paramètres hydriques des sols marneux du Rif marocain a identifié des besoins importants de recherche qui ont fait l'objet du noyau de deux projets soumis au financement par des institutions nationales ( PROTARS2, Soil Moisture Monitoring in Morocco, ONS).

**Caractérisation des états de surface des sols par télédétection** : Le fonctionnement hydrologique des versants est fortement commandé par les états de surface. Le recours à la télédétection aéroportée et/ou spatiale pour la caractérisation et la cartographie des paramètres de surface se justifie par la forte variabilité spatiale de ces paramètres et par le progrès significatif de cette nouvelle technologie. Le projet Hydromed c'est engagé cette année avec la collaboration du Centre des Applications et Recherche en Télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke (Qué, Canada) dans le développement de nouvelles méthodes d'analyse et d'interprétation des données spectrales des états de surface pour l'évaluation des processus de dégradation des terres. M. Chikhaoui, Mohammed, ex-étudiant mémorisant d'HYDROMED, traite ce volet dans le cadre de préparation d'une thèse de Doctorat sous l'encadrement conjoint IAV Hassan II (Pr MERZOUK) et CARTEL (Pr BONN). Ce programme vise l'utilisation de l'approche de la déconvolution spectrale (SMA, *Spectral Mixture Analysis*). Celle-ci nécessite une base de données de signatures prototypes de chaque objet (ici état de surface) contenus dans

l'image. C'est ce travail qui a été réalisé dans une première campagne de mesures radiométriques des sols de Saboun automne 2000. Ce programme parrainé par l'OTAN permettra des échanges entre l'équipe d'Hydromed et celle du CARTEL.

**Mesure et prévision de l'envasement des barrages collinaires :** Comme prévu dans le programme Hydromed, **une campagne de levée bathymétrique** de la retenue collinaire Saboun a été réalisée avec l'appui technique de l'équipe IRD-Tunis (Nov. 1999). Les données de l'envasement mesuré ont été utilisées pour la validation des modèles de prévision des taux de délivrance des sédiments ( Mémoire de fin d'études de El Hamoudi Azzédine). Elles sont aussi utilisées actuellement pour la validation des différents modèles d'érosion des sols testés pour les petits bassins versants au Maroc. Il s'agit d'un premier travail dans le genre au Maroc, où le dimensionnement de ces petits ouvrages de retenue collinaire était principalement basé sur des résultats de mesure de grands barrages.

**L'utilisation des paramètres du fonctionnement hydrologique du barrage Saboun** dans la gestion de l'eau de retenue pour l'irrigation du périmètre (643 ha) en val. Cette année a été marquée par la mise en service de la station de pompage et du réseau de distribution de l'eau de la retenue Saboun. Une association des usagers agricoles de l'eau (AUAE) a été redynamisée pour une gestion participative et conservatoire de l'eau de la retenue. Le projet s'est engagé dans le développement de modèle de gestion intégrant les paramètres de l'offre ( Station Hydromed) et de la demande qui permettra à l'AUAE de valoriser les données de la station à temps réel. Ce thème qui ne pouvait être abordé antérieurement ( acquisition et traitement des données, mise en service de la station de pompage) est devenu aujourd'hui prioritaire vu ses aspects importants de point de vue scientifique et surtout socio-économique.

Ces principaux thèmes de recherche ont nécessité en plus du suivi continu de la Station Hydrométrique au niveau du barrage, plusieurs campagnes de prospection de terrain menées à plusieurs reprises avec l'équipe espagnole ainsi que importants travaux de laboratoire. Le projet a permis de moderniser l'équipement de mesure sur le terrain pour plus de précision et de rapidité (TDR/Humidimètre) et l'équipement informatique du Laboratoire.

### **III. Echanges avec Partenaires**

Le projet a connu cette année un renforcement des échanges avec nos partenaires espagnoles. Un programme de visites respectives à été réalisé avec un appui financier de la coopération maroco-espagnole. Ce programme a démontré l'intérêt des échanges effectués en terme de collecte de données, de leur analyse et de préparation de publications conjointes. Il a renforcé ces liens et a assuré l'après Hydromed par la mise en place de nouveaux programmes de coopération. Il a été de même avec nos partenaires français de l'IRD de Tunis. Plusieurs visites techniques et scientifiques ont eu lieu et ont été fructueuses en terme de collecte de données (bathymétrie, etc.) et d'échange d'expérience. La continuité de cette collaboration est assurée aujourd'hui grâce au développement du programme de recherche AMBRE en tant qu'Unité de Recherche de 'IRD-Fr dirigée par Dr Albergell ; qui intègre notre équipe dans une optique de capitalisation des acquis d'Hydromed. Il n'a pas été ainsi avec les autres équipes (

**Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**  
**Département des Sciences du Sol**  
**Laboratoire de Physique et de Conservation des Sols**

---

anglaise et suédoise) avec lesquelles on aurait souhaité développer plus d'échange dans des actions de recherche partagée.

Toute fois, ce projet nous a permis cette année de développer d'avantage des échanges et partenariats avec des départements ministériels ( Agriculture DPA-Tanger, Equipement, DGH, Eaux et Forêts-Tétouan) et des établissements d'enseignement et de recherche (ENFI-Salé, FST-Tanger, FST-Errachidia, INRA, etc.).

#### **IV. Formation**

Le projet Hydromed a continué cette année à offrir un cadre de formation scientifique et technique dans les domaines : de l'hydrologie appliquée, de l'aménagement des terres et de l'utilisation de nouvelles technologies ( SIG, Télédétection, etc.). Des thèses et mémoires ont été conduits en relation directe avec la thématique d'Hydromed ou avec les moyens de recherche qu'offre le Laboratoire. Il est à signaler que les étudiants formés directement dans le cadre du projet n'ont pas eu de difficultés à s'intégrer dans le domaine du travail, et ce malgré les conditions très contraignantes de recrutement des cadres (recherche INRA, CRTS, INRH). Ceci témoigne de la qualité de l'expertise acquise via ce projet.

##### **4.1. Thèse/Mémoires de 3<sup>ème</sup> Cycle :**

| <b>Étudiant(e)</b>  | <b>Encadrant(s)</b>        | <b>Thème</b>  |
|---|----------------------------|---|
| Azzedine Hamopudi<br>IAV Sols, soutenue<br>09/1999                    | Pr Merzouk                 | Evaluation des paramètres du taux de délivrance des sédiments : Tangérois                                       |
| Dieye Abdou Karim<br>Soutenue en Sept 2000                            | Pr Merzouk                 | Elaboration des cartes d'aptitude et localisation des besoins en CES dans le bassin versant Saboun (Tangérois). |
| Diallo Amadou<br>Mémoire d'Ingénieur<br>de l'ENFI                     | Pr Sabir<br>Pr Merzouk     | Modélisation et cartographie de l'érosion hydrique dans le bassin versant des Beni Bou Frah                     |
| Marc Salmon<br>Univ de Liège, Bourse<br>CIME<br>Soutenue en Sept 1999 | Pr. Merzouk<br>Pr Ozer, UL | Etude diachronique de l'évolution du littoral dans un milieu fortement urbanisé ( Baie de Mohammedia)           |

##### **4.2. Doctorats**

**Abdelaoui Benyounes**, FS- Rabat. Fonctionnement Hydrologique et production en sédiments d'un petit bassin versant marneux. Encadrants : Pr Merzouk et Pr Aberkane (FSR). Bourse d'Hydromed. ( soutenance prévue en début de 2002).

**Mohammed Chikhaoui**, Université de Sherbrooke (Qué). Télédétection d'un bassin marneux méditerranéen pour la modélisation des paramètres hydrologiques de surface. Encadrants : Pr F. Bonn et Pr Merzouk ( soutenance prévue en fin 2002).

**Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**  
**Département des Sciences du Sol**  
**Laboratoire de Physique et de Conservation des Sols**

---

**Abdelakader El Garouani**, FST Fès : Spatialisation des modèles d'estimation de l'ETR utilisant les données de télédétection et le SIG. Encadrants: A. Merzouk, Boussema, Enit-Tunis et Jabrane, FST-Fès-Saiss (Soutenue en Février 2000).

**Boukil Ahmed** : Cartographie et analyse de l'évolution du couvert végétal dans le bassin de Oued Laou. Encadrant : A. Merzouk. (soutenance, prévue début 2002)

**Aboudi Ahmed, Faculté des Sciences de Rabat** : Télédétection et Cartographie de la Végétation en zone Aride : Application à la terminaison occidentale de l'Anti-Atlas marocain. Pr Merzouk, Rapporteur & membre de jury. (Soutenue en Septembre 2000).

## V. Publication/Diffusion des résultats

Le projet Hydromed – Maroc avec son dispositif de mesures et de suivi commence à produire suffisamment de données et de résultats qui sont intégrés dans l'étude et la compréhension du fonctionnement du barrage Saboun et de l'agrosystème en aval de ce dernier. Ces données vont faciliter davantage la formulation des recommandations à prendre en terme de gestion conservatoire de ce bassin versant et du périmètre irrigué à son aval. C'est ainsi que le projet a commencé cette année à toucher aux aspects de mise en valeur des terres en collaboration avec la DPA et les usagers de l'eau. Le projet commence à diffuser ses résultats scientifiques et pratiques à travers la publication scientifiques, les mémoires de fin d'études et thèses, les séminaires locaux (CT Guezennai, Tanger) et rencontres internationales. Des affiches (Posters) ont été édités et distribués pour faire connaître HYDROMED. Les principales publications faites à ce jour sont les suivantes :

2000: Merzouk., A et M. Mejjati Alami : Soil surface characteristics and erodibility : Moroccan case study. Paper prepared for the COST 623 "Soil Erosion and Global Change" Workshop, the significance of soil surface characteristics in soil erosion. Strasbourg, France 20-21/09/01.

2000: Merzouk., A et M. Mejjati Alami : Effects of rangeland changes on water balances and water quality in Morocco. The Rif mountain case study. Paper prepared for the RICAMARE Task 1 workshop. Land use changes and cover and water resources in the Mediterranean region, to be held in Medenine (Tunisia) 20-21 April 20001.

2000: Merzouk A., M. Mejjati Alami, B. Abdellaoui, J. Albergel et Y. Pepin. L'envasement des barrages collinaires au Maroc : Contribution des modèles de production des sédiments. Note technique IAV Hassan II.

2000 : M. Mejjati Alami, A. Merzouk et O. Berkat. Cartographie et diagnostic du niveau de production des écosystèmes pastoraux du Rif occidental (Bassin versant Telata) à l'aide de l'imagerie spectrale. Pp 177-182. In : La télédétection Optique et Radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux. A. Bennari, Editeur, Canadian cataloguing in Publication Data, ISBN 0-968690-0-X

2000 : Moreno F., A. Merzouk, de la Rosa et M. Mejjati Alami, 2000. Measurement and development of a database of soil hydraulic properties for the watershed of Saboun (Morocco). Actes du Séminaire International : Hydrologie des régions méditerranéennes. 11-13 octobre 2000. Agropolis International, Montpellier, France.

2000 : Roose E., M. Sabir et A. Merzouk, 2000. Traditional strategies and Methods for soil erosion control in the occidental Rif mountain (Morocco). Proceedings of the Third International Congress Man and Soils at the Third Millennium, Valencia (Spain) , 28 march-1<sup>st</sup> April 2000.

**Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**  
**Département des Sciences du Sol**  
**Laboratoire de Physique et de Conservation des Sols**

---

- 2000 : Mejjati Alami M., A. Merzouk et O. Berkat. 2000. Gestion conservatoire de l'eau de la retenue collinaire Saboun (Tangérois) : bilan hydrologique et stratégie communautaire. Actes du Séminaire International : Hydrologie des régions méditerranéennes. 11-13 octobre 2000. Agropolis International, Montpellier, France.
- 2000 : El Garouani A., Jabrane R et A. Merzouk, 2000. Essai méthodologique exploitant les images spatiales dans un SIG pour la protection des ressources en eau de surface au Maroc. Actes des VIII<sup>èmes</sup> Journées Scientifiques de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Lausanne, Suisse, 22-26 novembre, 1999. Edités par J. M. Dubois et al.
- 2000 : El Garouani A. et A. Merzouk, 2000. Utilisation des images de télédétection pour l'étude Hydrologique de la région d'Asilah (NW du Maroc). Actes de la première Journée Universitaire des Sciences et techniques de l'espace, 20 octobre 2000, Emi, Rabat, RUSTE.
- 2000 : Merzouk A. et O. Aloui, . Référentiel Technique de Conservation des Eaux et des Sols pour une Approche Participative dans le Haut Atlas. Ministère Délégué auprès du Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes, chargé des Eaux et Forêts. 83 pages avec affiches en couleurs. (Édition CD-ROM en cours).
- 2000 : Mohamed Benmoussa, C. My Cherif, Abdelaziz Merzouk et Mariem Sidqui ; Contribution à l'élaboration d'un SIG intégrant la télédétection pour la gestion et le suivi de la pollution des eaux : cas du barrage Sahla (Rif, Maroc). In : La télédétection Optique et Radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux. A. Bennari, Editeur, Canadian cataloguing in Publication Data, ISBN 0-968690-0-X
- 2000 : Abdellaoui., B., A. Merzouk, et M'hamed Aberkan, 2000. Variabilité spatiale et genèse du ruissellement dans un petit bassin versant marneux du Rif occidental ( Saboun, Maroc)., soumis à la revue Sécheresse.
- 2000: Cherkaoui., M., A. Merzouk, et T. Améziane. Etablissement d'un SIG intégrant la télédétection pour la gestion conservatoire des eaux et des terres dans la province de Tanger (Maroc). . In : La télédétection Optique et Radar et la géomatique pour la gestion des problèmes environnementaux. A. Bennari, Editeur, Canadian cataloguing in Publication Data, ISBN 0-968690-0-X
- 1999 : Mejjati Alami., M. et A. Merzouk : Réponses spectrales des espèces-clés des formations végétales du bassin Rifain (Maroc) et leur utilisation pour la télédétection des faciès pastoraux. VIII<sup>èmes</sup> Journées Scientifiques de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Lausanne, Suisse, 22-26 novembre, 1999.
- 1999 : Merzouk A., . Land use transformation impact on reservoir siltation in Morocco: the need for better assessment tools. In Proceedings of the International Seminar on Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semi-arid areas. Edited by Ronny Berndtsson, LIT Lund University, Lund, Sweden. TVVR-322. 321 pages.
- 1999 : El Garouani A., Jabrane R., M.R. Boussema et A. Merzouk, 1999. Contribution de l'imagerie satellitaire à la détection des zones saturées et au zonage de l'évapotranspiration dans la basse vallée de la Medjerda (Tunisie). Sécheresse n° 2, vol. 10, juin 1999.
- 1999 : Merzouk., A, M. Mejjati Alami, B. Abdellaoui et O. Berkat, 1999. Rupture des écosystèmes pastoraux du Rif centro-occidental : conséquences hydrologiques et besoins en suivi. Dans Session N°4 sur couverture et utilisation des sols et caractéristiques des écosystèmes. L'observation spatiale: un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Actes du Colloque international, Tunis, 23-27 novembre 1998. Centre National d'Études Spatiales (CNES), Toulouse, France, 6pages.

**Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II**  
**Département des Sciences du Sol**  
**Laboratoire de Physique et de Conservation des Sols**

---

1999 : M. Mejjati Alami et A. Merzouk. Réponses spectrales des espèces clé des formations végétales du bassin rifain (Maroc) et leur utilisation dans la télédétection des faciès pastoraux. (accepté) aux VIII<sup>es</sup> Journées scientifiques du Réseau de Télédétection : La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives, Lausanne, Suisse.

# Rapport d'avancement des travaux d' ACSAD- HYDROMED en Syrie et Liban

## 1 . Introduction

Le projet de coopération EU-INCO, HYDROMED programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi arides du pourtour Méditerranéen a été lancé fin 1996 . Quatre partenaires européens : Angleterre, France , Espagne et Suede et quatre partenaires du sud : Liban , Maroc , Tunisie , Syrie sont impliqués dans ce programme . L'IRD à Tunis joue le rôle de coordinateur général du projet .

L'objectif principal du projet est d'étudier la durabilité et l'efficacité des lacs collinaires face aux nombreuses conditions qui vont du choix du site à la participation des acteurs locaux aux projets .

L'ACSAD a comme mission de coordonner et superviser les actions du projet en Syrie et au Liban , en vue :

- d'approfondir la connaissance sur le calcul du bilan hydrologique des petits bassins versants ,
- d'assurer une meilleure gestion des ressources en eau des petits bassins versants ,
- d'introduire pour la première fois dans ces pays la notion d'étude socio économique dans la gestion et l'utilisation des ressources en eau .

Pour se faire l'ACSAD a poursuivi les activités suivantes .

## 2- Les activités

### *2-1 Analyse des données hydrologiques et climatiques :*

Les activités de cette année s'est concentré sur l'analyse des données collectées à partir de l'équipement automatique installé sur le lac Syndianeh et des échelles lamnimétriques sur le lac Tell Kallakh . Ces données concernent la pluviométrie, l'évaporation , l'apport au lac par l'eau de ruissellement .

Pour le traitement de ces données les logiciels fournis par l'IRD ont été utilisés. Ces logiciels aident aux traitements des données pluviométriques et analyse des orages .

Les résultats concernent deux années d'observation sur le site . Car malheureusement , faute d'une erreur de manipulation l'enregistreur PLUVIO-LIMNI 92 sur le site Syndiane est resté arrêté pendant la saison de pluie 1999-2000.

Heureusement l'enregistrement Limni a été en même temps effectué manuellement sur le site Syndianeh , mais évidemment avec moins de précision. L'analyse des données donc sur deux ans a recensé 71 crues dont nous connaissons le volume écolé (ve ) et la pluie correspondante (P) et par conséquent le coefficient ke . Pour 55 de ces drues on a pu calculer les paramètres nécessaires au calcul du bilan hydrologique .

Les cumuls de pluie et les intensités pluviométriques enregistrées ont été estimés . Il y a eu 88 averses pendant la période 2 décembre 1997 au 14 février 1999 .L'intensité maximale observée en 5 minutes a été de 366 mm/ h et celle en 30 minutes de 61 mm/h . Ceci correspond aux intensités observées en Méditerranée .Les crues sur le le site ont aussi été restituées .

### **2-2 Mesure d'envasement des lacs**

Un troisième essai des mesures d'envasement par topographie et bathymétrie a été réalisé sur le lac Syndianeh fin novembre 2000 .Deux autres essais au préalable ont été réalisés fin 1997 et fin 1998 .

Le volume de sédiments déposé pendant la période 18 novembre 1998 et 29 novembre 2000 a été estimé à 9963 m<sup>3</sup>. En se référant aux résultats des essais précédents nous estimons que l'apport en sédiment est de l'ordre de 4600m<sup>3</sup> par an. Le volume des sédiments déposés dans le lac depuis 3/12/ 1997 a été estimé de l'ordre de 22441m<sup>3</sup> .

Malheureusement nous n'avons pas pu réaliser ces mesures sur lac Tell Kallakh , faute de repères topographiques .

### **3- Action de formation**

Une mission d'expertise de IRD menée par MM. Yannick Pepin et ben Younes a été effectuée à Damas du 23 au 30 mai 2000 . L'objectif de cette mission a été de résoudre le problème de défaillance de l'enregistreur automatique installé sur le site Syndianeh et de remettre à jour les banques des données hydrologiques .Cette mission a aussi permis aux ingénieurs de l'ACSAd et du ministère de l'Irrigation Syrien de mieux se familiariser avec l'appareil et en même temps approfondir leurs connaissances sur les logiciels de calcul fournis dans le cadre de ce projet par l'IRD à l'ACSAD .

Deux ingénieurs du ministère de l'irrigation Syrien travaillant dans le projet ont exprimé leurs souhaits de préparer des thèses en exploitant les données collectées dans le cadre du projet . Malheureusement faute des bourses ils n'ont pas pu les réaliser pour le moment .

Une mission d'expertise et d'expérimentation sur la méthode TDR ( Time Domain Reflectory ) en Syrie a été demandée par l'ACSAD à la coordination d'HYDROMED dans le but d'introduire, pour la première fois, cette nouvelle

technique en Syrie . Cette demonstration sera réalisée en coopération avec l'université de Lund et IRNAS dont la date a été arrêtée au mois de fevrier 2001.

#### **4- Activites de coopération**

Grace aux contacts scientifiques établis entre l'ACSAD et l' Université de Lund une convention a été préparée pour le montage d'un programme de cooperation qui sera financé par le SIDA ( Agence Suedoise de cooperation ) .

Ce programme sera réalisé en Syrie( ACSAD, Ministère de l'irrigation ) et au Liban ( Université Saint Joseph) . Il traitera la gestion des ressources en eau dans certain bassins versants du mont Liban et Anti- Liban.

#### **5- Réunions scientifiques**

Un representant de l'ACSAD a assisté aux travaux du Séminaire International sur l'Hydrologie des Régions Méditerranéennes organisé par "IRD sous la responsabilité de Dr. Albergel coordinateur HYDROMED , qui s'est tenu à Montpellier – France du 11 au 13 octobre 2000.

Le representant de l'ACSAD a présenté un papier sur la gestion durable des oueds dans les zones arides et semi arides des pays Arabes.

Un resumé sur l'état d'art des petits barrages et lac collinaires au Liban et en Syrie a aussi été proposé .

**Progress Report of the Joint Experiments between the IRNAS  
(Sevilla, Spain) and the IAV (Rabat, Morocco)**

(January – November 2000)



Measurement with the tension disk infiltrometer

## Report of the group of IRNAS (CSIC)

During the month of May 2000 the group of IRNAS (CSIC) from Seville was participating together with the group of the IAV from Rabat in a joint experiment in the experimental site at Saboun (Morocco). The experiment consisted in the characterization of the hydraulic properties of the soils surrounding the hill reservoir Saboun. In this experiment we selected several representative sites in the transects of the previous experiments in 1999. In these sites we measured the infiltration before and after rainfall simulation to obtain information about the changes of the soil hydraulic properties. The persons involved in this experiment were: Dr. A. Merzouk, Dr. M.M. Alami and Mr. A. Benyounes from the IAV (Rabat), and Dr. F. Moreno, Dr. J.E. Fernández and Mr. I.F. Girón from the IRNAS (Seville). During this reporting period we were working in the development of database of soil hydraulic properties.

Both groups were working with the tension disk infiltrometer. The measurements were carried out in selected sites of the transects established during the experiments of 1999 in the area according with the type of soil, slope and use and management of the soil. The situation of the sites in which the measurements were carried out are shown in Fig. 1. The hydraulic conductivity and sorptivity in the range near saturation were determined. From these measurements was also determined the characteristic mean pore radius and the gravity time.

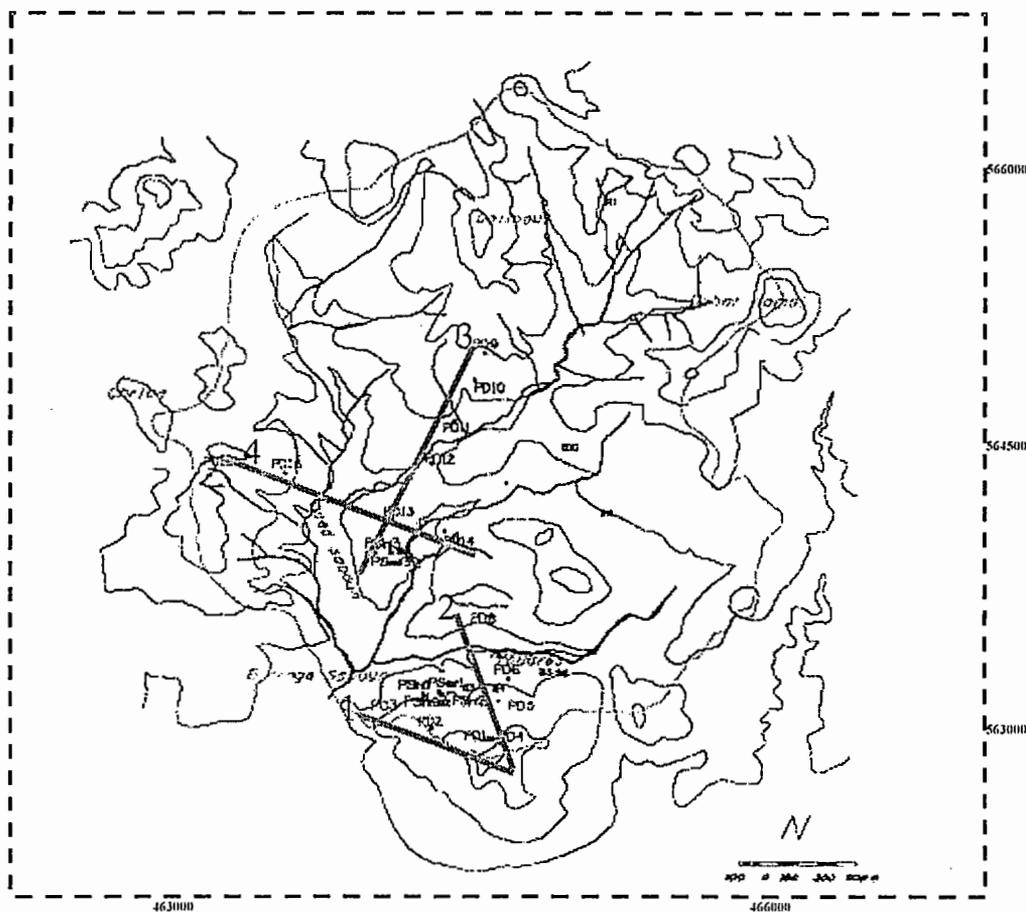


Fig. 1. Situation of the measurement sites. The green lines indicate the four transects.

## Results

Fig. 2 shows the change of hydraulic conductivity with the pressure potential applied for the sites P5 and P13 in two situations, before rainfall simulation and 24 hours after rainfall simulation. In both sites there are not significant differences between the values before and after rainfall simulation. However, the hydraulic conductivity was in general a little higher after the rainfall.

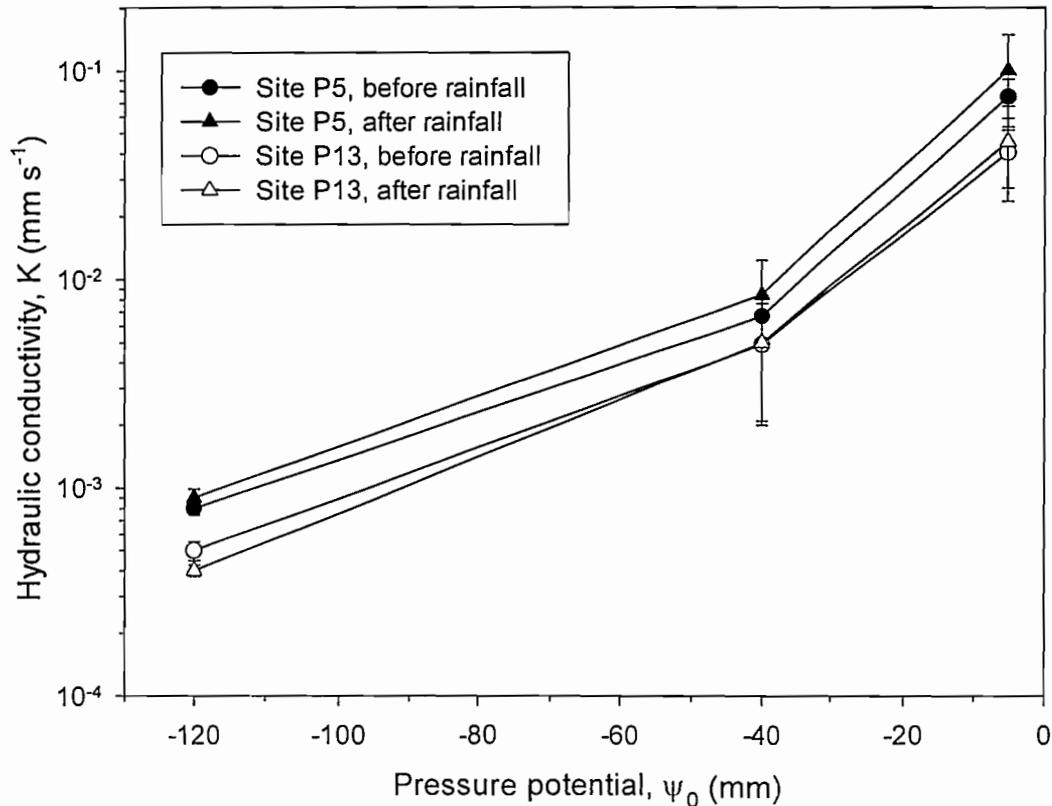


Fig. 2. Change of the hydraulic conductivity (K) with the pressure potential (h) applied in the sites P5 and P13 (in transect 1 and in transect 3 respectively, see Fig. 1).

The results obtained in the other sites showed a similar behaviour to that in sites P5 and P13. This results clearly show that one rainfall event it is not enough to alter the hydraulic properties of the soil surface.

### Database of soil hydraulic properties

During the period of July-December 1999 we have developed a database of soil hydraulic properties. This database includes the data obtained during the joint experiments carried out by the IRNAS of Sevilla and the IAV of Morocco during 1999. The results obtained in May 2000 have been also included. So the database contains data of hydraulic properties for a soil type and management within the watershed at spatial and temporal level.

### *General remarks*

The protection of land resources is of prime importance in many regions of the world. The effects of agricultural and climate changes on the degradation of land resources are characterized not only by long-term perspectives, but also by large geographic areas impacted. The protection of these resources, mainly soil and water, depends on the correct prediction of such effects.

Presently, there is no reliable framework in the Mediterranean region for the protection of soil and water resources from erosion processes and contamination by agrochemical compounds. In spatial and temporal terms, the modelling of erosion processes and water and solute movement in the soil is relatively well advanced at local scale, but extrapolation to a regional scale is still a major priority. This extrapolation can be made i) by scaling-up techniques, developing a linkage between the controlling variables included in the erosion and or contamination process models and information contained in spatial databases; or ii) by land evaluation techniques, combining expert knowledge on these processes and spatial database information.

At the same time, the increase of process modelling of soil erosion, water and solute transport in the soil, and the use of expert systems has imposed a demand of accurate measurements of hydraulic properties of soils. For given climatic conditions and soil type, tillage methods and irrigation practices are the main factors that can alter the soil structure of top layers and consequently the hydraulic properties (Messing and Jarvis, 1993; Somaratne and Smettem, 1993; Moreno et al., 1997). For cultivated soils, the transport properties of the soil surface can change during the growing season (Angulo-Jaramillo, et al., 1997). However, in modelling the processes mentioned above, it is usually assumed that the characteristics of the soil remain temporally without changes.

Although increasing consideration is being given to agricultural diversification and to lower input agriculture, it is still important to identify optimum land use systems for resource sustainability and environmental quality. Land evaluation makes it possible to use according to its potential. During the last few years, increasing application of information technology to land evaluation procedures has led to the development of land evaluation information systems. The MicroLEIS system developed by De la Rosa et al. (1992) is a good example of such systems. MicroLEIS represents an interactive and user-friendly system for optimal allocation of land use and management systems under Mediterranean agroforestry conditions.

Land evaluation procedures, as defined by FAO (1976, 1983), have been applied to provide a rational basis for making land use decisions based on relations between land use and land qualities (Davidson et al., 1994). However, these production-oriented applications can also be focused on land degradation or vulnerability predictions (De la Rosa et al., 1995). In this sense, it is interesting to test the applicability of the land evaluation techniques for predicting land vulnerability risk. The fundamental purpose of land evaluation is to predict the positive or negative consequences of change. Hydrological changes in Mediterranean regions, produced by extensification / intensification character of agricultural systems and by periods of drought, will have important effects on the behaviour of land degradation processes. Simulation models and land evaluation expert systems can be useful prediction techniques if we can improve the databases, particularly those referring to soil hydraulic properties, and the integration of different soil databases.

### *The basic framework of the database*

The database is written in C language and use tables of dbaseIV. The database includes the following sheets:

**Principal menu** (content, search, soil layer generator, graphic presentation, ...)

**Site description:**

*page 1* (location, co-ordinates, topography, land use,...)

*page 2* (parent material, erosion, drainage, water table depth,...)

*page 3* (photographs)

**Horizons** (description of the horizons)

**Standard analytical data** (depth of the horizon, chemical properties, texture, ....)

**Soluble salts data**

**General physical data** (bulk density, particle density, total porosity, ....)

**Water retention** (soil water content at different suctions)

**Unsaturated hydraulic conductivity** (hydraulic conductivity at several water contents)

In all sheets are referenced the methods used in the determination of the different parameters.

### **Other activities**

In October of this year Dr. F. Moreno was participating in the International Seminar "Hydrology of the Mediterranean Regions" in Montpellier (France). Two communications were presented:

MORENO, F., MERZOUK, A., DE LA ROSA, D., ALAMI, M.M., BENYOUNES, A., GIRON, I.F., (2000). Measurement and development of a database of soil hydraulic properties for the watershed of Saboun (Morocco). **Proceedings of the International Seminar Hydrology of the Mediterranean Regions** (en prensa). Montpellier, France, 11-13 October, 2000.

BENYOUNES, A., MERZOUK, A., ALBERGEL, J., MORENO, F., ABERKAN, M., (2000). Analyse des processus de ruissellement et l'érosion en zone semi-aride marseuse: Cas du bassin versant Saboun (Maroc). **Proceedings of the International Seminar Hydrology of the Mediterranean Regions** (en prensa). Montpellier, France, 11-13 October, 2000.

### **References**

- Angulo-Jaramillo, R., Moreno, F., Clothier, B.E., Thony, J.L., Vachaud, G., Fernández-Boy, E. and Cayuela, J.A., 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 27-32.
- Davidson, D.A., Theocharopoulos, S.P. and Bloksma, R.J., 1994. A land evaluation project in Greece using GIS and based on Boolean and fuzzy set methodologies. *Int. J. Geographical Info. Sys.*, 8: 369-384.
- De la Rosa, D., Mayol, F., Moreno, J.A. and Rosales, A., 1995. MicroLEIS 4.1. Software + Documentation. IRNAS Tech. Rep., Inst. de Recursos Naturales y Agrobiología, CSIC, Sevilla.

- De la Rosa, D., Moreno, J.A., García, L.V. and Almorza, J., 1992. MicroLEIS: A microcomputer-based Mediterranean land evaluation information system. *Soil Use Manage.*, 8: 89-96.
- FAO, 1976. A framework for land evaluation. *Soils Bulletin* 26, FAO, Rome.
- FAO, 1983. Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture. *Soils Bulletin* 52, FAO, Rome.
- Messing, I. and Jarvis, N., 1993. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *J. Soil Sci.*, 44: 11-24.
- Moreno, F., Pelegrín, F., Fernández, J.E. and Murillo, J.M., 1997. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain. *Soil Tillage Res.*, 41: 25-42.
- Somaratne, N.M. and Smettem, K.R.J., 1993. Effect of cultivation and raindrop impact on the surface hydraulic properties of an Alfisol under wheat. *Soil Tillage Res.*, 26: 115-125.



Department of Water Resources Engineering  
Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden

## HYDROMED

State of the art  
November, 2000

Ronny Berndtsson

Lund November, 2000

---

Postal address:  
P. O. Box 118  
S-221 00 Lund  
Sweden

Office:  
John Ericssons vaeg 1  
Lund  
Sweden

Phone:  
+46 - 46 - 222 8986 (office)  
+46 - 46 - 184253 (home)

Fax:  
+46 - 46 - 222 4435

Email:  
Ronny.Berndtsson@tvrl.lth.se

Home page: <http://aqua.tvrl.lth.se>

## Contents

- 1) Activities during January-December, 2000
- 2) Plans for January-June, 2001

## Appendix

Paper presented at conference in Montpellier  
Abstract to be submitted to EGS, Nice

### **1. Activities during January-November, 2000**

A field experiment planned and executed together with IRD and INRGREF was performed in Tunisia during 19-26 February. The objective of this experiment was to investigate surface soil moisture and salinity conditions for an area where extensive contour ridging has been performed. The chosen area for this was the El Gouazine catchment in central Tunisia. Techniques involved for measurements were different TDR-probes, Sigma probe and manual soil sampling. Appendix 2 shows some preliminary results from this experiment.

The work besides new experiments has meant further analyses of previously collected data. Appendix 1 shows a paper based on these analyses. The paper was presented and discussed during a conference in Montpellier in conjunction with a Hydromed meeting 10-14 October. This presentation now represents two papers; one has been submitted and accepted by Journal of Hydrology and the other paper will be submitted to Water Resources Research.

During the latest year also educational work continues. Mr. Slah Nasri is expected to present his doctoral thesis during 2001. Ms. Pernilla Öhrström will present her licentiate thesis during August, 2001. Mr. Ibraheem Yasser also continues his doctoral work and may be expected to present his doctoral thesis with the coming years. A new doctoral student Mr. Yasser Hamed has been assigned to work with data collected within Hydromed. He will compare water management alternatives for different Mediterranean countries to combat salinization.

To summarize the work has been extending with even a small amount of originally allocated funds. Even after the closure of the Hydromed project there will be positive spinoffs such as new cooperation studies as well as continuing doctoral projects, e.g., due to the large amount of valuable data collected. The positive after-effects of Hydromed is therefore expected to be extensive.

## **2. Plans for January-June, 2001**

A final joint experimental study is planned in Syria in February 2001. Also during February to March Mr. Slah Nasri is scheduled to stay a period at Lund University to finalize his doctoral presentation.

The final Hydromed meeting is scheduled to 28-30 May, 2001. Pernilla Öhrström and Yasser Hamed will take the opportunity to extend their field experimental experience in connection to this final meeting. Preliminarily some extended experiments are planned either in the m'Richet el Anze or the El Gouazine experimental catchments in central Tunisia.

Final work during spring 2001 also involves the preparation of the final document for results of the Hydromed project.

# Fractal theory to simulate unsaturated transport properties

Magnus Persson\*<sup>1</sup>, Jonas Olsson<sup>2</sup>, Jean Albergel<sup>3</sup>, Patrick Zante<sup>3</sup>, Slah Nasri<sup>4</sup>, Hiroshi Yasuda<sup>5</sup>, Ronny Berndtsson<sup>1</sup>, and Pernilla Öhrström<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lund University, Lund, Sweden

<sup>2</sup>Institute of Environmental Systems, Kyushu University, Fukuoka, Japan

<sup>3</sup>Institut de Recherche pour le Développement, Tunis, Tunisia

<sup>4</sup>Institut National de Recherche du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Tunis, Tunisia

<sup>5</sup>Tsukuba University, Japan,

## ABSTRACT

We investigate fractal characteristics of solute transport as viewed from dye experiments. Experiments performed within the EU-sponsored research HYDROMED (a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) are used to test two different fractal model concepts; the diffusion limited aggregation and the random cascade model. Solute transport properties as indicated from dye coverage experiments displayed fractal properties as viewed by power spectrum analyses and probability distribution characteristics. The diffusion limited aggregation model was calibrated and verified for two plots. The verified model agreed very well to observed data. The random cascade model was calibrated for one experimental plot. Some over-estimation appeared to be the case. However, the general spatial pattern appeared to agree well with observed data. It remains to perform a rigid statistical test for the performance of the random cascade model.

## INTRODUCTION

Field properties of preferential pathways for water and solutes are still not well understood (e.g., Booltink and Bouma, 1991; Bouma, 1991). Due to this and an increasing awareness of its importance for groundwater and general environmental quality, preferential flow at unsaturated field conditions has become an increasingly important research issue (e.g., Beven and Germann, 1982; Hillel, 1991). A reason for observed discrepancy between field scale transport and results from homogeneous media assumption may be that our tools of observation at field scale are not yet detailed enough to yield information at the relevant scales. Often it is the complicated three-dimensional flow structures at micro-scale that determines the actually observed field scale variation.

A technique to investigate actual field scale transport patterns at micro-scale may be to use dye tracers (e.g., Flury et al., 1994). Images of dyed soil transects provide an excellent resolution at the spatial scale. However, they usually give no information at the temporal scale. Dye data, however, may lead to the development of new model concepts that more accurately can depict complicated spatial patterns of solute transport (e.g., Schwartz et al., 1999).

A possible way to consider scaling in soil transport properties as well as modeling the observed dye formations may be to use fractal theory. Fractal patterns or soil properties are often observed at the field scale for related subsurface transport (e.g., Feder, 1988; Kemblowski and Wen, 1993; Baveye et al., 1998). Similarly, fractal transport models have been developed by several researchers (e.g., Wheatcraft and Tyler, 1988; Flury and Flühler, 1995; Mukhopadhyay and Cushman, 1998; Pachepsky and Timlin, 1998).

In the present paper we investigate fractal properties of observed dyed soil transect images at field conditions. Experimental data from an ongoing European Union cooperation (HYDROMED, a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) were used within this study (see e.g., Öhrström et al., 2000). We use the data to indicate fractal properties and also to test two different fractal models to generate observed properties; diffusion-limited aggregation and random cascade process. We close with a discussion on further development.

## MATERIALS AND METHODS

### Theory

#### Diffusion-limited aggregation (DLA)

Witten and Sander (1981) introduced this model concept already two decades ago. An advantage is that the DLA model can generate fractal transport patterns (e.g., Flury and Flühler, 1995; Meakin, 1991). In general, the DLA model generates spatial clusters of the solute by randomly walking particles. Particles are randomly generated from a line source at some distance below the soil surface. By random walk the particles may finally reach up to the line seed (soil surface). When the particles reach the seed they become part of the seed and remain attached at that position (Flury and Flühler, 1995). New particles that reach the seed permanently attach and form a gradually increasing cluster. The process can be halted once some pre-defined maximum depth is reached by the growing cluster  $z_{max}$ . The randomly walking particle can consequently move in four directions depending on probabilities,  $P_u$ ,  $P_d$ ,  $P_r$ , and  $P_l$ , corresponding to upward, downward, right and left walk in the two-dimensional grid, respectively.

$$P_u + P_d + P_r + P_l = 1.0 \quad (1)$$

An isotropic random walk model has the following probability distribution:

$$P_u = P_d = P_r = P_l = 0.25 \quad (2)$$

By changing these probabilities, anisotropic conditions may be simulated. Also, layered soils may be simulated by including different walking probabilities for different soil depths (see further e.g., Flury and Flühler, 1995). The DLA model should be seen as a conceptual model within the microscale. Therefore, output from the DLA model has to be averaged over a suitable space in order to be comparable to the scale of observations (see further Persson et al., 2000).

#### Random cascade process

Dyed soil transects may also be modeled within a multifractal framework. In terms of statistical moments, scaling implies that for the random field  $R(x)$  the average  $q$ th order moment of the coarse-grained field  $R_\lambda$  relates to the coarse-graining scale  $\lambda$  as

$$\langle R_\lambda^q \rangle \propto \lambda^{-K(q)} \quad (3)$$

where angle brackets denote (ensemble) averaging. Coarse-graining means decreasing the resolution of the field by taking spatial averages over non-overlapping squares of side  $\lambda$  (see, e.g., Davis et al., 1994). If the function  $K(q)$ , which essentially represents an infinite hierarchy of fractal dimensions, is nonlinear (convex) the data can be described as multifractal (Frisch and Parisi, 1985). The multifractal behavior as expressed by (3) is related to the exponents obtained from probability density functions and spectral analyses. According to, e.g., Mandelbrot (1974), for  $q > q_{cr}$   $K(q)$  becomes linear due to the divergence of moments. It should, however, be mentioned that an asymptotically linear  $K(q)$ -function has also been deduced as a general property of scaling (or self-similar) fields (Menabde et al., 1997). Further, for (3) to be valid it is

required that  $\beta$  is less than the Euclidean dimension of the observed space, i.e.,  $\beta < 2$  for spatial fields (e.g., Menabde et al., 1997).

Assuming an underlying multiplicative cascade process with a Lévy-distributed generator Schertzer and Lovejoy (1987) parameterized  $K(q)$ . In a multiplicative cascade process, the investigated quantity is transferred to successively smaller scales by means of multiplicative weights, and the generator specifies the statistical distribution of these weights (see e.g., Davis et al., 1994). The approach of Schertzer and Lovejoy (1987) was termed a 'universal multifractal model' in which  $K(q)$  is expressed as

$$K(q) = \begin{cases} \frac{C_1(q^\alpha - q)}{\alpha - 1} & \alpha \neq 1 \\ C_1 q \log(q) & \alpha = 1 \end{cases} \quad (4)$$

where  $\alpha$  and  $C_1$  characterize the Lévy-distribution. The parameters may also be interpreted in fractal terms;  $\alpha$  specifies the degree of multifractality and  $C_1$  characterizes the fractal behavior of the mean process. A method known as 'double trace moments' may be employed for parameter estimation (e.g., Lavallée, 1991; Tessier et al., 1993). For a field  $R$  transformed into  $R^\eta$ ,  $K(q)$  becomes  $K(q, \eta)$  and these two functions are related as

$$K(q, \eta) = \eta^\alpha K(q) \quad (5)$$

which means that  $\alpha$  may be estimated by plotting  $K(q, \eta)$  as a function of  $\eta$  in a log-log diagram. With a known  $\alpha$ ,  $C_1$  may be estimated using (4) by  $K(q) = K(q, 1)$ . It is possible to check the validity of the estimated parameters by comparing (4), e.g., with the 95% confidence interval of the empirical  $K(q)$ -functions.

In the universal multifractal model, the deviation from conservation is specified by the parameter  $H$  given by

$$H = \frac{\beta - (1 - K(2))}{2} = \frac{\beta - 1}{2} + \frac{C_1(2^\alpha - 2)}{2(\alpha - 1)} \quad (6)$$

which is an estimation of the power law filtering exponent required to obtain conservation (e.g., Tessier et al., 1993).

#### Experimental data

Experimental data from an ongoing European Union cooperation (HYDROMED, a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) were used within this study (see Öhrström et al., 2000). Experiments were conducted in the M'Richet el Anze catchment located 110 km southwest of Tunis in Tunisia. At the time of experiments (October 1996) the soils lay fallow. The average amount of rainfall in the area is 455 mm per year and the yearly average temperature is 16.6 °C. The soil may be described as a Typic Xerochrepts according to the classification of Soil Survey Staff (1996).

1 m



Fig. 1: Example of a dye image from plot 1.

At six plots, within a small catchment, dye stained water was applied. The tracer used was food-grade dye pigment Vitasyn-Blau AE 85 (Swedish Hoechst Ltd.), similar to the more commonly used Brilliant Blue. This dye has been used in several field experiments due to its good visibility, low toxicity, and weak adsorption on soils (e.g. Flury et al., 1994; Aeby et al., 1997). A rainfall simulator (Bernard, 1987) was used to simulate a heavy rainstorm during about 1.5 hrs over 1.0 m<sup>2</sup>. Placing an iron frame of size 1 by 1 m at each site created the 1.0 m<sup>2</sup> plots. In order to avoid border effects, totally about 9 m<sup>2</sup> were covered by the rainfall simulator. Surface runoff was collected through a discharge weir in the iron frame. A total of about 45 mm were infiltrated at each plot. The surface plots did not contain any visible vegetation and the soil surface was homogenized down to depth of 2 cm. After the simulations, the plot was covered to avoid evaporation. About 24 hrs after the rainfall, a trench was dug and vertical sections of 2.5 cm thickness were excavated, resulting in 41 sections at each plot. Photos were taken of the vertical sections by a 35-mm camera with Kodachrome 64 film. The color photos were converted to black and white images by use of the Adobe Photoshop™ (version 4.0, Adobe Systems, Inc.) software (Fig. 1). The resolution of the converted black and white images corresponded to a pixel size of 0.14 cm. However, when the images were compared to the DLA model simulation, they were re-scaled to a pixel size of 4 by 4 cm. This leads to a lower resolution, however, the horizontal average of the dye structures did not change significantly with the pixel size.

## RESULTS

### DLA model simulations

Initial tests for fractal behavior of the data were performed by power spectrum analyses and probability distributions (see Olsson et al., 2000). The power spectrum typically displayed power-law behavior extending over the entire frequency range. The probability distribution analyses displayed a hyperbolic tail for the majority of the plots. Consequently, both analyses indicate a fractal behavior.

Figure 2 shows an example of the general procedure to use the DLA model concept and the comparison to dye images. It should be noted that the DLA is a stochastic model that gives a randomly varying output. Therefore, individual model outputs and observations can not be

compared directly. Instead, statistical properties of model output and observations have to be compared. This is seen in Fig. 3, which shows a comparison between average and standard deviation of dye coverage with depth for simulations using the calibrated DLA and observations at plots 1 and 2.

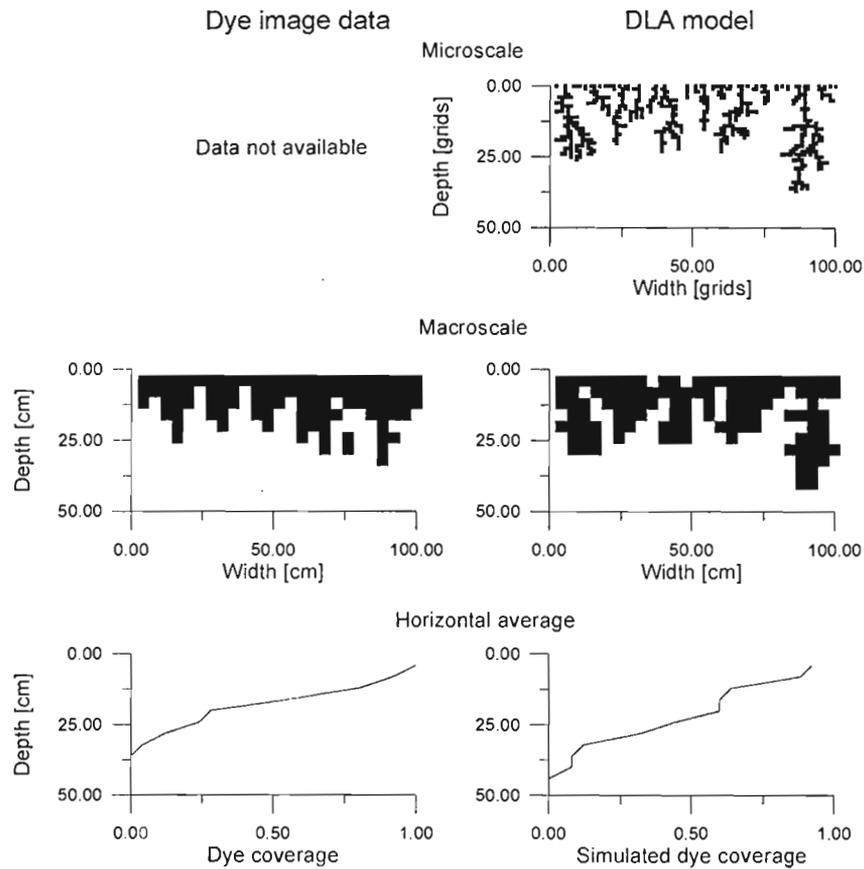


Fig. 2: Example of DLA model concept and a comparison between model results and observations. Note that the macroscale dye image data was calculated from the dye image shown in Fig. 1.

As seen from the figure model results and observations agree well between the average dye penetration and the average of 369 DLA model realizations. To test the DLA model against independent data the calibrated model was verified using data from plot 2. This is seen in Fig. 3 showing a comparison between simulated and observed dye coverage with depth. Here, it should be stressed that model parameters were kept constant and no information from plot 2 other than the distribution of maximum dye penetration was used when running the model. Even so, as seen from the figure, the match between model and observations is quite satisfactory with a  $r^2$  value of 0.997 between the average dye penetration and the average of 369 DLA model realizations. This confirms the applicability of the model concept and that the DLA can be used to simulate both average and variation in the soil at the field site with limited observations.

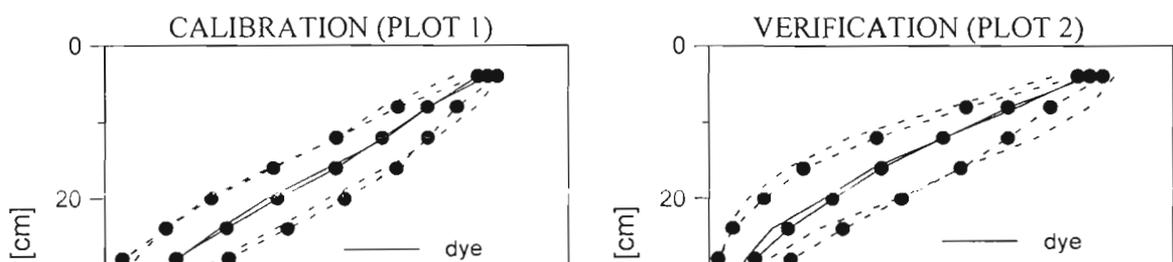


Fig. 3: Average and standard deviation of dye coverage for the calibrated (plot 1) and verified (plot 2) DLA model.

**Random cascade process**

A universal multifractal model according to (4) was tested by comparing estimated parameters with the 95% confidence interval of the empirical  $K(q)$ -functions (Fig. 4). As seen from the figure three out of four plots' universal function is contained within the 95% confidence limits thus confirming the model.

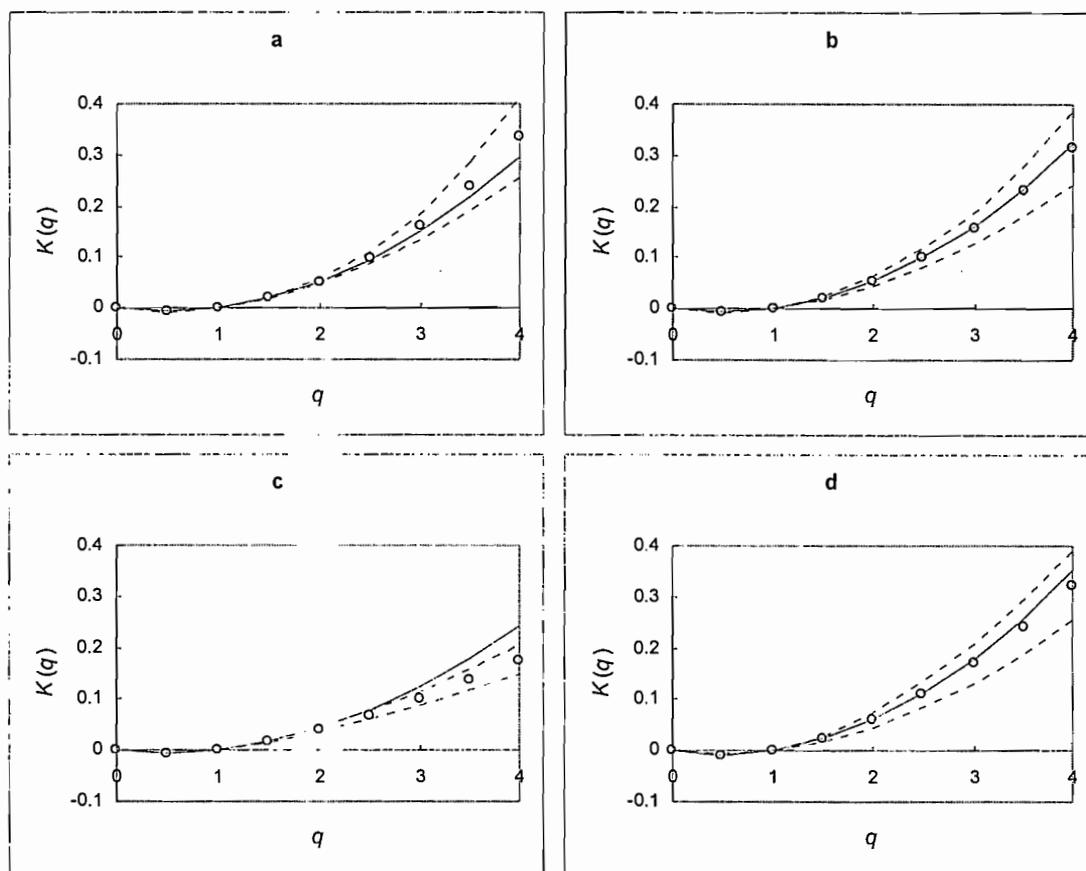
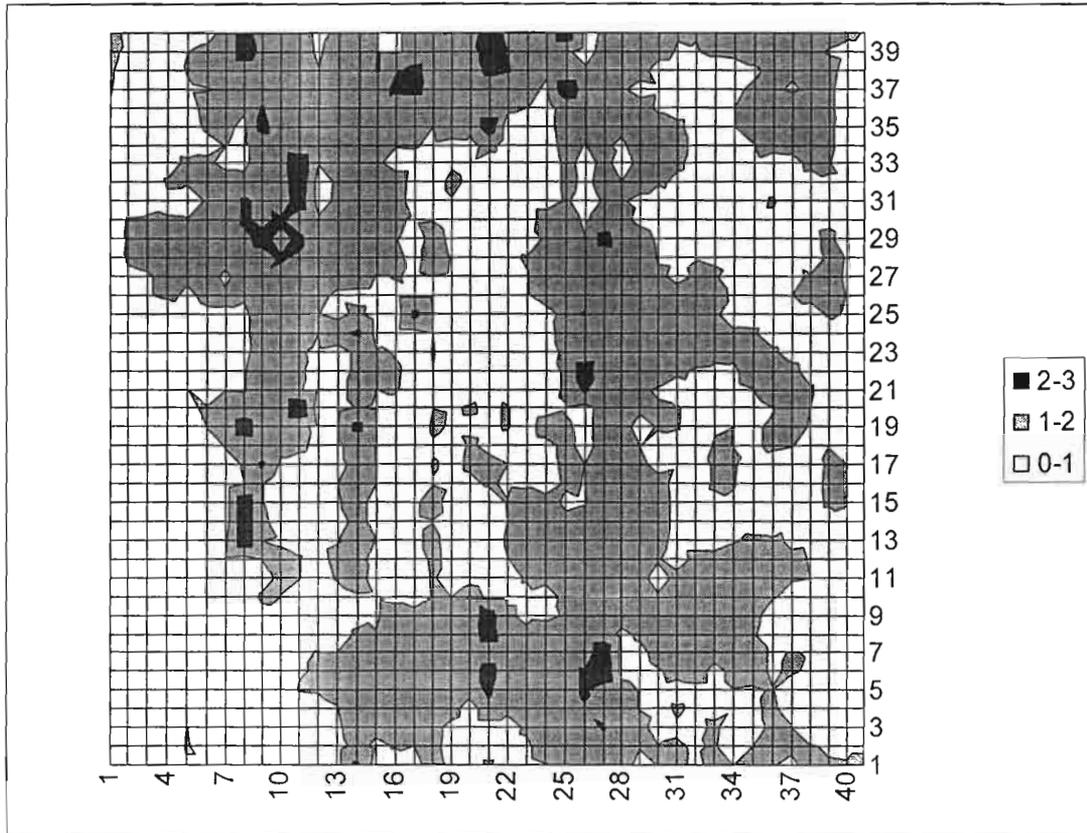


Fig. 4: Empirical  $K(q)$ -function (point values) with 95% confidence intervals (dashed lines) and fitted universal multifractal  $K(q)$ -function (solid line) for four typical experimental plots.

The encouraging results were used to simulate the dye coverage by use of a random cascade process. In Fig. 5 this is shown by comparing original and simulated maximum infiltration depth for a typical plot (plot 3).



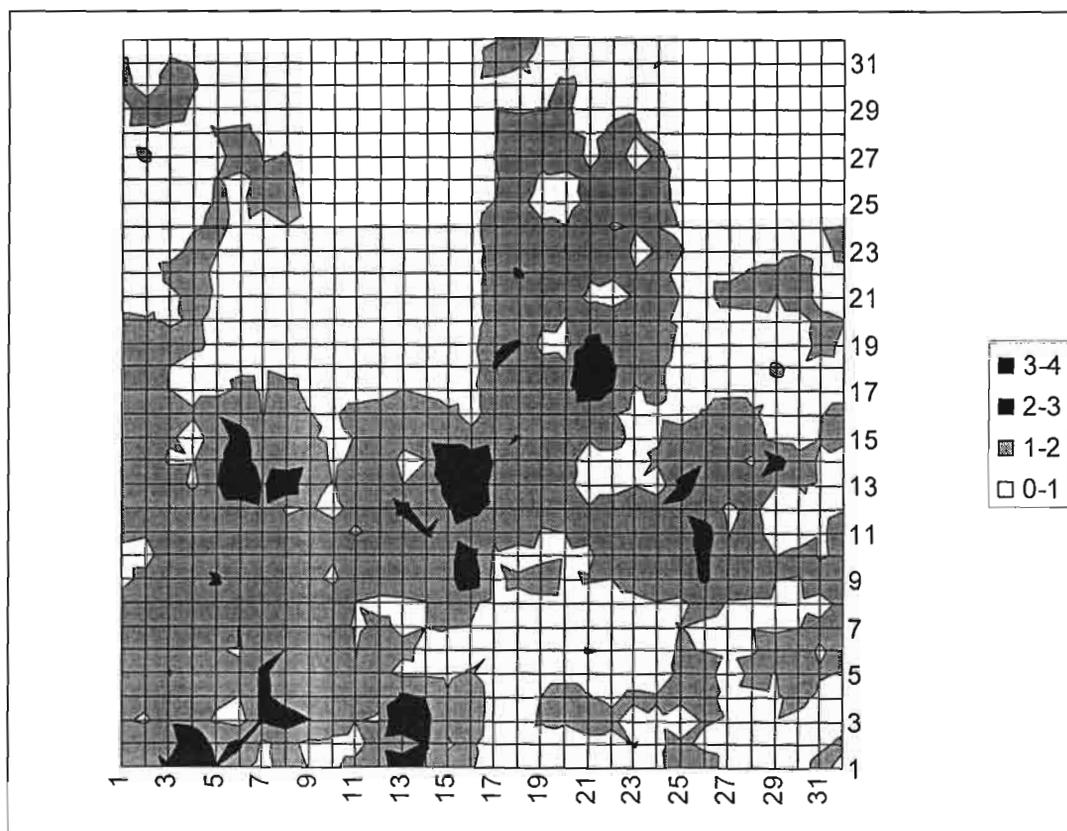


Fig. 5: Observed (upper) and modeled (lower) spatial variation of maximum infiltration depth for experimental plot 3. Simulation was done by discrete cascade simulation of a  $32 \times 32$  field.

As seen from the figure overall variation is well simulated. Areas of similar infiltration characteristics are generally spatially connected. Some over-estimation appears, however, in the simulated case. Even so it is seen that overall properties seem to be well preserved.

## CONCLUSIONS

The conclusions of this study can be summarized as:

- 1) Solute transport properties as indicated from dye coverage experiments displayed fractal properties as viewed by power spectrum analyses and probability distribution characteristics.
- 2) Two fractal models were tested and encouraging results were obtained. The tested fractal models were the diffusion limited aggregation and the random cascade model.
- 3) The diffusion limited aggregation model was calibrated and verified for two plots. The verified model agreed very well to observed data. The random cascade model was calibrated for one experimental plot. Some over-estimation appeared to be the case. However, the general spatial pattern appeared to agree well with observed data. It remains to perform a rigid statistical test for the performance of the random cascade model.

This study showed that fractal models are viable to apply for subsurface flow phenomena. Several previous studies have shown that many soil properties can be viewed as fractal pathways (e.g., Katz and Thompson, 1985; Tyler and Wheatcraft, 1990; Young and Crawford, 1991; Kemblowski and Wen, 1993; Baveye et al., 1998). In this paper we confirmed these results by

applying two fractal models to observed dye penetration in unsaturated field soil. Further studies are needed to explore the effects of varying fractal parameters on the investigated models. Also, studies are needed to relate different types of soils to different fractal properties such as fractal and multifractal parameters. We hope to be part of these future studies.

**Acknowledgments.** This study was funded by the European Union through the HYDROMED (Research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery), the European S&T Fellowship Programme in Japan, the Swedish Research Council for Engineering Sciences, the Swedish Natural Science Research Council, and the Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries. This support is gratefully acknowledged. We also thank D. Lavallée for providing the discrete cascade simulation algorithm.

## REFERENCES

- Aeby, P., Forrer, J., Steinmeier, C., and Flühler, H., 1997. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 33-35.
- Baveye, P., Boast, C.W., Ogawa, S., Parlange, J.-Y. and Steenhuis, T., 1998. Influence of image resolution and thresholding on the apparent mass fractal characteristics of preferential flow patterns in field soils, *Water Resour. Res.*, 34, 2783-2796.
- Bernard, A., 1987. Le simulateur de pluie 2<sup>ème</sup> génération, Technical report, ORSTOM, Tunis, Tunisia.
- Beven, K. and Germann, P., 1982. Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, 18, 1311-1325.
- Booltink, H.W.G. and Bouma, J., 1991. Physical and morphological characterization of bypass flow in a well-structured clay soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1249-1254.
- Bouma, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality, *Adv. Agron.*, 46, 1-37.
- Davis, A., Marshak, A., Wiscombe, W., and Cahalan, R., 1994. Multifractal characterizations of nonstationarity and intermittency in geophysical fields: Observed, retrieved, or simulated, *J. Geophys. Res.*, 99, 8055-8072.
- Feder, J., 1988. *Fractals*, Plenum Press, New York.
- Flury, M. and Flühler, H., 1995. Modeling solute transport leaching in soils by diffusion-limited-aggregation. Basic concept and application to conservative solutes, *Water Resour. Res.*, 31, 2443-2452.
- Flury, M., Flühler, H., Jury, W.A. and Leuenberger, J., 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, *Water Resour. Res.*, 30, 1945-1954.
- Frisch, U., and Parisi, G., 1985. On the singularity structure of fully developed turbulence, in *Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics – Proceedings of the International School of Physics “Enrico Fermi”*, edited by M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, pp. 84-88, North-Holland, Amsterdam.
- Hillel, D., 1991. Research in soil physics: A re-view, *Soil Sci.* 151, 30-34.
- Kemblowski, M.W. and Wen, J.-C., 1993. Contaminant spreading in stratified soils with fractal permeability distribution, *Water Resour. Res.*, 29, 419-425.
- Lavallée, D., 1991. *Multifractal Analysis and Simulation Technique and Turbulent Fields*, Ph.D. Thesis, McGill Univ., Montreal, Canada.
- Mandelbrot, B. B., 1974. Intermittent turbulence in self-similar cascades: Divergence of high moments and dimension of the carrier, *J. Fluid. Mech.*, 62, 331-358.
- Meakin, P., 1991. Fractal aggregates in geophysics, *Rev. Geophys.*, 29, 317-354.
- Menabde, M., Seed, A., Harris, D., and Austin, G., 1997. Self-similar random fields and rainfall simulation, *J. Geophys. Res.*, 102, 13509-13515.

- Menabde, M., Seed, A., Harris, D., and Austin, G., 1999. Multiaffine random field model of rainfall, *Water Resour. Res.*, 35, 509-514.
- Mukhopadhyay, S., and Cushman, J. H., 1998. Diffusive transport of volatile pollutants in nonaqueous-phase liquid contaminated soil: A fractal model, *Transport in Porous Media*, 30, 125-154.
- Olsson, J., Persson, M., Albergel, J., Zante, P., Nasri, S., and Berndtsson, R., 2000. Spatial variability of soil water infiltration: scaling properties and random cascade modeling, manuscript.
- Pachepsky, Y., and Timlin, D., 1998. Water transport in soils as in fractal media, *J. Hydrol.*, 204, 98-107.
- Persson, M., Yasuda, H., Albergel, J., Zante, P., Berndtsson, R., Nasri, S., and Öhrström, P. 2000. Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model, manuscript.
- Schertzer, D., and Lovejoy, S., 1987. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes, *J. Geophys. Res.*, 92, 9693-9714.
- Schwartz, R.C., McInnes, K. J., Juo, A.S.R. and Cervantes, C.E., 1999. The vertical distribution of a dye tracer in a layered soil, *Soil Sci.*, 164, 561-573.
- Soil Survey Staff, 1996. Keys to soil taxonomy, United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Tessier, Y., Lovejoy, S., and Schertzer, D., 1993. Universal multifractals: Theory and observations for rain and clouds, *J. Appl. Meteorol.*, 32, 223-250.
- Wheatcraft, S. W. and Tyler, S. W., 1988. An explanation of scale dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry, *Water Resour. Res.*, 24, 566-578.
- Witten, T. A. and Sander, L.M., 1981. Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon, *Phys. Rev. Lett.*, 47, 1400-1403.
- Öhrström, P., Persson, M., Albergel, J., Zante, P., Nasri, S., Berndtsson, R., and Nasri, S., 2000. Field scale variation of preferential flow indicated from dye coverage, manuscript.

# Spatial Variation of Soil Water Content and Electrical Conductivity Influenced by Surface Leveling.

*Yasser Hamed, Magnus Persson<sup>1</sup>, Jean Albergel<sup>4</sup>, Slah Nasri<sup>3</sup>, Patrick Zante<sup>4</sup>, and Ronny Berndtsson<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Lund University, Sweden

<sup>3</sup>Institut National de Recherche du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Tunisia

<sup>4</sup>Institut de Recherche pour le Développement, Tunisia

**ABSTRACT** / Collection of water through rainwater harvesting is becoming increasingly important in the semiarid arid areas of the Mediterranean. One technique that is applied on large areas in Tunisia involves contour ridging. This means that small banks of soil (1-1.5 m high) are used for collecting rainwater in hill slope catchments. The effects of these contour ridges on the water content distribution W/C, bulk soil salinity  $E_{ca}$ , and soil water salinity  $EC_w$  were investigated in the El-Gouazine plain, an important agricultural area in central Tunisia. The effect of topography in the investigated area was taken also into consideration. In total 258 measuring points were obtained in February 2000 by using both TDR and Sigma Probe instruments in area 80 m x 120 m. Contour maps of topography,  $EC_w$ ,  $E_{ca}$  and W/C were produced to investigate spatial variation and possible water movement in the upper 10 cm of soil. Geostatistics was used to obtain variograms for all variables. The  $EC_w$  variogram (for which Sigma probe was used) a linear relationship with distance was found. No sill could be found which means that a certain range within our measurements was absent. Also a high nugget value indicated a large sum of errors and small-scale variation. For both  $E_{ca}$  and W/C (in which TDR was used), the fitted model was exponential with a range of about 15 m. The nugget value was much smaller than the case for  $EC_w$  (Sigma probe). This is probably explained by the difference in measurement volume of the two techniques (Sigma Probe measures a few cubic centimeters whereas TDR measures average value within a relatively larger soil volume). Contour maps showed that in the upper 10 cm water accumulate before and after the ridges. There are indications that water tend to accumulate both before and after the ridges which in turn mean that salinity levels increase both before and after the ridge.



# Centre for Ecology & Hydrology

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

Maclean Building  
Crowmarsh Gifford  
Wallingford  
Oxon, OX10 8BB, UK  
Tel(CEH-SB): +44 (0) 1491 838800  
Tel(Direct): +44 (0) 1491 692303  
Fax: +44 (0) 1491 692424  
E-Mail: Rag@ceh.ac.uk

---

## HYDROMED

Program of research on Hill Reservoirs in the Semi-Arid zone of  
the Mediterranean Periphery

Annual report

Dr. R. Ragab

December, 2000

## CONTENTS

- 1- NEW DEVELOPMENT & ADDITIONAL FEATURES OF THE **HYDROMED** MODEL
- 2- MODEL DOCUMENTATION
  - A. THE RAINFALL - RUNOFF MODEL
  - B. THE STORAGE CAPACITY AND PROBABILITY OF FAILURE
- 3- MODEL DEMONSTRATION AT THE INTERNATIONAL SEMINAR ON **HYDROLOGY OF THE MEDITERRANEAN REGION, MONTPELLIER, FRANCE, OCTOBER 11-13, 2000**

## **1. Model Development and additional features**

The model has been developed further. The main new development included the possibility of using the model at different time steps ranges from hours to months which, would allow more types of data especially historical data to be used. The other main development was to include a two layers soil model to estimate the base flow.

Additional features included, file importing option for CSV files in addition to the data loggers file, optimization of more parameters including the new ones related to the new 2-layers soil model, A soil data base for soil hydraulic parameters of at least 14 soil types, more graphical plotting facilities which included 1:1 figures (measured vs modelled), plotting more than one event on the same graph and more variables to plot. More export files to include the new output for different time steps, new output of the soil model, table of statistics, etc.

## **2. Model Documentation**

The model at its present form has been documented in two parts. The first part is dedicated to the rainfall-runoff process while the second part is dedicated to the storage capacity and probability of failure of reservoirs in meeting the requirements. The documents describe, the model structure, equations used, the optimization method, the input and output files, the run options, the graphical options and the features of the model. These documents are presented here after.

## **3. MODEL DEMONSTRATION AT THE INTERNATIONAL SEMINAR ON HYDROLOGY OF THE MEDITERRANEAN REGION, MONTPELLIER, FRANCE, OCT. 11-13, 2000**

The model has been demonstrated to a wider scientific community during the International seminar in Montpellier, last October and it has been well received.

# HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS

## 1- THE RAIFALL-RUNOFF MODEL

R.Ragab

*Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, OX10, 8 BB, UK  
E-mail: Rag@ceh.ac.uk*

### ABSTRACT

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. 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.

Mediterranean countries could make a better use of their water resources by constructing small hill reservoirs. 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. Conducting field observations and modelling studies can achieve these goals. After being validated, models can be used as a management tool. The HYDROMED model has been developed specifically for the Mediterranean basin conditions. The model has two sub-models, the Rainfall-Runoff (part 1 of this paper) and Reservoir storage capacity and probability of failure (part 2 of this paper). In part 1, the hydrological processes contributing to the runoff are described and their mathematical formulation are given. In part 2 the model deals with the storage capacity of a reservoir required to maintaining a yield with a given probability of failure. The HYDROMED model is a menu driven, easy and friendly to use and runs under Windows 95 operation system. The model uses the Genetic Algorithm for Optimization and has default values that could be selected in absence of measured parameter values. The model has different options to calculate the flows and options for the time steps ranging from less than one hour to one month. The model has facility to import data from data loggers and output results into data files and graphs. An example of calibration for El-Guazine catchment has been given. The model showed successfully its ability to simulate the Rainfall-Runoff event. More results on different catchments will be published in a follow up papers.

### KEYWORDS

HYDROMED, Rainfall-Runoff model, Mediterranean, Conceptual model

### INTRODUCTION

It is widely accepted 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). The proposal in Tunisia is to build a thousand hill reservoirs by the end of this year. 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). Of the various types of surface runoff models available to hydrologists, the physically-based models where parameters in the model are determined by measurable features of the catchment need more data and 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. In this context, a simple Rainfall-Runoff model has been developed specifically for the

Mediterranean region. In the following section, the model structure and the hydrological processes will be described and an example of calibration of a Mediterranean catchment will be discussed.

### **Reservoir Water Balance**

The hydrology and the water balance components of a reservoir are associated with its catchment. 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. When  $\Delta V$  exceeds the maximum level of the storage the water flows out the reservoir as spillway flow, which could be recorded. In fact it is more accurate to use than the  $\Delta V$  to calibrate the model. The HYDROMED model considers the components of equation 1 in estimating the  $\Delta V$  or spillway flow. Input to the catchment water balance is mainly the rainfall over the catchment and the reservoir. The losses are mainly due to evaporation and abstraction. The rainfall over the catchment is divided into relatively fast flow to the reservoir (e.g. flow due to exceeding the infiltration capacity, surface runoff from impervious surfaces, flow from surface soil layers due to exceeding the saturation capacity) and slow flow known as base flow following the rain event. The following section will describe the different flow types and the components of the water balance.

## **THE HYDROMED MODEL DESCRIPTION.**

The HYDROMEI model is a Rainfall-Runoff conceptual model. The model is generic in terms of application as it runs at different time steps and allows different mechanisms to generate runoff by adopting different driving hydrological process. The model time step ranges from less than an hour to one month. The hydrological processes responsible for runoff generation are: infiltration excess, impervious surface runoff, saturation excess and base flow or combination of them. The base flow is computed either from the recorded stream flow data following rainfall events or as a free drainage at the bottom of the soil profile.

### **Infiltration Excess**

Infiltration rates for semi-arid catchments can vary enormously even within a few meters. Surface runoff varies considerably depending on the rainfall intensity, soil surface conditions (roughness, storage capacity, infiltrability etc.) the vegetation cover, soil moisture status and the slope. 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 infiltration excess could be described on the basis of Pitman's approach (1973). The surface runoff is separated into two components: runoff from impervious areas and runoff in excess of the absorption

rate. The former is a simple calculation, however the latter is highly unlikely to be uniform throughout the catchment, being influenced by geology, soil type, vegetation and many other factors. Pitman hypothesises that the variability of this absorption rate can be approximated using a symmetrical triangular frequency distribution of absorption rates over the catchment. His hypothesis was tested and proved adequate on test catchments in semi-arid South Africa. The triangular shape has the added advantage of flexibility and mathematical simplicity (see Figure.1). The total area of the triangle must be unity, hence (for  $Z$  being the absorption rate) :  $H = 2/(Z_{\max} - Z_{\min})$ . The expected runoff from a given input of rainfall,  $r$ , is then given by (Equations 2-4, same units everywhere):

$$\text{For } Z_{\min} \leq r \leq Z_{\text{mean}} : Q = \frac{2(r - Z_{\min})^3}{3(Z_{\max} - Z_{\min})^2} \quad (2)$$

$$\text{For } Z_{\text{mean}} \leq r \leq Z_{\max} : Q = r - Z_{\text{mean}} + \frac{2(r - Z_{\min})^3}{3(Z_{\max} - Z_{\min})^2} \quad (3)$$

$$\text{For } r \geq Z_{\max} : Q = r - Z_{\text{mean}} \quad (4)$$

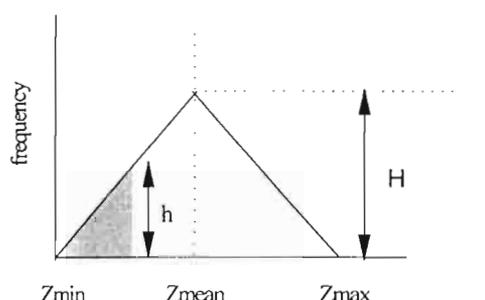


Figure 1 Assumed frequency distribution of absorption rate.

The values of  $Z_{\min}$  and  $Z_{\max}$  can be determined using infiltration tests on the catchment. Alternatively, an optimisation routine could be set up in the model during calibration such that the parameters, which produce the best hydrograph fit, are selected. This is the approach taken and presented in this paper.

The time delay of runoff is a variation of the Muskingham equation with the weighting factor set to zero for reservoir-type storage attenuation (Pitman, 1973 and Shaw, 1988):

$$O_{t+1} - O_t = \frac{\Delta t(I_t - O_t)}{k + \frac{1}{2}\Delta t} + \frac{\Delta t(I_{t+1} - I_t)}{2(k + \frac{1}{2}\Delta t)} \quad (5)$$

Where  $O_t$  and  $I_t$  are the flow and lagged flow (respectively) at time  $t$  and is measured in  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ,  $\Delta t$  (time step is variable in this model) is the routing period and  $k$  (h) is the lag of the runoff.  $k$  can be determined using an optimising routine in the calibration program. In HYDROMED model two time delays were considered,  $k1$  for relatively fast flow and  $k2$  for relatively slow flow such as the base flow.

Schematic diagrams of the processes used in the HYDROMED model are shown in Figure.2. The evaporation process incorporated only for daily and monthly time steps as it has negligible effect on runoff magnitude at hourly time step. The base flow of some small catchment could be assigned a zero value if there was no flow detected within hours of the rainfall event. Interception was also negligible (no significant ground cover).

### **Base flow**

In the HYDROMED model the base flow is estimated from the hydrograph as Base Flow Index or as a free drainage at the bottom of the soil profile.

## *I - Base flow index*

The base flow index can be thought as measuring the proportion of the runoff that derives from stored sources. The model applies smoothing and separation rules to the recorded flow hydro-graphs for which the index is calculated as the ratio of the flow under the separated hydro-graph, to the flow under the total hydro-graph.

The program calculates the minima of five-hour non-overlapping consecutive periods and subsequently searches for turning points in this sequence of minima. The turning points are then connected to obtain the base flow hydro-graph that is constrained to equal the observed hydro-graph ordinate on any hour when the separated hydro-graph exceeds the observed. The values that the BFI can take are in the region of [0,1]. A value close to 0 deduces that the catchment is impermeable and the contribution of base flow to an event is minimal whilst a value close to 1 deduces that the catchment is permeable and the contribution of base flow to the event is significant.

## *II- Free drainage at the bottom of the soil profile*

In HYDROMED this is calculated at the bottom of two-layers soil model. The surface layer contributes to surface runoff if its moisture content exceeds its saturation level and losses water via evapotranspiration. Its soil moisture is updated at each time step as:

$$\pm\Delta\theta_s = [R - I - E_s - T_s] / Z_s \quad (6)$$

$$\theta_s = \theta_{\text{initial}} + \pm\Delta\theta_s \quad (7)$$

For the sub surface layer

$$\pm\Delta\theta_{ss} = [flux_s + \theta_{ss} * Z_{ss} - T_{ss}] / Z_{ss} \quad (8)$$

$$\theta_{ss} = \theta_{\text{initial}} + \pm\Delta\theta_{ss} \quad (9)$$

$$flux_s = [\theta_s - (F.C)_s] * Z_s \quad (10)$$

$$\text{Drainage flux} = [\theta_{ss} - (F.C)_{ss}] * Z_{ss} \quad (11)$$

Where R is rainfall, mm day<sup>-1</sup>, I is the infiltration excess in mm day<sup>-1</sup>, T<sub>s</sub> is transpiration in mm day<sup>-1</sup>, E<sub>s</sub> is the bare soil evaporation in mm day<sup>-1</sup>, Z<sub>s</sub> is surface layer depth in mm, θ<sub>s</sub> is the surface soil moisture in m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, flux<sub>s</sub> is the outgoing flux at the bottom of the surface layer into the subsurface layer in mm day<sup>-1</sup>, subscript 's' refers to surface layer while 'ss' refers to subsurface layer and (F.C) is the soil moisture at field capacity, in m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

The Transpiration, T<sub>s</sub> from the surface layer is calculated as:

$$T_s = \text{ETP} * \text{Veg.Cover} * Z_s / (Z_s + Z_{ss}) * (\theta_s - (W.P)_s) / ((F.C)_s - (W.P)_s) \quad (12)$$

And for the second layer as:

$$T_{ss} = \text{ETP} * \text{Veg.Cover} * Z_{ss} / (Z_s + Z_{ss}) * (\theta_{ss} - (W.P)_{ss}) / ((F.C)_{ss} - (W.P)_{ss}) \quad (13)$$

While bare soil evaporation from surface layer is calculated as:

$$E_s = ETP * (1 - \text{Veg.Cover} * Z_s / (Z_s + Z_{ss}) * (\theta_s - k(W.P)_s) / ((F.C)_s - k(W.P)_s) \quad (14)$$

Where Veg.cover is a fraction of soil covered by vegetation (ranges from 0 to 1), k is a reduction factor (ranges from 0 to 1), ETP is the potential evapotranspiration.

It is assumed that the Evapotranspiration has insignificant effect on runoff when using a small time step of 1 hour or less. It is also assumed that bare soil evaporation only takes place from the surface layer while the surface and sub-surface layers contribute to transpiration. It is also assumed that that drainage from the bottom of the surface layer to the sub-surface layer and from the bottom of the sub-surface layer takes place when the soil moisture exceeds its value at field capacity.

Values of the soil moisture at saturation, field capacity and wilting point for 14 soil types are available as default values in the model and can also be given as user's input if available from measurements. ETP are daily values as user's input file.

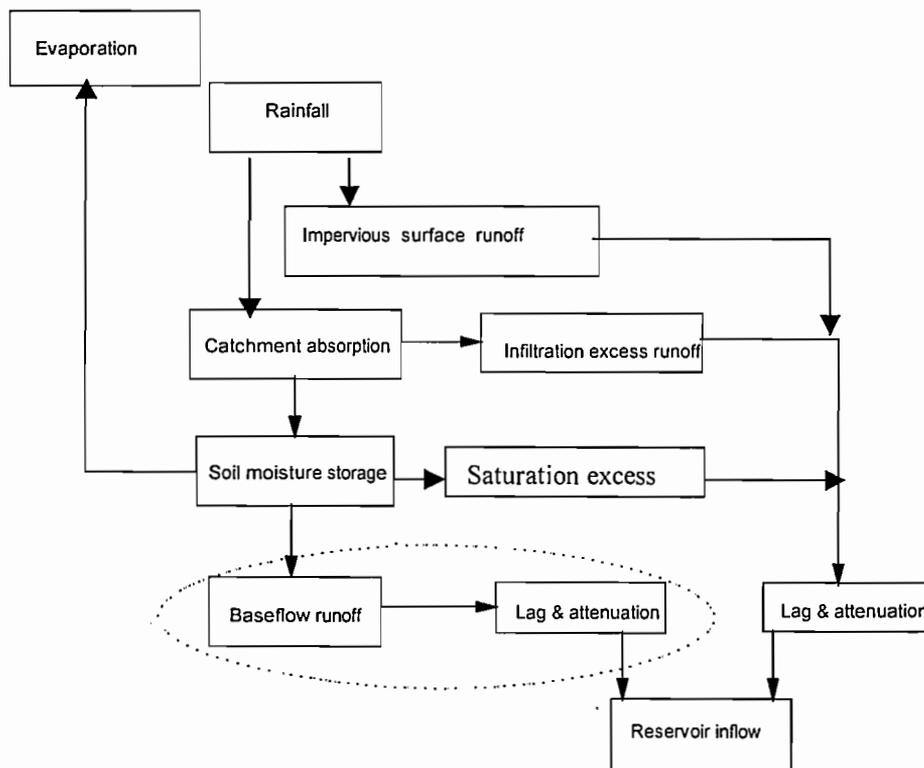


Figure 2. Components of the HYDROMED model.

### HYDROMED Run options

HYDROMED model run options are:

- 1- Runoff is generated by excess infiltration, surface runoff from impervious areas and a base flow estimated from the hydrograph (this could also be assumed zero if base flow has not been observed in the study site). This option is used for hourly time step (or even less than that) without need for ETP input but can also be applied on daily and up to monthly time step with ETP input required.

- 2- Runoff is generated by excess infiltration, surface runoff from impervious areas, saturation excess from the surface layer and a base flow calculated as a drainage flux in excess of the field capacity of the sub surface layer. This flux takes place at the bottom of the soil profile of a two layers soil model. If this option is selected then ETP input file will be required and the model should be run using daily or monthly time step.

### **HYDROMED Input data requirements**

The input requirement is dependant on the selected run option. The following list covers all options:

- 1- Rainfall data over the catchment (and if possible over the lake as well)
- 2- Flow data recorded at the spillway (recommended for calibration) or calculated from volume change in the lake.
- 3- Potential evaporation data for daily or monthly run options.
- 4- Catchment characteristics such as contributing area, lake area, estimate of vegetation fraction, and impervious area fraction.
- 5- Soil characteristics such as infiltration rate range ( $Z_{\min}$ ,  $Z_{\max}$ ) otherwise can be obtained by optimisation using the Genetic Algorithm GA in the model.
- 6- Soil moistures at saturation, field capacity and wilting point. These parameters are available as default values for 14 soil types in the soil menu.

### **HYDROMED input data file type**

The model runs with comma separated variables CSV file e.g. hour, date, and the variable value. The model can import data out of data loggers into CSV files.

### **HYDROMED output data file type**

The model provides three types of output:

- 1- Report files as text files easy to handle with other software such as Excel.
- 2- Time series graphs with option to select input or output variable.
- 3- 1:1 figures to compare simulated versus measured variables such as flows.
- 4- Figures and data files could be saved for further use as window meta files, \*.wmf.

### **Goodness of fit Criteria**

There are two options to fit simulated to measured data of the spillway flow or change in volume of the reservoir  $\Delta V$  based on two widely known criterions:

- 1- The Root Mean square error (Minimum)
- 2- The Nash Sutcliff criterion (Maximum)

### **The Genetic Algorithm, GA optimization technique**

The genetic algorithm library used to calibrate the HYDROMED model is the GALib library developed by the Massachusetts Institute of Technology. It is a set of C++ genetic algorithm objects and includes tools for using genetic algorithms to do optimization in any C++ program.

In the calibration of the model the genetic algorithm tries to minimise/maximize the objective function. The user can manipulate the population size, the number of generations (which is the stopping criteria), the probability of mutation [0,1] and the probability of crossover [0, 1]. The objective score is the value returned by the objective function; it is the raw performance evaluation of a genome. In the case of the HYDROMODEL this objective function is the one that calculates the root mean square or the Nash Sutcliff criterion.

## RESULTS

Runoff of catchments in Tunisia occurs so infrequently that there are very few data available for model calibration. Many of the reservoirs that supply the irrigation systems rely on less than a week of rainfall occurring every year. In EL-Guazine catchment the reservoir-filling curve (not shown here) showed that for the three-year period of record, there are only two events, which contribute significantly to the volume.

When there are no gauge data at the inlet of a reservoir, the inflow can be estimated from the change in the reservoir level - and therefore volume (with knowledge of the depth-volume curve). When the reservoir is full, the excess water flows through the emergency spillway. At the El-Goauzine experimental catchment, the spillway is rated and this provides a better estimate of the rate of inflow to the reservoir, even if there is some attenuation of the flow. When the reservoir is full it can be assumed that the catchment is close to saturation and therefore there are less unknowns in the runoff estimation equations and knowledge of the catchment soil moisture store is less crucial (losses, and therefore unknowns are smaller).

An example of model calibration of runoff at the El-Guazine Reservoir is given here under.

| Parameters |           |
|------------|-----------|
| Z Min      | 5.056461  |
| Z Max      | 5.056461  |
| K (Log)    | 3.239434  |
| Fitness    | 97.021848 |
| K (Log2)   | 0.0       |

| Configuration File |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| Title              | trial 7                            |
| Config File        | C:\HYDROMED\Configuration Files\Ka |
| Comments           | calibration 7                      |

Figure 3. Calibration window of El-Guazine Reservoir

The graphical out put can see in figure 4. This spilling condition occurs only once in the entire period of record available (see end of September, 1995 in Figure 4) for the El-Gouazine catchment, but nevertheless provides a good basis for calibrating the model. Optimising for  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$  and the Muskingham lag parameter,  $k$  results in a good hydrograph fit to observed flow (Figure 5). The Nash Sutcliff criterion for this calibration fit is 97%. The different modelled flows contributing to the total run off are shown in figure 6.

It is expected that the observed hydrograph deduced from the change in level of the reservoir is likely to be less accurate. In a heavy rainfall event there is likely to be some associated wind reservoir surging, which makes the estimation of the inflow more difficult. In addition, the accuracy of the observed hydrograph has to do with the resolution of the depth recorder measuring the level of the reservoir. It should also be noted that there is only two rain gauges on this catchment for measuring the rainfall.

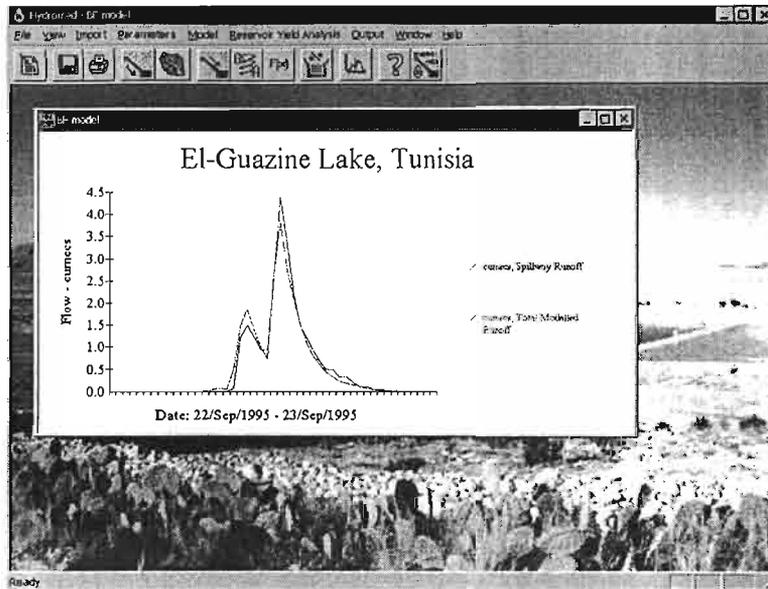


Figure 4. Modelled and observed runoff for the Event of 22-23 September 1995 at El-Guazine  
 The goodness of fit can also be seen in 1:1 graph type as in Figure 5.

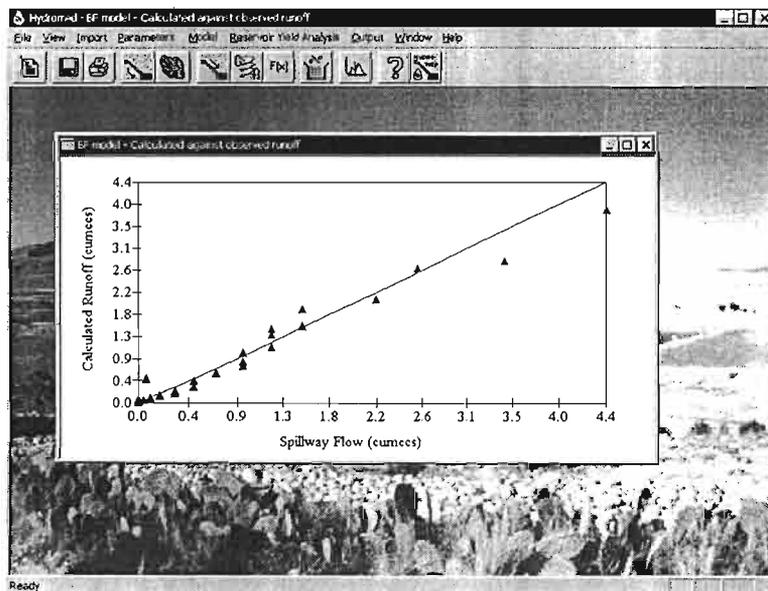


Figure 5. 1:1 relation between observed and modelled runoff at El-Guazine  
 The composition of different types of flow, which adds up to the total runoff flow, can be seen in figure 6.

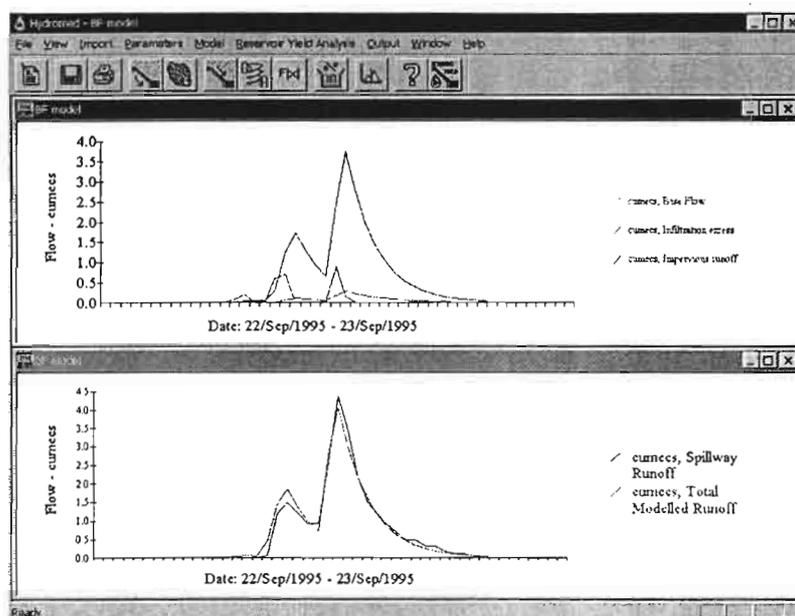


Figure 6. Components of the total runoff flow at El-Guazine Reservoir.

## CONCLUSIONS

Because the hydrology of semi-arid is different from humid and sub-humid regions, the HYDROMED model has been developed specifically for the Mediterranean region.

The HYDROMED model has two sub-models, the Rainfall-Runoff (part 1 of this paper). In this part the hydrological processes contributing to the runoff were described together with their mathematical formulation. In part 2 the model deals with the storage capacity of a reservoir required to maintaining a yield with a given probability of failure. The HYDROMED model is a menu driven, easy and friendly to use, and runs under Windows 95 operation system. The model uses the Genetic Algorithm for Optimization and has default values that could be used in absence of measured parameter values. The model has different options to calculate the flows and options for the time steps ranging from less than one hour to one month. The model has facility to import data from data loggers and output results in data files and graphs. An example of calibration for El-Guazine catchment has been given. The model showed excellent ability to simulate the Rainfall-Runoff event.

## REFERENCES

- Ghini, M., Tsoumanis, P. & Tsididis, 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,
- 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.
- 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.

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,

Shaw, E.M. 1988 Hydrology in practice. 2<sup>nd</sup> Edition. VNR International.

# HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS

## 2- RESERVOIR STORAGE CAPACITY & PROBABILITY OF FAILURE MODEL

**R. Ragab**

*Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, OX10, 8 BB, UK  
E-mail: Rag@ceh.ac.uk*

### ABSTRACT

This paper addresses the issue of “what is the reservoir storage capacity that is required to maintain a yield with a given probability of failure”. It is a very important issue in terms of construction and cost. HYDROMED model offers a solution based on the Gould probability matrix method. In the HYDROMED model, the probability of failure is calculated on monthly basis. The Model has been applied on El-Guazine catchment in Tunisia using a long data record of Kairouan (monthly data are available from World Climate Disc, CRU, 1990 from 1900 to present) together with the Horton parameters derived for the El-Gouazine catchment based on the local gauges. The evaporation data were based on the Pan evaporation measurements available at the site while the abstraction figures were based on available literature. Estimation of the probability of failure has been obtained for different months of the year. The Probability of failure differed from winter to summer. Generally, the probability of failure goes to near zero when the reservoir capacity is 500, 000 m<sup>3</sup>. The 25% probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233, 000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3 % in March, and around 1.1 % in May and June. Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. Subsequently, benefits, in terms of probability of failure, by increasing the reservoir volume of EL-Guazine greater than 250.000 m<sup>3</sup> mark are not high. This is important for the design engineers and the funding organization. However the analysis is based on the existing water abstraction policy, absence of siltation rate data and on the assumption that the present climate will prevail during the lifetime of the reservoir. Should these conditions change, a new analysis should be carried out.

### KEYWORDS

**HYDROMED, Reservoir, storage capacity, probability of failure, Mediterranean**

### INTRODUCTION

The design of a reservoir is concerned with determining the storage capacity required to maintain a yield with a given probability of failure. The cost of building the reservoir increases exponentially with the height of the dam. On the other hand a reservoir, which is too small, will not serve its purpose and there will be a shortage of water on a regular basis. A balance between costs of building, net gain (in financial or social terms) from having the reservoir and the probability of failure (and cost of failure) should be reached.

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 McMahon 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.

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 and requires the historical inflows (stream flow and rain), outflows (including evaporation, spillage and any other losses) and an assumed active storage capacity (Equation.1).

$$V_{i+1} = V_i + I_i - Abs_i - E_i - D_i \quad (1)$$

$I$  is the inflow,  $Abs$  is the abstraction pattern  $E$  is the evaporation and  $D$  are reservoir releases. Any other inflows or outflows are easily incorporated as needed.

Provided that a sufficiently long record is available, the simulation is run and the numbers 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.

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 McMahon and Mein, 1978) allows inflows and outflows to occur simultaneously.

A further modification to the Moran method was 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 as such is 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) applied the Gould method to catchments in Botswana for estimating the effect of rationing on the probability of failure of a reservoir.

Problems occur with implementing the probability matrix method when there is a lack of flow data. Normally a flow series can be generated based on a nearby raingauge or regionalisation procedure and a crude assumption about the likely runoff volume from this rainfall (Hortonian runoff usually assumed for semi-arid catchments).

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 could be 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.

## **THE HYDROMED MODEL**

The model adopts the Gould probability matrix and employs equation 1 with allowance for siltation rate (If available).

### **User Inputs**

- 1- **Evaporation factor.** This is a correlation factor to convert Class A pan evaporation rate into evapotranspiration rate. They are a set of 12 factors representing the e-factors for each month.
- 2- **Abstraction.**
  - 3- **Inflow.** The inflow used is estimated inflow data from the world climate disk station at Kairouan with some adjustments. The data should be loaded in a two dimensional array of doubles that denotes inflow during a specific year and month.
  - 4- **Start month.** The user should be able to enter the start month, which should be loaded, into an integer.
  - 5- **Years.** The user should be able to enter the number of years of Inflow data that has been provided which should be loaded into an integer.
  - 6- **Capacity.** The user is able to enter the capacity of the reservoir.

### **Step by step computation of the probability of failure**

1. Decide on abstraction quantities and any releases that may be required.
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). 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 20 zones and for each of the years of monthly data available and tally the number of times 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.
7. The multiplication of the two matrices derivatives gives the probability of failure of the reservoir.

## RESULTS

### The Gould probability matrix method for likelihood of reservoir failure studies: application on El-Gouazine catchment, Tunisia.

As an Example, monthly raingauge data at Kairouan (monthly data are available from World Climate Disc, CRU, 1990 for 1900 to present) are used together with the Horton parameters derived for the El-Gouazine catchment based on the local gauges. The evaporation figures were based on the Pan evaporation measurements available at the site while the abstraction figures were based on available literature.

Table.1. Average monthly evaporation and abstraction values of El Gouazine catchment.

| Month                               | Jan. | Feb | Mar. | Apr. | May | Jun. | Jul. | Aug. | Sep. | Oct. | Nov. | Dec. |
|-------------------------------------|------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| E mm                                | 201  | 230 | 230  | 259  | 287 | 287  | 259  | 230  | 230  | 201  | 173  | 172  |
| Abs m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> | 0    | 0   | 8    | 10   | 12  | 15   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Irrigation is assumed to take place only during the required part of the growing season. The total catchment area is 1810 ha and the reservoir capacity is  $233 \times 10^3 \text{ m}^3$ .

The screenshot shows a software window titled "Probability of Reservoir Failure". It contains the following input fields and sections:

- Reservoir Outputs:**
  - Evaporation File: D:\HMInfo\Evaporation.dat (unit: mmr/Month)
  - Evaporation Factor File: D:\HMInfo\Reservoir Yiel (unit: m3/Month)
  - Siltation File: D:\HMInfo\Reservoir Yiel (unit: m3/Month)
  - Abstraction File: D:\HMInfo\Reservoir Yiel (unit: m3/Month)
- Reservoir Capacity:**
  - Start: 10.0 (unit: 1000's m3)
  - End: 1000.0
  - Major Unit: 20.0
  - Surface Area File: D:\HMInfo\Reservoir Yi (unit: m2)
- Reservoir Inputs:**
  - Start Month: 4
  - No of Years: 89
  - Inflow File: D:\HMInfo\Reservoir Yiel (unit: m3/Month)
- Results:**
  - Output File: D:\HMInfo\Reservoir Yi

Buttons for "OK" and "Cancel" are located at the bottom right of the window.

Figure 1. Input windows for calculation of the probability of Failure

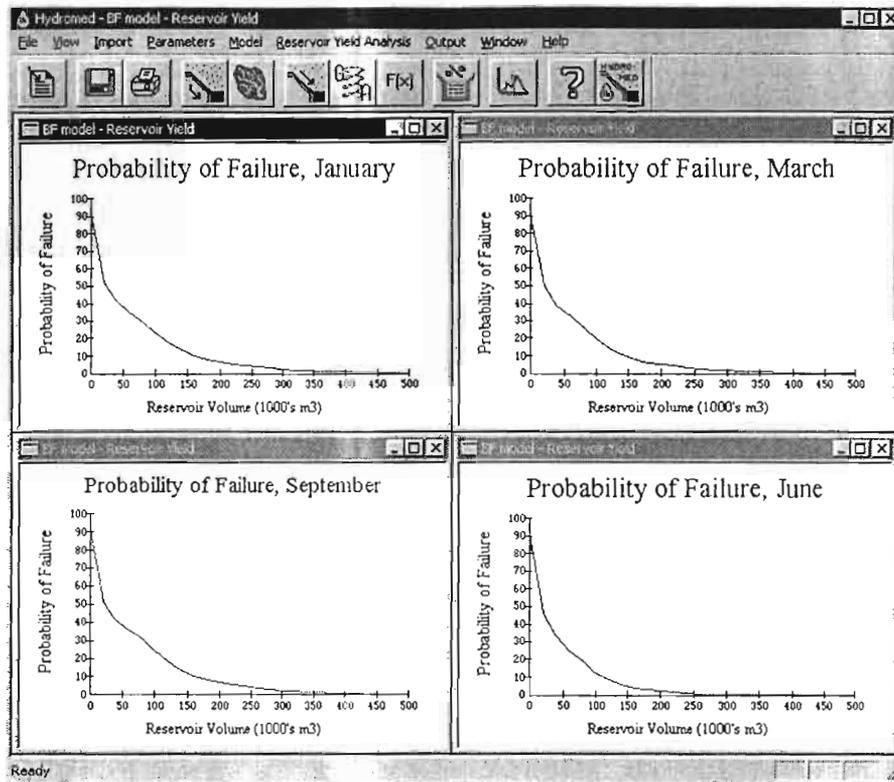


Figure 2. Reservoir probability of failure at El-Guazine, Tunisia for different times of the year.

It can be seen that the probability of failure differs from January where possibly the supply is greater than the demand when compared to June where the demand is greater than the supply. Generally, the probability of failure goes to near zero at reservoir capacity of 500,000 m<sup>3</sup>. The 25% Probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233,000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3% in March, and around 1.1% in May and June.

Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. In such case, benefits by increasing the reservoir volume greater than 250,000 m<sup>3</sup> mark are not very high. This is important knowledge for the design engineers and the funding organization.

One should remember that this analysis is based on the data at hand, which might not be accurate enough as it is based on literature and crude assumptions. One also should consider that the effect of erosion and the silting rate, which affect the storage capacity of the lake, is missing at present however it can be included in the calculation as and when silting rate data become available. Especially where there are problems with erosion, there are problems with siltation of the reservoir and this adds a whole new dimension to the estimation of the probability of failure of a reservoir. Estimating the likely rate of siltation of a reservoir is difficult because the rate of erosion increases exponentially with the rate of rainfall. At the extreme end, and as has been seen on catchments in Tunisia, reservoirs have become completely full of silt from only one rainfall event. If a standard rate of siltation (by volume) of the reservoir is assumed, then an appropriate adjustment can be made when consulting the probability of failure versus capacity graph on a year-by-year basis. Climate change and its impact should be considered when designing new reservoirs. The climate change scenarios suggest that the Mediterranean region will become hotter and dryer.

## 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.
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 siltation and abstraction policies.

## CONCLUSIONS

The Gould probability matrix method has been successfully implemented in the HYDROMED model. The probability of failure has been calculated on monthly basis for El-Guazine catchment in Tunisia using a long data record of Kairouan. Estimation of the probability of failure has been obtained for different months of the year. Generally, the probability of failure goes to near zero at reservoir capacity of 500,000 m<sup>3</sup>. The 25% Probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233,000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3 % in March, and around 1.1 % in May and June. Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. Benefits, in terms of probability of failure, by increasing the reservoir volume greater than 250,000 m<sup>3</sup> mark are not so high. This is important knowledge for the design engineers and the funding organization. However one should bear in mind that the present analysis is based on the existing water abstraction policy, absence of siltation rate data and on the assumption that the present climate will prevail during the lifetime of the reservoir.

## REFERENCES

CRU, World Climate Disk, Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK

Ghini, M., Tsoumanis, P. & Tsibidis, 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,

Gomer, D. 1996. *Écoulement et érosion dans des petits bassins-versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen*. Projet Pilote d'Aménagement Intégré du Bassin-Versant de l'Oued Mina, Eschborn.

Gould, B.W. 1961. Statistical methods for estimating the design capacity of dams. *Journal of the Institution of Engineers, Australia*, 33 (12), 405-16.

McMahon, T.A. & Mein, R.G. 1978. Reservoir capacity and yield. In: Chow, V.T. (Ed.), *Developments in water science*. Elsevier,

Moran, P.A.P. 1959. *The theory of storage*. Methuen, London.

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,

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,

Shaw, E.M. 1988 Hydrology in practice. 2<sup>nd</sup> Edition. VNR International.