



ECOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG



Institut de Recherche pour
le Développement

FONCTIONNEMENT DE PERIMETRES IRRIGUES A DIFFERENTS STADES D'EVOLUTION EN TUNISIE CENTRALE

Analyse des irrigations par modélisation du bilan hydrique



Maître de stage : Patrick LE GOULVEN

Mémoire de fin d'études présenté par : Sophie LARDILLEUX

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES

Juin 2000

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 3 |
| 1 EAU, AMENAGEMENTS ET SOCIETE EN TUNISIE..... | 5 |
| 1.1 CADRE PHYSIQUE..... | 5 |
| 1.2 LA GESTION DE L'EAU EN TUNISIE..... | 8 |
| 1.2.1 <i>Bref historique (Pérennès, 1993 ; SFER, 1998)</i> | 8 |
| 1.2.2 <i>L'investissement technique (1965 - 2000)</i> | 8 |
| 1.2.3 <i>L'accompagnement légal et structurel (1970-1980)</i> | 8 |
| 1.2.4 <i>La période des économies (1980 - 1990)</i> | 9 |
| 1.2.5 <i>Acteurs institutionnels du secteur eau (Faysse, 1999)</i> | 9 |
| 1.2.6 <i>Bilan actuel et perspectives de gestion</i> | 13 |
| 1.3 LES GIC : ELEMENTS-CLES D'UNE GESTION DE L'EAU RATIONNELLE EN TUNISIE..... | 14 |
| 1.3.1 <i>Statut et fonctionnement</i> | 14 |
| 1.3.2 <i>De la théorie à la réalité : limites du fonctionnement actuel des GIC d'irrigation</i> | 16 |
| 1.3.3 <i>Une recherche d'accompagnement</i> | 18 |
| 2 CADRE D'ETUDE ET OBJECTIFS | 20 |
| 2.1 CADRE D'ETUDE : LE PROJET MERGUSIE..... | 20 |
| 2.1.1 <i>Analyse intégrée des GIC</i> | 22 |
| 2.2 LES OBJECTIFS DU TRAVAIL..... | 23 |
| 2.3 CHOIX DE L'ECHANTILLON | 24 |
| 2.3.1 <i>Souaïdia</i> | 25 |
| 2.3.2 <i>Khatem</i> | 26 |
| 2.3.3 <i>Bled Abida</i> | 27 |
| 2.3.4 <i>Mlelsa</i> | 28 |
| 2.3.5 <i>Chebika Est</i> | 29 |
| 2.3.6 <i>Tableau récapitulatif</i> | 30 |
| 3 METHODOLOGIE..... | 31 |
| 3.1 PRESENTATION DE LA DEMARCHE EMPLOYEE | 31 |
| 3.2 STRESS HYDRIQUE ET RENDEMENT : LA THEORIE | 32 |
| 3.2.1 <i>Théorie du bilan hydrique</i> | 32 |
| 3.2.2 <i>Les cultures et l'évapotranspiration</i> | 33 |
| 3.2.3 <i>Réponse des cultures à l'eau</i> | 35 |
| 3.3 MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE PAR BILHY | 36 |
| 3.3.1 <i>Choix d'un logiciel</i> | 36 |
| 3.3.2 <i>BILHY : simulation du bilan hydrique sous EXCEL</i> | 37 |
| 3.4 CHOIX DES PARAMETRES | 42 |
| 3.4.1 <i>Hypothèses prises sur le réservoir sol</i> | 42 |
| 3.4.2 <i>Le facteur pluie</i> | 43 |
| 3.4.3 <i>Ruissellement</i> | 44 |
| 3.4.4 <i>Calcul de ET0</i> | 45 |
| 3.4.5 <i>Paramètres culturaux</i> | 47 |
| 3.5 LES BESOINS EN EAU PAR CULTURE | 51 |
| 3.5.1 <i>Besoins en eau selon la pluviométrie</i> | 51 |
| 3.5.2 <i>La réponse au rendement en sec</i> | 53 |
| 3.6 APPORTS REELS : LE FACTEUR IRRIGATION | 53 |
| 3.6.1 <i>Evaluation des débits et des pertes</i> | 53 |
| 3.6.2 <i>Distribution en mm sur les champs</i> | 55 |
| 4 ANALYSE..... | 56 |
| 4.1 BLE | 56 |
| 4.1.1 <i>Blé irrigué et blé en sec</i> | 56 |
| 4.1.2 <i>Résultats des simulations</i> :..... | 57 |
| 4.1.3 <i>Répartition géographique des performances</i> | 57 |
| 4.1.4 <i>Phases de stress</i> | 58 |
| 4.1.5 <i>Conclusion</i> | 59 |
| 4.2 FEVE, PIMENT-FEVE EN INTERCALAIRE : | 60 |
| 4.2.1 <i>Résultat des simulations</i> | 60 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Répartition géographique des performances</i> | 61 |
| 4.2.3 <i>Phases de stress</i> | 61 |
| 4.2.4 <i>Conclusion</i> | 63 |
| 4.3 <i>MELON ET PASTÈQUE</i> :..... | 64 |
| 4.3.1 <i>Résultat des simulations</i> | 64 |
| 4.3.2 <i>Répartition géographique des performances</i> | 65 |
| 4.3.3 <i>Phases de stress</i> | 65 |
| 4.3.4 <i>Conclusion</i> | 66 |
| 4.4 <i>OLIVIER ET ARBORICULTURE FRUITIÈRE</i> | 66 |
| 4.4.1 <i>Résultats des simulations</i> | 67 |
| 4.4.2 <i>Conclusion</i> | 68 |
| 4.5 <i>BILAN DES IRRIGATIONS A MLELSA POUR LA CAMPAGNE 98-99</i> | 68 |
| 4.5.1 <i>La pluviométrie</i> | 68 |
| 4.5.2 <i>L'utilisation du forage</i> | 69 |
| 4.5.3 <i>Le réseau</i> | 70 |
| 4.5.4 <i>Synthèse sur les déficits au cours de la campagne</i> | 71 |
| 4.5.5 <i>Conclusion</i> | 71 |
| 5 CONCLUSION | 73 |
| BIBLIOGRAPHIE | 75 |
| ANNEXES | 77 |

INTRODUCTION

La gestion de la ressource en eau en Tunisie s'avère de plus en plus difficile, puisque le bilan offre-demande devrait devenir négatif dans un futur proche. Face à cet état de fait, l'Etat revoit sa stratégie de gestion, en mettant l'accent sur la maîtrise de la demande en eau, et principalement celle destinée aux usages agricoles, qui en constitue la majeure partie.

Pour ce faire, il complète son dispositif technique de gestion en construisant de nouveaux aménagements de proximité (banquettes, lacs et barrages collinaires) chargés de mieux répartir la ressource sur les bassins versants, de protéger les grands ouvrages hydrauliques en aval et de transférer les eaux superficielles vers les aquifères pour diminuer les pertes par évaporation.

Parallèlement, il organise son désengagement financier en laissant une partie de la gestion à des Groupements d'Intérêt Collectif (GIC) chargés d'assurer l'entretien d'une partie des aménagements hydro-agricoles et mener une gestion du tour d'eau efficiente.

Enfin, il intervient par des mesures incitatives ou des règlements destinés pour mettre en place des politiques d'économie d'eau.

La recherche intervient pour accompagner cette stratégie, détecter les mécanismes pertinents et leur modalité d'application en essayant d'explicitier les dynamiques existantes en accès à l'eau et usages de celle-ci. Les leviers adéquats pour assurer une stabilité, voire une diminution des prélèvements, doivent notamment être mis en évidence. Leur pertinence permettra de maintenir un équilibre entre durabilité environnementale et viabilité économique des exploitations, afin d'éviter trop d'exode rural et une concentration des populations.

Le présent travail se propose de contribuer à la compréhension du fonctionnement actuel des périmètres irrigués gérés par un GIC et des performances de gestion sur la base d'une analyse des bilans hydriques.

Il s'inscrit au sein de MERGUSIE, projet pluridisciplinaire regroupant plusieurs organismes tunisiens et l'IRD. Ce projet inclut un groupe d'études basé sur l'analyse intégrée du fonctionnement des Groupements d'Intérêt Collectif (GIC) d'irrigation dans le gouvernorat de Kairouan, et dont l'échantillon est constitué de cinq périmètres irrigués.

Dans ce cadre, nous nous proposons d'analyser l'adéquation entre besoins en eau des cultures et irrigations pratiquées au niveau des champs cultivés.

Cette évaluation est possible grâce à la simulation du bilan hydrique, où le rapport entre l'évapotranspiration réelle d'une culture et son évapotranspiration maximale (ETR/ETM) est indicateur pertinent de la satisfaction en eau de celle-ci.

Nous avons tout d'abord estimé la demande en eau par culture principale au cours d'années pluviométriques statistiques (sèche, humide, médiane). Ce calcul a été l'occasion d'une comparaison entre deux logiciels de simulation : CROPWAT et SARRA. Il a également nécessité l'évaluation des paramètres cultureux entrant dans le calcul.

Dans un second temps, les simulations doivent être réalisées à partir des données réelles pluviométriques, d'assolement et d'irrigation sur les champs des GIC étudiés pour établir des diagnostics sur les conduites d'irrigation réelles. Des enquêtes ont donc été menées sur trois des cinq sites ; des hypothèses ont été posées afin d'attribuer un volume d'irrigation jour par jour, champ par champ.

Par ailleurs, devant le peu de maniabilité des deux logiciels précédents et le grand nombre de simulations à effectuer, nous avons préféré en concevoir un nouveau sous EXCEL, plus souple et mieux adapté à nos besoins.

Les résultats obtenus par ce logiciel sur le rapport ETR/ETM donnent le stress hydrique de chaque champ, au cours de l'année 98-99. Leur analyse est abordée par culture, tout au long des phases de cycle de développement végétatif, ainsi que dans l'espace du périmètre irrigué. Elle permet d'approcher les stratégies paysannes, ou renvoie aux questions essentielles à leur compréhension. Pour des raisons de temps, elle n'a été réalisée que sur un seul GIC.

Après avoir abordé le contexte général associant la Tunisie et sa ressource en eau, nous présenterons plus précisément le cadre et les objectifs de l'étude. La partie suivante concerne la méthodologie employée pour arriver aux résultats que nous analyserons dans le dernier chapitre.

1 EAU, AMENAGEMENTS ET SOCIETE EN TUNISIE

1.1 CADRE PHYSIQUE

La Tunisie est située à la jonction de la Méditerranée occidentale et la Méditerranée orientale. Dotée d'une superficie de 164150 km², elle est constituée par trois grandes régions géographiques: le Tell au Nord-Ouest, la Steppe au Centre-Est, et le Sud.

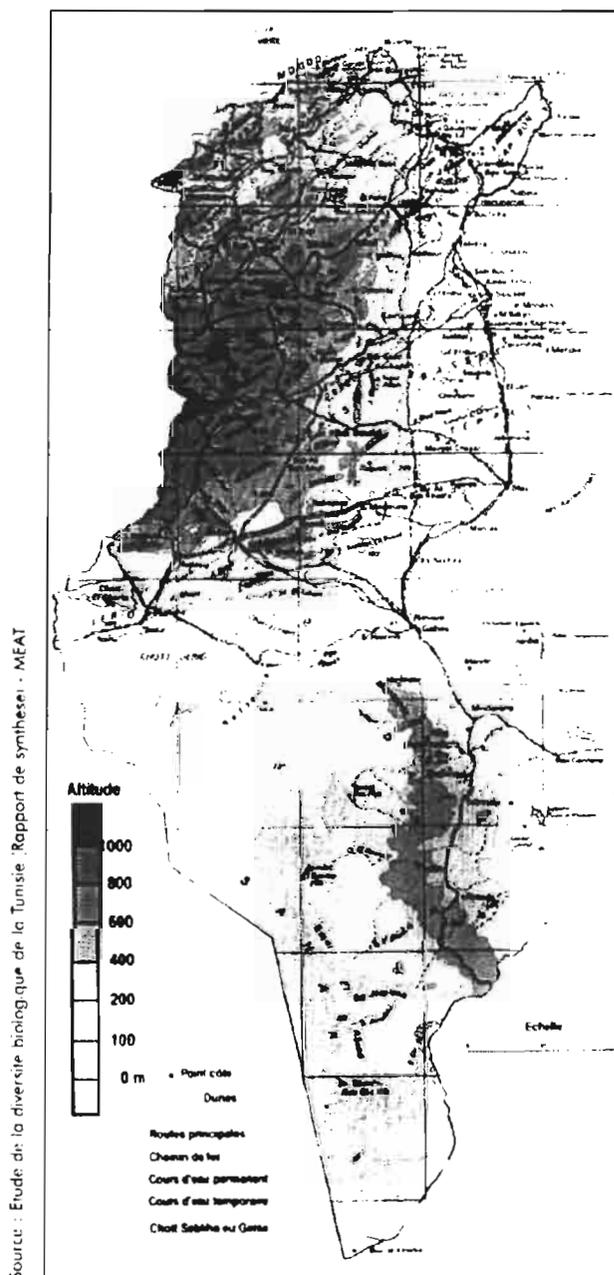


Figure 1 : Carte du relief de la Tunisie

Le relief tunisien est de manière générale peu important, puisque la moitié du pays se trouve à moins de 200 m d'altitude.

Le Tell est une région plus haute, où sont situés les montagnes de Kroumirie et les Mogods, les altitudes y sont comprises entre 400 et 800 m.

Le Tell et la Steppe sont séparés par une chaîne de hautes crêtes culminant à 1544 m : la Dorsale.

La Steppe est un ensemble de plaines et de montagnes que l'on nomme aussi Tunisie Centrale. Les hautes steppes se trouvent à plus de 400 m, et sont entrecoupées de chaînons montagneux, tandis qu'à l'Est, les basses steppes descendent jusqu'au niveau de la mer.

Le Sud comprend :

- les Jebels de la région de Gafsa (relief de cuesta),
- les dunes de l'extrémité du grand erg oriental saharien,
- les dépressions appelées chotts.

Ce relief explique en grande partie les variations du climat, de même que la géologie induit le type de ressource en eau souterraine.

C'est pourquoi on retrouve cette répartition, en 3 grandes régions tant du point de vue climatique que pour la partie hydrologique.

Le climat de la Tunisie est déterminé par deux facteurs majeurs :

- la présence de la mer, avec un littoral long de 1300 km, permet d'adoucir des conditions à tendance aride
- une forme étirée du Nord vers le Sud conduit à des variations climatiques et bioclimatiques essentiellement sur la latitude.

La saison des pluies va de septembre à fin mai, avec de fortes pluies en automne.

A mesure que l'on descend vers le Sud, le climat tunisien se fait de plus en plus aride.

Ainsi, la pluviométrie annuelle décroît de 1500 mm au Nord-Ouest à 200 mm au Sud-Est, au niveau de Sfax. Dans l'extrême sud, elle avoisine les 100 mm au maximum (cf. carte ci-contre).

La présence de la Dorsale, dans l'axe Kasserine-Zaghouan, est un obstacle aux vents porteurs de pluie venant du Nord ; d'où une décroissance rapide de la pluviométrie au sud de cette chaîne de crêtes.

La température moyenne annuelle varie de 13,3°C à Siliana, 21,3°C à Tozeur (Selmi S., Nasri S., 1993).

Le mois de janvier est souvent le mois le plus froid (2 à 8°C). Les mois de juillet et août sont les plus chauds (30 à 40°C).

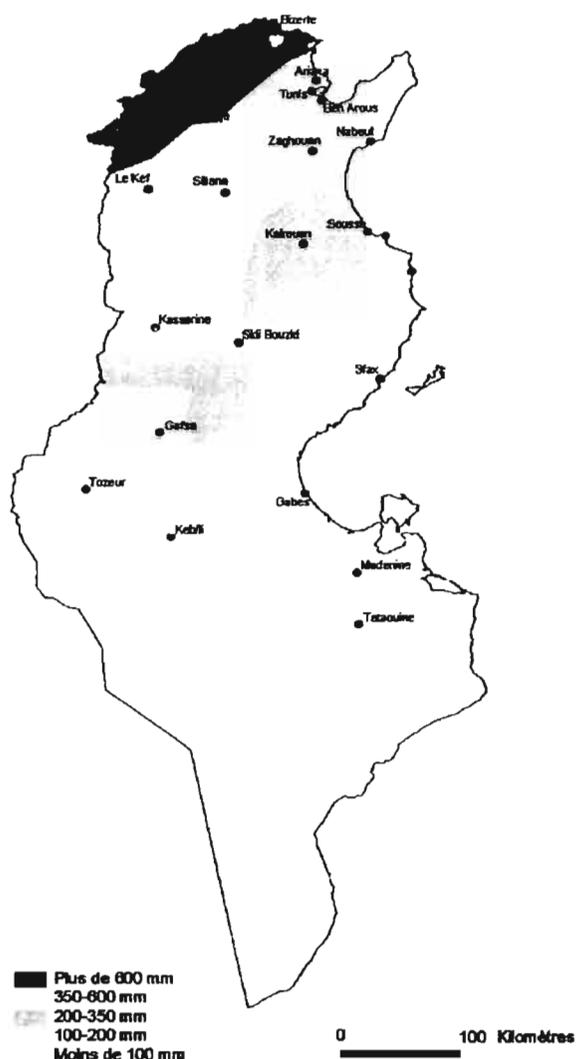


Figure 2 : Carte de la pluviométrie en Tunisie

Globalement, on peut donc distinguer 3 étages bioclimatiques :

- humide à sub-humide au Nord-Ouest
- semi-aride dans le Centre-Est,
- aride dans le Sud.

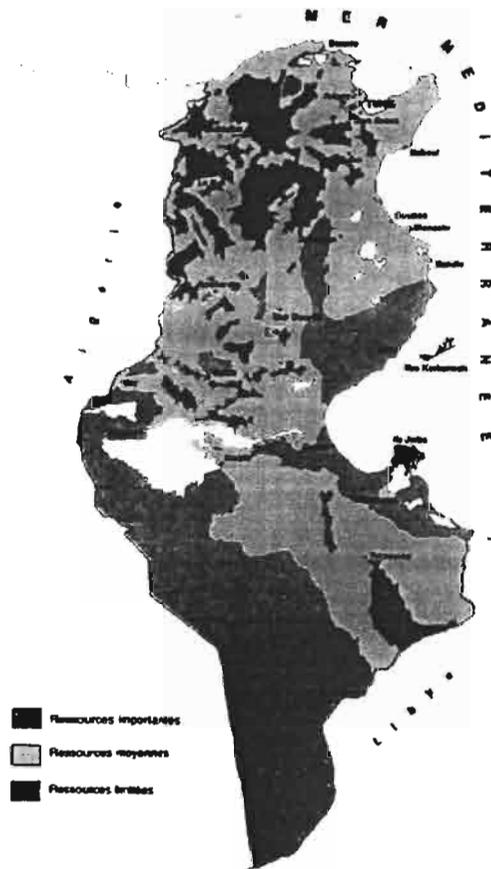


Figure 3 : Carte des ressources en eaux souterraines de Tunisie

Comme le climat, les ressources en eau superficielles et souterraines forment trois zones distinctes :

- La zone Nord dispose d'un réseau hydrographique développé dont l'élément majeur est la rivière ou oued Medjerda. Cette région contient 80% des eaux de surface. Ses écoulements sont en effet estimés à 2190 millions de m³/an. Elle n'a en revanche que peu de ressources souterraines (27% du total annuel).
- Le Centre possède trois bassins : celui du Nebhana, du Mergueillil, et du Zeroud, dont les oueds ont des écoulements irréguliers et parfois violents. Ceux-ci représentent 12% des eaux de surface. Le réseau hydrogéologique du Centre est complexe. Il est constitué de nappes phréatiques reliées les unes aux autres par de nombreuses fissures.
- C'est le Sud, très pauvre en eaux de surface, qui contient la majeure partie des eaux souterraines (46%). Les aquifères y sont profonds, et renferment 1250 millions de m³.

La Tunisie possède donc un climat très sec dans l'ensemble, et une ressource en eau existant majoritairement sous forme d'écoulements sporadiques. Ces conditions difficiles en rendent la gestion délicate.

1.2 LA GESTION DE L'EAU EN TUNISIE

1.2.1 *Bref historique (Pérennès, 1993 ; SFER, 1998)*

- Dans l'antiquité romaine, la gestion de l'eau en Tunisie était bien maîtrisée et reposait sur deux points importants.

D'une part, de nombreux petits ouvrages hydrauliques permettaient une bonne mobilisation de la ressource sur l'ensemble des bassins versants. Dans les parties hautes, les *banquettes* et *meskats* retenant les eaux de ruissellement, les *jessours* diminuaient l'énergie cinétique des rivières ; dans les parties moyennes les lacs collinaires permettaient la constitution d'un stock d'eau utilisé en partie l'été ; dans les plaines, les crues étaient dérivées par des canaux vers les zones cultivées.

D'autre part, l'organisation sociale autour de l'eau était très forte. Après la mobilisation, la phase de répartition est en effet tout aussi capitale, et celle-ci était très réglementée et hiérarchisée.

Le système était donc **rustique** d'un point de vue technique, mais parfaitement bien adapté au milieu. Il était construit et **géré en parfaite cohésion avec le tissu social**.

- Le **droit islamique des eaux** apparut vers les XIII^{ème} et XVI^{ème} siècles. Il n'apporta pas de modification majeure dans le fonctionnement précédemment décrit. Chaque musulman a droit à l'eau, et personne ne doit en manquer dans la communauté. Mais l'eau est aussi une propriété individuelle et indépendante de la terre, un bien que l'on peut vendre.

- Sous le **Protectorat français** s'amorce la tentative de faire disparaître les droits de propriété sur l'eau. En 1885, un décret beylical décrète que les eaux de surfaces, ainsi que les puits et les canaux d'irrigation appartiennent au domaine public. Les eaux souterraines seront rajoutées en 1933. Là aussi il y eut peu de changement en profondeur. La grande hydraulique et les grands barrages sont assez peu développés, hormis la construction du Kebir (1925), pour alimenter Tunis. Du point de vue agricole, les cultures restent extensives, et l'irrigation tardivement mise en valeur (dans la vallée de la Medjerda essentiellement).

1.2.2 *L'investissement technique (1965 - 2000)*

Avec l'indépendance, les hésitations entre grande hydraulique et petits aménagements font place à **un choix, celui de la grande hydraulique**.

La Tunisie adopte une stratégie de mobilisation fondée sur la construction d'un réseau de grands barrages destinés à mieux distribuer une ressource inégalement répartie par la mise en place de transferts d'eau de la région Nord vers les zones côtières de l'Est et du Centre.

D'autre part, l'exploitation des aquifères est systématisée dans les régions Centre et Sud.

1.2.3 *L'accompagnement légal et structurel (1970-1980)*

La construction des grands ouvrages sous-entend une **gestion très centralisée** qui se traduit par de nouvelles lois et règlements ainsi que par la création de nouvelles structures administratives.

En 1975 est voté le Code des Eaux, qui définit le Domaine Public Hydraulique, « inaliénable et imprescriptible » :

- il abolit définitivement le droit de propriété de l'eau, qui devient droit d'usage,
- il instaure les notions de périmètre de sauvegarde et d'interdiction, conditionnant l'exploitation des ressources en eau.

Un cadre institutionnel applicatif accompagne ces mesures. Ainsi, le Ministère de l'Agriculture, entièrement responsable de ce domaine, se dote de Directions Générales techniques spécialisées :

- la Direction Générale des Ressources en Eau,
- la Direction Générale des Grands Travaux Hydrauliques,
- la Direction du Génie Rural (chargée de l'irrigation et de l'eau potable rurale).

Le gouvernement crée également la SONEDE (Société Nationale d'Exploitation et de Distribution de l'Eau) pour l'eau potable, et les Offices de Mise en Valeur (OMV) qui sont chargés de l'encadrement agricoles des Périmètre Publics Irrigués (PPI).

Au cours de cette période, l'Etat Tunisien continue à viser à l'exploitation maximale de la ressource, se basant sur 4 Plans Directeurs d'Aménagement des Eaux (Extrême Nord, Nord, Centre, Sud).

Outre le stockage dans les grands barrages et le transfert d'eau vers les régions consommatrices, un fort investissement dans les infrastructures hydro-agricoles est réalisé, accompagné par des mesures d'incitation à l'intensification des prélèvements par les agriculteurs. Pour développer le pays, les objectifs prioritaires sont en effet :

- assurer l'eau potable à tous les habitants,
- favoriser l'agriculture pour : lutter contre l'exode rural,
tendre vers l'autosuffisance alimentaire (céréales, industrie),
développer l'exportation, essentiellement d'agrumes,
- développer le tourisme, grande part des revenus tunisiens.

1.2.4 La période des économies (1980 - 1990)

Une telle politique a vite engendré **des coûts trop élevés** pour la Tunisie. Les barrages posent en effet des problèmes d'envasement, donc de durabilité à court terme. Ceci conduit à remettre en cause la validité de l'option pour la grande hydraulique. Des difficultés financières sont également rencontrées au niveau des Offices de Mise en Valeur (OMV) et de la gestion publique des Périmètres Publics Irrigués (PPI).

L'aide mondiale, comme l'Etat, souhaite l'équilibrage du budget, donc la réduction des charges. Pour ce faire, la gestion des périmètres irrigués est décentralisée. Elle est confiée à des Associations d'Intérêt Collectif (AIC) en 1987.

Par le biais des AIC, les usagers sont responsabilisés dans le fonctionnement et la maintenance des infrastructures. Outre l'irrigation, ce système est mis en place pour l'AEP, la forêt et le sol. Ce **désengagement de l'Etat** est réalisé de manière progressive.

Dans le même temps sont fondés les Commissariats Régionaux de Développement Agricole (CRDA). Leur espace de compétence concorde avec les Gouvernorats, structures administratives régionales. Ils sont, entre autres, chargés d'encadrer les AIC, d'assurer la Police des Eaux, de recouvrir les droits d'usages de l'eau.

1.2.5 Acteurs institutionnels du secteur eau (Faysse, 1999)

Les acteurs actuels de la gestion de l'eau sont présentés brièvement dans ce chapitre avec leurs missions propres et leur place dans la structure globale.

1.2.5.1 Les institutions nationales

◇ Le Ministère de l'Intérieur

La Tunisie est divisée en 23 gouvernorats ; chaque gouvernorat est séparé en délégations, elles-mêmes subdivisées en secteurs. En milieu rural, il n'y a pas de commune (donc pas de maire), les seules autorités sont le chef de délégation (le délégué) et le chef de secteur (le omda). Les délégués interviennent dans l'activité économique de la délégation sous leur responsabilité, ainsi que dans la résolution des conflits : ils influent par-là sur la gestion de l'eau.

◇ *Le Ministère de l'Environnement*

Le Ministère de l'Environnement est un Ministère récent créé en 1991. Il exerce la tutelle de l'Office National d'Assainissement (ONAS) et de l'Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement (ANPE). Il possède des délégations régionales dont la compétence recouvre plusieurs gouvernorats. En pratique, les liens entre les Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement sont très faibles. Depuis peu, le Ministère de l'Environnement peut exiger des études d'impact avant la construction d'ouvrages comme les barrages. C'est seulement par ces études d'impact que ce Ministère intervient sur la ressource en eau : il n'a aucun rôle opérationnel.

◇ *Le Ministère de l'Agriculture*

Depuis 1978, la gestion de l'eau est confiée au Ministère de l'Agriculture (MOUSSA, 1988).

• **Le Secrétariat d'Etat chargé des Ressources Hydrauliques et la Pêche**

Le Secrétariat, poste créé en 1988, arbitre les choix d'allocation de la ressource, donne son avis sur la gestion des barrages aux pas de temps court et long, et définit les priorités entre les projets des différentes directions du Ministère.

• **Les Directions Générales du Ministère de l'Agriculture concernées par l'eau**

La DG des Etudes et Grands Travaux Hydrauliques (DG ETH) est la seule direction technique à ne pas avoir de représentation dans les CRDA. La mission de l'ETH est la création des grands barrages, des barrages collinaires, et des infrastructures des grands PPI créés en aval de ces barrages. L'ETH s'occupe également de la gestion des grands barrages.

Les autres Directions Générales ont perdu leur rôle opérationnel lors de la décentralisation de 1989. Elles assurent désormais la formation technique et l'encadrement des techniciens de leurs arrondissements. La gestion de l'eau concerne :

- la DG du Génie Rural (DGGR) qui s'occupe de la gestion des périmètres irrigués et des AIC (formation des techniciens locaux à la création et au suivi des AIC) ;
- la DG de la Conservation des Eaux et des Sols (DCES) ;
- la DG de la Législation ;
- la DG des Ressources en Eau (DGRE).

• **Les Commissions rattachées au Ministère de l'Agriculture**

Plusieurs commissions sont directement rattachées au Ministère :

- La Commission du Domaine Public Hydraulique (créée en 1978)

Lors de la procédure de création d'une zone d'interdiction ou de sauvegarde, la Commission donne un avis sur le dossier établi par la Direction des Ressources en Eau. La création est décidée par décret en Conseil des Ministres.

- La Commission des Purges

Depuis un siècle, l'administration cherche à transformer les droits de propriété de l'eau en droits d'usage. La Commission des Purges est chargée de traiter les cas restants. En général, le droit d'eau ancien est reconnu mais il ne sera pas transmissible à la mort du propriétaire.

- Le Comité National de l'Eau (créé en 1978)

"Il doit impliquer plusieurs partenaires (administration, élus, usagers, organismes socioprofessionnels, experts...) et permettre un débat plus vaste des orientations et choix stratégiques de la politique nationale de l'eau, mais n'est pas encore opérationnel" (HAMDANE, 1997).

- **La SONEDE**

La Société Nationale d'Exploitation et de Distribution de l'Eau (SONEDE) est une entreprise d'Etat rattachée au Ministère de l'Agriculture avec le rang de Direction Générale. Elle assure seule toute la chaîne de production d'eau potable : prélèvement, transfert, traitement et distribution dans le réseau urbain. Le prix de l'eau est national et tarifé par tranches.

La SONEDE gère l'adduction en Eau Potable des communes de plus de 500 habitants et des villages à proximité de ses canalisations. L'AEP des autres zones rurales est assurée par le Génie Rural.

- **Les Agences du Ministère de l'Agriculture :**

- L'Agence pour la Promotion de l'Investissement Agricole (APIA) a été créée en 1982. L'agence est un Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial (EPIC) rattaché au Ministère de l'Agriculture. Elle a été mise en place pour permettre un suivi particulier des investissements destinés à l'agriculture.
- La Banque Nationale Agricole (BNA) ;
- L'Agence de Réforme Agraire, créée en mars 1977 ;
- L'Agence de Vulgarisation, créée en 1990.

- **L'Unité Centrale de Suivi et d'Evaluation des Périmètres Irrigués :**

Créée en septembre 97, l'Unité est formée par des représentants de chaque DG et est directement rattachée au Ministre. Sa mission est l'étude des PPI par une approche globale, intégrant les approches sectorielles des différents CRDA. Elle doit pouvoir aboutir à des recommandations pour améliorer la production des Périmètres irrigués. Si sa compétence s'étend en théorie sur tous les périmètres irrigués, elle ne s'occupe en pratique que des PPI dont le taux d'intensification est inférieur à 50%.

- ◊ *L'Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche (UTAP)*

Fondée en 1950, elle se définit comme « le couronnement d'un mouvement syndical agricole qui a démarré en 1920" (brochure de l'UTAP). C'est une fédération d'environ 2000 associations locales. Ses missions sont :

- aider les agriculteurs à comprendre le bien fondé de la politique de l'Etat ;
- représenter les agriculteurs à plusieurs Conseils d'Administration, comme ceux de la SONEDE ou de l'Agence de la Réforme Agraire ;
- jouer le rôle d'intermédiaire, en cas de problème, entre l'agriculteur et l'administration.

1.2.5.2 Les institutions régionales

Les institutions régionales ont autorité sur la région administrative qu'est le gouvernorat.

- ◊ *Le Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA)*

Le CRDA est une institution qui existait déjà dans les années 80, mais qui n'a réellement pris de l'ampleur que lors de la décentralisation de 1989 (loi du 8 mars 1989). Lors de cette décentralisation, les CRDA sont passés du rang de Direction à celui de Direction Générale. Le CRDA s'occupe, à l'échelon du gouvernorat, de l'agriculture et des ressources en eau. La compétence de ces organismes s'étend sur la région administrative du gouvernorat.

- ◊ *Les représentations locales du Commissariat Régional de Développement Agricole*

Les structures locales du CRDA sont les Centres Techniques de Vulgarisation Agricole (CTV) et les Cellules de Rayonnement Agricole (CRA).

Ces représentations locales reproduisent la structure du Ministère de l'Intérieur :

| Structure du Ministère de l'Intérieur | Structure du Ministère de l'Agriculture |
|---------------------------------------|---|
| Gouvernorat | CRDA |
| Délégation | CTV |
| Secteur | CRA |

Les CTV sont les représentations locales du CRDA dans chaque délégation. Ils suivent les productions agricoles de la délégation. Chaque CTV comporte plusieurs arrondissements thématiques. Les agents du CRA sont les vulgarisateurs qui s'occupent principalement des Périmètres Publics Irrigués (PPI).

◇ *Les arrondissements du CRDA concernés par l'eau*

Le CRDA est constitué d'unités thématiques, les arrondissements. Les arrondissements dépendent hiérarchiquement du Commissaire, mais ils sont formés et suivis par leur Direction Générale.

• **l'arrondissement du Génie Rural**

"Chargé de la réalisation des programmes et des projets d'hydraulique agricole d'eau potable rurale ainsi que d'équipement rural, il est chargé également de la promotion et de l'encadrement des associations d'intérêt collectif." (décret du 29 juin 1989).

• **l'arrondissement de l'exploitation des PPI**

"Chargé de l'exploitation du réseau d'irrigation dans les PPI et la valorisation de l'utilisation des ressources hydrauliques dans l'ensemble des périmètres irrigués".

• **l'arrondissement de la maintenance des PPI**

"Chargé d'assurer l'entretien du réseau d'irrigation, des infrastructures et ouvrages hydrauliques."

• **l'arrondissement des ressources en eau**

"Chargé des études relatives au développement des ressources en eau ainsi que du contrôle du Domaine Public Hydraulique."

En plus du suivi des ressources hydriques superficielles et souterraines, cet arrondissement est également chargé de la police des eaux, ses agents sont assermentés.

• **l'arrondissement de la Conservation des Eaux et des Sols (CES)**

"Chargé de la réalisation des programmes et projets de CES".

• **l'arrondissement Encouragement et Financement**

"Chargé de la supervision des actions d'octroi des crédits agricoles ainsi que de la promotion des structures professionnelles agricoles".

• **l'arrondissement des Sols**

« Chargé des études pédologiques et de la vocation des sols ».

Le schéma de l'annexe 1 illustre l'ensemble de l'organisation du CRDA de Kairouan.

◇ *Le Groupement d'Intérêt Hydraulique (GIH)*

Par décret du 27 octobre 1987, le GIH est composé : du gouverneur (président), du commissaire (secrétaire), des représentants du Ministère des Finances, Ministère de la Santé, la SONEDE, les arrondissements du Génie Rural et des Ressources en Eau, l'UTAP et 7 membres des AIC du gouvernorat. Le GIH crée et peut dissoudre les AIC du gouvernorat.

1.2.6 Bilan actuel et perspectives de gestion

1.2.6.1 L'an 2000, période de préservation en vue des pénuries annoncées

- **La ressource en eau de surface tunisienne est limitée**, la phase de mobilisation est pratiquement achevée à 90% - 95% d'après les résultats présentés dans la stratégie décennale 1990-2000 (Horchani, 1995). Désormais la construction de nouveaux aménagements de stockage sera d'un coût élevé pour un bénéfice de plus en plus réduit, car les sites favorables sont déjà aménagés. Des réseaux de transfert régionaux sont en construction pour amener le surplus des écoulements de la région Nord vers les régions côtières du Centre et Centre Sud, où se situent les zones très peuplées notamment durant la période touristique. Les zones de l'intérieur du Centre et du Sud devront assurer leur autonomie.

- **La ressource en eau souterraine** à partir des aquifères renouvelables du Centre et des aquifères fossiles du Sud (oasis) est également exploitée soit par des périmètres publics, soit par des périmètres collectifs gérés par des Associations d'Intérêt Collectif mais encore contrôlées par les CRDA, soit enfin par les forages et puits privés. Ces derniers sont particulièrement difficiles à contrôler puisqu'il est possible de creuser un puits sans autorisation du moment qu'il ne dépasse pas les 50 mètres. Ces puits se sont multipliés depuis quelques années et il est difficile d'en suivre l'évolution de même que les volumes réels prélevés. Avec l'apparition de nouvelles pompes plus économiques à l'achat, l'exploitation de ces puits s'est intensifiée.

D'autre part les agriculteurs ont mis à profit des vides juridiques pour aménager leurs puits de manière à ne pas outrepasser la loi tout en exploitant les nappes à des profondeurs supérieures à 50 mètres. Une technique de "sondage à bras" consistant à réaliser des forages rustiques au fond des puits s'est généralisée depuis quelque temps, de nombreux puits sont à sec mais sont équipés d'un ou plusieurs sondages. Le sondage est donc une technique économique pour intensifier l'exhaure tant que la profondeur d'aspiration ne dépasse pas 5 ou 6 mètres.

L'évolution récente de cette technique laisse penser que prochainement, ces sondages dépasseront les 8 pouces de diamètre et pourront donc accueillir des pompes électriques immergées sans pour cela être considérés comme des forages et tomber sous le contrôle de l'administration.

- La plupart des études stratégiques sur l'eau réalisées à la demande du gouvernement tunisien font état d'un bilan offre/demande en eau négatif aux alentours des années 2010. Or le bilan des nappes phréatiques (Bechtel/SCET, 1998) fait déjà état d'une surexploitation généralisée des aquifères avec une intensité variable selon les régions. Les aquifères représentent les seuls réservoirs à régulation interannuelle dont l'exploitation n'est pas maîtrisée directement par l'Etat.

Leur fonctionnement n'est pas très bien connu (géométrie, taux de renouvellement, modélisation, exploitation). Le constat de surexploitation est surtout fondé sur l'observation des niveaux piézométriques en baisse continue, mais il reste à approfondir les études sur les aquifères ce que prévoit de faire le gouvernement par une série d'appels d'offres pour installer des réseaux de surveillance et élaborer des modèles d'exploitation de ses principaux aquifères pour construire à terme des modèles de gestion de ces réservoirs.

Face à ces différents constats, l'Etat tunisien s'est résolument engagé vers une maîtrise de la demande en eau et dans un désengagement progressif des frais d'entretien des aménagements hydrauliques.

1.2.6.2 Grands principes de la gestion de la demande en eau

Cette volonté s'appuie sur plusieurs principes généraux et des orientations techniques, réglementaires et institutionnelles.

- L'allocation de la ressource en eau

Dans ce contexte de compétition accrue autour des ressources en eau et des financements, c'est sur la part allouée à l'irrigation que cette maîtrise va s'exercer en priorité. Selon la loi, l'eau potable est prioritaire et récemment l'eau "touristique" a été classée comme eau potable, ce qui veut dire qu'en période estivale, l'agriculture devra réduire ses consommations. Ce choix est

justifié par le fait que les usages agricoles sont de loin les plus gros consommateurs (environ 80% de la ressource allouée) et qu'il valorisent mal l'eau qu'ils utilisent (près de 50% d'efficacité selon les différentes études).

- **Le désengagement financier de l'Etat**

La construction, l'entretien et la réhabilitation des aménagements hydro-agricoles grèvent fortement le budget tunisien. Si l'Etat entend garder le contrôle complet des grands ouvrages hydrauliques (grands barrages, barrages collinaires, canaux de transferts régionaux) pour assurer sa politique de répartition de la ressource, il entend désormais faire supporter aux usagers agricoles une partie des frais de fonctionnement des infrastructures de captage et de distribution. De la même manière, les pouvoirs publics recherchent des mécanismes pour faire payer aux irriguants privés l'utilisation d'une ressource hydrique commune, qu'ils s'efforcent de maintenir.

Ces 2 grands principes se traduisent par une série d'actions dont les principales sont les suivantes :

- **Mise en place de petits ouvrages, nombreux et variés**

Les bassins versant sont aménagés par tout une série d'ouvrages localisés et en cascade : banquettes ou *tabias* dans le haut des versants pour favoriser l'infiltration et diminuer l'érosion par ruissellement ; *jessours* dans les petits thalwegs pour éviter les phénomènes d'érosion régressive due à l'agressivité des écoulements et l'écroulement des berges ; lacs et barrages collinaires (plus de 1000 en construction) pour mieux répartir spatialement les stocks d'eau à l'intérieur des grands bassins, fixer la population rurale autour de ces ouvrages et protéger les grands ouvrages en aval de toute sédimentation excessive.

- **Politiques d'économie d'eau**

Elles s'organisent autour de subventions sur les équipements d'irrigation plus efficaces (jusqu'à 60% de subvention pour l'installation de goutte à goutte) et d'essais de tarification pour inciter les agriculteurs à consommer moins d'eau tout en maintenant leur productivité par une meilleure valorisation économique de l'eau.

- **Les structures de gestion associatives**

L'application des orientations précédentes seraient confiées à des Groupements d'Intérêt Associatif (GIC) dérivés des anciennes AIC. Le changement de nom n'est pas innocent, le GIC ayant une marge de manœuvre plus importante que les anciennes associations. Les pouvoirs publics fondent beaucoup d'espoir sur ces nouvelles institutions.

1.3 LES GIC : ELEMENTS-CLES D'UNE GESTION DE L'EAU RATIONNELLE EN TUNISIE

1.3.1 Statut et fonctionnement

1.3.1.1 Législation

Les textes constitutifs des GIC sont :

- le Code des Eaux de 1975, modifié par la loi du 6 juillet 1987,
- le décret du 27 octobre 1987,
- la loi du 12 janvier 1988
- le décret du 14 décembre 1992.

Les GIC sont institués par le Ministre de l'Agriculture après avis du GIH. Ils sont dotés de la personnalité civile et créés sur l'initiative des usagers ou de l'administration.

Les activités des GIC peuvent concerner l'eau d'irrigation ou potable, ainsi que l'assainissement. Les GIC ont pour objectif l'exploitation du Domaine Public Hydraulique sur leur périmètre, l'exécution de travaux d'entretien concernant celui-ci, l'irrigation ou le drainage des terres, l'exploitation du système d'eau potable. L'infrastructure appartient toujours à l'Etat, mais son entretien et sa gestion est confiée aux utilisateurs. Les GIC sont contrôlés par le GIH, encadrés et assistés techniquement par le CRDA.

En général, les GIC gèrent des périmètres sur lesquels la ressource en eau est constituée de forages et/ou de sources naturelles, tandis que le CRDA gère directement ceux qui sont alimentés par des barrages.

1.3.1.2 Mode de fonctionnement

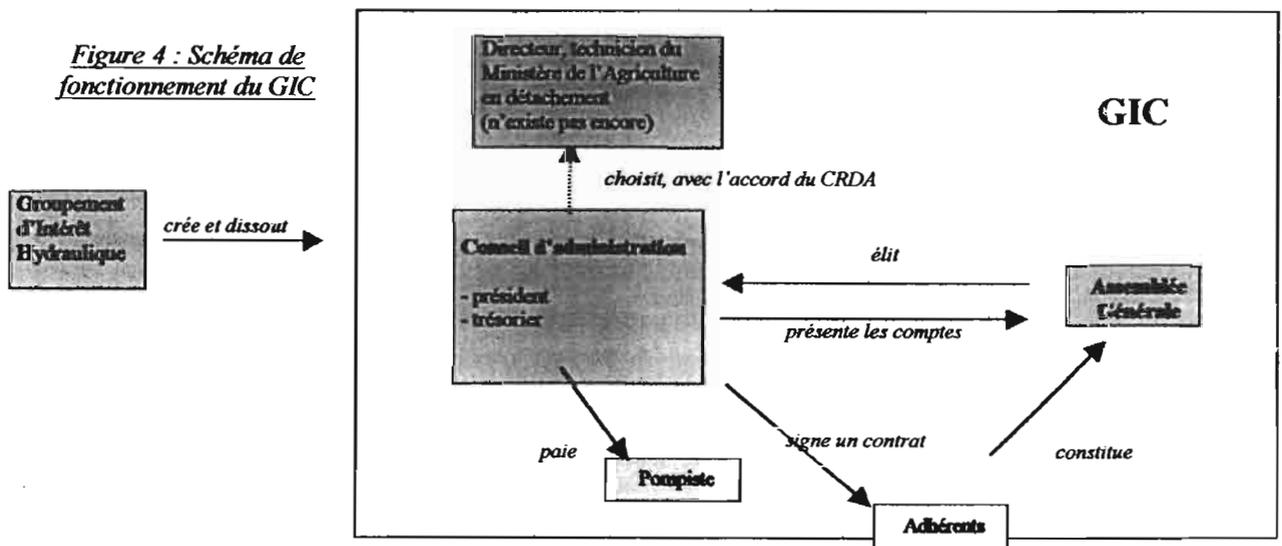
◇ Organisation du GIC

Le Conseil d'Administration qui gère le GIC se compose de 3 à 9 membres, élus par l'Assemblée Générale pour 3 ans, avec un renouvellement par tiers. L'AG rassemble l'ensemble des adhérents, et se réunit au moins une fois par an. Le CA élit le président qui assure l'exécution des décisions du conseil. Le CA peut également nommer un directeur, sur proposition du ministre de l'Agriculture. Il s'occupe alors de la gestion courante de le GIC, qui le rémunère.

Mais cette organisation reste théorique: il n'y a jamais eu un seul directeur nommé dans une GIC de Kairouan à notre connaissance.

En pratique, le directeur peut être le président du Conseil. Avant 1996, dans le gouvernorat de Kairouan, le Conseil d'Administration était nommé par le délégué. Les Assemblées Générales commencent à avoir lieu : la cellule GIC fait distribuer des cartes d'adhésion à tous les agriculteurs du GIC pour l'élection du Conseil d'Administration. L'intérêt principal de l'Assemblée Générale est la présentation des comptes de l'année à l'ensemble des adhérents.

Figure 4 : Schéma de fonctionnement du GIC



◇ Gestion financière

- Le GIC possède son budget propre, pour lequel la Cellule GIC (CRDA) l'assiste, et le GIH l'approuve. Un trésorier bénévole, désigné par le CA, assure la gestion comptable. Il perçoit ou paie les différentes sommes.

| INVESTISSEMENT | | FONCTIONNEMENT | |
|--|----------------------------|--|--|
| Dépenses | Recettes | Dépenses | Recettes |
| Entretien, réparations Remboursement annuités | Cotisations Vente d'eau | Travaux neufs Remboursements annuités | subventions Prélèvements sur la réserve |
| Frais de gestion Imprévus | Prêts, subventions | Etudes | Dons, emprunts |

Les GIC ont à présent la possibilité légale d'assumer des activités de coopératives agricoles (achats d'intrants, de matériel...).

- **Le recouvrement des coûts :**

- *Pour l'AEP*

Le système habituel de recouvrements des coûts est la cotisation : chaque famille qui a accès à une borne fontaine paie un abonnement. Ce système est peu équitable et n'encourage pas l'économie d'eau. De ce fait, la cellule GIC met progressivement en place un contrat de gardiennage et de gérance : elle constitue des groupements d'une trentaine de personnes autour d'une borne fontaine, sur laquelle se trouve un compteur. Une personne du groupement, le « gérant », signe un contrat avec le GIC. Chaque mois, le GIC relève la consommation et ce gardien est chargé de prélever les paiements. Sur le prix initial calculé à partir du volume noté par le compteur, 5% sont déduits pour tenir compte des pertes, et 30% sont donnés au gardien.

C'est au groupement de décider comment il répartit le paiement, soit une cotisation identique pour les familles, si les groupements sont homogènes, soit une tarification binôme, avec par exemple un prix de 1 millime le litre. Le gardien n'ouvre la borne fontaine qu'à des heures fixes. Dans un GIC, l'application de ce système de paiement a permis de passer d'une consommation annuelle de 44 000 m³ à 20 000 m³.

- *Pour l'irrigation*

Le prix est de l'ordre de 60 millimes/m³ (soit environ 3 centimes/m³). L'agriculteur doit payer par avance (mandat,...). Pour les exceptions, le Conseil d'Administration prend ses responsabilités.

1.3.2 De la théorie à la réalité : limites du fonctionnement actuel des GIC d'irrigation

En Décembre 1996, sur un total de 2 033 GIC légalisées, 564 gèrent les ressources en eau utilisées pour l'irrigation, et le reste gère les ressources pour les besoins en eau potable.

Les ressources en eau mises à la disposition des GIC (y compris GIC d'eau potable et GIC mixtes) proviennent de 1 099 puits profonds, 411 puits de surface, 103 sources naturelles et 8 barrages (DGGR, Décembre 96).

Les GIC d'irrigation gèrent environ 56 588 ha de périmètres irrigués. Les gouvernorats de Sidi Bouzid, Kébili, Gabès, Tozeur et Gafsa possède les plus grandes surfaces de GIC (8500 à 4520 ha). C'est là également que sont réalisés les investissements les plus importants.

Sur 564 GIC d'irrigation légalisés, 446 sont fonctionnels.

Les gouvernorats du Sud tunisien (Kébili, Gabès, et Tozeur) ont une excellente réussite, car leurs GIC sont des oasis possédant une tradition d'autogestion importante. Le reste est plus faible, avec 46,5 à 60 % de GIC fonctionnels. Ceci est lié à un mauvais état des ouvrages et des réseaux, ainsi qu'à une habitude d'assistanat de l'Etat.

1.3.2.1 Contraintes et difficultés des GIC : traits généraux

- **Les réseaux** gérés par les GIC sont parfois défectueux, soit parce qu'ils l'étaient déjà avant leur conversion, soit parce que la maintenance n'est pas assurée.

- **Les CA des GIC** souffrent de l'analphabétisme et de l'âge de ses membres, par ailleurs bénévoles, donc pas toujours disponibles.
- **Les Cellules GIC**, rattachées aux arrondissements Génie Rural des CRDA, sont entre autre chargées de la légalisation et de la dissolution des GIC, de la mise à jour des dossiers, de tout ce qui concerne le budget (élaboration, approbation...), de l'encadrement technique grâce à des journées de formation. Mais elles manquent de moyens humains et matériels, ce qui les empêche de suivre correctement les GIC dont ils ont la charge.
- **En ce qui concerne la situation financière**, certaines GIC rencontrent des difficultés à équilibrer leur budget. En général, ces problèmes sont dus à des prévisions fausses concernant la consommation d'eau, des conflits sociaux, un réseau défaillant entraînant des frais de réparation trop importants, ou encore un mode de facturation mal adapté. Mais d'autres GIC arrivent à retirer des bénéfices important, qu'ils destinent alors à l'amélioration du réseau, ou à d'autres activités comme se lancer dans celles d'une coopérative : achat de matériel agricoles, achat d'intrants..
- **Les contrats de gérance entre GIC et administration** (non prévus par les textes) rencontrent peu de succès, car l'une des deux parties est souvent en désaccord avec les conditions exigées.
- **Le statut des GIC** fait parfois obstacle à un meilleur fonctionnement : pas assez exigeante sur la formation et l'âge des membres du CA, et trop rigide en ce qui concerne le fond de réserve. Les dysfonctionnements nombreux découragent les agriculteurs, qui posent alors plus de problèmes aux GIC. Ceux-ci sont également entravés par la contrainte d'une ressource de plus en plus rare.

Comme il l'a été dit précédemment, ces problèmes concernent peu la région du Sud. Par ailleurs, la ressource des GIC du Nord est essentiellement sous forme d'eau de surface (vallée de la Medjerda). C'est donc dans la Tunisie centrale que l'on trouve la grande majorité des GIC utilisant des forages et dont le fonctionnement est problématique.

1.3.2.2 Cas des GIC du gouvernorat de Kairouan

Le rapport d'analyse, réalisé par le bureau d'études Eureka en 1999, est basé sur des questionnaires remplis par les Cellules GIC, ainsi que des enquêtes de terrain, menées sur un échantillon. Il présente le bilan suivant.

Il existe 43 GIC d'irrigation dans le gouvernorat de Kairouan, dont 21 fonctionnels.

◊ *Mise en valeur*

L'assolement se répartit dans les cultures maraîchères (38%), l'arboriculture (30%), et les grandes cultures (24%). L'arboriculture se développe aux dépens des grandes cultures, traditionnellement perçues comme ne nécessitant pas d'irrigation.

L'équipement des périmètres irrigués en bornes est encore faible pour 5 GIC sur les 20 fonctionnelles, et performant pour 8 d'entre elles.

Le mode d'irrigation traditionnel (gravitaire) est encore largement majoritaire au niveau des parcelles.

◊ *Aspects techniques*

Tous les GIC utilisent le pompage comme source d'eau. Les trois quarts d'entre eux ont un réservoir, d'une capacité moyenne de 200 à plus de 500 m³.

La grande majorité des GIC dispose d'un unique point d'eau, muni d'une seule station de pompage.

Conduites à ciel ouvert et sous pression sont conjointement utilisées. 55% de la longueur cumulée des réseaux est du premier type. Ces systèmes de distribution sont pour la plupart vétustes (plus de 20 ans), d'une longueur moyenne d'environ 7 km.

En ce qui concerne les GIC fonctionnels, ils sont l'objet de pannes fréquentes (en moyenne 7 par an) et longues (3 jours par panne), touchant le système d'alimentation électrique, comme le système mécanique. Ceci est en lien avec la vétusté des installations, ainsi que la non prévoyance des gestionnaires, qui ne sont pas habitués à faire appel à des entreprises privées de maintenance.

La quasi-moitié des GIC fonctionnels ne disposent pas de documents techniques au niveau des stations. Ces derniers sont en revanche souvent disponibles pour les réseaux hydrauliques. Les carnets de bords, présents partout, sont moyennement tenus.

◇ *Aspects financiers*

L'eau est vendue à l'heure d'irrigation, et payée à l'avance dans la plupart des cas.

Seul le GIC de Souaïdia possède un contrat d'abonnement à l'eau. De même, le contrat de gérance est peu utilisé, car étant mal mis à profit, il apparaît comme une lourdeur administrative supplémentaire. La STEG (électricité) est presque le seul tiers avec lequel les GIC réalisent des contrats.

En moyenne, les recettes de 1997 sont supérieures aux coûts, mais ceci est dû aux faibles dépenses, en particulier en ce qui concerne la réalisation de l'entretien, que les GIC devraient assumer.

◇ *Aspects sociaux*

En moyenne, les GIC sont gérés par une génération avoisinant 40 à 50 ans, d'un niveau d'instruction élémentaire.

Sur 21 GIC fonctionnels, 13 sont jugés d'un fonctionnement moyen, et 7 d'un fonctionnement satisfaisant par leurs usagers.

◇ *Situation de la Cellule GIC*

La Cellule GIC possède 10 membres, dont 7 ingénieurs. Elle dispose d'un budget de 12 000 DT/an, et d'une base de données assez importante. Une zone à couvrir est attribuée à chaque membre. Elle réalise des visites d'encadrement (397 j en 97), de sensibilisation (184 j en 97), et de formation (33 j pour 510 bénéficiaires en 97).

◇ *Le soutien politico-administratif :*

Des réunions du GIH (groupement d'intérêt hydraulique) ont lieu en moyenne 2 fois par an, afin de discuter des problèmes rencontrés par les GIC, et des améliorations à apporter.

Les relations de la Cellule GIC avec son environnement politico-administratif semblent plutôt déficitaires.

Au total, les principales difficultés rencontrées par les GIC concernent le fonctionnement du système de distribution, l'absence de comptabilité, et le niveau d'instruction faible des membres des CA.

Actuellement, les remèdes proposés visent surtout la sensibilisation et l'encadrement.

1.3.3 Une recherche d'accompagnement

Pour faire face aux problèmes d'approvisionnement en eau, la Tunisie a complété son dispositif technique par un grand nombre de petits ouvrages répartis dans l'espace et s'orientent vers une gestion sociale décentralisée ou de proximité en essayant de systématiser la mise en place des Groupements d'Intérêt Collectif.

Mis à part la présence incontournable des grands ouvrages, on revient donc au schéma historique de petits aménagements intégrés avec une gestion collective que l'on voudrait forte et autonome, mais les conditions ne sont plus les mêmes.

D'une part, il existe désormais une grande fiabilité dans la construction des ouvrages et une diversité technique accessible pour partager, transporter et appliquer l'eau à la parcelle ; cette technicité plaide pour de meilleures performances.

Par contre, la construction des infrastructures (emplacement et caractéristiques) et l'organisation sont imposées par l'Etat à des populations qui ont souvent perdu de leur savoir-faire hydraulique. Il n'y a plus de cohérence d'ensemble (technique et sociale) ce qui explique les difficultés de mise en place de cette phase de désengagement ou décentralisation.

Pour accompagner sa politique, le gouvernement tunisien suscite de nombreux programmes de recherche pour déterminer les modes de fonctionnement adéquats et les leviers d'action efficaces lui permettant de transformer une volonté affichée en réalité tangible.

Le présent travail sera centré sur l'analyse du fonctionnement des GIC

2 CADRE D'ETUDE ET OBJECTIFS

2.1 CADRE D'ETUDE : LE PROJET MERGUSIE

Le projet MERGUSIE est un projet de recherche pluridisciplinaire suscité par le Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique et à la Pêche et agrémenté par le Secrétariat d'Etat à la Recherche Scientifique et Technique (SERST) comme Programme National Mobilisateur.

MERGUSIE associe des instituts de recherche tunisiens (Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis - ENIT, Ecole Nationale d'Agronomie de Tunis - INAT), des Directions Techniques Nationales (Génie Rural, Ressources en Eau), le CRDA de Kairouan et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

L'objectif global du projet est de mettre au point des méthodes et des outils de gestion intégrée de l'eau sur le bassin du Merguellil, situé dans la région centre et soumis à un climat semi-aride où les précipitations varient entre 250 et 500 mm de pluie par an.

Le bassin supérieur de 1100 km² est fortement aménagé : 25% de sa superficie est occupée par des banquettes ou *tabias* et il contient 38 lacs collinaires ainsi que 2 barrages collinaires. Plusieurs de ces ouvrages sont connectés à des aquifères locaux qu'ils rechargent en permanence.

Le bassin du Merguellil est fermé par un grand barrage sur le site d'El Haouareb, ce barrage recharge en permanence une grande plaine d'effondrement située en aval, la plaine de Kairouan. La construction du barrage d'El Haouareb a été suscité par les fortes crues de 1969 qui ont inondé la ville de Kairouan provoquant de nombreux dégâts. Le barrage est donc dimensionné pour supporter des crues exceptionnelles, ce qui explique en partie son taux de remplissage assez bas. D'autre part, comme l'ouvrage est situé à la confluence de plusieurs nappes, l'eau de la retenue transite continuellement soit latéralement à travers le déversoir de crues, soit en-dessous de l'ouvrage pour remplir l'aquifère de la plaine de Kairouan située juste en aval.

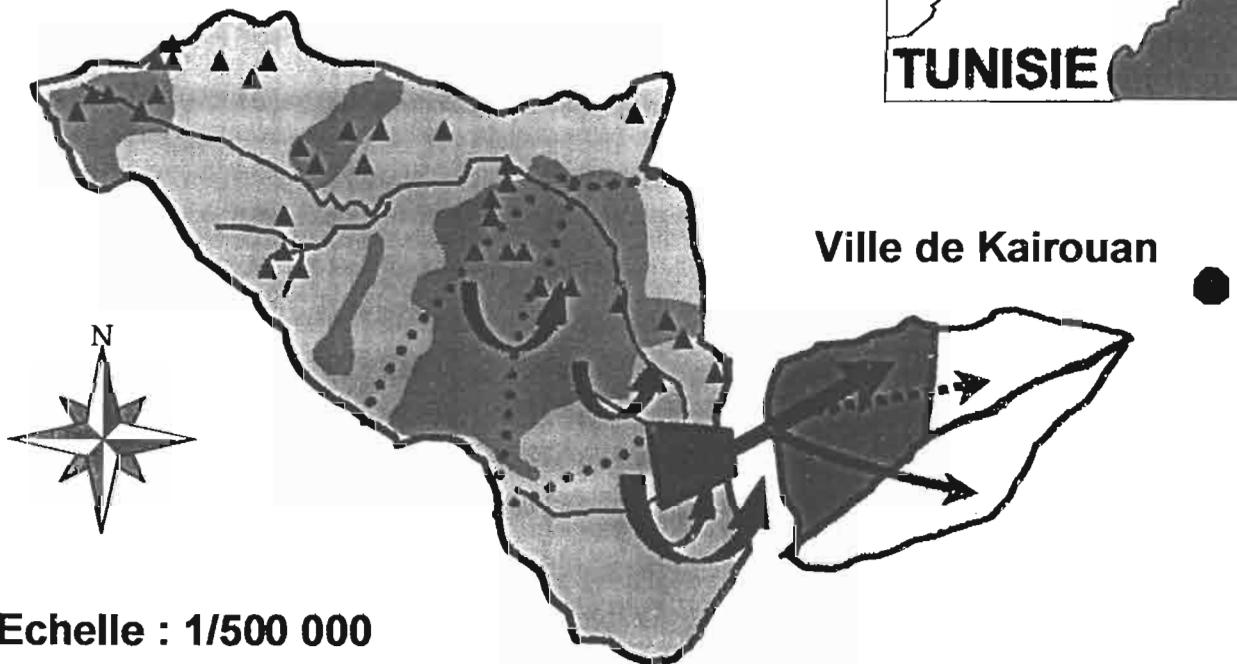
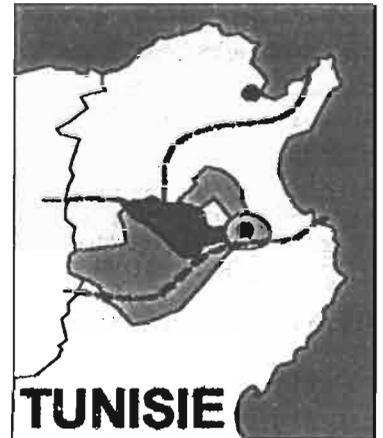
Le barrage d'El Haouareb a plusieurs conséquences sur la plaine aval. La recharge qui se faisait auparavant le long du lit du fleuve, s'effectue maintenant à partir du barrage, son cheminement a donc changé. La partie directement en aval est bien rechargée alors que les parties un peu plus éloignées reçoivent moins d'eau qu'auparavant.

D'autre part la présence du barrage a sécurisé la plaine en aval. Les agriculteurs sont maintenant certains de ne plus voir habitations et exploitations détruites par des flots intempêtes. L'occupation de sol est plus intense qu'auparavant, certains n'hésitant pas à investir l'ancien lit mineur.

Actuellement l'aquifère de Kairouan est exploité pour alimenter en eau potable les zones côtières et touristiques du Sahel qui sont proches ainsi que la ville de Kairouan. Mais l'usage prépondérant est bien entendu l'agriculture irriguée à partir de forages ou puits privés. Depuis une trentaine d'années, on note un abaissement progressif de l'aquifère d'environ 0,5 mètre/an avec un gradient de baisse pouvant dépasser 1,5 m/an les dernières années.

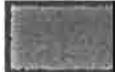
Le projet MERGUSIE a délimité une zone aval de 20 000 hectares sous influence directe du barrage d'El Haouareb pour étudié les dynamiques entre accès à la ressource en eau et usages agricoles de cette eau. La zone comprend plus de 2000 exploitations agricoles (irriguées ou non), les irriguants sont soit privés soit regroupés dans des périmètres directement gérés par l'Etat (Périmètres publics) ou dans des GIC. On rencontre dans cette zone toute la diversité des situations nationales.

BASSIN VERSANT DU MERGUELLIL



Echelle : 1/500 000

Bassin amont : usages de l'eau ponctuels

-  Bassin versant
-  Aménagements CES
-  Lacs / barrages collinaires
-  Limites des nappes

Plaine aval : irrigation intensive

-  Recharge forte
-  Recharge non estimée
-  Recharge très faible

 Barrage El Haouareb

 Transferts d'eau souterrains

De nombreuses études ont été lancées pour étudier le comportement et les stratégies des irriguants de toute nature, les premières se sont surtout intéressées aux irriguants privés, les plus méconnus. Or la zone aval comprend 15 périmètres collectifs, certains en gestion publique, d'autres en AIC formalisée et en cours de passage en statut de GIC, d'autres enfin sur le point de passer directement d'une gestion publique à une gestion par GIC, avec une réhabilitation technique préalable.

Le présent travail s'insère dans l'analyse des périmètres gérés collectivement ou en passe de l'être.

2.1.1 Analyse intégrée des GIC

L'étude des GIC de la plaine de Kairouan fait l'objet d'un travail pluridisciplinaire rassemblant des analyses économiques au niveau de l'exploitation (INAT), la bonne compréhension de la gestion sociale réelle du tour d'eau (Ecole Supérieure Agronomique de Mograne), une étude de la comparaison entre irrigations pratiquées et besoins en eau des cultures (S. Lardilleux), des mesures d'efficacité de transport dans les réseaux de distribution (IRD) et une analyse économique globale de la gestion collective (IRD, Cemagref).

2.1.1.1 Objectif

Les GIC doivent permettre de limiter la demande en eau afin de préserver la ressource. Une fois mis en place par l'Etat, nous pouvons considérer que le débit d'exhaure est fixé. A partir de là, on peut se demander quelle gestion il est préférable de mettre en place afin d'obtenir un gain économique optimum, et de limiter la construction de puits privés.

Or il est nécessaire d'établir le diagnostic du fonctionnement actuel des GIC avant de faire toute proposition d'amélioration.

L'ensemble de l'étude cherche donc à répondre à deux questions clés :

- quelle est l'efficacité actuelle des gestions technique et sociale de l'eau ?
- quel est le potentiel de gain dans un changement des règles de partage et/ou des infrastructures?

Si le critère principal d'évaluation est la valorisation totale de l'eau sur l'ensemble du périmètre, d'autres critères seront évalués, tels que l'équité de la distribution, la possibilité de mise en place d'assurance par le biais de la ressource en eau et la durabilité du système.

2.1.1.2 Méthodologie

On distingue 4 principaux axes d'étude:

- Mesure des pertes dans les réseaux,
- Modélisation agronomique, pour faire l'audit de la distribution actuelle de l'eau, et tester des d'autres règles d'allocation de la ressource,
- Modélisation économique et prise en compte des modifications de la technologie d'irrigation,
- Etude du fonctionnement social du GIC.

L'étude touche trois niveaux dont l'échelle est différente :

- la parcelle, voire le champ,
- l'exploitation agricole,
- le GIC.

Elle part de l'échelle la plus petite, pour aller en augmentant.

La première phase du travail réside en effet dans la modélisation agronomique et économique. L'étude agronomique se base sur le champ, et les études économique et stratégique sur l'exploitation agricole.

Cette modélisation permet d'abord d'évaluer la situation actuelle, et dans un second temps, d'explorer différents scénarios de règles de gestion et/ou d'infrastructure.

On cherche aussi à comprendre les liens entre les différents niveaux et à articuler les différents modèles. Par exemple, voir comment intégrer la modélisation de bilan hydrique à la parcelle et donc l'impact sur le rendement dans le calcul économique des agriculteurs.

Pour tester des scénarios, on se base sur le diagnostic de la situation actuelle puis, petit à petit, on "libère" des paramètres :

| Phases d'étude | Paramètres | | |
|---|--------------------------|--------------------------|--|
| | infrastructure | tour d'eau | assolement |
| Phase 1 : diagnostic de la situation actuelle | réelle | réel | réel |
| Phase 2 : test de différents tours d'eau | réelle | autres règles | calculé par modélisation économique, sans puis avec interaction entre agriculteurs |
| Phase 3 : modification des infrastructures, à la fois au niveau collectif et individuel | différentes alternatives | différentes alternatives | calculé par modélisation économique |

2.1.1.3 Résultats attendus

Au final, l'étude complète devrait permettre :

- de calculer la valorisation réelle de l'eau sur le périmètre et proposer des solutions explicites de tour d'eau,
- de comparer les potentiels de gain respectif du changement de structure par rapport au changement de règles de partage,
- d'estimer les réactions des agriculteurs face à une modification des subventions à l'économie d'eau, ou bien à un changement des conditions macroéconomiques,
- d'estimer à partir de quel seuil de dysfonctionnement les agriculteurs essaient de construire des puits.

2.2 LES OBJECTIFS DU TRAVAIL

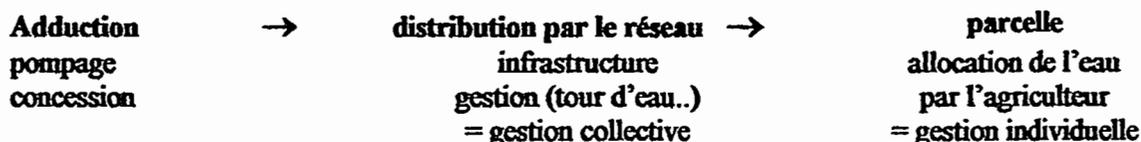
L'étude ci-présente traite de l'aspect agronomique. Elle concerne donc essentiellement le système infrastructure eau – sol – plante, et les échanges physiques qui s'y déroulent.

Elle vise à établir un diagnostic sur le fonctionnement de ce système en quantifiant d'abord le besoin en eau au niveau du champ, puis en dressant le bilan de satisfaction de ces besoins et enfin en essayant d'expliquer l'origine des défaillances.

Elle devrait par la suite permettre d'élaborer des scénarios d'irrigation "optima", d'en vérifier la pertinence et la faisabilité soit avec le réseau de distribution en place soit sur un réseau réhabilité.

Ce diagnostic veut montrer les causes individuelles et collectives de stress hydrique.

Les causes sont en effet possibles à plusieurs échelles :



En remontant le fil de l'eau, on étudie d'abord ce qui se passe au niveau de la parcelle, qui concerne donc un agriculteur, et les difficultés techniques, économiques ou stratégiques qu'il a rencontrées. Puis au niveau du réseau, il peut y avoir eu un problème collectif, concernant l'infrastructure (réseau défaillant, panne de pompe), ou la gestion (tour d'eau trop long).

Par ailleurs, la recherche de meilleurs rendements, donc de meilleurs profits conduira à de nouveaux scénarios de gestion du tour d'eau et de l'assolement.

Ce raisonnement devrait permettre de dégager des règles d'allocation de l'eau :

- au niveau de la parcelle ; quelle priorité l'agriculteur donne/devrait donner à quelle culture lorsqu'il manque d'eau, en fonction du rendement ou d'autres paramètres ;
- au niveau du périmètre ; quelle répartition du stress hydrique entre les parcelles (plutôt en bout de réseau ?), comparaison de la gestion pour une surface irriguée autorisée restreinte par rapport à une irrigation non limitée, quel tour d'eau s'il était géré de manière collective ?...

2.3 CHOIX DE L'ECHANTILLON

Une première étude des GIC a été réalisée par le bureau d'étude Eureka (rapport d'analyse de la situation des GIC/PI dans le gouvernorat de Kairouan présentée dans la première partie).

Toutefois, les données permettant de réaliser une analyse statistique manquent sur la population mère des GIC dans le Gouvernorat de Kairouan. Le choix de l'échantillon prélevé n'a donc pas pu être fait en fonction de sa représentativité. Il l'a été de manière raisonnée, en se basant les observations de terrain.

Des investigations sur le terrain ont permis de distinguer une vingtaine de GIC présentant des situations pertinentes pour l'étude et de connaître les difficultés rencontrées dans la transition PPI-GIC.

Le raisonnement conduisant à l'échantillon proposé est le suivant :

D'une part, les périmètres ont été choisis en priorité dans le bassin du Merguellil, mais la présence de cas intéressants assez proches et situés dans le gouvernorat de Sbikha a conduit à l'élargissement de la zone d'étude.

D'autre part, les GIC choisies possèdent une expérience collective d'au moins 4 ou 5 ans. Ceci est important, car la plupart des GIC n'en sont réellement que sur le papier, et ne fonctionnent pas encore indépendamment de l'Etat.

Ensuite sont entrées en compte les caractéristiques techniques :

L'échantillon ne concerne que des GIC sur forage. Le débit d'exhaure est fixé, ce qui permet d'étudier une gestion d'adaptation à une ressource fixe. Cette gestion rencontre de plus en plus de difficultés, en raison du vieillissement des équipements, et des abaissements potentiels de la nappe. C'est une gestion où les risques, vis à vis de la réussite d'une culture, sont de plus en plus forts.

Du point de vue système de distribution, nous avons choisi les deux cas possibles : basse pression ou canaux portés.

Par ailleurs, les GIC choisis rencontrent des difficultés différentes, et d'ordre croissant :

- soit le périmètre irrigué ne présente aucune difficulté,
- soit il souffre d'une infrastructure défaillante,
- soit d'une mauvaise gestion sociale,
- soit des deux.

Enfin, étant donné que la période actuelle est une phase de transition entre PPI et GIC d'irrigation, il est intéressant d'étudier les différents stades de cette transformation. Les 5 GIC choisies présentent une maturité plus ou moins grande vis à vis de l'état, le cinquième périmètre irrigué est ainsi un PPI, permettant ainsi de compléter la comparaison.

Par conséquent, l'échantillon ne constitue pas un choix statistique. Le pourcentage de représentativité de chaque GIC étudié n'est pas connu. Mais il contient un éventail complet des situations possibles, tant du point de vue technique, gestion, que statut.

Les GIC sélectionnés se nomment Khatem et Souaïdia, Mlelsa et Bled Abida. Le PPI est celui de Chebika Est. Les deux premiers périmètres irrigués appartiennent au gouvernorat de Sbikha et les autres, à celui de Kairouan.

La carte de situation est présentée en annexe 2.

De Souaïdia à Chebika Est, la situation est de plus en plus problématique, les difficultés s'étendant sur l'infrastructure et la gestion. Le GIC de Souaïdia représente la situation idéale ou tout concorde pour un bon fonctionnement (gestion technique et sociale), le PPI de Chebika-Est est l'exemple type d'un périmètre défaillant où les agriculteurs ont commencé à construire des puits privés.

2.3.1 Souaïdia

Le GIC de Souaïdia a une étendue de 120 ha divisés en 4 secteurs et 70 parcelles.

Le forage fut construit en 1991. Le réseau d'irrigation n'a commencé à fonctionner qu'avec le GIC, en 1994.

Profond de 180 m, le forage, fournit un débit de 40L/s. Un bassin régulateur de 50 m³ permet à un agriculteur d'irriguer, même s'il est seul à demander de l'eau. Il est équipé d'un régulateur automatique. Les 50 m³ sont néanmoins insuffisants l'été : quelques agriculteurs possèdent un système comprenant bassin, pompe et aspersion ou goutte-à-goutte. Ce système est en train d'être adopté par tout le GIC.

Tout le réseau, qui possède 4 lignes de distribution, est sous pression. Il bénéficie d'un certain équipement technique : 29 vannes, 25 vannes de sectionnement et 2 ventouses. La distribution sur les parcelles est encore majoritairement en gravitaire.

L'assolement est principalement constitué de blé, de piment et de pastèque, qui sont tous deux cultivés en intercalaire. Le maraîchage est de plus en plus pratiqué, en raison des possibilités croissantes du réseau.

Les règles concernant le volume d'eau accordé sont strictes : celui-ci est calculé sur la base de la mise en culture de 1/3 de la superficie en été et de 2/3 en hiver (à partir de 2 ha). Le tour d'eau est fixe entre agriculteurs, et dure en moyenne de 7 à 9 jours.

Le président actuel du GIC est autonome et responsable. Electromécanicien, il répare lui-même tous les incidents techniques de la pompe, ce qui permet une interruption très courte du tour d'eau.

Le GIC de Souaïdia ne rencontre pas de gros problème dans son fonctionnement, tant du point de vue technique que gestionnel. Il bénéficie de la présence d'un président capable d'intervenir en cas de panne, et plein d'initiatives.

Elle constitue donc un « bon » GIC, peut-être un modèle de fonctionnement à atteindre.

Des distensions se font sentir chez les membres principaux du GIC. Le président du GIC, agriculteur commerçant, n'est jamais disponible. Le nouveau trésorier comprend mal sa tâche. Il se laisse manipuler par les pompistes, dont l'un a déjà occupé le poste de trésorier, et l'autre ne s'entend pas avec le président.

D'autre part, il y a des problèmes de clientélisme, i.e. l'irrigation prioritaire des amis. Un **grand problème d'équité des volumes d'eau** a surgi à chaque réunion.

Personne ne veut donc s'investir dans la gestion ou le financement de la réparation des pannes. Ce qui engendre une perte de temps dans la réparation, et des tours d'eau de 15 jours.

Le système d'irrigation, équipé d'un réseau essentiellement à surface libre, est satisfaisant. Mais sa gestion est délicate, en particulier en ce qui concerne les tours d'eau. Ceux-ci ne sont pas répartis équitablement, ce qui engendre une dégradation des relations humaines. Ce climat de méfiance rend la gestion du GIC encore plus malaisée.

2.3.3 Bled Abida

Le GIC de Bled Abida a été créée en 1998, mais le périmètre irrigué fonctionne depuis 1969. La surface totale est de 125 ha, soit 70 parcelles.

Le réseau est alimenté par un forage dont la pompe fournit théoriquement 40 L/s. La distribution est un système à surface libre constitué de séghias en béton.

L'infrastructure, ayant plus de 20 ans, est vétuste. L'extrémité du réseau n'est même plus utilisée en raison des pertes trop importantes.

Les cultures majoritairement pratiquées sont l'olivier, souvent intercalé avec des céréales (blé, fourrage), ou des cultures maraîchères (corette, pastèque, melon). Les paysans se tournent de plus en plus vers l'élevage.

Concernant le tour d'eau, quatre agriculteurs doivent irriguer en même temps, recevant 10 L/s chacun. En période creuse, l'eau est fournie sur demande.

L'utilisation du tour d'eau commence dès la fin mars, en vue de l'irrigation de début mai. Le tour d'eau dure de 4 à 10 jours, et n'est pas prévu à l'avance. Il est fixe entre les personnes. Lorsqu'il y a une très forte tension sur la ressource en eau, **des compromis sont passés entre les agriculteurs et le GIC** pour choisir les cultures prioritaires.

La figure charismatique du GIC est le trésorier, qui est expérimenté et dominant.

La tenue du bureau témoigne d'un souci de transparence et d'information : affichage des ayant-droits, de slogans sur les objectifs d'une bonne irrigation, etc, même si beaucoup de décisions sont prises au sein du triumvirat trésorier-pompiste-président, sans concertation avec les autres usagers.

Bled Abida souffre donc de la vétusté de son réseau, qui empêche le bon fonctionnement du système, pourtant géré par un trésorier compétent, et bien organisé au niveau du tour d'eau.

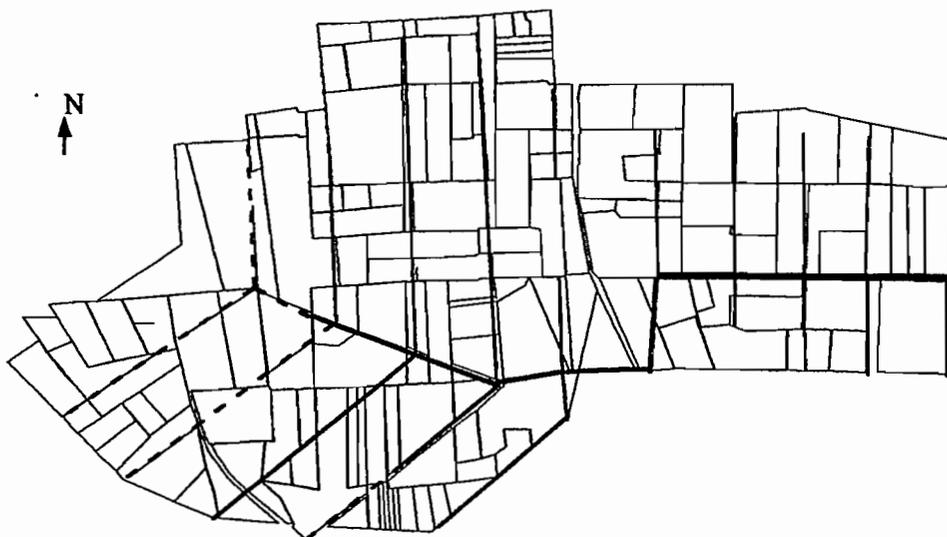


Figure 7 : Carte du périmètre de Bled Abida

2.3.4 Mlelsa

Mlelsa est un GIC mixte : eau potable et irrigation. Il a été mis en service en 1990 et dessert un périmètre de 114 ha (environ 60 parcelles) et un village de 100 familles.

En 1992, le CRDA a construit un forage à 85 m délivrant un débit théorique de 30 L/s. Ce débit se répartit dans trois lignes de 10 L/s chacune. Le forage refoule aussi l'eau jusqu'au réservoir d'eau potable.

Jusqu'au début 2000, le réseau primaire est sous pression grâce à des tuyaux BOER en acier galvanisé. Le secondaire est constitué de bargatères (tuyaux en PVC souple), menant l'eau jusqu'au parcelles. L'irrigation sur les parcelles se fait en gravitaire.

Le réseau primaire engendre des **pertes en eau très importantes** (jusqu'à 50 %), en raison de sa vétusté. La pression est peu satisfaisante, et la pénurie d'eau est forte en fin de ligne. C'est pourquoi le prix de l'eau est maintenu faible par le CRDA depuis plusieurs années (33 mil./m³), afin de ramener le coût réel à un niveau normal.

Les principales cultures sont le melon et la pastèque en été, et le blé et la fève en hiver.

Le tour d'eau est composé de trois mains d'eau indépendantes. **La concertation entre agriculteurs est quasi inexistante**, aussi bien pour le choix des cultures sur une même main que pour la répartition du tour d'eau. Quand vient le tour d'un agriculteur, il irrigue pendant la durée qu'il souhaite, sans se préoccuper de la durée totale du tour. Si bien que le tour d'eau peut durer jusqu'à 12 jours en période de tension.

Le CA de Mlelsa fonctionne mal. Il comprend le président, le trésorier, et 4 agriculteurs.

Le pompiste est agriculteur hors périmètre, ce qui est un cas rare, et montre les difficultés relationnelles qui existent sur ce périmètre irrigué (il a travaillé comme trésorier pendant 3 ans, mais ayant dû compléter le budget avec son salaire, il a abandonné.).

A partir du printemps 2000, un nouveau réseau de distribution a été mis en fonction. C'est un réseau enterré, qui utilise la pompe déjà en place. Egalement constitué de trois lignes, le réseau

primaire est utilisé, mais l'irrigation à la parcelle reste en gravitaire. Subventionné à 60% par l'Etat, le système d'arrosage en goutte à goutte devrait à terme être mis en place sur la majorité des parcelles.

On assiste donc actuellement à une transition du GIC de Mlelsa vers un système différent. Auparavant confrontée à un réseau défaillant, elle en acquiert maintenant un nouveau, dont la technicité n'est pas maîtrisée, et avec lequel on peut se demander de quelle manière les problèmes de gestion du tour d'eau vont évoluer.

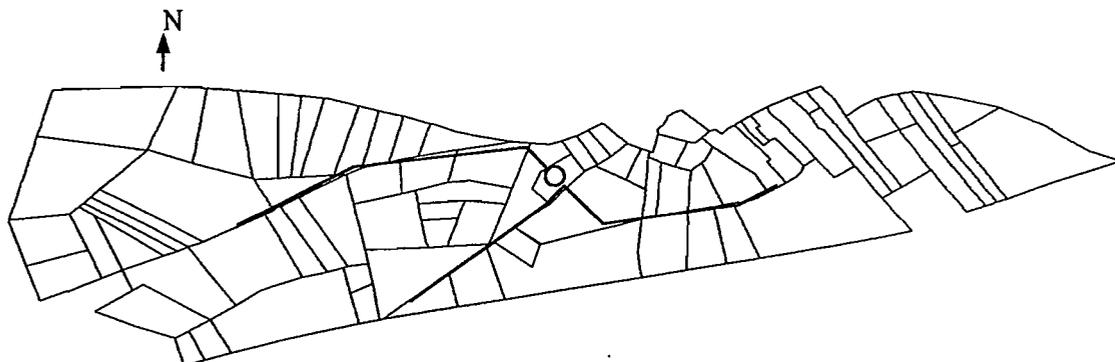


Figure 8 : Carte du périmètre de Mlelsa

2.3.5 Chebika Est

Le PPI de Chebika Est a été mis en service en 1956, et s'étend sur 150 ha, soit 52 parcelles.

Il est équipé d'un forage profond de 701 m, qui refoule 50 L/s jusqu'à un système de deux réservoirs suivis d'un régulateur de débit.

Le réseau de distribution, à surface libre, peut fournir un débit total maximal de 120 L/s, réparti en 4 mains d'eau de 30 L/s (ou 5 de 24 L/s). Il lui est possible de fonctionner 8h/jour à plein régime, sans recharge du réservoir (qui nécessite 14h).

En juin 98, la durée moyenne de pompage et de distribution était de 9h/j, avec un débit moyen distribué de 37 L/s. **Le réseau est donc sous-utilisé.**

En effet, les **pertes en eau** sont très importantes, et peuvent aller jusqu'à 40 %, en raison de la vétusté de l'infrastructure. Les canaux en ciment sont très souvent cassés, et remplacés par des séghias en terre. Ils sont mal entretenus, et servent d'abreuvoir, de lavoir, quand ils ne sont pas à moitié comblés par des dépôts de terre...ou de détrit. Le vol d'eau explique également ces pertes.

Il n'existe **aucune organisation concernant les tours d'eau** : ils ne sont pas du tout définis au préalable. Le calendrier est rempli au fur et à mesure des commandes. Par conséquent, dans les périodes de forte demande, l'agriculteur peut devoir attendre jusqu'à une semaine. Devant la faible demande habituelle, il n'y a pas non plus de motivation pour améliorer l'organisation.

Chebika est majoritairement planté en oliviers. Les cultures de plein champ ont évolué :

- Jusqu'en 1994, l'augmentation du prix de l'eau a fait baisser la consommation en eau, et entraîné le développement de cultures moins exigeantes. Ainsi, la proportion de jachère a augmenté. Les cultures maraîchères (melon, pastèque) ont cédé la place aux cultures d'hiver (céréales, fève).
- A partir de 1994, **les puits privés se sont fortement développés**, permettant l'intensification des cultures. Les cultures spéculatives telles que la pastèque et le melon ont repris de l'essor. Mais ces plantations épuisent le sol, et nécessitent un repos de 5 à 15 ans avant le semis suivant. Le propriétaire loue alors en métayage chez des agriculteurs qui n'irriguent pas, faute de moyens.

Ce développement de puits a créé un clivage entre les cultivateurs qui ont un puits et ceux qui n'en ont pas les moyens.

Il pose gravement problème, car l'exploitation de la ressource n'est dès lors plus contrôlable, et a lieu de manière anarchique. La zone de Chebika est définie comme une zone de surexploitation. Ces puits sont en infraction, mais aucune intervention ne les empêche de fonctionner. Un abaissement du niveau de la nappe a été constaté, d'environ 80 cm/an depuis dix ans.

Chebika Est présente donc le cas typique d'un périmètre public irrigué « rongé » par la multiplication des puits. Ce qui va poser problème lors de la rénovation, puisque de fait un certain nombre d'agriculteurs au sein du réseau ne seront plus intéressés par le cofinancement de cette rénovation.

Chebika Est vient de passer, depuis 2 mois, en GIC.

2.3.6 Tableau récapitulatif

| | Souaïdia | Khatem | Bled Abida | Mlelsa | Chebika Est |
|--|----------------|---------------|---------------|----------------|------------------|
| Statut | GIC | GIC | GIC | GIC | PPI |
| Système de distribution | Basse pression | Surface libre | Surface libre | Basse pression | Surface libre |
| fonctionnement du réseau | ☺ | ☺ | ☹ | ☹ | ☹ |
| Gestion sociale du tour d'eau | ☺ | ☹ | ☺ | ☹ | Gestion publique |
| Présence de puits privés dans le périmètre | - | - | - | + | +++ |

Figure 9 : Tableau récapitulatif des périmètres décrits

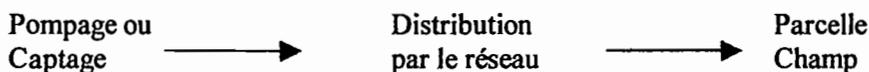
3 METHODOLOGIE

3.1 PRESENTATION DE LA DEMARCHE EMPLOYEEE

L'évaluation d'un fonctionnement nécessite des repères que nous fournissons les optima théoriques. Aussi le principe premier de l'étude est-il de comparer une optimisation technique obtenue par des calculs, avec la réalité.

L'eau est l'élément central d'un réseau d'irrigation. C'est son absence ou son abondance qui détermine la réussite du fonctionnement de l'infrastructure et de la mise en culture. Nous l'utilisons donc comme fil conducteur de cette méthodologie.

On peut distinguer trois étapes dans le cheminement de l'eau d'irrigation :



L'analyse part du dernier maillon de cette chaîne, du destinataire de l'eau, c'est à dire la plante. Par manque de temps, il n'est pas possible de pousser la précision jusqu'à s'intéresser aux échanges au niveau même de celle-ci. On commence donc par étudier l'unité la plus petite, à notre échelle, du périmètre irrigué : le champ.

Ce choix sous-entend une répartition de l'eau achetée par un agriculteur. Mais il s'est avéré que la lecture –difficile– des tours d'eau nécessitait de faire les mêmes hypothèses au niveau de l'allocation de l'eau entre cultures, en restant au niveau de la parcelle comme en raisonnant au niveau du champ.

Le champ sert de base à l'évaluation de l'optimum technique : on en évalue les besoins en eau théoriques. Ce dont ont besoin les cultures en place pour se développer de manière optimale est ainsi comparé aux apports réels.

Pour ce faire, les données climatologiques, agronomiques et hydrauliques sont analysées par un logiciel de simulation de bilan hydrique, qui en déduit les variations du paramètre ETR/ETM.

Ces calculs sont réalisés avec un pas de temps journalier, à partir de l'irrigation et de l'assolement réels. Les données ont été récoltées sur une période de deux à trois ans (97-2000), mais le temps n'a permis d'analyser que les mois de septembre 98 à août 99.

L'indice de défaillance de l'irrigation est le stress hydrique de la plante. Les besoins en eau de celle-ci sont insatisfaits si $ETR/ETM < 1$. Cet événement doit donc être étudié sous trois aspects : intensité, durée, fréquence, afin de décrire les modalités du manque d'eau.

3.2 STRESS HYDRIQUE ET RENDEMENT : LA THEORIE

Une plante se trouve en situation de déficit hydrique dès qu'elle ne peut plus tirer suffisamment d'eau du sol pour effectuer correctement ses échanges gazeux. Un moyen de quantifier ce stress est d'établir le rapport de l'évapotranspiration réelle à l'évapotranspiration maximale (ETR/ETM) (Hanks 1983), ou, plus précisément, celui de la transpiration réelle à la transpiration potentielle (rapport TR/TP) (Brisson 1992, Childs *et al.* 1977).

Dans des cas expérimentaux particuliers, ce rapport peut être mesuré (exemples dans Retta et Hanks 1979, Al-Kaisi *et al.* 1989). Cependant il est le plus souvent préférable de recourir à sa simulation. On admet généralement qu'il est lié à l'humidité relative du sol.

Une première approche consiste donc à mesurer celle-ci (mesures sur des échantillons de terre, par sonde à neutrons ou par l'intermédiaire de la tension de l'eau dans le sol). De telles mesures sont lourdes. Dans la pratique on les utilise principalement pour le calage et la validation de modèles de simulation.

La seconde approche est en effet celle de la simulation du bilan hydrique. Séduisante parce que beaucoup moins lourde, elle est très fréquemment utilisée.

3.2.1 Théorie du bilan hydrique

La simulation du bilan hydrique cherche à retracer l'évolution du stock d'eau du sol (réserve utile ou RU). D'un jour à l'autre, le stock prend des valeurs comprises entre 0 et la réserve utile maximale (RUM), qui dépend de la texture du sol, de sa profondeur, et de celle atteinte par les racines. On peut le décrire comme une série :

$$RU_{j+1} = RU_j + \text{Pluie} + \text{Irrigation} - \text{Drainage} - \text{Evapotranspiration} \quad (1)$$

Le pas de temps choisi entre deux évaluations (mois, décade, pentade, jour ou même parfois heure) dépend de l'objectif et des moyens de travail : disponibilité des données climatiques et des paramètres pédologiques ou culturaux, puissance de calcul disponible. Plus le pas de temps est court, plus les phénomènes simulés sont complexes et plus on a besoin de données précises et nombreuses.

Les différents termes de l'équation récurrente (1) vont être présentés successivement. Le terme d'évapotranspiration se décompose lui-même en plusieurs facteurs, qu'on présentera séparément.

3.2.1.1 Le réservoir sol

- **La réserve utile maximale (RUM)** est la quantité d'eau maximale qui peut être mise à disposition de la plante par le sol entre deux remplissages. On la définira par la capacité de rétention du sol par unité de profondeur (RU), et par la profondeur de sol utilisable (z).

$$RUM = RU * z$$

[mm] [mm/m] [m]

- **La capacité de rétention du sol (RU)** est la capacité de stockage par unité de profondeur de sol. On l'évalue classiquement par la différence entre le volume maximal stocké (à la capacité au champ c'est à dire après la phase de drainage rapide qui suit directement une saturation du sol $\theta_{V(FC)}$) et le volume stocké au point de flétrissement permanent $\theta_{V(WP)}$.

$$RU = \theta_{V(FC)} - \theta_{V(WP)}$$

Ces valeurs sont classiquement déterminées en laboratoire par la méthode d'application d'une force de succion de l'eau respectivement de 0,2 et 16 atmosphères (Doorenbos et Pruitt 1975).

3.2.1.2 Drainage

Le drainage est la quantité d'eau qui traverse la limite inférieure de la zone d'influence des racines. Dans le cas général, il peut être positif (de l'eau sort de la zone d'influence des racines) ou négatif (de l'eau rentre dans la zone d'influence des racines).

Le drainage négatif est un terme particulièrement difficile à appréhender puisqu'il dépend des caractéristiques spécifiques d'infiltration du sol et de la présence éventuelle d'une nappe (Feddes 1982).

Sur notre zone d'étude, les nappes sont suffisamment profondes, et la pente suffisamment faible pour considérer comme négligeables les apports d'eau souterrains et le drainage négatif.

A l'inverse, le drainage positif, c'est à dire les pertes d'eau de pluie comme d'irrigation par percolation, est généralement estimé par la quantité d'eau en surplus par rapport à la réserve utile maximale (Brisson et al. 1992, Gilot 1989). Nous le calculerons ainsi :

$$\text{Drainage} = (\text{RU}_i + \text{Apport d'eau}) - \text{RUM} \text{ quand cette valeur est positive}$$

3.2.1.3 Pluie

C'est l'apport réel de la pluie, c'est à dire la hauteur d'eau diminuée de la valeur du ruissellement.

Celui-ci correspond à la partie de la pluie qui ne pénètre pas dans le sol, mais s'écoule en surface, lorsque l'intensité de la pluie est trop forte pour la capacité d'infiltration du sol. On peut l'estimer par des mesures directes ou le calculer par diverses formules dont l'application exige la connaissance de paramètres de surface difficiles à évaluer (USDA 1972, Cazenave et Valentin 1991).

3.2.1.4 Irrigation

C'est la dose d'arrosage minorée des rémanents, qui correspondent à la part de la lame apportée qui ne pénètre pas dans le sol.

Dans un premier temps, nous avons effectué des simulations sans irrigation, afin d'évaluer les besoins en eau.

3.2.2 Les cultures et l'évapotranspiration

L'utilisation de l'eau au champ est la combinaison de l'évaporation du sol et de la transpiration de la plante.

Ces deux aspects sont liés entre eux : ils dépendent du couvert végétal, de la disponibilité de l'eau dans le sol et de la demande climatique.

3.2.2.1 Demande climatique : l'ETP

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)** est le flux d'évaporation produit par un couvert végétal correspondant à une surface complexe, comprenant le sol et les plantes, à saturation, donc sans restriction. De sorte que l'ETP ne dépend que des conditions atmosphériques, de l'énergie disponible à la surface à la surface évaporante et des caractéristiques géométriques de la surface végétalisée telles que la résistance aérodynamique, la structure et la densité de végétation (Tiercelin, 1998).

- **Le concept d'évapotranspiration de référence** a été introduit par Wright et Jensen (1972). Elle est définie comme l'évapotranspiration d'un gazon de 10 cm alimenté exactement selon ses besoins. Diverses formules permettent de donner une approximation correcte selon le site, la plus classique étant celle de Penman (1948).

3.2.2.2 Demande évaporative de la culture : L'ETM

Quand le couvert végétal atteint son plein développement, l'évapotranspiration atteint des valeurs *sensiblement supérieures* à l'ETP. Sur une parcelle, l'évapotranspiration maximale (ETM) varie donc dans le temps avec le couvert végétal.

On traduit le plus souvent cette remarque par l'équation (3) (Doorenbos et Pruitt 1975) :

$$ETM = K_c \times ETP \quad (3)$$

où K_c est appelé coefficient cultural, variable selon l'état de la végétation.

Nous nous baserons sur l'approche proposée par Doorenbos et Pruitt (1975). Ces auteurs effectuent une synthèse de nombreux travaux antérieurs pour fournir, pour de très nombreuses cultures les valeurs clés pour le calcul empirique de coefficients culturaux rapportés à une l'ETP calculée selon la méthode de Penman (figure 10).

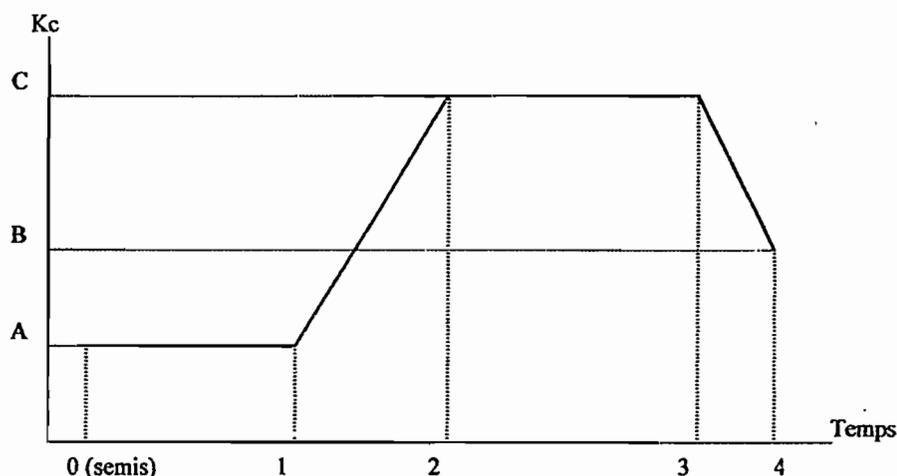


Figure 10 : Calcul des coefficients culturaux selon Doorenbos et Pruitt (1975)

- **Phase initiale**

Au cours de la mise en place de la culture, l'utilisation de l'eau se fait principalement par l'évaporation du sol, liée à la fréquence des humidifications de surface. Des abaques sont données pour l'estimation du coefficient cultural pour des périodes de l'ordre de la décade au moins, en fonction de la fréquence des pluies et des arrosages et de l'ETP (valeur A jusqu'à la date 1 sur la figure 12).

- **Phase de développement**

La seconde phase (de 1 à 2 sur la figure 12), caractérisée par la croissance végétative, présente une croissance presque linéaire du coefficient cultural, qu'on peut décrire simplement par la valeur maximale atteinte (C sur fig. 12) et le nombre de jours après le semis où celle-ci est atteinte (date 2).

- **Phase de mi-saison**

Il suit un palier qui correspond à une valeur de l'indice foliaire à partir de laquelle la surface foliaire s'accroît sans entraîner d'augmentation de la transpiration (à partir d'un indice foliaire de 2 à 4 selon Ritchie 1983).

- **Phase de maturation**

A la fin de ce palier s'amorce une chute de la valeur du coefficient cultural, liée à la sénescence des tissus, décrite elle aussi de façon linéaire entre les points de coordonnées (3,C) et (4,B) sur la figure 12.

3.2.2.3 Facteur de stress

L'évapotranspiration réelle (ETR) est déterminée par le potentiel ETM décrit plus haut, et par la disponibilité de l'eau. Un sol absolument sec n'autorise évidemment ni évaporation ni transpiration. Entre les deux cas extrêmes du sol saturé et du sol sec, le rapport ETR/ETM varie donc entre 0 et 1.

Il est intéressant pour deux raisons :

- Il est l'image du stress hydrique ressenti par la plante. Il constituera pour nous la principale donnée de sortie du modèle.
- C'est l'ETR qui doit être soustraite lors du calcul récurrent du bilan hydrique, son estimation passe par celle du rapport ETR/ETM.

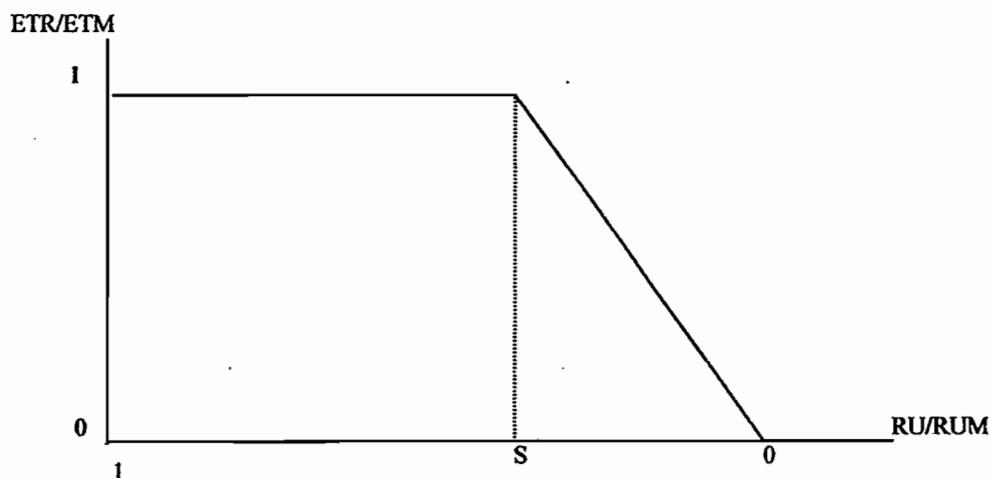


Figure 11 : évolution du rapport ETR/ETM en fonction du remplissage de la RU

Comme le montre la figure ci-dessus, tant que le taux de remplissage de la réserve utile est supérieur au seuil de tarissement admissible, il n'y a pas de stress hydrique. On a $ETR = ETM$. Ce seuil définit également la réserve facilement utilisable (RFU).

Au-delà du tarissement admissible, on a $ETR < ETM$.

3.2.3 Réponse des cultures à l'eau

3.2.3.1 coefficient de pénurie K_y :

La réponse du rendement à l'apport d'eau se chiffre au moyen d'un coefficient K_y de réponse du rendement qui lie la baisse de rendement relatif ($1 - Rd_r / Rd_m$) et le déficit d'évapotranspiration relative ($1 - ETR / ETM$).

$$K_y = (1 - Rd_r / Rd_m) / (1 - ETR / ETM)$$

Le calcul peut être fait sur l'ensemble de la période végétative ou pour chaque période de développement : installation, période végétative, floraison, formation du produit et mûrissement.

Pour toutes les cultures, une pénurie tout au long du cycle est beaucoup plus pénalisante que des pénuries ponctuelles. Les périodes de floraison et de formation du produit sont des périodes très sensibles au rationnement et inversement les rendements sont très peu affectés par une pénurie en phase de mûrissement.

Dans ce cas, il est plus favorable de satisfaire complètement les besoins pendant les périodes de forte sensibilité et d'introduire un déficit plus prononcé en début de période végétative et en période de mûrissement que de répartir le déficit sur l'ensemble du cycle de croissance. Par exemple, pour le maïs, la période la plus sensible est celle de la formation du produit; pour la canne à sucre, il s'agit de la période végétative.

3.2.3.2 K_y par période, cumulé et total : les limites de ce paramètre

Il est important de noter que ces coefficients établis pour une large gamme de conditions pédoclimatiques ne sont valables que lorsque le seul facteur limitant est l'eau. Ceci implique donc que

les alimentations minérales et azotées, les conditions de sol, phytosanitaires, d'enherbement, etc. soient optimales (Doorenbos et Kassam, 1987).

Par ailleurs, les situations intermédiaires entre stress sur une seule période végétative et sur la totalité du cycle sont mal connues.

On pourrait penser de manière intuitive que les stress des différentes périodes, et donc les pertes de rendement se cumulent de la façon suivante :

$$(1 - Y_a/Y_m)_i = 1 - (Y_a/Y_m)_1 * (Y_a/Y_m)_2 * \dots * (Y_a/Y_m)_i$$

Cette formule est en effet proposée dans le guide de l'utilisateur d'une vieille version du logiciel Cropwat (Version 5.5, 1989).

Cependant, on considère actuellement qu'elle n'est pas valable. La relation entre l'importance relative des stress sur différentes périodes et le rendement final n'a pas été démontrée à notre connaissance. En fait, les K_y par période sont utiles pour l'utilisation programmée d'une ressource en eau disponible en quantité limitée, par exemple en gestion de barrage.

S'il y a eu déficit hydrique sur plus d'une période végétative, on est donc contraint d'utiliser le K_y global, ainsi que le rapport ETR/ETM global.

Il y a donc une grande perte de précision de l'information lors du passage du rapport ETR/ETM à Y_a/Y_m .

3.3 MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE PAR BILHY

La simulation du bilan hydrique est l'outil qui nous permettra de quantifier pour chaque parcelle les déficits hydriques, les excès d'eau à l'arrosage, et l'origine de ceux-ci dans le cadre du tour d'eau.

3.3.1 Choix d'un logiciel

CROPWAT 4 Windows (de crop water, en anglais, l'eau des cultures) est un logiciel créé par la FAO, et SARRA (système d'analyse régionale des risques agroclimatiques) un logiciel créé par le CIRAD.

A la base, tous deux fonctionnent sur le même principe du bilan hydrique, pour en déduire les besoins en eau des cultures. Il s'agit donc d'établir d'une part une comparaison sur les potentiels d'utilisation de chacun.

D'autre part, CROPWAT et SARRA utilisent deux méthodes de calcul différentes : il nous faut donc choisir la plus pertinente.

La comparaison des 2 logiciels est détaillée en annexe 3 et nous amène aux conclusions suivantes.

D'une part, la pluie et l'irrigation sous CROPWAT ne sont entrés que de manière mensuelle, pour être ensuite répartis uniformément par le logiciel. Ceci est trop éloigné de la réalité par rapport à la précision dont nous avons besoin. La pluie à Chebika est un événement suffisamment rare pour qu'on l'enregistre au jour où elle est réellement tombée. La répartition uniforme d'une pluie minimise le stress hydrique par rapport à celui engendré par une pluie de même volume total mais répartie en événements plus importants mais plus espacés. En effet, l'apport fréquent de doses plus faibles permet de maintenir le stock d'eau dans la RFU, tandis qu'un apport plus important mais moins fréquent va engendrer un stress hydrique en fin de période.

D'autre part, SARRA fait moins d'approximations dans ses calculs en utilisant la méthode dissociant plante et sol. Dans notre cas, les pieds sont assez espacés : il vaut mieux prendre le sol plus en compte que ne le fait la méthode globale.

Ce seront donc les algorithmes de SARRA que nous préférons utiliser. Toutefois, la manipulation des fichiers et la répétition de nombreuses simulations nous a conduit à proposer, pour le calcul du bilan hydrique par parcelle des GIC, un tableur Excel, dont les méthodes de calculs seront basés sur SARRA.

3.3.2 BILHY : simulation du bilan hydrique sous EXCEL

Devant la différence, et le peu de souplesse général des deux logiciels CROPWAT et SARRA, nous avons pris le parti d'en créer un troisième, sous forme de tableur EXCEL. Nous avons repris le logiciel SARRA pour le fonctionnement de base, et effectué quelques apports au système. Sa configuration présente en effet des avantages certains. Nous montrerons aussi les limites de ce logiciel, baptisé BILHY (de BILan HYdrique).

3.3.2.1 Mode de calcul

◇ Une reproduction de SARRA

- **BILHY a été programmé pour réaliser une simulation du bilan hydrique identique à celle de SARRA.**

Nous nous sommes basés pour cela sur les lignes de calcul figurant dans le guide de l'utilisateur du logiciel SARRA (Baron, Maraux, Perez, 1996). Il a ensuite fallu procéder à un calage par comparaison des variations des différentes variables lors de la simulation du blé afin d'ajuster les formules. La plupart des caractéristiques du mode de calcul de BILHY figurent dans la comparaison détaillée. Ainsi, le pas de simulation de BILHY est journalier, l'ETR est calculée grâce à la formule d'Eagleman (cf. annexe 3) et au jeu des trois réservoirs sol, racinaire et de surface.

- Il nous restait un choix à faire concernant **la durée et les dates de simulation.**

BILHY réalise cette dernière sur **l'année entière, de septembre à août**. La coupure fin août a été choisie en fonction des dates de culture rencontrées sur le terrain. C'est à ce moment que le nombre de cycles végétatifs en cours est minimal. Les cultures principales se terminent avant, ou démarrent après.

Par conséquent, le calcul de l'ETR est permanent : le réservoir sol est l'objet d'une constante mise à jour en fonction des pluies et de l'ETP, même en l'absence de cultures.

◇ Jeu de remplissage des réservoirs

- **Schéma de fonctionnement**

Tout d'abord, il faut distinguer les notions employées ici, de réservoir et de stock, qui diffèrent des définitions usuelles concernant RU et RFU.

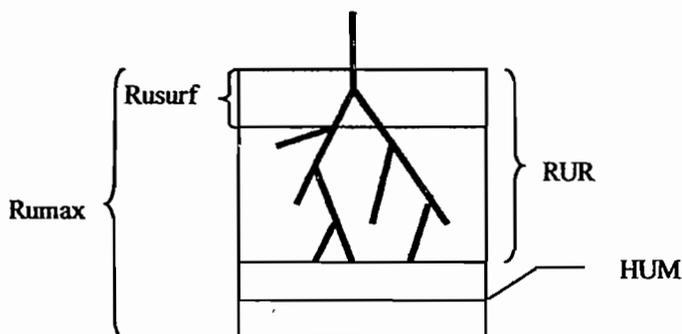


Figure 12 : schéma des réservoirs simulés

Un réservoir est un volume potentiellement remplissable, dont le niveau varie, de vide à plein.

On utilise les réservoirs suivants :

Rusurf : réservoir de surface (mm)

Rumax : réservoir sol (mm)

RUR : réserve utile racinaire (mm)

En revanche, le stock représente un volume d'eau présent dans le réservoir correspondant :

Stocksurf : stock utile dans le réservoir

de surface (mm)

Stock : stock utile dans le réservoir sol (mm)

Hum : valeur du front d'humectation, exprimée en stock d'eau (mm)

Ce paramètre diffère de Stock, car il n'est pas modifié par l'évapotranspiration au cours de la journée. C'est la limite maximale qu'aura atteint l'eau, et qui conditionne la croissance racinaire. Cette valeur est donc toujours croissante.

Sracc : stock utile dans le réservoir racinaire (mm)

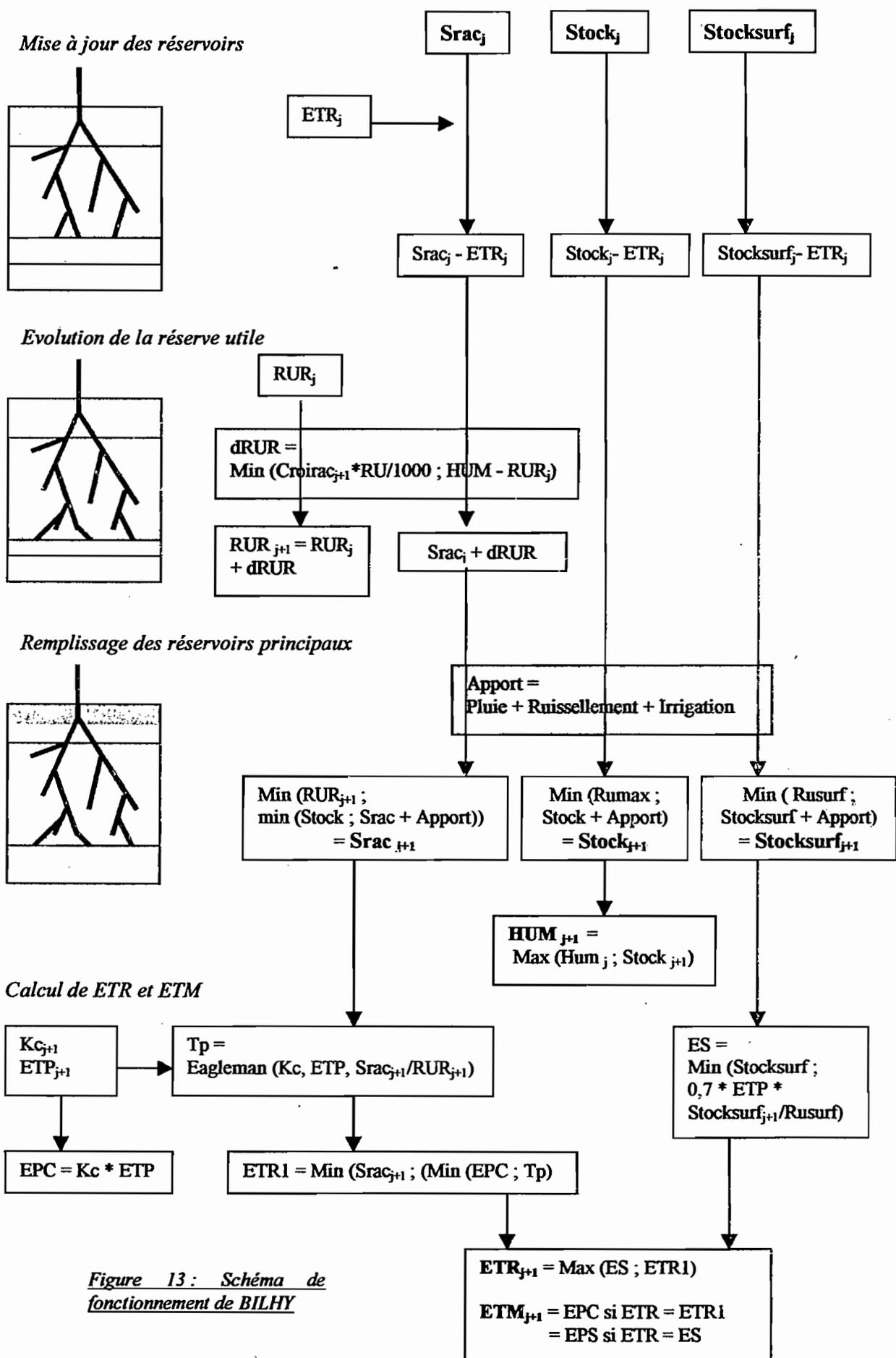


Figure 13 : Schéma de fonctionnement de BILHY

- **Front d'humectation et stock initial**

La longueur de la durée de simulation nous a conduit à remettre en cause la validité du calcul du front d'humectation, et de sa limitation de la croissance du réservoir racinaire.

En effet, les simulations sont réalisées systématiquement depuis septembre, même pour une culture d'été. Ce qui signifie que les pluies d'hiver auront largement abaissé le front d'humectation. La croissance racinaire ne sera donc en général pas limitée par celui-ci.

Au contraire, les cultures débutant en septembre auront un volume racinaire dépendant plus fortement du stock d'eau initialement contenu dans le réservoir sol. Il est d'ailleurs important de noter que celui-ci doit être non nul pour que la simulation puisse démarrer, puisque le volume du réservoir racinaire est limité par celui du stock du sol.

Finalement, cette "vieillesse" du front d'humectation est assez représentative de la réalité. Les trois réservoirs se vident par la partie haute lorsqu'il y a évaporation. Lorsqu'il n'y a pas de culture en place, la seule vidange est l'évaporation. Lorsque le réservoir de surface s'est entièrement vidé de son stock, il n'y a plus d'évaporation. Le stock du réservoir sol, plus profond, reste donc constant jusqu'à la pluie suivante.

Ainsi, pour le démarrage d'une culture en septembre, on peut considérer que le réservoir sol est à moitié plein quand la culture précédente était du maraîchage, et quasi vide quand c'était une céréale, en raison du mode d'irrigation des agriculteurs.

- **Calcul de Tp et ETRI**

La transpiration obtenue avec la formule d'Eagleman doit être majorée par EPC, car la fonction donne des valeurs supérieures à celui-ci lorsque l'humidité relative du réservoir racinaire approche 100%.

- **Efficience à la parcelle : calcul de la dose d'irrigation**

SARRA inclut l'irrigation dans le calcul du ruissellement. BILHY ne le fait pas et utilise la dose telle quelle. Il faut donc calculer les pertes auparavant si on veut les prendre en compte. Notre démarche en ce qui les concerne sera explicitée plus loin.

◇ *Apports au modèle*

- **Simulation de l'arboriculture**

Le calcul de l'évapotranspiration pour l'arboriculture s'est avérée délicate, la majorité des études ayant été réalisées sur des cultures de plein champ. Il était pourtant nécessaire dans notre cas, l'olivier étant souvent cultivé sur les champs étudiés.

SARRA ne prévoit pas le cas d'un réservoir racinaire constant et profond.

Dans BILHY, la simulation de l'arboriculture (essentiellement l'olivier en sol nu) est réalisée en prenant les réservoir et stock racinaires égaux aux réservoir et stock du sol.

Un autre problème nous est apparu : les champs d'oliviers étudiés ont une densité de plantation fortement variable (de 10 à 100 pieds/ha), et sont souvent plantés en intercalaire avec une culture de plein champ, variable elle aussi. Il a donc fallu adapter BILHY à ces nouvelles variations.

Nous avons pris le parti de créer un réservoir racinaire fictif d'un niveau moyen, proportionnel à la surface respectivement couverte par les deux cultures. Ce qui donne les formules suivantes :

$$RUR\ globale = S_{\text{oliviers/ha}} * 200 + (1 - S_{\text{oliviers/ha}}) * RUR\ culture$$

$$Srac_{j+1} = \text{Min}(RUR\ globale_{j+1} ; \text{Min}(\text{Stock}_{j+1} ; Srac_j - ETR_j + \text{Irrigation} + \text{Pluie} - \text{Ruissellement} + RUR\ globale_{j+1} - RUR\ global_j))$$

Le coefficient cultural d'une telle culture implique des choix que nous expliciterons plus loin.

Le nombre d'oliviers par hectare est entré par l'utilisateur en même temps que les numéros des champs et leur surface. Le calcul de la RUR et du Kc adaptés est ensuite automatiquement déclenché lorsque la présence d'une valeur est détectée dans la cellule correspondante.

L'inconvénient posé par ce mode de calcul est que les résultats sont globaux : il n'y a pas séparation entre le stress hydrique de l'arbre et celui de la culture. Il n'est donc pas possible de calculer le rendement. Il y a une interaction forte entre l'olivier (qui a tendance à monopoliser l'eau) et l'autre culture. Aussi avons nous préféré cette solution à celle consistant à considérer deux champs côte à côte, ou encore négliger la culture de plein champ. Ceci aurait valu un problème de répartition de l'eau dans le premier cas, et une sous-estimation du besoin en eau dans le deuxième.

- **Calcul des pertes de rendement**

Nous avons inclus dans BILHY les calculs de perte de rendement absents chez SARRA. Ils suivent la méthode précédemment décrite. La perte est calculée pour un stress sur la totalité du cycle, ainsi que par période végétative.

Dans le cas du calcul par période, le choix et l'évaluation de la pertinence des résultats est laissée à l'utilisateur. Il faut en effet vérifier que le déficit hydrique n'a eu lieu que sur une seule période avant de prendre en compte la valeurs affichée correspondante.

3.3.2.2 Avantages fonctionnels

Comme nous l'avons précédemment expliqué, l'analyse des GIC visés nous conduit à réaliser un grand nombre de simulations. Or SARRA comme CROPWAT offrent des sorties de résultats qu'il faut ensuite remanier sous Excel pour les rendre plus lisibles et exploitables. Par ailleurs, le risque de perdre la correspondance entre hypothèses ayant servi à la simulation et résultats obtenus est grand. L'automatisation de l'importation des paramètres initiaux et de l'exportation des résultats ne nous a pas paru faisable pour des questions de langage informatique.

Nous avons donc reproduit la simulation du bilan hydrique sous Excel, qui apporte un mode de présentation plus transparent, et plus fonctionnel par rapport à nos attentes.

◇ Structure de BILHY

BILHY est un tableur Excel composé de 26 feuilles de trois types :

- Données
- variables de simulation
- résultats

Les feuilles de données contiennent les paramètres cultureux et climatologiques. Une feuille "entrée_assolement" contient une macro permettant d'attribuer une culture à un champ.

Toutes les feuilles contenant les variables de simulation et les résultats ont la même structure. Il y a une feuille par variable (le nombre de champs n'en autorisant pas plus), et sur chaque feuille :

- une ligne par jour,
- une colonne par champ.

Cette présentation est plus transparente que les logiciels courants, puisque tous les chiffres sont visibles du début à la fin des calculs. BILHY offre ainsi plus de suivi au niveau des simulations sur les hypothèses et les résultats.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|----|------------|---------|--------|----|---|----|-----|---|-------|------|---|---|---|---|
| 2 | unité = mm | | Rusurf | 20 | | RU | 100 | | Rumex | 2000 | | | | |
| 3 | ETR | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | N° champ | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| 5 | culture 1 | Etr_DLE | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Culture 2 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 1-sept-98 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 2-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 3-sept-98 | 3 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 4-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 11 | 5-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | 6-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 7-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 8-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 15 | 9-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 10-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 17 | 11-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 18 | 12-sept-98 | 0 | | | | | | | | | | | | |
| 19 | 13-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 20 | 14-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 21 | 15-sept-98 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| 22 | 16-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 23 | 17-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 18-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 25 | 19-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 26 | 20-sept-98 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 27 | 21-sept-98 | 3 | | | | | | | | | | | | |
| 28 | 22-sept-98 | 3 | | | | | | | | | | | | |
| 29 | 23-sept-98 | 3 | | | | | | | | | | | | |

Figure 14 : présentation de la configuration de BILHY

◇ Entrée des données

- Les données climatiques et d'irrigation sont sous forme de colonne Excel, donc faciles à entrer.
- Concernant les paramètres cultureux, la feuille "cultures" contient code de chaque culture, phase de développement végétatif, coefficients cultureux, coefficients de réponse au rendement, croissance racinaire. Tous ces paramètres sont associés au champ voulu grâce à une macro, dont le développement et le fonctionnement figurent en annexe 4. Les cultures proposées et leurs paramètres sont ceux utilisés dans les GIC étudiés. Par conséquent, BILHY est une adaptation directe à ce dont nous avons besoin du point de vue agronomique.

◇ Simulation

- La manipulation à réaliser pour effectuer les simulations est facilitée par cette structure. Hormis pour le premier champ, qui doit forcément contenir les formules de calcul, la simulation sur les suivants consiste à étendre la même formule aux cellules voisines, une fois que tous les paramètres sont entrés. Le gain de temps est donc important, et la manipulation simple.
- De plus, le recalcul est automatique si on modifie un paramètre, ce qui évite de relancer les simulations à chaque changement d'hypothèse.
- BILHY permet par ailleurs l'enchaînement de deux cultures sur un même champ, pour une même simulation. Ceci n'est bien entendu possible qu'à la condition que les dates de cultures soient compatibles.

3.3.2.3 Critique du fonctionnement

◇ *Dates de culture et simulation de la croissance végétative*

Les cultures sont plantées à date fixe, et la croissance racinaire est également fixée.

Ce qui signifie d'une part que si la croissance est limitée au début, parce que l'irrigation de semis a lieu plus tard dans les faits, il n'y a pas d'influence sur le cycle végétatif. Celui-ci continue à évoluer de manière indépendante.

Il vaudrait mieux attendre la première irrigation pour démarrer le cycle, ce qui serait plus en lien avec la réalité (et avec les tours d'eau !).

Mais le dispositif est compliqué, car il faudrait que le modèle aille lire les paramètres culturaux au moment voulu.

On se contente donc de cette approximation, avec une marge d'erreur certaine. Les erreurs pourront être analysées en comparant les dates de cultures avec les dates d'irrigation relevées dans les tours d'eau.

◇ *BILHY : attention fragile...*

- Nous avons très vite pu tester les **limites "physiques"** de ce modèle. Au delà d'une cinquantaine de champs, avec un ordinateur Pentium II de 64 Mo de RAM, il s'avère que EXCEL commence à ralentir sérieusement son rythme de calcul. Il faut reconnaître qu'un tel fichier acquiert rapidement une taille importante (la simulation des 200 champs de Bled Abida représente 200 Mégaoctets...). La gestion des erreurs et le relancement des calculs a donc pris plus de temps qu'il ne l'était prévu.

- De plus, si BILHY offre une plus grande transparence dans ses calculs, cela le rend aussi plus fragile. En effet, les formules sont modifiables à volonté, ce qui est aux risques et périls de l'utilisateur... Les manipulations nécessitent donc une bonne compréhension du système pour ne pas faire d'erreur. Un mode d'emploi détaillé est prévu pour septembre 2000.

3.4 CHOIX DES PARAMETRES

3.4.1 *Hypothèses prises sur le réservoir sol*

- **Capacité de rétention en eau**

L'analyse précise des caractéristiques du sol des périmètres étudiés nécessite un protocole expérimental précis qu'il ne nous a pas été possible de suivre. Aussi avons nous évalué ces paramètres de façon approximative.

La région de Kairouan est une plaine alluviale, dont le sol varie entre une texture sableuse et une texture argilo-limoneuse (SCET, 2000 ; BICHE, 1999).

Pour une profondeur utile de 1 m, la valeur de la réserve utile est comprise, en gros, entre 100mm (sol sableux) et 200 mm (sols limono-argileux) (Tiercelin, 1998).

Les observations de terrain ont montré que l'ensemble des sites concernés est caractérisé par un sol drainant, dont le lessivage est important. Nous avons donc considéré une faible capacité de rétention de l'eau, de manière uniforme, à savoir de 100 mm/m.

- **La profondeur du réservoir superficiel et du réservoir profond** a surtout été conditionnée par l'utilisation du logiciel SARRA. En effet, celui-ci adopte systématiquement un réservoir de surface de 20 cm. Par ailleurs, nous avons adopté un réservoir sol de 2 m afin de ne pas limiter la taille des réservoirs racinaires, dont la profondeur nous est connue.

3.4.2 Le facteur pluie

3.4.2.1 Données disponibles en pluviométrie

Les stations pluviométriques ont été choisies pour leur situation géographique. Les plus proches des GIC étudiés sont Chebika pour Bled Abida et Mlelsa, et Sbikha délégation pour Souaïdia.

Nous disposons des données pluviométriques journalières de 1967 à 1999. Certaines années sont parfois incomplètes.

3.4.2.2 Analyse statistique de la pluviométrie

Outre l'étude des années réelles, les simulations de bilan hydrique devront prendre en compte les risques associés à un événement hydrologique.

Les événements qui nous ont paru les plus révélateurs sont l'année quinquennale sèche, humide, et l'année médiane.

L'échantillon utilisé est constitué des 20 dernières années de la pluviométrie de Chebika (1979-1999).

Afin d'ajuster une loi de probabilité théorique à la distribution de fréquence de cet échantillon, nous avons utilisé le logiciel SAFARHY (Orstom).

Cette loi de probabilité nous permet de déduire ensuite les événements hydrologiques recherchés.

◇ Analyse statistique par le logiciel SAFARY

Une loi de probabilité est un modèle qui doit être à la fois descriptif et prédictif :

- d'une part, ce modèle doit bien s'ajuster à l'échantillon des observations ;
- d'autre part, il doit correctement estimer les risques, c'est-à-dire la probabilité des événements dans la population.

Aucune justification théorique absolue ne vient appuyer le choix d'une distribution particulière et d'une méthode d'estimation des paramètres. Or il y a pléthore de lois et de méthodes (Lubès, Masson, Raous, Tapiou, 1994).

Les résultats de tests statistiques et les représentations graphiques nous ont conduits à choisir la loi Log. Normale. Par la méthode du maximum de vraisemblance, les tests du χ^2 et A^2 sont en effet positifs, et la répartition des observations suffisamment proche de la courbe théorique.

La fonction de densité de la loi lie ainsi la pluviométrie annuelle à une probabilité de retour :

$$y = f(x) \Leftrightarrow P(\text{Pluie} < y) = x$$

Or la pluie quinquennale sèche est telle que $P(\text{Pluie} < y_{\text{sèche}}) = 0,2$

humide est telle que $P(\text{Pluie} < y_{\text{humide}}) = 0,8$

la pluie médiane est telle que $P(\text{Pluie} < y_{\text{médiane}}) = 0,5$

La lecture des quantiles correspondant aux probabilités voulues nous permet donc de déduire les années hydrologiques recherchées.

| | Probabilité | Quantile (1/10 mm) | Pluviométrie annuelle la plus proche (mm) | Année |
|---------------|-------------|-----------------------|--|-------|
| Année sèche | 0,2 | 1847,807 | 191 | 1988 |
| Année médiane | 0,5 | 2605,902 | 270 | 1980 |
| Année humide | 0,8 | 3675,019 | 357 | 1991 |

Figure 15 : Déduction des années hydrologiques des résultats de SAFARHY

◇ critique

L'analyse a été réalisée sur la pluviométrie annuelle. Or le graphique ci-dessous montre que lorsque l'on s'intéresse à la pluie mensuelle, l'année sèche est parfois plus humide que l'année pluvieuse. Ceci a des conséquences sur les besoins en eau des cultures dont le cycle ne se trouve que sur une partie de l'année. Lors des simulations, il faudra donc prendre garde à conserver un point de vue sur le fonctionnement du périmètre irrigué sur l'ensemble de l'année.

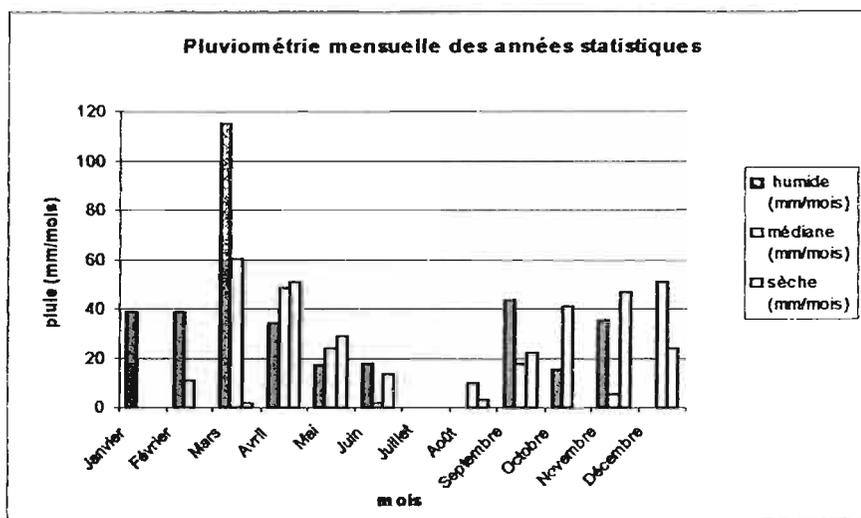


Figure 16 : Pluviométrie mensuelle des années statistiques

◇ Année hydrologique

Pour simuler la croissance d'une plante en fonction de la pluviométrie, nous avons utilisé des années hydrologiques ; C'est-à-dire que même si la culture devrait s'étaler sur deux années différentes (par exemple, de septembre à juin), la pluviométrie utilisée est celle de l'année considérée, sèche, humide ou médiane. Dans la pratique, on simule deux années de pluviométrie identique de suite.

L'événement hydrologique : sécheresse/humidité quinquennale s'applique sur la totalité du cycle végétatif.

3.4.3 Ruissellement

On aurait pu négliger le ruissellement, étant donné la faiblesse de la pente dans les différents sites, mais la pluie se constitue d'événements rares et violents dans le Kairouanais.

Le ruissellement sera considéré comme faible (la pluviométrie n'ayant en général pas un volume bien important).

Il est calculé à partir d'un seuil de 20 mm, et représente alors 20% du volume supérieur à ce seuil :

$$\text{Ruissellement} = (\text{Pluie} - 20) * 0,2 \quad \text{si Pluie} > 20 \text{ mm}$$

• Pluie effective

Du calcul précédent, on déduit une pluie effective : Pluie - LR, qui en réalité inclut la partie drainée, déduite ultérieurement.

$$\begin{aligned} \text{Pluie effective} &= \text{Pluie} - (\text{Pluie} - 20) * 0,2 && \text{si Pluie} > 20 \text{ mm} \\ \text{Pluie effective} &= 0,8 * \text{Pluie} - 4 \end{aligned}$$

3.4.4 Calcul de ET₀

• Pour le calcul de ET₀, la formule donnée par la méthode FAO-Penman-Monteith est actuellement la plus employée. Elle s'écrit de la manière suivante:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

avec :

ET₀, évapotranspiration de référence [mm d⁻¹];

R_n, rayonnement net à la surface de la culture [MJ m⁻² d⁻¹];

G, flux de chaleur échangé avec le sol [MJ m⁻² d⁻¹];

T, température moyenne journalière à une hauteur de 2 m [°C];

u₂, vitesse du vent à 2 m [m s⁻¹];

e_s et e_a, respectivement pression de vapeur saturante et pression réelle de l'air à la même hauteur [kPa];

Δ, pente de la courbe de pression de vapeur saturante pour la température T [kPa °C⁻¹];

γ, la constante psychrométrique [kPa °C⁻¹];

900, coefficient pour la culture de référence (gazon) [kJ⁻¹ kg K] lié aux unités utilisées et à la substitution des variables ρ, c_p et r_a;

0,34, coefficient de vent pour la culture de référence [kJ⁻¹ kg K] résultant du rapport r_a/r_s (70/108 = 0,34);

0,408, inverse de λ = 2,45 MJ kg⁻¹.

(Tiercelin, 1998)

Cette formule nécessite donc la connaissance de **nombreux paramètres**, dont l'estimation ou la mesure est difficile, et n'a pas été réalisée pour notre site d'étude.

Certains sont proposés dans la base de données de CROPWAT; mais avec un taux d'humidité de 60% en juin à Kairouan, on peut se demander si il n'y a pas eu de confusion avec le Cap Bon ou une région plus nordique...

• **Riou a adapté la formule de Penman à la Tunisie.**

L'ETP est alors obtenue à partir des seules données de températures et de latitude.

Pour Kairouan, la formule est la suivante :

$$ETP_n = 0,31 (\theta_n + 2 \theta_{n+1})/3 - 3,77$$

avec :

ETP_n, évapotranspiration potentielle du mois n [mm d⁻¹];

θ_n, température maximum moyenne interannuelle [°C];

(Riou, 1980).

• **Ce sont des moyennes mensuelles interannuelles**, mais on peut considérer sans trop de risques d'erreur que, d'une part l'ETP est globalement peu variable d'une année sur l'autre, et d'autre part que les valeurs mensuelles suffisent pour une précision correcte d'un bilan hydrique journalier dont les résultats seront exploités à des pas de temps plus grands. Le fait de considérer comme efficaces les pluies fines permet de réduire artificiellement la consommation de la réserve utile, ce qui a des conséquences analogues à la diminution de l'ETP qui se produit dans la réalité à l'occasion de celles-ci.

• **Réutilisation de données**

Le calcul des températures maximum moyennes interannuelles doit être réalisé avec un nombre suffisant d'années pour être représentatif. Or nous ne disposons pour Chebika que des relevés effectués sur les trois dernières années.

En revanche, plusieurs sources nous donnent un calcul déjà réalisé de l'ETP mensuelle interannuelle selon Riou :

- le bureau d'étude SCET
- S. Feuillette

La SCET a pu avoir accès aux chroniques de température de l'Institut National de la Météo de Tunisie. Nous pouvons donc penser qu'elles sont valables.

• **Conclusion**

La comparaison des différentes sources FAO, SCET et S.Feuillette nous montre que les écarts ne sont pas bien grands entre les différents résultats (graphique ci-dessus).

La SCET et la FAO ont des résultats plus proches dans l'ensemble. Les résultats S.Feuillette semblent être en décalage d'un mois par rapport aux deux autres.

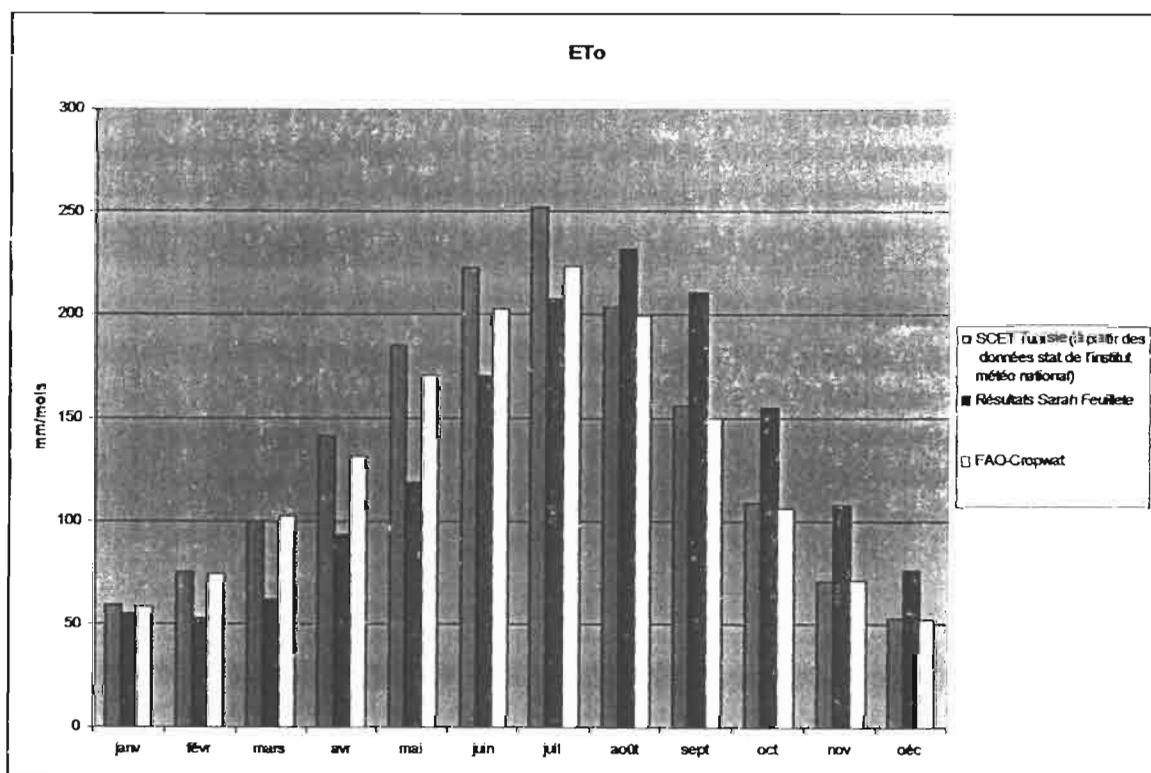


Figure 17 : graphique comparatif des différentes données d'ET₀

Les valeurs employées figurent dans le tableau ci-dessous.

| mois | janv | févr | mars | avr | mai | juin | juil | août | sept | oct | nov | déc | total |
|-------------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-----|-------|
| ET ₀ mm/mois | 59 | 75 | 100 | 141 | 185 | 223 | 252 | 204 | 156 | 109 | 71 | 53 | 1628 |
| mm/j | 2,0 | 2,5 | 3,3 | 4,7 | 6,2 | 7,4 | 8,4 | 6,8 | 5,2 | 3,6 | 2,4 | 1,8 | |

Il faut garder à l'esprit que ces valeurs sont approximatives, et ne remplacent pas un procédé expérimental précis, mais lourd à mettre en place.

3.4.5 Paramètres culturaux

Pour simuler le bilan hydrique au niveau des cultures, il nous faut connaître :

- les dates de semis et de récolte,
- la durée totale du cycle de développement végétatif qui en découle,
- la répartition en temps de chaque phase de croissance,
- la profondeur d'enracinement et son évolution,
- les valeurs prises par le coefficient cultural au cours du cycle.

Le choix de ces paramètres culturaux a prêté à de nombreuses discussions, en raison de leur variabilité selon les sources, en particulier en ce qui concerne les coefficients culturaux.

3.4.5.1 Sources des données

Trois sources, fournissent les paramètres recherchés :

- la **FAO 24** donne des valeurs de Kc en fonction des conditions climatiques dominantes, ainsi que les durées des phases végétatives.
- **S. Feuillette (SF)** a fait une évaluation au pas de temps mensuel des besoins en eau des cultures, à partir des données FAO et d'enquêtes menées dans le bassin du Merguellil auprès des agriculteurs.
- Le bureau d'études allemand **AHT international GmbH** a réalisé des bilans hydriques avec CROPWAT dans le Nord de la Tunisie (basse vallée de la Medjerda), en se basant également sur la FAO, mais aussi sur des données de terrain.

3.4.5.2 Croissance végétative

◇ *Le cycle végétatif*

- **En ce qui concerne la durée du cycle de développement et les dates de semis et de récolte**, on doit utiliser des observations locales lorsque c'est possible, pour tenir compte des variétés culturales, du climat et des pratiques culturales (Tiercelin, 1998).

Nous nous sommes d'abord appuyés sur les valeurs de Sarah Feuillette. Celles-ci se basent en effet sur des enquêtes de terrain dans la zone même de notre étude.

Ces données sont complétées et comparées avec des enquêtes menées sur les GIC concernées par S. Selmi et P. Le Goulven en septembre 1999. En l'absence de ces données, nous nous sommes rabattus sur AHT, dont les pratiques culturales sont vraisemblablement plus proches que l'échelle employée par la FAO où sont regroupés les climats semi-arides de plusieurs continents.

Ces valeurs ont ensuite été vérifiées lors de nos propres enquêtes, et ajustées au besoin, en lien avec les pratiques d'irrigation.

- **La répartition des 4 phases de croissance** est donnée par la FAO ; nous la transposons sur la durée de cycle adoptée grâce à des coefficients de proportionnalité.

Les longueurs des cycles végétatifs des cultures pratiquées dans le Kairouanais sont sensiblement différentes de celles données comme référence par Doorenbos et Pruitt. Nous avons donc fixé la longueur de chaque stade en proportion :

$$\text{Nouvelle durée} = \text{Durée proposée} * (\text{Durée totale observée} / \text{Durée totale proposée})$$

◇ *Croissance du réservoir racinaire*

- **Les chiffres sur l'enracinement** proviennent de AHT, qui pour cela a consulté le CRDA.

Quand les données manquaient, nous nous sommes renseignés auprès des agriculteurs (pour la corette, par exemple).

Or la profondeur racinaire entrée dans le logiciel est plus grande qu'en réalité, et surtout largement supérieure à celle apparente. En effet, les racines atteignent une eau qui au départ se trouvait environ 20 cm plus bas, et qui est remontée par capillarité. De plus, certaines radicules descendent plus

profondément que la majorité du faisceau racinaire, et ne sont pas forcément faciles à mettre en évidence sur le terrain.

C'est pourquoi, à une valeur relevée sur le terrain, on peut facilement ajouter 50 cm.

- La vitesse de croissance racinaire est calculée à partir de la profondeur d'enracinement, divisée par le nombre de jours dans la phase concernée, et arrondie au millimètre supérieur (cf. annexe 3).

3.4.5.3 Coefficients culturaux

◇ *Choix de la source*

A partir des données FAO, S. Feuillet a ajusté les Kc proposés. Il est à noter qu'elle n'a pas réalisé d'interpolation linéaire entre le Kc initial et le Kc de mi-saison, mais pris un Kc constant intermédiaire pendant la phase de développement.

Même si ET_0 reste la principale expression du facteur climatique dans le calcul de l'évapotranspiration de la plante, les valeurs des coefficients culturaux varient selon l'humidité relative et le vent.

Dans le Kairouanais, le climat est sec et le vent fort, tandis que AHT a utilisé des données basées sur un climat humide à vent modéré. Nous utiliserons donc les Kc de la FAO.

◇ *Calcul par phase*

• Phase initiale

Le Kc FAO de la première phase se lit sur une abaque. Il dépend de la fréquence d'irrigation, et de la valeur de ET_0 lors cette phase.

Nous avons donc utilisé les valeurs d' ET_0 précédemment présentées, et une fréquence d'irrigation de 10 jours (ce qui est en moyenne pratiqué dans les GIC étudiés).

| mois | ETP | Kc ini |
|-----------|-----|--------|
| janvier | 2 | 0,5 |
| février | 3 | 0,35 |
| mars | 3 | 0,35 |
| avril | 5 | 0,2 |
| mai | 6 | 0,15 |
| juin | 7 | 0,15 |
| juillet | 8 | 0,1 |
| août | 7 | 0,15 |
| septembre | 5 | 0,2 |
| octobre | 4 | 0,25 |
| novembre | 2 | 0,5 |
| décembre | 2 | 0,5 |

Figure 18 : valeurs de Kc ini en fonction de l'ETP

• Phase de développement

Lors de la phase de développement, le coefficient cultural est interpolé linéairement entre les valeurs des phases précédente et suivante :

$$Kc_{dev} = (Kc_{ini} - Kc_{mi-saison}) / \text{durée de la phase de développement}$$

• Phase de mi-saison et de récolte

Le taux d'humidité est estimé inférieur à 20 %, et la vitesse du vent entre 5 et 8 m/s (d'après les relevés de vents sur la station de Chébika), soit un climat sec à vent fort ; D'où les Kc de mi-saison et de récolte (Doorenboos, Pruitt ; 1986). Entre les deux, le Kc est interpolé linéairement.

◇ *Cultures pérennes*

L'évaluation des coefficients culturaux pour les cultures pérennes pose théoriquement un problème puisqu'il ne nous a pas été possible de considérer les coupes de luzerne. Les coupes y sont très fréquentes mais ne concernent que de très petites surfaces. La demande globale des parcelles de

luzerne est donc relativement constante. Il est donc justifié d'utiliser pour les cultures fourragères un coefficient cultural unique, correspondant à un développement moyen de la culture.

◇ Cultures manquantes

En ce qui concerne les cultures annuelles de plein champ dont nous n'avions pas les paramètres (coefficients culturaux, profondeur racinaire, K_y ...), nous les avons rapprochées de celles auxquelles elles s'apparentent le plus.

◇ Cultures intercalées

On distingue plusieurs types de cultures intercalées, selon la combinaison des couvertures du sol :

- deux cultures contiguës,
- une culture couvrant l'autre,
- une culture au bord de l'autre,

(Allen, Perera, Raes, Smith ; 1998).

• **Dans le cas de cultures contiguës** de même taux de couverture, c'est le K_c de la culture la plus haute qui est adopté. En effet, celle-ci crée une barrière protégeant la seconde du vent. La culture la plus basse transpire donc moins. Ainsi, pour les fèves en intercalaire avec le piment de Mlelsa, c'est le K_c de la fève qui prime.

On peut cependant remarquer que le cycle de la fève s'allonge en présence du piment, passant de 4 à 7 mois. L'une des cultures se développe donc au détriment de l'autre, dont elle ralentit la croissance. C'est pourquoi, étant donné que ces deux cycles ne diffèrent pas beaucoup, nous nous sommes permis de conserver le raisonnement initialement tenu, à savoir de prendre le maximum des deux K_c .

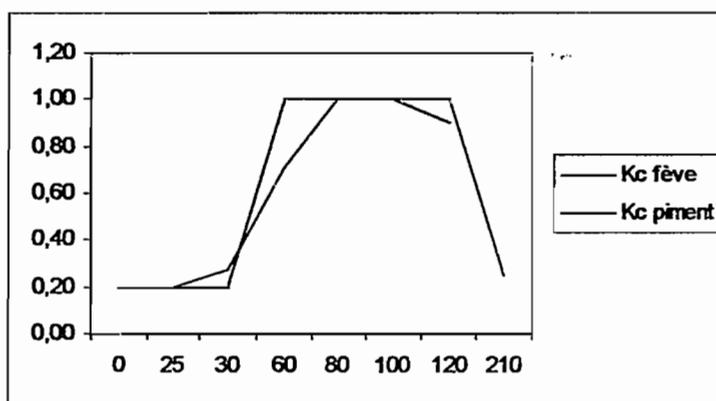


Figure 19 : K_c de la fève et du piment cultivés en intercalaire

• **Les champs plantés en arbres et en culture annuelle** sont également considérés comme des cultures contiguës. En effet, sur les périmètres observés, la terre n'est cultivée qu'entre les arbres (et non dessous). Le taux de recouvrement n'est en revanche pas égal. Les besoins en eau des arbres et de la culture s'ajoutent donc proportionnellement à la surface occupée par chacun (J.P. Luc).

La surface occupée des arbres par hectare est calculée de la manière suivante :

$$S_{\text{occupée/ha}} = 1 - (\text{nombre de pieds/ha}) * \pi D^2/4$$

où D est la circonférence moyenne de l'arbre [m].

Pour l'olivier, principal concerné, nous avons pris 6 m (observations de terrain).

Par ailleurs, le coefficient cultural de l'olivier a été calculé pour une densité moyenne d'arbres, soit 50 pieds/ha. Il nous faut donc le corriger proportionnellement à la nouvelle densité.

Le K_c total est ainsi déduit :

$$K_{c \text{ total}} = (n/50) K_{c \text{ olivier}} + S_{\text{occupée/ha}} * K_{c \text{ culture}}$$

Avec n , le nombre de pieds par hectare.

◇ Discussion et ajustement des K_c

- Les besoins en eau obtenus en utilisant ces coefficients cultureux sont très élevés,
 - d'une part par rapport aux volumes habituellement apportés par les agriculteurs (même ceux qui ne sont pas limités en eau),
 - d'autre part par rapport aux calculs déjà effectués sur la zone.
- Nous avons par la suite pu consulter le bulletin FAO n°56, qui contient une **remise à jour du calcul des coefficients cultureux** par rapport au bulletin n°24 : "Les valeurs de K_c ne sont en général pas très différentes, excepté pour un vent fort et une humidité relative faible".

Le calcul de $K_{c \text{ mi-saison}}$ et $K_{c \text{ récolte}}$ est alors ajusté de la manière suivante :

$$K_c = K_c(\text{Tab}) + [0,04*(u_2 - 2) - 0,04*(RH_{\min} - 45)] * (h/3)^{0,3}$$

avec :

K_c , le coefficient cultural ajusté aux conditions climatiques,

$K_c(\text{Tab})$, le coefficient cultural édité pour un climat sub-humide et un vent de 2 m s^{-1} ,

RH_{\min} , l'humidité relative minimum au cours de la période végétative [%],

$20 \% \leq RH_{\min} \leq 80 \%$,

u_2 , la vitesse du vent à 2 m au dessus d'un gazon, au cours de la période concernée, $1 \leq u_2 \leq 6 \text{ m s}^{-1}$,

h , la hauteur de la culture en fin de cycle [m], $1 \leq h \leq 10 \text{ m}$.

A un climat semi-aride correspond $RH_{\min} = 30\%$ (Allen, Perera, Raes, Smith ; 1998). Le vent est fort (8 m s^{-1}), mais la validité de la formule n'allant que jusqu'à 6 m.s^{-1} nous nous y limitons. Les hauteurs de cultures ont été observées à Mlelsa.

Malheureusement, ce calcul donne des valeurs tout aussi élevées que la première méthode, si ce n'est plus.

- Il semblerait plutôt que ce soit la **densité foliaire** qui soit en cause dans notre surévaluation. Les cultures sont en effet très extensives dans notre cas, la transpiration des plantes est donc plus faible. Lorsque la densité de végétation, la hauteur ou la surface foliaire sont inférieures à celles obtenues dans des conditions "normales", les valeurs de K_c doivent être réduites. Le $K_{c \text{ mi-saison}}$ pourra dans ces conditions être réduit de 0,1 à 0,5. Telle correction doit être faite selon la réduction de la surface foliaire effective (verte) par rapport à celle des couverts ayant une végétation et une densité normale (Tiercelin, 1998).

Etant donné que, là encore, les données manquent, nous nous contentons donc de limiter les $K_{c \text{ mi-saison}}$ à 1 (J.Vachez).

Finalement, à faire de nombreux ajustements à l'aide de formules complexes où les paramètres à estimer sont légions, on obtient une formule empirique dont la pertinence est incertaine. On préfère faire directement des approximations en lien avec la réalité.

3.4.5.4 Coefficients de réponse au rendement

Les coefficients de réponse au rendement K_y proviennent de AHT, pour les cultures disponibles. Les autres sont fournis par le bulletin FAO n°33 (Doorenbos et Kassam, 1987).

- **Calcul du Ky de l'olivier**

La simulation de l'olivier en sec, en année médiane, nous a permis de déduire un rapport total ETR/ETM de 21%. De plus, nous avons relevé sur le terrain les rendements en sec et en irrigué, qui sont respectivement de 1 et 2,5 t/ha.

Nous en avons ainsi déduit le Ky pour un stress global :

$$Ky = (1-ETR/ETM)/(1-Ya/Ym)$$

avec :

Ya, le rendement réel,

Ym, le rendement maximal.

Nous obtenons $Ky = 0,8$.

Cette valeur nous paraît plausible, car l'olivier est plus résistant au stress hydrique qu'une grande partie des cultures.

Le résultat des réflexions menées par culture figure sous forme de fiches culturales en annexe 5.

3.5 LES BESOINS EN EAU PAR CULTURE

Pour estimer les besoins en eau d'irrigation, un calcul de bilan hydrique du sol peut être effectué en simulant une parcelle non irriguée. Ce bilan hydrique permet de calculer l'évapotranspiration réelle de la culture, ainsi que, variable intermédiaire dans le calcul de l'ETR, l'évapotranspiration maximale ETM. La dose d'irrigation peut être alors estimée par la différence (ETM-ETR), et ce, au pas de temps décadaire (Tiercelin, 1998).

Outre ces besoins en eau, nous avons également évalué la perte de rendement des cultures traditionnellement pratiquées en sec.

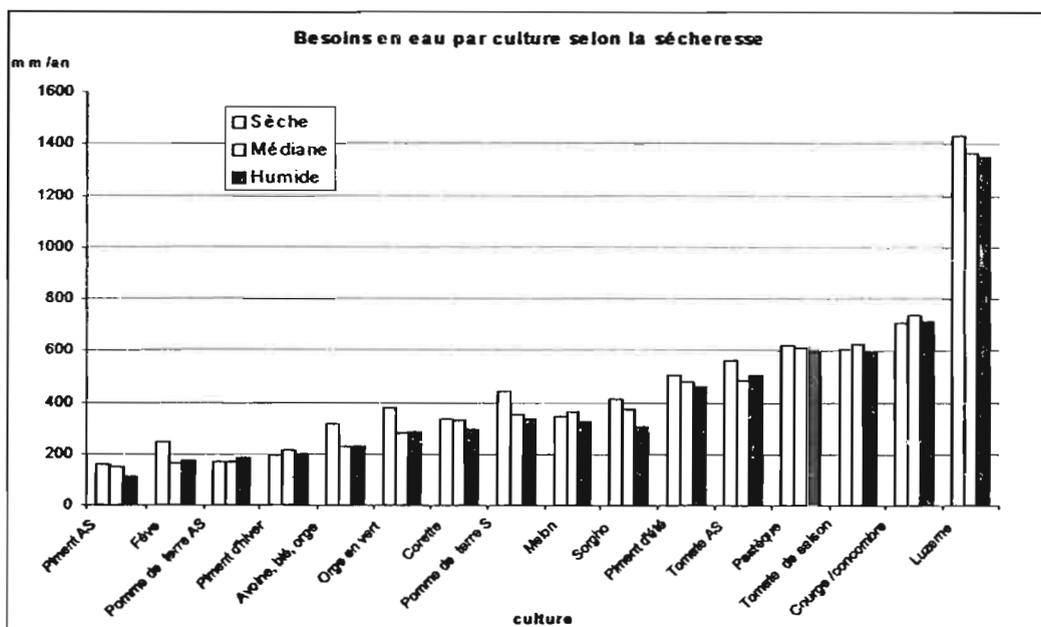
3.5.1 Besoins en eau selon la pluviométrie

La totalité des résultats figure en annexe 6.

◇ Besoins annuels

Les besoins en eau annuels varient de 180 à 800 mm/an en année médiane, avec un écart pour la luzerne qui est à 1400.

La multiplication de ces chiffres par un facteur de 10 permet d'obtenir des m³/ha.



Les écarts entre année sèche, humide ou médiane sont mineurs (100 mm maximum). Les années sèche et humide restent proches : il se peut que les besoins soient plus forts en humide qu'en sec. En effet, l'année 1991 (H) a été très humide au printemps (janv-mai), mais très sèche en automne (septembre-décembre). Ce qui explique pourquoi on trouve des besoins en eau plus élevés en année humide qu'en année sèche pour les cultures d'automne (courge, pomme de terre d'arrière saison, piment d'hiver).

◇ *Comparaison avec d'autres résultats*

• **Pratiques réelles d'irrigation**

Nous faisons l'hypothèse qu'un agriculteur irriguant avec son propre puits, donc non limité en eau, fournit aux cultures la totalité de leurs besoins en eau.

Les ordres de grandeur relevés à proximité du périmètre de Mlelsa correspondent avec nos résultats :

- 2500 m³/an pour le blé,
- 6000 m³/an pour la pastèque.

Nous estimons donc que le calage des paramètres est valable. Cela permettra d'avoir des stress hydriques, et surtout des pertes de rendement un peu plus proches de la réalité, même si des résultats éloignés permettent malgré tout de faire réagir les agriculteurs.

• **Un calcul plus approximatif**

S. Feuillette a fait le calcul : $Kc * ETP - Pluie$ au pas de temps mensuel.

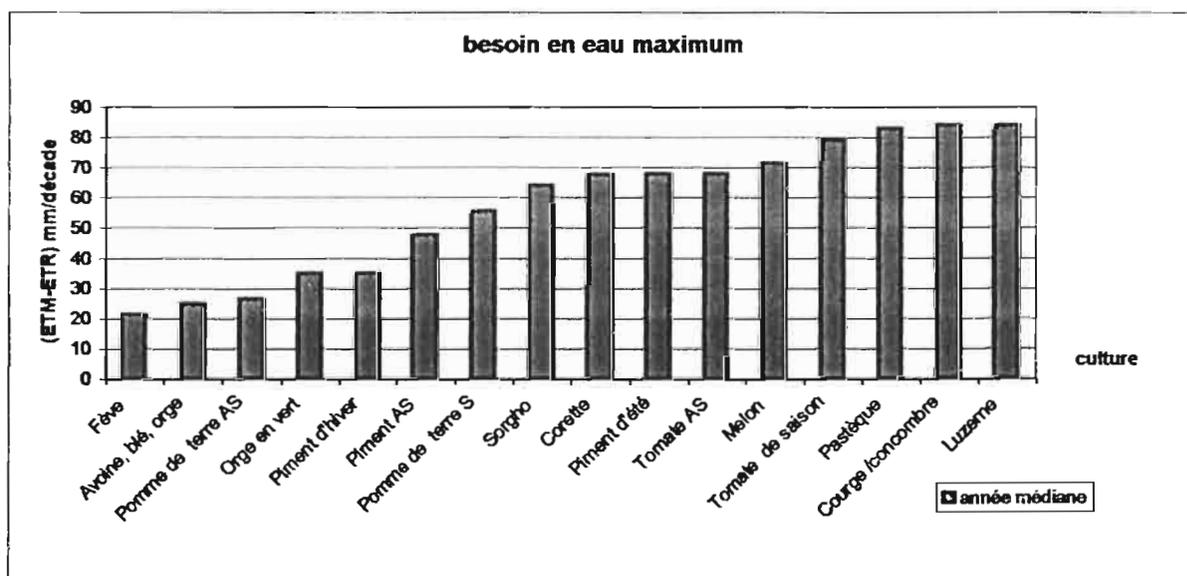
Ces calculs donnent 389 et 156 mm/an pour le blé, 633 et 494 mm/an pour la pastèque, respectivement pour l'année la plus sèche et la plus humide des 20 dernières années. On reste donc dans la même "fourchette", mais l'utilisation d'années hydrologiques extrêmes ne nous permet pas de pousser la comparaison plus loin. Il semblerait cependant que nos résultats soient plus élevés, ce qui est normal, en raison du pas de temps plus fin.

◇ *Besoins maximum par décade*

La comparaison des besoins annuels entre culture est très liée à la longueur du cycle végétatif. Ainsi, la luzerne est une culture en place sur la quasi totalité de l'année, d'où un besoin en eau élevé. Afin de s'affranchir de ce facteur, on étudie les besoins maximum par décade.

Cette analyse est aussi intéressante car le débit d'exhaure est constant tout au long de l'année : c'est ce facteur qui est déterminant dans la limitation de l'apport. Nous ne sommes pas dans le cas d'une ressource à répartir sur l'année.

Puisqu'il n'y a pas de grande différence entre les trois années statistiques, nous n'utilisons donc ici que l'année médiane.



Les besoins en eau les plus faibles par décade sont ceux du blé et de la fève (20 mm) ; les plus forts : la courge, la tomate, la luzerne, la pastèque. Les cultures d'hiver sont donc logiquement les moins nécessaires, puis l'ETP y est moins fort, et les cultures maraîchères d'été le sont le plus.

3.5.2 La réponse au rendement en sec

| 1-Ya/Ym | année pluviométrique | | |
|---------|----------------------|-------------------|------------------|
| | sèche (1988) | médiane (1980) | humide (1991) |
| blé | 78% | 55% | 56% |
| sorgho | 86% | 67% | 58% |
| fève | 101% | 67% | 73% |

Tableau 22: Perte de rendement pour des cultures en sec

Les céréales et la fève sont assez fréquemment cultivées en sec. Comme le montre le tableau ci-contre, la perte de rendement dépend alors beaucoup de la pluviométrie. Au vu de l'importance des pertes dans tous les cas, le gain pour une culture irriguée va du simple au double.

Les valeurs obtenues ne donnent que des ordres de grandeur. Les comparaisons établies montrent l'approximativité des résultats, et qu'une marge d'erreur assez large est acceptable vis à vis des résultats qui vont suivre.

Face à ces besoins en eau théoriques, d'autres simulations comprenant la dose d'irrigation réelle sont réalisées en vue d'une confrontation. Les données dont nous disposons sur cette dose sont les apports bruts, qu'il nous faut traiter avant de les inclure dans le bilan hydrique.

3.6 APPORTS REELS : LE FACTEUR IRRIGATION

La dose d'irrigation incluse dans le bilan hydrique est un apport net. Les pertes dues à la distribution de l'eau, ainsi que celles qui ont lieu sur le champ même n'en font pas partie. Il nous faut donc les déduire du volume brut fourni à la pompe. Par ailleurs, nous formulerons des hypothèses sur le passage du volume d'eau par exploitant à celui par champ.

Les étapes de conversion se résument ainsi :

$h/\text{ayant droit} - h/\text{parcelle} - m^3/\text{parcelle} - m^3/\text{champ} - \text{mm}/\text{champ}$

3.6.1 Evaluation des débits et des pertes

◇ Allocation de l'eau à la parcelle

Dans les GIC étudiés, le tour d'eau est noté journalièrement. Le pompiste inscrit sur un cahier la date, le nom de l'agriculteur, et le nombre d'heures d'irrigation que celui-ci a reçu.

Or la plupart des agriculteurs exploitent plusieurs parcelles. La relation entre le nom inscrit sur le cahier et celui de l'exploitant est d'ailleurs assez complexe. De nombreuses approximations ont donc été faites en raison de l'incertitude qui pèse sur les données récoltées.

Il a fallu déduire la destination de l'eau en fonction de trois éléments : le partage des mains d'eau, la situation géographique des parcelles et leur assolement.

Le cas de Mlelsa nous a en particulier posé problème. En effet, si le réseau est constitué de trois mains d'eau bien distinctes, la souplesse du réseau permet d'irriguer un bon nombre de parcelles avec une autre main d'eau que celle qui leur est attribuée.

Aussi, quand le choix n'était pas possible, les parcelles exploitées par le même agriculteur ont été considérées comme une seule.

Ainsi, la transformation du nombre d'heures en mètre cube n'est pas toujours juste : le partage entre deux parcelles n'appartenant pas à la même main d'eau ne donne pas le même volume. Mais étant donné que les tuyaux sont parfois déviés de leur main d'eau originelle (donc mêmes fuites mais perte

de débit), on peut penser que l'un dans l'autre, les écarts se rééquilibrent. ; (il aurait fallu savoir quel tuyau, quelle distance et comment sont utilisées les autres mains d'eau pour obtenir des ordres de grandeur correct, ce qui veut dire un suivi au jour le jour)

◇ *Volume brut*

Le nombre d'heures inscrit représente un volume brut dépendant du débit de la pompe :

- A Mlelsa, des mesures ont été réalisées (R. Calvez, P. Le Goulven, J.P. Luc). C'est le GIC où le débit est le plus variable, car le point de fonctionnement de la pompe varie selon la longueur de tuyaux raccordés, elle même variable. 20 L s⁻¹ en moyenne ont été adoptés.
- A Bled Abida, le débit est de 37 L s⁻¹ selon le trésorier.
- Souaïdia est équipée d'un compteur, et bénéficie d'un débit de 40 L s⁻¹.

◇ *Estimation des pertes*

De la pompe à la plante, le volume perdu est loin d'être négligeable. On distingue l'efficacité du réseau et l'efficacité à la parcelle, qui varient selon les modes d'irrigation.

• **Pertes en réseau**

Les pertes en réseau sont très liées à l'état du système. Ainsi, on peut estimer que celles du réseau sous pression de Souaïdia sont nulles.

Les mesures de débit réalisées à Mlelsa montre une variabilité des pertes selon les zones de main d'eau. Les pertes se produisent sur le primaire et le secondaire, en tuyaux BAUER. Les pertes par les bargaterres sont négligeables.

Les pertes du réseau à surface libre de Bled Abida sont importantes. Celles au niveau du secondaire ont été mesurées par la SCET.

• **Perte d'eau à l'arrosage**

La part de la quantité d'eau apportée qui ne profite pas à la plante est considérée comme une perte d'eau à l'arrosage.

Plusieurs facteurs participent à cette perte :

- La dose est appliquée de façon peu uniforme et de l'eau percole dans les parties surarrosées alors qu'elle aurait pu être utile ailleurs dans la même parcelle. Par manque de données, nous avons dû négliger cette perte. De toutes façons, au vu du prix de l'eau, on peut estimer que les agriculteurs n'irriguent pas en trop grande quantité.
- Lors d'un arrosage à la raie, une partie de l'eau s'échappe en colatures.
- La dose apportée est trop forte et le surplus percole en profondeur (toute mesure est impossible ; ce surplus est calculé dans le bilan hydrique sous le terme de drainage).

(Gilot, 1994)

Sur nos GIC, l'arrosage est à la raie pour Bled Abida, et par bargaterres pour Mlelsa et Souaïdia. Dans le premier cas, nous prenons donc en compte les pertes par colature, tandis que Mlelsa et Souaïdia ont une efficacité à la parcelle de 100 %.

◇ *Calcul du volume net*

Finalement, le volume net d'irrigation s'exprime de la manière suivante :

$$\text{Volume net d'irrigation} = \text{nombre d'heures d'irrigation} * \text{débit réel}$$

où le débit réel a été calé en fonction des hypothèses précédemment énoncées. Nous l'avons calculé en prenant une efficacité globale qui est fonction de la distance du centre de la parcelle au forage.

$$\text{Débit réel} = \alpha \text{ débit en tête de réseau} - \text{pertes par mètre linéaire} * \text{distance sondage parcelle}$$

avec α , coefficient de perte dues aux pertes de charge (N. Faysse).

$\alpha = a / (\text{distance parcelle} + \text{distance main 2 moyenne} + \text{distance main 3 moyenne} + b)$

Le débit en tête de réseau dans la formule est en fait le débit mesuré en tête de secondaire.

Cette méthode de calcul, très intuitive, permet de passer outre le manque de données, et d'obtenir des ordres de grandeur de débit proches de ceux mesurés sur les sites.

3.6.2 Distribution en mm sur les champs

La dose en millimètres est ensuite déterminée à partir de la dose en m^3 et de la superficie de la parcelle.

◇ Une répartition proportionnelle aux besoins en eau

Une parcelle contient souvent plusieurs champs, avec des cultures différentes. Pour répartir l'eau sur les champs, nous avons tenté de tenir compte des tactiques des usagers (qui peuvent arroser certains champs en priorité, pour ne laisser que des rémanents aux cultures fourragères par exemple). Il s'est avéré que ceux-ci irriguent principalement en fonction des besoins en eau des cultures :

$$dose_{\text{champ } i} = \frac{Kc_{\text{champ } i} * (\text{Volume net} / 10)}{\sum (S_i * Kc_{\text{champ } i})}$$

avec :

Volume net, le volume alloué à la totalité de la parcelle en m^3 ;

S_i , la surface du champ i en ha.

Quand une parcelle n'est pas entièrement en culture, la dose en m^3 est ainsi répartie entre les champs en culture.

Quand une irrigation se produit dans une parcelle sans aucune culture, elle est conservée en intégralité et répartie sur tous les champs

◇ Surplus d'irrigation

Nous entendons par surplus d'irrigation, les doses apportées en dehors des dates de semis et de récolte. Son calcul permet essentiellement de vérifier que des parcelles non assolées ne sont pas irriguées, ou encore que les dates d'assolement et d'irrigation correspondent bien à la même culture.

Il a conduit aussi, au travers de certaines incohérences, à constater des pratiques d'achat de l'eau par le propriétaire pour l'exploitant. Ce qui modifie la **destination de l'eau**, puisque nous avons au départ appliqué le principe payeur-exploitant de la terre pour établir la correspondance entre ayant-droits et parcelle.

Il y a des volumes perdus, en lien avec les **fluctuations des dates de semis**. Par ces calculs, nous avons pu vérifier que les dates prises étaient en général concordantes avec les irrigations réalisées. Au total, pour Mlensa, on dénombre généralement une tendance à planter le blé plus tôt qu'en novembre, et le melon se prolonge d'une semaine. La fève est également parfois irriguée avant la deuxième récolte, au cours du mois de février. Ces variations sont donc négligeables pour la culture concernée.

En revanche, quand la répartition est faite automatiquement entre cultures, le volume attribué dans la réalité à une culture plus tardive est attribué à une autre.

D'autres volumes consistent en des **irrigations de semis**. Celles-ci vont remplir les réservoirs sol et de surface de la parcelle prochainement assolée. Elles sont identifiées comme ayant lieu 1 à 2 semaines avant le semis.

Le traitement des données de tour d'eau est une tâche ardue, que nous avons tenté de réaliser avec la marge d'erreur la plus faible possible. Aussi nous sommes nous limités à l'étude d'une seule année : de septembre 98 à septembre 99.

4 ANALYSE

4.1 BLE

Durant la saison d'hiver 98-99, la reconstitution des assolements par enquête fait état de 38 champs cultivés en blé qui représentent une superficie de 61,5 ha soit 41% de la superficie du GIC.

4.1.1 Blé irrigué et blé en sec

Après entretiens avec l'enquêteur, nous avons distingué des champs en blé irrigué et d'autres en blé pluvial ou blé en sec. Comme le cycle du blé est calé sur la saison des pluies, un certain nombre d'agriculteurs s'en remettent à l'aléa climatique et fondent leur stratégie d'irrigation sur des cultures avec lesquelles l'eau sera mieux valorisée.

Cette distinction a guidé la logique de la répartition des irrigations face à des champs de cultures différentes et simultanées appartenant à un même agriculteur. En effet, le blé est cultivé en même temps que la fève de novembre à décembre et que le melon de mars à mai, toutes les 2 étant des cultures à forte valeur ajoutée.

L'eau demandée par un agriculteur a donc été attribuée en totalité aux autres cultures quand le choix se présentait.

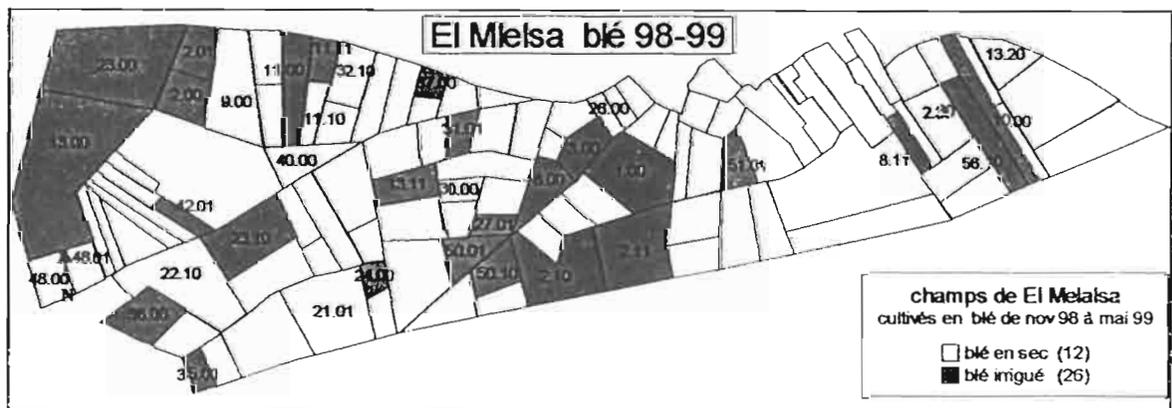


Figure 23 : Champs cultivés en blé Melsa sept 98-dec99

Sur la figure précédente, on ne note pas de logique forte d'organisation spatiale des parcelles en blé, même si celles de blé sec sont dans l'ensemble plus éloignées du forage. Etant donné que le réseau de distribution est particulièrement déficient, on aurait pu s'attendre à ce que le blé irrigué soit localisé près du pompage et le blé en sec aux extrémités des réseaux.

4.1.2 Résultats des simulations :

Nous avons effectué un classement des champs par leur stress hydrique ETR/ETM global sur les différents stades végétatifs et au niveau de tout le cycle.

Le rapport ETR/ETM total moyen atteint 60%, mais avec une forte variabilité. En fait, le rapport le plus faible (36%) correspond exactement aux chiffres des bilans réalisés sur le blé en sec avec une légère différence due aux conditions initiales prises en fonction des cultures précédentes. Cela signifie que certains agriculteurs (7 au total) qui avaient prévu d'irriguer leur blé ne l'ont pas fait, ce qui fausse totalement l'analyse des résultats.

| phase végétative | Ky | ETR/ETM blé dit irrigué | | |
|------------------|----------|-------------------------|------------|------------|
| | | moyen | min | max |
| initial | 0,4 | 83% | 75% | 96% |
| développement | 0,6 | 86% | 58% | 101% |
| mi- | 0,8 | 67% | 40% | 98% |
| maturatio | 0,4 | 34% | 9% | 86% |
| total | 1 | 60% | 36% | 91% |

Figure 24 : stress hydrique du blé à Mlelsa en 98/99 et sensibilité au stress par période végétative

Le tableau suivant présente les résultats obtenus sur les parcelles de blé réellement irriguées.

| phase végétative | Ky | blé réellement irrigué | | |
|-----------------------|----------|------------------------|------------|------------|
| | | moyen | min | max |
| initiale (nov) | 0,4 | 83% | 75% | 96% |
| développement (déc) | 0,6 | 96% | 58% | 101% |
| mi-saison (janv-mars) | 0,8 | 77% | 47% | 98% |
| maturatio (avr-mai) | 0,4 | 44% | 9% | 86% |
| total | 1 | 69% | 44% | 91% |

Figure 25 : stress hydrique du blé réellement irrigué à Mlelsa en 98-99

(La valeur de 101% de ETR/ETM maximum en phase de développement est due aux arrondis dans les calculs. Cette erreur est négligeable : il faut considérer une valeur réelle de 100%).

Le degré de satisfaction est meilleur (ETR/ETM = 69%) mais les écarts entre parcelles restent forts avec une tendance générale de plus grande satisfaction dans la période de développement alors que la phase de mi-saison est plus sensible au stress hydrique (Ky=0,8).

4.1.3 Répartition géographique des performances

Lorsque l'on reporte les indices de satisfaction sur les parcelles (figure suivante), on s'aperçoit que la plupart des agriculteurs qui n'ont pas irrigué malgré leurs intentions premières sont situés en fin des systèmes de distribution ouest, systèmes soumis à des fuites importantes (parcelles numérotées et en blanc).

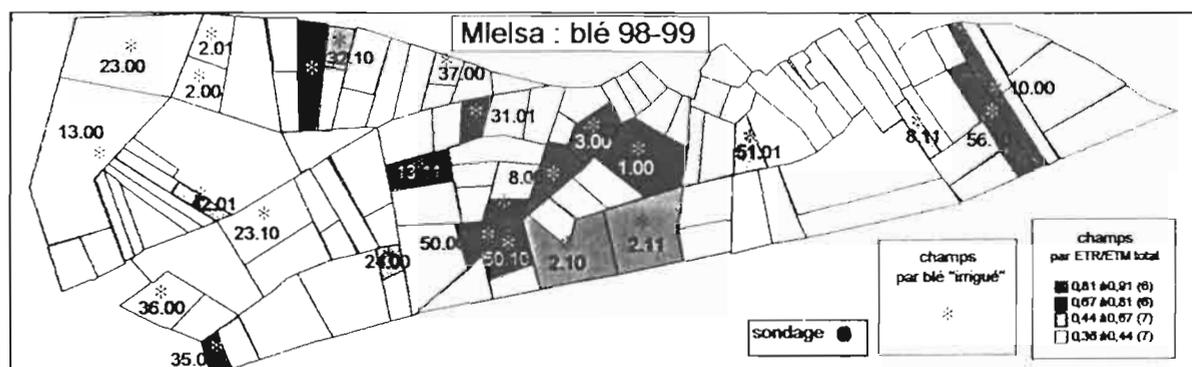


Figure 26 : Répartition géographique du rapport total ETR/ETM du blé à Mlelsa en 98-99

On retrouve maintenant une logique d'ordonnement spatial : les blés réellement irrigués sont plutôt regroupés près du forage à l'exception de la partie Est du périmètre où le réseau de distribution est

correct ; les mieux satisfaits sont proches du forage à l'exception du champ 35.00 qui obtient les meilleures performances en théorie. Or un retour sur le terrain a confirmé qu'en réalité ce champ n'avait pas eu "une bonne réussite" dans sa production de blé. Cette différence entre résultats théoriques et réalité peut s'expliquer par une incertitude sur la surface du champ, ce dernier étant très petit, les erreurs de précision sur la surface réellement emblavée peuvent avoir un impact important sur le calcul des doses en millimètres. Il semblerait par ailleurs que le calage du débit reçu au niveau de cette parcelle ait été l'occasion d'une surestimation, en comparaison avec la description obtenue lors de la deuxième enquête.

La logique des résultats est donc ainsi structurée sur un réseau de distribution défaillant, où les différences amont-aval sont importantes.

4.1.4 Phases de stress

Pour analyser les variations du rapport ETR/ETM au cours du cycle, nous avons sélectionné 3 champs de stress hydrique global approchant les valeurs statistiques calculées (maximum, moyenne, minimum), ainsi qu'un champ en blé sec pour servir de comparatif.

Le maximum de 91% étant atteint par le champ 35, nous avons, pour les raisons évoquées plus haut, préféré choisir le champ 56.10 qui est très proche et dont le résultat calculé par bilan concorde avec la réalité.

| N° champ | 2.01 | 42.01 | 56.10 | 50.01 |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|
| superficie (ha) | 1,2 | 0,5 | 1,6 | 3,6 |
| culture 1 | EHB_BLE | EHB_BLE | EHB_BLE | EHB_BLE |
| Culture 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ini | 83% | 96% | 86% | 77% |
| dev | 58% | 92% | 100% | 101% |
| mi-sais | 40% | 47% | 80% | 98% |
| récolte | 9% | 11% | 33% | 62% |
| Total culture 1 | 36% | 44% | 67% | 85% |

Figure 27 : choix de champs de stress hydrique total minimum, moyen et maximum.

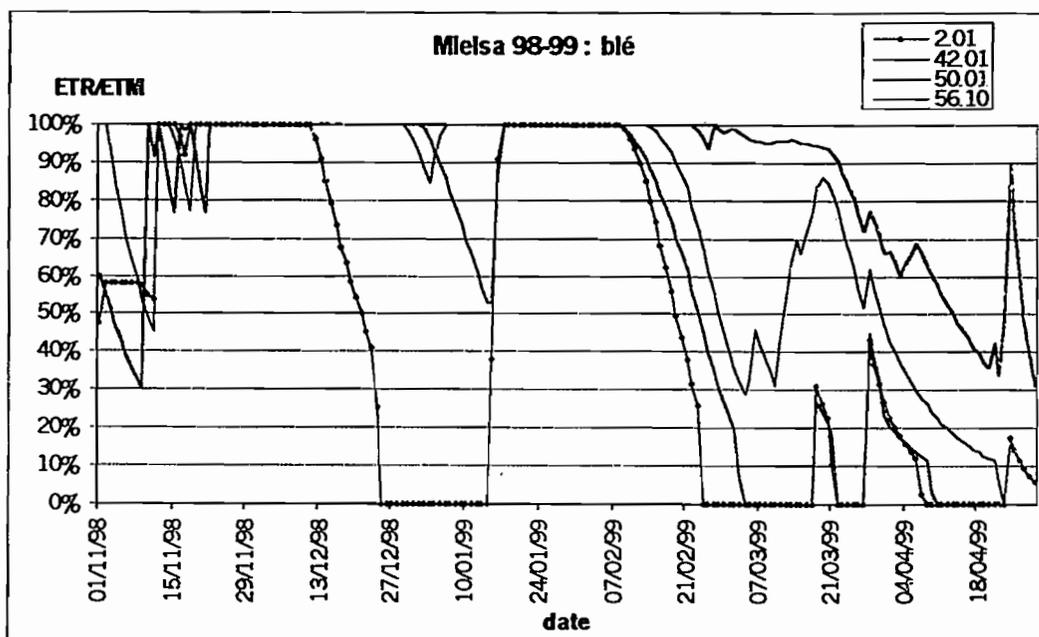


Figure 28 : variations du rapport ETR/ETM du blé, Mlelsa 98-99

Durant la **phase initiale**, on note peu de différence entre les blés irrigués et le blé en sec du fait de pluies commençant en à la mi-novembre. Les quelques différences qui apparaissent au début des calculs sont dues aux conditions initiales de stock d'eau dans le sol calculées en fonction des cultures et irrigations précédentes. Les stress hydriques observés sur les quatre champs sont moyens pour les

15 premiers jours du cycle. Les agriculteurs réalisent en effet simplement une irrigation de semis, puis n'arrosent plus durant cette période. Les pluies permettent ensuite d'assurer les besoins exprimés par la culture. Celle-ci est d'ailleurs peu sensible au stress hydrique au cours de cette période.

Les pluies sont inexistantes de mi-décembre à la mi-janvier, durant la **phase de développement**, la plus sensible au stress hydrique. Le rapport ETR/ETM des blés en sec chutent considérablement, les champs irrigués se maintiennent à un degré de satisfaction correct, même pour le champ le moins performant. A cette époque, il n'y a pas trop de concurrence sur l'eau, et l'irrigation du blé est assez bien menée.

Durant la **phase de mi-saison**, les pluies reprennent de mi-janvier jusqu'au 10 février et permettent à l'ensemble des cultures de blé de reprendre une évapotranspiration maximale. Après cette date, la saison des pluies est pratiquement terminée malgré deux petites pluies en mars et en avril. Les blés en sec sont durement touchés, mais aussi les blés irrigués moyens et les moins performants. Seuls les champs les plus performants arrivent à maintenir un degré de satisfaction correct. Cette phase est pourtant sensible au stress.

Deux explications possibles : tension sur la ressource du fait de demandes globales importantes amenant une saturation de la pompe alimentant le périmètre, ou choix stratégique des agriculteurs.

Or, au cours de cette période, on note une augmentation des prélèvements sur le forage mais il n'y a pas saturation de la pompe car les durées de prélèvements n'atteignent pas 9 heures par jour.

Par contre à cette époque commencent les semis de melon et de pastèque, cultures beaucoup plus spéculatives et il semble bien que cette concurrence se fasse au détriment des champs de blé, notamment pour ce qui concerne la parcelle la moins performante (42.01) qui se trouve assez éloignée du forage et sur un réseau de distribution peu performant. La parcelle 56.10 qui a obtenu des résultats moyens se trouve elle aussi assez loin du forage mais sur le réseau de distribution Est n'est pas soumise à de grosses fuites. Le champ le mieux irrigué se trouve près du forage.

Dans la **phase d'arrière saison**, les rapports ETR/ETM diminuent pour l'ensemble des champs irrigués, aucune irrigation n'est pratiquée. Il semble que la concurrence du melon et de la pastèque soit prépondérante dans les stratégies d'irrigation. Les parcelles les plus performantes maintiennent un taux de satisfaction correct, les autres tendent vers le point de flétrissement mais il faut noter que nous sommes en fin de cycle dans une période où la culture est peu sensible au stress.

4.1.5 Conclusion

Manifestement, le blé n'est pas une culture sur laquelle les irriguants vont fonder leur stratégie d'irrigation d'abord parce que le blé n'est pas une culture qui valorise énormément la ressource, ensuite parce que le cycle de culture est calé sur la saison des pluies qui en temps normal doit assurer une production correcte. Si la saison est bonne, la culture sera laissée en culture pluviale, sinon on l'irriguera en appoint.

Malheureusement, l'année 98-99 n'est pas une bonne année pluviométrique et les blés en sec n'obtiennent que 36% des rendements qu'ils pourraient avoir sans contrainte eau. Ces mauvais résultats sont confirmés par des confrontations de terrain.

Les champs de blé réellement irrigués se situent préférentiellement près du forage ou dans des endroits du périmètre dans lesquels les agriculteurs sont assurés d'avoir des débits conséquents (réseau Est). Cette organisation spatiale est encore mieux structurée lorsque l'on compare la situation des champs en fonction de leur performance.

Tant que le blé ne concurrence pas d'autres cultures, les champs irrigués maintiennent un degré de satisfaction de la culture assez bon, mais dès que le melon et la pastèque sont semés (fin février/début mars) ces dernières cultures prennent la priorité et le blé est laissé à l'aléa climatique. Le forage n'étant pas complètement exploité durant cette période, il ne peut s'agir que d'un coût de l'eau jugé prohibitif par les agriculteurs, d'autant plus qu'ils compteront toujours sur l'apparition de pluies. Il serait intéressant de comparer ces résultats avec des blés irrigués en exploitation privée pour voir laquelle des deux explications est prépondérante (espoir de pluie ou prix de l'eau).

4.2 FEVE, PIMENT-FEVE EN INTERCALAIRE :

Au total, il a été dénombré 12 champs cultivés en fève, et 9 champs en fève intercalée avec du piment au cours de l'année 1998-1999. Ils représentent respectivement 12,7 et 8 ha soit 8 et 5% de la surface du GIC.

L'illustration ci-dessous montre que ces cultures sont essentiellement pratiquées dans les zones centrale et Est, c'est-à-dire là où la fourniture en eau est le mieux assurée par le réseau.

Les besoins en eau de la fève ne sont pas très élevés puisque c'est une culture d'hiver. Cependant, elle n'est à priori pas cultivée en sec, en raison de sa valeur économique.

Nous avons étudié séparément les deux cultures, car elles ont une durée de cycle différente. Mais nous menons les comparaisons de front, en raison des stratégies identiques qu'adoptent les agriculteurs vis à vis d'elles.

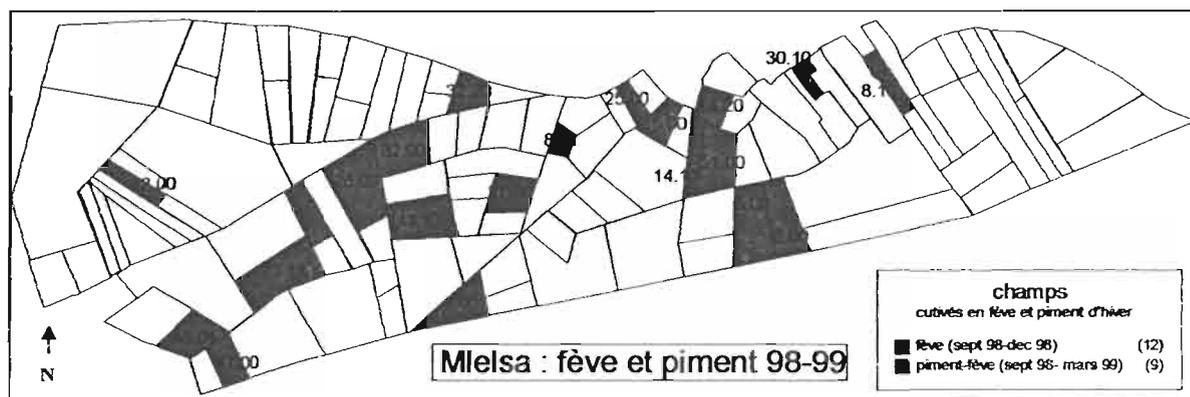


Figure 29 : Champs cultivés en fève et en piment d'hiver à Mlelsa de sept 98 à mars 99

4.2.1 Résultat des simulations

Le stress chez la fève atteint les mêmes ordres de grandeur que le blé. Mais sur les phases végétatives, il est moins bien réparti.

On peut constater que le minimum est parfois très bas (0%) chez la fève, ce qui est assez surprenant, car c'est une culture à forte valeur ajoutée. La conduite de l'irrigation est à priori différente de celle du blé, et habituellement menée de manière à satisfaire correctement les besoins en eau des plantes. Dans les faits, la fève a en grande partie été malade lors de cette saison. Les problèmes sont survenus très tôt dans le cycle cultural, d'où le rapport ETR/ETM nul dès le début. La phase la plus sensible, le développement, est celle qui a le moins souffert.

La perte globale de rendement est elle aussi très variable (29 à 84%).

| Phase végétative | Ky | ETR/ETM | | |
|------------------------------------|------|---------|-----|------|
| | | moyenne | min | max |
| initiale (début sept) | 0,2 | 34% | 0% | 76% |
| développement (mi-sept à déb. oct) | 0,9 | 83% | 78% | 88% |
| mi-saison (mi-oct à déb. déc) | 0,7 | 62% | 22% | 93% |
| maturation (mi-déc à fin déc) | 0,2 | 48% | 0% | 100% |
| total | 1,15 | 64% | 36% | 85% |
| Ya/Ym total | | 61% | 29% | 84% |

Figure 30: Stress hydrique de la fève

Les résultats concernant la fève en intercalaire avec du piment sont moins bas, mais dénotent les mêmes problèmes.

(le coefficient de réponse au rendement K_y de cette culture particulière n'a été estimé que pour un stress sur la totalité du cycle. On a $K_y \text{ total} = 1,1$)

| phase végétative | ETR/ETM | | |
|-----------------------|---------|-----|-----|
| | moyen | min | max |
| initiale (sept) | 39% | 26% | 58% |
| développement (oct) | 84% | 83% | 88% |
| mi-saison (nov à fev) | 59% | 40% | 84% |
| maturation (mars) | 32% | 7% | 70% |
| total | 55% | 40% | 77% |
| Ya/Ym total | 51% | 34% | 75% |

Figure 31 : Stress hydrique de la fève intercalée avec du piment

4.2.2 Répartition géographique des performances

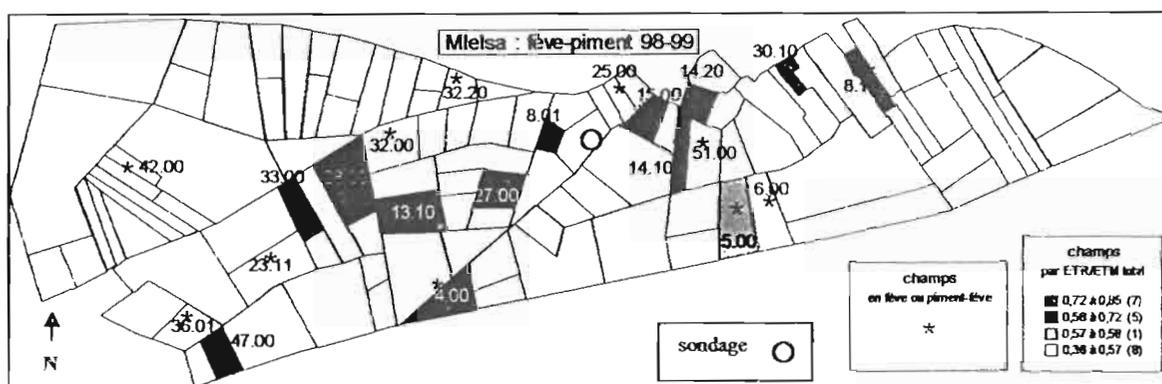


Figure 32 : ETR/ETM total de la fève/piment-fève par champ en 98-99

La répartition des déficits de la fève et du piment-fève n'est pas nette, et ne permet pas de tirer de conclusion. Les résultats sont en effet faussés, en raison de maladies qui ont touché une grande majorité des champs.

Les exploitants ont donc été conduits à abandonner leurs cultures, tandis que d'autres ont irrigué plus que d'ordinaire afin de tenter de pallier à ce problème.

4.2.3 Phases de stress

Là encore, nous raisonnerons sur des champs représentatifs des valeurs max., min., moy. de l'indice de performance ETR/ETM, en éliminant des champs trop petits, où l'imprécision des surfaces emblavées viendraient par trop perturber les résultats.

| N° champ | 23.11 | 4.00 | 33.00 |
|-----------------|----------|----------|----------|
| superficie (ha) | 2,2 | 1,1 | 0,9 |
| culture 1 | EHB_FEVP | EHB_FEVP | EHB_FEVP |
| culture 2 | 0 | 0 | 0 |
| ini | 0% | 46% | 43% |
| dev | 78% | 87% | 82% |
| mi-sais | 22% | 67% | 80% |
| récolte | 0% | 53% | 97% |
| Total culture 1 | 36% | 68% | 76% |

Figure 33 : Choix de champs de stress hydrique total minimum, moyen et maximum de la fève

| N° champ | 36.01 | 5.00 | 8.01 |
|-----------------|----------|----------|----------|
| superficie (ha) | 1,2 | 1,6 | 0,4 |
| culture 1 | EHB_FEVP | EHB_FEVP | EHB_FEVP |
| culture 2 | 0 | 0 | 0 |
| ini | 26% | 44% | 58% |
| dev | 83% | 83% | 88% |
| mi-sais | 40% | 65% | 84% |
| récolte | 7% | 21% | 68% |
| Total culture 1 | 40% | 57% | 77% |

Figure 34 : Choix de champs de stress hydrique total minimum, moyen et maximum

Le champ dont le déficit total est minimum (23.11) n'a dans les faits reçu aucune irrigation. Les variations de son déficit sont donc en lien direct avec la pluviométrie : il servira de comparatif au cours de l'analyse. Cette absence d'apport par l'agriculteur est du à la maladie, intervenue dès le début du cycle (vérification de terrain).

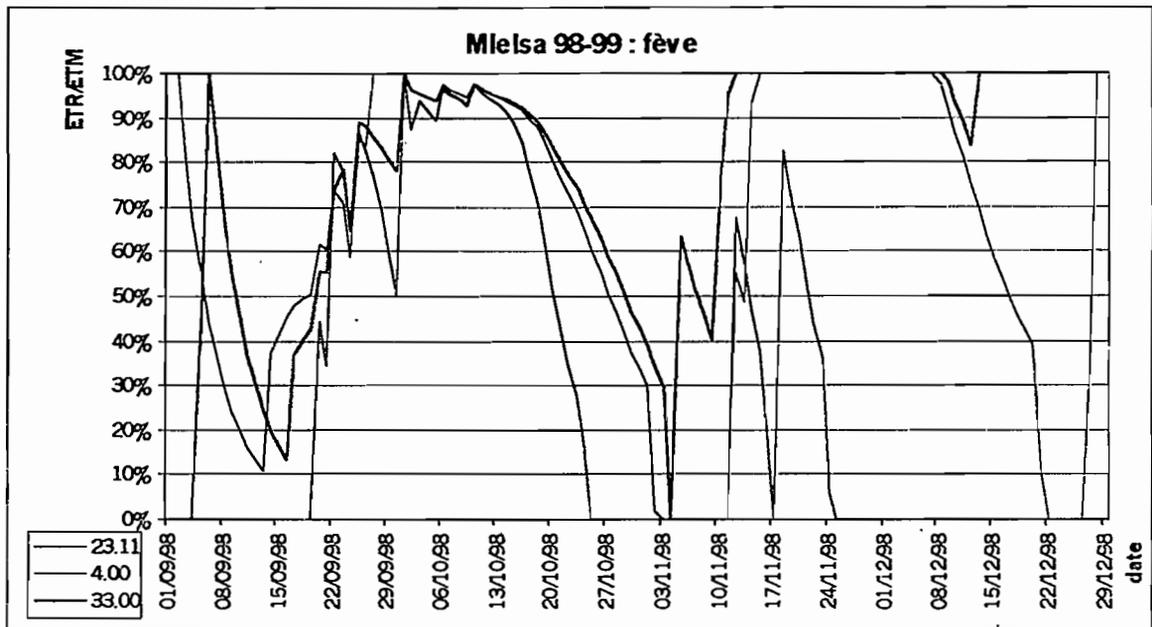


Figure 35 : Variations de ETR/ETM de la fève, Mlelsa 98-99

Pour les trois champs, le stress hydrique suit plus ou moins la pluviométrie. Celle-ci est constituée de deux événements pluvieux (mis en évidence grâce au champ non irrigué), formant trois intervalles au cours desquels les stress hydriques des trois champs reflètent trois types de réaction face à la sécheresse.

Le **premier intervalle**, au début du cycle, est l'occasion des irrigations de semis. Le décalage de l'irrigation de semis du champ « moyen » est dû au fait que le modèle a été calculé avec des dates de semis moyennes : un écart de 5 jours est acceptable. L'irrigation de semis (champs 4.00 et 33.00) est suivie d'une période de stress de 15 jours, qui est aussi la durée de la phase initiale, où l'on peut penser que les agriculteurs comptaient sur la pluie. Puis, à défaut de celle-ci, ils ont commencé à irriguer.

La première averse survient fin septembre jusqu'à mi-octobre, correspondant avec la période de développement. Ceci explique le stress moindre obtenu au cours de cette période sensible. On note cependant que les 2 champs irrigués ont reçu de l'eau.

Lors de la **mi-saison**, les comportements entre le champ moyen et celui qui a obtenu la meilleure performance se différencient. L'exploitant de celui-ci compte sur la pluie, jusqu'à ce que les cultures aient atteint un niveau de stress critique, à partir duquel il décide d'irriguer. Le champ moyen, lui, n'irrigue pas pour des raisons difficiles à cerner car à cette époque il n'y a pas de culture concurrentielle.

Deux événements pluvieux, insuffisants, interviennent ensuite à mi novembre.

A partir de ceux-ci, les champs sains au départ sont tous deux fortement irrigués. Sachant que le champ 4.00 n'a en réalité pas eu une « bonne réussite », on peut penser que cette culture, malade, n'était en réalité pas à l'ETM, et a demandé une plus forte quantité d'eau que la normale. Son irrigation est d'ailleurs interrompue, tandis que le 33.00 continue d'être satisfait en eau.

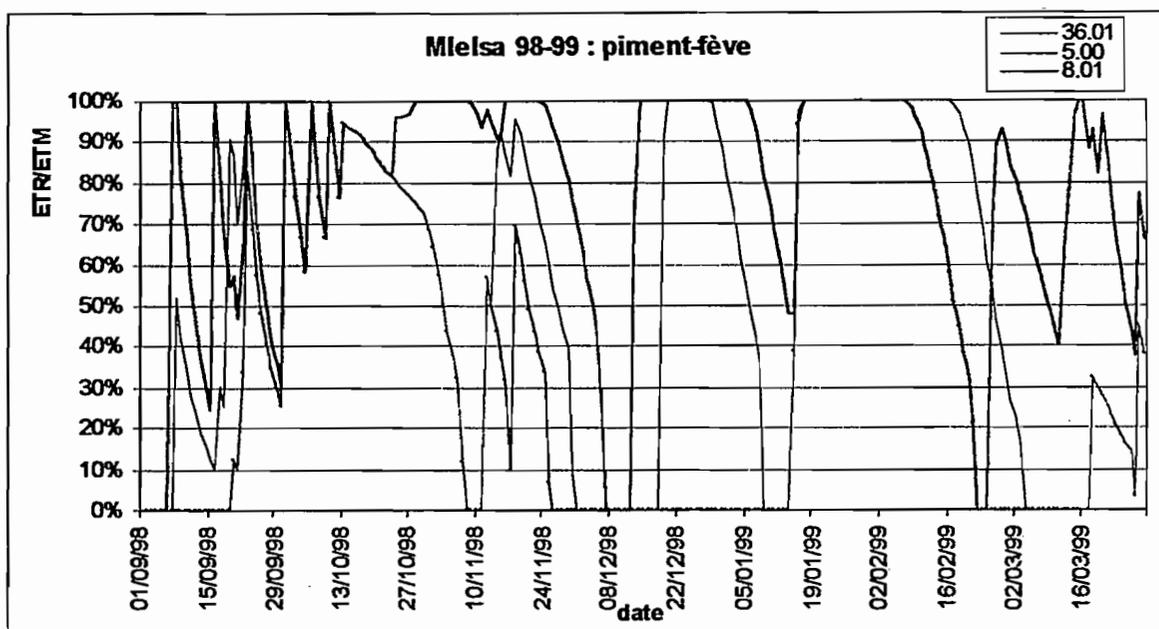


Figure 36 : Variation de l'ETR/ETM de fève/piment, Mlelsa 98-99.

Concernant la culture de la fève en intercalaire avec le piment d'hiver, nous observons les mêmes périodes de déficit de septembre à décembre (c'est à dire sur la période correspondant à la culture de la fève précédemment étudiée). Le champ 36.01 n'a pas reçu d'irrigation et servira de comparatif.

Dans la suite du cycle, de janvier à mars, des irrigations régulières sont réalisées de la même manière, afin de compenser la sécheresse du climat (nous savons des deux champs 8.01 et 5.00 qu'ils n'ont pas rencontré de problème sanitaire) mais que ces irrigations arrivent assez tardivement une fois que le stock d'eau dans le sol est épuisé. A cette époque, il n'y a pas de tension sur le forage, on peut donc penser que les agriculteurs attendent vainement la pluie avant de se décider à payer une irrigation pour sauver la culture.

En fin de cycle, le champ le champ 8.01 est irrigué à peu près correctement, tandis que le 5.00 reçoit nettement moins d'eau : il a été délaissé au profit du melon semé au cours de cette période.

4.2.4 Conclusion

Les forts stress hydriques obtenus pour la fève, seule ou intercalée, sont en partie liés aux problèmes agronomiques rencontrés par cette culture en hiver 98. Il est difficile de faire la part entre ce qui est dû à la sécheresse, et ce qui est dû à l'abandon de la culture. On peut noter cependant que les résultats globaux obtenus ne sont pas très forts pour des cultures à forte valeur ajoutée.

De nombreux champs ont souffert de maladies cette année là. Dès lors, les agriculteurs ont arrêté d'irriguer, et laissé la fève sécher sur pied, ou bien ils ont « sur-irrigué » par rapport aux besoins « normaux ». Il est à noter que le bilan hydrique n'est d'ailleurs plus valable dans de telles conditions, puisque les besoins en eau estimés ont été calés pour des cultures saines.

Par ailleurs, ce phénomène nous empêche de discerner une répartition géographique logique des insatisfaits. Il faut malgré tout de même remarquer que la culture de la fève est quasiment absente de la main d'eau Ouest.

La fève est une culture d'hiver, l'irrigation vient donc en complément de la pluie, lorsque la période sèche est trop longue : à la mi-décembre, et en début mars.

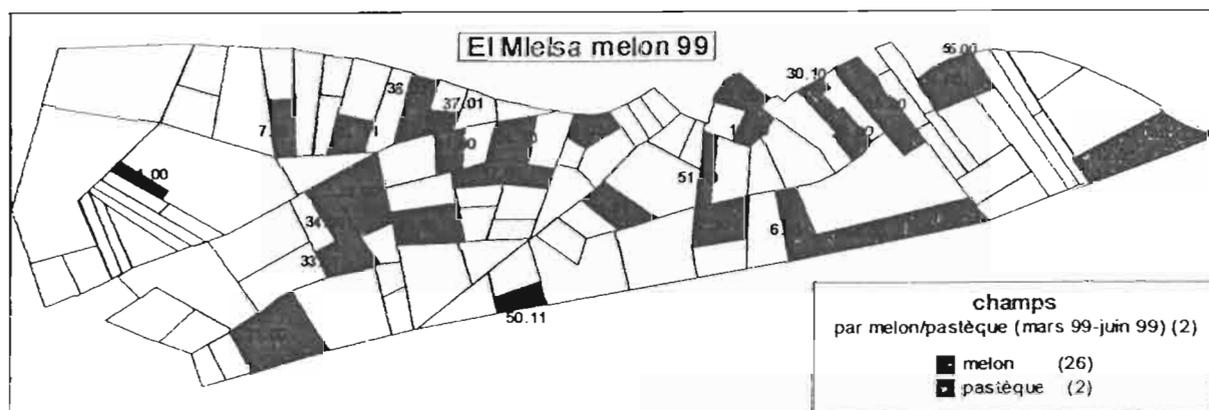
Mais contrairement au blé, les agriculteurs acceptent d'investir dans de l'eau, car la rentabilité économique en est meilleure. La culture est irriguée le plus possible en eau, même si le temps est très sec, ou même si elle en nécessite plus à cause d'une maladie.

Nous avons pu voir que ce comportement est plus ou moins adopté selon les agriculteurs, qui attendent jusqu'à un seuil plus ou moins grand de stress hydrique avant d'irriguer. La facilité d'accès à l'eau

entre en compte dans cette prise de décision. Ainsi, l'agriculteur possédant le champ 8.01 irrigué dès que sa culture commence légèrement à stresser : il est situé juste à côté du forage.

4.3 MELON ET PASTÈQUE :

Au total, 26 champs cultivés en melon ont été dénombrés, et 2 champs en pastèque au cours de l'été 1999. Ils représentent respectivement 27,2 et 0,7 ha soit 18 et 0,5% de la surface du GIC.



En ce qui concerne la pastèque, les résultats ne seront pas analysés pour deux raisons :

- d'une part, nous n'avons pas pu obtenir le tour d'eau de juillet-août 99 ; or la pastèque termine son cycle végétatif fin juillet.
- d'autre part, il n'y a que deux champs de 0,2 et 0,5 ha qui en contiennent, ce qui est très négligeable.

Bien que ces 2 cultures soient très gourmandes en eau, les champs sont répartis régulièrement dans le périmètre, sauf cependant dans les extrémités des réseaux soumises à de nombreuses fuites.

4.3.1 Résultat des simulations

Le stress chez le melon est important : la moyenne (43%) est plus faible que dans les cultures précédentes et il est présent dans toutes les phases du cycle et notamment dans celle de mi-saison la plus sensible, sauf pour les meilleurs champs. Ces résultats sont totalement anormaux pour une culture aussi spéculative. Mais le melon a lui aussi souffert de maladies favorisées par les périodes de sécheresse du printemps 99.

Dans ces conditions il est difficile de tenir compte des valeurs minimales, assez catastrophiques et qui ont trait à des champs touchés par la maladie et laissés à l'abandon.

| phase végétative | Ky | ETR/ETM | | |
|---------------------------------|------|---------|-----|-----|
| | | moyen | min | max |
| initiale (fin mars-déb. avr) | 0,5 | 63% | 40% | 85% |
| développement (mi-avr déb. mai) | 0,6 | 56% | 17% | 79% |
| mi-saison (mi-mai déb. juin) | 1,1 | 36% | 2% | 74% |
| maturation (mi-juin fin juin) | 0,8 | 44% | 3% | 82% |
| total | 1,05 | 45% | 19% | 72% |
| Ya/Ym total | | 43% | 15% | 71% |

Figure 38 : Stress hydrique du melon

4.3.2 Répartition géographique des performances

Les parcelles fortement touchées par le stress hydrique sont réparties indépendamment de leur position au sondage ; les champs 17.00, 1.01, 52.00 sont ainsi très proches, et ont eu, d'après nos calculs, un rendement très faible. La sécheresse et la maladie ont touché tout le monde, et, comme pour la fève, ont conduit à l'abandon de culture (absence d'irrigation).

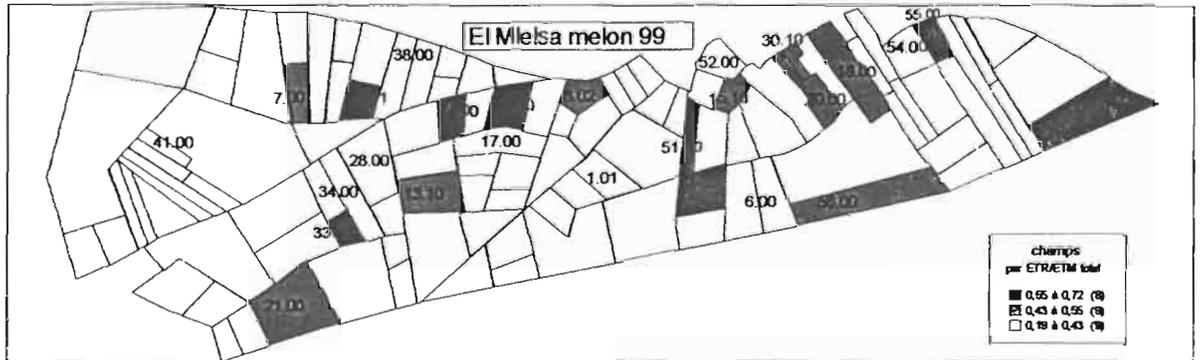


Figure 39 : ETR/ETM total du melon par champ en 99

On peut cependant remarquer que là où le débit est très faible, le melon n'est pas cultivé (le champ 41.00 est alimenté par un puits situé sur la parcelle à laquelle il appartient).

4.3.3 Phases de stress

L'amplitude des variations du rapport ETR/ETM est moins grande que pour les cultures précédentes. Elle reste cependant importante. Les pluies ayant été quasiment inexistantes au printemps 99, hormis fin mars, le stress hydrique est ici l'expression de l'irrigation reçue par les champs.

Les irrigations sont plus rapprochées : la fréquence des déficits augmente. Les stress du melon sont donc moins intenses, mais plus fréquents, ce qui explique la faiblesse de la moyenne calculée plus haut.

| N° champ | 52.00 | 7.00 | 26.10 |
|-----------------|----------|----------|----------|
| superficie (ha) | 0,8 | 1,2 | 0,7 |
| culture 1 | EHB_MELO | EHB_MELO | EHB_MELO |
| culture 2 | 0 | 0 | 0 |
| ini | 69% | 69% | 64% |
| dev | 44% | 55% | 79% |
| mi-sais | 7% | 29% | 74% |
| récolte | 3% | 65% | 64% |
| Total culture 1 | 19% | 45% | 72% |

Figure 40 : choix de champs de stress hydrique total minimum, moyen et maximum

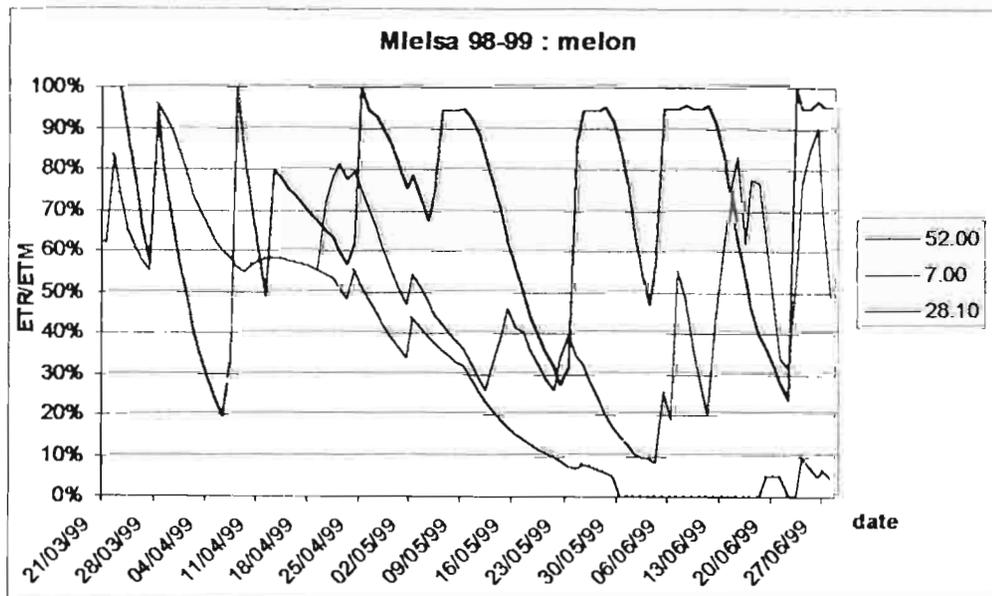


Figure 41 : Variation de l'ETR/ETM du melon, Mlelsa 99

En début de cycle, les 3 champs voient leur déficit hydrique varier entre 0 et 50%. Cette variation, comme il l'a été expliqué précédemment, est liée d'une part aux irrigations de semis, et d'autre part à quelques pluies tombées au cours de cette période.

Ces oscillations continuent pour le champ 28.10 tout au long du cycle. Les champs 7.00 et 52.00 amorcent eux une baisse progressive jusqu'à fin mai. Le champ 52.00 est laissé à l'abandon, alors que l'autre reçoit une irrigation début juin qui lui permet de repartir pour atteindre des performances équivalentes au meilleur champ. Les irrigations sont maintenues jusqu'à la fin du cycle contrairement aux autres cultures, car le melon est sensible au stress même dans sa phase de maturation.

Parmi les trois champs sélectionnés, celui dont le déficit est le plus grand n'a reçu qu'une irrigation de semis avant le début du cycle. Le champ, atteint du mildiou, a ensuite été abandonné.

Le champ 28.10 a eu accès à l'eau assez régulièrement, mais avec des intervalles d'irrigation trop importants pour assurer un stock d'eau suffisant à une évapotranspiration maximale. Le même phénomène se produit pour le champ de réussite moyenne, mais de manière plus accentuée : les doses sont moins fréquentes, et insuffisantes en intensité. Or ce champ est alimenté par la main d'eau ouest : la faiblesse des doses est donc due à celle du débit fourni. Et l'on peut penser que le manque de débit cumulé à la sécheresse a poussé les agriculteurs à irriguer plus longtemps, augmentant ainsi la durée du tour d'eau de cette main, plus radicalement encore que sur les deux autres mains.

4.3.4 Conclusion

Le melon, culture très demandeuse en eau, a eu des déficits importants au cours de la saison 98-99. Il a été touché par le mildiou, maladie qui se développe plus facilement lorsque le sol est extrêmement sec (non irrigué depuis longtemps). Or la saison 99 a été particulièrement sèche, les besoins en eau ont donc augmenté, provoquant tout d'abord une forte pression sur le tour d'eau. Les déficits causés par les retards de l'irrigation ont alors engendré le développement de maladies sur certains champs. La demande en eau a alors chuté brutalement, ce qui expliquerait la faible utilisation de la pompe fin avril (à moins qu'une faible recrudescence des pluies ait laissé croire que l'eau météorique qui avait fait défaut jusqu'alors allait enfin arriver). Les champs restés sains ont ensuite pu être irrigués plus fréquemment par la suite, mais le prolongement de la sécheresse a maintenu une durée du tour d'eau longue.

Néanmoins, on peut être perplexe devant la conduite des irrigations sur une culture aussi importante économiquement que le melon. La durée de fonctionnement du forage n'ayant pas atteint des limites excessives, ces résultats soulèvent plusieurs questions qu'il faudra résoudre par un retour sur le terrain.

4.4 OLIVIER ET ARBORICULTURE FRUITIERE

La culture de l'olivier à Mlelsa concerne 9,6 ha, soit 6% de la surface totale, répartis sur 7 champs. L'arboriculture fruitière est un élément peu important (2 champs, soit 7,6 ha) ; elle est pratiquée sur des champs possédant un puits privé, indépendamment du tour d'eau. Cette culture ne sera donc pas analysée. Il faut noter que les 2 puits en question sont situés aux extrémités des réseaux de distribution.

Sur 7 champs possédant des oliviers, un est irrigué par un puits (9.10), un deuxième n'a qu'un arbre (21.10 : erreur de relevé de l'assolement).

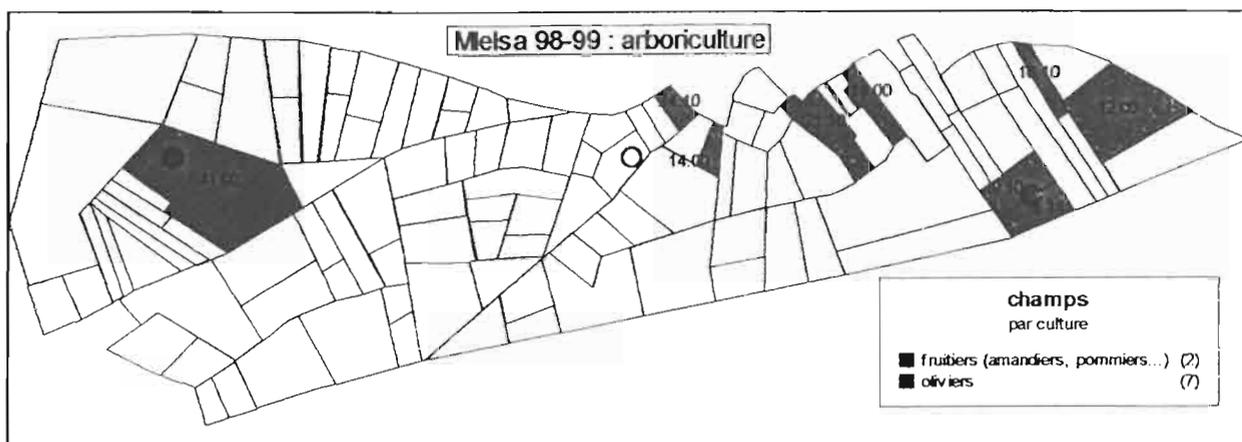


Figure 42 : Champs cultivés en arboriculture, Melsa 98-99

4.4.1 Résultats des simulations

L'analyse des résultats de l'olivier est assez particulière : les besoins en eau se répartissent sur deux périodes :

- de mi-mars à fin-avril (bourgeonnement),
- il n'y a pas d'irrigation en mai et juin (lors de la floraison),
- de début juillet à mi-octobre (phase de maturation la plus sensible au stress notamment entre début août et la mi-septembre).

La simulation débutant en septembre, on a donc trois périodes d'étude du stress hydrique :

- de septembre à octobre 98
- de mars à avril 99
- de juillet à août 99

| N° champ | 9.10 | 19.00 | 16.10 | 12.00 | 21.10 | 24.10 | 14.00 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Surface (ha) | 1,0 | 1,0 | 0,6 | 4,5 | 1,6 | 0,5 | 0,4 |
| sept-oct 98 | 26% | 26% | 26% | 34% | 35% | 66% | 60% |
| mars-avril 99 | 57% | 67% | 67% | 81% | 90% | 93% | 74% |
| juillet-août 99 | 13% | 13% | 16% | 22% | 36% | 37% | 51% |

Figure 43 : choix de champs de stress hydrique total minimum, moyen et maximum

Dans l'ensemble, le déficit est important surtout en automne 98, et en été 99. Mais les résultats sont très peu exploitables car le stress calculé en juillet-août est dû à l'absence de données fiables du tour d'eau au cours de cette période.

Les champs 19.00 et 24.10 ont probablement reçu une dose d'irrigation éloignée de la réalité, en raison des problèmes de partage de l'eau. Le stress hydrique important obtenu en automne n'est en effet pas en adéquation avec les vérifications réalisées sur le terrain.

Il ne reste donc que trois champs avec des résultats assez fiables.

Le champ 16.10 est en stress hydrique quasiment constamment. En effet, il n'est volontairement jamais irrigué par son exploitant. Les calculs économiques réalisés par N. Faysse et A.K. Tchamba ont montré que pour certaines valeurs de Kc et Ky, à certains mois, ce n'est économiquement pas rentable d'irriguer spécialement l'olivier en raison du prix de l'eau de 60 mil/m³ (compte tenu des pertes).

Les deux autres champs sont irrigués de la même manière que les cultures présentes à la même période : avec une dose suffisante pour porter la culture à l'ETM, mais avec des intervalles parfois un peu trop longs.

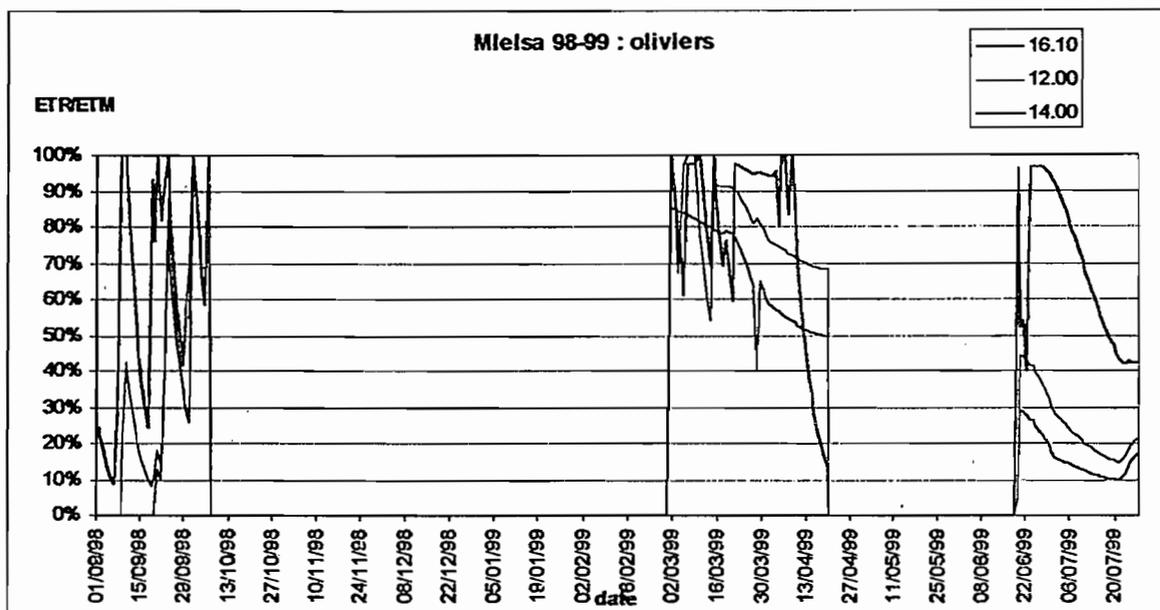


Figure 44 : Variation de l'ETR/ETM de l'olivier, Mlelsa 98-99

Les champs 12.00 et 14.00 bénéficient en fait de l'irrigation apportée simultanément aux cultures proches : soit celles qui sont intercalées, et que nous avons négligé (fève pour le 12.00), soit celles appartenant au même exploitant, et dont nous avons réparti le volume d'irrigation en fonction des besoins en eau. Dans le cas d'une culture intercalée, l'agriculteur n'arrose que la culture de plein champ ; les racines de l'olivier sont suffisamment longues et profondes pour « se servir » d'elles même, souvent d'ailleurs au détriment de l'autre culture.

4.4.2 Conclusion

Difficile de conclure sur les conduites d'irrigation pour l'olivier étant donnée le peu de parcelles concernées, les données erronées du tour d'eau en été, l'irrigation simultanée des cultures simultanées. Il est à peu près certain, d'après les vérifications de terrain, que les oliviers ont obtenu de meilleures satisfactions que celles qui ont été calculées, ce qui semble normal étant donné que l'olivier est une culture de rente.

Pour les autres fruitiers, les rares agriculteurs concernés ont préféré s'affranchir des contraintes du tour d'eau et les cultivent sur des parcelles équipées de puits privés.

4.5 BILAN DES IRRIGATIONS A MLELSA POUR LA CAMPAGNE 98-99

4.5.1 La pluviométrie

La pluviométrie de l'année hydrologique 98-99 est particulièrement déficitaire comme le montre la figure suivante où sont indiquées, à titre de comparaison, les années médianes ainsi que les quinquennales sèches et humides.

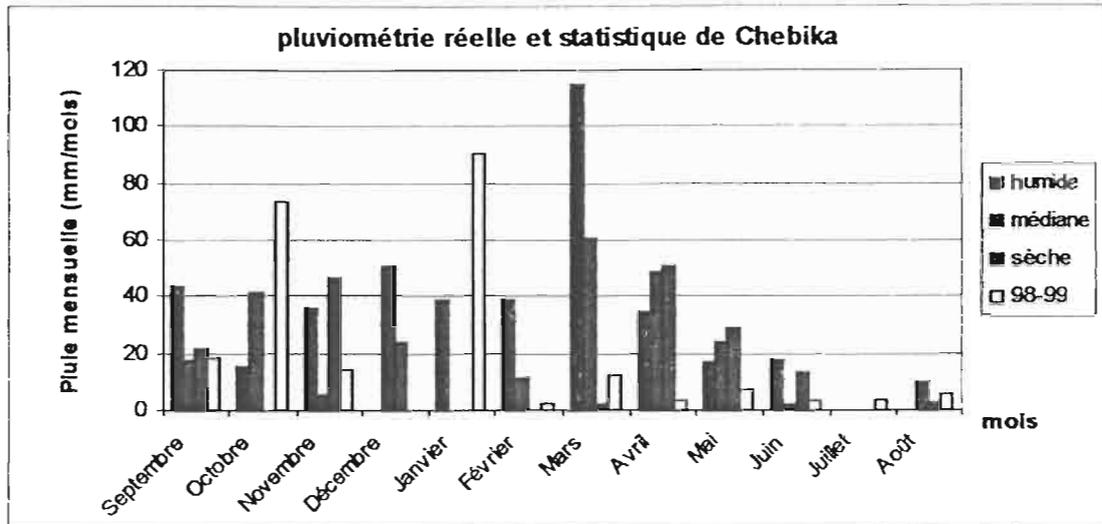


Figure 45 : Pluviométrie réelle et statistique à Chebika

En plus d'un total particulièrement bas on peut noter la répartition différente des pluies au cours des mois. La pluie est tombée dans des mois où on ne l'attendait pas (novembre, janvier) mais fait cruellement défaut dans les périodes attendues et notamment au cours du printemps 99 (de février à juin). Bien qu'en région semi-aride, la variabilité pluviométrique interannuelle soit très forte, cette année 98-99 sort de l'ordinaire et sa répartition saisonnière a certainement déjoué les stratégies des agriculteurs.

4.5.2 L'utilisation du forage

Le forage est directement connecté au réseau basse pression, ce qui signifie que le débit d'exhaure de la pompe varie selon la longueur du réseau de distribution (pertes de charge). Les mesures réalisées à l'aide d'un débitmètre à ultrasons montre que le débit minimal de la pompe est de 20 l/s quand les 3 secondaires sont utilisés dans la totalité de leurs longueurs respectives. Lorsque les 3 secondaires irriguent des parcelles proches et que donc la longueur du réseau de distribution est minimale, la pompe débite 30 l/s.

Sachant que la pompe fonctionne en période de pointe aux alentours de 20 heures par jour, elle peut donc soutirer entre 13 000 m³ et 19 500 m³ par décade selon la longueur des conduites de distribution. En période de crise et dans des intervalles de temps courts, la durée de fonctionnement peut atteindre les 24 heures, ce qui nous donne des prélèvements potentiels compris entre 17 000 m³ et 26 000 m³ par décade.

Toute l'eau prélevée ne va pas à l'irrigation car toutes les 3 heures, le forage alimente le château d'eau potable du village pendant 1/4 heure durant la journée, mais ces intervalles nous donnent une idée sur les tensions qui ont existées durant la campagne 98-99.

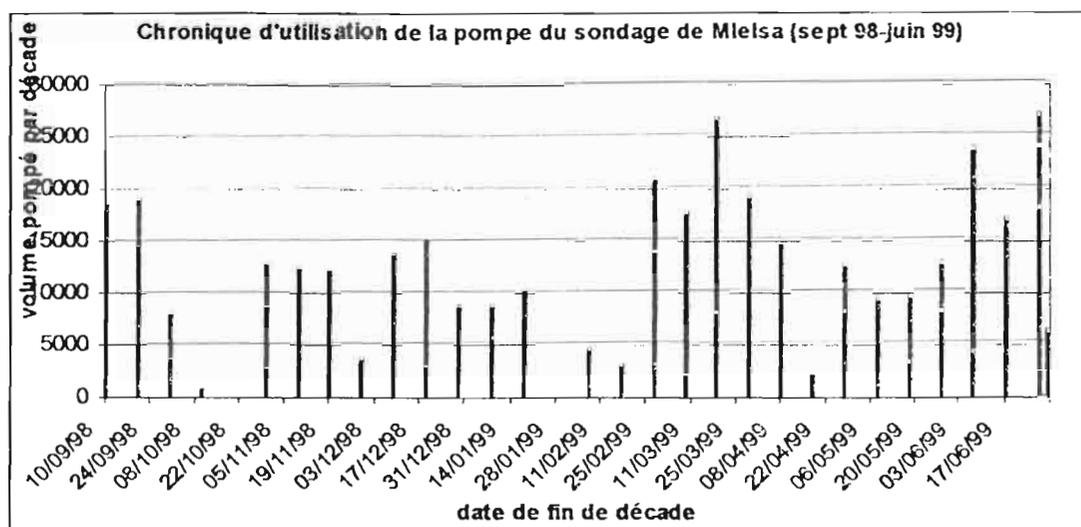


Figure 46 : Chronique d'utilisation de la pompe du sondage de Mlelsa (98-99)

A partir de la figure précédente, on remarque 3 périodes de tension sur la ressource :

- La deuxième quinzaine de septembre correspond aux irrigations pour les semis de blé, de fève et de piment-fève ; c'est une période de pointe mais pas encore une période de crise car les prélèvements n'atteignent pas les volumes maxima calculés auparavant ; les pluies qui apparaissent à cette époque laissent présager une année normale.
- De la mi-mars à la mi-avril, le forage fonctionne sur les 24 heures avec des répartitions à peu près égalitaires entre irriguants proches (26 000 m³/décade), situés au milieu du périmètre (20 000 m³) ou en fin de réseau (17 000 m³) ; c'est la période de mise en culture du melon et de la pastèque.
- Fin juin - début juillet, on se retrouve dans le même schéma de tension que précédemment, le forage fonctionne 24h/24.

4.5.3 Le réseau

La première source de déficit, en lien avec l'intensité de la dose, est la perte de débit et l'efficacité du réseau. Le réseau de Mlelsa, en 98-99, était en très mauvais état. En effet, dans la prévision de son remplacement, il n'était plus entretenu. Son état n'a donc fait qu'empirer, provoquant des fuites nombreuses, cumulées à d'importantes pertes de charge liées à la longueur des conduites. La main d'eau Ouest souffre par ailleurs d'une légère contre-pente, qui limite encore un débit déjà faible. Il nous a souvent été cité le cas d'un agriculteur devant, en main d'eau Ouest, irriguer 5 fois plus longtemps que ceux à proximité du sondage.

On pouvait donc s'attendre à une répartition spatiale du stress hydrique : les champs en tête de réseau recevant plus d'eau que ceux en extrémité auraient un rapport ETR/ETM global plus élevé.

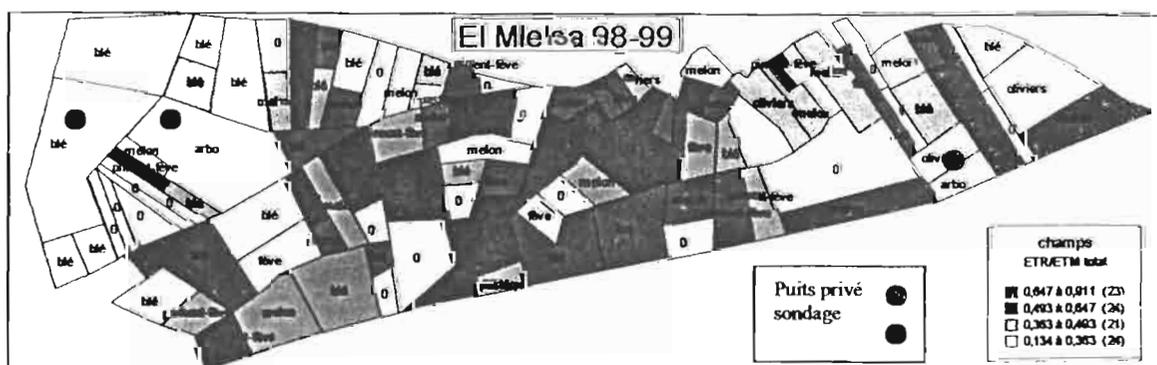


Figure 47 : ETR/ETM total par champ, Mlelsa 98-99

(Sur la carte ci-dessus, lorsqu'un champ a été cultivé en fève puis en melon, nous avons conservé la valeur la plus forte, afin de tenter de palier aux déficits dus à la maladie)

Les résultats ont montré que cette hypothèse était surtout valable pour le blé. Dans l'ensemble, il existe une concentration de parcelles satisfaites en eau autour du sondage, et fort déficit à l'extrême Ouest du périmètre.

4.5.4 Synthèse sur les déficits au cours de la campagne

On peut récapituler la comparaison entre besoins en eau théoriques et apports réels à Mlelsa, de septembre 98 à juin 99 de la manière suivante :

- En automne jusqu'à fin octobre, les cultures de blé, fève et piment-fève ont été à peu près bien irriguées, bénéficiant en plus de pluies en septembre et en octobre. Les quelques stress enregistrés début septembre sont à relativiser étant donné que les dates de semis considérées dans le logiciel sont des valeurs moyennes observées dans la zone. Les meilleures satisfactions se rencontrent près du forage et les défaillances d'irrigation sont avant tout dues à des stratégies individuelles d'attente d'épisodes pluvieux. En effet, il n'y a pas de tensions sur le forage à cette période. Les agriculteurs ayant peu irrigué ont certainement considéré que ce n'était pas économiquement rentable d'irriguer le blé, surtout en fin de réseau étant donné le prix à payer pour un débit parfois moitié de celui espéré.
- Durant la période d'hiver, le périmètre est partagé entre les mêmes cultures et il y a une pluviométrie satisfaisante en janvier. Le blé est correctement arrosé alors que fève et piment-fève sont soumis à de très forts stress hydriques en novembre même dans les champs ayant les meilleurs résultats. Cela est dû à des problèmes de maladie survenue au cours de cette période. Il n'y a pas de tension sur le forage à cette époque et les cultures de fève et piment-fève sont suffisamment valorisantes économiquement pour motiver les agriculteurs d'autant plus que les surfaces occupées sont faibles de même que les volumes demandés, contrairement au blé.
- Au printemps, la pluie est pratiquement inexistante contrairement à ce qui se passe en année normale. Le melon et la pastèque se mettent en place fin février/début mars et viennent concurrencer le blé qui va pâtir de cette situation puisque l'on note des déficits importants dans la troisième décennie de février.
Sans pluie, la culture du melon se met difficilement en place et on note fin février un fonctionnement continu du forage. Il est normal que la culture du melon et de la pastèque prime sur le blé et le tour d'eau lui est exclusivement réservé. La sécheresse a continué en été, provoquant une pression sur le tour d'eau, dont la durée a augmenté. Cet allongement du tour d'eau est particulièrement visible sur les bilans hydriques du melon ou le rapport ETR/ETM évolue en dents de scie. De la même manière, le déficit hydrique se généralise sur le blé même sur les meilleurs champs. Bien que fonctionnant à plein régime, le forage ne peut manifestement pas assurer l'ensemble des demandes en eau même pour les cultures spéculatives comme le melon et la pastèque.
- De fin mai à début juin, le blé est récolté et pourtant certains champs en melon subissent des stress importants alors que la pompe du forage ne fonctionne pas à pleine capacité. On peut dès lors se demander si certains agriculteurs n'auraient pas monopolisé l'utilisation du réseau.

4.5.5 Conclusion

Pour Mlelsa, les causes de déficits hydriques sont majoritairement individuelles durant l'automne et sont pour le blé à une saison des pluies très déficitaire alors que pour les cultures de fève et piment-fève, c'est l'apparition des maladies qui a découragé un certain nombre d'irriguants.

Durant le printemps, on note par contre un étirement des tours d'eau du fait de demandes supérieures à ce que peut fournir le forage en fonctionnant de manière permanente. Cette défaillance structurelle a des répercussions différenciées selon le positionnement des agriculteurs sur le réseau et leur place sociale au sein du GIC.

En effet, chacun irrigue à son tour autant qu'il veut. Chaque agriculteur irrigue à son tour jusqu'à ce que le réservoir racinaire de sa ou ses cultures soient complètement rempli. Les cultures ont donc en

général atteint l'ETM à chaque irrigation, puis ont stressé à cause de l'attente de l'irrigation suivante, qui a duré 15 jours en moyenne. Ce système non structuré peut favoriser les agriculteurs proches du forage qui reçoivent des débits plus importants et ont besoin donc de moins de temps pour pratiquer leurs irrigations.

Mais quel importance a le poids de l'agriculteur dans le GIC vis-à-vis de sa participation au tour d'eau (la fréquence entre aussi en jeu)? Quels agriculteurs ont eu des difficultés à obtenir la main d'eau ?

Sachant qu'en théorie, l'agriculteur irrigue aussi longtemps qu'il veut une fois qu'il a la main d'eau, la lecture du tour d'eau nous amène à constater que certains agriculteurs sont plus favorisés que d'autres (ils obtiennent l'eau avec une facilité déconcertante). A priori, l'ordre du tour d'eau suit l'ordre des parcelles : il n'en est rien pour l'année étudiée. En mars et puis en juin, c'est en réunion, avec un grand poids du trésorier, que le tour d'eau s'est construit au fur et à mesure.

Dans les faits, la faiblesse des débits fournis en fin de réseau a provoqué deux types de réaction :

- l'abandon des cultures maraîchères au profit de celles du blé en mode pluvial,
- la construction de puits privés, et avec elle le développement de l'arboriculture, puisque l'apport en eau n'est dès lors plus limité.

On assiste donc à une interaction entre l'assolement et la disponibilité en eau, une adaptation de la gestion sociale à la gestion technique. Par contre, il est probable que la mise en place du nouveau réseau, avec un système en goutte à goutte, provoque une nouvelle adaptation. Les agriculteurs ont des projets d'arboriculture.

Cependant les valeurs de stress hydriques calculés par le modèle sont encore imprécises du fait des hypothèses faites sur la répartition de l'eau sur les champs.

En effet, les durées d'irrigation sont notées en fonction de l'agriculteur demandeur. En fonction des autres demandes faites ce jour-là sur les différents réseaux, il est assez facile de situer la parcelle irriguée par un agriculteur en possédant plusieurs. Par contre, s'il existe sur la parcelle irriguée, plusieurs cultures concomitantes (champs), il est difficile de savoir la proportion d'eau qui va à chaque parcelle.

Pour effectuer cette répartition, nous nous sommes fondés sur une "matrice de préférence" pour calculer les bilans hydriques. Nous avons vu que pour la culture du blé par exemple, il a fallu revenir sur le terrain pour corriger certaines aberrations.

Pour donner toute validité et pertinence à la méthode d'analyse proposée, il sera nécessaire d'avoir des cahiers de tour d'eau plus précis où les agriculteurs indiquent les cultures qu'ils comptent arroser lorsqu'ils demandent une irrigation. C'est ce qui commence à se faire sur certains périmètres associatifs.

5 CONCLUSION

Les résultats obtenus par modélisation des bilans hydriques à l'aide du logiciel BILHY et présentés dans le détail sur le Groupement d'Intérêt Collectif de Mlelsa ont permis de bâtir une démarche d'analyse des stratégies d'irrigations aux niveaux individuel et collectif. L'analyse conforte ce que l'on soupçonnait déjà du fonctionnement du GIC mais permet de le quantifier, de l'explicitier tout au long de la campagne agricole et de le valider auprès des agriculteurs.

Certes, les résultats souffrent encore d'une certaine imprécision dans une région où l'évaluation précise des données agroclimatiques fait défaut. Des études plus approfondies sur le sol, la densité foliaire et l'ETP auraient permis d'obtenir des valeurs plus précises et plus fiables. Mais ceci requiert de longues expérimentations lourdes à mettre en place et impossibles à réaliser au niveau régional.

Les données sur le coefficient de réponse au rendement K_y renseignent sur les périodes de plus grande sensibilité au stress, mais nous avons préféré ne pas trop insister sur les résultats de pertes relatives de rendements dues à la contrainte eau qui mettent en jeu d'autres facteurs comme la variété culturale ; or les variétés locales utilisées dans le kairouanais (de blé, de piment par ex.) présentent probablement une résistance à la sécheresse que nous n'avons pas pu prendre en compte.

Mais ces approximations ne sont pas si pénalisantes pour l'analyse. Les besoins en eau sont apparemment surestimés, ce que nous avons d'ailleurs tenté de corriger, le rapport ETR/ETM diminuant malgré tout très rapidement. La fréquence et l'intensité relative des stress hydriques restent de bons indicateurs, et révèlent un bon nombre d'informations valables.

Des sources d'imprécisions interviennent principalement dans nos calculs :

- l'incertitude qui pèse sur les assoiements, les surfaces enblavées et la durée des cycles culturaux est pénalisante ; malgré de nombreux retours sur le terrain, des incohérences persistent (les fellah ont parfois tendance à se contredire...).
- les raisonnements élaborés pour distribuer l'eau aux parcelles d'une part (la relation exploitant/ayant-droit est souvent complexe si ce n'est floue), ceux pour la distribuer par champs d'autre part ne se sont pas toujours révélés justes.

Ces erreurs nous ont parfois conduits à remettre en cause la pertinence de nos résultats, et donc à ne pas pouvoir valider un certain nombre d'hypothèses.

Un bilan au niveau du champ était sans doute trop ambitieux, se contenter du niveau de la parcelle, voire de l'exploitant aurait pu donner de meilleurs résultats. Mais le problème demeure si un agriculteur possède des parcelles réparties sur plusieurs mains d'eau, on est obligé de faire des choix, ce qui revient au même. Par contre, le nombre d'éléments est ainsi plus restreint, ce qui facilite l'analyse.

Finalement, ce n'est pas "l'eau des livres", mais "l'eau des champs" qui nous éloigne de la réalité ! Le bilan souffre de ne pas être fondé sur des données issues d'un suivi réelles, mais vieilles d'un an et récupérées par entretiens successifs. A l'avenir, il sera préférable de demander aux agriculteurs à quelle culture ils destinent l'eau au moment où ils prennent la main d'eau.

On retiendra donc que BILHY, en l'état actuel, nécessite de bien connaître les stratégies de distribution intra-parcelle des agriculteurs : les nouveaux cahiers de tour d'eau mis en place dans les GIC sont bien adaptés au relevé des doses d'irrigation. Pour une meilleure gestion du tour d'eau, la destination de l'eau devrait y figurer au même titre que le volume. Avec un suivi précis, il est vraisemblable que la modélisation apportera des informations précises sur la gestion des tours d'eau au sein des périmètres.

Ainsi, cette étude aura avant tout été l'occasion de l'élaboration d'un outil réutilisable, et performant de par sa maniabilité. Il reste encore :

- à *vérifier* : la validité de la simulation réalisée sur des cultures en intercalaire avec des oliviers et si les hypothèses faites sur le calcul des réservoirs permet d'obtenir des estimations correctes du stress hydrique ;
- à *améliorer* : les sorties des résultats manquent de lisibilité, et l'automatisation de l'édition de graphiques, de bilans par décade apporterait plus de confort dans l'analyse. L'entrée des paramètres pourrait être assouplie par la création de quelques macros supplémentaires afin de modifier facilement les coefficients cultureux, les dates de semis. L'ajout d'une matrice de distribution de l'eau serait la bienvenue, comme on a pu le voir précédemment ;
- à *réadapter* : pour une réutilisation par le CRDA de Kairouan, qui pourrait appuyer sa gestion sur ce logiciel ; ou encore pour son insertion dans un modèle économique. BILHY devra pour cela être simplifié (pas de temps plus long, moins de variables différentes), afin de nécessiter moins de capacité de mémoire de la part du matériel informatique.

L'étude a apporté un outil intéressant, avec lequel l'analyse a été amorcée. Partant de ces premiers résultats, l'analyse du tour d'eau de Mlensa demande à être étayée par de nouvelles enquêtes, afin de mieux comprendre les stratégies des agriculteurs, et d'obtenir des précisions sur les événements survenus dans le tour d'eau au cours de l'année, éclaircissant ainsi les contradictions qui sont apparues.

Elle passera ensuite par l'élaboration des scénarios initialement prévus, et qui n'ont pas pu être réalisés par manque de temps. Le diagnostic formulé demande également la mise en lien avec les analyses économiques et sociales réalisées en parallèle sur ce GIC. Mlensa présente enfin une situation dont l'évolution est particulièrement intéressante, puisque le système d'irrigation est en train d'être converti au goutte à goutte.

La démarche méthodologique d'analyse doit être appliquée à l'ensemble de l'échantillon (Souaïdia, Bled Abida, Khatem, Chebika Est) ; les résultats sont là, seul le manque de temps ne nous a pas permis de les exposer.

Ainsi, une analyse comparative des 5 GIC pourra être finalisée, aboutissant à un diagnostic explicatif des performances actuelles de la gestion pratiquée par ces associations d'irriguants et à des recommandations concrètes pour l'améliorer. C'était l'objectif premier de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

AHT INTERNATIONAL GMBH - **Projet d'irrigation de la basse vallée de la Medjerda et de Ras Djebel : Guide pour l'irrigation à la parcelle** - Essen, Allemagne, 1996. Manuel de l'utilisateur. Version préliminaire.

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. - **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing, crop water requirements** - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°56 - Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1998, 300 p.

BARON C., MARAUX F., PEREZ P. - **SARRA Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques MODULE SARRABIL Guide d'utilisation** - Montpellier : CIRAD, 1996, 32 p.

BICHE - **Etude de création du périmètre irrigué de Mlelsa. Etude de factibilité** - Tunis : CRDA de Kairouan, 1999 - 50 p.

D.G.G.R. - **Associations d'Intérêt Collectif. Lois, décrets, statut type** - Tunis, 1994 - 21 p.

DOORENBOS J., KASSAM A.H. - **Réponse des rendements à l'eau** - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°33 - Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1987, 235 p.

DOORENBOS J., PRUITT W.O. - **Les besoins en eau des cultures** - Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n°24 - Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1986, 197 p.

EUREKA/BTE - **Analyse et planification des activités d'eau potable et d'irrigation. Rapport d'analyse de la situation des AIC/PI.** Gouvernorat de Kairouan - Tunis : Direction Générale du Génie Rural, 1999 - 64 p.

FAYSSE N. - **Les institutions de gestion de l'eau et les Associations d'Intérêt Collectif pour l'irrigation dans le Gouvernorat de Kairouan.** Notes de travail - Tunis : Programme National Mobilisateur MERGUSIE, IRD, 1999 - 70 p.

FEUILLETTE S., LE GOULVEN P., BACHTA M.S. - **Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie centrale.** Résumé - Colloque SFER : l'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. Montpellier, 19-20 novembre 1998

GILOT L. - **L'eau des livres et l'eau des champs. Des règles de distribution à leur mise en pratique. Principes généraux et analyse du cas d'Urcuqui.** - Thèse de doctorat. Sciences agronomiques : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 1994 - 363 p.

GROUPEMENT BECHTEL INTERNATIONAL INC. / SCET-TUNISIE - **Etude du secteur de l'eau** - Tunis : Direction Générale des Ressources en Eau, 1998. Thème 4 : Gestion des nappes phréatiques. Rapport provisoire - 100 p.

INAT-ALOUINI A., ENGREF-GUINAUDEAU M. - **Diagnostic rapide et orientations des actions sur un périmètre irrigué : apprentissage méthodologique par étude de cas.** Sidi Thabet (CRDA d'Ariana) en Tunisie - Session de formation du 16 au 27 mars 1998. Rapport d'étude - 53 p.

LE GOULVEN P., RUF T. - **Rapport de mission en Tunisie** - IRD, 1996

LHOMME J.P., MONTENY B.A.- **Eléments de bioclimatologie** - Abidjan : ORSTOM, centre d'Adiopodoumé, 1980 - 90 p.

LUBES H., MASSON J.M., RAOUS P., TAPIAU M.- **Safarhy, logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Manuel de référence** - Montpellier : ORSTOM, 1994

PERENNES J.J. - **L'eau et les hommes au Maghreb. Contribution à une politique de l'eau en Méditerranée** - Paris : Editions Karthala, 1993 - p.118-158

PEYTHIEU S. - **Le périmètre irrigué de Chébika-Est en Tunisie centrale** - Rapport de stage. IRD, 1998 - 41 p.

RIOU C. - **Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie** - Cahiers ORSTOM, série hydrologie, volume XVII, n°2, 1980 - p.130-137

RUF T. - **Projet de recherche présenté dans le cadre des Programmes Nationaux Mobilisateurs. Mergusie I : Gestion intégrée de l'eau sur le bassin du Merguellil, phase 1** - 1997 - 13 p.

SELMI S., NASRI S. - **Les lacs et retenues collinaires en Tunisie** - Tunis : ORSTOM, 1997, p.4-9

SCET-TUNISIE - **Projet d'économie d'eau dans les périmètres irrigués de petite et moyenne hydraulique au centre ouest de la Tunisie. Gouvernorat de Kairouan. Etude de faisabilité du périmètre de Bled Abida** - Tunis : CRDA de Kairouan, 2000 - 100 p.

SMITH M. - **Manual for CROPWAT** - Rome : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 1989, 55 p.

TIERCELIN J.R. - **Traité d'irrigation** - Paris : lavoisier TEC & DOC, 1998 - 1011 p.

ZOUAGHI M., ZAOUALI J., BEN MAIEZ N., BELKHIR Z. - **Etude de la biodiversité biologique de la Tunisie. Rapport de synthèse** - Tunis : La Page infographique, 1993, p.7-9

ANNEXES