

République Tunisienne  
Ministère de l'Agriculture  
Institut National Agronomique de Tunisie



Département de l'Economie et du Développement Rural

Option : Gestion des Entreprises Agricoles

Projet de fin d'études d'Ingénieur

Analyse des Choix des Techniques d'Irrigation. Cas de la zone de  
MELALSA (Gouvernorat de KAIROUAN).

Elaboré par : KOUKOU-TCHAMBA Até



Quelques techniques d'irrigation pratiquées à Melalsa (Lardilleux S., 2000)

Encadré par :

M. BACHTA Mohamed Salah  
INAT

M. LE GOULVEN Patrick  
IRD Tunis

Année universitaire : 1999 - 2000

## **AVANT - PROPOS**

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un Projet de Fin d'Etude d'Ingénieur à l'Institut National Agronomique de Tunisie : Spécialité Economie Rurale. Il a été élaboré dans le cadre du programme de recherche, MERGUSIE, sur la Gestion intégrée de l'eau dans le bassin de l'oued Merguelil (gouvernorat de Kairouan), qui est exécuté en collaboration entre le Ministère de l'Agriculture, l'IRD et l'INAT.

Notre sujet d'étude porte sur l'Analyse des choix des techniques d'irrigation des Agriculteur du GIC DE MELALSA situé en aval de l'oued Merguelil.

Pour l'accomplissement de ce travail nous avons bénéficié de l'encadrement de BACHTA Mohamed Salah, professeur à l'INAT et de Patrick LE GOULVEN directeur de recherche à l'IRD. Qu'il me soit permis de remercier ces deux chercheurs pour leurs conseils scientifiques et moraux qu'ils m'ont apporté durant ce travail.

Je profite aussi de cette occasion pour remercier les personnes suivantes, qui ont joué un rôle d'avant garde dans durant ma formation et ce travail :

Monsieur Moncef HARABI, Directeur de l'INAT ; Monsieur Khemais ZAYANI, Directeur d'Etudes de l'INAT ; et tout le corps professoral de l'INAT pour la qualité de l'enseignement reçu pendant mon cycle d'ingénieur. Une pensée particulière va au corps enseignant du Département de l'Economie Rural.

Monsieur J. CLAUDE, le Représentant de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), pour m'avoir accueilli et mis à ma disposition le matériel nécessaire pour l'accomplissement de cette étude. Les chercheurs de l'IRD et son personnel administratif garderont une bonne place dans ma mémoire pour beaucoup de bons moments partagés.

Permettez moi une fois encore de remercier Monsieur Nicolas FAYSSSE Stagiaire en thèse pour les conseils que j'ai bénéficié de lui durant mon stage à l'IRD .

Je voudrais exprimer ma gratitude envers la Tunisie : un pays d'accueil, un pays de l'hospitalité et un pays de formation dont j'espère avoir profité au maximum.

Pour cette occasion exceptionnelle je voudrais aussi adresser mes vifs remerciements aux autorités de la BID pour leur soutien financier sans précédent .

Durant mon séjour en Tunisie et dans le cadre de la réalisation de mon PFE j'ai bénéficié d'un soutien énorme de la part de mes amis et mes frères africains en Tunisie, je ne saurais terminer sans leur exprimer ma profonde gratitude.

# SOMMAIRE

AVANT - PROPOS.....	i
SOMMAIRE .....	II
LISTE DES TABLEAUX .....	IV
LISTE DES FIGURES .....	V
RESUME .....	VI
SUMMARY .....	VII
INTRODUCTION GENERALE .....	8
<b>PARTIE I : .....</b>	<b>12</b>
<b>PRESENTATION DU SECTEUR DE L'EAU EN TUNISIE ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE ...</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE 1 : BILAN ACTUEL ET FUTUR DE LA RESSOURCE "EAU" .....</b>	<b>13</b>
<i>1-1 Potentialités actuelles et Projections futures.....</i>	<i>13</i>
1.1.1 - Les potentialités hydriques actuelles.....	13
1.1.2 - Les projections futures.....	13
1.1.2.1 - Les nappes peu profondes.....	14
1.1.2.2 - Les eaux souterraines.....	15
<i>1.2 - Les Demandes en eau actuelles et Projetées.....</i>	<i>16</i>
1.2.1 - Les problèmes majeurs des ressources en Tunisie .....	16
1.2.1.1 - Des ressources en eau largement entamées .....	16
1.2.1.2 - Une demande en eau qui ne cesse d'augmenter.....	16
<i>1.3 - Le Bilan de la ressource sur la demande.....</i>	<i>18</i>
1.3.1 - Le bilan de la ressource/demande : Annonce d'une pénurie proche.....	18
1.3.2 - Le niveau actuel de l'exploitation des ressources souterraines en eau dans les PIP .....	18
1.3.3 - Le Rythme d'évolution des périmètres irrigués en Tunisie .....	19
1.3.3.1 - L'importance des périmètres irrigués privés en Tunisie .....	19
<b>CHAPITRE 2 : POLITIQUES PUBLIQUES POUR GERER L'EVOLUTION DE LA DEMANDE .....</b>	<b>21</b>
2.1 - Incitation et Encouragement à l'investissement dans l'économie d'eau.....	21
2.2 - Les institutions et législations impliquées dans la gestion intégrée de l'eau d'irrigation.....	23
2.2.1 - Aspect institutionnel.....	23
2.2.2 - Aspect législatif.....	24
2.2.3 - Système de tarification de l'eau .....	24
2.2.4 - Gestion décentralisées et Marchés de l'eau.....	26
2.2.5 - Utilisation Conjointe des Ressources hydrauliques .....	26
2.2.6 - Mesures de conservation.....	27
2-4 <i>Problématique de la recherche:</i> .....	<i>28</i>
2-4-1 - Présentation du problème:.....	28
2-4-2 -Hypothèses de travail .....	29
<b>PARTIE II : CADRE D'ETUDE, CHOIX ET PRESENTATION DE LA REGION .....</b>	<b>33</b>
<b>CHAPITRE 1: CADRE D'ETUDE .....</b>	<b>34</b>
<b>CHAPITRE 2: PRESENTATION DE LA REGION DE KAIROUAN .....</b>	<b>35</b>
2.1 - <i>Situation géographique.....</i>	<i>35</i>
2.2 - <i>Présentation générale du secteur irrigué .....</i>	<i>36</i>
2.2.1 - Ressources en eau.....	36
2.2.2 - Infrastructure hydraulique d'irrigation .....	36
2.2.3 - Les périmètres irrigués de Kairouan.....	37
2.3 - <i>Présentation de la région de Melelsa .....</i>	<i>39</i>
2.3.1 - Localisation .....	39
2.3.2 - Le climat.....	39
2.3.3 - Les sols.....	39
2.3.4 - Délimitation du périmètre.....	40
2.3.5 - Ressources en eau.....	40
2.3.6 - Situation démographique et facteurs humains .....	41
2.3.7 - Les statistiques agricoles de la région Melalsa.....	41
* Le secteur irrigué.....	41
* Les cultures pratiquées dans la région.....	42

<b>PARTIE III CADRE METHODOLOGIQUE</b> .....	<b>43</b>
<b>CHAPITRE 1 : LES TRAVAUX ANTERIEURS RELATIFS A L'ECONOMIE DE L'EAU</b> .....	<b>44</b>
<b>1.1 - Stratégies modernes en économie d'eau dans l'Agriculture</b> .....	<b>44</b>
1.1.1 - Introduction .....	44
1.1.2 - Adoption de nouvelles technologies de ressources non renouvelables.....	44
1.1.3 - Adoption de la technologie de l'irrigation: une approche multipériodique. ....	46
1.1.4 - Autres stratégies en irrigué : application de l'uniformité de l'eau dans les parcelles .....	48
1.1.4.1 - Systèmes d'applications de l'eau dans les périmètres irrigués.....	49
1.1.4.2 - Stratégie de conduite .....	49
1.1.5 - Les travaux récents en économie de l'eau en Tunisie.....	51
1.1.5.1 - L'estimation de la rente économique de l'eau dans les Périmètres Publiques Irrigués de Chebikha .....	51
1.1.5.2 - Simulation de l'évolution des exploitations des périmètres irrigués de Awamria.....	51
1.1.6 - Conclusion.....	52
<b>CHAPITRE 2 : LA METHODOLOGIE</b> .....	<b>53</b>
<b>2.1 - Typologie des exploitations Agricoles de MELALSA</b> .....	<b>53</b>
2.1.1 - Objectifs et concept théorique.....	53
2.1.2 - Présentation de la démarche typologique.....	54
2.1.3 - Les étapes de construction de la typologie du PIP de Melalsa.....	54
2.1.3.1 - La collecte des données .....	54
2.1.3.2 - Le traitement des données collectées.....	55
2.1.4 - La construction de la typologie des exploitations .....	56
<b>2.2 - Modélisation à adopter pour les exploitations agricoles de Melalsa</b> .....	<b>58</b>
2.2.1 - Définition d'un modèle en économie .....	58
2.2.2 - Les éléments d'un modèle en économie .....	58
2.2.2.1 - La fonction objectif.....	59
2.2.2.2 - Les contraintes .....	60
2.2.3 - Formalisation mathématique d'un modèle déterministe .....	63
* Hypothèses de programmation linéaire:.....	64
2.2.4 - Outils de résolution .....	65
<b>2.3 - Scénarios simulés et résultats obtenus</b> .....	<b>66</b>
2.3.1 - Modélisation de base.....	66
2.3.1.1 - Les données et le Modèle.....	66
2.3.1.1.1 - Les données .....	66
2.3.1.1.2 - Le Modèle.....	67
2.3.1.2 - Les Résultats du modèle de base.....	69
2.3.1.2.1 - Présentation des résultats de GAMS.....	69
2.3.1.2.2 - Interprétation de ces résultats.....	70
2.3.1.2.3 - Test de validation du modèle de base.....	72
2.3.1.2.4 - Conclusion.....	73
2.3.1.3 - Modélisation avec les conditions de stress hydrique.....	74
2.3.1.3.4 - Résultats du modèle de stress hydrique.....	78
2.3.1.3.5 - Conclusion .....	80
2.3.2 - Autres scénarios simulés.....	81
2.3.2.1 - Simulation avec pénurie d'eau (la règle d'arbitrage entre la Pastèque et les autres cultures).....	81
2.3.2.2 - Simulation avec les techniques d'irrigation .....	82
2.3.2.2.1 - Les techniques d'irrigation économes en eau.....	82
2.3.2.2.2 - Les pratiques de l'irrigation dans la Zone de Kairouan .....	85
2.3.2.2.3 - Investissement dans les différentes techniques : cas de la Tunisie.....	85
2.3.2.2.4 - Formalisation du modèle d'investissement dans les techniques d'irrigation.....	86
2.3.2.2.5 - Présentation du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation : .....	90
2.3.2.2.6 : Résultats du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation : .....	93
2 3 2 2 6 7 : Scénarios : augmentation du niveau de la subvention .....	95
2-4 : Les limites de la modélisation adoptée.....	97
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>98</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>101</b>
<b>PLAN D'ANNEXES</b> .....	<b>103</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Ressources potentielles hydriques en Tunisie(Mm <sup>3</sup> /an).....	13
Tableau 2 : Ressources hydriques sans considérer la salinité (Mm <sup>3</sup> /an).....	13
Tableau 3 : Etat des ressources hydriques souterraines en Tunisie.....	15
Tableau 4 : Utilisation des ressources hydriques en Tunisie,1994.....	16
Tableau 5 : Evolution prévisionnelle du bilan ressource/demande en Tunisie.....	18
Tableau 6 : Evolution des périmètre irrigués publics (PPI ) et privés ( PIP) en Tunisie.....	19
Tableau 7 : Evolution des surfaces équipées en économie de l'eau.....	21
Tableau 8 : Importance des périmètres irrigués du Kairouan.....	37
Tableau 9 : Occupation du sol dans les PIP (privé) et PPI (périmètres publiques irrigué).....	38
Tableau 10: Résultats d'essai de débit.....	41
Tableau 11: Les espèces rencontrées dans la région de Melalsa.....	42
Tableau 12: Caractéristiques des exploitations types (calcul des variables structurelles moyennes).....	57
Tableau 13 : Coût de l'eau en DT/m <sup>3</sup> pour chaque type d'exploitation.....	57
Tableau 14 : Fiche technico-economique du modèle de base.....	66
Tableau 15 : Les activités du modèle simple.....	69
Tableau 16 : Les contraintes du modèle simple.....	70
Tableau 17 : Calcul des Coefficients de l'équation de marge brute (Avril).....	76
Tableau 18 : Les activités du modèle avec stress hydrique.....	78
Tableau 19 : Les contraintes du modèle de stress hydrique.....	79
Tableau 20 : Apport d'eau aux cultures dans le mois d'Avril.....	81
Tableau 21: Schéma de financement des techniques d'irrigation.....	85
Tableau 22 : Classification de types d'exploitants selon les catégories d'investissement.....	86
Tableau 23 : Les activités du modèle de simulation des techniques d'irrigation.....	93
Tableau 24 : Les contraintes du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation.....	93
Tableau 25 : Schéma de financement proposé.....	95
Tableau 26 : Les activités des scénarios d'évolution des subventions.....	96

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Evolution du nombre de puits en Tunisie .....	14
Figure 2 : Evolution de l'exploitation des nappes .....	14
Figure 3 : Evolution prévisionnelle des proportions de la demande en eau par secteur(en %).....	17
Figure 4 : Présentation général du sujet d'analyse .....	32
Figure 5 : Modèle d'interaction EPIC .....	47
Figure 6 : Modèle de simulation d'économie d'eau .....	50
Figure 7 : Evolution des rendements en fonction du volume d'eau apporté .....	82

## RESUME

L'économie tunisienne est menacée par un problème très crucial : celui de la rupture de l'équilibre entre l'Offre et la Demande globale de l'eau d'ici l'an 2020 à 2030.

L'agriculture est restée jusqu'à nos jours le premier secteur consommateur d'eau, mais elle n'est pas prioritaire du point de vue affectation de cette ressource (généralement on distribue l'eau potable avant l'eau d'irrigation). S'il y a diminution des offres, l'agriculture risque à coup sûr d'en être la première victime.

Pour augmenter les revenus et assurer l'approvisionnement du pays en produits agricoles, le secteur devra utiliser l'eau de manière plus efficace d'où l'optimisation de son utilisation.

La demande en produit alimentaire est plus que proportionnelle par rapport à la croissance démographique. Plusieurs stratégies d'adaptation ont été envisagées. Dans le cadre de notre Projet de Fin d'Etudes, nous avons mis l'accent sur le comportement des exploitants du Groupement d'Intérêt Collectif (GIC) de Melalsa. Ce comportement se traduit par : l'acquisition des matériels d'économie d'eau (adoption de stratégies conformes aux politiques officielles d'incitation), le creusage ou l'approfondissement des puits sans se soucier de limiter le gaspillage et la réduction des superficies des cultures menées en irriguée (réorientation du système de culture).

Le but recherché étant d'apprécier le bien fondé économique de toutes ces stratégies et combinaisons possibles, des modèles de programmation linéaire ont été élaborés et traités par le logiciel GAMS.

Cette modélisation part de la situation actuelle, envisage les autres situations dans le future en jouant sur le risque de stress hydrique et sur les encouragements, et abouti à l'adoption des stratégies d'irrigation.

Partant des différents scénarios et simulations, le modèle démontre que les agriculteurs n'ayant pas de puits et souvent confrontés à des problèmes de manque d'eau, adoptent des techniques d'irrigation modernes (l'aspersion pour la culture du blé et le goutte à goutte pour le maraîchage). Par contre les exploitants qui ont les puits et qui disposent suffisamment d'eau conservent les techniques traditionnelles, mais pratiquent essentiellement le maraîchage.

Connaissant les besoins en eau des différentes cultures, le modèle fait ressortir qu'il serait avantageux d'irriguer en priorité les cultures maraîchères.

Il faudra alors revoir le comportement des acteurs autour du problème de gestion d'eau. Il sera également nécessaire d'envisager d'autres mesures pour arriver à une adoption complète des stratégies d'économie d'eau. En effet, ces dernières sont très coûteuses mais économiquement rentables aussi bien pour la collectivité que pour l'irriguant.

## SUMMARY

*the Tunisian economy is threatened by a very crucial problem: which is the balance rupture between water supply and total water demand by year 2020 - 2030.*

*Agriculture remains the first water consuming sector, but it does not have priority if considering allocation of this resource (generally drinking water considered before the irrigating water). If there is a shortage of offers, agriculture will undoubtedly be the first victim.*

*To increase the incomes and to ensure the provisioning of the country with agricultural product, the sector will have to use water in a more efficient way by optimising its use.*

*The demand for foodstuff is more than proportional compared to the demographic growth; several strategies of adaptation (demand to demography) were considered. Within the framework of our Project of End of Studies, we stressed the behaviour of Melalsa's Collective Interest Group (CIG) operators. This behaviour is characterised by : the acquisition of water economy material (adoption of strategies in conformity with the official policies of incentive), the digging or the deepening of wells without worrying to limit the wasting and the reduction of irrigated cultures surfaces (reorientation of the farming system).*

*The required goal being to appreciate the economical outcome all these strategies and possible combinations, linear programming models were elaborated and treated using the software GAMS.*

*This modelling starts from the current situation, considers the other future situations while exploiting the risk of hydric stress and encouragements, and led to the adoption of irrigation strategies.*

*On the basis of various scenarios and simulations, the model shows that the farmers not having wells and often confronted with problems of lack of water, adopt modern techniques of irrigation (sprinkling irrigation for the culture of corn and drip irrigation for market gardening. On the other hand the operators who have the wells and which have water sufficiently preserve the traditional techniques, but practise primarily the truck farming.*

*Knowing the water demand of various cultures, the model emphasises that it would be advantageous to irrigate in priority the market gardening.*

*It will then be necessary to re-examine the behaviour of the actors around the problem of water management. It will be also necessary to consider other measurements to arrive to a complete adoption of the strategies of water economy. Indeed, these last are very expensive but economically profitable as well for the community as for farmers.*

## INTRODUCTION GENERALE

L'Eau devient de nos jours une ressource naturelle de plus en plus rare. Sa rareté est beaucoup plus accentuée dans les régions à climat sémi-aride en particulier la Tunisie. En effet ce climat très instable est caractérisé par une pluviométrie faible et irrégulière.

Les études antérieures ont montré le risque qu'il y a de voir l'équilibre entre l'offre et la demande en eau, rompu à l'horizon 2020-2030.

Avec l'accroissement des besoins alimentaires de la population, la Tunisie a connu l'extension anarchique des systèmes agricoles. Ce qui a rendu l'activité agricole très dépendante de l'eau d'irrigation.

Ainsi le secteur agricole est considéré jusqu'à ce jour comme le premier consommateur des ressources en eau de la Tunisie.

Confrontée au problème de pénurie d'eau, la Tunisie s'engage alors à mieux gérer l'offre et la demande de l'eau public de même que l'exploitation des nappes souterraines. Il s'agit en fait de maîtriser l'exploitation de ces nappes et de réduire les consommations. Devant cette situation l'agriculture se voit la plus lésée puisqu'elle demeure la moins prioritaire par rapport aux autres secteurs. En d'autres termes, la distribution de l'eau potable prime sur celle de l'eau d'irrigation.

Cependant, l'économie tunisienne est en grande partie dépendante du secteur agricole; c'est ainsi que la promotion d'une agriculture durable reste une question d'actualité.

En effet, dans le cadre des stratégies nationales de développement durable de l'agriculture, l'Etat Tunisien a adopté depuis 1960 l'intensification des périmètres à irriguer pour deux objectifs principaux :

d'une part, garantir **"la sécurité dans l'approvisionnement en eau de ces périmètres"**.

Ce qui lui permet d'éviter le risque que peuvent engendrer les aléas climatiques;

et d'autre part, améliorer le rendement à l'hectare des différentes productions: c'est à dire assurer **"une sécurité alimentaire dans le pays"**.

A cela il faut ajouter la création de l'emploi que peut garantir la modernisation des systèmes agraires.

En fait, la stratégie concerne la mobilisation des ressources hydriques dont les eaux de surface et souterraines, superficielles et profondes. Depuis lors, les disponibilités en eaux dans les nappes aquifères deviennent de plus en plus rares dues à leur surexploitation.

Soutenu par les plans nationaux, les aménagements hydrauliques font actuellement l'objet d'énormes investissements (soit un montant total de 2044.3 millions de dinars courants). Cela correspond à un taux de 37% du budget public alloué à l'agriculture durant le XI<sup>e</sup> plan.

Cette orientation est souvent vérifiée par le fait que le secteur irrigué participe de 32 à 35 % de la valeur de la production totale du pays avec une réduction de 7 % de la superficie agricole utile du pays. (R. ALATIRI, 1999). Dans ce choix, les activités qui dominent le plus sont les cultures maraîchères et l'arboriculture. Les céréales représentent faiblement le système en irrigué soit les 6% de la production totale en irrigué.

Il faut préciser que parmi les produits agricoles d'exportation de la Tunisie, la part de la production du secteur irrigué représente 20%.

Ces données nous permettent d'évaluer le poids du système conduit en irrigué dans l'économie tunisienne.

Face aux problèmes de pénurie d'eau dans les périmètres irrigués, plusieurs stratégies d'adaptation peuvent être envisagées tant au niveau des pouvoirs publics qu'au niveau des bénéficiaires :

- au niveau des pouvoirs publics : il y a la mise en place des structures favorisant l'adoption des systèmes d'irrigation économes en eau :
- ✓ l'incitation et l'encouragement à l'investissement dans les techniques modernes,
- ✓ les institutions publiques et la législation dans la gestion de l'eau,
- ✓ le système de tarification de l'exploitation de l'eau.
- au niveau des bénéficiaires il y a les choix des stratégies telles que l'adoption des techniques d'irrigation économes en eau, la réorientation des choix cultureux et le creusage ou l'approfondissement des puits.

Notre travail se propose alors de tester le bien fondé économique des différentes combinaisons de toutes ces stratégies observables sur le terrain.

Ainsi, nous partirons des hypothèses fondamentales pour faire une analyse du fonctionnement des exploitations agricoles.

Le principe de notre étude concerne la modélisation économique et la programmation mathématique des différents modèles ; l'objectif étant de ressortir les décisions à prendre par chaque agriculteur. Il s'agit de voir la position de l'exploitant vis à vis du Groupement d'Intérêt Collectif (GIC) et d'apprécier les différents choix auxquels il se prête quand il se trouve dans

une situation difficile d'approvisionnement en eau. Cela concerne également la façon dont il décide de distribuer l'eau aux différentes cultures.

Dans le déroulement de ce travail, nous avons choisi comme zone d'étude, les périmètres irrigués de Melalsa. En fait la plupart des PIP de cette région fonctionnent par l'intermédiaire d'un GIC mis en place depuis que l'Etat s'est désengagé de la gestion de l'eau dans les exploitations agricoles.

La zone de Melalsa est située à l'aval du bassin de l'oued Merguellil. L'étude de cette zone entre dans le cadre d'un projet de recherche sur la "Gestion intégrée de l'eau dans le bassin de l'Oued Merguellil. Il s'agit du Projet National Mobilisateur MERGUSIE" dirigée par trois institutions : l'IRD<sup>1</sup> la DGRE<sup>2</sup> et l'INAT<sup>3</sup>.

Notre document, support de notre travail s'articule autour de 3 parties :

- ❖ La première partie concerne la présentation du secteur de l'eau en Tunisie et la Problématique de la recherche. Ainsi cette partie est subdivisée en deux chapitres :
  - **le chapitre 1** nous permet de faire le Bilan actuel et futur de la ressource en eau : il s'agira de présenter les potentialités actuelles et des projections futures, l'évolution des demandes en eau, puis d'établir le bilan de la demande et des ressources.
  - **le chapitre 2** nous donne un aperçu sur les systèmes mis en place par les politiques publiques pour gérer l'évolution de la situation actuelle. Il s'agit des stratégies d'incitation et d'encouragement, des institutions et la législation mises en place pour la gestion de la ressource.
- ❖ La deuxième partie permet de faire la présentation de la région d'étude et de situer le cadre de la recherche de notre analyse. Cette recherche porte sur le fonctionnement de 3 GIC situés dans le gouvernorat de Kairouan. Notre étude s'intéresse plutôt à un seul GIC : celui de Melalsa pris dans ce cas comme un exemple type de fonctionnement de tous les GIC de centre de la Tunisie.
- ❖ Dans la troisième partie nous abordons un cadre méthodologique et d'analyse. Elle comporte 2 chapitres:
  - **un premier chapitre** dans lequel nous présentons les travaux antérieurs relatifs à l'économie de l'eau et l'adoption des différentes stratégies,
  - **un second chapitre** qui porte sur l'ensemble de la méthode d'analyse proprement dite. Là, nous commençons par une typologie des exploitations de Melalsa confectionnée sur la base

<sup>1</sup> IRD : Institut de recherche pour le développement anciennement ORSTOM.

<sup>2</sup> DGRE: Direction Générale des Ressources Hydraulique.

des critères de structure et de fonctionnement des différentes exploitations agricoles. A la fin de cette partie nous avons fait ressortir les différents types de groupes d'exploitations. L'objectif c'est de ressortir les relations qui existent entre toutes les exploitations en vue de faire une simulation par type. Un autre volet de ce chapitre s'attache à la modélisation des types d'exploitations et la simulation des différentes situations observées.

Nous partons alors de la programmation mathématique puis à l'aide d'un logiciel informatique (GAMS), nous pourrions générer les résultats des modèles établis. De ces résultats, nous apprécierons les décisions des agriculteurs.

Nous analyserons ensuite le bien fondé économique de tous les choix. Ceci revient à revoir l'intérêt que les pouvoirs publics accordent à l'amélioration du niveau d'aide et des subventions en vue de l'adoption des techniques d'irrigation économes en eau.

---

<sup>3</sup> INAT : Institut National Agronomique de Tunisie

**PARTIE I :**  
**PRESENTATION DU SECTEUR DE L'EAU EN**  
**TUNISIE ET PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE**

# CHAPITRE 1 : BILAN ACTUEL ET FUTUR DE LA RESSOURCE "EAU"

## 1-1 Potentialités actuelles et Projections futures

### 1.1.1 - Les potentialités hydriques actuelles

Sur un total interannuel moyen de 4,540 Milliards de mètre cube ( $Mm^3$ ) les principales ressources en eaux en Tunisie, sont composées des eaux de surface ( $2.700 Mm^3$ ) et des eaux souterraines ( $1.840 Mm^3$ ). Une grande partie de ces ressources est concentrée au Nord du pays soit les 60% du potentiel enregistré. Il faut ajouter à cela  $200 Mm^3$  provenant de la recharge des eaux usées et d'une utilisation beaucoup plus efficace de l'eau potable. (voir tableau n° 1).

Tableau 1 : Ressources potentielles hydriques en Tunisie ( $Mm^3/an$ )

	NORD		CENTRE		SUD		TOTAL	
	$Mm^3$	%	$Mm^3$	%	$Mm^3$	%	$Mm^3$	%
Eaux de surface	2185	80	290	38	225	21	2700	56
Eaux souterraine peu profondes	362	13	208	28	94	9	664	15
Eaux souterraines profondes	187	7	155	34	734	70	1176	26
Total	2734	100	734	100	1053	100	4540	100
pourcentage	60%		17%		23%		100	

Source: MA, DGRE,1997.

### 1.1.2 - Les projections futures

Tableau 2 : Ressources hydriques sans considérer la salinité ( $Mm^3/an$ )

RESSOURCES	POTENTIELLES	EXPLOITABLES	DEVELOPPEES	A DEVELOPPER		
Eau de surface	2700	2100	1400	67%	700	33%
Eaux souterraines peu profondes	664	664	701	106%	-37	-6%
Eaux souterraines profondes	1176	1080	930	86%	210	19%
Total Tunisie	4540	3844	2971	78%	873	22%

Source: MA, DGRE,1997.

Alors que le développement des ressources hydriques en Tunisie tend à sa limite supérieure un bilan hydrique positif a été dressé et dont la validité s'étale à l'an 2010. L'estimation de ce bilan à  $+679 Mm^3$  part des hypothèses des investissements prévus dans la régulation des eaux de surface avec des débits moyens et des hypothèses de la demande en eau évaluée à  $3.165 Mm^3/an$ . Mais

cela cache la réalité si on se réfère à la variabilité entre les années, les effets de la salinité et les disparités interrégionales. En fait la Tunisie Centrale, le Sud tunisien voire le Nord plus humide connaîtront un déficit hydrique.

Notons que les chiffres sont calculés sans tenir compte de la qualité des eaux. En effet une bonne partie des eaux exploitables ont atteint un niveau de salinité assez important. En Tunisie, les ressources suffisamment exploitées constituent les eaux souterraines. Il s'agit des nappes peu profondes et des nappes profondes.

### 1.1.2.1 - Les nappes peu profondes

Ces nappes sont largement entamées avec la multiplication des puits privés qui échappent souvent au contrôle de l'Etat. En effet on dénombre 110000 puits dans le territoire (en 1990) qui permettent de développer 40 Mm<sup>3</sup> sur les 660 Mm<sup>3</sup> disponibles. Par rapport à la quantité de puits en 1980, on s'aperçoit que le chiffre et la quantité d'eau exploitée a presque doublé et leur utilisation a augmenté de 80% (voir figure1).

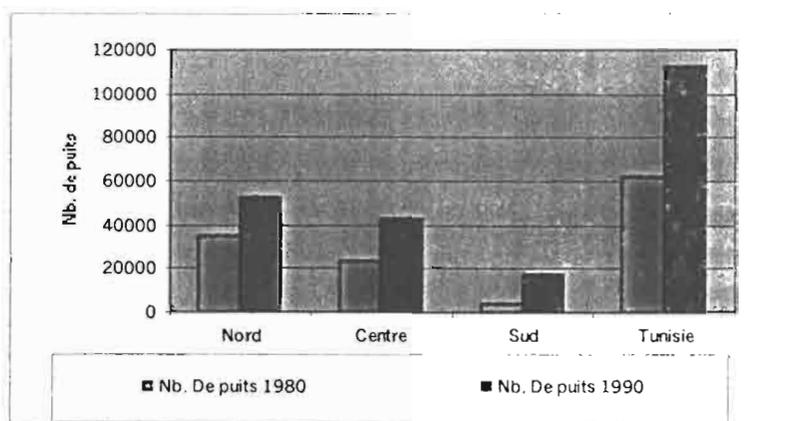


Figure 1 : Evolution du nombre de puits en Tunisie

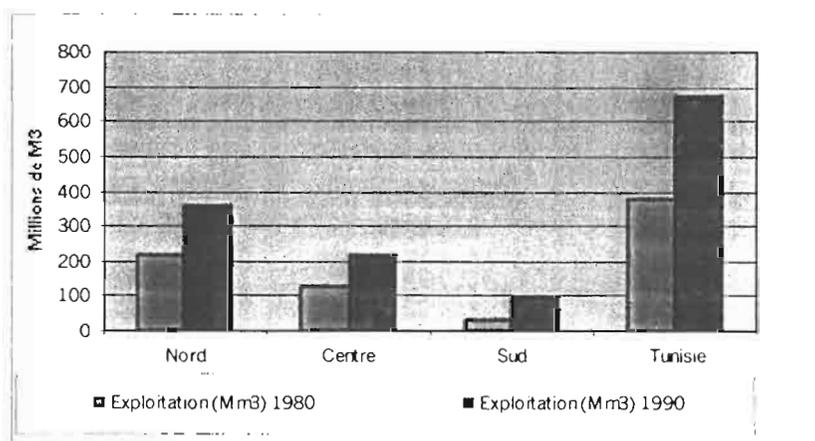


Figure 2 : Evolution de l'exploitation des nappes

On peut estimer les superficies dépendant des aquifères surexploitées entre 35000 à 40000 ha, ce qui fait les 10% de la superficie totale irriguée. Globalement ces zones sont réparties comme suit 15000-20000 ha dans le Nord, 10000-50000 ha dans le Centre et 5000-10000 dans le Sud.

### 1.1.2.2 - Les eaux souterraines

Ce sont souvent les eaux exploitables au moyen des forages. En 1990 on compte 2400 forages. Ce qui a permis de développer une quantité d'eau égale à 1176 Mm<sup>3</sup>. Les ressources souterraines sont réparties à 68% au Sud, 20% au centre et 12% au Nord. En général les 77% de ces ressources sont renouvelables dont les 78% sont concentrées au Nord et au Centre. Le Sud dispose en majorité des ressources non renouvelables mais largement entamées. (voir tableau 3)

**Tableau 3 : Etat des ressources hydriques souterraines en Tunisie**

RESSOURCES	POTENTIEL	DISPONIBLE	SUREXPLOITEE	UTILISATION ACTUELLE		
				NORD	CENTRE	SUD
Renouvelables	561	380	20(sud : 50%)	82	108	190
Non renouvelables	615	550	85(sud : 100%)	550		
Totale Tunisie	1176	930	105	632	108	190

*Source: MA, DGRE, 1997.*

## 1.2 - Les Demandes en eau actuelles et Projetées

### 1.2.1 - Les problèmes majeurs des ressources en Tunisie

Vis à vis de sa position géographique (dans le semi aride), la Tunisie s'est retrouvée dans la nécessité d'adopter des plans d'aménagements en hydraulique, la ressource naturelle y étant très rare. Ce qui lui a permis grâce au programme dynamique entamé depuis une trentaine d'années d'arriver à un niveau appréciable de la valorisation de la ressource. Ce programme est basé sur une série de réservoirs et de canaux pour mettre en valeur les eaux de surface du Nord et en particulier dans le bassin de la Medjerda et sur les puits et les forages pour l'exploitation des nappes profondes du Centre et du Sud .

#### 1.2.1.1 - Des ressources en eau largement entamées

Cependant l'exploitation technique de ces ressources sera très prochainement arrêtée; En effet, l'Etat a mis en place une stratégie décennale de mobilisation de l'eau pour 1990-2000. Selon cette stratégie, la mobilisation devrait atteindre 90% pour les eaux de surface et 100% pour les eaux souterraines (Horchani, A.,1995). Ce qui veut dire que le destockage des eaux dans les années à venir sera limité, le coût assez élevé pour capter les eaux de ruissellement et la variation du taux de salinité importante. D'où le recours aux ressources en eaux non conventionnelles: eaux dessalées et eaux usées traitées .

#### 1.2.1.2 - Une demande en eau qui ne cesse d'augmenter

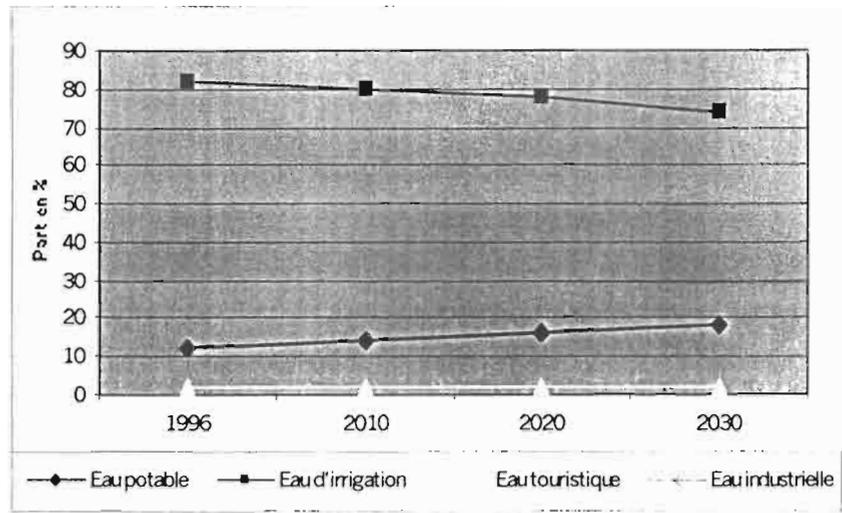
Au même moment une demande en eau ne cesse de croître dans chaque secteur et pour toutes les régions. En fait les demandes domestiques, industrielles et touristiques augmentent d'une manière générale. La demande pour l'irrigation est également en augmentation tant au niveau des approvisionnements en eaux de surface qu'au niveau des approvisionnements en eaux souterraines. On ne peut faire appel qu'à la gestion des demandes en eaux dans tous les secteurs et surtout dans l'agriculture. (voir tableau n°4).

Tableau 4 : Utilisation des ressources hydriques en Tunisie,1994

SECTEURS	VOLUME(MM <sup>3</sup> )	PROPORTION (%)
Irrigation	2100	84
Ménages	260	10
Usage municipal,...	49	2
Industrie	96	3
Tourisme	23	1
Total	2528	100

Source: MA, DG/PDIA : Etude sur la stratégie des ressources naturelles partie 1et 2 Novembre 1996.

Ce tableau nous présente la consommation globale en 1994. En effet les taux d'augmentation de la consommation sont substantiels; l'utilisation dans l'agriculture a doublé en 15 ans. Quant aux autres secteurs l'utilisation a augmenté de 80% sur la même durée, mais actuellement cette augmentation va beaucoup plus vite que la demande en agriculture (voir graphique n°1).



Source : (Benamouda 1999)

**Figure 3 : Evolution prévisionnelle des proportions de la demande en eau par secteur(en %)**

D'après toute analyse faite sur l'évolution de la situation actuelle, il ressort que jusqu'à l'an 2020 les ressources en eau pourront à peine satisfaire la demande. Mais on tendra à une situation inverse pour les années à venir. D'où la nécessité de promouvoir la gestion intégrée de l'offre et la demande des ressources en eau par l'implication de tous les opérateurs socio - économiques dans le jeu actuel : les pouvoirs publics, la collectivité et les autres agents (les ménages, les industriels et les agriculteurs).

## 1.3 - Le Bilan de la ressource sur la demande

### 1.3.1 - Le bilan de la ressource/demande : Annonce d'une pénurie proche

Pour établir le bilan ressource/demande, l'année 1996 a été prise comme année de référence. La projection a été basée sur l'évolution des ressources en fonction des réalisations de la stratégie de mobilisation et de l'évolution de la demande des différents secteurs. (EAU21, MA, 1998).

En 1996, le bilan ressource/demande reste encore excédentaire au niveau des ressources conventionnelles comme indiqué dans le tableau ci-dessous:

**Tableau 5 : Evolution prévisionnelle du bilan ressource/demande en Tunisie.**

Années	Ressources	Demandes	Bilan
1996	2647	2517	130
2010	3090	2689	401
2020	2793	2721	72
2030	2732	2760	-28

*Source: (Benamouda, 1999)*

Au delà de l'année 2020 un déséquilibre va apparaître entre les ressources en eaux conventionnellement régularisées et la demande totale du pays. Partant, le recours aux eaux non conventionnelles va prendre un rythme beaucoup plus important.

En effet, en 2030, la demande sera supérieure aux ressources conventionnelles exploitables, cette demande est estimée à 2760 Mm<sup>3</sup>, alors que les ressources ne sont que de 2732 Mm<sup>3</sup>. Le dessalement d'eau de mer atteindra 46 Mm<sup>3</sup> et les eaux usées utilisées en agriculture s'élèveront à 140 Mm<sup>3</sup>.

A ce jour avec toutes les implications institutionnelles, et budgétaires, la gestion des ressources hydriques a produit une situation très délicate. En revanche, le secteur public a axé ses efforts sur l'exploitation des eaux de surface et des eaux souterraines profondes. Ceci a favorisé au niveau des agriculteurs, la surexploitation des eaux souterraines peu profondes.

### 1.3.2 - Le niveau actuel de l'exploitation des ressources souterraines en eau dans les PIP

Dans les PIP, les nappes phréatiques connaissent une surexploitation. Cela est devenu un problème très préoccupant. En effet l'exploitation des ressources a atteint les 27% des ressources des nappes phréatiques et 14% des nappes fossiles. A cela il faut ajouter la dégradation de la qualité des eaux souterraines prenant un taux de salinisation de plus en plus croissant. Alors la dessalinisation deviendra une nécessité.

Le comble c'est que l'Etat a du mal à appliquer les réglementations en vigueur ayant pour objectif d'enrayer le phénomène de surexploitation des nappes. Aussi il est très difficile de sensibiliser les exploitants aux risques qu'ils courent et qu'ils font encourir l'ensemble de tous les exploitants du même aquifère.

Les volumes concernés par les surexploitations peuvent dépasser des volumes correspondants à des coûts de réanimation artificielle des nappes. Encore faut-il bien réfléchir sur les modalités de recouvrement des coûts de recharge surtout si cela nécessite un réseau de transfert coûteux tant à l'investissement qu'à l'exploitation.

### 1.3.3 – Le Rythme d'évolution des périmètres irrigués en Tunisie

L'exploitation de l'eau et son usage dans le secteur agricole en Tunisie se fait soit par la collectivité (Périmètres Publiques Irrigués : PPI) ou par les privés (Périmètres Irrigués Privés : PIP).

Au cours des deux dernières décennies les périmètres irrigués ont connu un rythme d'évolution très rapide allant de 167000 ha en 1980 à 334000 ha en 1995 soit une croissance de 90%. Ces statistiques masquent l'évolution relative à chaque catégorie dont les PIP ayant connu une augmentation de 16% et les PPI qui ont accrue en exponentiel (+160%) entre les 15 ans.(voir tableau 6).

Tableau 6 : Evolution des périmètre irrigués publics (PPI) et privés (PIP) en Tunisie

ANNEES	PPI EN HA	PIP EN (HA)	TOTAL (HA)	PROPORTION PIP (%)
1980	40130	135870	176000	77.2
1985	67610	126360	193970	65.1
1990	93800	161500	255300	63.3
1995	176725	157379	334104	47.1
Variation 1980-1995	164.4%	15.8%	89.8%	

Source: MA, DGRE,1997.

#### 1.3.3.1 - L'importance des périmètres irrigués privés en Tunisie

En 1995, la proportion des PIP en Tunisie est de 47.1% de la superficie totale en irrigué. Mais leur répartition n'est pas homogène d'une région à l'autre. En effet les régions du Centre- Ouest et du Nord- Est occupent une grande partie : respectivement les 42% et les 27% du total des PIP. Dans ces régions les localités fortement représentées sont celles de Nabeul, Kairouan et Sidi Bouzid.

Cependant la variation de l'ampleur des PIP n'est pas la même partout. Pour les régions du Nord-Ouest, du Centre-Ouest et du Centre-Est, on observe une progression respectivement égale à 59%, 53% et 37%. Contrairement à cela, les PIP des régions du Nord-Est et du Sud ont connu une régression brutale, respectivement égale à 17,3% et 13,7%.

Ces phénomènes que nous venons de constater peuvent être expliqués de différentes manières :

→ dans un premier temps, les encouragements et les aides de la part de l'Etat ont entraîné la création abusive des PIP en Tunisie.

→ dans un autre temps, la fréquence des PIP a entraîné la fuite d'eau des nappes phréatiques. Le surpompage de l'eau ayant atteint sa limite, les exploitants privés se trouvent dans l'obligation d'abandonner leurs puits taris.

## CHAPITRE 2 : POLITIQUES PUBLIQUES POUR GERER L'EVOLUTION DE LA DEMANDE

### ***2.1 - Incitation et Encouragement à l'investissement dans l'économie d'eau***

En vu d'une gestion rationnelle des ressources en eau encore très peu disponibles l'Etat s'est engagé depuis plus d'une décennie dans des stratégies d'incitation et d'encouragement à l'économie de l'eau dans tous les secteurs économiques. Pour le secteur agricole, il s'est beaucoup investi pour l'adoption des systèmes d'irrigation qui sont très efficaces et économes en eau. Ainsi les projets d'économie d'eau à la parcelle ont bénéficié d'encouragements multiples depuis l'année 1995, soit:

- l'augmentation du taux de subvention de 30 à 40, 50 et 60% selon la catégorie des agriculteurs (*décision présidentielle du 12 Mai 1995*),
- la non considération des dettes des agriculteurs pour l'octroi des subventions (*circulaire ministériel du 19 Septembre 1997*),
- la fixation du taux de subvention à 60% pour les AIC (*circulaire ministérielle du 4 février 1998*).

Suite à ces encouragements on évalue en 1999, la superficie équipée en systèmes d'irrigation d'économie d'eau dont le gravitaire amélioré, l'aspersion et l'irrigation localisée à un total de 190000 ha. Avec la mobilisation de 85 MD de subventions pour des investissements de près de 140 MD, on réalise en moins de 4 ans des aménagements sur plus de 62000 ha dont 22000 ha concerne l'irrigation localisée. Les réalisations évoluent selon le système d'irrigation que voici d'eau. (tableau 5)

**Tableau 7 : Evolution des surfaces équipées en économie de l'eau**

Surface équipée en économie d'eau							
Système d'économie d'eau	Total en fin 1995	1996	1997	1998	1999	Total de 4 ans	Total général
Gravitaire amélioré	57200	6600	7700	8600	3100	26000	83200
Aspersion	60100	4400	5200	3800	2000	15400	75500
Irrigation localisée	9900	3700	4900	7900	5400	21900	31800
<b>Total (ha)</b>	<b>127200</b>	<b>14700</b>	<b>17800</b>	<b>20300</b>	<b>10500</b>	<b>63300</b>	<b>190500</b>
<b>Subventions annuelle(MD)</b>	<b>6.5</b>	<b>14.1</b>	<b>18.5</b>	<b>33.6</b>	<b>10.5</b>	<b>76.5</b>	<b>83.2</b>

Source: MA, (ignore).

Il faut ajouter que selon les prévisions allant à l'an 2006, toutes les superficies qui seront irriguées (approximativement les 400000 ha), devront être équipés en système d'économie d'eau.

A cet effet, des stratégies régionales sont en cours d'élaboration. Les moyens nécessaires (la sensibilisation, la vulgarisation, l'assistance technique ect.) ainsi qu'une augmentation de la subvention annuelle de l'ordre de 40 MD/an afin de satisfaire aux besoins y afférents, doivent être mis en œuvre pour y arriver.

## ***2.2 - Les institutions et législations impliquées dans la gestion intégrée de l'eau d'irrigation.***

### **2.2.1 - Aspect institutionnel**

Dans le but d'améliorer la gestion des nappes phréatiques, l'idée est d'encourager les exploitants à former des associations spécifiques qui ont pour tâche la gestion et le contrôle de l'exploitation des ressources afin d'en assurer une exploitation rationnelle et durable dans le temps et dans l'espace.

⇒ **Cadre institutionnel du fonctionnement des GIC :**

Les GIC anciennement appelés AIC (Associations à Intérêts Collectifs) ont été créés à la suite du désengagement des pouvoirs publics tunisiens dans la gestion de l'eau vers la fin des années 80. Ces associations ont en charge une grande partie de l'entretien ainsi que la gestion de l'eau.

#### **• La structure des AIC prévue par les textes**

Les textes constitutifs des AIC 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 et le décret du 14 décembre 1992. Les activités des AIC peuvent être l'exploitation de l'eau d'irrigation ou potable, ainsi que l'assainissement. Les AIC sont dotées de la personnalité civile et créées sur l'initiative des usagers ou de l'administration.

Les AIC sont instituées par le Ministre de l'Agriculture après avis du GIH<sup>1</sup>. Le conseil d'Administration est constitué de 3 à 9 membres élus pour une durée de 3 ans parmi les usagers, avec un directeur nommé par l'administration, mais payé par l'AIC. Le comptable est un des usagers, bénévole (initialement, en 1987, il était nommé par l'administration). Il est aussi prévu qu'à terme les AIC disposent d'un directeur exécutif, technicien du Ministère de l'Agriculture détaché. L'AIC possède un budget propre qu'elle soumet chaque année à l'approbation du gouverneur. L'assemblée générale se réunit au moins une fois par an et élit le conseil d'Administration, qu'elle renouvelle ensuite par tiers chaque année. Les dépenses des AIC sont l'électricité, les frais de déplacement éventuels, les frais d'entretien du point d'eau (en général, 1% pour les puits, 1% pour les forages, 1% pour le génie civil), et les dépenses diverses (solidarité, ouvrages pour la collectivité...). Les recettes de l'AIC sont les subventions du CRDA et la participation des usages, par cotisation ou par vente de l'eau.

<sup>1</sup> GIH= Groupement d'Intérêt Hydraulique. C'est un organe administratif qui crée et peut dissoudre les AIC dans un gouvernorat. Il est institué par le décret du 27 Octobre 1987, et se compose du gouverneur (= président), du commissaire (= secrétaire), des représentants du Ministère des Finances, Ministère de la Santé, la SONEDE (Société Nationale Des Eaux du Nord), les arrondissements du Génie Rural et des Ressources en Eau, l'UTAP (Union Tunisienne de l'Agriculture et de la Pêche) et 7 membres des AIC (Association d'Intérêt Collectif) du gouvernorat.

- **La structure en pratique**

Les AIC assument parfois des activités de coopératives Agricoles (achats d'intrants, de matériels...). Ces activités, non prévues par la loi, sont bien tolérées par l'administration.

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 AIC fait distribuer des cartes d'adhésion à tous les agriculteurs de l'AIC 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. (N. Faysse, 1998.)

### **2.2.2 - Aspect législatif**

Le secteur de l'eau est régi par le code de l'Eau qui a été promulgué en 1975. Ce code s'intéresse essentiellement aux problèmes générés par le stockage, la distribution et l'offre d'eau. Il s'est préoccupé surtout de la gestion de l'offre en négligeant la gestion de la demande.

En fait, aucune mesure législative n'existe concernant l'exploitation de nappes phréatiques et ce, quelque soient les dégâts que cela peut engendrer. Le fonçage d'un puits d'une profondeur ne dépassant pas les 50 m, en dehors d'un périmètre de sauvegarde ou d'interdiction édictée par la DGRÉ n'est pas soumise à une autorisation. Dans ces conditions, l'exploitant peut extraire autant d'eau que possible. Ce qui explique la surexploitation effrénée de certaines nappes phréatiques.

Ce code ne confie à aucune entité à priori la responsabilité de l'ensemble de l'allocation des ressources en eaux même dans les époques difficiles.

Il est donc important de revoir la question de délimitation des nappes phréatiques et les principales règles qui définissent leur exploitation.

L'instauration d'une nouvelle législation qui régleme la création d'ouvrages et l'exploitation des nappes permettront leur préservation en évitant leur surexploitation. Les conséquences de la surexploitation des nappes sont lourdes : l'épuisement des ressources en eaux et la détérioration de la qualité chimique des eaux.

### **2.2.3 - Système de tarification de l'eau**

Afin de mieux gérer l'augmentation du coût d'approvisionnement en eau en Tunisie, d'autres moyens plus efficaces pourront être envisagés. Il s'agit entre autres de l'application des mesures de gestion de la demande.

Gérer la demande d'eau pour encourager l'utilisation efficiente et la conservation des ressources pourraient constituer une alternative rentable. C'est ainsi que l'application d'une telle mesure éviterait d'avoir recours à la construction d'une nouvelle infrastructure à des coûts relativement

élevés. Mais, comme toute mesure nouvelle, elle doit être introduite soigneusement afin de garantir le moins de perturbations possibles. Parallèlement à cela, de nouvelles approches doivent s'imposer, nécessitant un changement au niveau des mentalités et des comportements.

On rassemble en quatre catégories les politiques de gestion de la demande potentielle:

- Les objectifs financiers:

Les gestionnaires du secteur hydraulique ont un principal objectif : *l'objectif financier* car ils cherchent avant tout à recouvrir les coûts de réalisation et d'approvisionnement en eau à partir des infrastructures hydrauliques publiques.

Les investissements hydrauliques dans le secteur public en Tunisie, sont en général à la charge de la collectivité (budget public). En effet la politique mise en place ces dernières années visant à augmenter annuellement le prix de l'eau de 15% en valeur nominale, a provoqué entre 1992 à 1996, une augmentation de 70 % à 87 % de la moyenne nationale de recouvrement des frais d'exploitation et de maintenance.

- Les questions environnementales- (surexploitation des ressources hydrauliques):

Si les ressources hydrauliques disponibles sont utilisées en totalité, y compris les nappes phréatiques, fixer un prix de la ressource au delà des frais de maintenance et d'exploitation, pourra aussi être une manière efficace permettant d'équilibrer une demande excessive face à une disponibilité limitée. Toutefois, ceci n'est applicable que lorsque les ressources souterraines ne sont pas disponibles ou sont efficacement gérées par les usagers ou le gouvernement.

Il y a une relation entre les niveaux des prix de l'eau de surface et la surexploitation des eaux souterraines. Simultanément, les fermiers qui ont des puits, les utilisent, car ils sont plus fiables que l'alimentation en eau publique à partir des eaux de surface.

La combinaison des hauts prix pour les eaux de surface, a joué sans doute une part importante dans la surexploitation des ressources en eau souterraines. Ceci doit être pris en ligne de compte lors de l'élaboration d'une nouvelle stratégie de prix.

- considérations d'ordre régional :

La multiplication des modèles de distribution des cultures et des tarifs de l'eau entraîne une difficulté à appliquer un pourcentage national d'augmentation des prix économiques alors qu'une politique nationale d'augmentation des prix nominaux de 15% chaque année a été mise en place. L'application actuelle de cette politique varie considérablement d'une région à l'autre. En général, les régions auxquelles il a été possible d'appliquer cette politique sont celles des cultures à haute plus value.

Il est acquis que selon le prix de l'eau, les irriguants peuvent être contraints à modifier leur système de culture. Si les fermiers cultivent des produits à haute valeur ajoutée, alors ils peuvent se permettre des prix plus élevés de l'eau. Par exemple, les prix élevés de l'eau dans d'autres pays ont poussé les fermiers à se concentrer presque exclusivement sur les cultures à haute valeur ajoutée, telle que les fleurs, les fruits et les légumes destinés à l'exportation. Si les agriculteurs tunisiens sont supposés être en mesure de payer l'eau à des prix plus élevés, ils doivent être capables de se convertir aux cultures à haute valeur.

#### **2.2.4 - Gestion décentralisées et Marchés de l'eau**

La commercialisation de l'eau est appliquée comme moyen d'améliorer l'allocation de l'eau dans un nombre de plus en plus important de pays. La pratique par les agriculteurs prêtant à un voisin une quantité d'eau de leurs quotas est une manière informelle de commercialiser l'eau. En réalité, les agriculteurs au sud de la Tunisie, pratiquent cette forme d'échange depuis des siècles. L'efficacité de telles pratiques dans un système formel plus généralisé a été démontrée dans plusieurs autres pays. Il serait intéressant d'examiner comment un pareil système pourrait être appliqué à la Tunisie.

#### **2.2.5 - Utilisation Conjointe des Ressources hydrauliques**

L'utilisation excessive de certaines des ressources souterraines peu profondes a entraîné ces dernières années une dégradation de nombreuses nappes phréatiques, et plus particulièrement celles des zones côtières les plus précaires suite à l'intrusion de l'eau marine. Les difficultés pratiques auxquelles se heurtent les services de l'Etat dans le contrôle des eaux des nappes phréatiques, exploitées essentiellement par le secteur privé, est une des préoccupations des gestionnaires des ressources en eau du pays.

Selon les recommandations qui ont été établies, on mise sur la capacité des AIC, dans le futur, pour devenir l'institution principale, "responsable" ayant le contrôle de l'utilisation des ressources en eau souterraine.

Une politique tarifaire de promotion de la gestion conjointe pourrait être envisagée, si les prix de l'eau de surface sont assez proches des coûts de pompage des eaux souterraines et les risques de distribution et de qualité sont ainsi similaires. Durant les années pluvieuses, les gestionnaires de l'eau pourraient ainsi fixer le prix de l'eau de surface en-dessous des coûts de pompage de l'eau souterraine, encourageant ainsi les irriguants à préserver l'eau des nappes. A l'inverse, durant les années sèches, les prix élevés de l'eau de surface encourageront les cultivateurs à utiliser les ressources en eaux souterraines qui leur sont accessibles. En conséquence, le coût marginal de l'utilisation conjointe ou du stockage "naturel" de l'eau souterraine peut être considéré, à la limite, comme une alternative de nouvelles sources d'eau et soutenant la comparaison avec les coûts marginaux des ressources alternatives (barrages et nappes).

La politique actuelle de fixation des prix ne prend pas beaucoup en considération la possibilité de l'utilisation conjointe ou l'utilisation des prix afin de ralentir l'utilisation excessive des nappes peu profondes.

### **2.2.6 - Mesures de conservation**

Afin d'augmenter le volume d'eau disponible, l'Etat doit faire appel à la conservation de cette ressource qui est devenue de nos jours une alternative à laquelle l'on a tendance à accorder plus d'importance. Cependant cette conservation ne pourrait devenir une réalité que suite à un effort soutenu de la part des responsables de la ressource. En effet, les équipements modernes d'irrigation peuvent conserver la ressource, mais ils sont à coût d'acquisition et de maintenance élevés. C'est pourquoi, ils doivent être en priorité utilisés pour promouvoir les cultures à haut rendement afin de supporter les coûts croissants.

## **2-4 Problématique de la recherche:**

### **2-4-1- Présentation du problème:**

Devant le risque de voir le développement du secteur agricole freiné par le problème de pénurie en eau qui s'annonce dans les années à venir, l'Etat tunisien choisit d'investir dans la gestion de l'eau.

En effet, l'agriculture est un secteur clef de l'économie nationale. Mais elle est menacée actuellement par la rareté des pluies caractéristique du climat méditerranéen. L'objectif c'est de réduire la dépendance de l'agriculture des variabilités climatiques.

Depuis lors l'investissement dans l'hydraulique a été la préoccupation majeure des planificateurs et des décideurs. Ainsi, les perspectives décennales 1962-1971 misaient déjà sur un doublement de la superficie irriguée du pays portant celle-ci à 1.3% de la SAU (*R.Baduel*). Jusque là l'irrigation n a cessé de se développer souvent grâce à des fonds publics. Pour les agriculteurs, elle constitue un moyen technique de maîtriser la production agricole dans un contexte économique de plus en plus contraignant. Pour les pouvoirs publics, elle représente un facteur primordial de la politique agricole en favorisant le maintien de l'activité agricole et la sauvegarde des espaces ruraux (*S.Morardet 1999* ). En conséquence l'agriculture devient le premier secteur consommateur des eaux exploitables de la Tunisie.

Actuellement les ressources en eau de la Tunisie connaissent une extraction qui tend vers sa limite supérieure c'est à dire que les disponibilités en eau des nappes aquifères superficielles ou profondes deviennent de plus en plus faibles. Une approche de solution très évidente est d'intégrer dans le contexte actuel de développement de l'agriculture, la recherche de l'équilibre entre l'offre et la demande en eau par une gestion impliquant tous les acteurs autour du problème d'eau. Il s'agit de des pouvoirs publics, les agriculteurs et leur collectivité.

Le problème que nous posons ne peut se justifier que par le choix raisonné d'une zone d'étude. Alors nous essaierons d'analyser ce fait dans le cas du périmètre irrigué de Melalsa situé dans le gouvernorat de Kairouan.

En effet c'est une région essentiellement agricole avec une population pratiquant surtout le système en irrigué. Cette région connaît actuellement un problème de pénurie d'eau dont la cause est la multiplication anarchique des puits de surface et des forages, une surexploitation accrue des eaux de la nappe dans le bassin de l'oued Merguellil. La conséquence directe c'est que le niveau piézométrique de la nappe est en baisse, ce qui entraîne la diminution du niveau des prélèvements qui ne satisfont pas les besoins des exploitations.

Face à une telle situation, quel comportement peut adopter l'agriculteur ?

- ✓ sera t - il obligé d'irriguer certaines parcelles au dépens d'autres?
- ✓ modifiera t - il l'orientation culturale en place?
- ✓ quelle sera alors la règle d'allocation de l'eau à adopter?

Deux situations sont observables :

◆ une première situation « au sein des GIC sans disposer de puits ». Là l'exploitant est guidé par des règlements qui régissent le fonctionnement de GIC et la gestion de l'eau : la règle de répartition de l'eau et la valorisation de cette eau dans l'exploitation.

En effet les adhérents du GIC sont souvent confrontés à des problèmes d'approvisionnement en eau. C'est un problème inhérent à un "tour d'eau" parfois très éloigné (15 à 20 jours à Melalsa ) ou soit c'est un problème de "volume d'eau" reçu non satisfaisant. L'exploitant va tout de suite penser à disposer d'une autonomie de gestion de l'eau (creusage de puits si la situation et les moyens le permettent).

◆ une deuxième situation « autonomie de l'exploitation de l'eau dans le GIC ou hors du GIC »: malgré qu'ils disposent de puits, les irriguants ne sont pas totalement épargnés du risque général de pénurie. En effet le potentiel en eau par an du puits devient de plus en plus limitant, une fois qu'on observe une baisse général du niveau piézométrique de la nappe. Alors la disponibilité ou l'approvisionnement en eau devient de plus en plus inférieur aux besoins des plantes. Dans le pire des cas le puits tarie complètement , chose fréquente à Awanmria. Quel peut-être alors le premier remède?

Soit l'exploitant choisi d'approfondir son puits ou bien il l'abandonne et creuse ailleurs. S'il n'a plus d'autres moyens, il va choisir d'acquérir un matériel d'économie en eau. Soit il abandonne et se rabat au système de culture en sec qui souvent n a pas une bonne productivité mais exigent peu de main d'œuvre.

### 2.4.2-Hypothèses de travail

Nous partons de plusieurs constats :

Vis à vis de la politique d'encouragement à acquérir des équipements d'économie en eau , engagé par l'Etat tunisien depuis une dizaine d'année, plusieurs comportements des agriculteurs de cette région s'observent . Trois types de choix stratégiques observées sur le terrain expliquent l'ensemble de tous ces comportements: **choix techniques, choix d'investissement et choix culturaux .**

- Concernant le **choix technique**, il s'agit d'investir pour l'acquisition du matériel d'économie en eau c'est à dire l'adoption de stratégies conformes aux politiques de l'Etat. Il s'agit notamment de l'achat du matériel et l'installation du réseau de goutte à goutte avec une subvention de la part de l'Etat allant de 40 à 60% du total des frais de l'investissement; a cela s'ajoute une couverture du montant à payer par un crédit bancaire ou un crédit fournisseur. C'est une technique localisée qui permet d'augmenter l'efficacité technique\* par une réduction de la consommation de 40% à 60%; elle favorise ensuite la fertigation. Mais un tel choix tient compte de l'orientation des cultures (arboriculture et culture maraîchère. Quant aux céréales la technique qui s'adapte le mieux est l'irrigation de surface.
- Pour ce qui est du **choix de l'investissement** il s'agit d'approfondir les puits déjà existant mais qui connaissent une baisse du niveau de la nappe d'eau ou de creuser de nouveaux puits afin d'accéder à l'eau. Mais ceci se réalise souvent sans souci du gaspillage. C'est un choix qui se fait sur les principes qui tiennent compte uniquement du prix de revient de l'investissement souvent pas très élevé puis une sécurité de l'approvisionnement en eau.
- Quant aux **choix culturels** c'est une stratégie qui consiste à réduire les superficies des cultures menées en irrigué soit la réorientation du système cultural. Cela revient à abandonner les cultures les plus consommatrices d'eau et les moins rentables au dépend des cultures les plus rentables mais qui sont peu exigeantes en eau.

Le problème se pose pour notre exploitant qui n'a pas les moyens d'investir dans le creusage des puits ni pour l'acquisition du matériel d'économie d'eau mais qui dispose d'une exploitation exclusivement arboricole. Sera t - il contraint d'arracher une bonne partie de sa plantation ou opter pour la réduction de l'apport en eau?

Dans un autre cas où les moyens manquent pour un quelconque investissement pour accéder à l'eau et face à une situation où la nappe connaît une fuite complète de l'eau; notre pauvre agriculteur sera il amené à abandonner complètement le puits et choisir le système en sec dont le revenu ne couvre pas les besoins de la famille ou alors il complète le manque par les activités extra - agricoles.

Théoriquement la collectivité est-elle prête à déplacer le palier de crédit , d'aide et de subvention à accorder aux irriguants tant que la majorité parmi ceux là restent incapables d'épouser les techniques d'économies d'eau?

Quelle est le niveau maximal d'encouragement au delà de laquelle la collectivité ne peut t-elle pas dépasser ?

Quelles seront alors les réactions des paysans pour un éventuel changement positif des stratégies de l'Etat?

Il est entendu que des combinaisons de ces diverses stratégies sont observables sur le terrain. Le travail à mener dans le cadre de notre Projet de Fin d'Etude cherche à apprécier le bien fondé économique de ces diverses stratégies observées.

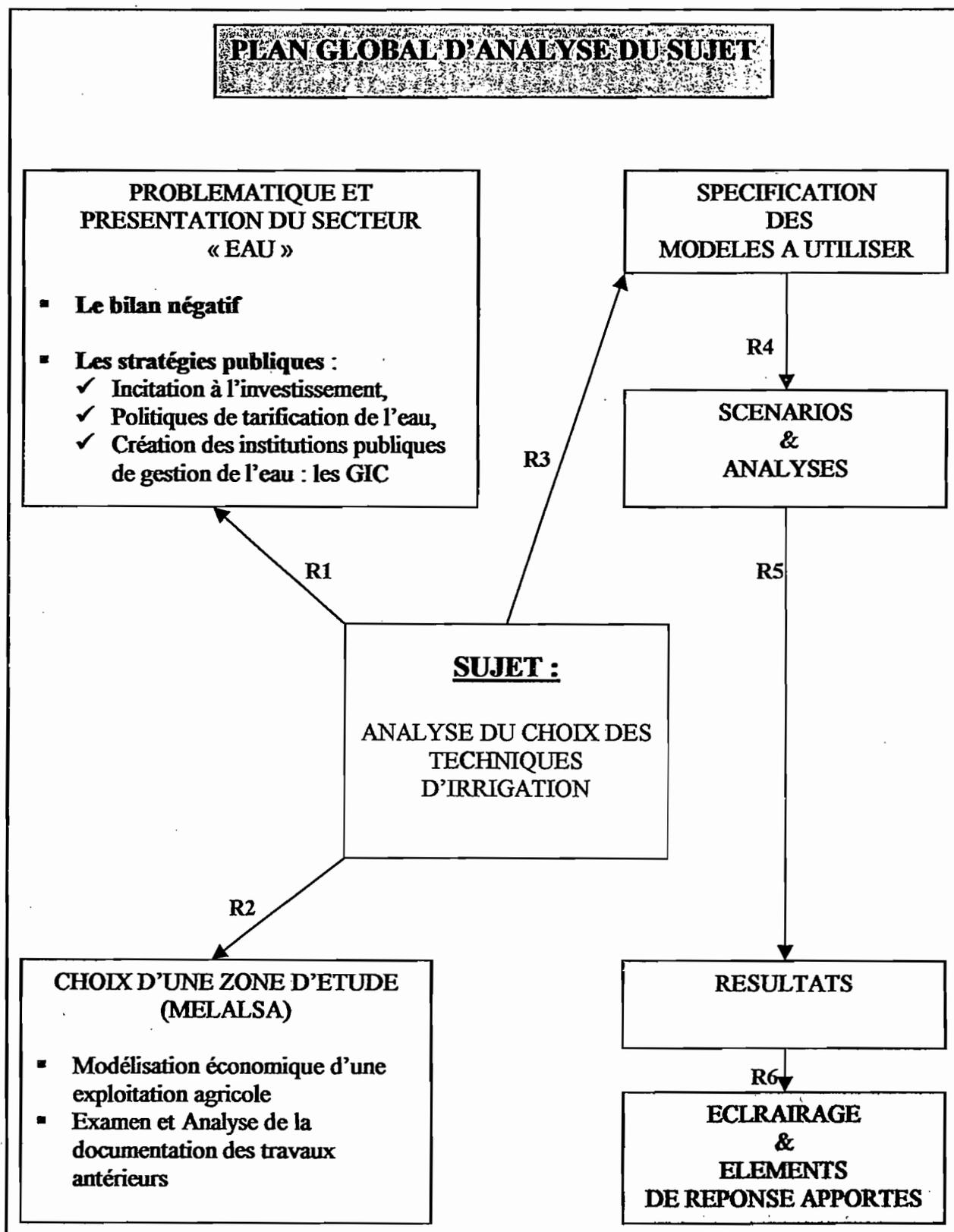


Figure 4 : Présentation général du sujet d'analyse.

**PARTIE II : CADRE D'ETUDE, CHOIX ET  
PRESENTATION DE LA REGION**

## CHAPITRE 1: CADRE D'ETUDE

La région d'étude choisie dans le cadre de notre projet concerne une partie du bassin versant de l'oued Merguellil localisé dans le gouvernorat de Kairouan. C'est un choix qui s'intègre dans le projet MERGUSIE<sup>1</sup> en cours d'exécution.

Certains travaux dans la région d'étude ont déjà été effectués et portent essentiellement sur la gestion intégrée de l'eau dans les PIP et les PPL. Pour notre cas, l'étude s'intéresse spécifiquement aux GIC: les divers comportements des agriculteurs selon leurs positions par rapport au GIC une fois que le problème d'eau se pose. Ce volet d'étude s'insère dans les travaux en cours sur les usages de l'eau et le fonctionnement des GIC.

Pour accomplir cette étude l'équipe de recherche a préféré travailler sur 4 GIC dont deux appartiennent aux régions situées à l'aval de l'oued Merguellil : il s'agit des régions de Melalsa et de Chbika localisées dans le bassin de Merguellil et deux autres GIC choisis hors du bassin Merguellil. Les deux derniers GIC appartiennent aux régions de Bled Abida et Souaidia situées dans le gouvernorat de Kairouan. Ils ont été ciblés ainsi pour avoir une vision complète du fonctionnement de l'ensemble des GIC étant donné que dans la zone du Merguellil on ne trouve pas de GIC expérimenté.

En effet, la zone de Merguellil rassemble tous les problèmes souvent rencontrés au niveau de l'exploitation des grands bassins. Comme il a été démontré par les chercheurs de l'IRD : « le Merguellil est très représentatif du semi-aride méditerranéen tant par les techniques de stockage utilisées que par les impacts environnementaux observés. La transposition des méthodes et des outils adaptés à d'autres régions en sera facilitée » (*P.Le Goulven; Ruf, Th, 1996*).

C'est ce qui explique le choix de la région de Kairouan dans le cadre de notre PFE. Pour être plus concis nous allons focaliser cette analyse uniquement que sur les périmètres irrigués de Melalsa. Partant de cette méthode, on peut élargir le domaine d'étude en la transposant aux autres régions.

<sup>1</sup> MERGUSIE= Projet sur l'oued Merguellil créé en 1997 Le projet est piloté par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) anciennement appelé ORSTOM en collaboration avec d'autres institutions Tunisiennes de recherche et de développement telles que l'INAT, les CRDA, le Ministère d'Agriculture....

## CHAPITRE 2: PRESENTATION DE LA REGION DE KAIROUAN

### *2.1.- Situation géographique*

Située au Centre-Ouest de la Tunisie, la région de Kairouan présente un climat semi-aride inférieur caractérisé par un milieu naturel fragile et difficile, ce qui expose la région aux aléas climatiques importants, aux effets néfastes sur le potentiel en sol, en infrastructures et en sites urbains. Les conditions naturelles sont caractérisées par des précipitations moyennes et très irrégulières (200 à 300 mm/ sur le  $\frac{3}{4}$  de la région), un réseau hydrographique à écoulement parfois très violent, se traduisant par des fortes crues, des températures assez élevées en été avec plusieurs jours de sirocco par an. On évalue l'évaporation sur surface libre à 1800 mm/an environ et l'évapotranspiration potentielle de 1345 mm, d'où un déficit hydrique apparent de l'ordre de 1000 mm.

Cette région est caractérisée sur le plan social par une population active essentiellement agricole car, en fait, l'agriculture reste encore une activité qui garanti le plus d'emploi. Mais le comportement de la société vis à vis de l'agriculture dépend des conditions climatiques et du marché de travail extérieur.

Du point de vu économique la région de Kairouan occupe une position stratégique en matière de ressources naturelles. Son potentiel en sol, valorisé par les ressources en eau mobilisées la classe parmi les premières producteurs agricoles et la meilleur à utiliser la main d'œuvre. Mais l'intensification agricole, permettant l'augmentation de l'emploi permanent, ne bénéficie pas encore de conditions de production satisfaisantes aussi bien sur le plan des structures d'appui que sur celui de l'encadrement et de la vulgarisation.

## **2.2 - Présentation générale du secteur irrigué**

### **2.2.1 - Ressources en eau**

Le secteur irrigué repose sur l'exploitation des ressources hydrauliques variées qui permettent de mobiliser un volume annuel de 324 Mm<sup>3</sup> repartis comme suit :

- eau de surface: 190 Mm<sup>3</sup>
- nappes profondes 78 Mm<sup>3</sup>
- nappes phréatiques: 56 Mm<sup>3</sup>

### **2.2.2 - Infrastructure hydraulique d'irrigation**

La région présente:

- 03 grands barrages (400 Mm<sup>3</sup>) dont El Houareb sur l'OUED Merguellil
- 03 barrages collinaires
- 47 lacs collinaires
- 285 forages dont 145 destinés à l'irrigation.
- 8072 puits de surface en 1995 (contre 5718 en 1985)<sup>1</sup> dont 6700 puits à usage agricole. La cadence d'accroissement est d'environ 235 puits/an (entre 1985 et 1995).

Avec l'accroissement du nombre de puits de surfaces, l'exploitation des nappes phréatiques a connu une augmentation sensible pour atteindre les 58.12 Mm<sup>3</sup>/an en 1995 et ce pour des ressources renouvelables de l'ordre de 56.1 Mm<sup>3</sup>/an, soit une exploitation des nappes phréatiques de 2.02 Mm<sup>3</sup>/an entre 1990 et 1995.

Sur les 8075 puits, on dénombre 2865 puits équipés de groupes motopompes (GMP) électriques, et 2876 sont équipés de GMP diesel, 1066 équipés de sceau et les 1245 restant sont abandonnés.

Un bilan des ressources en eau des nappes phréatiques montre que la totalité de ces nappes sont soit à un stade d'exploitation équilibré soit à un stade d'exploitation très avancé. La nappe de la plaine de Kairouan est l'une des nappes les plus touchées par la surexploitation. Cette dernière couvre toute la région de Chebika avec une couche de sable profonde de 50m; ce qui favorise la

<sup>1</sup> DGRE: Situation de l'exploitation des nappes phréatiques, 1996

multiplication des puits de surface souvent forés par des sondages à bras. Il faut aussi noter que la région a multiplié son équipement électrique allant de 671 en 1989 à 1321 en 1995.

### 2.2.3 - Les périmètres irrigués de Kairouan

\* Répartition des superficies irrigables selon la source d'approvisionnement :

Le secteur irrigué couvre en 1996 une superficie de 50970 ha. Suivant la source d'irrigation nous avons la composition du secteur:

- \* Barrages 8230
- \* Forages 9500ha (6450ha en PPI et 3050 ha en PI privé)
- \* Eaux usées traitées 240 ha
- \* Puits de surface 31000 ha
- \* Prises sur oued et lacs 2000 ha
- \* Importance des périmètres irrigués du Kairouan

Par rapport aux périmètres du centre et de la Tunisie en général, nous constatons que la région de Kairouan occupe à elle seule une grande partie des périmètres publiques irrigués et elle se classe en premier lieu quant il s'agit des PIP (résultat de 1996/97). Voir tableau n°8.

Tableau 8 : Importance des périmètres irrigués du Kairouan

		Kairouan		Centre		Tunisie	
		ha	%	ha	%	ha	%
Superficies irrigables	total	52330	100	125220	100	372010	100
	privé	42350	81	96560	77	210400	57
	publique	9980	19	28660	23	161610	43
superficies physiques irriguées	total	45910	100	108040	100	316640	100
	privé	39180	85	85760	79	185240	59
	publique	6730	15	22280	21	131400	41
superficies des cultures	total	48090	100	113530	100	336800	100
	privé	41360	86	91110	80	198980	59
	publique	6730	14	22420	20	137820	41
taux d'intensification (%)	total	105		105		106	
	privé	106		106		107	
	publique	100		101		105	
taux d'occupation du sol (%)	total	88		86		85	
	privé	93		89		88	
	publique	67		78		81	

Source: MA, DG/PDIA : Résultats d'enquête sur les périmètres irrigués, Décembre 1997

A la lumière de ces résultats, on voit que le taux d'intensification des PIP est voisin de la moyenne nationale alors que le taux d'occupation est plus élevé que la moyenne du pays.

Pour l'occupation du sol on le verra elle se présente comme on le voit dans le tableau 9

**Tableau 9 : Occupation du sol dans les PIP (privé) et PPI (périmètres publiques irrigués)**

	Kairouan		Centre		Tunisie	
	PIP	PPI	PIP	PPI	PIP	PPI
Céréales	21380	820	30270	2290	45600	23140
Fourrages	3190	240	9410	2780	20160	19070
Légumineuses			90	20	1510	430
Cultures Maraîchères	13960	2230	42160	7360	87520	41310
Arboriculture	13360	4710	40120	14190	85210	64180
Autres cultures			30		3060	5760
Culture en intercalaire	10530	1270	30970	4220	44080	16070
total	41360	6730	91110	22420	198980	137820

Source: MA, DG/PDIA : Résultats d'enquête sur les périmètres irrigués, Décembre 1997

On constate à travers ce tableau que les cultures irriguées du Kairouannais occupent 45% des PIP du centre et 30% des PPI de la Tunisie.

## **2.3 - Présentation de la région de Melelsa**

### **2.3.1 - Localisation**

Le périmètre de Melalsa est irrigué à partir du forage existant à Melalsa, il est rattaché administrativement à Imadat Sidi Ali Ben Salem de la délégation de Chebika du Gouvernorat de Kairouan.

### **2.3.2 - Le climat**

Le Kairouannais fait partie du bio-climat aride supérieur, à hiver tempéré. Il s'agit d'un climat continental marqué par un été chaud et un hiver froid. La zone du projet fait partie de cet étage bioclimatique.

**\* La Pluviométrie :** En effet, on enregistre dans cette zone une pluviométrie caractérisée par une grande variabilité d'une averse à une autre, d'un mois à un autre et même d'une année à une autre. La moyenne annuelle est de l'ordre de 305 mm, la répartition saisonnière se présente comme suit:

- Automne: 120 mm
- Hiver: 73 mm
- Printemps: 85 mm
- Eté: 27 mm

Il faut noter que la mauvaise répartition et l'irrégularité du régime pluviométrique ont un impact important sur l'agriculture.

**\*Les températures:** La température annuelle est de 19.6 °C avec les maxima dans l'année  $\leq 36.8^{\circ}\text{C}$  et les minima  $\geq 6.2^{\circ}\text{C}$ .

A cela il faut ajouter que la région est soumise par l'influence de deux vents dominants (le vent du Nord-Ouest en hiver et le vent du Sud-Est en été), l'influence du sirocco (vent chaud de l'été de direction Sud et Sud-Ouest) puis l'effet de la gelée qui commence de Décembre à Mars avec une moyenne annuelle de 3.4 jours

### **2.3.3 - Les sols**

Il s'agit d'alluvions fines d'apport récent actuel qui ont subi une salinisation secondaire sous irrigation mal organisée et anarchique. Ces formations à drainage topographique défailant se distinguent par une structure massive peu nette et un régime de filtration lente, d'autre part l'influence des caractéristiques du matériau original semble également déterminante dans la

pédogenèse des sols, ce sont d'elles en effet, que dépend pour une grande part le bilan hydrique des sols qui conditionnent étroitement l'évolution pédologique et la migration des éléments dissous sous évaporation intense.

### **2.3.4 - Délimitation du périmètre**

On distingue à Melalsa les périmètres privés qui sont souvent gérés par les GIC qui existent depuis 1992. Le périmètre couvre une superficie totale de 130 ha alors que les superficies réellement irriguées varient selon la saison:

- superficie irriguée en hiver : elle est de 80 ha ,
- superficie irriguée en été : elle est de 45 ha .

De même le nombre d'adhérents varie d'une campagne à une autre et tourne autour de 49 exploitants.

Vis à vis du collectif de gestion des ressources GIC, on distingue plusieurs catégories d'exploitants: les exploitants ayant leurs parcelles dans le GIC uniquement, les exploitants ayant une partie de leur parcelle en GIC et une autre hors de GIC et les exploitants qui n'adhèrent pas au GIC mais qui influencent indirectement le système de gestion des exploitations agricoles de la région. Ce dernier cas est faiblement représenté dans le Melalsa.

### **2.3.5 - Ressources en eau**

Dans le périmètre irrigué de Melalsa, il y a deux types de ressources :

- les puits en GIC et hors GIC
- le forage géré par le GIC

En fait le forage de Melalsa exploite l'aquifère de la plaine de Kairouan. Ce forage a été exécuté en 1992 dont les caractéristiques sont les suivantes:

- Profondeur = 81m
- tubage = 9" 5/8 de 0.5 m à -69 m
- Niveau statique = -19.54m

L'essai de débit a donné les résultats suivants: voir tableau 10

**Tableau 10: Résultats d'essai de débit**

n° de pallier	durée(heure)	débit(l/s)	rabattement(m)	débit spécifique(l/s/m)
1	8	20	5.40	3.71
2	8	30	8.40	3.61
3	8	43	14.70	2.93

*source CRDA Kairouan : Etude de création du périmètre irrigué( rapport provisoire de factibilité)*

Proposition d'exploitation

- débit = 30 l/s
- niveau statique = -24.5 cm
- rabattement = 9m
- résidu sec = 1.3 g/l

### 2.3.6 - Situation démographique et facteurs humains

**La population:** l'enquête et les interviews menées avec les futurs bénéficiaires (49 familles constituées par 6.3 personnes en moyenne) révèlent que cette zone est à caractère exclusivement rural et que les bénéficiaires dans le périmètre irrigué résident dans des maisons en dur situées dans le village de Melalsa. Ce village se trouve sur la limite nord du périmètre et donc sur l'exploitation agricole; ceci constitue un facteur favorable à l'entretien des cultures étant donné la présence en permanence de la main d'œuvre familiale.

Le travail agricole se fait généralement par le chef de la famille, sa femme, s'ils ne sont pas trop âgés et ses enfants. En outre une répartition des tâches existe entre l'homme et la femme selon les opérations agricoles.

**L'emploi:** la zone est caractérisée par un taux de chômage relativement faible du fait de la pratique de l'irrigation soit sur le périmètre autour du forage de Melalsa soit autour des puits de surface relativement abondant dans la zone.

### 2.3.7 - Les statistiques agricoles de la région Melalsa

#### \* Le secteur irrigué

D'après les données statistiques agricoles sur la délégation de Chebika qui couvre la région de MELALSA, il ressort que sur les 30000 ha de SAU, le secteur irrigué couvre une superficie de l'ordre de 10100 ha desservis comme suit:

- - Zone public: superficie = 30000 ha
- puits profonds = 19 puits
- barrage El Haoureb = 110000
- Zone privée : superficie = 5710 ha

- puits profonds = 9 forages
- puits de surfaces = 1203 puits

**\* Les cultures pratiquées dans la région**

Les types de cultures rencontrées dans la région sont : l'arboriculture, la culture maraîchère, les grandes cultures et l'élevage.

L'arboriculture est quasiment dominée par l'olivier, la pastèque et le melon qui sont les principales en culture maraîchère tandis que le blé et la fève sont plus cultivés parmi les grandes cultures. L'élevage concerne essentiellement les ovins.

Les autres espèces rencontrées sont énumérées dans le tableau 11

**Tableau 11: Les espèces rencontrées dans la région de Melalsa**

arboriculture		culture maraîchère		grande culture		culture fourragère		élevage	
espèces	S (ha)	espèces	S(ha)	espèces	S(ha)	espèces	S (ha)	espèces	nbre têtes
olivier	9500	pastèque		blé		avoine		ovins	
amandier	2500	melon		orge		orge		caprin	
abricotier	300	tomate	—	avoine	—	vesce	—	bovins	—
agrumes	117	piment		fève		bersim		animaux de trait	
divers	3000	autres						ruches d'abeilles	
total		total		total	total	total		total	

S (ha) : superficie en h

Sources : Biche

**Commentaire :** les données dont nous n'avons pas de précision sur les superficies cultivées ont été complétées à partir de nos propres enquêtes

## **PARTIE III CADRE METHODOLOGIQUE**

# CHAPITRE 1 : LES TRAVAUX ANTERIEURS RELATIFS A L'ECONOMIE DE L'EAU

## ***1.1 - Stratégies modernes en économie d'eau dans l'Agriculture***

### **1.1.1 - Introduction**

De nombreuses recherches dans le développement économique portant essentiellement sur les ressources naturelles épuisables ont aboutit à des approches de solutions par des modèles économiques connus. La programmation linéaire reste de nos jours l'une des techniques les plus utilisées et adaptées à cet effet.

### **1.1.2 - Adoption de nouvelles technologies de ressources non renouvelables**

La méthode de Zilberman et Casuel est l'un des modèles empiriques utilisé pour évaluer le bénéfice monétaire global de la production nette, du coût de l'utilisation de l'eau et de l'adoption d'une technique d'irrigation à un instant donné.

En effet le monde actuel est confronté à de multiples problèmes qui entravent le développement de l'agriculture : la résistance des maladies, l'érosion du sol et la rareté des ressources en eau. Ce dernier problème a été la préoccupation des concepteurs de ce modèle (Zilberman et Chakravorty).

Alors il est démontré que la gestion de l'eau et l'adoption de nouvelles stratégies pour son extraction sont les solutions fondamentales.

Ce modèle est conçu à partir d'une analyse économique d'une seule unité qui se complique par une simple agrégation de plusieurs unités aboutissant à une analyse à l'échelle régionale. Dans ce genre d'analyse on tient compte de paramètres hétérogènes à savoir :

- la fonction de production,
- la technologie et l'efficacité technique<sup>4</sup> *i* (*i* prend la valeur 1 ou 2 suivant qu'il s'agisse de la méthode traditionnelle ( gravitaire ou moderne), l'aspersion ou le goutte-à-goutte,
- la nature de la terre,

<sup>4</sup> Efficacité technique d'une technique d'irrigation c'est encore le rendement ou efficience évalué par le rapport Volume de l'eau nécessaire à la plante sur le volume total d'eau apporté. Cette valeur est toujours inférieure à 1 due aux pertes engendrées en profondeur par percolation et en surface par ruissellement ou par évapotranspiration.

- le coût de la technologie et le coût du pompage de l'eau,
- la subvention accordée par la collectivité,
- Le bien être social,
- La durée de la planification

Ainsi, on maximise la fonction objective qui est ici le bénéfice monétaire net du coût de l'utilisation de l'eau et de l'adoption de la technologie à l'instant  $t$ . Il s'agit de la fonction de production. Le principe de résolution utilisé est celui de pontryagin's.

En fait, l'eau non utilisée par les plantes est souvent perdue à cause d'une percolation en profondeur d'un ruissellement en surface. Cette eau n'est pas récupérable d'après les hypothèses qui ont été développées. Avec des recherches plus approfondies il est démontrable que cette eau peut être prise en considération dans des modèles plus élaborés car il y a la recharge de l'écoulement. Là il faudra encore élaborer des modèles conjoints qui utilisent l'eau souterraine et l'eau de surface à partir des concepts qui évaluent la capture de l'eau qui ruisselle et celle qui percole.

Dans ce modèle on démontre que pour inciter à l'adoption de la technique d'économie d'eau, il faudra prendre en compte une réglementation de la valeur marchande de l'eau. C'est ainsi que toute augmentation du coût unitaire de l'eau pourra décourager les consommateurs qui abusent de son usage. Ce qui entraînera la réduction du niveau de la consommation individuelle par l'utilisation des techniques modernes d'irrigation.

### Les limites de cette théorie

Ce modèle admet des limites dans son application. D'abord il ne peut pas simuler plusieurs choix cultureux. Mais aussi le modèle ne permet pas d'intégrer la recharge de l'eau des nappes avec les pertes par ruissellement ou par percolation.

En fait la prise en compte de la recharge de la nappe n'est pas aisée. Normalement on doit intégrer les effets de pollution des eaux souterraines par des sels minéraux emportés au cours de la percolation. Là encore la solution repose sur le choix de la technique d'irrigation localisée. Ce qui permettra de réduire les pertes par ruissellement de sels minéraux et de garantir une absorption plus efficace de l'eau au pied de la plante. Un autre avantage pour le choix de la technique c'est d'assurer la fertigation.

En conséquence la réorientation des choix cultureux dans ce contexte, doit plutôt tenir compte des besoins des plantes en éléments minéraux.

Pour arriver à la réalisation d'un modèle plus complet, la prise en compte de la politique de taxation sur l'utilisation abusive des intrants chimiques permettrait de réduire les risques d'intoxication des nappes aquifères.

D'autres recherches faites sur Alantéjo envisagent la prise en compte d'autres paramètres qui constituent la limite du premier modèle. Cela concerne l'élaboration des modèles d'irrigation proposés par MIGUEL NETO.

### **1.1.3 - Adoption de la technologie de l'irrigation: une approche multipériodique.**

«Dans une région comme Alentejo (Portugal), avec un climat méditerranéen, la précipitation totale annuelle a une distribution très irrégulière et aussi très basse. Cet événement peut donner lieu à des conditions critiques pour l'agriculture. Face aux impacts de la réforme de la PAC<sup>5</sup> et aux prévisions des prix agricoles pour l'année 2000, nous considérons de très grande importance l'étude de la transition de l'agriculture traditionnelle (système non irrigué) pour une agriculture moderne (système irrigué). Ce travail vise à évaluer la viabilité des investissements en équipement d'irrigation pour différentes combinaisons de capital et coût de l'eau. Un modèle de programmation linéaire multipériode a été utilisé pour décrire les différentes possibilités d'investissement en équipement d'irrigation et aussi les différentes mesures de la réforme de la PAC. Les résultats révèlent l'importance de la reconversion de l'agriculture non irriguée en agriculture irriguée ».(M.NETO et al, 1998).

En effet Alentejo est une région à population essentiellement agricole dont le revenu est basé sur le système de culture en sec: principalement les céréales (blé, orge, avoine) sont cultivés en hiver et le tournesol cultivé au printemps. Avant la politique de la réforme de la PAC, l'agriculteur d'Alentejo pouvait gagner son profit malgré les conditions climatiques car les prix de vente des produits agricoles étaient relativement élevés et loin d'être concurrencés. Mais face à l'ouverture des marchés et aux politiques de nouvelles réformes avec lesquelles les prix des produits agricoles sont fixés par rapport à leur valeur économique mondiale, l'agriculture traditionnelle est devenue une activité la moins rentable.

C'est ainsi que les décideurs ont pensé à améliorer les rendements de ces cultures par une conversion du système traditionnel en système irrigué. Cette stratégie ne pouvait se réaliser qu'avec la création d'un grand barrage prévu pour alimenter un total de 110000 ha. Pour un changement pareil dans les pratiques d'irrigation il a fallu réajuster le système de tarification de l'eau afin de mieux la valoriser et de limiter le gaspillage.

Le but de cette recherche repose sur la modélisation de l'ensemble des exploitations par laquelle on simulera la production des cultures et les décisions d'investissement dans les différentes techniques d'irrigation adaptées aux cultures des céréales.

<sup>5</sup> PAC = Politique Agricole Commune.

Dans un premier temps l'auteur propose un scénario sur la situation présente alors il construit des modèles :

un premier modèle simple avec les cultures en sec et un autre modèle qui simule les choix culturaux et les choix de l'investissement dans les différentes techniques d'irrigation. Puisqu'il s'agit de la modélisation sur les céréales les techniques en aspersion sont les mieux adaptées notamment le Pivot central, le Pivot multi-central, la rampe mobile, le système en aspersion permanent, et le système en aspersion semi-permanent. A priori on peut apprécier le choix d'une technique d'irrigation compte tenu de ces caractéristiques ( son coût à l'investissement, son efficacité technique, sa rentabilité économique) et les avantages associés (les crédits à moyens et long termes).

Pour ressortir la variation des rendements des cultures considérées dès le départ, l'auteur a pris en compte dans son analyse le Calculateur de l'Impact de la l'Erosion sur la Productivité "EPIC" qui a été développé par la **Station de Recherche de Blackland, Temple**. L'EPIC est un modèle mathématique très sophistiqué qui simule l'interaction entre le sol, le climat, la plante, et la gestion de la plante dans la production agricole. Ainsi ce modèle (figure 1) a permis de simuler la croissance de plusieurs espèces en prenant en compte d'une part la nature des sols et les conditions climatiques de la régions considérée, et d'autre part les variables spécifiques aux différentes cultures telles que le plan technologique. Une fois les données et les contraintes entrées, le modèle optimise la production de la culture.

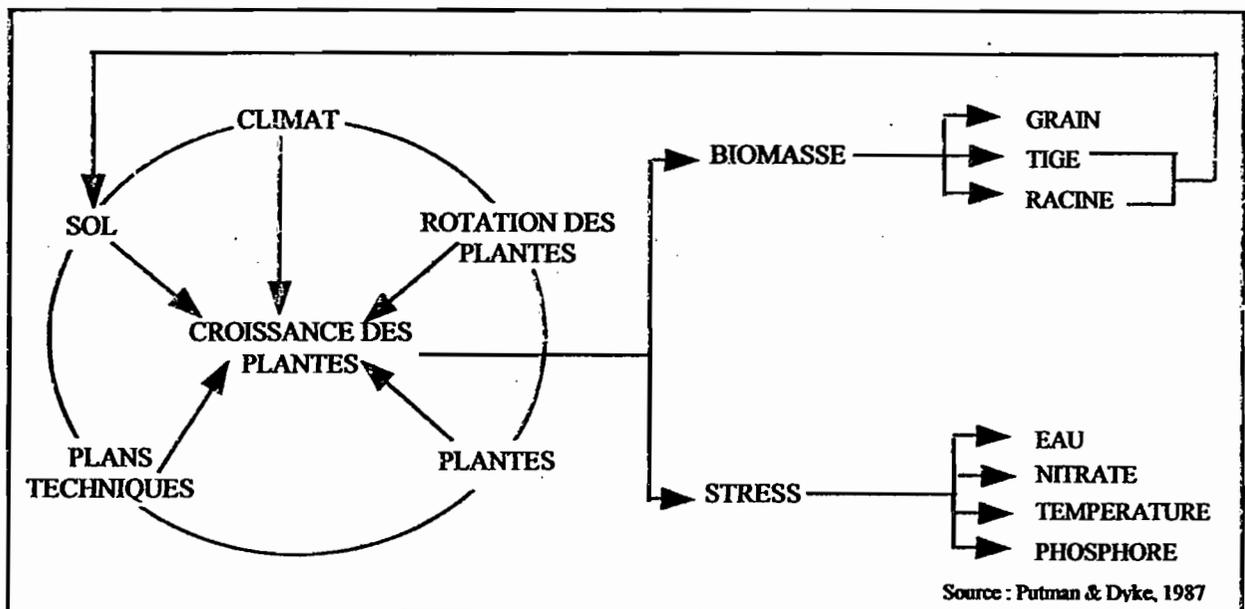


Figure 5 : Modèle d'interaction EPIC

Dans son analyse, l'auteur utilise l'EPIC pour évaluer l'impact de la réduction de l'offre de l'eau sur les rendements des différentes cultures.

Pour rendre les résultats des modèles qui simule le présent plus crédible, il fait une analyse de comparaison avec un scénario qui décrit l'évolution de la situation future du point de vu politique des prix des produits et d'aide à l'investissement dans le contexte de mondialisation.

L'outil d'aide à la décision est alors la programmation linéaire multi-périodique. Ce qui a permis d'apprécier le niveau d'adoption de la technologie moderne dans l'irrigation des céréales.

Il ressort de l'analyse que le Pivot Multi-central a une meilleur relation entre l'investissement et le coût de l'opération d'une part et la reconversion dans les pratiques de la région d'autre part. Cela a été prouvé ces dernières années par l'augmentation des demandes d'installation de cet équipement. L'augmentation du tarif de l'eau peut avoir une conséquence sur le plan de l'aménagement sans toute fois porter atteinte à la décision d'investir en économie de l'eau.

Le modèle complet réalisé sur Alantejo prend en compte plusieurs paramètres (la réforme de la politique des prix, et les impacts de tous les changements physiques), mais il exclu le risque de la chronique des prix sur les rendements qui justifie le comportement d'aversion de certains agents.

#### **1.1.4 - Autres stratégies en irrigué : application de l'uniformité de l'eau dans les parcelles**

L'eau est souvent un facteur qui limite la production agricole dans les périmètres irrigués. Sa gestion est sujette à une influence socio-politique.

En effet, dans le système irrigué certaines habitudes paysannes se manifestent par une mauvaise répartition de l'eau dans les parcelles. Par ailleurs, les projecteurs ou les vulgarisateurs en agriculture conseillent d'utiliser certains paramètres d'irrigation ou d'appliquer certains coefficients d'ajustement. Mais ces conseils ne s'adaptent pas souvent à la réalité observé sur le terrain. En conséquence malgré l'adoption des techniques plus performantes dans l'irrigation on arrive pas à minimiser les pertes.

Le paradoxe c'est qu'en Méditerranée, les politiques d'économie d'eau se concentrent souvent sur le système de tarification de l'eau et fait fie de son mode d'utilisation alors que les usagers maîtrisent très peu ou pas la technicité de l'utilisation de l'eau.

La prise en compte des méthodes de l'application de l'uniformité d'eau d'irrigation dans les parcelles est une mesure pouvant rendre plus efficace la gestion de cette ressource rare. C'est à ce sujet qu'une évaluation à l'américaine a été présentée par Walker<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Walker (chercheur des USA): invité lors du séminaire sur la gestion de l'eau dans le secteur agricole des zones semi- arides, tenu à Zaragosse, mars 1994.

### 1.1.4.1 - Systèmes d'applications de l'eau dans les périmètres irrigués

*(évaluation faite par Walker (1994))*

Plusieurs problèmes d'utilisation des intrants en agriculture se présentent pendant le choix de la méthode et au moment de l'application de l'eau. Malgré le niveau de développement, en Amérique l'irrigation gravitaire occupe 60% de la superficie irriguée. Ce qui paraît contradictoire!

En fait l'efficacité de l'application de l'eau dépend de chaque technique d'irrigation. Mais le plus important c'est d'appliquer une uniformité de répartition de l'eau dans les parcelles. Actuellement il existe 19 définitions d'application de l'uniformité. Un logiciel "SIRMOD" permet d'évaluer l'irrigation de surface, mais son application reste théorique et nécessite beaucoup de mesures sur terrain.

Comme tout autre méthode d'évaluation, les paramètres d'entrée doivent être justes afin d'obtenir une uniformité dans l'irrigation. Le pédologue étudie le comportement de l'eau dans le sol tandis que l'ingénieur étudie la variance des moyennes.

Il est important de savoir (et d'en tenir compte) qu'une opération de changement de système d'irrigation (du gravitaire à l'irrigation localisée par exemple) provoque souvent un choc naturel au niveau de l'absorption de l'eau par plante. Une telle réaction négative de la culture ne peut qu'engendrer une baisse de la productivité.

Les résultats de l'irrigation localisée ne sont satisfaisants qu'avec une certaine profondeur racinaire (de 30 à 40 cm). L'inconvénient de l'application de l'irrigation par aspersion réside dans la perte de l'eau engendrée, surtout pendant la période de vent.

### 1.1.4.2 - Stratégie de conduite

Une mauvaise conduite de l'irrigation pourra détériorer le sol et gaspiller l'eau. L'objectif de chaque agriculteur est de gagner le maximum de bénéfice. La production réduite pendant plusieurs années successives entraînera l'abandon de la propriété.

Après des périodes de sécheresse successives la production diminue. Pour cela il faut préparer des stratégies afin d'utiliser le peu d'eau qui existe.

L'eau est un facteur limitant de l'agriculture des zones semi-arides, pour bien la gérer plusieurs facteurs doivent être étudiés: l'efficacité de l'évapotranspiration et de la production de la biomasse, la fonction de la récolte, la minimisation des pertes d'eau par évapotranspiration.

*Ci - dessous les recommandations à faire à un exploitant :*

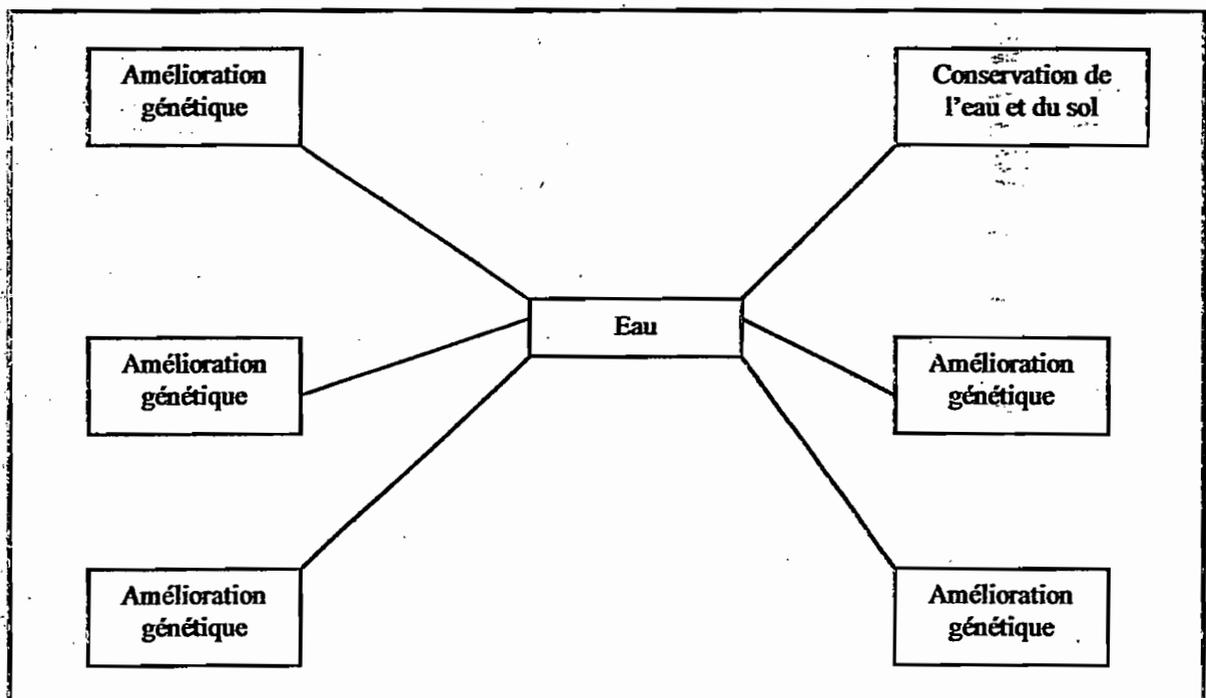
- éviter les mauvaises herbes et faire un assolement adéquat ;

- avancer la date de semis des cultures ;
- maintenir une couverture du sol avec le reste des cultures précédentes ;
- choisir des cultures à cycle court ;
- améliorer la génétique des semences ;
- maximiser l'eau disponible dans le sol par un bon assolement; et
- maximiser la biomasse en minimisant l'évapotranspiration.

La stratégie optimale repose sur l'efficacité de l'eau. Pour avoir de bons résultats dans les cultures en irrigué il est important de définir un ensemble d'éléments sol - plante- atmosphère - agents pathogènes - insectes - mauvaises herbes.

« Comment alors économiser le peu d'eau dont on dispose ? » Plusieurs facteurs de même que les interactions entre ces facteurs sont à étudier. Ainsi, les paramètres doivent être bien choisis afin d'arriver aux meilleurs résultats. A titre d'illustration nous présenterons un modèle<sup>26</sup> de simulation que voici:

Figure 6 : Modèle de simulation d'économie d'eau



<sup>2</sup> Modèle de simulation réalisé par Dahman Rachid dans le cadre d'un thème de recherche réalisé par l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II du MAROC et présenté lors du Séminaire de Zaragoza, mars 1994

## **1.1.5 - Les travaux récents en économie de l'eau en Tunisie**

### **1.1.5.1 - L'estimation de la rente économique de l'eau dans les Périmètres Publiques Irrigués de Chebikha**

En vu d'encourager l'agriculture en irrigué et pour lui permettre de s'adapter à des situations de pénurie d'eau, l'Etat tunisien a déployé un grand effort dans la mobilisation et l'exploitation des ressources hydrauliques. En plus pour améliorer le revenu des agriculteurs, il a subventionné l'eau d'irrigation par l'adoption d'une tarification qui ne tient pas compte des coûts d'investissement et de renouvellement.

Cette stratégie de tarification ne permet pas de recouvrir largement les coûts dans un futur proche. Aussi les ressources hydrauliques atteindront leur limite avec la demande en eau qui dépassera l'offre. Devant ce défi, La politique agricole tunisienne opte pour une élimination graduelle des subventions allouées à l'eau d'irrigation. Ainsi, les tarifs de l'eau connaîtront une augmentation régulière de 15% par an.

Face à cette situation l'auteur s'est beaucoup intéressé au comportement des agriculteurs vis à vis de la tarification de l'eau en vu d'apprécier leur capacité à payer les redevances actuelles et futures.

En effet le travail concerne la détermination de la rente économique (RE) suivant la formule:

$$\underline{RE = RG - CP}$$

Avec :

- RE = Rente économique
- RG = Recette globale
- CP = Coût de production - Coût de l'eau

L'estimation de la rente économique sur les différentes exploitations de Chébika a permis d'arriver à la construction de différents scénarios d'évolution de ces exploitations.

Il ressort de cette analyse que les exploitants ayant de faibles revenus, ne pourront pas supporter l'augmentation des tarifs. Alors que les gros exploitants qui savent mieux valoriser l'eau avec des revenus assez importants pourront bien supporter l'augmentation des prix.(M.KEFI,1999)

Concernant la même région une étude plus complète a été faite sur les Périmètres Irrigués Privés.

### **1.1.5.2 - Simulation de l'évolution des exploitations des périmètres irrigués de Awamria**

C'est une étude qui a porté essentiellement sur l'identification des stratégies des irriguants privés confrontés à une pénurie d'eau, l'impact des différents choix stratégiques sur l'évolution des résultats économiques des exploitations puis l'évaluation de ces choix sur la base des résultats obtenus.

Ainsi le PIP de Awanmria a servi d'exemple pour faire l'analyse. En effet à Awanmria les agriculteurs irriguent à partir des puits de surface qui courent le risque d'une pénurie d'eau suite à la baisse continue de la nappe. Partant des hypothèses de stratégies observables sur le terrain (Creusage ou approfondissement du puits, adoption d'une technique d'économie d'eau et la réduction des superficies des cultures irriguées), la simulation des décisions des exploitants de la région par un simulateur d'entreprise (QUO VADIS) a permis de tirer des conclusions.

Une comparaison de l'évolution des résultats économiques des exploitations simulées, entre la situation actuelle et celle projetée, en tenant compte ou pas du risque (variabilité inter-annuelle des résultats) a permis de déduire que l'économie d'eau serait le choix le plus idéal à faire. Toutefois, un appui technique aux irriguants s'avère nécessaire pour pallier au risque technique lié à l'installation d'un système d'économie d'eau, et par voie de conséquence, pour inciter les irriguants à s'orienter, d'avantage, vers ce choix. (N.Benamouda, 1996).

### **1.1.6 - Conclusion**

Les démarches que nous avons cités ci dessus constituent des approches de solutions autour du même problème : l'utilisation efficace de l'eau. Dans l'absolu, il n'existe pas de méthode figée. C'est l'adaptation de la théorie à la réalité qui fait l'efficacité de tout concept.

Pour l'accomplissement du travail propre à nous, nous pouvons nous inspirer de toutes ces méthodes. Mais compte tenu de notre objectif de départ et de certaines particularités du terrain, on se propose d'adopter la démarche la plus simple et la plus évidentes : la programmation linéaire des modèles à concevoir.

## CHAPITRE 2 : LA METHODOLOGIE

### 2.1 - Typologie des exploitations Agricoles de MELALSA

#### 2.1.1 - Objectifs et concept théorique

Il est certain qu'il existe une diversité des exploitations agricoles sur plusieurs niveaux. Bachta et bien d'autres chercheurs ont montré à travers des études de cas, que la réalité du monde agricole et rurale n'est pas homogène et se caractérise par une diversité assez pertinente. En fait, elle est reconnue au niveau des comportements, des situations et des projets des exploitants. Elle se reflète par voie de conséquence, par une diversité des stratégies adoptées par les agriculteurs (*Deffontaines J.P. et Petit M., 1985*).

Pour appréhender cette diversité, l'outil le plus efficacement utilisé est la typologie qui consiste à identifier des types d'exploitations et de les classer. Nous recherchons de cette typologie plusieurs objectifs:

- ◆ fournir une représentation simplifiée du système étudié composé des exploitations agricoles dont la complexité est impossible à modifier d'un point de vu pratique,
- ◆ comprendre le fonctionnement des exploitations agricoles et formaliser la diversité des comportements observés sur celles-ci, en particulier vis-à-vis de la gestion de l'eau,
- ◆ préparer et faciliter l'étape suivante de modélisation des exploitations.

Cette typologie permet de regrouper les exploitations dont les stratégies et les moyens de production sont homogènes. Ceci conduit ainsi à ramener la multiplicité des cas, qui ne pourraient être modélisés individuellement, à un nombre réduit de types plus faciles à étudier, caractérisés par leurs stratégies de production et d'utilisation de l'eau. La construction de la typologie des exploitations s'appuie sur les hypothèses émises par Sébillote (*1983*), concernant les décisions des agriculteurs.

Les choix stratégiques relatifs au système de production résultent d'une confrontation des objectifs généraux définis par la famille, avec les caractéristiques de l'appareil de production et de l'environnement économique dans lequel l'agriculteur se situe. Les stratégies des agriculteurs sont mises en évidence en confrontant leurs pratiques, leurs structures de production et leurs projets.

En fait la typologie est conçue dans un objectif de modélisation d'où la prise en compte des contraintes spécifiques à l'écriture des modèles. Il s'agit en particulier de minimiser les biais d'agrégation pouvant apparaître lors de l'étape de modélisation. Mais ces contraintes de modélisation ne doivent pas nuire à la cohérence de fonctionnement et de stratégie des divers types observés (*S.Morardet, 1999*).

## 2.1.2 - Présentation de la démarche typologique

### L'élaboration de la typologie repose sur les principes suivants :

- une enquête exhaustive auprès de toutes les exploitations présentes sur le périmètre d'étude,
- une analyse détaillée des pratiques des agriculteurs, qui permet d'identifier et d'explicitier leurs différentes stratégies de production, cette analyse conduisant à l'élaboration d'une typologie des pratiques agricoles,
- la construction d'une typologie des exploitations à partir du croisement des données relatives aux structures de l'appareil de production, aux pratiques agricoles observées sur chaque exploitation et aux objectifs à moyen terme des agriculteurs,
- la recherche d'un compromis entre les contraintes de modélisation (un modèle à élaborer par type) et une représentation suffisamment précise de la diversité observée.

## 2.1.3 - Les étapes de construction de la typologie du PIP de Melalsa

### 2.1.3.1 - La collecte des données

L'acquisition de l'information sur les exploitations se caractérise par les éléments spécifiques au *territoire* sur lequel l'enquête est faite, le *protocole* de déroulement de l'enquête et la *nature* des informations collectées.

#### a - Le déroulement des enquêtes

Nous avons procédé en deux étapes pour collecter les informations nécessaires : en premier lieu une série d'*enquêtes simplifiées* sur tous les agriculteurs de chaque GIC. Ainsi, nous avons construit une typologie qui satisfait à nos attentes. En dernier lieu nous avons effectué, une autre série d'*enquêtes approfondies* mais sur quelques échantillons de chaque type, cette dernière a porté essentiellement sur les données socio-économiques et sur les détails qui n'avaient pas été pris en compte.

### b - Le questionnaire d'enquête

L'enquête simplifiée effectuée sur le périmètre irrigué de Melalsa<sup>7</sup> s'intéresse surtout aux :

- ⇒ caractéristiques générales des exploitations (identification de l'exploitation, la composition de la famille, la stratégie du revenu et la force de travail, la superficie exploitée).
- ⇒ les équipements hydrauliques (puits/forage, matériel de pompage, niveau de prélèvement).
- ⇒ l'inventaire du cheptel vif (nombre de tête bovine ou ovine).
- ⇒ l'emplacement de la parcelle (dans le GIC ou hors du GIC) et les différents assolements pratiqués.
- ⇒ le mode de faire valoir (faire valoir direct ou indirect : les parcelles données en location ou prises en location et quelles sont les raisons).
- ⇒ le système de rotation des cultures observé.
- ⇒ les itinéraires techniques.
- ⇒ la méthode de conduite de l'irrigation en situation normale ou en situation de tension.
- ⇒ la gestion collective de l'irrigation.
- ⇒ les stratégies et les projets.
- ⇒ la productivité des cultures pratiquées (rendement en bonne saison et rendement mauvaise saison).

Pour compléter l'information recueillie auprès des exploitants, et dans le souci d'arriver à une analyse cohérente et vraisemblable, quelques entretiens ont été effectués avec les responsables de CRDA de Kairouan.

#### **2.1.3.2 - Le traitement des données collectées**

Les données regroupées sous forme d'un tableau nous présentent deux catégories de variables :

les variables qualitatives et les variables quantitatives.

Les variables qualitatives nous permettent de savoir si l'exploitant a une autre source de revenu à part l'agriculture; est-ce qu'il donne ou il prend en location ; dispose-t-il d'un puits (dans le GIC ou hors de du GIC)?

<sup>7</sup> voir annexe n°1: la fiche d'enquête simplifiée sur les GIC de Melalsa de Mars - Avril 2000

## 2.1.4 - La construction de la typologie des exploitations

Notre typologie a été construite sur la base des critères de structure et des critères fonctionnels de l'exploitation. Etant donné que nos variables quantitatives ne sont que trois (superficie, main d'œuvre familial, débit moyen de pompage), nous avons jugé moins important de faire l'analyse de la corrélation entre les variables quantitatives. Nous avons plutôt pensé à une Analyse Factorielle de correspondance qui nous permettrait de regrouper les différentes observations en plusieurs types sur la base des variables qualitatives que nous disposons (activités en GIC et activités hors GIC). Mais l'appréciation de nos variables pour l'analyse à faire nous oblige à opter directement pour une typologie simple suivant les qualités : (présence ou non de puits en GIC ou hors GIC, la taille de l'exploitation, le niveau de débit de pompage, présence ou non de cultures maraîchères).

Ainsi nous sommes arrivés à identifier cinq types d'exploitations existantes : (voir annexe I)

### □ type 1 :

Correspond aux petits exploitants qui n'ont pas puits donc qui achètent l'eau du GIC à son prix réel (70 millimes le m<sup>3</sup>). En fait ce sont des individus mal placés et/ou qui n'ont pas d'emploi extérieur et/ou qui n'exploitent généralement qu'une parcelle < 5 ha. Ils sont connus du type d'exploitants très averse au risque autrement ne prennent pas souvent le risque de faire beaucoup de maraîchage. Ce type comporte 17 exploitants dont les n° 11, 14, 15, 17, 26, 27, 30, 35, 37, 38, 40, 42, 47, 71, 43, 46, 282.

### □ type 2 :

Correspond aux grands exploitants mais qui n'ont pas de puits. Mais il s'agit des exploitants qui sont peu averse au risque par la taille de leurs exploitations. Tout comme le type 1, les exploitants achètent l'eau à 70 millimes auprès du GIC. On compte pour ce type 14 agriculteurs dont les n° 1, 2, 5, 18, 19, 21, 24, 31, 32, 33, 34, 55, 200, 281.

### □ type 3 :

Correspond aux exploitants qui disposent de puits en privé ( hors du GIC) dont le prix du m<sup>3</sup> d'eau correspond au coût de l'exhaure du m<sup>3</sup> (20 millimes le m<sup>3</sup>). Les éléments de ce type sont au nombre de 12. Il s'agit des exploitants n° 3, 8, 12, 20, 22, 23, 25, 39, 48, 50, 51, 52.

### □ type 4 :

Correspond aux exploitants qui disposent de puits seulement qu'en GIC. Pour ces derniers, la consommation de l'eau ne coûte que 20 millimes le mètre cube (coût d'exhaure de l'eau). Ce type regroupe les identifiants n° 4, 10, 16, 41, 561. Soit au total 5 exploitants.

□ type 5 :

Correspond aux exploitants qui ont les puits en GIC et hors GIC. Le prix de l'eau équivaut également au coût du pompage de cette eau. Là également on identifie 6 exploitants dont les n° 6, 9, 36, 44, 45, 130.

**Tableau 12: Caractéristiques des exploitations types (calcul des variables structurelles moyennes).**

Valeurs moyennes par type	surface totale (ha)	surface exploitée en GIC (ha)	surface exploitée hors GIC (ha)	main d'œuvre familiale MO (j)	surface totale /MO (ha/j)	débit moyen parcelles
Type1	3.11	1.59	1.53	1.7	2.33	23.42
Type2	9.95	3.58	6.36	2.18	6.49	24.78
Type3	12.08	3.42	8.67	2.42	7.75	24.24
Type4	9.37	4.5	6.3	1.6	5.44	22.38
Type5	10.91	2.83	8.08	2.67	5.97	22.75

Source : nos calculs à partir des enquêtes.

Notons que :

- En dehors du type 1, tous les autres types sont des exploitations à grande échelle (surface totale > 9 ha). Cela est très important pour notre analyse. En effet il existe une corrélation positive entre les sources en eau disponibles et la grandeur de l'exploitation. Le cas particulier est le type 2 où, l'exploitation est considérable mais sans source d'eau. C'est pour cette raison que nous le qualifions de type non-averse au risque.
- La valeur de l'eau est estimée à 70 Millimes le m<sup>3</sup> si elle provient de GIC et à 20 millimes si elle provient des puits individuels. En effet un exploitant qui dispose d'un puits privé peut adhérer au GIC et ne pas consommer l'eau du GIC car c'est plus coûteux. La prise en compte du coût de l'eau suivant la typologie s'observe dans le tableau n°13

**Tableau 13 : Coût de l'eau en DT/m<sup>3</sup> pour chaque type d'exploitation**

GROUPE	Parcelles dans le GIC		Parcelles hors du GIC	
	Possède un puits	Coût en DT/m <sup>3</sup>	Possède un puits	Coût en DT/m <sup>3</sup>
Type1&2	<b>Non</b>	<b>0.07</b>	<b>Non</b>	<b>Impossible</b>
Type3	<b>Non</b>	<b>0.07</b>	<b>Oui</b>	<b>0.02</b>
Type4	<b>Oui</b>	<b>0.02</b>	<b>Non</b>	<b>Impossible</b>
Type5	<b>Oui</b>	<b>0.02</b>	<b>Oui</b>	<b>0.02</b>

source, nos calculs à partir des données enquêtes.

## ***2.2 - Modélisation à adopter pour les exploitations agricoles de Melalsa***

L'objectif de cette étape est de fournir une représentation pertinente du comportement des agriculteurs face à l'irrigation afin de construire un outils de simulation permettant d'évaluer les conséquences de différents scénarios d'évolution de l'environnement économique des exploitations et d'aménagements hydro-agricole, en termes de production agricole (volumes et localisation) et demande en eau.

### **2.2.1 - Définition d'un modèle en économie**

Les modèles que nous utilisons sont des modèles de programmation linéaire. Par définition, un programme linéaire permet de calculer l'optimum (maximum ou minimum) d'une fonction objectif en respectant un système de contraintes, la fonction objectif et chacune des contraintes s'expriment linéairement en fonction des **variables décisionnelles** (dans notre cas la *superficie en hectare de chaque culture*). La justification de ce choix découle directement de nos hypothèses sur le fonctionnement des exploitations agricoles.

Les agriculteurs prennent leurs décisions de production et d'investissement dans un univers risqué. Parmi les multiples sources de risque en agriculture, les aléas climatiques occupent une place importante. L'un des objectifs de l'irrigation étant de limiter ces risques climatiques, en régularisant les apports d'eau aux plantes, il nous semble nécessaire de prendre en compte ces critères dans la formalisation du comportement des agriculteurs face à l'opportunité d'irriguer. Pour la commodité de l'exposé, nous présenterons dans un premier temps la formalisation des modèles déterministes en suite celle des modèles avec risque.

Dans ce chapitre nous définirons les éléments qui composent tout modèle (fonction objectif, activités, et contraintes), puis nous présenterons les différentes étapes de modélisation, les aspects spécifiquement liés à la prise en compte du risque et enfin les résultats que l'on peut tirer des modèles et leur interprétation.

### **2.2.2 - Les éléments d'un modèle en économie**

La formalisation des modèles économiques d'offre agricole nécessite avant tout de bien identifier le système sur lequel porte les modèles (les productions et les limitations auxquelles sont confrontées les agriculteurs), ainsi que la nature des problèmes à résoudre à l'aide de la modélisation (les objectifs de l'agriculteur et les variables sur lesquelles il peut agir).

Classiquement en théorie de la production, le producteur (ici l'agriculteur) maximise une fonction d'utilité  $U(X, B)$  sous la contrainte  $f(X, B) = 0$ , où  $U$  représente les préférences de l'agriculteur et  $f$  est la fonction de production représentant l'ensemble des relations techniques

qui font correspondre un volume possible de production X à un ensemble de facteurs de production (ou ressource) B.

Un tel modèle comporte donc trois éléments essentiels : une fonction d'utilité, qui tient lieu ici de la **fonction objectif** à optimiser, un **vecteur de production ou d'activités X**, et un ensemble de relations (**contraintes et liaisons**) liant le vecteur d'activités X au vecteur de ressources B. Dans le cas des modèles de programmation linéaire que nous utilisons, ces relations sont exprimées sous forme d'inéquations linéaires.

### 2.2.2.1 - La fonction objectif

La fonction objectif traduit les buts poursuivis par les agriculteurs dans leur activité de production. Dans le cas le plus général, la fonction objectif retenue est la maximisation de l'utilité procurée par le revenu agricole, souvent assimilée au revenu lui-même. Cependant lorsque les scénarios économiques testés n'entraînent pas de modifications des structures de production (charges de structures constantes), la Maximisation du revenu agricole est équivalente à celle de la marge globale de l'exploitation.

La marge brute s'écrit:

#### Equation 1

$$MBT = \sum_{j=1}^n (r_j \cdot p_j - cv_j) * x_j$$

avec

- $r_j$  : productivité unitaire de l'activité j (rendement d'une culture ou élevage),
- $p_j$  : prix unitaire de vente du produit de l'activité j,
- $cv_j$  : charges variables de l'activité j,
- $x_j$  : niveau de l'activité j calculé par le programme,

**Les charges variables** : nous les calculons à partir de la somme des produits consommés par les activités (achat de semence, des fertilisants, des produits de traitement et de l'eau, le coût de la location du tracteur, de la terre et de la main d'œuvre).

**Les activités** : généralement on distingue plusieurs types d'activité au sein de l'exploitation : les activités de production, les activités d'achat ou de location de facteurs de production (la terre, la main d'œuvre, les équipements de mécanisation, etc.) et les activités de vente (vente des matériels et des outputs sur pied ou sur le marché, etc.). Dans cette analyse nous prendrons en compte uniquement l'activité dominante : la **production végétale**.

#### La production végétale à Melalsa:

En fait, on distingue à Melalsa plusieurs variétés de production telles que les grandes cultures (blé tendre, blé dur, orge, fève, etc.), la culture maraîchère (pastèque et/ou melon, tomate, piment, etc.), un peu d'arboriculture (olivier, amandier, etc.) et des cultures fourragères (orge, avoine/vesce, etc.).

En effet à Melalsa le fourrage rentre dans la consommation du bétail donc il est utilisé comme produit intermédiaire.

Il y a aussi la production animale mais elle très peu représentée par la présence des ovins et de quelques têtes bovines.

Pour simplifier l'écriture de notre modèle et faciliter l'interprétation de nos résultats, nous allons considérer seulement 4 principales variétés cultivées et distinctes par leur stade végétatif, et leur besoin en intrants. Il s'agit du Blé tendre, de la Fève, de la Pastèque, et de l'Olivier.

**N B** : Dans les calculs des Charges Variables nous prendront en considération la quantité des inputs consommés à l'hectare tels que les fertilisants (ammonite 33%, phosphate 45%, DAP, Potasse, Fumier), le coût à l'hectare des pesticides, le travail familial, la main d'œuvre spécialisée, la mécanisation (le nombre d'heures de traction mécanique et animale nécessaire pour le labour, le désherbage et la récolte ) puis le besoin en eau. (Voir tableau n°14).

### 2.2.2.2 - Les contraintes

On désigne sous le nom de "contraintes" tous les facteurs qui interviennent dans la production et qui déterminent le niveau de cette production.

Dans notre cas, les contraintes prises en compte pour l'élaboration de notre modèle de base sont celles qui ont été identifiées lors de l'enquête exhaustive (approfondie) des exploitations de Melalsa. Elles définissent en fait le domaine de réalisation du modèle. Elles traduisent donc:

⇒ *le caractère limité de certains facteurs de production (les ressources des exploitations):*

disponibilités en terres de potentialités agronomiques différentes, ressources en main d'œuvre permanente à différentes périodes, surface irrigable, équipement, eau d'irrigation...

#### ◆ contraintes en terres:

On écrit que la somme des besoins des cultures en terres d'une certaine catégorie doit être inférieur à la surface disponible en terres de cette catégorie. Soit :

#### Equation 2

$$\sum_j S_j \leq ST$$

avec

$S_j$  : surface de la culture j et,  
 $ST$  : surface totale.

◆ contraintes de main d'œuvre:

On peut distinguer plusieurs périodes pour tenir compte des pointes de travail. Le découpage en périodes relève le plus souvent de la confrontation des calendriers de travaux des différentes activités et de l'expertise. Il n'est pas nécessaire que les périodes retenues dans les modèles couvrent la totalité de la campagne agricole. En effet seule nous intéressent les périodes de travaux où la main d'œuvre disponible risque d'être saturée.

Pour chaque période, on écrit que la somme des besoins en main d'œuvre des différentes activités doit être inférieure aux disponibilités en main d'œuvre de la période. Soit :

**Equation 3**

$$\sum_j MO_{jt} \leq MOT_t$$

avec

- $MO_{jt}$  besoins en main d'œuvre de l'activité j pour la période t ; et
- $MO_t$  en main d'œuvre disponible pour la période t

Ainsi nous avons considéré les mois de Mars et Juin comme les mois les plus saturée en main d'œuvre car en Mars il y a plusieurs cultures à la fois alors qu'en début de Juin la récolte de blé vient bousculer les activités de la pastèque et du melon dont la récolte se fait vers fin Juin.

⇒ *les contraintes qui résultent des modes de fonctionnement technique adoptés par les agriculteurs:*

◆ Contraintes agronomiques:

Parmi celles-ci, on distingue généralement trois types (Boussard, 1970):

- la restriction de fréquence, qui interdit le retour d'une culture sur une même parcelle durant un certain nombre d'années (contrainte d'assolement),
- la restriction de succession, qui interdit l'installation de telle culture après telle autre, et corrélativement limite l'effet bénéfique de certaines cultures sur les rendements des suivantes (effet précédent cultural qui détermine la contrainte en rotation)

Dans ces deux contraintes, on traduit une limitation temporelle (alternance des cultures sur une même parcelle), par une limitation spatiale.

En effet, D'après nos observations, nous avons considéré:

⇒ dans un premier temps que la pastèque ne peut revenir sur la même parcelle que tous les deux ans; ce que nous traduisons par l'équation suivante :

**Equation 4**

$$PASTEQUE \leq 0.5.(BLE + FEVE + PASTEQUE + OLIVIER)$$

⇒ dans un autre sens nous avons tenu compte du fait que la pastèque précède toujours la fève dans la rotation des cultures. On écrit alors:

**Equation 5**

$$PASTEQUE - FEVE \leq 0$$

⇒ *la contrainte de sécurité:*

une bonne partie de la production de la plupart des agriculteurs de Melalsa est utilisée pour l'autoconsommation. Par mesure de sécurité l'agriculteur choisit toujours de faire du blé sur au moins 1/3 de la superficie. La prise en compte de cette contrainte se traduit comme suit:

**Equation 6**

$$BLE \geq \frac{1}{3}(BLE + FEVE + PASTEQUE + OLIVIER)$$

- Contraintes d'eau :

A Melalsa le problème majeur est celui de la disponibilité de l'eau. Ce problème est beaucoup plus pertinent quand on irrigue ses parcelles avec l'eau de GIC. Ceci à cause du tour d'eau parfois très long dans les moments difficiles (15 jours) et la main d'eau qui est très limitée à 20 m<sup>3</sup>/h. Pour ceux qui disposent de puits, le problème est moindre car il y a de l'eau en permanence. Le seul risque qu'on peut courir dans ce cas c'est de voir l'eau de son puits tarir, ce qui n'est pas très fréquent. Ou si c'est le cas il y a la possibilité d'approfondir le puits ou d'en creuser d'autres. Une fois qu'on réalise de gros revenus, il est très important de prendre en compte cette contrainte dans notre modèle de base. Elle se traduit par l'équation suivante:

**Equation 7**

$$\sum_j Be_{jt} \leq APPORT_t$$

Avec :

- $Be_{jt}$  est le besoin en eau de la culture  $j$  durant la période  $t$ , et
- $APPORT_t$  : la quantité de l'eau à apporter à la parcelle durant la période  $t$

- Contraintes de trésorerie:

La prise en compte de la contrainte de trésorerie nous permettra de voir si l'exploitant dispose des moyens nécessaires pour supporter les charges durant la campagne. Puisqu'il s'agit généralement des petites exploitations, nous allons introduire cette contrainte que dans les modèles d'investissement en économie d'eau. On traduit cette contrainte par l'équation suivante :

**Equation 8**

$$\sum_j CV_{ji} \leq \text{Somme Disponible dans la Caisse}$$

$CV_{ji}$  = Charges d'investissement dans les différentes activités.

### 2.2.3 - Formalisation mathématique d'un modèle déterministe

La formalisation primal d'un modèle de programmation linéaire s'écrit:

**Equation 9**

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sous les contraintes

**Equation 10**

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$$

avec

$i= 1$  à  $m$  intrants

$j= 1$  à  $n$  activités et  $x_j \geq 0$

Cette écriture peut être reprise sous forme matricielle:

Max.  $CX$  sous les contraintes

**Equation 11**

$$AX \leq B \quad \text{et} \quad X \geq 0$$

Sachant que:

- $X = [x_j]$  est le vecteur d'activités, où  $x_j$  est le niveau de l'activité  $j$
- $A = [a_{ij}]$  est la matrice des coefficients technologiques, où  $a_{ij}$  est la quantité de ressource  $i$  nécessaire pour produire une unité d'activité  $j$ ,

- $B = [b_i]$  est le vecteur des ressources, où  $b_i$  est la quantité de ressource  $i$  disponible
- $C = [c_j]$  est le vecteur des marges, où  $c_j$  est la marge unitaire de l'activité  $j$ .

La mise en œuvre d'un tel programme implique de respecter un certain nombre d'hypothèses de base qui lui sont implicites et qui décrivent la nature du processus de production, des ressources et des activités.

**\* Hypothèses de programmation linéaire:**

**Optimisation** : L'intérêt c'est soit la maximisation des l'objectifs positifs (profit ou marge brute) soit la minimisation des objectifs négatifs (les coûts de production). En théorie économique le premier modèle est dit primal et le second modèle est dit dual. Dans le cas de Malelsa il s'agit de maximiser la Marge Brute.

**Linéarité** : c'est à dire le respect des conditions de proportionnalité entre les variables d'entrée (vecteur B) et les variables de sortie (vecteur X).

**Déterminisme** : la matrice technologique A, le vecteur C des marges unitaires et le vecteur B des ressources sont considérés comme fixes et connus avec certitude. En pratique, ils représentent des valeurs moyennes pour l'ensemble des exploitations du type modélisé.

**Fixité** : à la rigueur une contrainte doit avoir un coefficient du second membre non négatif (= RHS : Right Hand Side).

**Continuité** : c'est à dire la divisibilité des éléments du vecteur ressource B à utiliser et du vecteur activité X produisant les quantités positives. En effet ces éléments doivent être des unités positives fractionnelles.

**Homogénéité** : toutes les unités de ces mêmes ressources et activités sont identiques.

**Additivité** : les activités doivent être additives dans ce sens que si 2 ou plusieurs sont utilisées, leur produit total est la somme de leur produit individuel. Autrement, l'effet d'interaction entre les activités ne sont pas permis.

(Hazell P. & Norton R., 1986)

## 2.2.4 - Outils de résolution

Plusieurs logiciels de gestion et d'analyse économique sont disponibles sur le marché : il y a le QUO VADIS, le MLP, LINDO, le solveur d'EXCEL, GAMS etc. Les différences qui existent entre ces logiciels sont : leur coût d'acquisition et leur performance.

Comme outil de résolution, nous avons opté pour le GAMS (General Algebraic Modelling System).

### Pour quoi l'usage de GAMS dans notre travail?

GAMS est l'un des logiciels les plus facilement accessibles. Il est très connu et utilisé par de très grandes sociétés (la Banque Mondiale par exemple). C'est un outil très performant dans la programmation linéaire ou non linéaire. A la différence avec LINDO souvent limité du point de vue taille et QUO VADIS comme outils de gestion des entreprises décrivant de simples combinaisons, GAMS nous permet d'avoir des solutions quel que soit la taille et la nature de la relation entre les variables endogènes et exogènes.

La simplicité de ce logiciel permet de formuler les modèles en forme d'équations algébriques en mettant en relation les différentes variables ou coefficients techniques qu'on introduit auparavant sous forme de tableaux ou de vecteurs. De cette manière, chaque équation générique représente une multitude d'équations réelles dans le modèle. Ceci facilite la tâche de contrôle de la logique dans chaque équation générique. Un autre avantage réside dans le fait que toutes les données utilisées pour la construction du modèle, sont introduites de manière désagrégée et le calcul de coefficients qui seront utilisés dans les équations est réalisé par GAMS. Le contrôle de variables et d'éventuelles erreurs de saisie est simple et la modification de valeurs implique un nouveau calcul automatique des coefficients, ce qui évite des erreurs. En plus, il permet de mieux organiser les fichiers de sortie ; ce qui a pour conséquence de faciliter leur récupération et leur présentation avec d'autres logiciels. De même, il permet l'utilisation postérieure de ces fichiers dans le cadre de différentes simulations.



Les prix des outputs sont les prix de 1998 observés dans le marché de gros de Kairouan. Souvent ces prix sont très variables dans la même année, le plus intéressant c'est de faire la moyenne annuelle.

### **b - Les types**

Dans la typologie nous avons présenté 5 types d'exploitants qui se distinguent par leurs activités, la dotation et l'utilisation de leurs ressources. Dans ce qui suit nous présenterons, pour chacun de ces types, les coefficients techniques et les contraintes.

On distingue les coefficients de la fonction objective et ceux des contraintes :

Les coefficients de la fonction objective déterminent le niveau de contribution de chaque activité dans la fonction objective. Ils sont comptés positifs (+) lorsqu'il s'agit des revenus des activités (offre de produit), négatifs (-) dans le cas des coûts (demande de produit). L'ensemble de ces coefficients forment un vecteur de Revenu dans la programmation linéaire.

Les coefficients des contraintes permettent de préciser le niveau d'utilisation des ressources dans une exploitation. Ils sont pris positifs (+) pour l'offre des ressources disponibles et négatifs (-) pour la demande des ressources. Ces coefficients se présentent dans la programmation linéaire sous forme d'une matrice  $[i,j]$  (où  $i$  est le nombre d'activités et  $j$  le nombre de contraintes).

Le niveau des ressources se traduit par la limitation des contraintes sous forme d'un vecteur placé au second membre (RHS) du programme linéaire.

### **c - Les données du modèle de base sont présentées sous forme de tableau de**

#### **programmation linéaire voir (Annexes IIA, IIB, IIC, IID, IIE)**

#### **2.3.1.1.2 - Le Modèle**

##### **a - La fonction objectif**

La fonction objectif se présente sous la forme suivante :

##### **Equation 12**

$$Z = MBT = \sum_{i=1}^n (r_i p_i - cv_i) x_i - LTER_p - LMO_i$$

Avec :

- $r_i p_i$  : la production par hectare des cultures  $i$  observées,
- $cv_i$  : le coût des intrants de ces différentes cultures,
- $x_i$  : la superficie cultivée pour chaque activité,

- $LTER_p$  : le coût total de la location de la terre dans la parcelle p (p étant en GIC ou hors du GIC),
- $LMO_t$  c'est le coût total de la location de la main d'œuvre dans le mois t (t étant le mois de MARS et JUIN).

### b - Les équations

On fait la maximisation de la fonction objectif sous des contraintes observées selon la formalisation:

#### Équation 13

$$MAX Z = MBT = \sum_{j=1}^n MB_j * X_j$$

S/C

$$a_{kj} X_j \leq RE_j \quad \text{et} \quad a'_{kj} \geq RE'_j$$

L'indice j représente les activités telles que définies ci-après :

- BGIC : la culture du Blé en GIC,
- FGIC : la culture de la Fève en GIC,
- PGIC : la culture de la Pastèque en GIC,
- OGIC : la culture de l'Olivier en GIC,
- BSHGIC : la culture du Blé en Sec Hors du GIC,
- BHGIC : la culture du Blé hors du GIC,
- FHGIC : la culture de la Fève hors du GIC,
- PHGIC : la culture de la Pastèque hors du GIC,
- OSHGIC : la culture de l'Olivier hors Sec Hors du GIC,
- OGIC : la culture de l'Olivier hors GIC,
- LTGIC : la location de la Terre au sein du GIC,
- LTHGIC : la location de la Terre hors du GIC,
- LMOJN : la location de la Main d'œuvre en Juin,
- LMOMS : la location de la main d'œuvré en Mars.

$X(j)$  est la variable décisionnelle qui correspond au niveau d'intensité des activités

### c - Les contraintes

$RE_j$  désigne les limites des ressources, définies comme suit :

- SGIC : la surface (ha) cultivée en GIC,
- SHGIC : la surface (ha) cultivée hors du GIC,
- MOJN : la disponibilité (j) de la Main d'œuvre en Juin,
- MOMS : la disponibilité (j) de la Main d'œuvre en Mars,
- EMSGIC : le besoin en Eau (m3) en Mars pour les cultures en GIC,
- EMGIC : le besoin en Eau (m3) en Mai pour les cultures en GIC,
- EMSHGIC: le besoin en Eau (m3) en Mars pour les cultures hors du GIC,
- EMHGIC : le besoin en Eau (m3) en Mai pour les cultures hors du GIC,
- PFGIC : la rotation (ha) de culture ( la pastèque vient toujours avant la fève en GIC),
- PFHGIC : la rotation (ha) de culture (la pastèque vient toujours avant la fève hors du GIC),
- AGIC : l'assolement (ha) (la pastèque ne vient au plus qu'un an sur 2 dans le GIC),

➤ AHGIC : l'assolement (ha) (la pastèque ne vient au plus qu'un an sur 2 hors du GIC).

RE<sub>j</sub> désigne la limite de sécurité en ce qui concerne la culture du blé, elle a été définie comme suit :

➤ SEC (ha) : le blé occupe au minimum le tiers de la SAU par mesure sécurité.

### 2.3.1.2 - Les Résultats du modèle de base

Les principales information à dégager du résultat sont :

- ❑ *Le solution de base:* C'est une solution dans laquelle le nombre de variables est égal au nombre de contraintes non nulles.
- ❑ *Le coût d'opportunité:* c'est le coût dont diminuerait la fonction objective si une unité de cette variable est forcée dans la base.
- ❑ *Les coût de substitution:* c'est le niveau dont augmenterait la fonction objectif si le niveau de la contrainte diminue d'une unité

#### 2.3.1.2.1 - Présentation des résultats de GAMS

Tableau 15 : Les activités du modèle simple

ACTIVITES	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS
BGIC	0.000	-791.7	0.000	-791.70	0.000	-589.80	9.690	0.00	11.740	0.00
FGIC	0.595	0.0	0.595	0.00	0.595	0.00	2.250	0.00	1.420	0.00
PGIC	0.595	0.0	0.595	0.00	0.595	0.00	2.250	0.00	1.420	0.00
OGIC	0.000	-214.9	0.000	-214.90	0.000	-277.30	0.000	-330.20	0.000	-330.20
BSHGIC	1.530	0.0	6.360	0.00	4.030	0.00	6.300	0.00	0.000	0.00
BIHGIC				0.00		-1.43			0.000	-3805.60
PHGIC					4.330	0.00			4.040	0.00
FHGIC					4.330	0.00			4.040	0.00
OSHGIC	0.000	-111.0	0.000	-111.00	0.000	-284.00	0.000	-180.00	0.000	-180.05
OIHGIC					0.000	-266.40			0.000	-162.45
LTGIC	0.000	-300.0	0.000	-300.00	0.000	-300.00	9.690	0.00	11.750	0.00
LTHGIC		-89.4.0		-89.40	4.020	0.00	0.000	-104.00	0.000	-104.00
LMOJN	0.000	-5.0	0.000	-5.00	43.290	0.00	4.940	0.00	48.370	0.00
LMOMS	0.000	-5.0	0.000	-5.00	94.650	0.00	69.220	0.00	126.55 0	0.00
Profit (DT)	2339.480		3356.680		17354.990		12909.280		23950.000	

avec SB : la solution de base et CS : le coût de substitution.

Tableau 16 : Les contraintes du modèle simple

	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO
SGIC	1.19	0.00	1.19	0.00	1.19	0.00	4.50	300.00	2.83	300.00
SHGIC	1.53	210.00	6.36	210.60	8.67	300.00	6.30	196.00	8.08	196.00
MOJN	14.00	0.00	14.00	0.00	72.60	5.00	48.00	5.00	80.10	5.00
MOMS	23.50	0.00	37.65	0.00	75.02	5.00	49.60	5.00	82.77	5.00
EMSGIC	625	0.00	625.00	0.00	625.00	0.00	9434.90	0.00	10060.30	0.00
EMGIC	1000.00	2.02	1000.00	2.02	1000.0	0.00	10368.0	0.50	10368.00	0.50
EMSHGIC					4546.5				4242.00	0.00
PFGIC	0.00	250.00	0.00	250.00	0.00	0.00	0.00	6.25	0.00	6.25
EMHGIC					7274.0				6787.00	0.00
PFHGIC					0.00				0.00	110.25
AGIC	0.59	0.00	0.59	0.00	0.595	2.25	2.25	2065.60	1.42	2065.00
AHGIC					4.33			-104.00	0.00	-104.00
SEC	1.04	0.00	6.36	0.00	4.03	-104.0	4.94		4.04	3114.00

avec NUR : le niveau d'utilisation des ressources et CO : le coût d'opportunité.

### 2.3.1.2.2 - Interprétation de ces résultats

#### a - Le type 1 et 2

Le profit optimal est plus élevé chez les exploitants du type 2 que ceux du type 1 car le premier dispose de plus de ressources en terre et en main d'œuvre (MO).

► Les solutions qui restent dans la base sont: la fève, la pastèque et le blé en sec. En revanche les exploitants de ce type ne peuvent pas faire des cultures en irrigué hors du GIC car ils ne disposent pas de puits. Toutes les autres activités restent hors de la base. Leur coût de substitution est très élevé.

► Les coûts de substitution des variables hors de la base sont de 796 DT pour le blé en irrigué, 215 DT pour l'olivier en irrigué et 111 DT pour l'olivier en sec. La pratique de ces cultures sont donc très coûteuses à l'exploitant. Les autres variables hors de la base sont : la location de la terre (CS = 300 DT en GIC et 89.4 DT hors du GIC ) et la location de la main d'œuvre (5 DT en Juin comme en Mars).

► Les coûts d'opportunité est nul pour les ressources SAU en GIC et MO en Juin et Mars. Donc la ressource utilisée n'est pas pleine. La SAU hors du GIC et l'Apport d'eau en Mai dans les parcelles en GIC ont un coût d'opportunité respectivement égale à 210 et 2.02. Alors la ressource terre est limitante.

#### b - Le type 3, 4 et 5

Il s'agit des exploitants qui n'ont pas de problèmes d'eau et qui ont généralement de grandes exploitations. La valeur objective est plus élevée (17300 DT pour le type 3, 12900 DT pour le type 4 et 23900 DT pour le type 5).

► Les solutions qui restent dans la base sont:

- la fève, la pastèque en GIC, le blé en sec, la fève et la pastèque hors du GIC puis la location de la Main d'œuvre et de la terre hors du GIC pour le type 3;
- le blé, la fève, la pastèque en GIC, le blé en sec puis la location de la Main d'œuvre et de la terre hors du GIC pour le type 4;
- le blé, la fève, la pastèque en GIC, le blé en sec, la fève et la pastèque hors GIC puis la location de la Main d'œuvre et de la terre hors du GIC pour le type 5.

► Les coûts de substitution des variables hors de la base:

- Concernant le type 3, l'exploitant pour faire entrer la fève dans la base doit perdre 590 DT sur son profit, 1.43 DT s'il s'agit du blé en irrigué hors du GIC, 277 DT pour le cas de l'olivier en GIC, 266 DT quand l'olivier est hors du GIC et 300 DT quand ce dernier est conduit en sec. Il y a aussi la location de la terre en GIC qui doit lui coûter 300 DT sur la Marge Brute. Cette valeur est nulle pour les autres variables car elles sont déjà dans la base.
- Pour le type 4, l'olivier a le coût de substitution de 330 DT (en irrigué) et 180 DT (en sec), la location de la terre hors du GIC coûte 104 DT.
- Les exploitants du type 5 diminueraient leur profit de 330 DT s'il veulent forcer l'olivier dans la base soit de 3805 DT pour le blé conduit en irrigué hors du GIC.

► Les coûts d'opportunité:

- Chez les exploitants du type 3 le coût d'opportunité est de 300 DT pour la SAU hors du GIC, 1.85 pour l'apport d'eau dans les parcelles en GIC, et 5 pour la main d'œuvre.
- Le type 4 et 5 ont les mêmes coûts d'opportunité concernant la SAU (300 DT pour la parcelle en GIC et 196 DT pour la parcelle hors du GIC) alors qu'il est de 5 DT pour la main d'œuvre familiale. Concernant l'apport d'eau en Mai le coût d'opportunité est très faible (0.5 DT).

On constate à travers ces résultats qu'une fois que les exploitants ont le puits et suffisamment d'eau (type 3, 4 et 5), que ce soit dans le GIC ou hors du GIC, le coût d'opportunité de l'eau baisse et tend vers 0. D'abord ils n'arrivent pas à épuiser cette ressource, au contraire ils ont tendance à utiliser au maximum d'autres notamment la SAU et la main d'œuvre dans les parcelles où ils disposent le puits. Ce qui fait que le coût d'opportunité de la terre devient très élevé et pour finir ils se jettent dans la location de la terre et de la main d'œuvre. C'est ce qui explique le fait que les activités de location restent dans la base pour ces derniers.

Par contre les petits exploitants qui n'ont pas de puits n'utilisent pas généralement toute la ressource terre dans le GIC par manque d'eau. Cette situation les oblige à mieux faire les

activités qui n'exigent pas d'eau, surtout le blé en sec et la fève. Ils font cependant encore un peu de la pastèque dans les périmètres irrigués, suite à son rendement qui reste intéressant.

Cette restriction des activités fait que les exploitants n'ont pas intérêt à louer la terre ni la main d'œuvre. D'ailleurs ils ont suffisamment de la main d'œuvre familial pour louer à d'autres. En revanche l'olivier n'entre pas dans la base quelque soit la nature de l'exploitation. Nous pouvons dire à priori que cette culture n'est pas très profitable pour les agriculteurs.

### 2.3.1.2.3 - Test de validation du modèle de base

Dans cette dernière étape nous allons apprécier la qualité de nos résultats par rapport à ce qui est réellement observé. Ce n'est qu'après avoir calé le modèle que nous pouvons faire des simulations qui s'imposent.

Au niveau de l'objectif nous remarquons que le modèle est plus ou moins réaliste avec un niveau de profit relativement faible. En effet les petits exploitants ont réellement un bénéfice qui ne dépasse jamais les 5000 DT. Le fait de ne pas pouvoir s'acheter des facteurs de production supplémentaires limite d'avantage leur niveau de profit. Par contre les grands exploitants réalisent de gros bénéfices qui leur permettent de réinvestir dans les exploitations. D'autres parts le coût de l'eau dans le GIC étant très élevé, cela alourdit les charges des petites exploitations par conséquent le profit devient faible. C'est pour alléger ces charges que les petits et moyens exploitants sont obligés de réduire de réduire leur surface en irrigué. Nous pouvons envisager l'évolution de la situation quand le prix de l'eau va augmenter.

Si on compare les coûts de substitution à la réalité, se rend compte qu'effectivement, les petites exploitations ne prennent pas le risque de faire les activités qui leur consomment assez d'eau et qui sont très peu rentables. Là il s'agit du blé et de l'olivier. Tant que ces cultures peuvent réussir dans les conditions naturelles, autant utiliser l'eau supplémentaire pour irriguer suffisamment les cultures les plus rentables. Cela revient à faire beaucoup du blé en sec et quelques cultures en irrigué chez les petits exploitants et faire les cultures de la pastèque, la fève et le blé en irrigué chez les moyens et les grands exploitants. Une remarque à faire c'est que le coût de substitution reste toujours élevé pour l'olivier. Tout comme si la culture de l'olivier n'existait pas dans cette région. Il est vrai qu'il est faiblement représenté mais les agriculteurs qui le cultivent dégagent néanmoins leur bénéfice. C'est en fait l'une des insuffisances de notre modèle.

Avec les coûts d'opportunité on se rend compte que l'eau celui de l'eau est relativement faible alors que le problème d'eau constitue l'épineux dans la région. En effet le système de tour d'eau fait que l'eau apportée dans les parcelles en GIC est parfois très insuffisante. Dans le pire des cas l'agriculteur est dans un dilemme entre irriguer la Pastèque ou les autres cultures. L'application de la règle d'arbitrage entre les cultures nous permettra de savoir ce qui est prioritaire.

D'après nos résultats, si le coût d'opportunité de l'eau est relativement faible pour les petites exploitations (ce qui n'est pas réaliste), il est presque nul chez les grandes exploitations en

particulier ceux qui disposent des puits. Ce qui est vraisemblable, c'est que ces derniers trouvent l'opportunité d'augmenter leur SAU par une location des terres des autres propriétaires.

#### 2.3.1.2.4 - Conclusion

Le modèle, à travers l'essai de validation, constitue-t-il une représentation acceptable du fonctionnement des exploitations étudiées?

- Oui pour l'occupation du sol mais en tenant compte de certaines cultures réellement pratiquées telle que l'olivier et la fève.
- Non pour le coût d'opportunité de l'eau qui normalement doit être assez élevé. Contrairement le coût d'opportunité de la terre est trop élevé.

Pour passer à des simulations nous allons essayer de consolider notre modèle de base en prenant en compte les conditions de stress hydrique dans lesquelles vivent généralement les cultures tant que le problème d'eau dans la région reste une question d'actualité. De même nous allons tenter de discriminer les apports au niveau des cultures.

### 2.3.1.3 - Modélisation avec les conditions de stress hydrique

Devant la réalité observée sur le terrain et compte tenu de notre problématique de départ, il est plus intéressant de prendre en compte dans ce modèle de base de la variabilité de la l'approvisionnement en eau dans une année. C'est de cette façon que nous pouvons mieux comprendre le comportement des agriculteurs dans leurs exploitations vis à vis de pénurie d'eau. Aussi nous pourrons faire des scénarios d'évolution de la situation en cas de pénurie d'eau.

#### *a - Notion du stress hydrique*

L'espèce végétale ne peut évoluer normalement qu'avec des conditions optimales de température, d'oxygène, de salinité, d'humidité d'air, etc. Une fois que l'une de ces conditions n'est pas satisfaite, la plante ne résiste pas et risque de mourir. Ainsi pour le cas de l'eau apportée à la plante, si elle ne remplit pas le minimum vitale la plante flétrit et meurt Mais si elle est juste à son niveau minimal la plante ne meurt pas mais on dit qu'elle est stressée. Le stress hydrique pour une culture est alors défini comme une situation dans laquelle la culture a juste ce qu'il faut pour satisfaire ses besoins en eau.

En réalité, les irriguants ne fournissent jamais la quantité d'eau optimale et au moment opportun. Et puisque la production est fonction du rendement qui à son tour est fonction de la qualité d'irrigation, nous allons nous atteler sur ce fait et voir comment un agriculteur peut gérer son eau non seulement pour satisfaire sa plante suivant ses besoins nécessaires mais aussi nous intéresser sur la question d'arbitrage qui s'impose devant une contrainte saturée en eau.

#### *b - Coefficients de stress hydrique*

A chaque stade d'évolution de la plante correspond un coefficient de stress hydrique qui détermine les besoins en eau de la plante durant la période considérée. Le Tableau vu en **annexe IIIA** nous fournit les coefficients de stress hydrique des cultures de Melalsa en eau par stade végétatif.

#### *c - Formalisation mathématique du modèle dans les conditions de stress hydrique*

A partir de la formule FAO, permettant le calcul de la chute des rendements en fonction de l'évapotranspiration réelle (ETR) et maximale (ETM) que voici:

#### Équation 14

$$1 - \frac{\text{Rendement réel}}{\text{Rendement max}} = k_y \left(1 - \frac{\text{ETR}}{\text{ETM}}\right)$$

avec  $K_y$  le coefficient de stress hydrique ( propre à chaque stade végétatif de la plante), On déduit son équivalent :

Tableau 17 : Calcul des Coefficients de l'équation de marge brute (Avril)

cultures	coef de stress hydrique Avril	besoin_e au Avril	besoin_e u totale	rendem ent maximale	Prix_ produit	charges des intrants sans l'eau	coût de l'eau= 70mill	coût de l'eau= 20mill	Apport total de l'eau	F70	F20	G70	G20
										DT	DT	DT	DT
	ky	BcAi (m³)	BEj (m³)	Rj(t)	Pj(DT /t)	CVj(D T)	DT/m³	DT/m³	m³				
BLE	0,4	580	2300	4	285	455	0,07	0,02	2300	102,6	194,6	0,7162	0,76621
FEVE	0,2	0	1610	4	200	417	0,07	0,02	1610	110,3	190,8	0	0
PASTEQ	0,6	230	6090	30	160	1241	0,07	0,02	6090	268,8	561,8	12,452	12,5017
MELON	0,6	220	3610	17	285	1226	0,07	0,02	3610	474,7	644,2	13,144	13,1936
OLIVIER	0	125	1500	2,5	334	687,9	0,07	0,02	1500	50,35	119,6	-0,07	-0,02
TOTAL		1155	15110	57,5		4026,9			15110				

**Commentaires**

Les ky sont donnés par le bull FAO n°33 - Rome. Et le calcul des besoins théoriques en eau a été fait par S.Lardilleux (voir annexe IIA). Seul le besoin en eau de l'olivier correspond aux besoins calculés à partir des données des enquêtes

*c.2 - Les contraintes*

En plus des contraintes citées dans le modèle de départ, nous avons introduit une autre contrainte qui impose que le rendement réel soit inférieur au rendement maximal.

Ainsi cela se traduit comme suit:

**Équation 18**

$$V_j - Be_{\mu} X_j \leq 0$$

*c.3 - Présentation des données du modèle (voir les tableaux des annexes IIIC, IIID, IIIE, IIIF, IIIG)*Désignation des activités:

- BGIC : la culture de Blé en GIC,
- FGIC : la culture de Fève en GIC,
- PGIC : la culture de Pastèque en GIC,
- OGIC : la culture de l'Olivier en GIC,
- BSHGIC : la culture de Blé en Sec Hors GIC,
- BIHGIC : la culture de Blé en irrigué hors du GIC,
- FHGIC : la culture de Fève hors du GIC,
- PHGIC : la culture de Pastèque hors du GIC,
- OSHGIC : la culture de l'Olivier hors Sec hors du GIC,
- OIHGIC : la culture de l'Olivier en irrigué hors du GIC,
- VOLBG : l'apport en eau en GIC pour la culture du blé (m3),
- VOLFG : l'apport en eau en GIC pour la culture de la fève (m3),
- VOLP : l'apport en eau en GIC pour la culture de la pastèque (m3),
- VOLOG : l'apport en eau en GIC pour la culture de l'olivier (m3),
- VOLBH : l'apport en eau hors du GIC pour la culture de blé (m3),

- VOLFH : l'apport en eau hors du GIC pour la culture de la fève (m3),
- VOLPH : l'apport en eau hors du GIC pour la culture de la pastèque (m3),
- VOLOH : l'apport en eau en GIC pour la culture de l'olivier (m3),
- LTGIC : la location de la Terre au sein du GIC,
- LTHGIC : la location de la Terre hors du GIC,
- LMOJN : la location de la Main d'œuvre en Juin,
- LMOMS : la location de la main d'œuvré en Mars.

#### Désignation des ressources

- SGIC (ha) : la surface cultivée en GIC,
- SHGIC (ha) : la surface cultivée hors du GIC,
- MOJN(j) : la disponibilité de la Main d'œuvre en Juin,
- MOMS (j) : la disponibilité de la Main d'œuvre en Mars,
- EMSGIC (m3) : le besoin en Eau en Mars pour les cultures en GIC,
- EMSHGIC (m3) : le besoin en Eau en Mars pour les cultures hors du GIC,
- PFGIC (ha) : la rotation de culture ( la pastèque vient toujours avant la fève en GIC),
- PFHGIC (ha) : la rotation de culture (la pastèque vient toujours avant la fève hors du GIC),
- AGIC (ha) : l'assolement (la pastèque vient au maximum qu'un an sur 2 dans le GIC)
- AHGIC (ha) : l'assolement (la pastèque vient au maximum qu'un an sur 2 hors du GIC)
- SEC (ha) : la sécurité (le blé occupe au minimum le tiers de la SAU pour mesure sécurité),
- RMAXBG (m3) : le rendement de blé en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal en GIC,
- RMAXFG (m3) : le rendement de fève en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal en GIC,
- RMAXPG (m3) : le rendement de la pastèque en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal en GIC,
- RMAXOG (m3) : le rendement de l'olivier en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal en GIC,
- RMAXBH (m3) : le rendement de blé en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal hors du GIC,
- RMAXFH (m3) : le rendement de la fève en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal hors du GIC,
- RMAXPH (m3) : le rendement de la pastèque en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement maximal hors du GIC,
- RMAXOH (m3) : le rendement de l'olivier en cas de stress ne doit pas dépasser son rendement hors du GIC,
- EAVG : apport en eau stressant durant le mois d'avril dans le GIC,
- EAVRH : apport en eau stressant durant le mois d'avril hors du GIC.

#### Désignation des variables:

j : désigne les activités susmentionnées

x(j) : est la variable décisionnelle qui correspond au niveau d'intensité des activités

z : le niveau optimal du profit.

Désignation des équations:

REVENU = fonction objectif,

RESSOURCE (RE) = contraintes de ressources,

SECURITE (SE) = contraintes de sécurité,

**2.3.1.3.4 - Résultats du modèle de stress hydrique****Tableau 18 : Les activités du modèle avec stress hydrique**

ACTIVITES	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS
BGIC	1.045	0	0.63	0	0.67	0	13.28	0	13.6	0
FGIC	0	-422	0	-430.3	0	-454.7	0	-483.49	0	-484.1
PGIC	0.79	0	1.79	0	1.71	0	2.25	0	1.42	0
OGIC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BSHGIC	1.530	0	6.36	0	4.33	0	6.3	0	4.038	0
BIHGIC					0.003	0			0.002	0
PHGIC					4.33	0			4.04	0
FHGIC					0	-43.95			0	-43.95
OSHGIC	0	-111		-111.1	0	-180	0	-189	0	-180
OIHGIC					0	0			0	0
LTGIC	0.245	0	0	-300	0	-300	11.03	0	12.2	0
LTHGIC		-89.4	0	-89.4	4.02	-104	0	-104	0	-104
LMOJN	0	-5	0	-5	69.52	0	4.94	0	48.37	0
LMOMS	0	-5	0	-5	86.43	0	62.26	0	101.53	0
VOLBG	606.219	0	367.86	0	386.93	0	7701.29	0	7899.12	0
VOLFG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VOLPG	181.700	0	411.7	0	393.3	0	517.5	0	326.6	0
VOLOG	0	-2.38	0	-0.4	0	-1.046	0	-2.58	0	-2.58
VOLBH					1.46	0	0		1.21	0
VOLFH					0	0			0	0
VOLPH					995.9	0			929.2	0
VOLOH					0	-1.3			0	-1.306
Profit (DT)	3273.160		7279.974		18071.000		13929.022		23937.000	

avec SB : la solution de base et CS : le coût de substitution.

Tableau 19 : Les contraintes du modèle de stress hydrique

	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO
SGIC	1.59	300	2.42	0	2.337	0	4.5	300	2.83	300
SHGIC	1.53.	210	6.36	210.6	8.67	196	6.3	196	8.08	196
MOJN	18.59	0	42.12	0	72.6	5	48	5	80.1	5
MOMS	26.72	0	63.9	0	75.02	5	49.6	5	82.77	5
EMSGIC	1000	0.31	1000	0.72	1000	0.7	10368	0.45	10368	0.45
EMSHGIC					1300.8	10368			1213.52	0
PFGIC	-0.79	0	-1.79	0	0	0.63	-2.25	0	0	0.63
PFHGIC					-4.33	0			-4.04	0
AGIC	0.79	2139.3	1.79	2916	1.71	2683.5	2.250	2763.4	1.42	2764
AHGIC					4.33	3001.6			4.04	3001.6
EAVG	787.92	0	779.56	0	780.23	0	8218.78	0	8225.7	0
EAVH									930.4	0
RMAXBG	0	0.72	0	0.72	0	0.72	0	0.77	0	0.77
RMAXFG	0	EPS	0	EPS	0	EPS	0	EPS	0	EPS
RMAXPG	0	12.45	0	12.45	0	12.45	0	12.5	0	12.5
RMAXOG	0	2.30	0	0.32	0	0.98	0	2.57	0	2.57
RMAXBH					0	0.77			0	0.77
RMAXFH					0	0.31			0	EPS
RMAXPH					0	12.5			0	12.5
RMAXOH					0	1.28			0	1.28
SEC	2.57	0	6.9	0	5	0	19.57	0	17.66	0

avec NUR : le niveau d'utilisation des ressources et CO : le coût d'opportunité.

### a - Les types 1 et 2

**Solution de base :** Les activités qui sont dans la base pour les deux types sont la culture de blé en irrigué, la pastèque, la location de la terre (pour le type 1 seulement) dans le GIC et le blé en sec hors du GIC. Tout se passe comme si le blé en irrigué substitue la fève.

**Les coûts de substitution:** Ces coûts sont élevés pour la pastèque mais deviennent nuls pour l'olivier. Ceci veut dire que l'agriculteur est indifférent entre faire et ne pas faire la culture de l'olivier. C'est plus proche de la réalité. Il est vrai que la rentabilité de l'olivier n'est pas élevée mais il est pratiqué par quelques agriculteurs en particuliers ceux qui ont hérité leur exploitation. Une autre contradiction c'est que la fève n'existe pas dans la base avec son coût de substitution très élevé (422 DT) alors que dans la réalité elle est conduite en irrigué. Cela voudrait dire que les agriculteurs préfèrent du blé en irrigué qu'à la fève quand il y a manque d'eau. Les coûts de substitution de la location de la main d'œuvre et de la terre hors du GIC restent inchangés.

**Les coût d'opportunité:** Ils sont très intéressants pour la SAU hors du GIC (210 DT) dans les deux types et la SAU en GIC (300DT) pour le type 1 seulement. Le modèle nous dit que le volume d'eau apporté pendant le mois de Mars est complètement utilisé mais si on ajoutait 1 m<sup>3</sup> d'eau de plus, on gagnerait 0.3 millimes pour le type 1 et 0.7 millimes pour le type 2. Ce coût de substitution a diminué par rapport à ce qu'il était dans le modèle de départ. Malgré que cette

valeur n'est toujours pas réaliste, l'évolution du CO nous permet de déduire que l'eau a été mieux valorisée dans le règlement d'arbitrage.

Devant cette considération, le modèle nous donne une précision concernant l'apport en eau dans le mois d'Avril. Ainsi parmi les variables qui se trouvent dans la base, la pastèque et le blé sont celles qui reçoivent suffisamment d'eau. Ce qui n'est pas le cas pour la fève et l'olivier. En fait le mois de stress considéré exclut la production de la fève. Mais cela n'empêche pas au modèle de nous indiquer si la fève est conduite en irrigué ou pas.

### ***b - Les types 3,4 et 5***

Les exploitants de ces 3 types se comportent de la même façon suivant qu'ils ont leurs puits en GIC ou hors du GIC.

Les variables de base : En GIC elles restent les mêmes pour le type 4 et 5: il s'agit du Blé, de la Pastèque et de la location de la terre.

Hors du GIC tous les exploitants de chaque type font du blé en sec, alors que ceux du types 3 et 5 font un peu du blé irrigué en plus, puis de la pastèque. Le type 3 loue la terre, ils louent tous la main d'œuvre.

Les coûts de substitution : celui de la fève est de 484 DT pour le type 5 et 180DT pour l'olivier en sec. L'olivier en irrigué a un coût de substitution nul. Il y a aussi pour le type 3 celui de la location de la terre qui vaut 300 DT (en GIC) alors qu'il est de 104 DT pour les autres types hors du GIC.

Les coût d'opportunité: chez les exploitants du type 4 et 5 la SAU en GIC a un coût d'opportunité assez élevé (300DT). Chez le type 3 c'est l'inverse: la SAU hors du GIC a un coût d'opportunité élevé. En effet cela s'explique par le fait d'avoir l'eau en permanence; donc on se permet d'utiliser toute la surface disponible. Par contre le coût d'opportunité de l'eau apportée en Mars a baissé (0.72 DT).

### **2.3.1.3.5 - Conclusion**

D'une façon générale le profit s'améliore au niveau de chaque type d'exploitation car il y a une meilleure affectation des ressources : eau, terre et main d'œuvre disponible. Le plus intéressant, c'est que le modèle précise les cultures qu'on peut irriguer pour avoir le maximum de profit. Dans ce cas l'eau sera distribuée entre le blé et la Pastèque. Il ressort que l'agriculteur n'a pas d'intérêt en faisant de la fève et pire dans sa parcelle située dans le GIC. C'est pareille pour l'olivier.

## 2.3.2 - Autres scénarios simulés

### 2.3.2.1 - Simulation avec pénurie d'eau (la règle d'arbitrage entre la Pastèque et les autres cultures)

Dans cette partie nous voulons savoir le choix entre plusieurs cultures en irrigué dans les conditions où l'eau devient rare. D'après nos hypothèses, l'eau à apporter dans le mois d'avril ne dépasse guère 200 m<sup>3</sup> au sein d'une parcelle.

Résultats (voir les valeurs en annexe V).

#### Interprétation des résultats

Tableau 20 : Apport d'eau aux cultures dans le mois d'Avril

AVRIL	BLE	FEVE	PASTEQUE	OLIVIER
Besoin réel en m <sup>3</sup> /ha	580	0	230	125
Apport total en m <sup>3</sup>	18.300	0	181.7	0
Surface cultivée en ha	0.8	0	0.79	0
Apport en m <sup>3</sup> / ha	22.87	0	230	0

On constate malgré un manque d'eau que les besoins de la Pastèque sont satisfaits à 100% alors que le Blé n'est satisfait qu'à 0.039 %.

Autrement dit , dès que l'agriculteur affronte des problèmes de manque d'eau au cours de l'année, Il préfère irriguer la pastèque avant le blé. Ce choix ne l'écarte pas de l'objectif lorsque les conditions sont normales (2896.79 contre 3273.16DT).

En revanche il ne fait pas du tout la fève parce que la productivité de cette culture devient faible dans ces conditions. Mais si on se trouvait dans une situation où le rendement maximal du blé n'atteint pas celui de la fève, l'exploitant choisirait d'irriguer la fève avant le blé. Voir dans la figure 7 l'évolution du rendement en fonction du volume d'eau apporté.

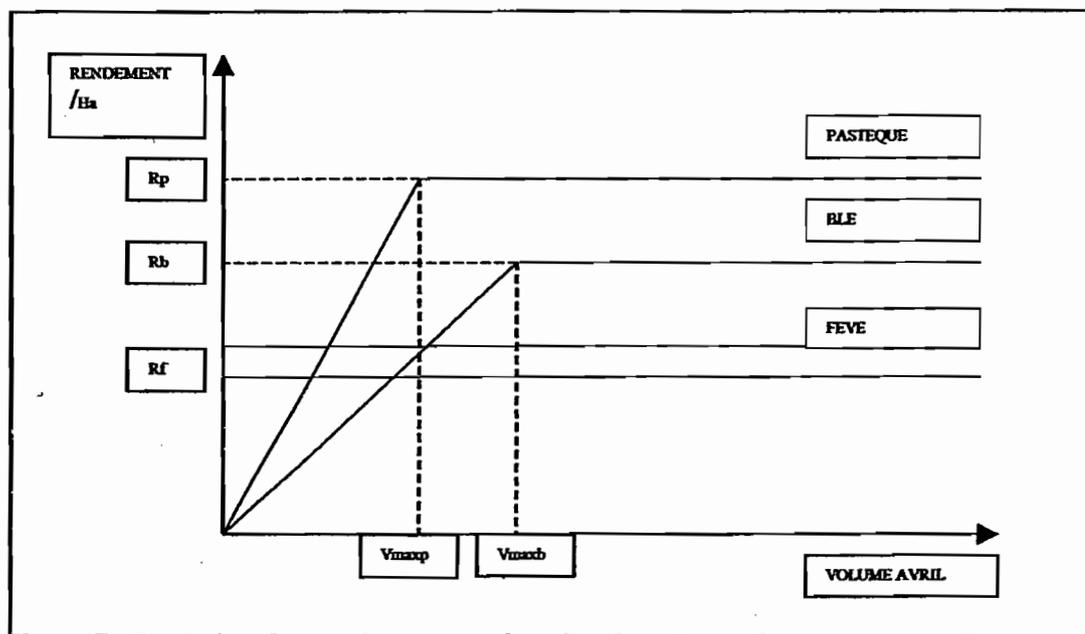


Figure 7 : Evolution des rendements en fonction du volume d'eau apporté

- V<sub>maxp</sub> : volume qui satisfait les besoins de la pastèque
- V<sub>maxb</sub> : volume qui satisfait les besoins du blé
- R<sub>i</sub> : Rendement de i (i = p, b, f).

D'après cette figure, on comprend que l'irrigant choisit d'apporter suffisamment d'eau à la pastèque ensuite le blé étant donné que le rendement de la pastèque est meilleur à celui de blé. Dans ces conditions la fève ne reçoit rien. Mais si on diminue arbitrairement le rendement du blé, face au rendement de la fève, l'irrigation de la fève devient prioritaire à celle du blé.

### 2.3.2.2 - Simulation avec les techniques d'irrigation

Le but essentiel est d'analyser le comportement des agriculteurs vis-à-vis de la politique d'encouragement de l'Etat dans l'adoption des techniques d'irrigation. Nous allons dans cette partie présenter d'abord les différentes techniques d'économie d'eau présentes en Tunisie et leurs avantages; ensuite nous partirons de la situation de Melalsa pour construire notre modèle qui simule avec ces techniques d'irrigation et faire les scénarios de l'évolution de la situation.

#### 2.3.2.2.1 - Les techniques d'irrigation économes en eau

En dehors de la technique de la technique traditionnelle qui n'est pas du tout économe en eau, toutes les autres techniques telle que le gravitaire amélioré, l'irrigation en aspersion et l'irrigation en goutte à goutte sont des techniques modernes qui permettent généralement d'améliorer la productivité par hectare de l'eau d'irrigation.

### ***a - La technique traditionnelle***

C'est une irrigation de surface. L'eau arrive dans le champ par le potentiel de gravité à travers les rigoles. Ces rigoles sont creusées depuis la borne jusqu'au pied de la plante. Pour cette technique l'efficacité reste très faible car une bonne partie de l'eau est perdue par ruissellement et par percolation loin du pied de la plante. La qualité d'une irrigation est caractérisée par l'uniformité et le rendement .

En irrigation traditionnelle bien maîtrisée, le rendement peut atteindre des valeurs comprises entre 60 et 70%. En irrigation modernisée, il peut dépasser les 80%. L'uniformité peut aussi dépasser 80%. En effet l'investissement engagé dans cette technique est très négligeable mais elle exige beaucoup de main d'œuvre.

### ***b - Le gravitaire amélioré***

Le gravitaire améliorée est une irrigation à la raie mais plus améliorée. Pourquoi alors moderniser une irrigation à la raie?

- Pour améliorer la production (l'irrigation ne doit pas être un frein au progrès des facteurs de production),
- Pour mieux maîtriser l'application (répartir l'eau régulièrement dans les raies, éviter aussi bien les sous- irrigations que les excès d'eau et le lessivages),
- Pour diminuer les charges de main d'œuvre ( alléger les temps de travaux nécessaires au bon déroulement de l'arrosage.

Pour cette technique l'investissement concerne surtout l'achat des conduits qui arrivent aux pieds des plants. Alors il y a amélioration de l'efficacité. En conséquence on gagne en eau ce qu'on perd en investissement. Le plus important c'est que le bilan gains-pertes reste positif.

### ***c - L'Aspersion***

Cette technique est beaucoup plus pratiquée dans les grandes cultures (le blé, la fève, etc.). La prise en compte des coefficients d'uniformité fait de cette technique celle dont l'efficacité est bonne. Mais elle exige beaucoup plus d'investissement (2000DT/ha en moyenne). Aussi elle demande un peu moins de main d'œuvre. Il existe une gamme de matériels en aspersion dont les conduits métalliques mobiles, les conduits en PVC mobiles ou flexibles, les conduits en PVC enterrés etc. Le choix du matériel dépend de plusieurs facteurs: la nature du sol et du terrain, le débit de l'aspersion, le coût de l'investissement et la durée de vie.

### ***d - L'irrigation localisée***

Il est démontré par les chercheurs en Irrigation et en Physiologie Végétale que cette technique reste jusqu'à preuve du contraire la meilleure qui permet l'utilisation de l'eau d'une manière très

efficace surtout dans l'irrigation des cultures maraîchères et l'arboriculture. Aussi elle est utilisée pour la fertigation. Sur la base de plusieurs paramètres le choix dans une gamme de matériels n'est pas facile à faire. En revanche une bonne étude du projet doit être faite au préalable. Cela concerne surtout :

- la qualité de l'eau pour le choix des filtres et des goutteurs,
- la nature du sol et du terrain pour le choix du diamètre des rampes, et
- le coût de l'installation pour décider de l'adoption du projet.

⇒ Le coût de l'installation :

Le dernier élément à considérer est le coût global de l'installation, c'est à dire celui des équipements et des charges annuelles qui en découlent, compte tenu de la durée de vie de ces équipements; mais aussi le coût de la main d'œuvre nécessaire pour la mise en œuvre de l'installation. Il est intéressant d'équiper une grande superficie afin de minimiser le prix de revient à l'hectare (sur la base des rendements d'échelle).

⇒ Le coût du matériel :

Il dépend du choix de l'organe de distribution, du type de filtration nécessaire et du dispositif choisi pour l'implantation du porte-rampes et des rampes. Pour une même parcelle, ce coût peut varier de 20 à 30% de l'investissement soit 1000 à 1200 DT/ha.

La station de Filtration est un poste onéreux qui doit s'amortir sur au moins 3 à 4 ha. Son coût est de l'ordre de 600 à 1000F (120 à 200 DT) par m<sup>3</sup>/h de capacité de filtration.

La durée de vie des équipements peut aller d'une campagne d'irrigation (gaine souple « jetable ») à 10 ou 15 ans.

⇒ Le coût de la main d'œuvre

En irrigation localisée on a souvent besoin d'une main d'œuvre qualifiée. Ce coût n'est pas le même pour tous les "distributeurs de l'eau". Il est faible pour les goutteurs en ligne et élevé pour les gaines, les goutteurs en dérivation, les diffuseurs, ensuite les mini-diffuseurs (Guide CEMAGREF).

### 2.3.2.2.2 - Les pratiques de l'irrigation dans la Zone de Kairouan

#### *a - La région de Melalsa*

L'irrigation traditionnelle a tendance à être complètement abandonnée par les agriculteurs de Melalsa au profit du gravitaire amélioré. Actuellement le projet d'installation de la technique d'aspersion est en cours d'étude, l'opinion social adhère avec beaucoup d'intérêt à ce projet national. Par contre l'adoption de la goutte à goutte n'est pas encore avouée par les irriguants à cause de l'investissement très contraignant, malgré les efforts d'encouragement de l'Etat qui se traduisent par les crédits des banques et les subventions accordées par le Ministère d'Agriculture.

#### *b - La région de Souadia*

Toutes les pratiques sont observables dans cette région. En effet, à partir des informations de la CTV de cette région il ressort que la majorité pratique la technique traditionnelle et le gravitaire amélioré. Alors qu'une minorité fait de l'Aspersion et de la goutte à goutte.

#### *c - La région de Bled Abida*

D'après nos observations et à partir des informations reçues du GIC de la région, une bonne partie du réseau serait défaillant depuis un bon bout de temps. En revanche ils font beaucoup du gravitaire amélioré mais avec une efficacité technique inférieure aux normes nationales. Le périmètre où le réseau est détruit n'est plus irrigué. Beaucoup de travaux de la refection du réseau et de reamenagement des systèmes d'irrigation sont en cours d'élaboration.

### 2.3.2.2.3 - Investissement dans les différentes techniques : cas de la Tunisie

En Tunisie les petites et moyennes exploitations sont les plus dominantes. En général les petits exploitants n'arrivent pas à affronter des dépenses trop coûteuses car leur revenu est très bas. C'est dans le souci d'aider les agriculteurs et dans l'intention de mieux valoriser la ressource "eau", que l'Etat tunisien s'investit dans l'adoption des techniques d'irrigation économes en eau. Le tableau suivant nous présente un schéma global de financements en vigueur.

**Tableau 21: Schéma de financement des techniques d'irrigation.**

	Fonds propres	primes	Crédit à moyen terme
Petits( catégorie A)	10%	60%	30%
Moyen ( catégorie B)	10%	50%	40%
Gros ( catégorie C)	30%	40%	30%

**Commentaire:** le crédit est accordé par la BNA<sup>8</sup> avec un taux d'intérêt de 9 %, le délai de remboursement est de 7 ans avec une année de grâce. Mais l'accès aux primes se fait au niveau de l'APIA<sup>9</sup> pour les exploitants de la catégorie B et C par contre ceux de la catégorie A s'adressent directement au CRDA de la région où ils se trouvent.

Dans ce qui suit nous avons classé les types d'exploitants par catégorie d'aide à l'investissement du matériel d'économie d'eau. Mais cette classification ne tient compte que de la taille des exploitations.

**Tableau 22 : Classification de types d'exploitants selon les catégories d'investissement**

Catégorie	Type1		Type2		Type3		Type4		Type5	
	GIC	HGIC								
A	+	+							+	
B			+	+	+		+	+		
C						+				+

D'après les informations que nous avons reçu auprès des agents l'OTD<sup>10</sup> et les informations lues dans un rapport de la DGGR<sup>11</sup> du CRDA<sup>12</sup> de Nabeul (R. ALATIRI, 1999), nous dégagons un tableau des coûts d'investissement dans les différentes techniques d'irrigation et le niveau d'efficacité de chaque technique (**voir les tableaux en annexe IVA**).

Sur la base de ces données nous pouvons élaborer la fonction de marge brute de notre modèle d'investissement.

#### 2.3.2.2.4 - Formalisation du modèle d'investissement dans les techniques d'irrigation

Le problème revient à Maximiser tout comme dans les autres modèles, la fonction objectif sous les mêmes contraintes. La fonction objectif (Z) est encore la somme des marges brutes de toutes les activités.

##### ► Calcul de la marge brute

La marge brute par définition est la différence entre les productions et les charges variables de chaque activité. Le calcul de la production a été démontré dans le chapitre 6. Pour calculer les charges variables, nous allons incorporer aux charges des intrants, d'autres charges liées à l'installation d'une technique d'irrigation donnée. Etant donné que l'apport de l'eau à une culture dépend de l'efficacité de chaque technique d'irrigation, nous allons voir dans ce qui suit comment prendre en compte le coût de l'eau dans le calcul des charges. Nous procéderons de même pour la main d'œuvre.

<sup>8</sup> BNA= Banque Nationale Agricole.

<sup>9</sup> APIA= Agence de Promotion pour l'Investissement Agricole

<sup>10</sup> OTD = Office des Terres Domaniales

<sup>11</sup> DGRE = Direction Générale du Génie Rural

<sup>12</sup> CRDA= Commissariat Régional de Développement Agricole.



**Équation 20**

$$(\text{Prix MO\_journalier}) * (\text{BE\_culture}) / (20 \text{ m}^3 / \text{h}) / (10\text{h/j}) = \text{Coût de MO}$$

► *Autres charges variables liées à l'installation des techniques :*

Etant donné que les matériels ont besoin d'un entretien permanent nous avons évalué au hasard toutes les charges d'entretien à 20 DT/ha dans le cas de l'Aspersion 30 DT/ha dans le cas du Goutte à goutte.

(Voir les Tableaux en annexe IVA)

**La fonction objectif**

L'équation de la fonction objectif s'écrit alors:

**Équation 21**

$$Z = \sum_{i=1}^m MB_{ji} = \sum_{i=1}^m (R_j * P_j - CV_{ji} - Pe * \frac{BE_j}{eff_i} + BONUS) * S_i - locMO - locTER$$

Avec

- $MB_i$  : la marge brute de la culture j pour la technique d'irrigation i (DT),
- $R_j$  : le rendement de la culture j (t/ha),
- $P_j$  : le prix de vente du produit de la culture j (DT),
- $CV_{ji}$  : les charges des intrants sauf l'eau de la culture j pour la technique i (DT),
- $Pe$  : le prix de vente de l'eau (DT),
- $BE_j$  : le besoin en eau de la culture j ( $\text{m}^3$ ),
- $eff_j$  : l'efficacité de la technique d'irrigation,
- $S_i$  : la surface à équiper pour la technique i (ha),
- $BONUS$  = Bonus de la main d'œuvre (DT),
- $LocMO$  = location de la Main d'œuvre,
- $LocTER$  = location de la terre.

**Les contraintes**

Les principales contraintes à prendre en compte sont celles de la terre, les contraintes agronomiques, les contraintes de main d'œuvre, les contraintes en eau, puis les contraintes de trésorerie. Les détails de l'écriture de ces contraintes sont déjà fournis au chapitre 6. Nous allons tout simplement reprendre la formalisation de la contrainte de trésorerie. L'équation de la contrainte de trésorerie s'écrit :

#### Équation 22

$$\sum_j CV_{ji} \leq \text{Somme Disponible dans la Caisse}$$

Avec

$CV_{ji}$  = Charges d'investissement dans les différentes activités.

La prise en compte de cette contrainte dans notre modèle d'investissement est très importante. Ce qui est observable chez les exploitants surtout les petits, il y a une inquiétude de ne pas pouvoir régler les dettes accordées pour ces techniques.

▶ *Evaluation des charges d'investissement par activité:*

Nous appelons charges d'investissement par activité tout ce que l'agriculteur paye au cours d'une année pour réaliser une activité donnée. Il s'agit du coût d'achat des intrants, le coût de la location de la terre et de la main d'œuvre, le coût de l'installation de la technique d'irrigation (investissement annuel et entretien).

▶ Calcul des Charges liées à l'installation des matériels d'irrigation:

En fait l'Agriculteur ne paye qu'une partie du montant de l'investissement à la première année. Les autres parties sont sous forme de prêts et de subvention. Toute fois le bénéficiaire réagit en fonction de ce qu'il aura à payer les années suivantes tant que le crédit doit être remboursé dans un délai bien limité. Il serait intéressant de prendre en compte ce "risque" qui traduit en fait son comportement pour les années à venir. Mais nous allons tout simplement faire la somme de toutes les charges fixes comme variables liées à l'acquisition du matériel.

▶ Calcul de l'annuité

Nous partons du fait que le Remboursement des prêts se fait en "annuité constante" comme c'est le cas dans la plupart des administrations financières qui accordent les crédit aux agriculteurs.

Puisque le délai de remboursement est fixé pour 7 ans y compris l'année de Prêt, Il est donc nécessaire de tenir compte du taux d'actualisation dans le calcul du montant à rembourser. L'actualisation en fait permet d'évaluer la valeur de la monnaie courante par rapport à une année

de base étant donné l'inflation des prix des produits, la dépréciation de la valeur de l'échange et la préférence du présent par rapport au futur chez un agent économique.

En partant de ce fait, le calcul de l'annuité c'est à dire la somme que le bénéficiaire paye à la banque chaque année, est vue comme nous l'avons énoncé dans l'équation 23

Dans les calculs à faire, on part du coefficient de récupération du prêt ( $\beta$ ) pour déduire le taux de récupération de ce prêt en annuité constante (A) à partir de la formule:

### Équation 23

$$A = \beta_{in} * \text{Montant du prêt}$$

$\beta = 0.22292$  : c'est le coefficient de récupération du prêt en annuité constante

pour  $i = \text{taux d'intérêt} = \text{taux d'actualisation} = 9\%$  et

$n = \text{durée de la dette} = 7 \text{ ans avec une année de grâce}$

A= annuité.

(Voir les tableaux en annexe IVA)

### 2.3.2.2.5 - Présentation du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation :

(voir les tableaux en annexes(IVB, IVC, IVD, IVE, IVF)

#### Désignation des activités:

- BGR (l'activité de blé en gravitaire amélioré en GIC)
- BAS (l'activité de blé en aspersion en GIC)
- FGR (l'activité de fève en gravitaire amélioré en GIC)
- FAS (l'activité de fève en aspersion en GIC)
- PGR (l'activité de pastèque en gravitaire amélioré en GIC)
- PGG (l'activité de pastèque en goutte a goutte en GIC)
- OGR (l'activité de olivier en gravi amélioré en GIC)
- OGG (l'activité de olivier en goutte a goutte en GIC)
- BSH (l'activité de blé en gravitaire amélioré en GIC)
- BGRH (l'activité de blé en sec hors GIC)

- BASH (l'activité de blé en aspersion hors GIC)
- FGRH (l'activité de fève en gravitaire amélioré hors GIC)
- FASH (l'activité de fève en aspersion en GIC)
- PGRH (l'activité de pastèque en gravitaire amélioré hors GIC)
- PGGH (l'activité de pastèque en goutte a goutte hors GIC)
- OSH (surface de l'olivier en sec hors GIC)
- OGRH (l'activité de olivier en gravi amélioré hors du GIC)
- OGGH (l'activité de blé en goutte a goutte hors du GIC)
- LTGIC (location de la parcelle en GIC)
- LTHGIC (location de la parcelle hors du GIC)
- LMOJN (location de la main d'œuvre en JUIN)
- LMOMS (location de la main d'œuvre en Mars)
- GR (adoption du gravitaire amélioré hors ha)
- AS (adoption de l'aspersion hors GIC en ha)
- GG (adoption de la goutte a goutte hors GIC en ha)

Désignation des ressources :

- SGIC (ha): surface cultivée en GIC,
- SHGIC (ha): Surface cultivée hors GIC,
- MOJN (j) : disponibilité de la Main d'œuvre en Juin,
- MOMS (j) : disponibilité de la Main d'œuvre en Mars,
- EDEC (m3): Apport Eau en Décembre pour les cultures en GIC,
- EAVR (m3): Apport Eau en Avril pour les cultures en GIC,
- EDECH (m3): Apport Eau en Décembre pour les cultures hors GIC,
- EAVRH (m3): Apport Eau en Avril pour les cultures hors GIC,

- PF (ha) : la rotation de culture ( la pastèque vient toujours avant la fève en GIC),
- PFH (ha) : la rotation de culture (la pastèque vient toujours avant la fève hors du GIC),
- ASS (ha) : l'assolement (la pastèque vient au maximum qu'un an sur 2 dans le GIC),
- ASSH (ha) : l'assolement (la pastèque vient au maximum qu'un an sur 2 hors du GIC),
- SGR (ha) : la surface occupée par le gravitaire amélioré,
- SAS (ha) la surface occupée par l'Aspersion,
- SGG (ha) la surface occupée par la goutte à goutte,
- SEC (ha) : la sécurité (le blé occupe au minimum le tiers de la SAU pour mesure sécurité).

#### Désignation des variables:

j désigne les activités susmentionnées

$x(j)$  est la variable décisionnelle qui correspond au niveau d'intensité des activités

z le niveau optimal du le profit.

#### Désignation des équations:

REVENU : fonction objectif,

RESSOURCE (RE) : contraintes de ressources,

SECURITE (SE) : contraintes de sécurité,

SECURITE (SE) = contraintes de sécurité,

### 2.3.2.2.6 : Résultats du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation :

Tableau 23 : Les activités du modèle de simulation des techniques d'irrigation

	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS	SB	CS
BGR	1.11	0	1.22	0	0	-517	4.025	0	1.45	0
BAS	0	0	0	0	0	-562	0	0	0	EPS
FGR	0	-232.6	0.17	0	0	-742	0	-298	0	-279.74
FAS	0	-240	0	-35.2	0	-703	0	-3030	0	-283.7
PGR	0	-85.3	0	-18.6	0.79	0	1.79	0	1.4	0
PGG	1.04	0	1.71	0	0	-330.6	0	0	0	EPS
OGR	0	-525.15	0	-407.5	0	-1431	0	-643.4	0	-833.7
OGG	0	-572.1	0	-553.6	0	-2018	0	-757	0	-966
BSH	1.53	0	6.36	0	3.63	0	6.36	0	1.34	0
BGRH					0	-204.88			2.69	0
BASH					0	-189.4			0	0
FGRH					0	-523			0	-279.7
FASH					0	-512.5			0	-283.7
PGRH					4.33	0			4.04	0
PGGH					0	-494.6			0	0
OSH	0	-136.3	0	-163.68	0	-417	0	-190.8	0	-291
OGRH					0	-1228			0	-833.7
OGGH					0	-1868			0	-966
LTGIC	0.56	0	0	-453	0	-814	2.23	0	0	-620
LTHGIC	0	-194.9	0	-309.4	0	-814	0	-279.69	0	-647.7
LMOJN	0	-6.23	0	-7.55	0	-13.56	0	-6.97	0	-10.7
LMOMS	0	-6.22	0	-7.55	60	06	6.46	0	65.6	0
GR	1.11	0	1.4	0	5.12	0	5.82	0	9.56	0
AS	0	-46.7	0	-93.9	0	-458.7	0	-109.9	0	-858.18
GG	1.04	0	1.7	0	0	0			0	-1129.9
Z objectif	4190.19		7708.78		17872.89		9368.34		21332.5	

Avec SB : la solution de base et CS : le coût de substitution.

Tableau 24 : Les contraintes du modèle de simulation avec les techniques d'irrigation

	TYPE1		TYPE2		TYPE3		TYPE4		TYPE5	
	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO	NUR	CO
SGIC	1.59	373.36	3.11	0	0.8	0	3.59	418	2.83	27
SHGIC	1.53	178.5	6.36	6145.6	7.96	0	6.36	138.5	8.1	27
MOJN	24.44	0	40.18	0	18.62	0	42.2	0	33.25	0
MOMS	32.9	0	64.917	0	75	13.	67.3	7	82.77	10.8
EDEC	310.83	0	40.18	0	0	0	1127	0	396.2	0
EAVR	820.15	0	64.917	0	182.3	0	2747	0	1146.1	0
EDECH					0	0			755.32	0
EAVRH					995.9	0			2493.8	0
PF	-1.04	0	-1.5	0	-0.8	0	-1.8	0	-1.41	0
PFH					-4.3	0			-4.04	0
ASS	1.04	2490.2	1.71	2271	0.8	0	1.8	2312	1.41	1568
ASSH					4.	772			4.04	1568
SGR	0	EPS	0	EPS	0	EPS	0	EPS	0	EPS
SAS	0	0	0	56.67	0	0	0	11	0	12.35
SGG	0	688	0	225.87	0	688	0	150.8	0	175.7
TRES	3000	0.24	5000	0.51	8000	1.7	6000	0.4	10000	1.15
SEC	1.04	0.00	7.57	0.00	3.63	-53.89	10385	0.00	5.455	0.00

Avec NUR : le niveau d'utilisation des ressources et CO : le coût d'opportunité.

### ***a - Interprétation des résultats***

#### **a.1 - Les types 1 et 2**

***La solution de base:*** ce sont les activités de blé en gravitaire, la pastèque en Goutte à goutte puis le blé en sec. Il y a aussi la fève en gravitaire pour les exploitants du type 2.

***Les coûts de substitution :*** Pour les activités qui restent hors de la base, il y a l'olivier qui dont le coût de substitution est très élevé dans chaque technique d'irrigation (525 DT), ensuite la fève conduit en aspersion (35 DT pour le type 2 et 240 DT pour le type 1), et en gravitaire (232 DT pour le type 1). L'irrigation en aspersion a un coût de substitution de 47 DT pour le type 1 et 94 DT chez le type 2. Il y a aussi la location de la terre et de la main d'œuvre qui ont un coût de substitution relativement important.

***Les coûts d'opportunité:*** ils sont très élevés pour la SAU et la Surface équipée en goutte à goutte :

- ▶ 373 DT (SAU en GIC) pour le type 1, mais 0 DT pour le type 2,
- ▶ 178.5 DT (SAU hors du GIC) pour le type 1 et 614.5 DT pour le type 2,
- ▶ 688 DT (SAU en goutte à goutte) pour le type 1 et 226 DT pour le type 2.

Les coûts d'opportunité de la surface en gravitaire est presque négligeable. Ensuite celui de la trésorerie est relativement faible c'est à dire que la contrainte n'est pas assez limitante. Autrement dit les petits exploitants préfèrent le gravitaire par rapport aux techniques modernes. Avec le gravitaire ils font beaucoup du Blé et rarement de la fève. Le goutte à goutte est faiblement utilisé pour faire la pastèque. Le profit s'améliore avec l'adoption de certaines techniques modernes: il est de 4190 DT chez les exploitants 1 et 7709 DT chez les exploitants 2. Mais si l'exploitant augmentait sa surface en goutte à goutte, il gagnerait plus sur la marge.

#### **a.2 - Les types 3, 4 et 5**

Ces trois types se comportent tous de la même façon :

***La solution de base :*** Parmi les solutions de base on cite les activités de pastèque conduite gravitaire et du blé conduit en sec. Chez le 4 et 5, Il y a en plus le blé en gravitaire. Donc seule l'irrigation en gravitaire reste dans la base parmi toutes les techniques.

***Les coûts de substitution :*** Concernant l'adoption de l'aspersion ce coût est de 458.7 DT chez les exploitants 3, 109.9 DT chez les exploitants 4 et 858 DT chez les exploitants 5. Ce coût est moins élevé pour l'adoption de la goutte à goutte. Mais quand il s'agit de faire l'olivier toutes les techniques ont des coûts de substitution très élevés.

Les coûts d'opportunité : ce coût est très élevé pour le goutte à goutte et faible pour les autres techniques. Par contre la trésorerie devient de plus en plus contraignante car le coût est trop élevé.

### ***b - Conclusion***

On remarque que chez les grands exploitants les techniques d'irrigation économes en eau ne sont pas intéressantes. En effet ils ont de l'eau en permanence.

Pour la suite de notre analyse nous allons faire des scénarios de l'augmentation du niveau des subventions et/ou du niveau des crédits à moyen terme pour voir la réaction des agriculteurs.

### **2 3 2 2 6 7 : Scénarios : augmentation du niveau de la subvention**

**Tableau 25 : Schéma de financement proposé**

	Fonds propres(%)	Primes (%)	Crédit à Moyen et long terme(%)
Petits (A)	05	65	30
Moyen (B)	05	60	35
Gros (C)	25	70	25

D'après l'analyse des résultats nous nous rendons compte que les exploitants ne changeront pas beaucoup de choix des techniques d'irrigation, néanmoins ils augmenteront les portions à irriguer par les techniques ayant été adoptées. En général les grands exploitants resteront indifférents vis à vis de l'amélioration du niveau des subventions qui a été proposé.

Il faudra alors revoir la situation de départ : celle de la contrainte en eau. Puisque le premier modèle nous donne un coût d'opportunité égal à 0 concernant l'apport d'eau en avril, ce résultat ne fait pas l'importance qu'on accorde à l'adoption de l'économie d'eau.

Pour ressortir ce effet nous proposons de réduire encore la disponibilité en eau pour ceux qui n'ont pas de puits. D'autre part la limitation de la trésorerie cache beaucoup de réalités chez les gros exploitants. Pour corriger le modèle, nous augmenterons le niveau de trésorerie pour ces derniers. Notre analyse sera basée cette fois sur deux types d'exploitations : les T2 et les T4.

Chez le T2 l'apport d'eau en Avril va est de 500 m<sup>3</sup> au lieu de 1000m<sup>3</sup> sans changer les autres paramètres. Et chez les T4 on garde le même apport d'eau mais on fixe la trésorerie à 10000 DT au lieu de 6000.

### **Résultat du scénario (tableau 15) :**

Tableau 26 : Les activités des scénarios d'évolution des subventions

	Type2		Type 4	
	Solution de base	Coût de substitution	Solution de base	Coût de substitution
BGR	0.00	-42.70	8.93	0.00
BAS	0.44	0.00	0.00	0.00
FGR	0.33	0.00	0.00	-298.00
FAS	0.40	0.00	0.00	-303.60
PGR	0.00	-152.70	1.79	0.00
PGG	1.71	0.00	0.00	0.00
OGR	0.00	-165.00	0.00	-643.40
OGG	0.00	-138.00	0.00	-757.00
BSH	6.36	0.00	6.36	0.00
OSH	0.00	-120.40	0.00	-190.80
LTGIC	0.00	-327.00	7.13	0.00
GR	0.34	0.00	10.70	0.00
AS	0.82	0.00	0.00	-109.94
GG	1.71	0.00	0.00	-30.20

D'après ces résultats, l'agriculteur T2 adoptera toutes les techniques mais il fera mieux du goutte à goutte. Les coûts d'opportunité des superficies à irriguer par ces techniques modernes sont désormais intéressants. Donc l'exploitant a intérêt à augmenter sa superficie en goutte à goutte et en aspersion.

Pour le T4, on constate qu'il s'attache de mieux en mieux au gravitaire. Le souci majeur des décideurs étant d'arriver à son adoption totale, nous devrions imposer d'autres contraintes qui peuvent être le niveau de la nappe à ne pas dépasser. Ces nouveaux paramètres ne peuvent être pris en compte que dans les modèles d'agrégation qui feront l'objet d'autres travaux de recherches.

## ***2-4 : Les limites de la modélisation adoptée***

Tout comme les autres modèles économiques, le notre admet évidemment des limites.

En effet la théorie de modélisation agricole que nous avons élaboré pour le cas de Melelsa n'est ne suffit pas pour prendre des décisions qui s'imposent. En fait cette méthode ne peut traduire qu'une partie des informations à considérer dans un environnement agricole. Les que nous aurions pu prendre en compte pour sortir un modèle beaucoup plus fiable sont notamment : l'effet des marchés des produits agricoles parfois difficile à évaluer, l'évolution de l'investissement à long terme et d'autres contraintes environnementales non encore maîtrisées.

Etant donné que les prix des produits agricoles changent d'une année à l'autre, il serait plus intéressant de voir le comportement de l'agriculteur vis à vis de la politique des prix. D'où la prise en compte de l'aversion au risque des agriculteurs pour une chronique de rendement.

Ce modèle ne prévoit pas l'évolution de l'investissement à long terme. En fait l'étude prend en compte un pas de temps annuel. Il faudrait par la suite de ce travail voir la dynamique du système d'exploitation sur une période de plus d'une année. On peut alors faire appel à un modèle multipériodique.

La non prise en compte de certaines contraintes sur l'arboriculture ignorées à notre niveau rend notre modèle exclusif de la culture de l'olivier. Nous avons ainsi penser que l'on pouvait évaluer dans ce contexte le critère risque dans le choix des spéculations. En général les cultures maraîchères sont à haut risque alors que l'arboriculture est vu dans la pratique comme une culture qui admet moins de risque. La prise en compte de ce fait permettra d'inclure l'olivier dans la base. Mais aussi il faudra prendre en compte la fixité des superficies d'arboricultures.

Une agrégation des exploitations à l'échelle d'une région rendrait le modèle plus complet et faciliterait la prise de décisions pour notre région d'étude.

## CONCLUSION GENERALE

Le bilan des ressources en eau sur la demande sera négatif après l'an 2020. La Tunisie évolue dans une situation de plus en plus difficile de **pénurie d'eau** : d'abord une eau insuffisante (le stock ne satisfait pas les besoins agricoles, industriels et des ménages alors que ces derniers ne cessent de s'augmenter), ensuite une eau dont la qualité se dégrade.

Conscient de ce fait, l'Etat se doit de relever le défi qui consiste à mieux gérer cette ressource de plus en plus rare et dont la mobilisation devient de plus en plus coûteuse.

C'est ainsi que les pouvoirs publics accordent plus d'importance à **l'économie de l'eau surtout dans le secteur agricole qui reste encore la première consommatrice d'eau douce.**

Alors des stratégies mises en place par l'Etat se résument en trois types :

- ◆ La mise en place d'une politique d'incitation et d'encouragement à l'investissement se traduisant par les **subventions accordées aux agriculteurs, les crédits et d'autres formes d'aides** qui ont été instituées pour favoriser l'adoption des techniques d'irrigation économes en eau,
- ◆ La mise en place des institutions publiques pour la gestion de la ressource tant au niveau de l'administration qu'au niveau des bénéficiaires : il s'agit de la **création de GIH (Groupement d'Intérêt Hydraulique)** au sein du CRDA et de **GIC (Groupement d'Intérêt Commun anciennement AIC)** au niveau des agriculteurs.
- ◆ La mise en place de la législation par la **création des zones d'exploitation interdite** et par un système de **tarification de l'eau**, ceci rentre dans le cadre du programme d'ajustement structurel agricole "PASA".

En plus de ces stratégies il faut mentionner la **promotion dans la recherche sur la gestion du stock** et toutes les recherches engagées par le Ministère de l'Agriculture : Direction des Ressources en Eau, dont l'une en cours concerne la gestion intégrée de l'eau sur le bassin versant du Merguellil situé dans le gouvernorat de Kairouan, il s'agit de **MERGUSIE**.

Dans le cadre de ce projet, nous avons essayé de faire une analyse de choix des techniques d'irrigation en étudiant le comportement des agriculteurs dans un environnement qui fait face à une situation de pénurie d'eau. Ces comportements se traduisent par surtout par:

- ✓ l'acquisition des matériels d'économie d'eau c'est à dire l'adoption des stratégies conformes aux politiques officielles,
- ✓ le choix de l'investissement dans le creusage ou l'approfondissement des puits en vue de l'augmentation des disponibilités d'exploitations d'eau sans se soucier de son gaspillage,

- ✓ la réduction des superficies des cultures menées en irrigué et la réorientation des systèmes de cultures.

Pour réaliser notre analyse nous avons choisi la zone de Malelsa parmi les 3 GIC en étude dans le Gouvernorat de Kairouan (Bled Abida, Souadia, Melalsa).

Il s'agissait de concevoir un modèle économique des exploitations agricoles en partant de la situation actuelle et voir son évolution dans l'avenir en tenant compte des objectifs envisagés par l'Etat : celui de mieux gérer la demande en eau et de maîtriser l'exploitation de la nappe aquifère de la région de Kairouan qui voit son niveau baisser tous les ans .

Nous sommes partis alors des enquêtes sur la région concernée pour faire une typologie à cinq types d'exploitations nettement distincts. Ceci a été fait sur la base de 3 critères fondamentaux se traduisant par les variables de fonctionnement et de structure de nos exploitations : la taille de l'exploitation, la présence ou pas de puits dans l'exploitation ainsi que le débit de pompage, et sa localisation par rapport au GIC.

En partant de la programmation linéaire à l'aide du logiciel informatique "GAMS", nous avons représenté trois types de modèles dont le modèle de base, le modèle de base dans les contions de stress et le modèle de base qui simule avec les différentes techniques d'irrigation présentes ou non.

D'après les résultats de ce modèle, les exploitants qui n'ont pas de puits et qui s'approvisionnent à partir du sondage sont prêts à abandonner les techniques traditionnelles (ie gravitaire) au profit des techniques modernes (la goutte à goutte et l'Aspersion) compte tenu de leurs les avantages.

Avec ces techniques ils feront mieux les cultures maraîchères qui sont beaucoup plus rentables et le blé (cas de l'aspersion). Mais pour les adopter il y a les contraintes financières qui les bloquent. Face à cette situation c'est l'amélioration des politiques d'incitation et d'encouragement en place qui peut les encourager à s'y investir. Nous avons ainsi proposé d'arriver à 65 % de la subvention du coût d'investissement des matériels. Cela paraît intéressant pour les irriguants dans l'adoption du Goutte à goutte et de l'aspersion.

A propos du choix des cultures, l'olivier et la fève conduite en irrigué ne profitent pas à l'agriculteur. Nous pouvons ainsi expliquer ce comportement par le fait que l'olivier résiste à des conditions climatiques très difficiles (rareté de l'eau). C'est absurde pour l'agriculteur d'investir dans l'irrigation d'une telle culture.

Les exploitants moyens et grands disposant d'au moins un puits dans leur exploitation n'accordent pas suffisamment d'importance à l'économie de l'eau, même si on améliorerait la subvention ou le crédit accordé aux irriguants. Ils trouvent leur compte dans le choix du gravitaire car investir pour une technique très coûteuse selon eux est une forme de fuite de leur

trésorerie. Ce qui peut les intéresser pour adopter les techniques modernes, c'est la réduction des besoins en main d'œuvre et la fertigation à prendre en compte pour les autres modèles.

D'autre part, cette analyse nous définit clairement la règle d'arbitrage à adopter entre différentes cultures qu'on irrigue dans une situation de pénurie. Il nous dit de faire d'apporter suffisamment de l'eau par ordre de priorité à la pastèque, le blé, la fève puis l'olivier. A chaque fois il faut satisfaire la précédente avant de penser à la suivante.

En définitif, il faudrait voir le comportement de tous les acteurs autour du problème d'eau, notamment l'exploitant, les gestionnaires et l'Etat. Car il est vrai que l'investissement dans la technique d'irrigation n'est pas toujours profitable pour tous les exploitants surtout ceux qui ont les moyens de creuser leur propre puits.

Du côté de l'Etat, la meilleure façon d'atteindre les objectifs fixés dès le départ c'est de revoir les réglementations en vigueur qui régissent le système d'exploitation des nappes aquifères. L'Etat pourrait imposer en ce qui concerne la consommation de l'eau ou du creusage de puits une certaine limite à ne pas franchir, ou soit infliger des sanctions qui pourraient entraîner les changements dans les habitudes paysannes. Il devrait aussi se pencher d'avantage sur les problèmes qui handicapent les petites et les moyennes exploitations dans leur investissement dans l'acquisition des matériels d'économie d'eau. Une amélioration des crédits et d'autres formes d'aides seraient plus intéressantes.

Du côté des gestionnaires, la question de l'amélioration du taux de recouvrement des coûts de l'investissement public dans l'hydraulique devrait être revue. En effet, elle se traduit par une augmentation de 15 % par an du tarif de l'eau. Ceci a un impact négatif sur le rendement agricole et sur les périmètres irrigués.

Du côté des bénéficiaires (les agriculteurs), bien que les problèmes soient reconnus et que les actions commencent à être entreprises, il faudra focaliser l'effort beaucoup plus dans le sens d'un changement d'attitude de la part de nombreux intervenants dans le secteur de l'eau, notamment les agriculteurs irrigués. Même si ces agriculteurs n'améliorent pas leur niveau de production, l'intérêt c'est de contribuer, avec l'adoption des nouvelles techniques d'économie d'eau et du changement de certains comportements, au développement durable de l'agriculture.

Il faudrait également sensibiliser les autres acteurs économiques dont les ménages, le service du tourisme et les industries sur ce problème d'économie d'eau. En effet le comportement de ces acteurs en ce qui concerne la consommation de l'eau a des impacts indirects sur cette activité agricole.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. AL ATIRI R., 1999 : Economie d'eau et irrigation localisée dans le secteur agrumicole. CRDA Nabeul - Direction Générale du Génie Rural - Hammamet, 13 p.
2. BADUEL P. R.,: Action sur les facteurs de production et dépendance paysanne. L'exemple du développement Hydro- Agricole Tunisien, *C.N.R.S./C.R.E.S.M Aix en Provence* 705-720p.
3. BEN HAMOUDA Noaman, 1999 : Stratégie des agriculteurs irriguants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un Périmètre Irrigué dans le bassin de Merguillil en Tunisie Centrale. Master of science, CIHEAM Montpellier.
4. BEN HASSINE M., 1994 : Rapport de mission - Séminaire sur la gestion de l'eau dans l'agriculture des zones semi-arides, Zaragosse du 13 au 27 mars 1994. Tunis, 12 p.
5. BICHE (Bureau d'ingénieurs Conseils en Hydrauliques et Environnement), 1998 : Etude de la création du périmètre irrigué de Mlelsa. CRDA de Kairouan – Rapport de Factibilité, 33 p.
6. BROOKE Anthony, KENDRICK David & MEERAUS Alexander, 1992 : Release 2.25 GAMS, a user's guide – GAMS Development Corp.- The Scientific Press South San Francisco, 289p.
7. DEYBE DANIEL, 1995 : L'écriture d'un modèle mathématique à l'aide du logiciel GAMS - Support de cours - GERDAT- Unité de recherche en prospective et politiques agricoles, CIRAD- Paris 29 p.
8. DOORENBOS J. & KASSAM A.H., 1987 : Réponse des rendements à l'eau – Bulletin FAO, n° 33. Organisation des Nations Unies Pour l'Alimentation et l'Agriculture - Rome, 235 p.
9. FARHED A. Shah, David ZILBERMAN, & UJJANT Chakravorty, 1995 : Technology adoption in the presence of an exhaustible resource. The Case of Groundwater Extraction. *American journal of Agr. Econ.*, 77 (291-299p).
10. FAYSSE N., 1999 : Les institutions de gestion de l'eau et les Associations d'Intérêt Collectif pour l'irrigation dans le Gouvernorat de Kairouan. Notes de travail – Programme National Mobilisateur MERGUSIE - IRD, 70p.
11. FEUILLETTE S., LE GOULVEN P. & BACHTA M.S., 1998 : 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 (19-20 Novembre) : l'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde, Montpellier.
12. GITTINGER J. P., 1973 : Compounding and discounting tables for Project Evaluation. Economic Development Institute - International Bank For Reconstruction and Development Washington, D.C., 144p.

13. GROUPEMENT BECHTEL INTERNATIONAL INC. & SCET-TUNISIE, 1999 : Etude du secteur de l'eau - Thème 6 : La demande économique de l'eau en agriculture et le recouvrement des coûts. Rapport définitif - Ministère de l'Agriculture DGRE Tunis, 316p.
14. HAZELL PETER B. R. & NORTON ROGER D., : Mathematical programming for economic analysis in agriculture - Macmillan publishing company New York, Collier Macmillan publishers London.
15. KEFI M., 1999 : Estimation de la rente économique de l'eau dans les PPI de Chébika-Kairouan. Projet de fin d'études d'ingénieur - INAT, 62p + Annexes.
16. LE GOULVEN P. & RUE T., 1996 : Rapport de mission en Tunisie, IRD.
17. MINISTERE DE L'AGRICULTURE, 1997 : Le développement des ressources Naturelles, neuvième plan de développement économique et social (1997-2001). Rapport général, 82p.
18. MORARDET Sophie, 1999 : Rapport des travaux de recherche. CEMAGREF - Montpellier.
19. NETO MIGUEL, PINHEIRO ANTONIO & CARVALHO LEONOR, 1998 : Irrigation Technology Adoption: Multi-period approach. *MEDIT (Prospettive e proposte mediterranee - Rivista di Economia, Agricoltura e Ambiente)* Vol. 9 n° 1, 20-25p.
20. REHIF N., 1998 : Analyse de l'investissement privé en matériel d'économie de l'eau d'irrigation. Etude de cas : Périmètre irrigué de Teboulba. Mémoire de fin d'études du cycle.

## PLAN D'ANNEXES

**Annexe I : Les données d'enquêtes et la Typologie des exploitants de Melalsa**

**AnnexeIIA : Modèle simple de base : exploitation du type 1**

**AnnexeIIB : Modèle simple de base : exploitation du type 2**

**AnnexeIIC : Modèle simple de base : exploitation du type 3**

**AnnexeIID: Modèle simple de base : exploitation du type 4**

**AnnexeIIE: Modèle simple de base : exploitation du type 5**

**AnnexeIIIA : Données des coefficients de stress hydrique des cultures de la région de Melalsa**

**AnnexeIIIB : Besoin en eau des plantes : région de Kairouan**

**AnnexeIIIC : Modèle de base dans les conditions de stress hydrique (Melalsa type 1)**

**AnnexeIIID : Modèle de base dans les conditions de stress hydrique (Melalsa type 2)**

**AnnexeIIIE:Modèle de base dans les conditions de stress hydrique (Melalsa type 3)**

**AnnexeIIIF: Modèle de base dans les conditions de stress hydrique (Melalsa type 4)**

**AnnexeIIIG : Modèle de base dans les condition de stress hydrique (Melalsa type 5)**

**AnnexeIVA: Fiche technique d'investissement dans les matériels d'irrigation par différentes catégories d'agriculteurs.**

**Catégories A**

**Catégories B**

**Catégories C**

**AnnexeIVB: Modèle de simulation des techniques d'irrigation (type 1)**

**AnnexeIVC: Modèle de simulation des techniques d'irrigation (type 2)**

**AnnexeIVD: Modèle de simulation des techniques d'irrigation (type 3)**

**AnnexeIVE: Modèle de simulation des techniques d'irrigation (type 4)**

**AnnexeIVF: Modèle de simulation des techniques d'irrigation (type 5)**

**AnnexeV: Les fichiers de sorties de la Programmation linéaire.**