

**Les Déterminants de l'adoption des techniques d'économie d'eau d'irrigation en Tunisie
Etude de cas du périmètre de Fej Rouissat - Kairouan**

Ayoub FOUZAI ^a, Mohamed Salah BACHTA ^b

^a Etudiant Mastère: Département d'Economie Rurale – I.N.A Tunisie.

^b Professeur : Département d'Economie Rurale – I.N.A Tunisie

RESUME

L'examen du bilan actuel de l'eau de la Tunisie résultant d'une demande sans cesse croissante et d'une offre en stagnation permet de constater une situation de stress hydrique, une dotation de près de 450m³/an/habitant. Le secteur irrigué, le plus grand consommateur de cette ressource (80 %) serait le premier concerné par cette situation. Pour réduire les effets de la pénurie d'eau sur l'agriculture irriguée, les pouvoirs publics ont conçu et mis en œuvre depuis 1995 un programme national d'économie d'eau. D'importantes incitations positives ont été décidées pour encourager les agriculteurs à adopter les nouvelles techniques d'irrigation proposées par ce programme. Force est de constater que malgré l'importance des subventions accordées à l'investissement en équipement d'économie d'eau (60% du montant investi), les taux d'équipement sont restés en deçà des objectifs attendus, en particulier en ce qui concerne l'irrigation localisée.

Le présent travail cherche à expliquer la faible progression du programme d'économie d'eau et ce en analysant les décisions d'adoption des techniques proposées par les agriculteurs. La modélisation de l'adoption de l'irrigation localisée est retenue comme le cadre méthodologique du travail réalisé. C'est ainsi que trois modèles économétriques différents mais complémentaires ont été spécifiés et estimés; C'est ainsi qu'un modèle *Logit* a permis d'identifier les variables explicatives de l'adoption de l'irrigation localisée; Le deuxième modèle *Logit Ordonné* a déterminé les effets des variables explicatives précédemment identifiées sur chaque niveau d'adoption de l'irrigation localisée; le troisième modèle *Tobit* simple pour estimer l'effet marginal des variables sur l'intensité de l'adoption technologique de l'irrigation localisée.

Les données utilisées pour l'estimation des trois modèles spécifiés sont collectées par enquête réalisée auprès de 113 agriculteurs appartenant à un périmètre irrigué privé dans la zone de Fej Rouissat- Gouvernorat de Kairouan.

Les résultats obtenus montrent que des variables sociodémographiques et techniques ont avoir un pouvoir explicatif important de la décision d'adoption de l'irrigation localisée. L'existence de telles variables relativise donc la portée des incitations utilisées comme instruments économiques pour orienter les décisions des agriculteurs.

Mots clefs: agriculture irriguée, périmètre privé, adoption technologique, irrigation localisée, modèle *Logit*, modèle *Logit Ordonné*, modèle *Tobit*.

ABSTRACT

The examination of the current water assessment in Tunisia resulting from an unceasingly increasing demand and a stagnant supply testifies the presence of hydrous stress situation, with a quota of almost 450m³/year/inhabitant. The irrigated sector, which is the largest consumer in hydrous resources (80 %), arouses all the interest of the public authorities' interventions. since 1995, the authorities have conceived and implemented a national program of water saving to reduce the effects of the water shortage on the irrigated agriculture. In fact, significant incentives were taken to encourage the adoption of new irrigation techniques. However, in spite of the importance of the granted subsidies in water saving equipments (60% of the invested amount), the rate of equipment has not yet reached the targets laid out in advance, particularly the drip irrigation.

The objective of the present work is to explain the weaknesses in the progression of the water saving program through the decision analysis of the adopted techniques applied by farmers. The present framework is based on a modeling of choice adoption of the drip irrigation. Thus three different but complementary econometric models were specified and estimated; *a Logit model* has to identify the explanatory variables of the adoption of the drip irrigation; The second model *Ordered Logit* determined the effects of the explanatory variables previously identified on each level of adoption of the drip irrigation; and the third simple *Tobit* model was established to consider the marginal effects of the variables on the degree of technological adoption of the drip irrigation.

For that purpose, a survey has been carried out around 113 farmers belonging to a private irrigated area in the zone of *Fej Rouissat* (Gouvernorat of Kairouan). Results show that socio-demographic and technical variables explain significantly the decision of adoption of the drip irrigation. The existence of such variables make relative the extent of the incentives used as economic instruments to guide the farmer's decisions.

Key words: irrigated agriculture, private perimeter, technology adoption, drip irrigation, *Logit* model, *Ordered Logit* model, *Tobit* model.

INTRODUCTION

Pour régulariser et intensifier la production de son secteur agricole, la Tunisie s'est engagée, dès les années 1960, dans une politique de mobilisation de ses ressources hydriques et de création de périmètres irrigués. Durant les années 1970, trois plans directeurs de l'eau, de la région du Nord, du centre et du Sud, ont permis d'identifier et d'affecter les principales ressources mobilisables. En complément à ces efforts d'aménagement de l'espace, un cadre législatif adéquat a été adopté (le code des eaux promulgué en Mars 1975) dont la principale innovation est la reconversion du droit de propriété de l'eau par les agriculteurs en droit d'usage.

Ces efforts ont permis la mobilisation de 2,2 Milliards de m³ d'eau de surface et 1,8 Milliard de m³ d'eau souterraine, soit un taux de mobilisation global des ressources inventoriées de 88 % en 2005. La projection à l'horizon 2015 de ce taux de mobilisation le situe autour de 96 %, soit en terme de volume 2,5 Milliards de m³ d'eau de surface et 1,9 Milliard de m³ d'eau souterraine.

Les volumes mobilisés ont permis de faire passer les superficies irriguées de 65 000 ha en 1960 (première évaluation de la superficie irriguée) à 243 000 ha en 1985, à 340 000 ha en 1995 et à près de 400 000 ha actuellement. La gestion de ce potentiel de production a été assurée par des mécanismes de prise de décision collective fondés sur l'intervention de l'état représenté par l'administration publique (Bachta, 2005).

Avec la fin des années 1980, la Tunisie, pour faire face à une mobilisation qui atteint ses limites physiques et qui suscite des investissements de plus en plus lourds, a entrepris un important programme de modernisation des périmètres irrigués visant à gérer la demande d'eau d'irrigation. C'est ainsi que des instruments techniques, économiques et institutionnels ont été mis en œuvre.

Pour réduire le gaspillage de l'eau et inciter les agriculteurs à améliorer sa valorisation, le tarif de l'eau de l'eau d'irrigation appliqué dans les périmètres publics irrigués a connu depuis 1990 une augmentation annuelle de l'ordre de 9% en terme réel et 15 % en terme nominal.

Par ailleurs, les périmètres privés ont fait l'objet de plusieurs mesures restrictives vis-à-vis l'accès libre à la ressource. Ainsi, l'administration a procédé par l'instauration des périmètres de sauvegarde (Kairouan, Cap Bon,...) puis l'incitation à l'électrification du matériel de pompage pour mieux contrôler les volumes pompés. Mais le manque de suivi, laisse un champ libre aux usagers pour contourner ces mesures.

Pour réduire les pertes d'eau sur les exploitations, la Tunisie a entamé un programme d'économie d'eau d'irrigation lancée en 1995 dont l'objectif est d'améliorer les systèmes d'irrigation par l'adoption de techniques à efficacité élevée. Des encouragements sous forme prêts et de subvention (jusqu'au 60% montant global de l'investissement en équipement d'économie d'eau) ont été mis en œuvre.

La conception de ces incitations a cherché à réduire l'effort de financement à consentir par les agriculteurs lors de l'adoption des nouvelles techniques d'irrigation. Cette conception a supposé que la capacité de financement de l'agriculteur de l'investissement en économie d'eau constitue la contrainte majeure à l'adoption de l'irrigation localisée.

La revue de la littérature sur les impacts des technologies d'irrigation localisée permet de justifier son emploi *(i)* en tant que moyen d'économie de l'eau d'irrigation ce qui permet d'éviter les crises imminentes de l'eau (Polak et al 1997; Shah et Keller 2002; Narayanamoorthy 2003), *(ii)* comme stratégie d'amélioration de l'efficacité de l'irrigation, augmenter les produits et réduire les charges, notamment chez les petites exploitations, *(iii)* pour garantir une certaine sécurité alimentaire des ménages ruraux et ce, en augmentant les rendements des cultures pratiquées (Bilgi 1999; Upadhyay 2003; Upadhyay 2004), et *(iv)* en tant que moyen d'utiliser un potentiel hydraulique limité sur une surface cultivée plus grande, particulièrement pendant les années de sécheresse.

L'adoption de la nouvelle technologie d'économie d'eau d'irrigation est souvent citée comme la voie à l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de la ressource. Une telle adoption permet de

faire face aux baisses des dotations d'eau tout en maintenant les niveaux courants de la production (Cason et Uhlaner., 1991; Green, Sunding, Zilberman et Parker, 1996).

L'hypothèse de travail de cette recherche considère que la contrainte de financement n'est pas le seul déterminant de la décision d'adoption et que son pouvoir explicatif varie selon les exploitations considérées. Les faibles taux d'adoption des techniques proposées sont de nature à étayer notre hypothèse de travail. L'objet de cet article est d'identifier les déterminants de l'adoption de l'économie d'eau et d'en estimer les pouvoirs explicatifs respectifs. La technique de l'irrigation localisée a constitué l'objet de cette recherche. Ce choix est justifié par le fait qu'elle peut être considérée comme la technologie d'introduction récente et qu'elle garantit l'efficience la plus élevée. Le reste du texte est structuré autour de deux sections assorties d'une conclusion. Alors que la première section est dédiée à la méthodologie, la deuxième présente le travail empirique.

1. Cadre méthodologique retenu.

1.1. Les modèles utilisés

Il convient de rappeler que le travail de recherche vise essentiellement à répondre à deux questions. Premièrement, *quels sont les déterminants de la décision d'adoption de la technologie d'irrigation localisée ?* Deuxièmement, *quels sont les facteurs qui déterminent la superficie équipée en économie d'eau dans une exploitation donnée ?*

Le choix d'adoption d'une technologie d'économie d'eau est une décision de type **oui** ou **non**, ce qui signifie qu'il faut un modèle limité de variable indépendante. De tels modèles existent et ont été largement développés. En effet, les modèles *Probit* et *Logit* ont été élaborés et utilisés pour étudier des problèmes de choix avec des variables dépendantes du type binaire.

Le niveau d'utilisation de la nouvelle technologie peut fournir une mesure quantitative de l'ampleur de l'adoption quand la nouvelle technologie est divisible, c.-à-d. que l'adoption peut être approximée par une variable pouvant prendre plusieurs valeurs, une variable discrète. Une telle manière d'exprimer la variable dépendante permet, dans le cas de l'adoption de la technologie d'économie d'eau, d'envisager une explication des taux d'adoption. Les modèles multinomiaux ordonnés, appelés aussi modèles polytomiques (*Logit* ordonné, *Probit* ordonné) permettent de modéliser, non pas la probabilité d'adoption, mais plutôt le niveau d'adoption. Le *Logit* ordonné estimé fait appel à des modalités (1,2,..,k). Ces modalités traduiront les différents intervalles d'adoption de l'irrigation localisée.

La variable dépendante qui traduit les superficies équipées en irrigation localisée par rapport à la superficie agricole utile doit être doublement censurée, à gauche dans la mesure où elle admet une limite inférieure égale à zéro, et à droite dans la mesure où elle ne peut pas prendre des valeurs supérieures à l'unité. Cette particularité de la variable exprimant l'intensité d'adoption peut être utilement prise en compte la mise à profit d'un modèle *Tobit* qui corrige le biais des données censurées.

Les modèles *Logit*, *Logit* multinomial et *Tobit* nous permettent d'évaluer respectivement :

(i) la contribution de ces variables indépendantes au comportement en matière d'adoption (c'est-à-dire la probabilité qu'un exploitant adopte) et le niveau d'adoption (probabilité qu'un exploitant adopte à un seuil donné).

(ii) le pouvoir explicatif des variables indépendantes à l'égard de la performance en matière d'adoption (c'est-à-dire le pourcentage d'adoption de l'irrigation localisée dans l'exploitation agricole).

1.2. Les variables considérées

1.2.1. Les variables dépendantes

Variable dépendante pour le modèle Logit (Y_1):

En général, le résultat d'une observation binaire est appelé "succès" ou "échec". Il est représenté mathématiquement par une variable aléatoire Y , dans notre cas, $Y_1 = 1$ s'il y a adoption de l'irrigation localisée et $Y_1 = 0$ s'il n'y a pas d'adoption. Cette variable a une distribution de Bernoulli, et on note $p = P(Y_1 = 1)$ probabilité d'adoption; donc $P(Y_1 = 0) = 1 - p$.

Variable dépendante pour le modèle Logit ordonné (Y_2):

La variable expliquée est une variable qualitative polytomique dont les valeurs peuvent être logiquement ordonnées. Dans notre cas, on suppose l'existence d'une variable continue inobservable d'adoption et l'on considère désormais trois seuils d'adoption C_1 , C_2 et C_3 , ce qui permet de générer quatre modalités (quatre intervalles de niveaux d'adoption) :

- Le 1^{er} intervalle pour un niveau d'adoption strictement inférieur à 3% ;
- Le 2^{ème} intervalle pour un niveau d'adoption compris entre 3% et 20% ;
- Le 3^{ème} intervalle pour un niveau d'adoption compris entre 20% et 30% ;
- Le 4^{ème} intervalle pour un niveau d'adoption supérieur à 30% .

Variable dépendante pour le modèle Tobit (Y_3):

Du fait de l'importance de la proportion des cas observés de non adoption de l'irrigation localisée, valeur nulle de la variable endogène, l'estimation du modèle décisionnel Tobit (Tobin, 1958 et Greene, 2001) se base sur une variable à expliquer continue. Elle prendra la valeur 0 en cas de non adoption.

Elle est représentée par le niveau d'utilisation de la technologie d'économie d'eau, à savoir l'irrigation localisée au cours de la campagne 2004. Il est exprimée comme étant la proportion de la superficie totale qui est équipée en matériel d'irrigation localisée. Cette variable présente une double censure, une censure à gauche à la valeur 0 et une deuxième à droite à 80 %.

1.2.2. Les variables explicatives : nature et effets anticipés

Les variables explicatives ont été identifiées en se référant aux hypothèses avancées dans ce travail concernant l'adoption de la nouvelle technologie d'économie d'eau et bien évidemment la diffusion de cette nouvelle technologie. Le choix des variables est basé aussi sur les informations obtenues de l'enquête menée dans la zone d'étude.

Les résultats des travaux identifiés sur l'adoption des innovations agricoles et le contexte du milieu d'étude permettent de cerner les facteurs qui gouvernent l'adoption d'une nouvelle technologie d'économie d'eau. Ces derniers sont classés trois catégories, les facteurs économiques, ceux d'ordre sociodémographiques et d'autres de nature technique.

. Facteurs économiques

Revenu total (RAGTOT): C'est une variable qui mesure en dinar tunisien (D.T) le montant annuel des revenus provenant de la vente des produits agricoles et qui est en relation avec la taille de l'exploitation et le système cultural (revenu agricole). On s'attend à ce que cette variable ait un effet incidence positive sur la probabilité d'adoption de l'irrigation localisée.

. Facteurs sociodémographiques :

Mode de tenure foncière (PROPTER) : Un exploitant n'ayant pas un titre de propriété sera peu incité à consentir un investissement dans l'économie d'eau.. La tenure de la terre aura une incidence négative sur l'adoption des technologies. Elle est représentée par une variable binaire

Age de l'exploitant (AGE) : Les agriculteurs les plus âgés ont le plus souvent des horizons de planification plus courts, d'où un taux d'actualisation élevé qui réduit la valeur actuelle des rendements des investissements réalisés dans la conservation de la ressource. Il y a tout lieu de croire qu'ils seront hostiles au changement et aux nouvelles technologies. D'après Bultena et Hoiberg (1983), les jeunes agriculteurs ont plus de chance d'être instruits et ont des taux d'actualisation moins élevés et peuvent par conséquent tirer un rendement plus élevé de l'investissement réalisé dans l'acquisition des technologies. On suppose donc que l'âge a un rapport négatif sur l'adoption des technologies. L'âge de l'exploitant est exprimé en années.

Main d'œuvre familiale (MOF): Il est évident que la technologie d'irrigation localisée, en dépit de son rôle de conservation des ressources hydriques et amélioration des rendements, est réductrice du nombre de jours de travail nécessaire à la réalisation de cette pratique culturale. On admet l'hypothèse que cette variable a une incidence positive sur l'adoption de la technologie d'économie d'eau. Elle mesurée par le nombre de jours de travail par campagne agricole que la famille peut assurer.

Niveau d'instruction (NIVOUV) : C'est une variable qui traduit le niveau d'ouverture chez l'exploitant, présentée sous forme d'indice, cette variable traduit (*i*) le niveau d'instruction de l'agriculteur ainsi que les formations qu'il a reçues. On suppose que l'éducation et l'alphabétisation, la sensibilisation à la dégradation des ressources naturelles ont un apport positif avec l'adoption des technologies et la production durable. L'éducation améliore également les capacités de gestion qui sont souvent nécessaire à l'exploitant pour incorporer la nouvelle technologie d'économie d'eau.

Visites techniques des vulgarisateurs (VISTECH) : Cette variable reflète le contact avec les vulgarisateurs du ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques. Ce corps technique, assume la tâche de la diffusion de l'information. Le rôle de l'information dans la réduction des incertitudes et des erreurs de répartition dans le processus d'adoption des technologies a fait l'objet de nombreuses études (Feder et Slade, 1984; Feder et al. 1985). La disponibilité de l'information sur les méthodes et les technologies nouvelles permettant de mieux appréhender l'impact de celles-ci sur la productivité et l'environnement contribuera à la prise de décisions en matière de production et favorisera, dans le même temps, une planification efficace de l'utilisation des ressources naturelles. Par conséquent, le rôle des services de vulgarisation dans la diffusion des informations est un facteur qui influence positivement l'adoption des technologies d'économie d'eau. Cette variable a été présentée sous une forme binaire ; zéro si l'exploitant ne reçoit pas de visites et 1 s'il y en a des visites fréquentes.

. Facteurs techniques :

Superficie agricole utile (SAU) : Cette variable est traduite en hectare (ha) et désigne la superficie totale exploitée en sec et en irrigué.

Superficie céréalière (SUPCER) : Cette variable traduit la superficie des cultures céréalières. Elle est exprimée en hectare. Sa présence est justifiée par l'hypothèse qu'une superficie importante en céréaliculture, malgré une consommation importante en eau, aura une incidence négative sur l'adoption d'une nouvelle technologie d'économie d'eau. L'observation de terrain milite en faveur d'une telle hypothèse.

Superficie arboricole (SUPARB) : Il s'agit de la superficie arboricole exprimée en hectare observée sur l'exploitation. Une telle orientation culturale encourage la mise en place d'un équipement d'économie d'eau. Elle aura donc un effet positif sur l'adoption d'une nouvelle technologie d'économie d'eau.

Superficie maraîchère irriguée (SUPMAR) : c'est la superficie des cultures maraîchères en menées en irrigué. Il est évident que de telles spéculations augmentent les besoins en eau de

l'exploitation. Dans ces conditions, l'adoption d'une nouvelle technologie d'économie d'eau est une décision économiquement fondée. Elle permet d'économiser l'eau et d'améliorer les rendements de cultures à haute valeur marchande.

Prise de conscience de la pénurie de la ressource (CONSEAU) : deux modalités sont considérées pour approcher cette variable, variable binaire prenant la valeur unitaire s'il y a prise de conscience, et zéro autrement. Ces modalités sont déduites des réponses des agriculteurs vis-à-vis la disponibilité en eau obtenues lors des enquêtes effectuées. D'une manière générale, les agriculteurs croient le plus souvent qu'il est d'améliorer les débits de leurs forages par des approfondissements successifs et par un matériel de pompage de plus en plus en plus performants. D'autres agriculteurs semblent être informés de la surexploitation de la nappe et de ses limites à faire face aux sollicitations exprimées.

Accès à l'eau par puit de surface (ACCP) : L'accès à la ressource via un puits de surface est l'une des caractéristiques du périmètre privé irrigué de Fej Rouissat, d'autres modes d'accès sont enregistrés dans la zone (Source, pompage dans le barrage collinaire), mais ces différents types de modes d'accès coexistent dans la majorité des exploitations avec l'irrigation par puits de surface. On s'attend à ce que ce mode d'accès à l'eau aura une incidence positive sur l'adoption, en fait le rabattement de la nappe dans la zone d'étude contraint de plus en plus l'activité agricole, cette situation amène les agriculteurs à maximiser la superficie irriguée, chose possible avec un équipement d'économie d'eau. (0 = si l'accès n'existe pas, 1 = si oui).

Techniques alternatives d'irrigation (IRRASP, IRRRA): L'irrigation par aspersion et à la raie sont encore présentes dans la zone d'étude. Etant donné la difficulté de déterminer avec une précision acceptable les superficies effectivement irriguées par ces deux techniques, leur présence est exprimée à travers un codage binaire, zéro dans le cas de leur absence et un autrement.

3. Travail empirique

3.1. La zone d'étude

3.1.1. Présentation générale

Le choix s'est fixé sur la zone de Fej Rouissat, qui fait partie de la délégation de Chebika, gouvernorat de Kairouan. Cette zone est située à 20 km à l'ouest de la ville de Kairouan. Sa population est estimée à environ 10 000 habitants. L'activité économique y est presque exclusivement représentée par l'agriculture. Compte tenu du caractère semi aride de son climat, l'irrigation et partant l'eau constitue un moyen privilégié de régularisation et d'intensification de l'activité agricole et partant des revenus des ménages.

3.1.2. Répartition des exploitations par mode d'accès à l'eau

Les agriculteurs de la zone de Fej Rouissat sont organisés en deux Groupements de Développement Agricole (GDA) : un GDA pour les exploitations situées sur la rive droite de l'oued Fej Rouissat et un deuxième pour les exploitations de l'autre. On rencontre dans la zone de Fej Rouissat principalement cinq modes d'accès à l'eau : les puits de surface, les forages, les groupes de pompage dans le barrage collinaire, les sources et les ouvrages d'épandage.

L'administration a recensé sur la rive droite 164 puits de surface, 4 forages, 27 épandages, 7 pompes directs dans l'oued (Groupe Moto Pompe). Sur la rive gauche, on dénombre 72 puits, 6 forages, 33 ouvrages d'épandages, 2 sources et 6 pompes directs dans l'Oued. Le tableau N°1 illustre la taille de l'échantillon par mode d'accès à l'eau.

Tableau 1: Taille de l'échantillon retenu et composition de modes d'accès à l'eau

	Puits	Forages	GMP	Source	Total
Echantillon	91	9	10	3	113
Total zone	236	10	13	4	263
Echantillon/zone (%)	39%	90%	77%	75%	43%

Source : Dépouillement de l'enquête

3.1.3. Enquête effectuée et données collectées

Après des 113 exploitations composant l'échantillon, une enquête par questionnaire a été conduite. Le contenu du questionnaire utilisé est structuré autour de 3 modules. Le premier module s'intéresse essentiellement à l'identification socio-économique de l'exploitant et du ménage. Dans le deuxième module on a essayé de cerner toutes les caractéristiques de l'exploitation ainsi que tout les détails techniques y compris la main d'œuvre agricole et enfin dans le troisième module a été destiné à la composante hydrique dans l'exploitation ainsi que le comportement de l'exploitant (processus de prise de décision) en terme de gestion de cette ressource.

3.2. Estimation des modèles et interprétation des résultats

3.2.1. Estimation du modèle Logit

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'adoption s'est réalisé pour l'exploitant } i \\ 0 & \text{si l'adoption ne s'est pas réalisé pour l'exploitant } i \end{cases}$$

Le codage $[0,1]$ est traditionnellement retenu pour les modèles dichotomiques. En effet, celui-ci permet définir la probabilité de survenue de l'événement comme l'espérance de la variable codée Y_i , puisque :

$$E(Y_i) = \text{Prob}(Y_i=1) \times 1 + \text{Prob}(Y_i=0) \times 0 = \text{Prob}(Y_i=1) = P_i$$

La probabilité P_i d'adoption de la technologie de l'irrigation localisée est donnée par:

$$P_i = \text{Prob}(Y_i=1) = \text{Prob}(Y_i^* > 0) = \text{Prob}(\beta'X_i + \varepsilon_i > 0) = (\text{Prob } \varepsilon_i > -\beta'X_i)$$

La loi de ε_i détermine la distribution de F et le type de modèle. En supposant une distribution symétrique de ε_i comme c'est le cas pour la loi logistique, on obtient:

$$P_i = \text{Prob}(\varepsilon_i < \beta'X_i) = F(\beta'X_i)$$

Le modèle dichotomique **Logit** admet pour variable expliquée, non pas un codage quantitatif associé à la réalisation d'un événement (comme dans le cas de la spécification linéaire), mais la probabilité d'apparition de cet événement, conditionnellement aux variables exogènes. Ainsi, on considère le modèle suivant :

$$P_i = \text{Prob}(y_i = 1 | X_i) = F(X_i\beta)$$

Où la fonction $F(.)$ désigne une fonction de répartition, on utilise pour le modèle **Logit** la fonction de répartition de la loi logistique. C'est à cette fonction que revient le nom attribué à ce modèle.

Le modèle *Logit* dichotomique univarié que nous avons utilisé a été estimé par la méthode du maximum de vraisemblance. Toutefois, la fiabilité des paramètres estimés (convergence et normalité asymptotique) par cette méthode repose sur le caractère aléatoire et indépendant des variables explicatives utilisées ; ce qui suppose que leurs valeurs sont déterministes et donc bornées.

Les coefficients estimés β sont essentiellement des pentes de régression. Un coefficient positif indique qu'un accroissement de la variable indépendante accroît la probabilité d'adoption de l'économie d'eau. À l'inverse, un coefficient négatif décroît cette probabilité et, par conséquent, diminue la probabilité d'occurrence de cet événement.

Interprétation des résultats du modèle Logit

Le tableau 2 représente les résultats de l'estimation du modèle *Logit* sur un échantillon de 113 exploitants dans la zone de Fej Rouissat. La variable dépendante est la variable dichotomique traduisant le fait qu'il y a ou non adoption de l'irrigation localisée dans l'exploitation. Globalement, le modèle est statistiquement valide. En effet, le Khi-Deux (χ^2) du modèle (**36,54**) est significatif à 1 %. Le pseudo-R² (**0,4512**) est satisfaisant, il approxime la proportion de la variance expliquée par le modèle, c'est un indicateur de la performance du modèle. Le pourcentage de bonne prédiction du modèle est de **84,96 %**, ce pourcentage indique que dans 84,96 % de cas le modèle prédit correctement le comportement de l'exploitant.

Tableau 2 : Résultat de l'estimation du modèle Logit

Y1	Coefficient	Odds Ratio	Erreur standard	z	P>z
RAGTOT	0,000080	1,00008	0,00003	2,76***	0,006
MOF	0,000105	1,00011	0,00076	0,14***	0,890
NIVINSTR	0,649682	1,91493	0,24854	2,61***	0,009
AGE	-0,023262	0,97701	0,01105	-2,10***	0,035
PROPTER	1,563868	4,77726	0,69671	2,24***	0,025
CONCPEAU	4,123433	61,77097	1,11356	3,70***	0,000
SAU	0,176277	1,19277	0,05445	3,24***	0,001
IRRRA	-0,445037	0,64080	0,73639	-0,60***	0,546
IRRASP	2,451051	11,60054	0,72539	3,38***	0,001
ACCP	2,153396	8,61407	0,91141	2,36***	0,018
RATCER	-0,717732	0,48786	0,41445	-1,73***	0,083
RATMAR	1,761153	5,81914	1,06081	1,66***	0,097
Constante	-10,799470	--	2,52505	2,76***	0,006

Log Vraisemblance	-38.37968	Restr.Log vraisemblance	-69.93435
Pseudo R2	0.4512	AIC	102.7594
Dep = 0	78	BIC	138.2154
Dep = 1	35		

(*) : Significatif à un seuil de 10 % ; (**) : Significatif à un seuil de 5 % ; (***) : Significatif à un seuil de 1%

Les variables présentées dans le tableau 2 sont les variables retenues pour l'estimation du modèle *Logit* de l'adoption de l'irrigation localisée dans notre échantillon.

Dans ce qui suit, la significativité des variables sera analysée et la comparaison de leurs à nos attentes sera conduite :

- Variable (RAGTOT), qui traduit le revenu agricole, présente un signe positif conforme à l'hypothèse énoncée quant à l'influence de cette variable économique sur l'adoption de

l'irrigation localisée. La variable en question est significative à un seuil de 1 %. En effet, le changement marginal d'une unité des coefficients estimés n'est pas très intuitif. L'exponentiel de ces paramètres, que l'on nomme généralement rapport de côte (Odds Ratio), facilite l'interprétation de l'effet d'une variable sur la probabilité de réalisation de la variable dépendante. Pour avoir l'effet du revenu agricole, on procède par la formule suivante : Odds ratio – 1 = pourcentage de variation de la probabilité d'adoption suite à une variation de 1 % de la variable explicative. Il paraît que l'effet d'une variation du revenu agricole sur l'adoption est insignifiant (trop petit), l'absence d'effet important de cette variable peut être à la forme sur laquelle elle a été introduite.

- La variable (NIVINSTR) : niveau d'instruction est fortement significative, à un seuil de 1%, avec un signe positif, conformément à nos attentes
- La variable (AGE) : âge du chef de l'exploitation, est significative à un seuil de 1 %, avec un signe négatif, ce résultat est conforme à nos attentes, le rapport de côte (Odds ratio) montre qu'une augmentation de l'âge de 1 %, occasionne une diminution de 0,1 % de la probabilité d'adoption de l'irrigation localisée.
- La tenure foncière (PROPTER) et la superficie agricole utile (SAU), ont un effet positif quant à l'adoption de l'irrigation localisée.
- L'irrigation par aspersion (IRRASP) présente un effet positif sur l'adoption de l'irrigation localisée, et elle est significative à un seuil de 1 %.
- La superficie céréalière (SUPCER), présente un effet négatif sur l'adoption, cette variable est significative à un seuil de 10 %.
- la variable superficie culture maraîchère (SUPMAR) a un signe positif ; cette variable est significative à un seuil de 10%. En fait, il s'agit d'une variable qui traduit bien la relation technique : irrigation localisée et cultures maraîchères.

3.2.2. Estimation du modèle Logit Ordonné

Le modèle polytomique ordonné utilisé est un modèle à choix qualitatif de type *Logit* ordonné (Abdulai et CroleReiss, 2001 ; Barret Bezuneh et Aboud, 2001). Quatre niveaux d'adoption représentant différentes intensités d'adoption ont été distingués. Ils traduisent les situations de (i) non adoption; (ii) adoption à un faible taux (Superficie équipée < 20 %) ; (iii) une adoption plutôt moyenne (20 % < Superficie équipée < 30%); et (iv) une adoption appréciable (Superficie équipée > 30%). Bien que le choix des niveaux d'adoption soit arbitraire, les modalités retenues découlent de la répartition des poids des surfaces localisées dans les exploitations enquêtées. A travers cette spécification des niveaux d'adoption on cherche à affiner l'estimation des déterminants de l'adoption. De plus, les effets marginaux des variables explicatives seront propres à chaque intervalle d'adoption. Le *Logit* Ordonné permet également une prédiction de la probabilité d'appartenance à un intervalle donné d'adoption pour chaque observation.

Le modèle *Logit* Ordonné, s'écrit sous la forme :

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } Y_i^* < C_1 \\ 2 & \text{si } C_1 \leq Y_i^* < C_2 \\ 3 & \text{si } C_2 \leq Y_i^* < C_3 \\ 4 & \text{si } C_3 < Y_i^* \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, N$$

Avec : $C_1 = 3\%$
 $C_2 = 20\%$
 $C_3 = 30\%$

Le tableau 3 présente les résultats de l'estimation du modèle *Logit* ordonné. La variable dépendante Y2 est la variable polytomique traduisant les quatre niveaux d'adoption générés

arbitrairement sous forme de modalités: 1, 2, 3 et 4 ($Y_i^* < 3\%$; $3\% < Y_i^* < 20\%$; $20\% < Y_i^* < 30\%$ et $Y_i^* > 30\%$).

Résultats et interprétation du modèle Logit Ordonné

Globalement, le modèle est statistiquement valide. En effet, le Khi-Deux (χ^2) du modèle (37,71) est significatif à 1 %. Le pseudo-R2 (0,3187) est satisfaisant, il approxime la proportion de la variance expliquée par le modèle, c'est un indicateur de la performance du modèle. Les résultats des estimations du modèle *Logit* ordonné sur la base de l'échantillon de 113 agriculteurs de la zone de Fej Rouissat sont présentés dans le tableau N° 3.

Tableau 3 : Résultat de l'estimation du modèle Logit Ordonné

Y2	Coefficient	Erreur Standard	Z	P> z
RAGTOT	0,000100	0,000027	-3,75***	0,000
MOF	-0,000520	0,000711	-0,73***	0,465
NIVINSTR	0,495582	0,216163	-2,29***	0,022
AGE	-0,018839	0,010434	-1,81***	0,071
PROPTER	1,484768	0,560489	-2,65***	0,008
CONCPEAU	4,211123	1,186144	-3,55***	0,000
SAU	0,160052	0,057763	-2,77***	0,006
IRRRA	-0,405773	0,687607	-0,59***	0,555
IRRASP	2,034799	0,596050	-3,41***	0,001
ACCP	1,962250	0,724894	-2,71***	0,007
RATCER	-0,869258	0,473754	-1,83***	0,067
RATMAR	1,983441	1,276758	-1,55***	0,120
C1	9,875587	2,639695		
C2	11,173010	2,784480		
C3	12,676880	2,932048		

(*) : Significatif à un seuil de 10 % ; (**) : Significatif à un seuil de 5 % ; (***) Significatif à un seuil de 1%

Il ressort de ce tableau que les signes des coefficients sont conformes aux attentes ; les variables (RAGTOT), (PROPTER), (IRRASP) et (ACCP) sont significatives à un seuil de 1 %. La variable (MOF), présente un coefficient à signe négatif ce qui est conforme aux hypothèses émises concernant cette variable, mais comme pour le modèle précédent elle reste non significative.

L'estimation du *Logit* ordonné permet également de dégager les effets marginaux des variables explicatives pour chaque modalité, c'est-à-dire pour chaque niveau d'adoption. Les effets marginaux seront présentés dans le tableau N°4.

Il paraît bien que les résultats présentés dans le tableau N°4 coïncident avec les hypothèses émises concernant les différences des pouvoirs explicatifs selon les niveaux d'adoption. La variable (RAGTOT) qui explique, à un degré de significativité de 1%, l'adoption à un niveau compris entre 3% et 20% (deuxième modalité retenue) n'a pas d'effet lorsqu'il s'agit d'un niveau d'adoption supérieur à 30 % (quatrième modalité). Les deux seules variables qui expliquent l'adoption à tous les niveaux sont la surface agricole utile (SAU) et la prise de conscience de la pénurie d'eau (CONCPEAU).

Tableau 4 : Effets marginaux des variables explicatives selon les niveaux d'adoption.

variable	Modalité 1			Modalité 2		
	dy/dx	z	P> z	dy/dx	z	P> z
RAGTOT	-0,00001	-4,34***	0,000	0,00001	3,65***	0,000
MOF	0,00007	0,72	0,469	-0,00005	-0,72	0,470
NIVINSTR	-0,07069	-2,54**	0,011	0,04545	2,29**	0,022
AGE	0,00269	1,89*	0,059	-0,00173	-1,72*	0,085
PROPTER*	-0,23732	-2,51**	0,012	0,14373	2,39**	0,017
CONCPEAU*	-0,54509	-4,33***	0,000	0,28923	3,63***	0,000
SAU	-0,02283	-2,93***	0,003	0,01468	2,35**	0,019
IRRRA*	0,05923	0,58	0,560	-0,03782	-0,58	0,560
IRRASP*	-0,38670	-3,34***	0,001	0,20446	2,91***	0,004
ACCP*	-0,19756	-3,29***	0,001	0,13009	3,24***	0,001
RATCER	0,12400	1,72***	0,086	-0,07972	-1,80*	0,072
RATMAR	-0,28294	-1,57	0,116	0,18190	1,40	0,160

variable	Modalité 3			Modalité 4		
	dy/dx	z	P> z	dy/dx	z	P> z
RAGTOT	0,000004	2,45**	0,014	0,0000012	1,59	0,111
MOF	-0,000020	-0,70	0,486	-0,0000064	-0,67	0,502
NIVINSTR	0,019132	2,02**	0,043	0,0061122	1,46	0,144
AGE	-0,000727	-1,66*	0,097	-0,0002323	-1,47	0,142
PROPTER*	0,069973	1,86*	0,064	0,0236156	1,45	0,146
CONCPEAU*	0,184213	2,72**	0,006	0,0716502	1,77*	0,076
SAU	0,006179	2,51**	0,012	0,0019740	1,67*	0,095
IRRRA*	-0,016201	-0,57	0,566	-0,0052065	-0,53	0,595
IRRASP*	0,132131	2,21**	0,027	0,0501038	1,61	0,106
ACCP*	0,051339	2,11**	0,035	0,0161359	1,44	0,149
RATCER	-0,033558	-1,37	0,172	-0,0107208	-1,12	0,264
RATMAR	0,076572	1,57	0,117	0,0244624	1,42	0,156

(*) : Significatif à un seuil de 10 % ; (**) : Significatif à un seuil de 5 % ; (***) Significatif à un seuil de 1%

Les effets marginaux mesurent les effets d'une augmentation d'une unité d'une variable indépendante donnée sur la variable dépendante c'est-à-dire sur la probabilité d'adoption de l'irrigation localisée.

La valeur des effets marginaux dépend de la définition des variables indépendantes. L'importance de l'effet marginal pour une variable ne peut donc pas être évaluée en comparant cet effet marginal à celui d'une autre variable. Les effets marginaux de toutes les variables de notre modèle *Logit* ordonné ont une tendance vers la baisse chaque fois qu'on passe d'un niveau d'adoption à un autre plus important.

3.2.3. Estimation du modèle Tobit

Un modèle Tobit Simple ou modèle Tobit de type I est défini par :

$$Y_i^* = X_i \beta + \varepsilon_i \quad \forall i = 1, \dots, N$$

$$Y_i = \begin{cases} Y_i^* & \text{si } Y_i^* > 0 \\ 0 & \text{si } Y_i^* \leq 0 \end{cases}$$

Avec : $X_i = (X_i^1, \dots, X_i^k)$, $\forall i = 1, \dots, N$: Vecteur des caractéristiques observables ;

$\beta = (\beta_1, \dots, \beta_k)' \in \mathfrak{R}^k$: Vecteur de paramètres inconnus ;

ε_i : Perturbations distribuées selon une loi normale $N(\mathbf{0}, \sigma_\varepsilon^2)$.

On suppose ainsi que les variables Y_i et X_i sont observées pour tous les individus, mais que les variables Y_i^* sont observables uniquement si elles sont positives.

Résultats et interprétation du modèle Tobit

Afin de mettre en exergue l'effet des variables explicatives sur l'intensité de l'adoption, l'estimation d'un modèle *Tobit* a été conduite. Les résultats de cette estimation sont présentés dans le tableau N°5.

Globalement, le modèle *Tobit* simulé est statistiquement valide. En effet, le Khi-Deux (χ^2) du modèle est égale à 65,79 et est significatif à 1 %. Le pseudo-R2 (0,5889) est de même assez satisfaisant.

Tableau 5 : Résultats de l'estimation du modèle Tobit.

Y3	Coefficient	dy/dx	Erreur Standard	t	P> t
RAGTOT	0,000012	0,00001	0,000	4,05***	0,000
MOF	-0,000022	-0,00002	0,000	-0,23	0,818
NIVINSTR	0,056813	0,05681	0,031	1,86*	0,066
AGE	-0,001592	-0,00159	0,001	-1,08	0,281
PROPTER	0,159268	0,15927	0,074	2,14**	0,034
CONCPEAU	0,520861	0,52086	0,149	3,49***	0,001
SAU	0,019616	0,01962	0,007	2,79***	0,006
IRRRA	-0,009133	-0,00913	0,079	-0,12	0,909
IRRASP	0,277481	0,27748	0,086	3,21***	0,002
ACCP	0,228996	0,22900	0,100	2,29**	0,024
RATCER	-0,128491	-0,12849	0,050	-2,59**	0,011
RATMAR	0,226140	0,22614	0,111	2,03**	0,045
_CONS	-1,267245	--	0,297	-4,26***	0,000
/sigma	0,240431	--	0,032	--	--

(*) : Significatif à un seuil de 10 % ; (**) : Significatif à un seuil de 5 % ; (***) Significatif à un seuil de 1%

La variable Revenu Agricole (RAGTOT) a un coefficient positif et présente un degré de significativité élevé au seuil de 1%. Cette variable répond à nos attentes. Il est alors clair que l'intensité de l'adoption dépend fortement du niveau de revenu de l'exploitation même si l'effet marginal est faible.

Les résultats indiquent aussi que la prise de conscience de la pénurie d'eau; variable (CONCPEAU) explique fortement l'intensité de l'adoption de la technologie d'économie d'eau d'irrigation.

Le niveau d'instruction, est positivement corrélé à la variable dépendante retenue mais seulement à un seuil de 10%. D'autres variables telles que la (SAU), l'irrigation par aspersion (IRRASP), l'accès à un puits (ACCP) et la superficie réservée aux cultures maraîchères (RATMAR) sont toutes positivement corrélées avec l'intensité de l'adoption. La variable (IRRASP) qui traduit la présence ou non de la technologie d'irrigation par aspersion au sein de l'exploitation facilite l'adoption de l'irrigation localisée. Cette variable est positivement corrélée, à un seuil de 1%, à l'intensité d'adoption.

Il est finalement logique que la superficie emblavée en céréaliculture au sein de l'exploitation (RATCER) affecte négativement l'intensité de l'adoption. Les techniques d'irrigation par aspersion sont toujours plus adaptées à ce type de culture.

Les résultats des trois modèles (*Logit*, *Logit* ordonné et *Tobit*) ont montré, malgré la différence de la les différentes spécifications de la variable dépendante, que les pouvoirs explicatifs et les signes des coefficients des variables exogènes n'ont que peu varié. Les différents modèles conçus et estimés ont générés des résultats concordants et se sont mutuellement étayés.

CONCLUSION

L'augmentation de l'efficacité des usages de l'eau, notamment par le secteur, le plus grand utilisateur est l'une des solutions à la raréfaction de cette ressource. C'est dans ce cadre de rationalisation de la consommation agricole de l'eau que l'Etat tunisien a entamé, depuis les années 90, la gestion de la demande d'eau d'irrigation. Les instruments mis en œuvre sont (i) des augmentations annuelles des tarifs d'eau et (ii) un programme national d'économie d'eau. Pour encourager les agriculteurs à adopter les techniques d'irrigation préconisées par ce programme d'économie d'eau d'irrigation, des incitations à l'investissement ont été mises en œuvre. Les résultats de ce programme sont restés en deçà des attentes.

Des modèles *Logit*, *Logit* ordonné et *Tobit* ont été sélectionnés pour expliquer la décision d'adoption des techniques d'irrigation par les agriculteurs de la zone de Fej Rouissat - gouvernorat de Kairouan.

Les résultats obtenus à partir du modèle *Logit* montrent l'importance des variables économiques, sociodémographique et techniques dans l'explication de la décision d'adoption. Le niveau d'instruction, l'âge, la tenure foncière, l'accès à un puits, l'existence de l'irrigation par aspersion au sein de l'exploitation sont des variables significativement impliquées dans l'explication de l'adoption de l'irrigation localisée.

Le modèle *Logit* ordonné nous permet d'estimer l'effet des variables explicatives sur le niveau de l'adoption. Les résultats de ce modèle ont montré que le pouvoir explicatif des variables varie selon les niveaux d'adoption. Les deux seules variables qui expliquent l'adoption à tous les niveaux sont la surface agricole utile et la prise de conscience de la pénurie d'eau.

Finalement, l'estimation du modèle *Tobit* à variable indique que des variables telles que la prise de conscience de la pénurie d'eau, le niveau d'instruction, la SAU, l'irrigation par aspersion, l'accès à un puits et la superficie maraîchère sont toutes positivement corrélées avec l'intensité de l'adoption.

Au vu de ces résultats, les incitations à l'adoption gagnent en efficacité lorsqu'elles (i) sont accompagnées par des campagnes de sensibilisation des agriculteurs concernés à la raréfaction de l'eau et/ou (ii) ciblent les agriculteurs les plus disposés à l'adoption, des jeunes avec une formation. La promotion des cultures maraîchère constitue un autre levier pour encourager l'adoption des techniques d'irrigation localisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Abdulai, A. et CroleRess, A. 2001.** Determinants of income diversification amongst rural households in Southern Mali, *Food Policy*, 26(4), pp. 437-452.
2. **Bachta, M.S. et Elloumi M., 2005.** Analyse des politiques hydrauliques en Tunisie : quelques éléments d'évaluation. In. CENA .F., ELLOUMI M., GALLARDO R., SAI M. B., (s/d) 2005. Les defies de la terre : l'agriculture en Espagne et en Tunisie face aux défis de la libéralisation, ouvrage collectif, Tunis, Cérès Editions et IRESA, 330 p.
3. **Barrett, C.B., M. Bezuneh and A.A. Aboud, 2001.** AIncome Diversification, Poverty Traps and Policy Shocks in Cote d'Ivoire and Kenya, @ *Food Policy* 26, 4: 367-384.
4. **Bilgi, M., 1999, Socio-economic Study of the IDE Promoted Micro-irrigation Systems in Aurangabad and Bijapur. - IDE, New Delhi, India.**
5. **Bultena, G.L., and E.O. Hoiberg. 1983.** Factors Affecting Farmers' Adoption of Conservation Tillage, *Journal of Soil and Water Conservation*, May-June, 1983.
6. **Cason, T.N. and Uhlaner, R.T., 1991.** Agricultural production's impact on water and energy demand: a choice modelling approach, *Resources and Energy*, 13 (December), pp307-21,.
7. **Feder, G. & Slade, R. 1984.** The acquisition of information and the adoption of new technology. *American Journal of Agricultural Economics* 66, 312–320.
8. **Feder, G., Just, R. E. & Zilberman, D. 1985.** Adoption of agricultural innovations in developing countries: a survey. *Economic Development and Cultural Change* 33, 255–297.
9. **Green, G., D. Sunding, D. Zilberman, and D. Parker. 1996.** Explaining Irrigation Technology Choices: A Microparameter Approach, *American Journal of Agricultural Economics* 78:1064-72. 1996.
10. **Greene, W., 2001.** Fixed and Random Effects in Nonlinear Models, New York University, Leonard N. Stern School Finance Department Working Paper Series 01-01.
11. **Narayanamoorthy, A. 2003.** Averting water crises by drip method of irrigation: A study of two water intensive crops. *Indian Journal of Agricultural Economics* 58 (3): 427-437.
12. **Polak P., Nanes R., Adhikari D. 1997.** A low-cost drip irrigation system for small farmers in developing countries. *Water Res Bull* 33(1):119–124.
13. **Shah, T.; and Keller, J. 2002.** Micro-irrigation and the poor: A marketing challenge in smallholder irrigation development. In *Private irrigation in sub-Saharan Africa: Regional seminar on private sector participation and irrigation expansion in sub-Saharan Africa, 22-26 October 2001, Accra, Ghana.*
14. **Tobin, J. 1958.** Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables, *Econometrica* 26: 29-39.
15. **Upadhyay, B. 2003.** Drip irrigation: An appropriate technology for women. *Appropriate Technology* Vol. 30 (4).
16. **Upadhyay, B. 2004.** Gender aspects of smallholder irrigation technology: Insights from Nepal. *Journal of Applied Irrigation Science* Vol. 39 (2). Department of Rural Engineering and Natural Resources Protection and the DLG- Varrlags-GMBH.