

Tarification de l'eau d'irrigation et durabilité des systèmes de production: Cas du bassin versant d'Oum Zessar, Sud-est de la Tunisie

HOUCINE JEDER*, MONGI SGHAIER*, KAMEL LOUHICHI**

Jel classification : Q12, C61

1. Introduction

La région aride du sud-est tunisien est caractérisée par de profondes mutations d'ordre écologique, socio-économique et politique, qui constituent un enjeu majeur pour la préservation de l'intégrité des milieux et le développement de l'agriculture irriguée. Les ressources en eau dans ces zones arides sont sujettes à de fortes pressions qui menacent sérieusement leur durabilité. Cette situation risque de s'aggraver au fil des années avec l'accroissement des besoins, la surexploitation de la ressource et la baisse de la pluviométrie, notamment sous l'effet des changements climatiques. Pour remédier à ce problème, les pouvoirs publics ont déployé, depuis plusieurs décennies, des efforts considérables moyennant diverses stratégies évolutives passant d'une stratégie basée sur la gestion de l'offre à une stratégie tournée vers la gestion de la demande en eau (Romagny et al., 2006). L'objectif principal des programmes d'économie d'eau est de rationaliser l'utilisation de l'eau agricole et de maintenir la demande en eau à un niveau compatible avec les ressources en eau disponibles. La tarification de l'eau demeure l'un des instruments de régulation

de la gestion des ressources en eau en Tunisie (Bachta et al., 2005). La valorisation économique de l'eau d'irrigation par l'adoption d'une tarification progressive est l'instrument le plus utilisé dans le cadre de ces programmes. En effet, l'évaluation de l'impact de la tarification d'eau d'irrigation a fait jusqu'à aujourd'hui l'objet uniquement d'une évaluation a posteriori des décisions liées aux politiques publiques à l'échelle nationale ou locale (Alatiri, 2006). L'objectif principal de cet article est de contribuer, à travers un exemple concret d'évaluation d'impact ex ante, à analyser l'impact de la politique de tarification de l'eau d'irrigation sur la durabilité des systèmes de production irrigués dans les zones arides du sud-est tunisien.

2. Matériels et méthodes

2.1. Zone d'étude

Ce travail a pris comme cas d'étude les systèmes de production irrigués

dans le bassin versant d'Oum Zessar. Ce dernier est localisé dans le sud-est tunisien (nord-ouest du gouvernorat de Médenine). Il couvre une superficie de 33600 ha. Administrativement, il relève de trois délégations (Médenine nord, Sidi Maklouf et Bénikhdache). Cette zone a bénéficié d'un grand intérêt socio-économique qui s'est concrétisé par la réalisation de plusieurs projets et programmes de développement pour la promotion de l'activité agricole en milieu rural (Carte 1).

Résumé

L'objectif de ce papier est d'évaluer l'impact de la tarification de l'eau d'irrigation sur la durabilité des systèmes de production irrigués en Tunisie à travers une panoplie d'indicateurs. La modélisation bioéconomique couplant le modèle biophysique CropSyst (Cropping System model) et le modèle économique de ferme FSSIM «Farming System SIMulator» a été mobilisée dans ce travail et appliquée à quatre exploitations-types, représentatives de l'agriculture irriguée dans le bassin versant d'Oum Zessar, situé dans le sud-est de la Tunisie. Les principaux résultats dégagés de cette étude montrent: la forte dépendance de la durabilité de différents systèmes de production à l'égard de la politique de tarification de l'eau; la grande sensibilité des exploitations des périmètres privés à l'évolution progressive des coûts de pompage de l'eau par rapport aux exploitations des périmètres publics. Ces dernières arrivent à amortir l'impact de la tarification grâce à leur capacité d'adaptation; les systèmes de production autour des puits de surface paraissent plus fragiles et non durables et l'orientation vers la gestion collective de l'eau semble être une solution adéquate pour maintenir l'activité en irriguée et assurer la durabilité des ressources en eau dans ces zones arides.

Mots-clés: Système de production; Durabilité; Tarification de l'eau; Modélisation bioéconomique FSSIM; Bassin versant d'Oum Zessar; Sud-est tunisien.

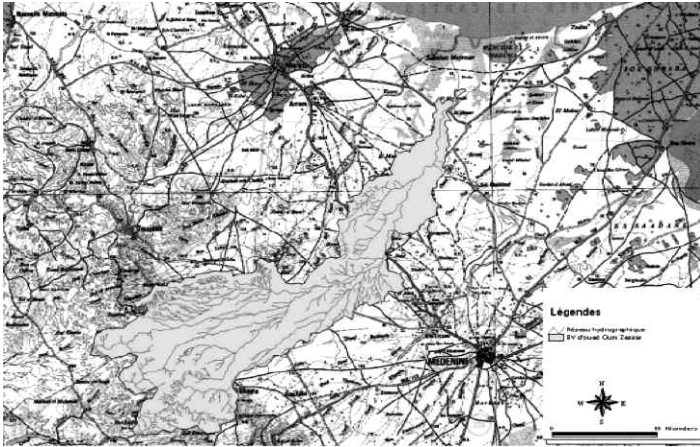
Abstract

This paper aims at assessing the impact of water pricing policy on the sustainability of irrigated farming systems and the preservation of water and soil resources in Tunisia. The bio-economic modelling approach coupling the biophysical model CropSyst (Cropping System Model) and the economic farm model FSSIM (Farming System Simulator) has been mobilized for this impact analysis. This approach was applied to four farm types representing irrigated agriculture systems in the Oum Zessar watershed located in the south-east of Tunisia. The main results from this research show: the strong dependence of different agricultural systems on the pricing water policy; the high sensitivity of farms in the private irrigated schemes to the progressive increase of irrigation water cost compared to those in the public scheme, which are able to reduce the impact of water cost increase thanks to their good adaptation capacity. The agricultural systems of groundwater wells seem more fragile and unsustainable, and thus, the extension of public schemes would be preferable for maintaining irrigated activities and ensuring natural resources sustainability in these arid zones.

Keywords: Production system, Sustainability; Water pricing policy, Bio-economic modelling FSSIM; Oum Zessar Watershed; Southern-eastern Tunisia.

* Institut des Régions Arides (IRA) de Médenine, Tunisie.

** Institut National de Recherche Agronomique (INRA)- AgroParis-Tech, UMR-Economie publique, France.



Carte 1: Localisation du bassin versant d'Oum Zessar.

2.2. Données utilisées

Les données relatives aux exploitations agricoles sont issues d'une enquête technico-socioéconomique qui a été conduite au cours de la campagne agricole 2007-2008 auprès de 50 exploitations réparties sur les périmètres irrigués privés et publics du bassin versant de l'amont vers l'aval. L'échantillon a été élaboré par la méthode des quotas. Il représente 30 % de la population mère dans le cas du périmètre public et 11% dans le cas du périmètre privé, soit environ 6 % de la totalité des exploitations en irrigué dans la zone d'étude.

Les coefficients technico-économiques associés aux activités productives pratiquées dans chaque exploitation-type proviennent des fiches technico-économiques offertes par les services techniques du Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Médenine. Ces coefficients ont été adaptés suite aux investigations réalisées auprès des agriculteurs dans chaque zone agro-environnementale. Pour prendre en compte aussi les risques climatiques et du marché, nous avons collecté également des informations sur la variabilité des prix et des rendements sur une série de 5 années auprès des services techniques du CRDA et de l'Office de Développement du Sud (ODS).

Les coefficients d'érosion sont générés par le modèle biophysique *Cropsyst*, en tenant compte des conditions pédoclimatiques et des techniques de production (Stöckle et al., 2003). Dans le cas de l'olivier, nous n'avons pas pu estimer ces coefficients étant donné que le modèle *Cropsyst* n'est pas en mesure de simuler la croissance des cultures pérennes. Les données climatiques utilisées au cours de la simulation de ce modèle reviennent à la période 1990-2006 (Oussear, 2007).

2.3. La modélisation bio-économique

Ce travail de recherche a fait recours à la modélisation bioéconomique couplant le modèle biophysique *CropSyst* (Cropping System model) et le modèle économique FSSIM «Farming System SIMulator». FSSIM est un modèle d'exploitation développé dans le cadre du projet européen SEAMLESS (Van Ittersum et al., 2008). Il s'agit d'un modèle générique et modulaire conçu pour évaluer l'impact

des politiques agricoles et environnementales sur la durabilité des systèmes de production en Europe, mais également en dehors de l'Europe en cas de disponibilité de données (Louhichi et al., 2009a). Les raisons du choix du modèle FSSIM dans cette application reviennent à son caractère générique, ce qui facilite son application et son adaptation au contexte tunisien. FSSIM est couplé dans notre cas au modèle biophysique «CropSyst» dont le but est de générer les coefficients d'externalité (notamment l'érosion des sols) liés au processus de production.

Formulation mathématique du modèle FSSIM

FSSIM est un modèle de programmation non-linéaire, statique comparatif et calibré avec la programmation mathématique positive (PMP). Il intègre le risque selon la méthode «Moyenne-Ecart type» (Hazell et Norton, 1986). Sa fonction objective consiste à la maximisation d'une fonction d'utilité espérée tout en satisfaisant une série de contraintes socio-économiques, agronomiques et environnementales. La formulation mathématique du modèle FSSIM se présente comme suit (Louhichi et al., 2009b):

$$\begin{aligned} \text{Max } U &= Z - \phi\sigma \\ \text{S.c } Ax \leq B; x &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Sachant que

- U : fonction d'utilité
- Z : revenu annuel espéré
- x : (nx1) vecteur de variable de décision (i.e. niveau de l'activité agricole)
- A : (nxn) matrice des coefficients techniques
- B : (nx1) vecteur de disponibilité des ressources
- ϕ : coefficient d'aversion au risque ($0 \leq \phi \leq 1.65$)
- σ : désigne l'écart type du revenu selon les états de nature. Il est calculé d'une façon endogène à partir des déviations totales entre le revenu espéré annuel Z et le revenu en fonction des états de nature (k), sachant que le nombre d'états de nature a été choisi d'une manière arbitraire et qu'il est égal à 100 états.

Avec:

$$Z = \left[Mb'x - d'x - \frac{x'Qx}{2} \right] \quad (2)$$

- Mb : (nx1) vecteur de la marge brute
- d : (nx1) vecteur lié au terme linéaire de la fonction du coût implicite estimée avec la (PMP)
- Q : (nxn) matrice liée au terme quadratique de la fonction du coût implicite estimée avec la PMP

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_k (Dev_k)^2}{N}} \quad (3)$$

$$Dev_k = Z - Z_k$$

- Dev_k : déviation du revenu selon les états de nature k .
- Z : revenu annuel espéré. Z_k : revenu par état de nature basé sur la distribution normale de deux paramètres prix et rendements.

– N : nombre total des états de nature qui est égal à 100.

Les contraintes techniques et socioéconomiques

• Disponibilité des terres

La somme des superficies des activités optimales (c'est-à-dire des activités retenues dans la solution optimale) ne doit pas dépasser la superficie agricole totale disponible.

$$\sum_{r,s,t,sys} X_{r,s,t,sys} \leq Totland_s \quad (4)$$

$X_{r,s,t,sys}$: superficie de chaque culture (c) associée à une rotation (r), un sol de type (s), technique de production (t) et un système (s), en hectares (ha).

$Totland_s$: Superficie agricole totale par type de sol en hectares (ha).

• Activités pluriannuelles

Toutes les cultures pluriannuelles (oliviers, figuiers, raisins de table,...) sont liées à des décisions d'investissement à long terme et devraient être analysées de préférence avec des modèles de programmation dynamiques. Pour les prendre en compte dans un modèle statique, nous avons opté pour la manière la plus simple qui consiste à fixer ces cultures à leurs superficies observées.

$$\sum_{t,sys} X_{percrops,s,t,sys} \leq X_{percrops,s}^0 \quad (5)$$

$percrops$: Indices pour les cultures pluriannuelles.

$X_{percrops,s,t,sys}$: Superficie d'une culture pluriannuelle par type de sol (s), technique (t), et système (sys).

$X_{percrops,s}^0$: Superficie des cultures pluriannuelles par type de sol (s) pendant l'année de base.

• Contrainte de travail

La somme des besoins en main d'œuvre des activités optimales ne peut pas dépasser la disponibilité en main d'œuvre familiale. En raison du manque de données sur le marché du travail dans la région d'étude nous avons supposé que la main d'œuvre salariale est égale à zéro.

$$\sum_{r,s,t,sys,p} X_{r,s,t,sys} \cdot Lr_{r,s,t,sys,p} / N_r = Lreq \leq Flabour \quad (6)$$

$X_{r,s,t,sys}$: Superficie de l'activité choisie i (avec $i = r, s, t, sys$) en hectares (ha).

$Lreq$: Besoin de travail pour chaque activité choisie i en heures par année (hrs/an).

N_r : Nombre d'années pour chaque type de rotation r .

$Flabour$: Disponibilité de travail familial en heures par année (hrs/an).

• Contrainte de terre irrigable

La somme des superficies des activités irriguées retenues dans la solution optimale ne doit pas dépasser la superficie irrigable disponible.

$$\sum_{r,s,ti,sys} X_{r,s,ti,sys} \leq Irland \quad (6)$$

ti : Indice lié à la technique d'irrigation

$X_{r,s,ti,sys}$: Superficie irriguée de l'activité choisie i (avec $i = r, s, t, sys$) en hectares (ha)

$Irland$: La superficie irrigable disponible en hectares (ha)

• Contrainte d'eau

La somme des besoins en eau des activités irriguées retenues dans la solution optimale ne doit pas dépasser la quantité d'eau disponible.

$$\sum_{r,s,t,sys,p} X_{r,s,t,sys} \cdot Wr_{r,s,t,sys,p} / N_r = Wused \leq Towater \quad (8)$$

$X_{r,s,t,sys}$: Superficie irriguée de l'activité choisie i (avec $i = r, s, t, sys$) en hectares (ha).

$Wr_{r,s,t,sys,p}$: Besoin en eau par culture et par activité i en (m^3/an).

$Wused$: Quantité d'eau utilisée par activité i en (m^3/an), (variable endogène).

N_r : Nombre d'années pour chaque type de rotation r .

$Towater$: Quantité totale d'eau disponible par activité i en (m^3/an).

• Equation de calcul des indicateurs environnementaux

Cette équation est construite d'une manière générique pour calculer les indicateurs environnementaux à l'échelle de l'exploitation. Il s'agit en fait d'utiliser le modèle comme un compteur des dégâts environnementaux associés aux choix cultureux, mais également en fonction des différents instruments de politiques simulés. Un exemple de ces instruments serait l'imposition d'une norme ou d'une taxe environnementale au niveau de l'exploitation pour voir leurs impacts sur les processus de décision.

$$\sum_{r,s,ti,sys,p} X_{r,s,t,sys} \cdot ENV_{r,s,t,sys,p} / N_r = ENVused \quad (9)$$

t : Indice lié à la technique d'irrigation

$X_{r,s,t,sys}$: Superficie de l'activité choisie i (avec $i = r, s, t, sys$) en hectares (ha).

$ENV_{r,s,t,sys,p}$: Les coefficients environnementaux associés aux activités productives (T/ha), (comme salinité, nitrate et érosion).

$ENVused$: Valeurs des indicateurs environnementaux à l'échelle de l'exploitation, (variable endogène).

Formalisation de la politique de tarification de l'eau d'irrigation dans le modèle FSSIM

Pour prendre en compte la politique de tarification de l'eau d'irrigation dans FSSIM, nous avons utilisé la formulation suivante:

$$\left[\text{coût de l'eau d'irrigation} = \text{Tarif_fixe} + CE_{r,s,t,p,sys} * \frac{X_{r,s,t,p,sys}}{N_r} * \text{Tarif_variable} \right] (a)$$

Avec: $Tarif_fixe$: frais d'abonnement (10 DT/exploitation);
 $Tarif_variable$: tarif variable de l'eau d'irrigation par m^3 consommé (0,080 DT)

CE : besoin en eau des cultures.

Le coût de l'eau (équation a) est introduit dans la fonction objectif du modèle FSSIM comme suit:

$$Z = \left[\sum_{c,prd} \text{prix}_{c,prd} \cdot \text{Qtité}_{c,prd} \right] - \left[\sum_{r,s,t,p,sys} \text{coût}_{prod}_{r,s,t,p,sys} \cdot \frac{X_{r,s,t,p,sys}}{N_r} \right]$$

(valeur de production = prix*quantité) – (coût variable de production)

$$\left[\text{Tarif}_{fixe} + CE_{r,s,t,p,sys} \cdot \frac{X_{r,s,t,p,sys}}{N_r} * \text{Tarif}_{variable} \right]$$

(coût de l'eau d'irrigation = partie fixe + partie variable)

$$- \text{PMPterm} - \sum_{r,s,t,p,sys} \text{coût}_{trav} * \text{hrs}_{trav}$$

(b)

le terme de PMP - coût de main d'oeuvre

2.4. Scénarios analysés

Trois scénarios ont été retenus dans le cadre de ce travail de recherche:

Scénario de référence «Baseline 2015»: ce scénario est utilisé comme référence pour l'analyse et l'interprétation des scénarios des politiques à simuler. Il est basé sur la continuation des politiques actuelles jusqu'à 2015, choisi comme horizon de simulation. La seule différence entre l'année de base 2007 (*Baseyear_2007*) et l'année de référence 2015 (*Baseline_2015*) est la prise en compte d'un taux d'inflation annuel de 2,9 % (taux moyen en Tunisie pour l'année 2008).

Scénario 1: l'application des tarifs de l'eau d'irrigation plus élevés.

Le système de tarification instauré au niveau du périmètre irrigué public est de type binôme. Il est composé de deux parties: (i) une partie fixe, indépendamment de la quantité d'eau utilisée et dont le montant est fixé à 10 Dinars tunisiens (DT)/exploitation, (ii) une partie proportionnelle à la quantité consommée et elle est fixée à 0,080DT par m³ consommé.

L'objectif de ce scénario consiste donc à évaluer l'impact d'une augmentation du tarif variable de l'eau d'environ 13% par an, entre 2007 et 2015, sur la durabilité des systèmes de production au niveau de ce périmètre.

Scénario 2: l'augmentation du coût de pompage de l'eau de 13% dans le périmètre privé irrigué.

En raison de la surexploitation de la majorité des nappes souterraines dans le sud tunisien, le coût d'extraction de l'eau devient de plus en plus élevé. Cette situation a entraîné la disparition de plusieurs puits de surface et risque d'entraver ceux qui sont toujours opérationnels. Ceci témoigne également du stade ultime de la surexploitation des ressources hydrauliques et du risque potentiel pour la durabilité de l'activité agricole dans cette zone. Donc, anticiper les conséquences économiques et environnementales d'une augmentation progressive du coût de pompage serait d'une grande utilité aussi bien pour les acteurs locaux que pour les décideurs politiques. Tel est l'objectif de ce scénario.

3. Résultats et discussions

3.1. Résultats de la typologie d'exploitations agricoles

L'enquête socio-économique a permis l'élaboration d'une typologie d'exploitations agricoles permettant de décri-

re les caractéristiques structurelles et fonctionnelles de l'exploitation agricole d'une part, et d'identifier la diversité des systèmes et des techniques de production, d'autre part. Les critères retenus pour l'élaboration de cette typologie sont principalement la source d'eau d'irrigation (forage public ou puit de surface) et la taille de l'exploitation (la Surface Agricole Utile). Le tableau 1 illustre les quatre types de systèmes de production qui ont été identifiés à l'échelle du bassin versant. Ils sont décrits comme suit:

Système de production semi-intensif (S11): il regroupe les exploitations agricoles irriguées à partir des forages publics avec une superficie supérieure à 3ha et un niveau d'intensification moyen. Ces exploitations représentent 32 % de l'échantillon et se caractérisent par un système de production basé sur une monoculture semi-intensive (céréales/maraîchères/fourragères) associée à l'arboriculture. Ce groupe sera représenté par l'exploitation-type «**FARM_1**».

Système de production intensif (S12): il regroupe les exploitations agricoles irriguées à partir des forages publics de petites tailles d'environ 2,5ha avec une forte intensification. Ces exploitations représentent 22 % de l'échantillon et se caractérisent par un système de production basé sur une polyculture intensive (maraîchères/fourragères). Ce groupe sera représenté par l'exploitation type «**FARM_2**».

Système de production mixte (S21): il regroupe les exploitations agricoles irriguées à partir des puits de surface de taille moyenne de 6.5ha, avec une faible intensification. Ces exploitations représentent 10% de l'échantillon et se caractérisent par un système de production basé sur une monoculture extensive (céréales/ maraîchères /jachère). Ce groupe sera représenté par l'exploitation de type mixte «**FARM_3**».

Système de production intensif (S22): il regroupe les exploitations agricoles irriguées à partir des puits de surface de taille inférieure à 5ha et avec une forte intensification. Ces exploitations représentent 36 % de l'échantillon et se caractérisent par un système de production basé sur une polyculture intensive (maraîchères/ fourragères). Ce groupe sera représenté par l'exploitation-type intensive «**FARM_4**».

Tableau 1 - Caractérisation des exploitations types retenues.

Système de production	S11 : semi-intensif	S12 : intensif	S21: mixte	S22 : intensif
Exploitations-types	FARM_1	FARM_2	FARM_3	FARM_4
Nombre d'exploitations	16	11	18	5
Superficie moyenne en hectares (ha)	3,5	2,5	6,44	3,02
Superficie par zone agro-environnementale (type de sol) en hectares (ha)	Z1 : 0,53 (15%) Z2 : 0,86 (25%) Z3 : 2,11 (60%)	Z1:0,75 (30%) Z2:0,75 (30%) Z3:1,00 (40%)	Z1:1,13 (18%) Z2:0,21 (3%) Z3:5,10 (80%)	Z1:0,30 (10%) Z2:0,50 (17%) Z3:2,22 (74%)
Superficie de terre irrigable en hectares (ha)	1,95 (56 %)	2,1(84 %)	3,95(50 %)	2,4(56 %)
Disponibilité en eau en m ³ /ha/an	6719	8059	18438	10147
Tarif/coût de pompage DT/ m ³	0,80	0,80	0,236	0,256
Disponibilité de main d'œuvre en (heurs/an)	975	650	1525	1220
Superficie de Culture en (%)				
Céréaliculture	14,57	8,8	11,65	5,95
Maraîchères	20,57	29,6	54,80	38,1
Fourragères	6,86	12	2,51	11,90
Jachère	6,85	4,4	7,60	5,3
Arboriculture (olivier)	51,15	45,2	23,45	38,75
Z1 : sols peu évolués ; Z2 sols rendzines ; Z3 (sols isohumiques) Source : (Propre enquête 2007).				

3.2. Résultats du calibrage du modèle FSSIM

La méthode de calibrage retenue est basée sur le couplage de la méthode du risque et de l'approche standard de la PMP (Howitt, 1995). Elle consiste à choisir, dans un premier temps, le coefficient d'aversion au risque qui permet de donner la meilleure déviation entre les valeurs observées et simulées et ensuite, à appliquer l'approche standard de la PMP pour calibrer le modèle d'une manière exacte. L'indicateur retenu pour juger la qualité du calibrage du modèle est le Pourcentage de Déviation Absolue «*Absolute deviation percentage*» (PAD en %). Cet indicateur permet de mesurer les écarts entre les assolements simulés et observés pour les différentes simulations. Si le pourcentage de déviation absolue (PAD) est égal à zéro (0%), alors le modèle est considéré comme calibré et il peut être utilisé pour simuler les scénarios sélectionnés. Le Tableau 2 présente les résultats du calibrage pour chacune des exploitations avant et après l'application de la PMP. Il contient les assolements observés et simulés, le coefficient d'aversion au risque qui donne la meilleure déviation et les PAD avec et sans la PMP.

Exploitation-type	Code en GAMS	FARM_1		FARM_2		FARM_3		FARM_4	
		$\varphi=1,5$		$\varphi=1,5$		$\varphi=1,65$		$\varphi=1,5$	
Coeff d'aversion au risque	PHI	$\varphi=1,5$		$\varphi=1,5$		$\varphi=1,65$		$\varphi=1,5$	
Superficie (ha)		Obs.	Sim ^b	Obs.	Sim	Obs.	Sim	Obs.	Sim
Orge	WBAR	0,51	0,51	0,12	0,12	0,50	0,50	0,10	0,10
Blé	WDWH			0,10	0,10	0,25	0,25	0,08	0,08
Avoine	OATS			0,05	0,05	0,05	0,05		
Luzeerne	ALFA	0,24	0,24	0,25	0,25	0,11	0,11	0,36	0,36
Pomme de terre	POTA					0,25	0,25		
Tomate	TOMA	-	0,10	-	0,36	-	1,39	-	0,57
Courge	PMUP					-	0,25		
Piment	PAFR	-	0,51	-	0,02	-	0,25	-	0,02
Concombre	CUUU	-	0,10	-	0,36	-	1,39	-	0,57
Cultures maraichères	EYES	0,72	0,72	0,74	0,74	3,28	3,28	1,15	1,15
Jachère	FALL	0,24	0,24	0,11	0,11	0,49	0,49	0,16	0,16
Olivier	OLIV	1,79	1,79	1,13	1,13	1,51	1,51	1,17	1,17
Superficie totale	TOLAND	3,5	3,5	2,5	2,5	6,44	6,44	3,02	3,02
PAD (%) sans PMP	PAD		27,42		43,20		61,02		54,63
PAD (%) avec PMP	PAD		0,00		0,00		0,00		0,00

a : superficie observée ; b : superficie simulée. Source : Résultats du modèle FSSIM à l'année de base 2007.

Le principal résultat montre que le PAD avant la PMP n'est pas trop élevé, ce qui implique que la qualité du modèle en termes de spécification des activités, des contraintes et de la fonction objectif est bonne et que les termes de la PMP (c'est-à-dire, la fonction implicite du coût) ne risquent pas d'influencer beaucoup les résultats du modèle dans la phase de simulation.

3.3. Analyse du scénario de référence «Baseline_2015»

Le scénario de référence représente généralement la prévision la plus probable compte tenu de l'évolution historique, et en supposant la poursuite des politiques réellement entreprises. Il est utilisé comme référence pour l'analyse et l'interprétation des scénarios des politiques à simuler. C'est sur ce principe que nous avons construit notre scénario de référence. Il est basé sur la continuation des politiques actuelles jusqu'à 2015, choisi comme horizon de simulation. La seule différence entre l'année de base 2007 (*Base*

year_2007) et l'année de référence 2015 (*Baseline_2015*) est la prise en compte d'un taux d'inflation annuel de 2,9 % (taux moyen en Tunisie pour l'année 2008). Les résultats de la situation de référence 2015 montrent que l'ensemble des contraintes est toujours saturé, en particulier l'eau, expliquant que les agriculteurs utilisent le maximum de leur disponibilité en eau pour tirer le maximum de revenu de l'activité irriguée.

Tableau 3 - Résultats du modèle FSSIM (Situation de référence).

	FARM_1	FARM_2	FARM_3	FARM_4
Revenu (DT/ha)	3880,35	4170,82	5265,84	5451,89
Production (DT/ha)	6906,29	7489,18	8870,14	8820,78
Coût Total (DT/ha)	3025,97	3318,36	3604,30	3368,89
Main d'œuvre total (heures/ha)	644,29	882,55	1069,64	1054,06
Consommation totale en eau (m ³)	6719	8059	18438	10147

Source : Résultats du modèle FSSIM

3.4. Analyse du scénario_1: application des tarifs plus élevés

En termes d'économie d'eau, les résultats du modèle FSSIM pour l'exploitation-type «FARM_1» montrent que l'augmentation du tarif de l'eau d'irrigation entraîne une baisse de la consommation d'eau de l'ordre d'environ 14,88% par rapport à l'année de référence 2015 (Tableau 4). Ces résultats paraissent tout à fait logiques et montrent que l'augmentation des tarifs pourrait être un outil efficace pour l'incitation à l'économie d'eau en zones arides, en particulier dans le cas d'un système intensif «FARM_2» où la baisse de la consommation d'eau est plus significative par rapport au système semi-intensif. Elle est d'environ 17,64% par rapport à la situation de référence 2015. Cette régression explique la forte dépendance du mode de production intensif à l'égard de la ressource en eau ainsi que l'importance de cet instrument comme politique de régulation et d'économie de l'eau d'irrigation.

Sur le plan socio-économique, l'application des tarifs élevés induit, comme prévu, une baisse du revenu d'environ 5,7% par rapport à l'année de référence. Ceci est expliqué notamment par l'augmentation des coûts de l'eau de 5,80 % et le changement dans le plan de production agricole. Cette baisse reste cependant à un niveau satisfaisant grâce à une meilleure allocation des superficies, une légère extensification des systèmes et une orientation vers des cultures qui sont moins coûteuses et moins exigeantes en main d'œuvre occasionnelle, ce qui justifie la baisse importante de cette dernière de 7,10% par rapport à l'année de référence. Les résultats du modèle dans le cas du système intensif montrent une baisse plus importante du revenu agricole, ce qui explique la forte dépendance de la consommation d'eau vis-à-vis du mode d'exploitation intensif. En effet, l'augmentation de 13% du prix de l'eau a entraîné une baisse du revenu agricole d'environ 7,60 %, accompagnée également d'une baisse qui est moins importante de la main d'œuvre utilisée d'environ 5,35%. Ceci montre le besoin en main d'œuvre occasionnelle dans le cas du système intensif basé sur des cultures irriguées.

Sur le plan environnemental, les résultats de l'application d'une tarification plus élevée montrent des effets positifs sur le niveau d'érosion du sol. En effet, dans le système de production semi-intensif, une diminution plus importante de l'érosion de 6,82 % est enregistrée. Dans le système intensif, cette baisse est moins importante et s'élève à 6,28 % par rapport à l'année de référence. Ceci s'explique en partie par la baisse des activités irriguées qui nécessitent plus de travail du sol, aggravant ainsi le problème d'érosion. Ce résultat montre également l'efficacité de l'instrument de tarification de l'eau d'irrigation à corriger les effets pervers causés par le rythme d'exploitation intensif dans des zones arides qui sont caractérisées par un faible potentiel de ressources naturelles eaux et sols.

En termes d'orientation culturale, les résultats relatifs à ce scénario montrent un changement important au niveau de l'assolement, marqué essentiellement par l'orientation vers un système plus extensif basé principalement sur la céréalière avec environ 11,78 % et sur les cultures maraîchères ayant une valeur ajoutée plus élevée de 6,07%. Ce résultat est obtenu au détriment des cultures fourragères exigeantes en eau et moins rémunératrices, qui ont enregistré une baisse de l'ordre de 74,98%. L'implantation d'une tarification de l'eau plus élevée a induit aussi un changement important en terme d'orientation culturale dans le cas du système intensif dont le plan de production enregistre une baisse remarquable des superficies allouées aux cultures fourragères de 77,46% et une orientation plus importante vers les cultures maraîchères de 17,96 %, avec une tendance à l'augmentation des superficies céréalières conduites en sec de 13,70%. Cette nouvelle réallocation des ressources eau et sols traduit les comportements des agriculteurs face au choc exogène induit par l'augmentation du tarif de l'eau d'irrigation.

Tableau 4. Résultats du modèle FSSIM (scénario_1: tarif plus élevé, cas du FARM_1 et 2).

Type d'exploitation	S11 : FARM_1		S12 : FARM_2	
	Référence 2015	Impact du Scénario_1_2015 en (%)	Référence 2015	Impact du Scénario_1_2015 en (%)
Revenu (DT/ha)	3880,29	-5,70	4170,82	-7,60
Coût total (DT/ha)	3025,97	5,80	3318,36	8,00
Main d'œuvre temporelle (Heures/ha)	644,29	-7,10	882,55	-5,35
Consommation en eau (m3/ha)	1919,39	14,88	3223,76	-17,64
Erosion du sol (T/ha)	3,30	6,82	3,30	-6,28
Superficie céréalière (ha)	0,61	11,78	0,23	13,70
Superficie maraîchère (ha)	0,93	6,07	0,89	17,96
Superficie fourragère (ha)	0,17	-74,98	0,25	77,46

Source : Résultats du modèle FSSIM

3.5. Analyse du scénario_2: augmentation du coût de pompage de l'eau d'irrigation

En termes d'économie d'eau, l'augmentation des coûts de pompage a entraîné une baisse faible de la consommation d'eau d'environ 4,5% dans le cas du système mixte, et de 11,08% dans le cas du système intensif (Tableau 5). Cette baisse reste, néanmoins, faible comparée à celle observée dans les périmètres publics. Ceci montre l'efficacité du sys-

tème de tarification appliqué dans les périmètres publics à inciter les agriculteurs à l'économie d'eau.

En termes économiques, les résultats obtenus montrent que le système mixte est capable de maintenir un niveau de revenu assez acceptable qui est de l'ordre de 4112,02 DT/ha, malgré l'augmentation du coût de production de 27,75% et la légère baisse de la main d'œuvre occasionnelle d'environ 3,55%. Cette réaction montre également que ces types d'agriculteurs (FARM_3) ont plus de marge de manœuvre vis-à-vis de l'augmentation du coût de pompage et que leur capacité d'adaptation à la rareté des ressources en eau et à l'instabilité de la conjoncture économique (forte variation des prix des outputs et des inputs agricoles) est meilleure que dans le système intensif représenté par les agriculteurs de (FARM_4). Ce dernier a enregistré une baisse plus importante du revenu agricole d'environ 24,85% par rapport à la situation de référence 2015 et par rapport au système mixte. Cette chute du revenu agricole est expliquée par la hausse des coûts de production de 37,81% qui est due principalement à l'augmentation du coût de pompage et ce, malgré une baisse de 3,62% de la main d'œuvre occasionnelle employée par rapport à l'année de référence. Ces variations montrent le degré de fragilité du système intensif à l'augmentation du coût de pompage par rapport au système mixte qui a montré une adaptation plus élevée à travers une variation moins importante de ces indicateurs (Tableau 5).

Tableau 5 - Résultats du modèle FSSIM (scénario_2: augmentation du coût de pompage).

Type d'exploitation	S21 : FARM_3		S22 : FARM_4	
	Référence 2015	Impact du Scénario_2_2015 en (%)	Référence 2015	Impact du Scénario_2_2015 en (%)
Revenu (DT/ha)	5265,84	-21,91	5451,89	-24,85
Coût total (DT/ha)	3604,30	27,75	3368,89	37,81
Main d'œuvre temporelle (Heures/ha)	1069,64	-3,55	1069,06	-3,62
Consommation en eau (m3/ha)	2863,16	-4,55	3360,10	-11,08
Erosion du sol (T/ha)	4,83	-0,40	4,29	-3,16
Superficie céréalière (ha)	1,15	11,71	0,18	22,96
Superficie maraîchère (ha)	3,71	-2,96	1,35	7,64
Superficie fourragère (ha)	0,07	-37,14	0,32	-45,10

Source : Résultats du modèle FSSIM

En conclusion, les différents résultats obtenus ont montré le degré d'efficacité des scénarios testés en matière d'économie d'eau et de préservation des ressources en eau et en sol. En effet, nous avons enregistré au niveau de l'ensemble des exploitations-types identifiées, aussi bien dans les périmètres privés que publics, une baisse de la quantité d'eau consommée allant de 4 % à 15% ainsi qu'une réduction de la perte en sol qui varie de 1% à 7% selon le mode d'exploitation adopté. Cependant, ces effets positifs en termes de préservation des ressources sont associés chaque fois à une baisse des revenus qui atteint dans certains cas 24 %. Dans un tel contexte, il serait donc judicieux de trouver un compromis permettant de préserver d'une manière durable les ressources naturelles, indispensables pour les générations futures, sans pour autant compromettre les revenus agricoles des producteurs actuels.

3.6. Test de sensibilité

Afin d'appréhender les effets potentiels d'une évolution rapide de la tarification de l'eau d'irrigation sur la durabilité de ces systèmes de production à long terme, nous avons testé la sensibilité de certains indicateurs à l'augmentation des tarifs et/ou du coût de pompage de l'eau. L'idée est donc de faire varier les tarifs de l'eau (périmètre public) et des coûts de pompage (périmètre privé) de +13% à +20% et de voir les conséquences sur le revenu, la consommation en eau et l'érosion des sols. Pour simplifier l'analyse, mais également faciliter la comparaison entre les systèmes, nous avons appliqué ce test de sensibilité uniquement sur les systèmes intensifs des périmètres privés et publics (FAM_2 et FARM_4). Excepté l'accès à la ressource en eau, ces deux systèmes sont très semblables en termes de superficie, d'orientation culturale et de disponibilité des ressources. Le but est donc de juger la durabilité de ces systèmes avec l'augmentation des coûts de l'eau.

Tableau 6 - Sensibilité des systèmes de production intensifs à l'évolution des coûts de l'eau d'irrigation.

	Evolution des tarifs /coûts de pompage de l'eau en %	Revenu (DT/ha)		Consommation d'eau (m ³ /ha)		Erosion (T/ha)	
		Privé FARM 4	Public FARM 2	Privé FARM 4	Public FARM 2	Privé FARM 4	Public FARM 2
S0	13 (référence)	4096.89	3794.64	2987.90	2655.06	4.16	4.55
S1	14	-3%*	-1%	-3%	-12%	-1%	0%
S2	15	-7%	-2%	-6%	-13%	-2%	0%
S3	16	-10%	-3%	-10%	-13%	-3%	0%
S4	17	-14%	-5%	-13%	-13%	-4%	1%
S5	18	-18%	-6%	-14%	-14%	-3%	1%
S6	19	-22%	-7%	-14%	-14%	-2%	1%
S7	20	-27%	-9%	-15%	-14%	-1%	1%

* % de variation par rapport à S0 (référence). Source : Résultats du modèle FSSIM

Les principaux résultats, illustrés dans le tableau 6, montrent :

– que les systèmes intensifs dans les périmètres privés sont très sensibles à l'évolution progressive des coûts de pompage de l'eau comparés aux systèmes des périmètres publics. En effet, ces derniers arrivent à amortir l'impact de l'évolution des tarifs de l'eau grâce à leur bonne capacité d'adaptation. Ainsi, une évolution de 20% du coût de l'eau entraînait une baisse des revenus de 27% dans les exploitations du périmètre privé contre 9% seulement dans les exploitations du périmètre public (Tableau 6). D'autre part, l'augmentation progressive du coût de l'eau affecte positivement la consommation d'eau au niveau des périmètres public et privé. La seule différence est que la baisse de la consommation est presque proportionnelle à l'augmentation des coûts dans le cas du périmètre privé alors que dans le périmètre public, cette baisse est assez forte au départ pour rester ensuite presque inchangée.

– En ce qui concerne l'externalité environnementale, l'augmentation des tarifs induit une faible baisse de l'érosion des sols dans les périmètres privés en raison des changements de l'orientation culturale alors que dans les périmètres publics, une légère augmentation a été enregistrée avec l'évolution progressive des tarifs de l'eau d'irrigation.

– Il est d'intéressant de remarquer qu'au-delà d'un taux d'accroissements des tarifs de 17%, la baisse de la consommation d'eau et de l'érosion des sols reste presque inchangée alors que le revenu continue à chuter, notamment dans les périmètres privés. Par conséquent, ce taux pourrait être considéré comme un taux plafond à ne pas dépasser si on veut préserver les ressources en eau et éviter la détérioration importante du revenu des agriculteurs. Ce résultat est conforme aux constats révélés par d'autres travaux qui signalent l'abandon de l'activité irriguée dans les périmètres privés à cause du faible débit d'eau ou de l'épuisement total des puits de surface. Cette régression a atteint dans certains cas plus de 47%, en particulier à Métameur ouest et Médenine nord (Sghaier et al., 2006), ce qui justifie la non-durabilité de ces systèmes. Ce résultat est en concordance avec le principe même de la théorie de la tragédie des biens communs «*Tragedy of the commons*» de Garrett Hardin: l'accès libre aux ressources en eaux entraîne une augmentation du coût de pompage, une diminution du stock d'eau et une surexploitation des nappes d'eau (Ostrom et al., 1994).

4. Conclusion

L'application du modèle FSSIM nous a permis d'avoir un premier éclairage sur les effets de la tarification de l'eau d'irrigation sur la rentabilité socio-économique et l'efficacité environnementale des systèmes de production agricoles à partir des exploitations-types représentatives de ces systèmes. Bien que ces effets ne soient pas souvent importants en termes absolus, mais significatifs en termes relatifs, ils donnent en tout cas une bonne idée sur les tendances les plus probables. Il a aussi été possible de démontrer que le système intensif autour des puits de surface est un système fragile et non durable et que l'orientation stratégique du pouvoir public vers l'extension des périmètres publics est une solution préférable pour maintenir l'activité en irrigué et assurer la durabilité des ressources naturelles.

D'un point de vue méthodologique, cette application nous a permis d'adapter le modèle FSSIM, grâce à sa généralité, et de l'appliquer aux différents contextes et sous diverses conditions, mais également de montrer sa capacité à simuler l'impact intégré des instruments de politique à travers un ensemble d'indicateurs socio-économiques et environnementaux. Toutefois, comme tout travail de recherche, cette application présente certaines limites d'ordre méthodologique qui pourraient être surmontées dans des travaux futurs. On peut citer à titre d'exemple :

- La non-intégration de l'activité d'élevage qui est très importante dans cette zone.
- La non-prise en compte d'autres indicateurs environnementaux importants comme la salinité.
- La non-prise en compte des interactions entre les exploitations-types (c'est-à-dire couplage avec un modèle régional).
- Le nombre d'instruments de politique testés reste assez restreint.

Références Bibliographiques

- Romagny B., S. Palluault et H. Ben Oueddou, (2006), *L'eau au cœur des stratégies de développement durable*, 10, Entre désertification et développement dans la Jeffara Tunisienne, Institut des Recherches pour le Développement IRD et Institut des Régions Arides IRA, Cérès éditions, Tunis, pp 250-253.
- Bachta M.S., Ben Mimoun A., Zaiebet L. et Albouchi L., (2004), *Simulation of a water market in Tunisia: case study of GIC Melalsa-Kairoun*. Actes du Séminaire Wademed, Modernisation de l'agriculture irriguée Rabat, du 19 au 23 avril 2004.
- Alatiri R., (2006), *Evolution institutionnelle et réglementaire de la gestion de l'eau en Tunisie vers une participation accrue des usagers de l'eau*. Actes du Séminaire Wademed, Montpellier, France, 6-7 Novembre, CIRAD, Montpellier, France.
- Van Ittersum M.K., Ewert F., Heckelei T., Wery J., Alkan Olsson J., Andersen E., Bezlepikina I., Brogaard S., Donatelli M., Flichman G., Olsson L., Rizzoli A., van der Wal T., Wien J.E and Wolf J., (2008), *Integrated assessment of agricultural systems – A component-based framework for the European Union (SEAMLESS)*, *Agricultural Systems* 96, pp150-165.
- Louhichi, K., Flichman G. and Blanco M., (2009a,b), *A generic template for FSSIM for all farming systems in the EU*, SEAMLESS Report No.37, SEAMLESS integrated project, EU 6th Framework Programme, contract no. 010036-2, www.SEAMLESS-IP.org, 80 pp. ISBN no. 978-90-8585-125-7.
- Stöckle C.O., Donatelli M. and Nelson R., (2003), *Crop-Syst, a cropping systems model*. *Europ.J.Agronomy*, 18, pp 289-307.
- Hazell P.B. and Norton R.D., (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan Publishing Compagny.
- Ouessar M., (2007), *Hydrological impacts of rainwater harvesting in wades Oum Zessar watershed (Southern Tunisia)*. Ph.D. thesis, Faculty of bioscience Engineering, Gen University, Gen, Belgium, 154p.
- Howitt R.E., (1995), *A calibration method for agricultural economic production models*. *American Journal of Agricultural Economics*, Vol. 77, No. 2 (May, 1995), pp. 329-342.
- Sghaier M., Fétoui M., Gammoudi T. et Farhat K. (2006), *Dynamique et mutation des structures foncières dans la Jeffara tunisienne au cours du 20^e siècle*. Institut des Recherches pour le Développement IRD et Institut des Régions Arides IRA, Cérès éditions, Tunis, pp57-78.
- Ostrom E., Garden R. and Walker J., (1994), *Rules, games and common pool resources*, the University of Michigan press.