

Impacts des formules tarifaires binômes sur le système irrigué de la basse vallée de la Medjerda (Tunisie)

K. Abbas, R. Mahjoubi, G. Flichman

Institut agronomique méditerranéen de Montpellier, 3191, route de Mende 34093 Montpellier Cedex 5, France

kaisabbes@hotmail.com

Résumé

La gestion de la demande en eau est au centre des plans de développement tunisiens en raison de sa rareté croissante et du coût de plus en plus élevé de la mobilisation des ressources. Convaincus du pouvoir de la tarification pour allouer efficacement l'eau d'irrigation et couvrir les coûts associés à l'exploitation de l'infrastructure hydraulique, les pouvoirs publics ont décidé de réformer le système tarifaire. Dans ce contexte, sont analysés les impacts économiques et environnementaux d'une part de l'application d'une première version de tarification binôme (H1B) à la place d'une tarification préférentielle en exercice jusqu'en 2001, d'autre part de la mise en place à moyen terme d'une deuxième version de tarification binôme (H2B) se substituant à la première. Un modèle de programmation mathématique de type stochastique à décision unique couplé à un modèle biophysique a été utilisé. Appliqué à la région de la basse vallée de la Medjerda, le modèle montre que les objectifs de l'Etat sont partiellement réalisables et qu'une des conséquences de l'application de ces nouveaux systèmes tarifaires est le risque inquiétant de pollution par les nitrates.

Mots clés: irrigation, tarification de l'eau, modélisation bio-économique, pollution par les nitrates.

1 Introduction

L'élément majeur de l'évolution de l'agriculture en Tunisie est l'essor des cultures irriguées, conséquence d'une politique très active dans le domaine de l'hydraulique agricole. La superficie des périmètres irrigués a quintuplé pour atteindre 365 000 ha en 2001, dont 221 600 ha de périmètres publics irrigués (PPI), soit près de 7 % de la surface agricole utile. Cela a augmenté la contribution de l'irrigation dans la production agricole totale de 10 % en 1961 à 40 % actuellement.

Néanmoins, face à une ressource en eau de plus en plus rare¹ et de plus en plus coûteuse à mobiliser, la gestion de la demande en eau en Tunisie a constitué la question centrale des derniers plans de

¹ Les ressources en eau ne sont que de 4 669 Mm³ dont 650 Mm³ sont des ressources non renouvelables et le taux de mobilisation a dépassé les 90 % (MA, 1998). De ce fait le pays connaît déjà une situation de stress hydrique (528 m³/habitant en 1995 (MEAT, 2001)). Les projections sont encore plus pessimistes, puisque le pays serait en situation de pénurie d'eau à partir de 2025 (moins de 500 m³/habitant/an).

développement surtout après la mise en œuvre du Programme d'ajustement du secteur agricole (PASA) en 1986. Plus spécifiquement, la demande agricole est estimée à 80 % des disponibilités en eau, les agriculteurs sont donc appelés non seulement à une exploitation plus rationnelle de la ressource, mais aussi à une participation plus active dans la gestion de l'eau par la promotion des associations d'intérêt collectif (AIC) et à la prise en charge des coûts d'exploitation des ouvrages et des réseaux de distribution. En effet, le principal défi de l'agriculture irriguée est de pouvoir prendre en charge le coût total de l'eau utilisée, jusqu'à présent subventionnée par la collectivité. La plupart des grands systèmes irrigués étant gérés par l'Etat ou par des agences publiques, les contraintes budgétaires du gouvernement incitent à limiter les aides publiques à l'irrigation. Il s'agit en effet de sortir du système où l'eau est « donnée » par l'Etat, pour mettre en place un service de l'eau d'irrigation à un client agriculteur.

La tarification de l'eau est l'outil le plus communément utilisé pour couvrir les coûts associés à l'exploitation de l'infrastructure hydraulique et pour allouer l'eau d'irrigation. Les instruments de gestion de l'eau d'irrigation sont la tarification, les quotas et les marchés ; Montginoul (1997) en a analysé les avantages et les limites. Les pouvoirs publics ont décidé de réformer le système de facturation de l'eau en adoptant dès 2002 les mesures tarifaires proposées par le ministère tunisien de l'Agriculture (MA *et al.*, 1997). La mise en œuvre de ces assiettes tarifaires suppose de nouvelles dispositions : réhabilitation des réseaux, amélioration de la qualité de l'eau et mise en place de dispositifs d'estimation des volumes fournis à partir des débits et des temps d'ouverture des prises d'eau. La réforme a pour objectifs principaux :

- collecter le paiement des frais de fonctionnement et de maintenance des aménagements hydro-agricoles à court terme et récupérer les charges (coûts fixes inclus) à long terme (équilibre budgétaire) ;
- respecter la capacité de paiement des agriculteurs (équité) ;
- responsabiliser de plus en plus les exploitants et promouvoir davantage les techniques d'économie d'eau (efficacité).

En choisissant comme terrain d'étude la plus ancienne région agricole de la Tunisie, la basse vallée de la Medjerda, on se propose d'analyser les impacts économique et environnemental des changements de tarification : tout d'abord l'application d'une première version de la tarification binôme (H1B) à la place d'une tarification préférentielle (TP) en exercice jusqu'en 2001, ensuite l'entrée en vigueur à moyen terme d'une deuxième version de tarification binôme (H2B) remplaçant la première. L'impact économique est analysé en comparaison des objectifs contenus dans les nouvelles propositions tarifaires. L'impact écologique est évalué surtout vis-à-vis de la pollution par les nitrates, car le développement des algues dans les réseaux hydrauliques et les teneurs en nitrates des nappes phréatiques, d'après des mesures récentes, sont alarmants, des niveaux élevés de pollution sont atteints dans les eaux superficielles et profondes. Dans le gouvernorat de l'Ariana (qui englobe la quasi-totalité des périmètres publics irrigués de la zone étudiée) les teneurs en nitrates sont comprises entre 34,11 et 223,24 mg/l dans les nappes phréatiques et 6,82 à 86,81 mg/l dans les nappes profondes. La salinité, que nous ne traitons pas dans cet article, est aussi un des problèmes à résoudre rapidement.

Notre principale source d'information est une enquête de terrain pour la campagne agricole 1999-2000 et notre méthode est fondée sur un modèle bio-économique, provenant du couplage d'un modèle économique et d'un modèle biophysique. Cet article présente le terrain d'étude, le cadre méthodologique et la discussion des résultats obtenus.

2 Présentation de la basse vallée de la Medjerda

La basse vallée de la Medjerda est située au Nord-Est de la Tunisie à une latitude moyenne de 36° 50 et une longitude moyenne 9° 75. Elle se répartit entre les deux gouvernorats de l'Ariana et de Bizerte au nord de Tunis et de part et d'autre de l'oued Medjerda en aval du barrage de Laroussia jusqu'à la mer, zone où se trouve la station de pompage P0 à Tobias. La zone d'étude est limitée aux périmètres publics irrigués, alimentés exclusivement par les eaux de surface de l'oued Medjerda – distincts des

anciens périmètres (25 828 ha de surface agricole utile) irrigués par les eaux du barrage de Laroussia. Les nouveaux périmètres (7 345 ha de surface agricole utile), en aval des anciens, sont alimentés par la station de pompage P0 à Tobias.

Les données climatiques sont relevées à la station météorologique de Cherfech. La région appartient à l'étage bioclimatique semi-aride à hiver doux, la pluviométrie annuelle moyenne est de 450 mm avec des variations assez fortes de 250 mm à 750 mm. L'évapotranspiration est de 1 550 mm/an, le déficit hydrique moyen est donc de 1 100 mm/an. La température annuelle moyenne est d'environ 20 °C avec une amplitude thermique annuelle moyenne relativement faible en raison de l'effet modérateur de la mer (15 °C), mais il y a des risques de gelée en janvier et des températures élevées proches de 40 °C en juillet.

Les sols reposent sur un relief à faible pente et sont soit peu évolués provenant d'un apport alluvial à caractère vertique, soit calcimagnésiques ou bruns calciques. D'une manière générale, la texture des sols est le plus souvent argileuse à limoneuse et par endroits sableuse (anciens bourrelets de berges). En superposant deux cartes de texture du sol pour deux horizons (< 30 cm et > 30 cm), on différencie huit classes de sol.

La situation du drainage est dramatique. Dans la basse vallée de la Médjerda, les anciens périmètres sont mal drainés, seulement 7 % de la surface irrigable dispose d'un réseau de drainage fonctionnel. En revanche, dans les nouveaux périmètres, la superficie irrigable est totalement drainée. Vu l'importance du drainage pour lutter contre le risque de salinisation et d'hydromorphie, il est urgent de rétablir un drainage efficace sur les anciens périmètres, c'est une condition nécessaire pour promouvoir une irrigation efficace sur les sols lourds de la région.

Le réseau d'irrigation des anciens périmètres ainsi que le réseau de deux des nouveaux périmètres (Utique et Lezdine) est composé de secteurs de 100 à 2 000 ha où l'eau est amenée par des canaux secondaires. Chaque secteur est partagé en quartiers par des canaux tertiaires et quaternaires en béton à ciel ouvert, généralement en très mauvais état. Le réseau est conçu pour une irrigation à la demande ou au tour d'eau. Toutefois, c'est l'irrigation au tour d'eau qui est généralement pratiquée sur les anciens périmètres sauf pour le périmètre récemment créé de Borj Toumi Nouvel et pour les deux nouveaux périmètres où l'irrigation se pratique à la demande. Le réseau d'irrigation pour les deux autres nouveaux périmètres (Kalaat Landalous et Henchir Tobias) est composé d'unités d'adduction et de distribution en conduites enterrées sous pression. L'irrigation se fait à la demande à l'aide des bornes de 5 l/s tout les 5 ha.

Le fonctionnement actuel de l'ensemble du réseau d'irrigation de la basse vallée de la Médjerda présente une série de défaillances dues :

- à la vétusté des canaux tertiaires et quaternaires, à l'origine de pertes d'eau importantes dans certains anciens périmètres ;
- à la forte charge en limon résultant de la gestion des lâchers par turbinage et des opérations de vidange des barrages en hiver ;
- au développement d'algues dans le système et dans les réseaux hydrauliques occasionnant de nombreux dysfonctionnements dans la desserte des parcelles (colmatages de filtres, des compteurs et des matériels d'aspersion).

L'exploitation de l'infrastructure primaire du réseau d'irrigation a été confiée à la société SECADENORD (Société d'exploitation des canaux et adductions des eaux du NORD) pour les nouveaux périmètres et au Commissariat régional au développement agricole (CRDA) pour les anciens périmètres, mais il est envisagé de transférer la gestion des nouveaux périmètres à la SECADENORD. L'exploitation et la maintenance des réseaux des périmètres sont du ressort des CRDA. La gestion de

l'eau d'irrigation est assurée par les CRDA et par les 29 associations d'intérêt collectif² dont la création s'est achevée en 2000. Ainsi, les CRDA achètent l'eau à la SECADENORD, puis la revendent aux associations ou directement aux irrigants à la demande. Le prix d'achat de l'eau par les CRDA en 2000 est de 0,035 DT/m³, le prix de vente est établi selon les modalités de la tarification préférentielle : en saison hivernale, 0,047 DT/m³ pour les associations d'intérêt collectif et 0,0625 DT/m³ pour les exploitants ; en saison estivale, 0,094 DT/m³ pour les associations et 0,125 DT/m³ pour les exploitants³.

L'analyse de la structure agraire montre une très forte inégalité dans la répartition de la terre entre les exploitants de la basse vallée de la Medjerda. En effet, près de 2 % des agriculteurs possède une exploitation de superficie supérieure à 50 ha et exploite 26 % de la surface agricole utile totale de l'ensemble des périmètres de notre étude (33 174 ha). Alors que 54 % des 4 448 exploitants ont une surface inférieure à 5 ha et partagent seulement 16 % de la surface agricole utile totale (le coefficient de Gini est de 0,66).

La production végétale est très variée. Pour la campagne agricole 1999-2000, la répartition est équivalente entre l'arboriculture, les céréales (y compris les légumineuses) et les fourrages en totalisant près de 80 % de la superficie cultivée, la jachère n'est pas fréquente, le maraîchage ne représente que 19 % de la surface cultivée. Le programme initial de mise en valeur de la basse vallée de la Medjerda a prévu, en fonction des potentialités agronomiques de la région, la promotion en ordre décroissant des cultures fourragères (et par voie de conséquence de l'élevage bovin laitier), des cultures maraîchères, de l'arboriculture et en dernier lieu des céréales de promouvoir d'abord les cultures fourragères, puis l'élevage bovin laitier, les cultures maraîchères, l'arboriculture et en dernier lieu les céréales. Actuellement, ce schéma n'est pas respecté, et les céréales, contre toute attente, occupent une part importante dans les assolements principalement à cause de la garantie du prix à la production (subvention).

La conduite en sec dans la basse vallée de la Medjerda couvre près de 29 % de la surface cultivée : 58 % les céréales, 31 % les fourrages et 20 % l'arboriculture. En maraîchage, 58 % des surfaces sont cultivées en hiver, ce qui explique la très faible consommation d'eau – 1 258 m³ par hectare irrigable ou équipé, pour une quantité allouée cinq fois plus élevée –, et le faible taux d'intensification (78 %), par rapport au taux de 110 % espéré lors de la création des périmètres. Ces observations résultent de la réticence de la plupart des agriculteurs à utiliser une eau de plus en plus chargée et des pannes successives du réseau d'irrigation dues à la précarité des canaux et à la mauvaise qualité de l'eau.

Le mode d'irrigation le plus répandu est l'irrigation gravitaire, mais son efficacité est faible (50 à 70 %) en comparaison des autres systèmes plus économes en eau, comme l'aspersion (80 à 85 %) et le goutte à goutte (90 à 95 %) qui représentent 38 % des surfaces des périmètres publics irrigués.

L'élevage bovin laitier est la principale activité de production animale de la région. En l'absence de données sur les effectifs et la production par périmètre, nous analysons ce secteur à partir des estimations de notre propre enquête de terrain. Cette activité est peu développée, la charge animale est seulement de 0,46 en vache ou unité zootechnique bovine (UZB) par hectare irrigable. L'activité a plus de succès dans les nouveaux périmètres (0,60 UZB/ha) que dans les anciens (0,42 UZB/ha). Les troupeaux sont composés essentiellement de races sélectionnées et de races croisées, mais la production laitière est moyennement performante, atteignant à peine 3 500 litres par vache et par an.

² La promotion des associations d'intérêt collectif est encore faible dans la basse vallée de la Medjerda, surtout dans les anciens périmètres publics irrigués puisqu'on compte moins d'une association par périmètre, 20 associations pour les 29 anciens périmètres et 9 associations pour les 4 nouveaux périmètres.

³ A l'an 2000 : 1 DT = 0.7206 \$ US et 1 DT = 0.7916 €

De 1999 à 2001, la tarification de l'eau d'irrigation a été de type préférentiel. En 2002, dans le cadre de la réforme de la politique de tarification de l'eau d'irrigation, le programme de l'Etat a consisté à instaurer un système de tarification binôme propre à la région. Ce système tarifaire a été choisi à partir des caractéristiques de mise en valeur observées au cours des années 1990 et des objectifs recherchés en termes de valorisation de l'eau, mais aussi et surtout de la couverture des charges d'exploitation des ressources en eau, compte tenu des difficultés rencontrées dans les périmètres publics irrigués de la basse vallée de la Medjerda :

- l'écart important entre superficies irriguées et superficies équipées malgré les obligations de mise en valeur ;
- la faible consommation unitaire en eau ;
- la très faible utilisation des périmètres en hiver alors qu'il y a un intérêt économique à apporter un complément d'irrigation aux fourrages et aux céréales.

Les pouvoirs publics ont cherché à proposer une structure tarifaire qui réponde aux objectifs suivants :

- accroître la production de céréales, de lait et de viande ; produits alimentaires de base et dérivés de cultures irriguées en hiver ;
- encourager l'utilisation des systèmes d'irrigation plus économes en eau, par l'aspersion et par la goutte à goutte ;
- favoriser l'émergence de systèmes de production plus intensifs valorisant mieux les ressources en eau.

La structure de tarification binôme proposée repose sur les principes suivants :

- l'assiette de la partie fixe correspond à la superficie équipée, afin d'encourager la mise en valeur de ces surfaces et de sécuriser les ressources financières du gestionnaire ;
- un volume en franchise est attribué en période hivernale, du 1^{er} novembre au 30 mars, non reportable sur la période suivante. Ce volume fixé à 1 000 m³/ha a pour but d'encourager l'irrigation des céréales et des fourrages en hiver. Il constitue un plancher rationnel pour inciter les agriculteurs qui ne sont pas enclins à utiliser l'eau durant cette période à en consommer ;
- absence de franchise en été, du 1^{er} avril au 31 octobre, période de production de cultures plus rémunératrices. La facturation de l'eau selon le volume consommé doit encourager une meilleure gestion de l'eau et inciter à investir dans les équipements économes en eau.

Les pouvoirs publics ont programmé d'instaurer en 2002 une première version de la tarification binôme (H1B) et ultérieurement une seconde version (H2B). Selon les tarifications (H1B et H2B), un tiers des charges fixes est transféré vers le terme variable ; la tarification H2B multiplie par deux les frais d'entretien et de gestion (comptabilisés en prix constants de 1994) par rapport à H1B (Tableau 1).

Tableau 1. La structure des différentes tarifications binômes (exprimée en Dinars tunisiens).

Périmètre public irrigué	Termes fixes	Termes variables	Indice
	72,5 DT x ha équipés	[(cons.hiver en 1 000 m ³) - (ha équipés x 1 000 m ³) + (cons.été en 1 000 m ³)] x 41 DT	H1B
Ancien	166,9 DT x ha équipés	[(cons.hiver en 1 000 m ³) - (ha équipés x 1 000 m ³) + (cons.été en 1 000 m ³)] x 88,2 DT	H2B
	53,3 DT x ha équipés	[(cons.hiver en 1 000 m ³) - (ha équipés x 1 000 m ³) + (cons.été en 1 000 m ³)] x 36,1 DT	H1B
Nouveau	122,9 DT x ha équipés	[(cons.hiver en 1 000 m ³) - (ha équipés x 1 000 m ³) + (cons.été en 1 000 m ³)] x 70,9 DT	H2B

Pour mieux approcher les exploitations agricoles de la basse vallée de la Medjerda, notamment leur caractérisation et leur mise en valeur, une enquête a été conduite au cours de la campagne agricole 1999-2000, selon la structure agraire de la région. L'enquête a touché 60 exploitations réparties sur les anciens et les nouveaux périmètres en fonction de leur superficie totale. L'échantillon représente seulement 1,35 % du nombre total des exploitants et 7,34 % de la surface agricole utile totale. Pour gagner en représentativité, le travail de terrain a été réparti d'une manière presque homogène sur toute la basse vallée de la Medjerda dans 27 périmètres sur les 33 retenus dans l'analyse.

Les exploitations représentatives de la région sont classées selon trois critères :

- l'origine de l'eau d'irrigation du fait de la différenciation de qualité de l'eau, les exploitations dans des anciens périmètres (AE) et celles des nouveaux périmètres (NE) ;
- la dotation en terre :
- Strate 1 : SAU < 5 ha
- Strate 2 : 5 ≤ SAU < 10 ha
- Strate 3 : 10 ≤ SAU < 20 ha
- Strate 4 : 20 ≤ SAU < 50 ha
- Strate 5 : SAU ≥ 50 ha
- l'orientation agricole, autrement dit le système de production :
 - Système 1: arboriculture / céréales / fourrages / maraîchage
 - Système 2 : arboriculture / céréales / fourrages
 - Système 3 : arboriculture / céréales / maraîchage
 - Système 4 : céréales / fourrages / maraîchage

Afin de privilégier la diversité culturelle quant aux spéculations et rotations pratiquées qui caractérise la mise en valeur dans la basse vallée de la Medjerda, les exploitations-types ont été tirées de la moyenne des unités de production groupées selon ces trois critères de typologie. Ceci nous permet d'éviter de « sur-spécialiser » la région étudiée et de garder un niveau de flexibilité assez important à l'intérieur du modèle bio-économique à développer. En revanche, cela contraint à un nombre très élevé de simulations à réaliser sur le modèle biophysique. En définitive, 20 exploitations-types ont été définies (Abbes, 2005), 12 sur les anciens périmètres et 8 sur les nouveaux.

3 Méthodologie : la modélisation bio-économique

L'agriculture est un domaine d'application par excellence des modèles de programmation mathématique. Du fait de la présence de multiples unités de production de différentes tailles, en

compétition, et dépossédées de pouvoir monopolistique sur les marchés d'inputs et d'outputs, l'activité est un domaine d'application idéal de la théorie économique de base (Boussard, 2002). En outre, l'agriculture est caractérisée par la complexité extraordinaire d'utilisation des ressources naturelles. Ainsi, l'application des modèles de programmation mathématique doit être complétée par la construction de fonctions de production adéquates.

Les fonctions de production traditionnelles issues de la convergence de l'inférence statistique et de la théorie économique standard (approche économétrique) présentent certaines limites pour traiter les rapports complexes qu'entretient l'agriculture avec l'environnement naturel d'une part et le milieu économique d'autre part (Boussard, 1987 ; Flichman, 1997). Construire des fonctions de production suivant les formes mathématiques les plus simples dans le secteur agricole, où des phénomènes biologiques, agronomiques et écologiques conditionnent fortement le choix des techniques de production, ne semble pas toujours très pertinent. En outre, à court et à moyen terme, une fonction de production continue peut être une représentation un peu éloignée de la réalité micro-économique. En effet, des choix discrets représentés par des vecteurs *input-output* sont souvent plus réalistes que des choix intermédiaires peu significatifs. Dans ce cas, la fonction de production continue est une approximation des fonctions de production discrètes réelles et non l'inverse (Hazell et Norton, 1986).

Les limites de l'approche économétrique nous ont conduit à une autre approche plus originale, utilisant des fonctions de production d'ingénieur obtenues via le savoir des agronomes par des simulations sur un modèle biophysique ou agronomique⁴. Dans ce travail, l'application du modèle biophysique a pour objectif de simuler à long terme les rendements et la pollution par les nitrates dans un contexte d'une grande diversité de techniques de production et dans des conditions pédoclimatiques très variées. Les coefficients techniques ainsi obtenus sont intégrés dans le modèle économique, d'où l'expression de « modélisation bio-économique » pour désigner ce couplage possible de deux manières différentes : soit d'une manière discrète en introduisant directement dans le modèle de programmation mathématique la matrice des coefficients techniques générés par le modèle biophysique (Taylor *et al.*, 1992 ; Louhichi, 2001), soit par l'intermédiaire des fonctions estimées au préalable à partir de ces coefficients (Vicien, 1989 ; Helfand et House, 1995 ; Maugars, 1998) appelées aussi méta-modèles (Bouzaher *et al.*, 1993). Dans notre travail, la méthode de couplage a été adoptée pour deux raisons : d'une part le choix de la forme fonctionnelle pose problème, car une fonction estimée économétriquement peut être fondée pour certaines cultures et pour certains types de sols mais pas pour d'autres⁵, et surtout, comme l'affirment Hazell et Norton (1986) les choix discrets sont souvent plus réalistes que des choix intermédiaires peu significatifs.

3.1 Le modèle biophysique

Le modèle biophysique utilisé est CropSyst, Cropping Systems Simulation Model (Stöckle *et al.*, 1994 ; Stöckle *et al.*, 2003). CropSyst a été choisi comme source des fonctions de production d'ingénieur parce que le modèle a été utilisé et validé pour les régions semi-arides, notamment la basse vallée de la Medjerda (Mlaouhi, 2002 ; Belhouchette, 2004).

⁴ Dans la littérature ces modèles sont désignés comme modèles biophysiques, agronomiques, environnementaux, bio-techniques ou de croissance de plantes. Cela dépend essentiellement du regard de l'utilisateur et de l'usage qu'il en fait.

⁵ Par exemple, lors de l'estimation économétrique des fonctions de pollution par les nitrates d'une culture de laitue cultivée sur deux types du sol en fonction des apports en eau et azote, Helfand et House (1995) ont dû choisir deux formes fonctionnelles différentes pour leurs fonctions de lixiviation.

Les rotations intégrées au modèle agronomique représentent les activités dans le modèle bio-économique et sont définies en 6 dimensions : exploitation-type, culture, mode de conduite (sec ou irrigué), technique de production (dose d'eau et dose d'azote), type de sol, précédent cultural. Les techniques de production ont été générées par la combinaison de 5 doses d'irrigation et de 6 doses de fertilisation azotée (en diminuant à chaque fois les doses initiales appliquées par l'exploitant de 20 %). L'arboriculture, présente dans certaines exploitations-types, a été assimilée à la vigne, car CropSyst est capable de simuler avec la vigne.

Les simulations (9 726 au total) ont concerné la période 1999-2005 et ont été basées sur les données climatologiques générées par le modèle ClimGen pour la période 2001-2025 (Mlaouhi, 2002). Les différentes simulations sont validées pour chaque type de sol et pour chaque itinéraire technique (rotation culturale, technique de production) réellement suivi par chacune des exploitations-types, selon le seul critère disponible c'est-à-dire les rendements des différentes cultures de la campagne agricole 1999-2000. La comparaison entre les rendements simulés par CropSyst et les rendements réels (obtenus lors de l'enquête) a permis de constater que le modèle simule assez fidèlement les conditions pédoclimatiques de la région étudiée. En effet, les rendements simulés des cultures enregistrent des écarts importants (plus de 10 %) par rapport aux rendements réels des exploitations-types dans 14 cas sur 312. Les simulations de CropSyst traduisent d'une manière assez fidèle la loi de facteur limitant de von Liebig mais avec un certain degré de substituabilité entre les inputs à des faibles doses d'apports (Ackello-Ogutu *et al.*, 1985 ; Frank *et al.*, 1990 ; Berck et Helfand, 1990 ; Paris, 1992 ; Berck *et al.*, 2000). L'augmentation des doses d'irrigation et de fertilisation entraîne, dans une première phase, une augmentation plus que proportionnelle du rendement, ensuite une augmentation moins que proportionnelle et enfin une stagnation, voire parfois même une diminution (Figure 1).

En ce qui concerne la pollution par les nitrates, les représentations graphiques de la lixiviation moyenne des nitrates sur les 26 campagnes agricoles et pour les six rotations précédemment évoquées, confirment l'hypothèse de la non-monotonie et/ou la non-convexité de la fonction d'externalité (Flichman, 2002 ; Abbes, 2005). En fait, elles mettent en évidence la multitude des formes que peut incarner la pollution selon la combinaison des apports en eau et en azote et soulignent surtout l'importance de la rotation comme moyen préventif (Figure 2). A titre d'exemple, un niveau de pollution de 9,4 kg/ha est atteint par une irrigation de 8 000 m³/ha d'eau et une fertilisation de 264 kg/ha d'azote pour la rotation TOMS/BD (Tomate de saison / Blé dur), alors que la moitié de cette dose (132 kg/ha) appliquée avec la même irrigation conduit au même niveau de pollution avec la rotation TOMS/PDTAS (Tomate de saison / Pomme de terre d'arrière saison).

Afin de préparer les résultats de CropSyst pour les intégrer au modèle de programmation mathématique, il faut identifier les rendements moyens et les pollutions moyennes par nitrates par catégorie de campagne agricole (bonne, mauvaise et moyenne). L'analyse des séries climatologiques a conduit au classement des campagnes agricoles en se fondant sur l'intervalle de confiance de la pluviométrie au cours de deux périodes, la première de septembre à décembre, la seconde de janvier à avril.

Figure 1. Illustration graphique des résultats de CropSyst : Cas du rendement en fonction des apports d'intrants pour quelques exemples de rotation

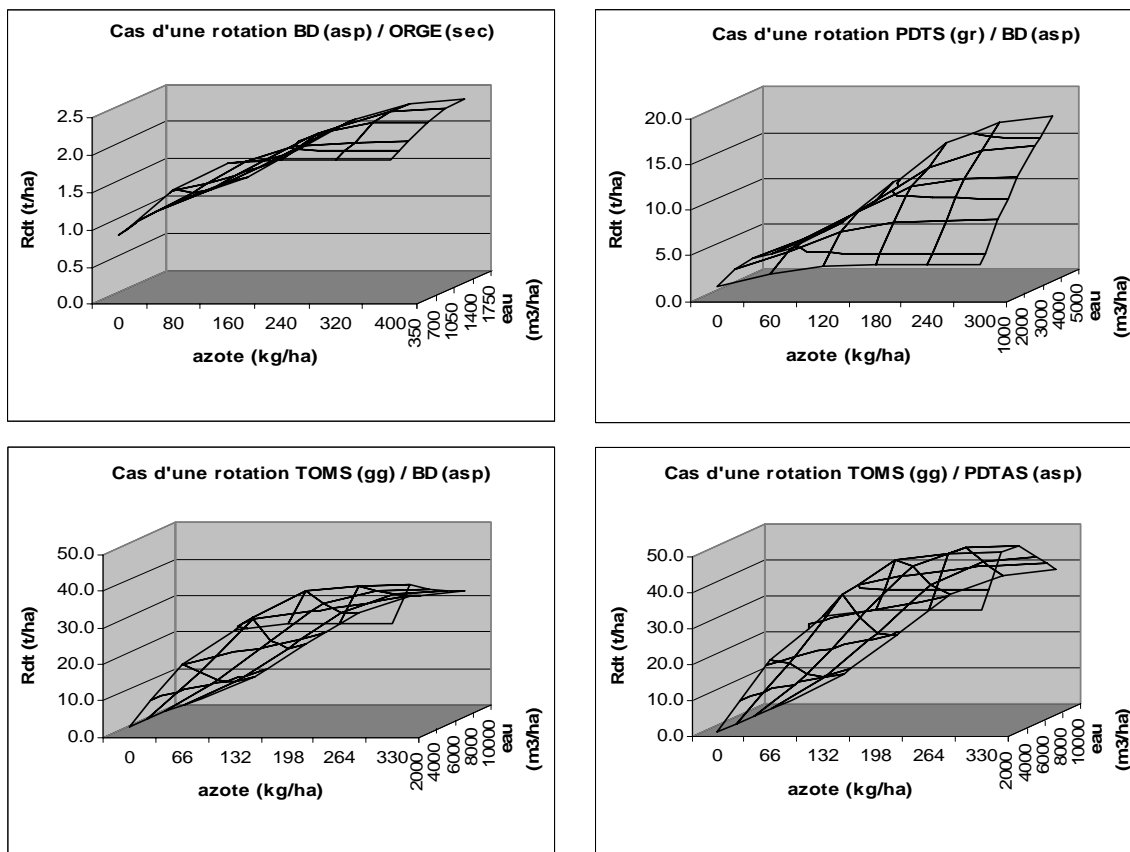
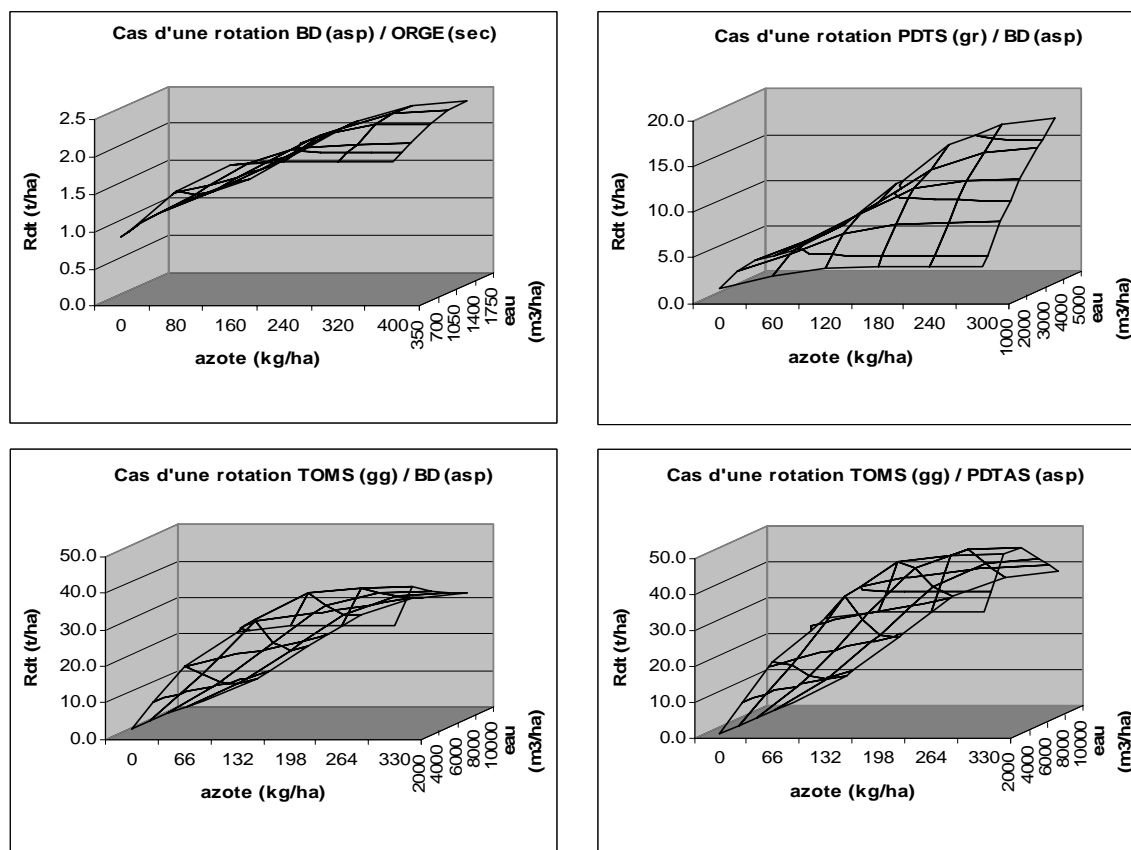


Figure 2. Illustration graphique des résultats de CropSyst : Cas du lixiviation des nitrates en fonction des apports d'intrants pour quelques exemples de rotation



3.2 Le modèle économique

Le modèle développé est un modèle de maximisation sous contraintes de la démarche néoclassique utilisée, du moins au départ, dans une perspective d'analyse positive pour adopter par la suite une perspective d'analyse normative en étudiant les impacts des différentes politiques tarifaires.

Le modèle de programmation mathématique est élaboré à une échelle régionale. Le choix de cette échelle se justifie d'une part économiquement, par le fait que les exploitations agricoles entretiennent entre elles des activités de transfert de facteurs de production (terre et main-d'œuvre), et d'autre part écologiquement, par le fait qu'en matière de pollution diffuse, comme dans le cas de la pollution par les nitrates, les unités physiques dans lesquelles s'inscrivent les fonctionnements écologiques et hydrologiques englobent un certain nombre d'exploitations et coïncident avec l'entité de bassin versant. Tout en reposant sur une base micro-économique, le modèle agrégé régional intègre ainsi les caractéristiques de plusieurs exploitations représentatives et les liaisons de transfert entre les exploitations qui sont définies de manière explicite (Buckwell et Hazell, 1972). Cette réponse agrégée est le fruit des décisions individuelles et des interactions entre les acteurs (Deybe, 1994), mais elle est issue des situations particulières et par conséquent non généralisable.

Le point de départ de cette approche est la modélisation de plusieurs exploitations-types représentatives de la région où le comportement micro-économique de chaque exploitant est supposé rationnel en maximisant l'utilité espérée tout en satisfaisant une série de contraintes. Le temps est pris en compte dans ces modèles d'une manière implicite via les coefficients techniques obtenus par les simulations à long terme du modèle agronomique et la modélisation du risque est fondée sur le modèle espérance-écart-type (E,σ) développé par Brink et McCarl (1978).

$$\text{Max} : E(U_s) = RN_s - \phi_s * \sigma_s$$

où :

U_s l'utilité

RN_s le revenu net espéré ou la marge nette espérée

σ_s l'écart-type du revenu net

ϕ_s le coefficient d'aversion au risque

Les états de nature sont obtenus par la combinaison de la variabilité climatique et de la variabilité économique. La variabilité climatique est définie par les trois types de campagnes agricoles auxquelles on assigne des probabilités d'occurrence sur la période de simulation du modèle agronomique (EN = 3). En revanche, la variabilité économique considérée est due à la variation des prix à la production sur le marché et elle est générée en faisant l'hypothèse d'une distribution normale de ces prix (EM = 20). Ces états de nature combinent des rendements à des niveaux de prix et représentent ainsi des situations auxquelles l'agriculteur peut avoir l'occasion de faire face, on en dénombre T = 60 (EN x EM). De ce fait, l'écart-type est calculé de façon endogène en fonction de l'ensemble des déviations entre le revenu net espéré et les différents revenus nets spécifiques de chaque état de nature.

$$\sigma_s = \sqrt{\text{VARCE}_s}$$

$$\text{avec } \text{VARCE}_s \text{ la variance : } \text{VARCE}_s = \left(\sum_{en,em} \text{DEV}_{s,en,em} \right)^2 * \frac{1}{T}$$

où $\text{DEV}_{s,en,em}$ les déviations entre le revenu net espéré et les revenus nets relatifs à chaque état de nature

$$\text{DEV}_{s,en,em} = RN_s - \text{RNA}_{s,en,em}$$

Le revenu net espéré est la différence entre la somme des valeurs de productions végétales et animales et l'ensemble des charges de mise en valeur sur l'exploitation. Les charges variables comprennent la fertilisation azotée, le pressage des balles de foin et de paille, la consommation d'eau, le recrutement de main-d'œuvre, l'approvisionnement en aliments concentrés, les semences, les plants, les engrais

phosphatés et potassiques, les traitements phytosanitaires, le labour et la récolte pour les céréales. Les valeurs du foin et de la paille sont comptabilisées selon l'état des stocks. Les charges fixes comprennent les coûts d'amortissement des vergers arboricoles et du matériel d'irrigation, et les coûts de location des terres.

Dans ces modèles d'exploitation, les prix des inputs et des outputs sont logiquement exogènes puisqu'on suppose qu'une seule unité de production est généralement dépourvue de tout pouvoir monopolistique pour influencer les prix sur les marchés. Cette hypothèse peut être contestée à l'échelle régionale où les prix sont rendus souvent endogènes, surtout du côté des outputs par une confrontation entre l'offre et la demande régionale. Cette demande est supposée constante, et c'est pour cela qu'on parle dans ce cas de modèle d'équilibre partiel car si les prix sont endogènes, les revenus ne le sont pas. Cependant, le fait de considérer que tous les produits agricoles sont commercialisés à l'intérieur de la région est déjà une forte hypothèse, puisqu'en réalité les débouchés peuvent dépasser les limites régionales surtout lorsque la région est le principal producteur de certains produits agricoles à l'échelle nationale. En outre, il est difficile d'estimer les élasticités-prix qui sont normalement calculées à l'échelle nationale et non plus régionale. On pense donc que l'endogénéisation des prix est beaucoup plus pertinente dans les modèles sectoriels et dans les modèles d'équilibre général qu'au sein des modèles régionaux. C'est la raison pour laquelle les prix des inputs et d'outputs sont supposés exogènes à notre modèle agrégé, ce qui constituera sa principale limite.

Le modèle agrégé de nature stochastique à décision unique consiste à optimiser l'utilité espérée régionale obtenue par agrégation des utilités espérées des exploitations-types tout en gardant la spécificité des contraintes individuelles et en introduisant les contraintes du transfert des ressources :

$$Max : UT = \sum_s (U_s * CPPPI_s * NEXAPPI) + \sum_s (U_s * CPPPI_s * NEXNPPI)$$

avec :

UT l'utilité espérée régionale

CPPPI_s le coefficient de pondération par exploitation

NEXAPPI le nombre des exploitations des anciens PPI

NEXNPPI le nombre des exploitations des nouveaux PPI

La validation des modèles individuels a été effectuée par ajustement des coefficients d'aversion au risque⁶ afin de minimiser les écarts entre les résultats des modèles en termes de revenu, d'assolement et des unités zootechniques bovines et les résultats obtenus sur le terrain dans le cadre d'une tarification préférentielle de l'eau d'irrigation (au cours de la campagne agricole 1999-2000). Quant à la validation du modèle agrégé, on peut avancer que la validation des modèles individuels permet automatiquement sa réalisation, ce qui est aberrant car la structure du modèle agrégé est totalement différente de celle des modèles individuels. La validation de chacun des modèles individuels est une étape nécessaire mais elle n'est pas suffisante pour en déduire la validation du modèle agrégé dès lors que les résultats issus des modèles individuels validés peuvent être considérés comme l'aboutissement d'une situation où aucune coopération entre les agriculteurs n'est existante puisque chaque exploitant maximise son utilité indépendamment de la réalisation sur les autres exploitations et dans le cadre de ses propres contraintes de dotation en ressources. Par contre, dans le modèle agrégé, les résultats peuvent être interprétés comme émanant d'une situation où tous les exploitants coopèrent ensemble, notamment via le transfert des ressources, pour dégager le maximum de revenu agrégé sans donner trop d'importance aux effets

⁶ Le coefficient d'aversion au risque est une valeur ayant une interprétation intuitive : lorsque le revenu suit une distribution normale, il correspond à un niveau de risque toléré par les statisticiens (ou les économistes) pour que l'erreur de test des hypothèses soit inférieure à 5 %. Le coefficient d'aversion au risque est une valeur qui suppose que la probabilité d'avoir un revenu supérieur ou égal à U est de 95 % (Hazell et Norton, 1986).

redistributifs. L'idée se résume alors dans la recherche d'une méthode pour limiter cette forme de coopération entre les exploitants. Cette méthode consistera à recueillir une information supplémentaire sur la distribution des revenus des agriculteurs sous forme d'une matrice de variances et de covariances (ou simplement d'une matrice de variances). En fait, l'introduction de la matrice variances et de covariances issue de la validation des modèles individuels dans le modèle agrégé permet d'apporter deux types d'information exogènes au modèle : le premier concerne la distribution des revenus dégagés par les exploitants pour chaque état de nature autour de leurs moyennes respectives via les variances, et le deuxième concerne la corrélation entre les niveaux de revenus des exploitants par le biais des covariances. Dans le cadre de ce travail, on a retenu seulement les variances des revenus issues des modèles individuels, supposées être les valeurs maximales que peuvent atteindre les variances des revenus dans le modèle agrégé.

Le modèle bio-économique agrégé, ainsi construit et validé, est utilisé pour analyser les impacts économique et environnemental de la mise en œuvre des formules tarifaires binômes de l'eau d'irrigation (H1B) et (H2B).

4 Résultats et discussion

Les résultats des systèmes tarifaires binômes sont analysés et interprétés en fonction des objectifs de la tarification préférentielle au cours de la campagne agricole 1999-2000. Même si les deux formules tarifaires binômes diffèrent selon les anciens ou les nouveaux périmètres, les objectifs recherchés sont identiques : meilleure couverture des charges d'exploitation de la ressource en eau et incitation des exploitants à irriguer davantage tout en valorisant mieux la ressource par l'émergence de systèmes de production plus intensifs et par l'utilisation accrue de systèmes de micro-irrigation économes en eau. On essaye donc de vérifier grâce au modèle bio-économique le degré de réalisation de ces objectifs. La vérification de la couverture des charges d'exploitation de la ressource en eau est difficilement réalisable compte tenu de l'information disponible. C'est pour cela qu'on suppose que plus l'État collecte des recettes engendrées par une formule tarifaire mise en place, plus il est en situation favorable pour couvrir les charges d'exploitation de la ressource en eau.

A l'aide de la classification des exploitations selon la taille et le revenu net dégagé grâce au modèle, on a calculé un indice de distribution de revenu l'indice de Gini, discuté par Tsur et Dinar (1995) :

$$G = 1 + \frac{1}{n} - \frac{2}{n^2 \mu} \sum_{i=1}^n i \pi_i$$

où : π_i est le revenu net de l'exploitation i

n le nombre total des exploitations

$$\mu \text{ le revenu net moyen } \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \pi_i$$

et les exploitations sont ordonnées de telle manière que $\pi_1 \geq \pi_2 \geq \dots \geq \pi_n$

Le tableau 2 expose le degré de réalisation de certains objectifs des pouvoirs publics et les effets du changement de formule tarifaire sur la mise en valeur des périmètres publics irrigués de la basse vallée de la Medjerda.

Tableau 2. Les résultats des simulations de différentes formules tarifaires à l'échelle de la basse vallée de la Medjerda.

Mode de tarification	Préférentielle	Binôme H1B	Binôme H2B
Revenu net (MDT)	46,1	49,1	41,8
Indice de Gini	0,78	0,78	0,78
Céréales (1 000 ha)	11,96	10,77	11,84
Jachère (1 000 ha)	0,41	0,40	0,41
Cultures fourragères (1 000 ha)	7,82	8,65	8,03
Cultures maraîchères (1 000 ha)	7,49	8,35	7,55
surface conduite en sec (1 000 ha)	8,61	8,03	8,60
surface conduite en irrigué GR (1000 ha)	12,49	14,02	12,74
surface conduite en irrigué ASP (1 000 ha)	9,40	8,98	9,31
surface conduite en irrigué GG (1 000 ha)	3,93	3,90	3,93
Taux d'intensification (%)	82,3	85,8	82,8
Demande totale en eau (Mm ³)	69,7	84,6	73,0
Demande en eau durant la saison hivernale (Mm ³)	14,2	16,9	15,2
Demande en eau durant la saison estivale (Mm ³)	55,6	67,7	57,8
Irrigation par ha (m ³ /ha)	2 223	2 696	2 327
Prix moyen de l'eau (DT/m ³)	0,11	0,07	0,17
Valorisation de l'eau (DT/m ³)	0,66	0,58	0,57
Taux d'utilisation d'eau par rapport aux allocations (%)	30	37	32
Fertilisant par ha (kg/ha)	305	322	309
Valorisation de l'azote (DT/kg)	4,57	4,60	4,07
Pollution nitrates par ha (kg/ha)	10,7	11,6	11,0

(Asp, aspersion ; GG, goutte à goutte ; Gr, gravitaire)

Mm³ millions de mètres cubes

DT dinar tunisien

4.1 Analyse des impacts de la formule tarifaire binôme H1B

Dans la basse vallée de la Medjerda, le passage de la tarification préférentielle à la tarification binôme de formule H1B se traduit par l'augmentation de la demande totale en eau de 21,2 %, demande marquée surtout par une hausse de 19,2 % durant la saison hivernale à la suite de l'extension de la superficie allouée aux cultures fourragères, principalement en bersim. Même si la tarification préférentielle et la tarification binôme H1B sont deux formules ayant pour objectif d'inciter à consommer l'eau en hiver, la deuxième semble dotée d'un pouvoir incitatif beaucoup plus intéressant. La demande en eau durant la saison estivale croît de 21,8 %.

Les objectifs des pouvoirs publics sont loin d'être atteints, excepté celui du taux d'intensification. En effet, la couverture des charges d'exploitation de la ressource en eau n'est pas possible du moment que les recettes baissent de 19,6 %, en raison d'un fléchissement de 33,7 % du prix moyen de l'eau malgré l'accroissement de la demande. En revanche, le déficit budgétaire du gestionnaire se traduit par un surplus pour les exploitants qui améliorent leur revenu net de 6,4 % mais en valorisant beaucoup moins la ressource en eau (-12,2 %) puisque l'accroissement de la demande en eau est plus que proportionnel à celui du revenu net. Par ailleurs, la superficie des spéculations conduites en micro-irrigation baisse de 3,4 %, tandis que celle en irrigation gravitaire augmente de 12,3 %, ce qui est en complète contradiction avec le programme national d'économie d'eau dès lors que l'efficacité globale de l'irrigation est

devenue dans ce cas moins pertinente. En ce sens, la formule H1B n'est pas capable, à elle seule, d'inciter les exploitants à s'équiper en matériel de micro-irrigation.

En terme d'occupation du sol, la baisse du prix moyen de l'eau engendrée par la tarification binôme H1B favorise les cultures fourragères (10,6 %) et maraîchères (11,4 %) conduites principalement en irrigué eu regard de la céréaliculture (- 9,9 %) et de la jachère (- 2,7 %). Le système de production devient ainsi plus intensif de 4,2 %, le taux d'intensification passe de 82,3 % à 85,8 %, et l'essor des cultures fourragères s'accompagne de l'augmentation du cheptel bovin de 13,1 %. Les effets conjugués de la baisse du prix moyen de l'eau et de l'intensification de l'activité explique la nette amélioration du profit des agriculteurs.

L'augmentation de la consommation d'eau et la hausse de la demande en intrants azotés de 5,5 % sont les caractéristiques de ce mouvement d'intensification. En revanche, le bilan de pollution par les nitrates est plus inquiétant, la pollution s'étant amplifiée de 9,0 %.

En conclusion, la formule tarifaire binôme H1B semble être un outil plus incitatif que la tarification préférentielle à l'irrigation, notamment en hiver, pour la promotion des spéculations maraîchères et fourragères et par voie de conséquence de l'élevage bovin. Son application est profitable aux agriculteurs à l'encontre d'une qualité environnementale qui se dégrade de plus en plus et d'un budget du gestionnaire de la ressource en eau qui se déséquilibre davantage. Sans tenir compte de la composante environnementale, les objectifs de la tarification binôme H1B sont donc partiellement réalisables. La formule H2B a été programmée pour combler les objectifs non accomplis par la formule H1B et surtout réduire les transferts financiers vers les agriculteurs afin d'atténuer le déficit budgétaire du gestionnaire.

4.2 Analyse des impacts de la formule tarifaire binôme H2B

Vu la prise en compte des charges de gestion et de renouvellement des équipements à la limite du double de ceux de la formule H1B, il est attendu que la formule H2B permette une meilleure couverture des charges d'exploitation de la ressource en eau. Par rapport à la formule H1B, le prix moyen de l'eau augmente de 134,4 % et le budget du gestionnaire de 102,3 % respectivement. Ainsi, la tarification binôme H2B est une formule plus avantageuse pour le gestionnaire.

L'augmentation du prix moyen de l'eau se répercute directement sur la demande totale qui diminue de 13,7 % et sur les demandes saisonnières qui baissent de 10 % en hiver et de 14,6 % en été. En passant de la formule H1B à la formule H2B, l'évolution des prix affectés aux termes fixes et variables est respectivement de 130 % et 115 % pour les anciens périmètres publics irrigués et de 131 % et 96 % pour les nouveaux périmètres. La demande hivernale est moins sensible que la demande estivale bien qu'en passant de la formule H1B à la formule H2B la variation du prix de terme fixe (ou de volume en franchise) est plus élevée que celle du prix de terme variable, quelle que soit la catégorie de périmètres. Ainsi, l'élasticité-prix de la demande d'eau en hiver est plus faible que celle en été. Cette situation est expliquée par la structure de la tarification binôme et plus particulièrement par l'obligation de consommer l'eau pendant l'hiver véhiculée par son terme fixe quel que soit le niveau des prix affecté au volume en franchise.

Le volume en franchise est utilisé à 54 % et 48 % respectivement avec les formules H1B et H2B. La consommation du volume en franchise est plus importante dans les nouveaux périmètres (H1B, 67 %, H2B, 63 %) que dans les anciens (H1B, 50 %, H2B, 44 %) quelle que soit la formule tarifaire binôme appliquée. Toutefois, le volume en franchise (31,37 Mm³ dans la basse vallée de la Medjerda) n'est jamais totalement utilisé quelle que soit la formule tarifaire binôme appliquée. Il est simplement plus consommé avec la formule H1B qu'avec la formule H2B.

Par rapport à la tarification préférentielle, l'impact de la tarification binôme H2B est paradoxal car la demande annuelle en eau croît au même titre que le prix moyen de l'eau. Chacune des demandes saisonnières doit être analysée : la hausse de la demande hivernale de 7,1 % est expliquée par l'obligation d'irriguer durant l'hiver traduite par le terme fixe de la formule H2B. Par contre, la hausse de la demande estivale de 4,0 % est due au fait que les niveaux de prix de l'eau des termes variables des formules H2B pour les anciens et les nouveaux périmètres sont plus faibles que ceux d'une tarification

préférentielle (de 125 à 112,6 DT/1 000 m³ pour les anciens périmètres et de 125 à 90,5 DT/1 000m³ pour les nouveaux périmètres). Mais ces baisses de prix durant la saison estivale sont compensées par les prix affectés aux volumes en franchise, engendrant la hausse constatée du prix moyen de l'eau.

En terme de mise en valeur, la formule H2B permet de réaliser presque le même plan d'assolement que la tarification préférentielle. En effet, cette tarification incite sensiblement à l'extension des superficies allouées aux cultures maraîchères (0,7 %) et fourragères (2,6 %), et par voie de conséquence à l'augmentation de l'effectif d'élevage bovin (3,9 %), eu regard de la céréaliculture (- 1,0 %) et de la jachère (- 0,3 %). L'amélioration du taux d'intensification est donc seulement de 0,6 % en passant de 82,3 % à 82,6 %.

Le constat après application de la formule H1B concernant l'investissement en équipement de micro-irrigation demeure valable pour la formule H2B puisque les superficies effectivement irriguées sont conduites en faisant appel à plus d'irrigation gravitaire (2,0 %) que de micro-irrigation (- 0,7 %) par rapport à la tarification préférentielle. Ces faibles progressions sur le plan de la mise en valeur, conjuguées à la hausse de la demande et du prix moyen de l'eau expliquent le gouffre financier des exploitants qui s'élève à 9,5 % et la diminution de la valorisation de l'eau de 13,5 % par rapport à la tarification préférentielle.

Sur le plan environnemental, la situation en matière de pollution par les nitrates demeure alarmante, mais moins inquiétante qu'avec la formule H1B. Par rapport à la tarification préférentielle, la pollution s'accroît seulement de 2,9 % mais ceci représente pratiquement le double du taux de croissance de la demande en intrants azotés (1,4 %).

En somme, la formule tarifaire binôme H2B est l'outil le plus adéquat pour le gestionnaire de la ressource en eau pour combler son déficit budgétaire. Le surplus dégagé par le gestionnaire du marchandage de l'eau est synonyme de perte pour les agriculteurs obtiennent le niveau de revenu le plus bas de tous les scénarios de tarification. L'eau est moins demandée qu'avec l'application de la formule H1B puisque son prix unitaire moyen est plus élevé, mais par rapport à la tarification préférentielle, la formule H2B est plus incitative pour la pratique de l'irrigation, notamment en hiver, avec un mode de conduite axé plutôt sur la technique gravitaire que sur les techniques de micro-irrigation. Le taux d'intensification et les plans d'assolement qui résultent de l'application de la formule H2B sont très proches de ceux obtenus avec la tarification préférentielle, et ils sont accompagnés d'un faible accroissement des spéculations maraîchères et fourragères et donc de l'élevage bovin. Les objectifs de la tarification binôme H2B par les pouvoirs publics sont partiellement réalisés et l'intensification de l'utilisation des facteurs production, principalement l'eau et les intrants azotés, ne font qu'augmenter l'inquiétude concernant les atteintes à l'environnement en matière de pollution par les nitrates.

5 Conclusion

La mise en œuvre des formules tarifaires binômes est loin de satisfaire l'ensemble des objectifs arrêtés par les pouvoirs publics. Par rapport à la tarification préférentielle, un seul objectif paraît réalisable par les deux formules tarifaires binômes H1B et H2B – celui d'accroître la demande en eau. Par conséquent, la tarification binôme H1B est profitable aux agriculteurs qui améliorent leurs revenus, mais le déficit budgétaire d'exploitation de la ressource en eau se creuse davantage pour le gestionnaire, et inversement avec l'application d'une tarification binôme H2B. La simulation des deux tarifications binômes montre que les intérêts de l'Etat et des agriculteurs ne sont pas forcément convergents. De plus, les deux formules n'incitent pas à l'économie de l'eau puisque les investissements en matériel de micro-irrigation sont en net recul. Il est donc recommandé d'accompagner les nouvelles formules tarifaires d'un renforcement des mesures institutionnelles pour encourager l'investissement en matériel d'économie d'eau et une accélérer l'apurement de la situation foncière – condition préalable à l'obtention des crédits agricoles. Aussi, les deux formules tarifaires binômes n'ont aucun impact sur la distribution de revenu tant que l'indice de Gini demeure au niveau enregistré avec une tarification préférentielle. Ceci confirme les propos de Tsur et Dinar (1995) concernant l'inefficacité de la tarification comme moyen de redistribution de revenu. Enfin, la mise en œuvre des deux tarifications

binômes ne fait qu'augmenter les inquiétudes concernant la pollution par les nitrates, d'où l'urgence de traiter cette question. Il peut être judicieux de rechercher un compromis entre les différents objectifs de rentabilité pour l'Etat et les agriculteurs plutôt que de parler de réalisation d'objectifs.

Références bibliographiques

- Abbes K., 2005. Analyse de la relation agriculture-environnement : une approche bio-économique. Cas de la salinisation des sols et de la pollution par les nitrates au Nord tunisien. Thèse de doctorat en sciences économiques, université de Montpellier I, 313 p. + annexes.
- Ackello-Ogotu C., Paris Q., Williams W.A., 1985. Testing a von Liebig Crop Response Function against Polynomial Specifications. *American Journal of Agricultural Economics*, 67 (4) : 873-880.
- Belhouchette H., 2004. Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie : Utilisation conjointe d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique. Thèse de doctorat en science du sol, ENSAM, 155 p.
- Berck P., Geoghegan J., Stohs S., 2000. A Strong Test of the von Liebig Hypothesis, *American Journal of Agricultural Economics*, 82 (4) : 948-955.
- Berck P., Helfand G., 1990. Reconciling the von Liebig and Differentiable Crop Production Functions. *American Journal of Agricultural Economics*, 72 (4) : 985-996.
- Boussard J.M., 1987. *Economie de l'agriculture*. Economica, Paris, 320 p.
- Boussard J.M., 2002. Modeling agriculture : Which model for which purpose ? In: *Modelización Económica en el Sector Agropecuario*, Vicien C., et Pena De Ladaga S. (eds.), Buenos Aires, Argentina, p. 7-27.
- Bouzaher, A., P.G. Lakshminarayan, R. Cabe, A. Carriquiry, P.W. Gassman and J. F. Shogren, 1993. Metamodels and Nonpoint Pollution Policy in Agriculture. *Water Resources Research*, 29 : 1579-1587.
- Brink L., McCarl B., 1978. The trade-off between expected return and risk among corn belt farmers », *American Journal of Agricultural Economics*, 60 : 259-263.
- Buckwell, A., Hazell, P., 1972. Implications of Aggregation Bias for the Construction of Static and Dynamic Linear Programming Supply Models. *Journal of Agricultural Economics*, 23 : 199-134.
- Deybe D., 1994. *Vers une agriculture durable – Un modèle bio-économique*. CIRAD, Paris, 193 p.
- Flichman G., 1997. Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water. *CIHEAM-IAMM, Options méditerranéennes, Sér. A /n° 31* : 327-336.
- Flichman G., 2002. Building Agro-environmental indicators by the Integration of Biophysical and Economic models for Assessing Sustainability of Agricultural Trade Liberalisation. In: *SIAP Workshop – Methodological tools for assessing the sustainability impact of the EU's economic policies with applications to trade liberalisation policies, Session II – Environmental Issues, 7-8 november 2002, Bruxelles, Belgique*, 24 p.
- Frank M.D., Beattie B.R., Embleton M.E., 1990. A Comparison of Alternative Crop Response Models. *American Journal of Agricultural Economics*, 72 (4) : 597-603.
- Hazell P.B.R., Norton R.D., 1986. *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan Publishing Company, New York, Etats-Unis, 400 p.
- Helfand G.E., House B.W., 1995. Regulating Nonpoint Source Pollution Under Heterogeneous Condition. *American Journal of Agricultural Economics*, 77 : 1024-1032.
- Louhichi K., 2001. *Essai de modélisation bio-économique de la relation agriculture environnement – le cas de l'érosion en Tunisie*. Thèse de doctorat en sciences économiques, université de Montpellier I, France, 252 p.
- MA (République Tunisienne - Ministère de l'Agriculture) DGETH, Kreditanstalt Für Wiederaufbau (KfW) et AHT international, 1998. *Projet Hydro-Agricole Kalaat et Landalous - Ras Djebel. Étude de la qualité des eaux*. Rapport APS définitif - Rapport principal, 136 p.

- MA (République tunisienne, ministère de l'Agriculture), 1998. EAU 21 : Stratégie à long terme du secteur de l'eau en Tunisie (2030). 85 p.
- MA (République tunisienne, ministère de l'Agriculture), CNEA et BRL-France, 1997. Etude de la gestion et de la tarification de l'eau d'irrigation au niveau des périmètres irrigués. Seconde phase : analyse et propositions tarifaires. 111 p.
- Maugars S., 1998. Couplage d'un modèle économique et d'un modèle biophysique pour la quantification des impacts environnementaux des cultures. Mémoires et Thèses n° 28, INRA-ESR, Grignon, 100 p.
- MEAT (République tunisienne, ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire), 2001. Communication initiale de la Tunisie à la convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques. 211 p.
- Mlaouhi S.S., 2002. Contrôle de la salinité pour la préservation de la fertilité du sol en Tunisie. Cas du périmètre irrigué de Henchir-Tobias dans la basse vallée de la Medjerda. Mémoire de Master of Science, CIHEAM-IAMM, Montpellier, France, 170 p.
- Montginoul M., 1997. Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs. Thèse de doctorat en sciences économiques, université de Montpellier I, CEMAGREF, Montpellier, France, p. 73-132.
- Paris Q., 1992. The von Liebig Hypothesis. *American Journal of Agricultural Economics*, 74 (4) : 1019-1028.
- Stöckle C.O., Marcello D., Nelson R., 2003. CropSyst, a cropping system simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18 : 289-307.
- Stöckle C.O., Martin S.A., Campbell G.S., 1994. CropSyst, a cropping system simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield. *Agriculture System*, 46 : 335-359.
- Taylor M.L., Richard M.A., Stanley F.M., 1992. Farm-Level Response to Agricultural Effluent Control Strategies: The Case of the Willamette Valley. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 17 (1) : 173-185.
- Tsur, Y., Dinar A., 1995. Efficiency and Equity Considerations in Pricing and Allocating Irrigation Water. Policy Research Paper 1460, World Bank, Washington DC.
- Vicien C., 1989. Les modèles de simulation comme outil pour la construction de fonction de production: une application à la mesure de l'efficacité de la production agricole. Thèses et Masters, CIHEAM-IAMM, 133 p.