

# La gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle de bassin versant en zones arides : Proposition méthodologique et applications

Mongi SGHAIER\*, Naceur MAHDHI\*, Monder FETOUI\*, Ounalli NIHAYA\*

Jel classification: Q250, O210

## Introduction

Marquées par le dilemme d'extrême rareté, d'instabilité de l'offre et d'accroissement élevé de la demande, les ressources en eau dans les zones arides sont sujettes à de fortes pressions qui menacent sérieusement leur durabilité. Cette situation a fait de ces ressources de véritables biens économiques nécessitant de nouvelles approches et des outils innovants de gestion et d'analyse.

Au vu du caractère complexe et multi-usage des ressources en eau, les approches unidimensionnelles et fragmentaires de gestion des ressources en eau ont atteint leurs limites (Auger et al., 2004). D'où l'intérêt de développer des approches intégrées de gestion qui considèrent le bassin versant comme unité pertinente de gestion.

Nombreuses sont les références qui adoptent cette approche par bassin versant (Gangbazo, 2004 ; OCDE, 2004). Les conférences internationales sur l'eau et l'environnement, notamment celle de Rio de Janeiro en 1992 et le troisième forum mondial de l'eau, tenu à Kyoto en 2003, ont appelé à son adoption.

L'OCDE recommande aux pays membres "d'appliquer les approches intégrées par bassin hydrographique et par écosystème". Une telle orientation constitue l'un des éléments clés pour une gestion efficace de l'eau (OCDE, 2004). Selon Affeltrouger et Lasserre (2003), le recours au

## Résumé

Les ressources en eau dans les zones arides de la Tunisie sont sujettes à de fortes pressions qui menacent sérieusement leur durabilité. Cette situation a fait de ces ressources de véritables biens économiques nécessitant de nouvelles approches et de nouveaux outils de gestion et d'analyse qui doivent dépasser les approches unidimensionnelles et fragmentaires.

Ce papier synthétise les résultats de travaux de recherche multidisciplinaire menés durant la période 1999-2005 dans le bassin versant d'Oued Oum Zessar, dans le Sud-est de la Tunisie. Une panoplie d'outils technico-socio-économiques, complémentaires et intégrés a été appliquée (Analyse coût-avantage élargie, modélisation bioéconomique, programmation multi-objectifs, analyse des externalités entre usagers, étude de l'efficacité technique et Système d'Information Géographique (SIG)). Le papier traite également les difficultés méthodologiques persistantes liées à l'application du concept de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle de bassin versant en zones arides.

**Mots-clés** : gestion intégrée des ressources, bassin versant, zones arides, modélisation bioéconomique, externalités, analyse coût-avantage, Tunisie.

## Abstract

*Water resources in dry areas in Tunisia are under strong pressure, which seriously threatens their sustainability. As a result, they are viewed as economic goods that require new analytical approaches and innovative management tools, going beyond unidimensional and fragmentary approaches. This paper shortly outlines the results stemming from some multidisciplinary research works conducted in the period 1999-2005 in the watershed of Oum Zessar (Southeast Tunisia). Several complementary and integrated socio-economic and technical tools were applied (extended cost-benefit analysis, bioeconomic modelling, multi-objective programming, analysis of externalities between users, study of technical efficiency and Geographic Information System (GIS)). Emphasis is also laid on the persisting methodological difficulties related to the application of integrated water resources management on the watershed scale in dry areas.*

**Keywords**: integrated resources management, watershed, dry areas, bioeconomic modelling, externalities, cost-benefit analysis, Tunisia.

bassin versant comme unité de gestion territoriale répond au principe de développement durable.

En effet, l'intérêt de considérer l'unité de bassin versant comme unité de gestion réside en le fait de pouvoir prendre en compte l'ensemble des activités et leurs impacts (Auger et al., 2004). Cette unité permet également de saisir les interactions entre les phénomènes hydrologiques, climatiques, biologiques et sociétaux (Chaïbi et al., 2003 ; Auger et al., 2004 ; Sghaier et al., 2002; Mahdhi et al., 2005).

Se référant au chapitre 18 de l'Agenda 21 qui explicite les principes de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (Integrated Water Resources Management, IWRM) (AIT, 2003) (cité par Affeltrouger et Lasserre (2003)), «une approche

holistique (systémique) et institutionnelle est nécessaire, qui prend en compte la dynamique amont/aval des bassins versants».

En zone aride, la rareté et la vulnérabilité des ressources en eau et la multiplicité des acteurs économiques, dont particulièrement les usagers de la ressource, couplée à des mutations socioéconomiques profondes, rendent complexe l'application de cet outil méthodologique de gestion intégrée des ressources en eau. En effet, en dépit des avancées scientifiques et techniques récentes, le concept de gestion intégrée est un concept qui reste très générique et parfois même ambigu. D'où l'intérêt d'entreprendre des recherches permettant d'analyser les principaux aspects qui lui sont

\*Institut des Régions Arides de Médenine, Tunisie

liés.

Dans le présent travail, on essaie d'illustrer brièvement les résultats d'une approche de recherche intégrée et multidisciplinaire expérimentée à l'Institut des Régions Arides de Médenine (Tunisie) durant la période 1999-2004 dans le bassin versant d'Oum Zessar, Sud-est de la Tunisie.

## 1. Principaux questionnements scientifiques liés au bassin versant (BV) d'Oum Zessar

Les recherches ont été développées dans le bassin versant d'Oued Oum Zessar, situé dans le Sud-est de la Tunisie (Gouvernorat de Médenine) et couvrant une superficie de 36700 hectares (figure 1). Le site d'étude est caractérisé par un climat aride (pluviométrie moyenne de 180 mm/an) et un environnement édaphique et écologique vulnérable. Le bassin versant s'étend sur dix (10) imadats (la plus petite unité administrative en Tunisie), avec une population estimée à 24188 habitants répartis sur 4728 ménages (INS, 2004).

La gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant d'Oum Zessar soulève de nombreux questionnements scientifiques qui méritent d'être mentionnés :

- le site d'étude est depuis les années 90 le théâtre d'importants aménagements de conservation des eaux et des sols (CES) qui se sont traduits par la réaffectation des ressources en eau mobilisées. Au-delà des objectifs déclarés par les deux stratégies décennales 1990-2000 et 2000-2010 de CES, les impacts biophysiques et socio-économiques de ces travaux restent peu évalués, voire même inconnus. D'où l'intérêt pressant d'entreprendre des

recherches d'évaluation de ces impacts afin de mieux orienter les aménagements futurs et rationaliser la gestion durable des ressources naturelles. Au vu de la complexité de cette évaluation, le recours aux approches multidisciplinaires et aux outils de modélisation devient nécessaire;

- les changements dans les modes d'usage et d'accès aux ressources naturelles et les mutations socioéconomiques survenues au cours des dernières décennies ont conduit à la naissance de nouveaux conflits d'intérêt entre usagers qui méritent d'être étudiés. Ces conflits se sont traduits par des externalités entre usagers et entre acteurs à l'échelle des différents compartiments du BV de l'amont à l'aval. Des conflits d'intérêts entre usagers sectoriels, usagers des différentes catégories des ressources (ressources pluviales, nappes profondes, usage mixte, etc.) sont induits par l'interconnexion entre eau de surface et eau souterraine (recharge des nappes, etc.) ;
- des problèmes d'allocation des ressources en eau entre usagers sectoriels, usagers agricoles (systèmes de production) et entre amont et aval sont observés. L'efficacité économique de l'eau n'est pas encore considérée, sauf partiellement, comme critère des choix allocatifs des ressources en eau dans les approches de gestion intégrée de ces dernières.
- les modes d'accès et d'usage des acteurs locaux en milieu rural ne sont suffisamment connus ni au plan du fonctionnement ni au plan des règles qui les régissent. Les interactions et les négociations entre agents économiques et sociaux au sein des bassins versants, méritent d'être appréhendées dans le cadre des systèmes de gestion intégrée et interactive.

- l'efficacité économique des unités de production agricole par rapport aux ressources en eau n'est pas encore suffisamment connue, d'où la nécessité de l'évaluer afin d'améliorer l'allocation des ressources et d'accroître leur rentabilité économique.

## 3. Approche de recherche et outils méthodologiques développés

Au vu du caractère complexe et intégré de la problématique évoquée et des questionnements scientifiques soulevés, une approche méthodologique a été mise en œuvre dont les principales caractéristiques sont décrites ainsi :

- Multidisciplinaire : elle a été imposée par le besoin d'appréhender la complexité de la réalité moyennant le concours de diverses disciplines des sciences de la nature et des sciences sociales.
- Systémique : l'approche privilégie les interactions entre les éléments d'un système. Cette approche a été appliquée aussi bien au plan physique (système hydrologique, etc.), que biologique (système écologique) ou encore socio-

Figure 1. Carte de localisation du bassin versant d'Oued Oum Zessar

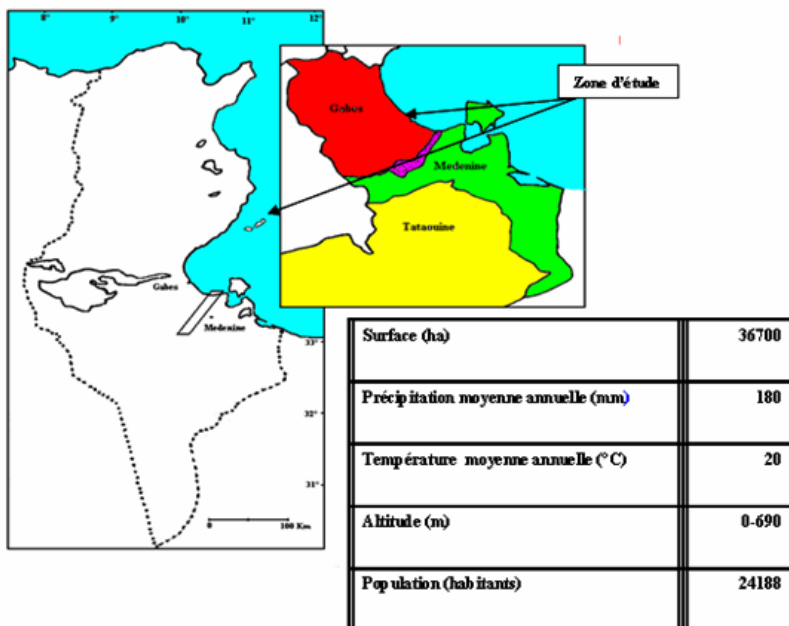


Tableau 1. *Questionnements, Méthodes, outils et échelles d'intervention*

Questionnements généraux	Questionnements spécifiques	Méthodes	Outils méthodologiques	Echelle d'analyse
Evaluation de l'efficacité technique, financière et économique des aménagements hydro-agricoles dans le bassin versant	Evaluation de l'efficacité financière	Analyse Coûts-Avantages Financiers (ACAF)	Analyse coûts- avantages (CBA) Modèle FORCES-MOD	Unité hydrologique élémentaire (jessr) Exploitations agricoles
	Analyse de l'efficacité économique conventionnelle (échelle de la collectivité)	Analyse coût- avantages économiques (ACAE)	Modèle FORCES-MOD	Bassin versant Exploitations agricoles
	Conservation des ressources en eau et en sol (Phénomènes environnementaux tangibles et intangibles) Durabilité	Analyse Coûts-Avantages Elargie I et II (ACAE I et II) Programmation multi- objectifs	Modèle FORCES-MOD Programmation linéaire (LINDO), Méthode de NISE	Bassin versant Exploitations agricoles
	Prise en compte de l'équité sociale Profitabilité des actions collectives par catégories de ménages (à qui profite le plus l'action)	Analyse Coûts-Avantages Socio-économiques (ACASE)	Modèle FORCES-MOD	Bassin versant Exploitations agricoles
	Etude d'impact des travaux de CES sur la production Evaluation de l'efficacité économique globale par unité et par compartiment Allocation spatiale des eaux de ruissellement	Programmation économétrique Méthode paramétrique Modèle déterministe	Méthode du Moindre Carré Ordinaire Corrigée (MCOC)	Bassin versant Exploitations agricoles
Prise en compte des externalités entre usagers	Concurrence entre usagers amont aval	Méthode paramétrique Modèle déterministe	Méthode du Moindre Carré Ordinaire Corrigée (MCOC)	Bassin versant Exploitations agricoles
Analyse des modes d'accès et d'usage et négociations entre acteurs	Equité sociale Analyse et négociations autour des conflits d'intérêt entre acteurs	Modélisation/programmation	Système Multi-Agent (SMA)	Micro-bassin versant Exploitations agricoles
Optimisation de l'allocation des ressources en eau et en sol dans le bassin versant	Efficience/optimisation Durabilité Concurrence entre systèmes de production Préservation et lutte contre la dégradation de l'environnement	Programmation multi- objectifs et de compromis	Programmation linéaire (LINDO) Méthode NISE (Non Inferior Set Estimation)	Bassin versant Exploitations agricoles

économique (système de production, système population environnement).

- Partenariale et orientée vers la recherche-développement, puisqu'elle a associé une équipe pluridisciplinaire de chercheurs à des partenaires du développement. L'approche a associé des partenaires de développement et des organisations non gouvernementales (ONGs).
- Analytique et intégrative (synthétique), en ce sens qu'elle s'est organisée au départ en axes thématiques par souci d'opérationnalité au sein de chacune des disciplines scientifiques impliquées pour déboucher en fin sur des analyses synthétiques et intégrées ;
- Synchrones et diachrones, en ce sens qu'elle combine des analyses décrivant la situation actuelle à des analyses des évolutions croisées et des interactions entre les dynamiques environnementales et les dynamiques sociodémographiques.

Un panel d'outils méthodologiques a été mis en œuvre, dans le cadre d'opérations de recherches intégrées<sup>1</sup>, pour

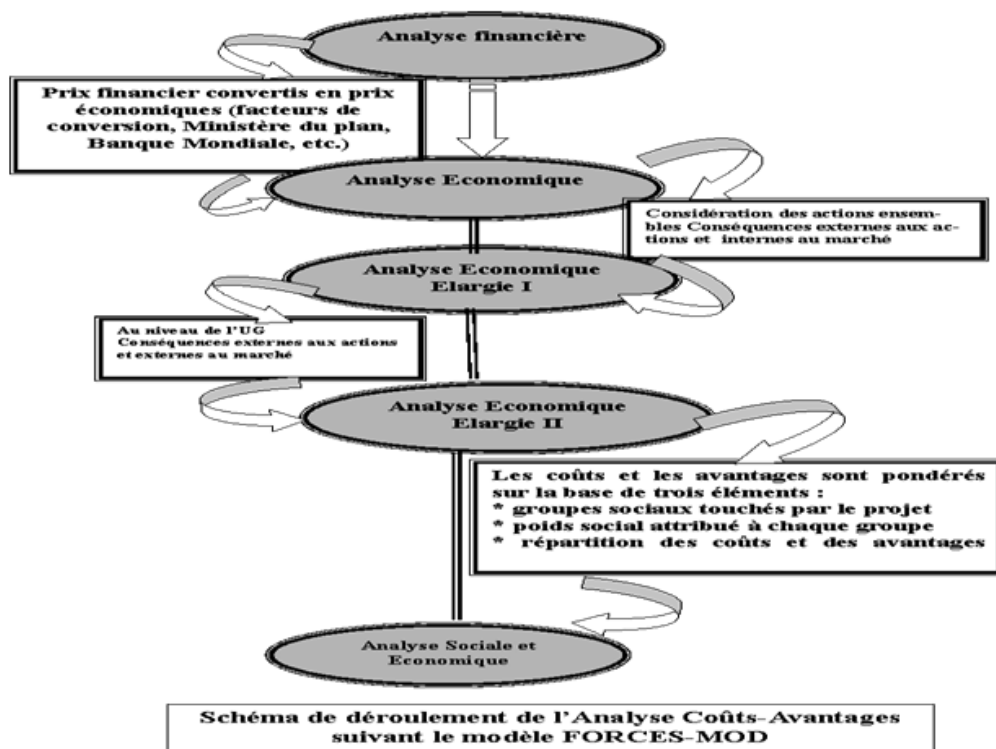
répondre aux questionnements scientifiques respectifs, par l'équipe socio-économique en collaboration avec le reste de l'équipe multidisciplinaire et avec le concours ponctuel de chercheurs appartenant à des universités et à des centres de recherche tunisiens et européens (tableau 1).

L'originalité de l'approche méthodologique réside en le fait d'appliquer des outils méthodologiques complémentaires et intégrés qui permettent l'aide à la décision et à la gestion intégrée des ressources en eau et en sol dans le bassin versant.

Parmi ces outils, la méthode d'évaluation d'impact des aménagements a été tentée dans le bassin versant. Celle-ci nous renseigne sur l'efficacité technico-économique de ces aménagements et d'en tirer les enseignements nécessaires pour le futur. Ce volet est analysé à travers l'application d'outils tels que l'analyse coût-avantage (ACA) et la programmation multi- objectifs. Ces outils permettent de mieux harmoniser les interventions avec la prise en compte des intégrations entre les différents compartiments du

<sup>1</sup> La recherche a été entreprise dans le cadre du contrat programme de l'Institut des Régions Arides (2000-2006) avec l'appui de deux principaux programmes de recherche : le programme « Impact assessment and economic evaluation of water harvesting technique in dry Mediterranean zones » (WAHIA) (2000-2002), appuyé par l'Union Européenne et le programme Jeffara (2001-2003), appuyé par le comité scientifique français de la désertification (CSFD).

Figure 2. Déroulement de l'Analyse Coût-Avantage Elargie suivant le modèle FORCES-MOD



bassin versant.

Un deuxième outil consiste en l'analyse des externalités positives et négatives entre usagers. Il permet de percevoir et de quantifier les effets intangibles des aménagements de CES dans le bassin versant et par conséquent, permet aux décideurs de mieux les rationaliser.

L'analyse des modes d'accès et modes d'usages constitue également un outil d'un grand intérêt pour prendre en compte les conflits d'intérêt entre usagers et leurs stratégies d'accès et d'usage des ressources dans le bassin versant. Elle permet également d'améliorer la concertation et les négociations entre acteurs sociaux.

#### 4. Synthèse des résultats obtenus des principales applications au niveau du bassin versant d'Oued Oum Zessar

Les outils méthodologiques appliqués cités plus haut ont permis de contribuer à répondre aux principaux questionnements scientifiques posés à différentes échelles dans le bassin versant étudié. Dans ce qui suit, on est tenté de présenter une synthèse des principaux résultats :

##### 4.1. Evaluation de l'efficacité technique, financière et économique des aménagements hydro-agricoles dans le bassin ver-

sant : application de l'analyse coût-avantage (ACA)

##### 4.1.1. Application de l'analyse coût-avantage au niveau de l'unité hydrologique élémentaire (l'échelle du jessr<sup>2</sup>)

Le site de recherche est un jessr appartenant à un agriculteur (Mr Amrich) et situé dans la zone amont du bassin versant étudié. Les résultats de l'Analyse Coût-Avantage (ACA) montrent que l'investissement ne serait pas rentable du point de vue financier compte tenu de la faiblesse de la Valeur Actualisée Nette (VAN), -660 DT et du Taux de Rentabilité Interne (TRI) : 2.9% (Fleskens et al., 2002). L'analyse montre que ce type d'investissement reste non attractif à l'échelle individuelle (cas de l'agriculteur) sans in-

centations et subventions. L'application de l'ACA à cette échelle (unité du jessr) semble ne pas permettre de renseigner totalement sur la rentabilité des aménagements de conservation des eaux et des sols au vu de la fragmentation exagérée de l'espace qui impose l'intégration de l'ensemble des ouvrages et des actions au sein d'une unité hydrologique plus pertinente. D'où la nécessité, d'une part, d'entreprendre l'analyse ACA à une échelle appropriée, le bassin versant et d'autre part, de l'élargir pour la prise en compte des phénomènes environnementaux intangibles et des aspects sociaux.

##### 4.1.2. Application de l'ACA Elargie à l'échelle du bassin versant d'Oued Oum Zessar

Dans cette étape, l'ACAE est entreprise à l'échelle du bassin versant d'Oum Zessar. Il s'agit d'entreprendre une Analyse Coût-Avantage Elargie ACAE en appliquant le modèle FORCES-MOD (FAO et Banque Mondiale, 1994) afin d'évaluer les coûts et les avantages des aménagements de CES réalisés au niveau de la stratégie de CES (1990-2000). C'est une analyse ex-post pour les investissements effectifs réalisés par la stratégie pendant la période 1990-2000. Ainsi, l'horizon global de l'ACAE est de trente ans, période jugée suffisante pour tenir compte de la majorité des coûts et des avantages des investissements et pour permettre l'amortissement des aménagements réalisés. L'A-

<sup>2</sup> Un jessr est un petit barrage en terre, parfois consolidé par des pierres, qui est construit sur les petits oueds et sert à collecter l'eau et le sol derrière pour permettre à l'exploitant de cultiver les terres en amont (en général, des arbres). Cette technique est millénaire et très répandue dans les zones montagneuses du sud de la Tunisie

CAE réalisée tente également, grâce au modèle FORCES-MOD, d'élargir l'analyse aux phénomènes environnementaux externes aux actions aussi bien tangibles qu'intangibles. L'ACAIE évolue alors en cinq étapes, à savoir, l'analyse financière, l'analyse économique conventionnelle, l'analyse Economique Elargie1, L'analyse Economique Elargie2 et l'analyse sociale et économique comme le décrit la figure 2 (Sghaier et al., 2002).

Les données techniques, physiques et climatiques ont été collectées auprès des services techniques du commissariat régional de développement agricole de Médenine. Les données technico- socio-économiques relatives aux systèmes de productions ont été obtenues grâce aux enquêtes socio-économiques effectuées dans la zone d'étude auprès de 120 exploitations agricoles en 2001.

L'application du modèle FORCES-MOD a permis d'estimer les critères d'évaluation, dont notamment le Taux de Rentabilité Interne (TRI) et la Valeur Actualisée Nette (VAN) et ce, au niveau des cinq étapes d'analyse du modèle FORCES-MOD.

Les résultats sont synthétisés en tab 2.

Les résultats de l'ACAIE montrent que le TRI et la VAN s'améliorent progressivement d'une étape à l'autre. En effet, ils évoluent respectivement de 5,47 % à 27,8 % et de -1,065 à 1,150 millions de dinars tunisiens (MDT) de l'étape 1 à l'étape 5. En effet, au niveau de l'AEE1, la prise en compte du phénomène de réduction des coûts de destruction des ouvrages a accru le TRI et la VAN qui prennent les valeurs respectives de 18,44% 0,798 MDT.

Au niveau de l'analyse économique élargie II (AEE2), la

Cette prise en compte des externalités aurait sans doute des effets négatifs sur les critères de rentabilité.

## 4.2. Etude des externalités des aménagements de CES

Une modélisation économétrique a été entreprise pour analyser les externalités entre les usagers de l'amont et de l'aval du bassin versant. La principale hypothèse considère que les aménagements de CES réalisés en amont ont de répercussions directes sur la production agricole dans les régions en aval. D'où la nécessité de considérer l'examen du niveau de production comme indicateur d'impact des travaux de CES (Mahdhi, 2003).

Pour spécifier la technologie de production, on adopte la fonction Cobb-Douglas qui s'écrit sous la forme :

$$Y = A \prod_{t=1}^n x_t^{b_t} e^{u_t} \quad (1)$$

Où  $y_t$ ,  $x_t$  représentant respectivement la production observée et le vecteur de variables explicatives du modèle par compartiment à l'instant  $t$ ,  $b$  est un vecteur de paramètres inconnus à estimer.

$f$  est la fonction de production correspondante (Cobb-Douglas) et  $u$  est l'erreur de spécification.

Par compartiment, la fonction de production à estimer est sous forme logarithmique.

$$\ln Y_t = b_0 + \sum b_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad (2)$$

La formulation économétrique estimable du modèle peut être présentée par compartiment comme suit :

$$\ln y_t = \ln A + \beta_1 \ln x_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 + \beta_4 \ln x_4 + u_t \quad (3)$$

Les données sont issues d'enquêtes socioéconomiques effectuées dans le cadre du programme WAHIA (Projet INCO-DC sur « l'évaluation d'impact des aménagements de conservation des eaux et des sols en zones arides ») dans la zone d'étude (120 enquêtes) et du dépouillement des fiches et de la documentation technique du Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) de Médenine

Par compartiment, les résultats de l'estimation du modèle (3) sont explicités par la formulation numérique suivante :

En piedmont :

$$\ln y = -2.81 + 0.13 \ln x_1 + 0.69 \ln x_2 - 0.74 \ln x_3 + 1.12 \ln x_4 \quad (4)$$

$$(-1,46) \quad (0,7) \quad (2,34)^* \quad (-5,26)^{***} \quad (4,45)^{***}$$

$R^2 = 0.90$ ,  $R^2$  ajusté = 0.86  $F = 252^{***}$   $DH = -1.28$   $T = 15$  observations

En aval :

$$\ln y = 1,69 + 0,47 \ln x_1 - 0,43 \ln x_2 - 0,63 \ln x_3 + 1,24 \ln x_4 \quad (5)$$

$$(1,2) \quad (2,75)^* \quad (-2,39)^* \quad (-6,04)^{***} \quad (3,05)^{**}$$

$$R^2 = 0.95, R^2 \text{ ajusté} = 0.94 F = 537^{***} DH = -1.27$$

Où :

$y$  : production moyenne par compartiment exprimée en

Tableau 2. Récapitulatif des résultats de l'ACAIE suivant le modèle FORCES-MOD

Etapes d'analyse	TRI (%)	VAN*
Analyse Financière (AF)	5,47	-1,065
Analyse Economique Conventi onnell e (AEC)	13,25	0,285
Analyse Economique Elargie I (AEE1)	18,43	0,798
Analyse Economique Elargie II (AEE2)	25,98	1,049
Analyse socio-économique (ASE)	27,8	1,15

\*Les analyses sont effectuées au taux d'actualisation de 10,8 %

prise en compte de l'effet de la recharge de la nappe à partir des ouvrages de CES et d'amélioration de la qualité de la vie de la population a permis une augmentation du TRI pour atteindre 25,98 % et une nette amélioration du VAN qui dépasse 1MDT soit 1,049 MDT. L'analyse économique et sociale a révélé une amélioration nette du TRI qui passe à 27,8% et une légère amélioration du VAN qui passe à 1,150 MDT.

Cependant, des améliorations sont escomptées si l'analyse intègre les phénomènes environnementaux et socio-économiques dont la valeur marchande est absente. On peut citer notamment les aspects d'internalisation des externalités qui se produisent entre les différents usagers de l'amont à l'aval et même entre les différents secteurs économiques (Sghaier et al., 2002).

Dinar Tunisien (DT)

X1 : coût d'entretien DT

X2 : coût d'investissement DT

X3 : superficie aménagée dans le compartiment (jessours, banquettes et seuils en pierre sèche)

X4 : pluviométrie annuelle

Les résultats montrent que la superficie aménagée en amont a l'effet le plus important sur la production par compartiment, avec une élasticité de (-0,74) et (-0,63) en piedmont et en aval, respectivement. Ceci est lié à la rareté des pluies et à la forte dépendance de l'agriculture pluviale vis-à-vis de la récolte d'eaux pluviales. Le signe négatif associé à la variable (X2 : coût d'investissement) est le résultat d'un effet cumulatif de deux états de figures. En effet, vu la rareté de la pluviométrie avec la rétention des eaux en amont, les parties aval se trouvent privées d'un volume d'eau aussi indispensable pour la mise en valeur agricole et l'amélioration du rendement des cultures pour ces zones. Cette diminution des écoulements va se répercuter négativement sur les rendements des cultures et par conséquent, sur les productions par compartiment.

Les résultats montrent également que la réaffectation des ressources en eau privilégie les zones situées en amont. Les zones situées en aval sont conditionnées par les prélèvements (volume capté) au niveau des compartiments en amont. Les aménagements en amont génèrent sur les zones en aval des externalités négatives matérialisées par la réduction des disponibilités d'eau. Cette dernière induit une perte de production dans la zone aval.

L'analyse des élasticités conduit aux observations suivantes : en piedmont, l'élasticité de la production par rapport à la superficie aménagée en amont est égale à 0,74, c'est-à-dire, si on augmente la superficie (toute chose égale par ailleurs) de 10%, la production moyenne des cultures pluviales diminue de 7,4%. En aval, l'élasticité de la production par rapport à la superficie aménagée en amont est égale à 0,63, c'est-à-dire, si on augmente la superficie (toute chose égale par ailleurs) de 10%, la production moyenne des cultures pluviales diminue de 6,3%.

### 4.3. Mesure de l'efficacité technique de l'agriculture pluviale

Afin d'outiller les décideurs pour assurer une gestion intégrée des ressources dans le bassin versant, il est utile de compléter les analyses réalisées par une évaluation de l'efficacité technico-économique des exploitations agricoles utilisant les ressources. Ainsi, une modélisation économétrique a été élaborée par compartiment moyennant l'approche de fonction de production et la méthode MCOC (Mahdhi, 2003 ; Mahdhi et al., 2005).

Pour spécifier la technologie de production, on adopte la fonction Cobb-Douglas qui s'écrit sous la forme :

$$Y = A \prod_{t=1}^n x_t^{\beta_t}$$

Par compartiment, le modèle de frontière déterministe est donné par l'équation suivante :

$$Y_t = A \prod_{t=1}^n x_t^{\beta_{it}} e^{\mu_t} ; t = 1n(6)$$

Avec  $Y_t$ ,  $X_{it}$  représentant respectivement la production observée et le vecteur de variables explicatives du modèle par compartiment à l'instant  $t$ , est un vecteur de paramètres inconnus à estimer.

$f$  est la fonction de production correspondante (Cobb-Douglas) et est le terme de l'erreur représentant l'efficacité technique relative à la frontière déterministe.

Par compartiment, la fonction de production à estimer est sous forme logarithmique

$$\ln Y_t = \beta_0 + \sum \beta_k X_{kt} + \mu_t \quad (7)$$

Dans notre cas d'étude, la variable endogène ( $Y$ ) considérée est la production arboricole moyenne à l'hectare. Les variables exogènes retenues sont :

FC : nombre d'heures de traction animale et mécanique utilisée pour le travail du sol par an.

L : nombre de jours de travail salarié et familial engagés dans le processus de production (entretien de l'ouvrage) par an ;

P : la pluviométrie annuelle exprimée en millimètres.

Le modèle à estimer par compartiment s'écrit donc sous la forme suivante :

$$\ln Y_t = \beta_0 + \beta_1 \ln FC + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln P + \mu_t \quad (8)$$

Les données relatives aux variables du modèle ont été collectées à partir des recoupements d'enquêtes socio-économiques effectuées dans la zone d'étude et à partir des dépouillements des documents de base des arrondissements de conservation des eaux et du sol et de la production végétale de Médenine.

Les résultats de l'estimation de l'équation (8) du modèle moyennant la MCOC montrent que, par rapport à la frontière de production, les exploitations agricoles (agriculture pluviale) réalisent, en moyenne, 55%, 70% et 70% de l'output frontière respectivement en amont, piedmont et en aval (tableau 3).

Il en ressort que l'efficacité technique est meilleure dans les régions situées en aval du bassin versant. Ceci confirme l'hypothèse qu'en dépit de la réallocation de l'eau défavorable à ces zones, celles-ci gardent une efficacité meilleure de l'agriculture pluviale.

Tenant compte de ces résultats, il semble qu'il soit possible d'augmenter la production de l'agriculture pluviale pour atteindre la frontière de production moyennant une meilleure utilisation des facteurs de production, ce qui permettra de réduire les coûts de production et par conséquent, d'améliorer la compétitivité de ce type d'agriculture.

<sup>3</sup> Les chiffres entre parenthèses sont les  $t$  de Student

\* \* \* paramètres significatifs au seuil de signification de 1 0/00

\* \* paramètres significatifs au seuil de signification de 1 %

\* paramètres significatifs au seuil de signification de 5 %

Tableau 3. *Efficacité technique et moyenne par compartiment (1986 -2000)*

	Amont	Piedmont	Aval	Bassin versant
Moyenne	0,55	0,7	0,70	0,65
Max	0,75	0,93	0,94	0,86
Min	0,43	0,56	0,48	0,52
Ecart type	0,096	0,090	0,155	0,095

#### 4.4. Modes d'accès et d'usage des acteurs locaux en milieu rural : applications d'un Système Multi-Agent (SMA)

Cette application a été développée à l'échelle méso (micro-bassin versant) pour appréhender les modes d'accès et d'usage des ressources en eau. Le micro-bassin versant est situé à Dkhilet Stout, dans la région centrale du bassin versant et il regroupe environ 30 familles rurales qui exploitent les ressources en eau et en sol.

Un modèle multi-agent a été élaboré permettant aux acteurs locaux et aux gestionnaires du système de représenter leurs stratégies d'accès et d'usage des ressources dans le système et de réfléchir sur les conséquences des scénarios d'évolution (Fetoui et al., 2004).

La conception du système multi-agent SMA est décrite par la figure 3 .

Cet essai de modélisation multi-agent autour de la gestion de l'eau a permis d'aboutir à :

-une compréhension du fonctionnement des systèmes de production dans le MBV ;

-une identification des relations entre les acteurs pour la gestion des eaux de ruissellement dans une logique amont/aval, à savoir les relations de conflits et/ou de complémentarité entre eux pour l'accès et l'usage de ces ressources ;

-une identification des relations entre les acteurs et les sources d'approvisionnement en eau (réseau SONEDE, G-IC, achats complémentaires de citernes) ;

-une analyse des stratégies des acteurs et leurs pratiques d'usage de l'eau dans le contexte de petite agriculture familiale ;

-une analyse des modalités de gestion de l'alternance d'années sèches et pluvieuses de ces acteurs agropastoraux dans le but du maintien de la viabilité de leurs systèmes de production via l'accès à l'eau ;

Le modèle est en cours de développement par l'équipe des chercheurs concernés.

#### 4.5. Allocation optimale des ressources en eau et en sol dans le bassin versant d'Oum Zessar : application de la programmation multi-objectifs et de compromis

Partant de l'hypothèse que l'allocation des ressources en eau n'est pas optimale dans le bassin versant de l'amont et l'aval, un modèle de programmation multi-objectifs a été développé moyennant la méthode de NISE (Non Inferior Set Estimation) (Ounalli, 2005). Cet essai de modélisation a permis de concevoir un schéma d'allocation optimale des ressources en eau et en sol dans les systèmes de production du bassin versant d'Oued Oum Zessar. Le modèle permet de concilier entre deux objectifs conflictuels :

- Maximisation de la marge brute (objectif économique).
- Minimisation du coût de la dégradation du sol (objectif environnemental).

La méthode de l'évaluation contingente et la méthode de programmation multi-objectifs ont été utilisées.

La formulation mathématique du modèle est décrite comme suit:

$$\text{Max MB} = \sum (MB)_{ij} X_{ij}$$

$$\text{Min } \sum C_{Dij} X_{ij}$$

Sachant l'ensemble des contraintes :

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

$C_{Dij}$  : Le coût de la dégradation du sol du système de production  $j$  qui fait partie du strate (partie)  $j$

$MB$  : Marge brute à l'échelle du bassin versant

$MB_{ij}$  : Marge brute par hectare du système de production  $i$  qui fait partie du strate (partie)  $j$

$X_{ij}$  : Superficie occupée par le système de production  $i$  (en hectare) de la strate (partie)  $j$

$n$  : nombre de systèmes de

Figure 3. *Fonctionnement du système d'usage et d'allocation d'eau dans le micro bassin versant de Dkhilet Stout.*

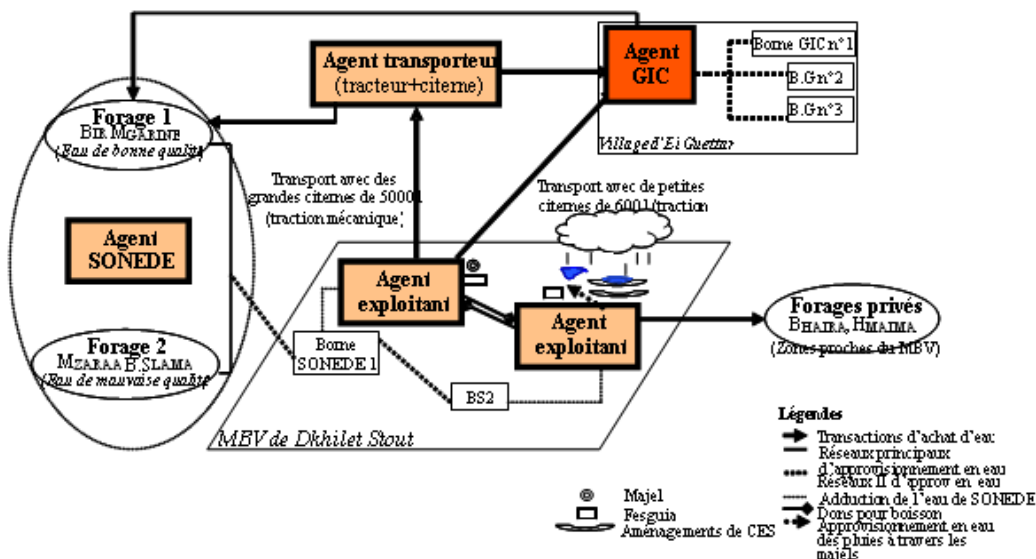




Tableau 4. *Solution optimale de l'optimisation simultanée des deux objectifs*

	Fonctions objectives		Occupation du sol (ha)					Total
	Max MB	Min DS	X <sub>11</sub>	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>31</sub>	X <sub>32</sub>	
Solution optimale	3073187	566122	5397	9080	3120	4664	41	22302
Situation de référence	1580447	380099	3120	728	3120	4664	41	11673

MB : Marge Brute, DS : Dégradation des sols

X<sub>11</sub>: système jessour amont, X<sub>21</sub>: système jessour piedmont,

X<sub>22</sub>: système banquette piedmont, X<sub>31</sub>: système agriculture pluviale plaine,

X<sub>32</sub>: système périmètres irrigués plaine.

production au niveau du bassin versant.

Les résultats sont illustrés par la courbe de trade-off (Figure 4).

Le tableau 4 synthétise les résultats de l'optimisation simultanée du modèle en comparaison avec la situation initiale de référence. En effet, le modèle révèle qu'il est possible de doubler la MB (marge brute additionnelle de 1,493 millions de dinars) tout en gardant les coûts de dégradation à un niveau acceptable (coût additionnel de 0,186 MDT).

L'occupation du sol correspondant à la solution optimale passe de 11673 ha à 22302 ha, avec un avantage comparatif des systèmes de production basés sur les jessours en amont et en piedmont qui connaissent un accroissement de leur superficie respective de 3120 ha à 5397 et de 728 ha à 9080 ha.

Cet outil a permis également d'orienter les choix d'aménagement et d'allocation des ressources en eau et en sol dans une vision intégrée au sein du bassin versant.

## Conclusion : Quelques difficultés et perspectives

Comme unité socio-territoriale naturelle, le bassin versant semble offrir une unité pertinente pour l'aide à la décision et à la gestion intégrée des ressources en eau et en sol. Par ailleurs, le choix d'un bassin versant comme unité de gestion territoriale intégrée pose immédiatement la difficulté d'une adéquation entre deux types de réalités : l'espace physique et l'espace social et politique. Bien souvent, la recherche de la prise en compte des différents usages de la ressource, afin de parvenir à la satisfaction de tous les usagers à l'échelle du bassin, n'apparaît ni évidente à court terme ni réaliste et ce, plus particulièrement, dans des zones arides caractérisées par des précarités climatiques couplées à une multiplicité d'acteurs économiques usagers de la ressource, qui complexifient la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant.

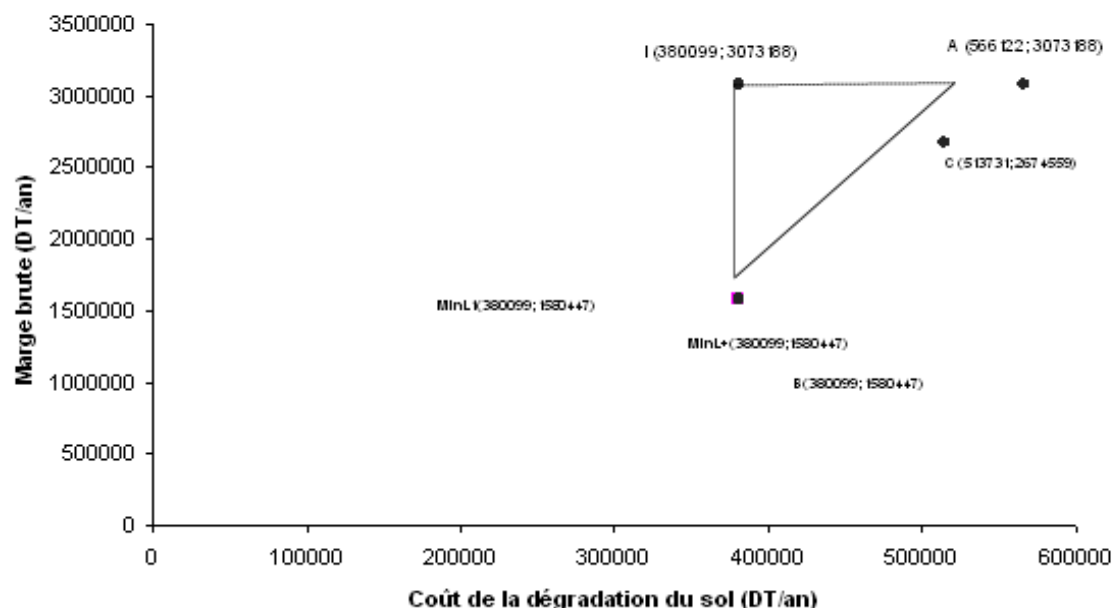
Pour ce faire, un panel d'outils méthodologiques complémentaires et intégrés a été mis en œuvre, notamment l'analyse coût-avantage élargie, l'approche paramétrique, la modélisation multi-agent et la programmation multi-objectifs. Les résultats obtenus sont évidemment à relativiser en fonction de la difficulté de la prise en compte de l'ensemble des usagers du bassin versant, de la dynamique amont-aval du bassin versant, de la qualité des données retenues, de la nature des modèles appliqués (déterministes) et de la difficulté d'extrapolation et d'interpolation des résultats.

Ainsi, des améliorations concernant les données collectées (variables, etc.), la nature des modèles appliqués et les modes de gestion de la ressource, tenant en compte l'ensemble des usagers du bassin, pourraient conduire à des résultats meilleurs.

## Références

Auger P., Baudrand J., 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec : cadre de références pour les organismes des bassins versants prioritaires, environnement Québec. Ministère de l'Environnement, Québec.

Banque Mondiale, 1994. Analyse économique des projets concernant les

Figure 4. *Courbe de trade-off*



- ressources naturelles en Tunisie. Une application du modèle FORCES-MOD aux bassins versants de Bou Hertma et de Marguellil. Rapport final. ITALECO, Rome.
- Bousquet F., Barréteau O., Page C.L., Mullon C., Weber J., 1999. An environmental modelling approach. The use of multi-agent simulations. p. 113-122. In Weill A. (ed.) *Advances in environmental and ecological modelling*. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.
- Chaibi Thameur, Chenini F., Epp C., Tondi G.. 2004. Une approche intégrée pour la gestion durable des ressources en eau dans le bassin méditerranéen [en ligne]. In : *Colloque développement durable : leçons et perspectives*. Ouagadougou. <http://www.francophonie-durable.org/documents/colloque-oua-ga-a3-chaibi.pdf>
- Ferber J., 1994. La kénétique: des systèmes multi-agents à une science de l'interaction. *Revue Internationale de Systémique*, 8:13-27.
- Fétoui M., Sghaier, M. et Romagny B. 2004. Accès, usages et stratégies des acteurs ruraux face à l'alternance d'années sèches et pluvieuses : cas d'un micro-bassin versant de la Jeffara tunisienne. Vers un essai de modélisation multi-agent autour de la gestion des ressources en eau. *Revue des Régions Arides*, numéro spécial, pp : 951-960.
- Fétoui, M. 2003. Ressources naturelles, usages et stratégies des acteurs ruraux dans un micro- bassin versant de la région de Zeuss-Koutine (Jeffara tunisienne): vers un essai de modélisation multi-agent autour de la gestion des ressources en eau. *Mémoire de Mastère, IRA-INAT, Institut National d'Agronomie de Tunis, Tunisie*
- Flesken L., Stroosnijder L., Fetoui M. 2002. Economic evaluation of the on-site impact of water harvesting in southern Tunisia. pp: 89-100. In J. De Graaff and M. Ouessar (ed.) 2002. *Water harvesting in Mediterranean zones: an impact assessment and economic evaluation*. TRMP paper 40, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.
- Gangbazo G. 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant au Québec: concepts et applications, environnement Québec. Ministère de l'Environnement, Québec.
- Graaff J. de, 1996. The price of soil erosion; an economic evaluation of soil conservation and watershed development. *Mansholt Studies 3*. Wageningen University. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Institut National des Statistiques (INS) 2005. Recensement national de la population
- Mahdhi N. 2003. Etude d'impact des travaux de CES sur la production en zone aride. Cas du bassin versant d'Oued Oum Zessar du gouvernorat de Médenine, Diplôme d'Etudes Approfondies, Institut National Agronomique de Tunis, Tunisie.
- Mahdhi N., Bachta M. S., Sghaier M., 2005. Conservation des eaux et du sol et efficacité technique de l'agriculture pluviale en zone arides. Cas du bassin versant d'Oued Oum Zessar. *New Médit*, N.1, pp: 52-56.
- OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) 2003. *Improving water management: recent OECD experience*. OECD, Paris, 125 pp.
- Ouessar M., Sghaier M., Mahdhi N., Abdelli F., de Graaff J., Chaieb H., Yahyaoui H. and Gabriels M., 2004. An integrated approach for impact assessment of water harvesting techniques in dry areas: The case of Oued Oum Zessar watershed. (Tunisia). *J. Environmental Monitoring and Assessment*, 99:127-140.
- Ounalli N., 2005. Allocation optimale multiobjective des ressources en eau et en sols dans le bassin versant d'Oum Zessar, *Mémoire du Mastère, IRA-INAT, Institut National d'Agronomie de Tunis, Tunisie*.
- Romero C., Rehman T., 1989. *Multiple criteria analysis for agricultural decisions*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Sghaier M., Genin D., 2003. Concepts et méthodes: diversité d'approches, multiplicité d'échelles et interaction. *Rapport scientifique de synthèse, la désertification dans la Jeffera Sud-est tunisien, IRA-IRD, Médenine, Tunisie*.
- Sghaier M., Mahdhi N., de Graaff J., Ouessar M., 2002. Economic evaluation of water harvesting at catchment's scale: An application of the FORCES MOD model. p. 101-113. In J. De Graaff and M. Ouessar (ed.) 2002. *Water harvesting in Mediterranean zones: an impact assessment and economic evaluation*. TRMP paper 40, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.