

Impact économique de la protection des sols à l'amont des bassins sur l'agriculture irriguée à l'aval: Analyse par l'approche Target MOTAD

HACIB EL AMAMI*, AYOUB FOUZAI**, JAMEL NASR**, MOHAMED SALAH BACHTA**

Jel classification: Q27, Q24, C61

1. Introduction

Dans un souci de recherche d'efficacité économique, en Tunisie les ressources en eau ont été transférées des zones productrices vers les zones qui en assurent le meilleur usage (Hassaïnya, 1991). Il en résulte un contraste de développement patent, de plus en plus difficile à accepter sur le plan social et environnemental. En effet, à l'aval des bassins versants, on assiste à une croissance économique et à un développement rapide des périmètres irrigués encouragés par les pouvoirs publics. En revanche, la partie amont est caractérisée par un faible niveau de développement socio-économique, des rendements et des revenus agricoles particulièrement bas et une dégradation de l'environnement matérialisée par une érosion très avancée des terres agricoles, une déforestation et une dénudation généralisée du couvert végétal.

Le traitement des bassins versants est perçu comme étant un moyen pour protéger les sols, augmenter la productivité de l'agriculture pluviale par le captage d'une

Résumé

Dans le cadre de la stratégie nationale de conservation des eaux des sols en Tunisie, plusieurs programmes d'aménagement sont actuellement mis en œuvre à l'amont des bassins versants dans l'objectif de réduire l'érosion, d'augmenter la productivité de l'agriculture pluviale et d'améliorer les revenus des populations locales. L'impact potentiel de ces programmes sur l'évolution des activités économiques et/ou environnementales dans la partie aval des bassins est généralement ignoré. En couplant un modèle hydrologique à un modèle d'optimisation économique Target MOTAD, ce travail a simulé, dans le cas du bassin versant de Oued Merguellil, l'impact de différents scénarios de réduction de l'érosion à l'amont sur l'évolution des revenus économiques des agriculteurs dans la plaine, située à l'aval du bassin, où se développe un large périmètre irrigué à partir d'une nappe souterraine alimentée par les eaux de ruissellement provenant de l'amont. Les scénarios simulés consistent à réduire l'érosion de 25%, 50% et 75% par rapport à son niveau maximum. Les résultats obtenus montrent que tous les scénarios simulés impliquent une diminution du revenu économique dans la plaine qui devient particulièrement élevée au-delà du scénario de réduction de l'érosion de 50%.

Ils montrent également que les gains de revenus obtenus à l'amont, qui résultent de la protection des sols et du captage de l'eau, ne peuvent compenser que partiellement les pertes économiques subies dans la plaine et on assiste alors à une chute du revenu global dégagé à l'échelle du bassin (amont et aval). Dès lors, le ciblage de la réduction de l'érosion à l'amont serait la politique d'aménagement la plus indiquée.

Mots-clés: réduction de l'érosion, revenu économique, perte, gains, amont, aval.

Abstract

For the implementation of the Tunisian strategy for soil and water conservation, several management programs have been launched on upstream watershed to reduce erosion, increase rain-fed agriculture productivity and improve local population income. The potential impact of these programs on the economic benefits of activities and environmental liability in the downstream area are generally ignored. In this study, a hydrological model has been coupled to an economic optimization model (Target MOTAD). It is designed to simulate, in the case of Merguellil watershed, the potential impact of different scenarios of upstream erosion reduction on the farmers' returns in the plain, located in the downstream area. The plain is irrigated from groundwater aquifer which is naturally recharged with runoff water from the upstream. The scenarios simulated envisage erosion reduction by 25%, 50% and 75% compared to its maximum level. Results show that all the simulated scenarios reduce the economic returns of farmers in the plain; that becomes particularly high beyond the erosion reduction by 50%. They also show that income gains obtained upstream, resulting from soil conservation and water harvesting, can only partially compensate the economic losses in the plain; this leads to a decrease in the total economic income across the basin (upstream and downstream). Therefore, reducing soil erosion in the upstream watershed seems to be the most appropriate management strategy.

Key words: erosion reduction, economic income, losses, gains, upstream, downstream.

partie des eaux de ruissellement et améliorer le revenu des populations locales, qui sont restées en marge du développement économique et social du pays. A cet effet, diverses structures antiérosives et de petits ouvrages hydrauliques de collecte des eaux de ruissellement ont été mis en œuvre dans le cadre de la stratégie nationale de conservation des eaux et des sols.

L'objectif de la réduction de l'érosion à l'amont a certes des conséquences favorables sur le développement de l'activité agricole pratiquée dans ces zones et l'amélioration des revenus de la population locale. Toutefois, il peut également induire des impacts potentiels considérables sur les bénéfices économiques tirés de l'agriculture irriguée au niveau de la zone aval où se développent de larges périmètres d'irrigation. Les impacts considérés dans ce travail sont représentés par la variation du niveau de la recharge annuelle de la nappe.

En effet, les diverses structures d'aménagement mises en œuvre à l'amont pour réduire l'érosion cap-

tent aussi une partie des eaux de ruissellement. Or, la plupart des périmètres situés à l'aval des bassins sont irrigués à partir d'une nappe souterraine dont la recharge annuelle est assurée essentiellement par les eaux de ruissellement provenant de l'amont. En conséquence, et en raison de cette forte dépen-

* Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts Ariana – Tunisie.

** Institut National Agronomique de Tunisie, Tunis, Tunisie.

dance, toute réduction de l'érosion à l'amont affecterait, via le processus de la recharge, le fonctionnement de l'agriculture irriguée à l'aval et les revenus économiques correspondants des agriculteurs. Egalement, et du moment que les nappes souterraines sont des ressources collectives gérées sous le régime de l'accès libre, la réduction de la recharge annuelle de la nappe se traduirait par un rabattement additionnel de la nappe, étant donné qu'en l'absence de règles de limitation de pompage, les agriculteurs continueraient toujours de prélever le même volume d'eau afin de conserver leurs revenus, abstraction faite de la diminution de la recharge annuelle de la nappe.

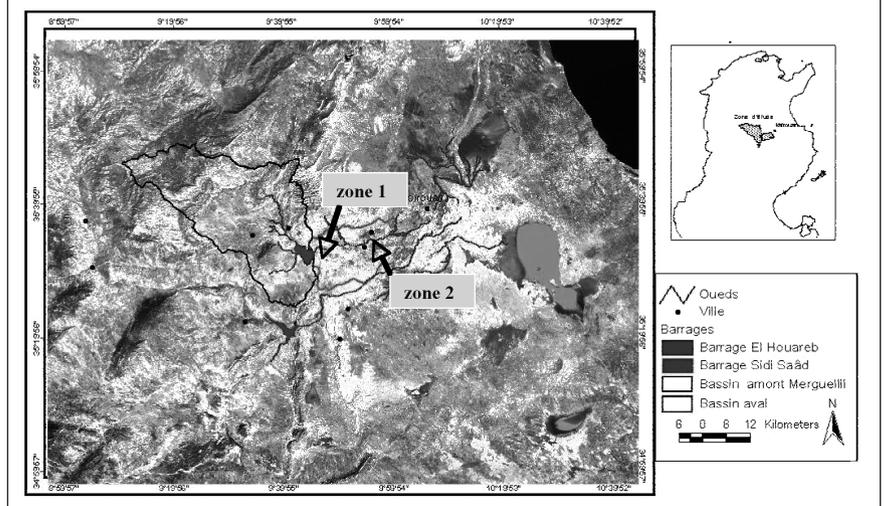
Ces effets externes ne sont pas généralement pris en compte et incorporés dans l'évaluation économique de ces projets. Un tel constat a été mentionné par plusieurs auteurs (Bachta, 1993; Bouma et al. 2011). Ces auteurs ont montré que l'évaluation économique des programmes d'aménagement focalise le plus souvent sur l'estimation des coûts et des bénéfices directs qui se produisent dans la zone d'intervention du projet et ignorent les impacts potentiels qui se produisent à une échelle plus grande dépassant les limites géographiques de la zone, en particulier au niveau de la zone aval (Ganderton, 2005; Barbier et Thompson, 1998). La non-intégration de ces externalités entraîne des biais dans l'estimation des coûts et des bénéfices des projets d'aménagement et peut induire une diminution du bien-être social.

L'objectif de ce travail est d'analyser l'impact potentiel de l'aménagement de l'amont du bassin sur l'économie de l'agriculture irriguée à l'aval. Il s'agit, en particulier, de quantifier l'impact de différents scénarios (Target) de réduction de l'érosion à l'amont sur l'évolution de la superficie irriguée en plaine (aval), les choix productifs et les revenus économiques correspondants. Une méthodologie multicritères couplant un modèle hydrologique à un modèle d'optimisation économique (Target MOTAD) a été élaborée à cet effet. Dans ce qui suit, la section 2 présente le cadre d'application de ce travail, à savoir le bassin versant de Oued Merguellil. Dans cette section, nous définissons les entités socio-économiques du système et nous établissons les interdépendances hydrologiques entre les différentes parties du bassin. Dans la section 3, nous passons en revue la méthodologie adoptée. Le modèle d'optimisation Target MOTAD, utilisé comme outil d'analyse, est également présenté. La section 4 illustre et discute les résultats obtenus. Les implications de ce travail pour les politiques de protection de l'environnement seront présentées à la fin à titre de conclusion.

2. Le bassin versant d'Oued Merguellil: cadre d'application

Le bassin versant d'Oued Merguellil est situé au centre de la Tunisie dans une zone semi-aride, avec une pluviométrie

Figure 1 - L'amont et l'aval du bassin versant d'Oued Merguellil (Source: Leduc et al, 2004).



moyenne qui ne dépasse pas les 300 mm/an. Le bassin peut être découpé en deux grandes entités ressources-usages, supposées relativement homogènes, et interconnectées par le biais du barrage El Houwareb. Il s'agit, d'une part, de la partie haute du bassin située à l'amont du barrage et, d'autre part, de la plaine située à l'aval du barrage (Figure 1). Dans la suite de ce travail, ces zones seront désignées respectivement par: «amont» et «aval» par référence au barrage.

Malgré sa dotation naturelle importante en eau de surface, l'agriculture dans la partie amont est restée du type pluvial extensif, peu diversifié. Cette agriculture n'autorise que des rendements faibles et irréguliers; les revenus dégagés sont particulièrement bas et le taux de chômage est élevé (Dridi, 2000). Outre le faible niveau de développement socio-économique, l'environnement dans le bassin est particulièrement fragile et dégradé. En effet, le bassin de Merguellil est considéré comme l'une des régions les plus érodées de la Tunisie centrale: près de 25% de sa superficie est attaquée par une forte à moyenne érosion (Kingumbi, 1999). Les différents travaux effectués durant les années 80 et 90 font état d'un taux d'érosion moyen élevé de 17 T/ha/an et on estime que le barrage El Houwareb, situé à l'interface entre l'amont et l'aval, s'envase à raison de 2,1 millions de tonnes par an. L'érosion est responsable de la diminution de la fertilité des terres, de la chute des rendements des cultures et du revenu agricole et aboutit, à terme, à la perte du capital productif de base qui est le sol.

L'aval du bassin est constitué par la plaine de Kairouan qui renferme une grande nappe phréatique. Sur cette plaine se développe un large périmètre d'irrigation, de l'ordre de 40 000 ha. La zone sous l'influence d'Oued Merguellil est estimée à 20 000 ha dont 12 000 ha sont actuellement irrigués à partir de la nappe dont la recharge est effectuée essentiellement par les infiltrations souterraines à partir du barrage El Houwareb. Ces infiltrations représentent environ

63% des eaux retenues par le barrage (Kingumbi, 1999). Selon les caractéristiques de la nappe, l'aptitude agronomique des sols et les choix de production, la plaine peut être découpée en deux grandes zones d'irrigation. Au niveau de la zone 1, située juste à l'aval du barrage, la nappe bénéficie d'une recharge forte et elle est de bonne qualité ; toutefois elle est située à un niveau profond. Le système de culture pratiqué se base essentiellement sur l'arboriculture en association avec des cultures maraîchères et céréalières.

Dans la zone 2, les sols sont plus favorables pour le développement des grandes cultures et des cultures maraîchères. Les cultures maraîchères pratiquées en été sont majoritairement des tomates et des piments et secondairement, des pastèques et des melons; celles pratiquées en hiver sont surtout des fèves. Les cultures céréalières sont principalement le blé et l'orge. Au niveau de cette zone, la nappe n'est pas profonde, ce qui explique le développement rapide et intensif de l'irrigation. Le système agraire est presque homogène à travers toute la plaine. Il est caractérisé par la prédominance de petites exploitations qui sont pour la majorité constituées de petites parcelles dispersées. Un nombre réduit de grandes exploitations coexistent avec ces petites structures et elles sont surtout localisées à l'amont de la plaine et pratiquent essentiellement l'arboriculture et les grandes cultures.

L'extension rapide des superficies a fait que les prélèvements sur la ressource eau sont passés de 19 millions m³ en 1994 à 43 millions m³ en 2003, soit une augmentation de 126%. Cette surexploitation s'est traduite par une baisse continue et généralisée du niveau de la nappe de l'ordre de 0,5 m par et peut atteindre 1 m/an dans certains endroits (Feuillette, 2001).

La durabilité de l'agriculture irriguée dans la plaine dépend donc largement de la recharge de la nappe à partir des eaux de ruissellement provenant de l'amont du bassin.

3. Approche méthodologique

Pour analyser et quantifier l'impact de l'aménagement du bassin de Merguellil sur l'agriculture irriguée au niveau de la plaine, le bassin versant a été découpé par rapport au barrage El Houwareb en deux grandes unités: amont et aval. L'amont a été également découpé en huit principaux sous-bassins selon l'importance de la contribution au ruissellement d'Oued Merguellil. Chaque sous-bassin a été découpé en six versants parallèles et chaque versant a été découpé transversalement en trois panneaux emboîtés (partie amont, centrale et aval) pour tenir compte de l'amplification de l'érosion et du ruissellement qui se créent le long du versant à la suite d'un événement pluvieux. Pour chaque panneau, une exploitation représentative a été choisie pour la modélisation. La nappe a été découpée en deux grandes mailles (ou zones) relativement homogènes et interconnectées. Chaque zone est définie par un taux de recharge naturel déterminé et un niveau *Target* de rabattement admissible. Au niveau de chaque maille, une exploitation représentative a été également choisie pour la modélisation.

3.1. Le modèle d'optimisation : Target MOTAD

Le Target MOTAD, technique d'optimisation multicritères, est utilisé dans ce travail pour analyser l'impact de la réduction de l'érosion des terres agricoles à l'amont sur l'évolution de l'économie de l'agriculture irriguée en plaine et les revenus économiques correspondants obtenus. L'évolution du revenu social obtenu à l'amont a été également analysée. Deux critères sont pris en considération: le critère économique et le critère environnemental. Le critère économique consiste à maximiser le revenu dégagé par l'agriculture irriguée en plaine.

L'hypothèse avancée, en se basant sur des travaux de recherche empiriques conduits dans la région, est que l'eau est beaucoup mieux valorisée en plaine qu'en amont et que la collectivité gagne mieux en allouant les eaux de ruissellement vers cette zone (Albouchi, 2006; Bachtta et Zaïbet, 2005). Pour le critère environnemental, deux indicateurs ont été développés: l'un pour indiquer le risque de l'érosion des sols à l'amont et l'autre pour indiquer le risque de rabattement additionnel de la nappe à l'aval. Ces deux indicateurs ont été traités comme Target dans le modèle. Nous supposons à cet égard l'existence d'un planificateur qui cherche à maximiser l'efficacité économique de l'usage de l'eau à travers le bassin, tout en tenant compte simultanément de l'objectif de la réduction de l'érosion à l'amont et de la protection de la nappe à l'aval.

3.3.1. Présentation du modèle

Mathématiquement, le modèle se présente comme suit:

$$\text{Max} \sum_{z=1}^H \sum_{j=1}^J n_z C'_{jz} Y_{jz} \quad (1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_j \sum_k \sum_m \sum_n n_{kvs} \alpha_{jkvs} (\Phi_{kvs}, \beta_j) (P_t + Q_{t(k-1)}) X_{jkvs} - Q_{tks} = 0; \forall v, s, t \quad (2)$$

$$T_e - \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n n_{kvs} \alpha_{jkvs} (\Phi_{kvs}, \beta_j) (P_t + Q_{t(k-1)vs}) X_{jkvs} - d_{te} \geq 0 \quad (3)$$

$$\sum_t p_t d_{te} = \lambda_e \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{v=1}^M \sum_{s=1}^N \sum_{j=1}^J n_{kvs} C_{tj} X_{jkvs} - R_s = 0 \quad (5)$$

$$T_n - \sum_{j'} n_z a_{zz} (a_{ij'z} Y_{j'z}) - \sum_{j'} \sum_{r \neq z} n_r a_{rz} (a_{ij'r} Y_{j'r}) + \beta \cdot \delta \cdot \mu_z Q_{bt} - d_{tn} \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_t p_t d_{tn} = \lambda_n \quad (7)$$

Avec:

- j: indice de l'activité j à l'amont; j = 1.....J;
- j': indice de l'activité en plaine; j' = 1.....J';
- p: indice des panneaux d'un versant donné; p = 1,2,3;
- v: indice des versants; v = 1.....6;
- s: indice des sous-bassins; s = 1.....8;
- z: indice de la zone d'irrigation, z = 1,2;

t: indice de l'état de nature; $t = 1, 2, 3$.

n_{kvs} : nombre d'exploitations dans le panneau «k» du versant «v» du sous-bassin «s»;

C_{jkvs} : contribution de l'activité j au revenu de l'exploitation type du panneau «k» du versant «v» du sous-bassin «s»;

X_{jkvs} : niveau de l'activité j dans l'exploitation type du panneau «k» du versant «v» du sous-bassin «s»;

R_s : revenu social de la population de l'amont;

α_{jkvs} : coefficient de ruissellement de la culture j dans le panneau «k» du versant «v», du sous-bassin «s»; ce coefficient varie en fonction des caractéristiques du milieu (Φ) et du couvert végétal (β). Les caractéristiques du milieu englobent principalement le type d'aménagement présent. Les caractéristiques du couvert végétal impliquent le type de culture ou l'état du couvert s'il s'agit d'un parcours ou forêt (dégradé, amélioré ou bien reconstitué).

T_e : Indicateur de l'environnement; il indique le niveau d'érosion à ne pas dépasser et il est exprimé en termes de tonnes par ha par an;

d_{te} = déviation négative au-dessus du Target environnemental sol;

λ_e : Valeur de la déviation négative au-dessus du Target environnemental sol; elle est exprimée en T/ha/an;

p_t : Probabilité d'occurrence de l'état de nature de la pluviométrie «t»;

n_z : nombre d'exploitations dans la zone «z»;

n_r : nombre d'exploitations dans la zone «r» avec $r \neq z$;

C_{jz} : contribution de l'activité «j» au revenu de l'exploitation type dans la zone «z» (niveau plaine);

Y_{jz} : niveau de l'activité j dans l'exploitation type de la zone «z»;

a_{zz} : coefficient de l'influence de la maille «z» sur elle-même, exprimé en m^{-2s} ;

a_{ijz} : consommation en eau de l'activité X_j dans la zone «z» durant la période «i», exprimée en $m^3/ha/an$. La période «i» est prise égale à une année dans le cas de ce travail;

a_{rz} : coefficient indiquant l'influence du prélèvement de la zone «r» sur la zone «z», exprimé en m^{-2s} ;

a_{ijr} : consommation en eau de l'activité Y_j dans la zone «r» durant la période «i», exprimée en $m^3/ha/an$;

T_n : Indicateur de l'environnement; il indique le niveau de rabattement de la nappe à ne pas dépasser et il est exprimé en m/an;

λ_n : Valeur de la déviation au-dessus du Target de rabattement de la nappe en plaine, elle est exprimée en m/an;

d_{tn} = déviation au-dessus du Target de rabattement de la nappe en plaine relatif à l'état de nature «t»;

Z: niveau du revenu économique agrégé en plaine;

Q_{bt} : quantité d'eau libérée par l'amont en fonction de l'état de nature de la pluviométrie; «t», cette quantité est fonction de l'occupation du sol et du taux d'aménagement du bassin;

β : coefficient de conversion du volume d'eau infiltré à partir du barrage exprimé en m^3 en hauteur de recharge de la nappe exprimée en m;

δ : coefficient qui indique la part de la recharge de la nappe

dans les eaux ruisselées par l'amont (Q_{bt}); ce paramètre est pris égal à 63%;

μ_z : coefficient indiquant la part de la zone «z» dans la recharge annuelle.

La fonction objectif du modèle consiste à maximiser le revenu économique des agriculteurs dégagé par l'agriculture irriguée en plaine (équation 1). Le ruissellement dégagé à l'amont du bassin est représenté par l'équation (2). Il varie en fonction de la nature des cultures, des pratiques culturales adoptées, du type d'aménagements entrepris et de la superficie traitée. L'équation (3) traduit le Target d'érosion du sol à ne pas dépasser; le niveau de ce Target a été modifié pour prendre des valeurs maximales et des valeurs réduites correspondant à une grande protection des sols. Le revenu social obtenu à l'amont est représenté par l'équation 5. Il varie en fonction du scénario de réduction de l'érosion. L'équation (6) traduit le Target de rabattement de la nappe en plaine à ne pas dépasser. Les équations (4) et (7) traduisent respectivement les déviations au-dessus des deux Target environnementaux: érosion des sols à l'amont et rabattement de la nappe en plaine.

Le modèle de Target MOTAD élaboré couvre une seule campagne agricole. Il a été appliqué à des exploitations types représentant les exploitations de l'amont et celles de la plaine. Le volume d'eau de ruissellement provenant de l'amont et qui alimente la nappe à partir du barrage El Houwareb assure le lien entre les deux grandes unités du bassin.

3.1.2 Données et estimation des coefficients

Estimation des coefficients d'érosion

Les coefficients de l'érosion des sols ont été déterminés pour chaque culture à l'aide de l'équation RUSLE (Wischmeier and Smith, 1978). Du moment que la pluie est l'agent principal de l'érosion des sols dans le bassin de Merguellil, la série pluviométrique pour chaque sous-bassin versant a été divisée en 3 intervalles entre le minimum et le maximum des pluies annuelles en ajoutant à chaque fois un « pas » de pluie de 100 à 150 mm selon les sous-bassins. Ces intervalles correspondent aux 3 états de nature de la pluviométrie: sèche, moyenne et humide, avec des probabilités déterminées en divisant le nombre des années dans chaque intervalle par le nombre total des années dans la série.

Estimation des rendements

Pour quantifier l'effet de la variation de l'apport d'eau sur le rendement d'une culture pluviale, il est nécessaire de dériver la relation entre la baisse de rendement relatif ($1 - YR/YM$) et le déficit de l'évapotranspiration relative ($1 - ETR/ETM$) qui aboutit à l'obtention d'un coefficient empirique (K_y) de réponse des rendements à l'eau (Doorenbos et Kassam, 1979):

$(1 - YR/YM) = K_y (1 - ETR/ETM)$; avec YR = rendement réel selon l'apport d'eau; YM = rendement maximum obtenu sans stress hydrique; ETR = évapotranspiration réelle selon l'apport d'eau; ETM = évapotranspiration maximale sans stress hydrique.

Pour estimer la relation entre l'érosion des sols et le rendement des cultures, nous avons utilisé l'équation de Lal (1987). Cette équation trace l'effet de l'érosion cumulative sur les rendements des cultures selon les aménagements et les techniques culturales pratiquées.

Détermination de la marge brute des cultures

Au niveau de l'amont du bassin, le revenu annuel est estimé pour chaque exploitation type en déduisant de la valeur brute de l'ensemble des cultures choisies le coût variable pour chaque culture. La marge brute est calculée pour chaque culture selon les états de nature de la pluviométrie et le type d'aménagement entrepris. Au niveau de la plaine, la variabilité des revenus est régie à la fois par la variabilité des rendements et des prix des produits observés sur le marché. Le calcul de la variabilité des marges brutes des cultures est effectué sur la base d'une série de 10 années. Pour chaque culture, il s'agit de calculer sa marge brute en se basant sur le rendement observé au cours de l'année t et le prix du produit correspondant sur le marché. La valeur moyenne de la marge brute de chaque culture est introduite dans l'équation relative au revenu moyen espéré de l'exploitation type.

4. Résultats et discussion

Le modèle Target MOTAD a été résolu d'abord sans contrainte environnementale sur la protection des sols à l'amont. Le niveau maximum (ou Target) de l'érosion, compte tenu des états de nature de la pluviométrie, a été alors identifié. Ce scénario, que nous qualifions de scénario de référence (scénario 1), correspond à la situation de «haut risque environnemental» où aucun aménagement n'est entrepris au niveau de l'amont du bassin. Ce *Target* a été ensuite réduit de 25%, 50% et 75%, donnant lieu à différents scénarios de protection des sols. Ils seront désignés dans la suite de ce travail respectivement par scénario 2, scénario 3 et scénario 4. L'impact potentiel de chaque scénario sur le revenu économique en plaine a été alors quantifié. Les gains potentiels de revenu à l'amont ont été également comparés à la perte probable du revenu économique à l'aval afin d'analyser l'évolution du bilan global de revenu dégagé à l'échelle du bassin.

4.1. Impact sur le revenu économique à l'aval

L'impact de la protection des sols à l'amont, sur l'évolution de l'agriculture irriguée en plaine et le revenu économique correspondant, a été analysé en faisant varier le niveau de la norme instaurée sur l'érosion des sols. Les résultats obtenus montrent que tous les scénarios

(Target) de réduction de l'érosion entraînent une modification dans les orientations de production et la taille de la superficie irriguée en plaine, qui se traduit par une chute du revenu économique. Cette chute devient particulièrement élevée au-delà d'un certain seuil de protection des sols (Tableau 1). Ceci s'explique par le fait que les aménagements entrepris à l'amont pour réduire l'érosion captent aussi une partie des eaux de ruissellement destinée initialement à la recharge de la nappe à l'aval: il en résulte alors une diminution du volume de la recharge annuelle et, par conséquent, l'offre de l'eau disponible pour l'irrigation.

Ce tableau montre que le maximum du revenu économique en plaine, soit 35 MD, est atteint lorsqu'aucune norme n'est instaurée sur l'érosion des sols (scénario 1); en d'autres termes, lorsque aucun programme d'aménagement n'est entrepris à l'amont. Dans ce cas, la quasi-totalité des eaux ruisselées dans cette partie rejoignent l'aval pour alimenter la nappe et la superficie totale irriguée est alors de 10 000 ha environ. Toutefois, ce scénario correspond au maximum de la dégradation des terres agricoles puisque le niveau total de l'érosion est de 3 MT/an, soit 25T/ha, ce qui est extrêmement élevé par rapport au niveau d'érosion tolérable qui ne dépasse pas généralement 6T/ha/an. Egalement, il génère le revenu social le plus faible pour la population de la zone amont.

Le tableau 1 montre aussi que plus on impose des normes sévères sur l'érosion, plus on diminue le volume d'eau destiné à la recharge de la nappe. Cette diminution a introduit des ajustements continus au niveau du programme optimum de production au niveau de la plaine. L'ajustement concerne à la fois la combinaison optimale des cultures et la superficie totale irriguée et il en résulte une réduction de plus en plus élevée du revenu économique. Dans le scénario 1, par exemple, qui réduit l'érosion de 25%, la diminution de

Tableau 1 - Variation des choix de production et diminution du revenu économique en plaine en fonction du niveau de la norme instaurée sur l'érosion des sols.

Rubriques	Unité	Scénarios d'aménagement			
		Scénario 1 ^(*)	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Erosion réduite	MT	0,754	1,496	2,238	2,683
Eau captée à l'amont	Mm ³	3,02	6,89	17,72	24,08
Recharge de la nappe à l'aval	Mm ³	19,5	17,9	15,3	8,7
Superficie totale irriguée	ha	10076	9331	8035	4386
• Cultures d'hiver	ha	3507	3513	3514	2064
• Cultures d'été	ha	1864	1317	520	0
• Olivier	ha	1908	1903	1661	482
• Arbres fruitiers	ha	2797	2597	2339	1841
Revenu économique en plaine	DT ⁽⁺⁾	35	31,8	27,5	15,5

(*) Scénario de référence (sans aménagement); (+) 1 DT: Dinar Tunisien \approx 0.7 \$USA en 2012.

Tableau 2 - *Impact différentiel des scénarios de réduction de l'érosion à l'amont sur les choix productifs et le revenu économique des zones d'irrigation de la plaine.*

Scénarios/zones	Scénario 2		Scénario 3		Scénario 4	
	zone 1	zone 2	zone 1	zone 2	zone 1	zone 2
Cultures						
Cultures retenues (ha)						
• Cultures hiver	790	2723	790	2724	791	1273
• Cultures été	520	797	520	0	0	0
• Olivier	632	1271	632	1079	482	0
• Arbres fruitiers	484	2113	484	1855	484	1357
Superficie totale (ha)	2427	6905	2427	5608	1757	2630
Revenu économique (DT)	5,9	25,9	5,9	21,6	4,6	10,9

la disponibilité de l'eau a fait que 9% de la superficie habituellement irriguée reste non exploitée, et il s'ensuit un déclin du revenu économique de 10% par rapport au scénario de référence. La diminution de la superficie des cultures maraîchères d'été, fortement exigeantes en eau, et la conversion de l'olivier d'un régime irrigué à un régime pluvial ont constitué les principales adaptations proposées par la solution optimale face à la diminution sévère de la recharge de la nappe. Dans le scénario 3, la diminution de la disponibilité de l'eau a fait que 21% de la superficie reste non irriguée et il en résulte une diminution du revenu économique de 22%. Dans le scénario 4, environ 66% de la superficie reste non irriguée et on assiste à l'élimination complète des cultures maraîchères d'été. Le revenu économique a été fortement affecté puisqu'il a diminué de 55% par rapport au revenu de référence.

Toutefois, cet impact sur les choix productifs et le revenu économique correspondant n'est pas homogène sur toute la plaine;

Tableau 3 - *Diminution de la recharge de la nappe et coût d'opportunité économique par million de tonnes d'érosion réduit à l'amont.*

Rubriques	Unité	Scénarios d'aménagement		
		Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Diminution de la recharge de la nappe	m/an	0,67	0,95	2,1
Coût d'opportunité économique	DT	3,2	7,5	20,5

il diffère selon les zones d'irrigation. Le tableau 2 montre qu'au niveau de la zone 1, les scénarios d'aménagement 2 et 3 n'ont pas affecté le niveau de la recharge annuelle de la nappe. La combinaison des cultures pratiquées ainsi que la taille de la superficie irriguée et le revenu économique obtenu sont restés les mêmes que ceux observés dans le scénario de référence. Ceci est dû au fait que cette zone ne connaît pas un développement rapide de l'irrigation et que, de ce fait, sa demande en eau reste inférieure à l'offre disponible.

Elle ne voit son programme de production modifié et sa superficie diminuée que dans le scénario d'une protection élevée des sols qui correspond à une réduction de l'érosion de 75% (scénario 4).

Au niveau de la zone 2, qui connaît une forte intensification et un développement rapide de l'irrigation, on assiste à la fois à une régression de la superficie irriguée et à une perte du revenu économique, respectivement de 8% et 10%, dès le premier scénario de réduction de l'érosion (scénario 2). Dans le scénario 3, on assiste à une diminution de la superficie irriguée de 27%, à la conversion des oliviers d'un régime irrigué à un régime pluvial et à une élimination totale des cultures maraîchères d'été. La chute du revenu économique correspondant est de 26%.

Les résultats qui viennent d'être exposés suggèrent l'existence d'un conflit fort entre la protection des sols à l'amont et la poursuite de la croissance économique en plaine. Les scénarios d'aménagement qui ont l'impact le plus faible sur la croissance économique ne réduisent que légèrement l'érosion (scénario 2). En revanche, les scénarios qui assurent une véritable protection des sols à l'amont (scénarios 3 et 4) induisent les pertes les plus élevées sur le revenu économique de l'agriculture irriguée à l'aval.

Théoriquement, le conflit d'objectifs peut être mesuré par le coût d'opportunité qui mesure le sacrifice d'un objectif donné pour accroître d'une unité l'autre objectif (Thampapillan and Sinden, 1979). Le tableau 3 présente le coût d'opportunité de la protection des terres en fonction du niveau de la norme instaurée sur l'érosion des sols. Ce coût représente le niveau du revenu économique auquel la collectivité devrait renoncer pour réduire l'érosion à l'amont et améliorer les revenus sociaux des populations locales.

Ce tableau montre que, dans le scénario 2, chaque million de tonnes d'érosion réduit à l'amont implique à la fois une chute de la recharge de la nappe en plaine de 0,67 m/an et une perte du revenu économique de 4,2 MDT. Dans le scénario 3, l'effet devient fortement significatif: en effet, chaque million

de tonnes d'érosion réduit implique une réduction de la recharge de la nappe de 0,95 m/an et une perte de revenu de 5,1 MD par an.

Cette perte devient de 9,2 MD dans le scénario 4 et on assiste à un rabattement de la nappe de 2,1 m/an pour chaque million de tonnes d'érosion réduit. Ces résultats montrent clairement que le coût d'opportunité économique de la protection des terres agricoles à l'amont du bassin versant de Oued Merguellil n'est pas négligeable. Il est même fortement significatif au-delà du scénario 3, qui implique pratiquement l'aménagement de 26 000 ha par diverses structures antiérosives et petits ouvrages hydrauliques.

Dans les bassins semi-arides, comme celui de Merguellil où l'eau est particulièrement rare, ignorer le coût d'opportunité du captage de l'eau à l'amont lors de l'évaluation du projet d'aménagement, induit certainement des biais dans l'estimation des coûts et bénéfiques et induit une diminution du bien-être social.

4.2. Bilans de revenus

Inversement à l'évolution du revenu économique dans la plaine, le revenu social de la population de l'amont augmente au fur et à mesure qu'on diminue l'érosion. Toutefois, le bilan du revenu global dégagé à l'échelle du bassin semble évoluer négativement comme le montre le tableau 4 suivant.

Rubriques	Unité	Scénarios d'aménagement		
		Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Gains de revenus à l'amont (1)	MD	2,8	5,4	11,3
Pertes de revenus en plaine (2)	MD	3,7	7,5	19,6
Bilans de revenus : (2) - (1)	MD	-0,9	-2,1	-8,3
Gains/pertes: (1)/(2)	%	75	72	57

Les résultats montrent que le bilan du revenu global est négatif dans tous les scénarios de réduction de l'érosion simulés. Cela signifie que les gains additionnels de revenus obtenus à l'amont, résultant directement de la réduction de l'érosion et du captage des eaux de ruissellement par les ouvrages, n'ont pas pu compenser la perte du revenu économique subie par l'agriculture irriguée à l'aval suite à la diminution du niveau de la recharge annuelle. Dans le scénario 1, les gains de revenu à l'amont ne forment au maximum que 75% des pertes de revenus à l'aval et dans le scénario 4, ils n'en forment que 57%.

Ces résultats suggèrent que l'aménagement de l'amont implique une perte de la valorisation économique de l'utilisation de l'eau à l'échelle du bassin. Ceci tient essentiellement au différentiel du potentiel de productivité agronomique entre les

deux zones (amont et aval) et aussi au différentiel de la maîtrise technique de l'irrigation par les acteurs situés de part et d'autre du barrage.

4.3. Rabattement additionnel de la nappe à l'aval

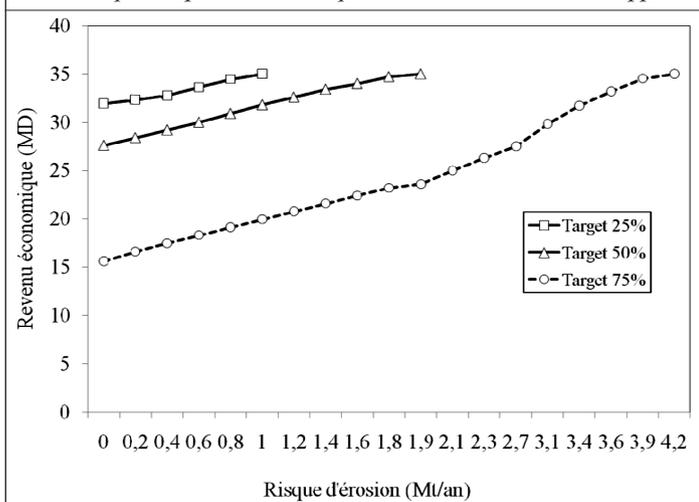
Les résultats présentés précédemment ont été obtenus dans le contexte où aucun rabattement additionnel n'est autorisé pour la nappe, compte tenu de son état de surexploitation actuel. Cela veut dire que la quantité d'eau pompée pour l'irrigation ne doit pas dépasser le volume de la recharge annuelle. Or, pour une nappe commune gérée sous le régime de l'accès libre, comme celle de la plaine de Kairouan, cette situation n'est possible que si le planificateur, soit par des mesures économiques soit par des interventions directes, fixe le quota à ne pas dépasser pour chaque usager. En l'absence d'une telle réglementation, ce qui est actuellement le cas, les agriculteurs continueraient toujours de suivre une stratégie individuelle basée sur la maximisation du profit, abstraction faite de la diminution du niveau de la recharge annuelle. Pour simuler l'évolution du niveau de la nappe en fonction des différents scénarios de protection des sols, un travail de paramétrage a été effectué: il consiste à faire varier le paramètre (I_z) relatif au risque de rabattement de la nappe (équation 7) pour chaque scénario de réduction de l'érosion jusqu'à ce que le revenu économique de la plaine égalise celui obtenu dans le scénario de référence où aucun aménagement n'est entrepris, soit à 35 MD. La Figure 2 présente les résultats de ce paramétrage.

Cette figure montre que le risque de rabattement de la nappe est fortement tributaire du niveau des scénarios de protection des sols à l'amont. A titre d'exemple, dans le scénario 2, le risque de rabattement additionnel de la nappe, pour pouvoir dégager le revenu initialement obtenu (35 MD), est de 0,9 m/an. Ce risque devient 1,7 m/an et 4,5 m/an dans les scénarios 3 et 4, qui réduisent l'érosion respectivement de 50% et 75%. Le planificateur du bassin de Merguellil devrait alors avoir conscience que la poursuite de l'aménagement de l'amont, dans l'objectif d'une meilleure protection des sols et d'une meilleure équité sociale en matière d'allocation de l'eau, impliquerait non seulement une réduction du revenu économique en plaine mais augmenterait aussi, sous le régime de l'accès libre, le risque d'un rabattement additionnel de la nappe. Ceci s'explique, comme le signalent Önal et al (1998), par le fait que l'environnement présente généralement plusieurs attributs qui ne peuvent pas être améliorés simultanément. Dès lors, la recherche d'une solution de compromis et le ciblage de la réduction de l'érosion seraient dans ce cas la politique d'aménagement la plus indiquée.

5. Conclusion

L'analyse des projets de conservation des eaux et des sols se focalise souvent sur la zone d'intervention du projet et ignore les effets externes économiques et/ ou environnementaux qui se produisent à une distance plus grande. En couplant des mo-

Figure 2 - Corrélation positive entre l'augmentation du revenu économique en plaine et le risque de rabattement de la nappe.



dèles hydrologiques à un modèle d'optimisation économique (Target MOTAD), ce travail a simulé dans le cas du bassin versant de Oued Merguellil l'impact de différents scénarios de réduction de l'érosion à l'amont du bassin sur l'évolution des activités économiques dans la plaine, située à l'aval du bassin, où se développent de larges périmètres d'irrigation qui puisent à partir d'une nappe alluviale, alimentée essentiellement par les eaux de ruissellement provenant de l'amont. Les résultats obtenus montrent que tous les scénarios de réduction de l'érosion simulés impliquent des pertes sur le revenu économique dégagé par l'agriculture irriguée dans la plaine et une baisse de l'efficacité économique de l'allocation de l'eau à l'échelle du bassin. Cette perte augmente avec le niveau de la norme instaurée sur l'érosion des sols et devient particulièrement élevée au-delà du scénario de réduction de l'érosion de 50% par rapport à son niveau maximum. Les résultats montrent également que les gains de revenus à l'amont, provenant du captage des eaux et de la réduction de l'érosion, ne peuvent pas remplacer les pertes économiques observées en plaine: il en résulte alors une perte de l'efficacité économique de l'allocation de l'eau à l'échelle du bassin.

Egalement, les résultats montrent que la protection des sols à l'amont, et le captage des eaux de ruissellement qui en découle, entraînerait un coût environnemental à l'aval. Celui-ci serait matérialisé par le rabattement additionnel de la nappe, étant donné que cette nappe collective est actuellement gérée sous le régime de l'accès libre. En l'absence de mesures (économiques et/ou institutionnelles) qui limitent le pompage d'eau, les agriculteurs continueraient toujours de pomper le même volume d'eau afin de maximiser leurs profits individuels, abstraction faite de la diminution du niveau de la recharge annuelle, épuisant ainsi le stock initial de la nappe.

Ce travail a montré que le ciblage de la réduction de l'érosion constitue la politique d'aménagement la plus indiquée, dans le cas du bassin versant de Oued Merguellil, qui permet à la fois de protéger les terres agricoles à l'amont et de maintenir les bénéfices économiques de l'agriculture irriguée à l'aval.

Références bibliographiques

Albouchi L., 2006. *Gestion de l'eau en Tunisie: d'une politique de mobilisation à une politique de réallocation de la ressource selon sa valorisation économique. Cas du bassin de Merguellil en Tunisie Centrale*. Thèse de doctorat de la Faculté des Sciences économiques de l'Université de Montpellier I, France, 232 p.

Bachta M.S., 1993. *Conservation des Eaux et du Sol (CES) en Tunisie. Intervention des pouvoirs publics et stratégies paysannes: un éclairage économique*, CIHEAM, Options Méditerranéennes, 49-59.

Bachta M.S., Zaibet L. and Albouchi L., 2005. *Impact assessment of water resources development in the Merguellil basin: Kairouan, Tunisia*, Rapport pour l'IWMI, 24 p.

Barbier E. B. and Thompson J.R., 1998. *The Value of Water: Flood-plain versus Large-Scale Irrigation Benefits in Northern Nigeria*, *Ambio*, Vol. 27(6): 434-440, Royal Swedish Academy of Sciences.

Bouma J.A., Biggs T.W. and Bouwer L., 2011. *The downstream externalities of harvesting rainwater in semi-arid watersheds: An Indian case study*. *Agricultural Water Management*, 2011, vol. 98 (7): 1162-1170.

Dridi B., 2000. *Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant de Oued Merguellil (Tunisie Centrale)*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, France, 194 p.

Dooronbos J. et. Kassam, A.H., 1979. *Réponse des rendements à l'eau*. Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), Rome, Bulletin irrigation et drainage N. 33, 173 p.

Feuillette S., 2001. *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre: Exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents: Application à la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale*. Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier II, France: 344 p.

Ganderton P.T., 2005. *Benefit Cost Analysis of disaster mitigation: Application as a policy and decision-making*, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 10 (3), 445-465.

Hassainya J., 1991. *Irrigation et développement agricole: L'expérience Tunisienne*. Options Méditerranéennes, série B: Etudes et Recherches N. 3, CIHEAM, Montpellier, France, 217 p.

Kingumbi A., 1999. *Caractérisation du Bassin versant de Oued Merguellil: Application à la simulation des eaux de surface et à l'érosion*. PFE à l'Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural de Medjez El Bab, Tunisie, 98 p.

Lal R., 1987. *Effects of Erosion on Crop Productivity: Critical Reviews*, *Plant Sciences*, 5(4), 303-67.

Leduc C., Calvez R., Beji R., Nazoumou Y., Lacombe G. et Aouadi C. *Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale)*, In *La modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb*, Séminaire WADEMED, Avril 19-21, 2004, Rabat, Maroc, 9 pages.

Önal H., Algozin K.A., Isik M. and Hornbaker R.H., 1998. *Economically efficient watershed management with environmental impact and income distribution goals*. *Journal of Environmental Management* 5 (1998): 241-253.

Thampapillai D.J. and Sinden. J.A., 1979. *Trade-off for multiple objectives planning through linear programming*, *Water Resources Research* 15(5):1028-1034.

Wischmeier W.H. and Smith D.D., 1978. *Predicting rainfall erosion losses*. USDA Agricultural Handbook N. 537.