

L'ADOPTION DES SYSTEMES AGRICOLES DE CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS POUR UNE GESTION DURABLE DE L'EAU EN ZONE SEMI-ARIDE MONTAGNEUSE TUNISIENNE

L. Lajili-Ghezal and R. Guelloubi

* Ecole Supérieure d'Agriculture de Mograne, 1121 Mograne, Zaghouan, Tunisie.

Tel. : + 216 72 660 283, Fax : + 216 72 660 563, E-mail : ghezal.lamia@iresa.agrinet.tn.

** CIHEAM-Instituto Agronomico Mediterraneo-Bari, Via Ceglie 9, 70010, Valenzano (Bari), Italy. E-mail : guelloubi@iamb.it

RESUME – L'eau et le sol sont deux ressources naturelles d'importance capitale pour la production alimentaire et le développement économique, considérées comme ressources rares et précieuses par la plupart des pays en voie de développement appartenant à des milieux climatiques favorables à leur dégradation. C'est le cas de la Tunisie qui, face à des contraintes sociales et économiques doit gérer au mieux la rareté de ses deux ressources. L'irrégularité des apports en eau en quantité et qualité, associé à un accroissement important de la demande en eau et une surface agricole limitée engendre d'une part une perte du potentiel naturel et de la productivité des sols et d'autre part l'augmentation des coûts de production agricole, affectant le développement agricole durable des zones semi-arides montagneuses. D'où la recherche de systèmes de gestion durable de l'eau permettant de répondre à des objectifs économiques et environnementaux. C'est dans ce sens que, les systèmes agricoles de conservation des eaux et des sols sont proposés comme moyen pour protéger les ressources naturelles et contrôler les risques liés aux aléas climatiques. Pour ce faire, les actions suivantes sont proposées :

- 1- Un aménagement intégré des bassins versants, basé sur l'adoption des systèmes agricoles de conservation des eaux et des sols dont le choix est fondé sur des critères topographiques, édaphiques, bioclimatiques, économiques et environnementaux; prenant en considération le phénomène d'irrégularité et d'agressivité des pluies ainsi que des risques liés aux aléas climatiques et leurs impacts sur les ressources hydriques ;
- 2- La valorisation de l'eau en agriculture par la mise en œuvre de stratégies d'irrigation et de lessivage en agissant sur les systèmes cultureux et les conduites culturales au niveau de la parcelle agricole ;
- 3- L'amélioration de l'offre en eau par la construction de grands et petits barrages, recharge des nappes et contrôle de la qualité de l'eau ;
- 4- La recherche d'associations végétales valorisant au mieux les sols dégradés, l'eau rare et s'adaptant aux systèmes de productions de ces zones semi-arides montagneuses.

Des résultats relatifs à des essais d'application de certaines actions dans un contexte semi-aride tunisien, menés par les auteurs, sont développés.

MOTS-CLES : Gestion durable de l'eau, aménagement intégré des bassins versants, systèmes cultureux, conduites culturales, offre en eau, conservation des eaux et des sols, zones semi-arides montagneuses

ABSTRACT – Water and soil are considered as the most important resources for food production and economic development, especially for many developing countries suffering from water scarcity and soil degradation. Tunisia is one of these countries, needing best management of water and soil resources to face social and economic constraints. The irregularity of water supply, associated to an increase of water demand and a limited agricultural land leads to a loose of natural resources, decrease of soil productivity and growth of agricultural production costs, constraining the sustainable agricultural development of semi-arid high lands. In this context research of sustainable water management systems to attend economic and environmental objectives are interesting to rank. These kinds of systems are

proposed as a tool to protect natural resources and to control climatic risks. The following actions are proposed:

- 1- Integrated watershed management, based on adoption of water and soil conservation systems. The choice of these systems is build on topographic, soil, climatic, economic and environmental criteria;
- 2- Improvement of agricultural water use efficiency, based on irrigation and leaching strategies elaborated for specific crop management systems within the parcel;
- 3- Water supply improvement based on building dams, refilling aquifers and control of water quality;
- 4- Restoration of degraded soils, using water efficient vegetation associations adapted to agricultural production systems of semi-arid high lands.

Some results related to research works conducted by authors, on tunisian semi-arid region, are presented.

KEY WORDS: Sustainable water management, *integrated watershed management*, *crop systems*, *crop management*, *water supply*, *water and soil conservation*, *semi-arid high lands*.

INTRODUCTION

Les zones semi-arides montagneuses (plus de 300 m d'altitude par rapport au niveau de la mer) présentent des particularités en terme climatique: pluies plus abondantes, températures moyennes plus faibles et des évapotranspirations potentielles relativement réduites, conférant à ces zones des conditions plus favorables pour le développement agricole. Ceci est d'autant plus prononcé avec la proximité de ces zones à la mer. En terme édaphique, et comme conséquence du climat et de la nature géologique des roches dans ces zones, ces milieux semi-arides montagneux présentent des potentialités en sol assez importantes, si ces derniers sont bien utilisés. Toutefois, ces zones sont caractérisées par une forte agressivité des pluies surtout en automne (Lajili, 1998). Ainsi, la mise en valeur agricole durable de ces zones nécessite le recours à l'utilisation de systèmes agricoles de conservation des eaux et des sols pour permettre une agriculture aussi bien durable que rentable, permettant la protection des ressources naturelles et le contrôle des risques liés aux aléas climatiques.

Ces systèmes sont en mesure de répondre à plusieurs objectifs dont : 1) la protection des ressources sol et eau contre la dégradation, 2) l'amélioration de la productivité des ressources sol et eau et 3) la reconstitution de la fertilité des sols. Ils sont à ventiler entre :1) l'aménagement intégré des bassins versants, basé sur l'adoption des systèmes agricoles de conservation des eaux et des sols visant la limitation des conséquences néfastes de l'érosion par la conservation des terres agricoles contre l'érosion hydrique, 2) la valorisation de l'eau en agriculture par la mise en œuvre de stratégies d'irrigation et de lessivage en agissant sur les systèmes culturaux et les conduites culturales au niveau de la parcelle agricole, 3) l'amélioration de l'offre en eau par la construction de grands et petits barrages, la recharge des nappes ainsi que le contrôle de la qualité de l'eau et 4) la recherche d'associations végétales valorisant au mieux les sols dégradés, l'eau rare et s'adaptant aux systèmes de production de ces zones semi-arides montagneuses.

Ainsi, la combinaison de ces différentes actions de conservation des eaux et des sols (CES), permettra de répondre à des objectifs de développement agricole et de protection de l'environnement.

L'AMENAGEMENT INTEGRE DES BASSINS VERSANTS

L'aménagement anti-érosif des bassins versants a toujours constitué une base pour la protection des terres agricoles contre l'érosion hydrique. Cet aménagement est généralement basé sur des critères topographiques, édaphiques, bioclimatiques, économiques et

environnementaux. Ceci explique l'incitation fournie par l'Etat pour l'évaluation des projets avant leur exécution et dont l'une des composantes est l'identification des différentes alternatives et le choix approprié du / ou des composantes à réaliser. Toutefois, les difficultés rencontrées lors de l'exécution de ces projets d'aménagement, a incité les responsables de développement à travailler à un niveau local en intégrant l'exploitant, et ce par le biais de l'approche participative de développement agricole. Cette approche s'est traduite par la création de groupements d'intérêt collectif (GIC) visant une gestion collective des ressources. Cette organisation sociale des exploitants est de nature à améliorer la gestion des ressources naturelles ainsi que la rentabilité des exploitations agricoles. L'assistance financière de l'Etat tunisien aux exploitants agricoles (subvention, primes, ...etc.) devra être associée à une assistance technique à travers l'élaboration de plans d'aménagement de conservation des terres agricoles contre l'érosion hydrique en zone semi-aride montagneuse, à un niveau local. En se référant à Bennett (1955) qui écrit que la stabilité économique se développe à partir de l'utilisation intelligente des 'bons sols', leurs protections contre l'érosion et la perte abusive de la pluie par excès de ruissellement. Ainsi, une bonne classification des terres en terme d'utilisation appropriée, une protection adéquate de ces sols en fonction de leurs modes d'exploitation et une conservation rationnelle des eaux pluviales, peuvent être les critères de base d'un développement soutenable et durable à tous les niveaux: social, agronomique, économique, écologique, ...etc. Ce genre d'approche a été testé dans un contexte Tunisien semi-aride (Laajili Ghezal et al., 1998). L'étude d'un petit bassin versant montagneux à dominante forestière et pastorale dans la région de Kasserine (Fig. 1) a été réalisée dans le but d'un aménagement optimal de ce bassin par des techniques de conservation des eaux et des sols. L'utilisation de trois critères de classements des sols, un agronomique qui est l'indice de productivité des sols PI, hydrologique à partir de l'application d'un modèle conceptuel d'érosion et un critère d'aménagement basé sur l'approche d'arbres de décision, a permis de montrer qu'un groupe de sol semble être intéressant à investiguer pour répondre à un double objectif: protéger le sol contre l'érosion et améliorer la productivité agricole du sol. Ce groupe renferme les sols dont la pente est aux alentours de 10%, ayant un potentiel d'érosion relativement moyen (12t/ha/an) mais un faible taux de sédimentation (2t/ha/an). Ce groupe semble pouvoir évoluer d'un faible à un moyen ou fort potentiel de production, moyennant des modes de protection appropriés contre l'érosion et une utilisation rationnelle des eaux pluviales et celles de ruissellement. Ce genre d'approche ' bassin versant ' semble donner des résultats acceptables à adapter au niveau local.



Figure 1. Localisation des sites d'études

D'après Lajili (1998), le choix des aménagements de C.E.S. au niveau d'un micro bassin versant de 40 ha situé dans la région de Siliana (Fig. 1), a été basé sur trois critères qui sont l'érosion spécifique moyenne (Es), la pente (S) (Fig. 2) et l'utilisation du sol (LU). La pente par définition étant la dénivelée du terrain sur la longueur de la parcelle, sa valeur va être liée à la position géographique de la parcelle ainsi qu'à sa longueur. La combinaison des trois critères Es, S et LU, permet de définir différents plans d'aménagement élaborés sur support cartographique, le choix final de chaque type d'aménagement sera fait sur la base de considérations économiques et environnementales. L'adaptation au niveau local est recommandée lors de l'exécution de ces plans d'aménagement.

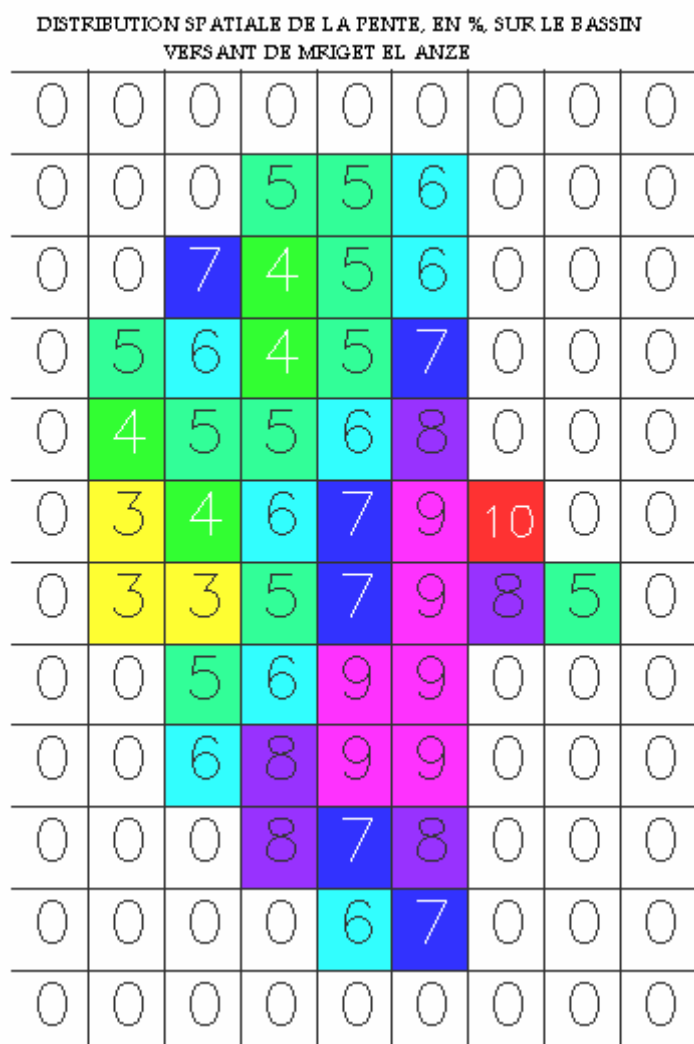


Figure 2. Carte des pentes sur le micro bassin de 40 ha à Siliana, pour des mailles de 15 m x 15 m

Le critère primordial pour le choix théorique d'un aménagement de C.E.S. est la topographie, principalement la pente qui conditionne la vitesse de transport des sédiments et la formation des rigoles. De ce fait, pour des pentes inférieures à 10 %, un aménagement biologique (cultures en courbes de niveau, cultures en bandes alternées, ...etc.) est requis ; alors que pour des pentes supérieures à 10 %, un aménagement physique (banquette, cordon en pierre sèche, ...etc.) est nécessaire afin de limiter l'entraînement du sol et le transport des sédiments par le ruissellement. La mesure de l'érosion hydrique étant un processus lourd et onéreux, le recours aux modèles d'érosion comme outils de simulation et de gestion est

intéressant (ex.KINEROS, WEPP). Le choix du système de culture sur le plan théorique est généralement fait sur la base de considérations bioclimatiques (quantité de pluie, température, ...) et sur la base d'un risque lié essentiellement au climat. Dans un contexte semi-aride, l'agressivité de la pluie totale, saisonnière et mensuelle, est un facteur déterminant qui devrait être pris en compte pour orienter le choix du système de culture, et limiter ainsi le phénomène de l'érosion hydrique (Lajili-Ghezal, 2000). Le recours aux modèles d'érosion peut intégrer les composantes agronomiques et environnementales et étudier les conséquences des modes de gestion des terres sur l'érosion hydrique et orienter ainsi, le choix des systèmes culturaux à pratiquer pour des conditions climatiques et édaphiques données. La pratique d'un assolement biennal avec une céréale secondaire et une jachère inculte peut être comparée à l'installation de vergers à base d'olivier, figuiers, amandiers et pistachiers selon la nature du sol et la proximité de l'eau pour l'arrosage. Ces plantations seront réalisées en conjugaison avec les aménagements anti-érosifs (cordons en pierre sèche et banquettes). Ou encore à une mise en défens d'un glacis avec amélioration pastorale.

Le bassin versant étant formé d'un ensemble de parcelles agricoles, l'étude de l'érosion agricole au niveau parcelle constitue une base permettant d'orienter les choix des cultures et des pratiques culturales. D'après les résultats obtenus par Lajili (1998) sur la modélisation de l'érosion hydrique en zone semi-aride tunisienne, l'élaboration d'un modèle d'érosion à la parcelle (PLAG) et son application sur un micro bassin versant de 40 ha en zone semi-aride tunisienne à Siliana (Carte 1), a permis de montrer que la fraction de sol non protégée par la végétation ou les cailloux dans les rigoles, l'efficacité d'entraînement et la pente du sol sont les paramètres les plus sensibles du modèle. Le calage du modèle PLAG a été obtenu pour une averse d'automne enregistrée sur le site d'étude et en utilisant le paramètre efficacité d'entraînement () comme paramètre de calage. Le meilleur résultat a été obtenu pour une erreur relative de la charge totale en sédiment égale à 0.13% (Fig. 3).

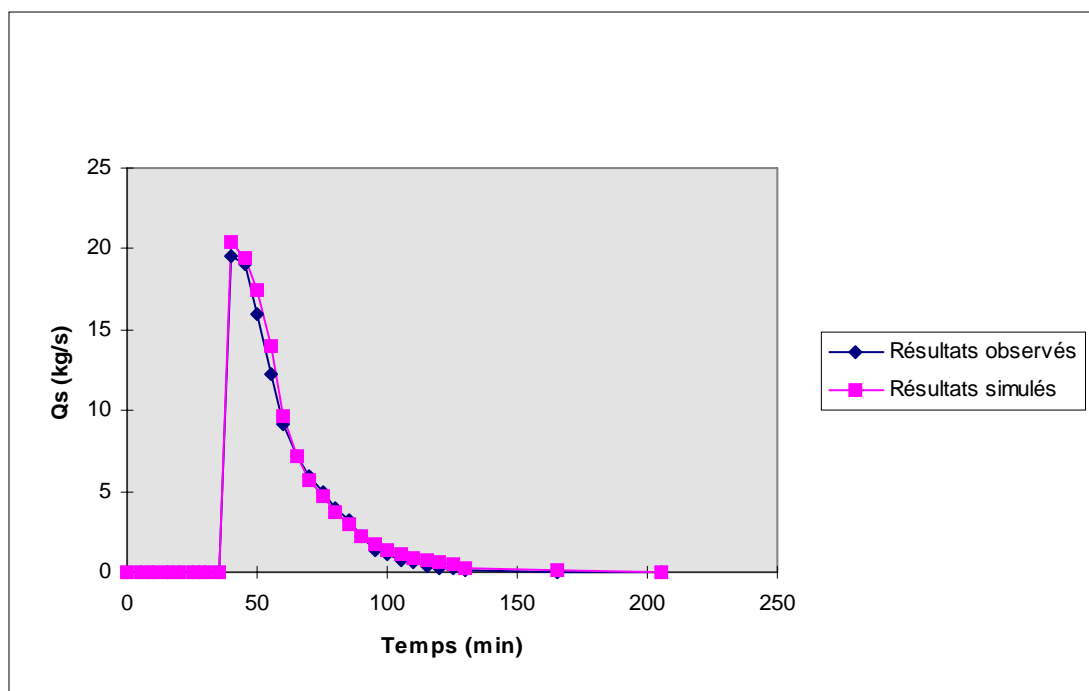


Figure 3. Représentation des turbidigrammes observé et simulé par le modèle PLAG pour l'averse du 03/10/94 ($\eta=0.889$)

Ce paramètre d'efficacité d'entraînement est lié à l'occupation de la parcelle ainsi qu'à l'état de surface du sol, la pente de la parcelle, l'état d'humidité du sol et la pluie.

LA VALORISATION DE L'EAU EN AGRICULTURE

Le secteur agricole reste le plus grand consommateur en eau avec 80% de la consommation hydrique totale du pays. Face à un accroissement de la demande totale et une offre limitée en eau, une valorisation de l'eau en agriculture s'impose. Le développement de l'irrigation a entraîné des recherches sur l'alimentation en eau des plantes, sur les transferts d'eau du système sol-plante vers l'atmosphère, sur l'évaluation de l'infiltration profonde de l'eau d'irrigation et sur l'optimisation des modalités d'apport. (Pelisser, 1978). Le Ministère de l'Agriculture tunisien a engagé, dans le cadre de sa stratégie de mobilisation des eaux, un programme d'économie d'eau en agriculture visant essentiellement la réhabilitation des réseaux d'irrigation et l'introduction des systèmes d'irrigation économisant l'eau telle que le goutte à goutte, l'aspersion, ...etc., avec recours aux incitations financières auprès des exploitants agricoles pour la réalisation de ses programmes. La zone semi-aride montagneuse tunisienne étant souvent ventée et chaude, caractérisée par une eau d'irrigation de qualité réduite (salinité), c'est plutôt le goutte à goutte qui domine face à l'aspersion. L'étude de la valorisation de l'eau en agriculture nécessite des études de recherche associant systèmes d'irrigation et cultures. Une étude menée en 2002 sur un périmètre public irrigué (PPI) par une eau salée, sur forage depuis trente années, géré par un GIC et situé en zone semi-aride sahélienne (Mahdia) (Fig. 1) a permis de dégager l'effet combiné des systèmes culturels avec les systèmes d'irrigation ainsi que la qualité de l'eau d'irrigation. L'eau d'irrigation, issue d'un forage, est caractérisée par un résidu sec de 3,9 g/l, et un SAR de 13,35, qui présentent des valeurs fortes pour un usage agricole. La superficie agricole irriguée est très faible. Elle est, en moyenne, de 0,65 ha/exploitation. Dans le cadre du programme national d'économie d'eau, le réseau de distribution du PPI a connu une réhabilitation, il est passé d'un réseau à ciel ouvert à un réseau de basse pression. Dans le même sens, le système d'irrigation à la parcelle a connu aussi une amélioration par suite du changement de l'irrigation gravitaire, type rigole, par l'irrigation par gaine perforée. Dans une deuxième étape, il y a eu recours à l'irrigation goutte à goutte. Avec l'adoption du nouveau système d'irrigation (goutte à goutte), les agriculteurs ont vu diminuer leurs charges d'exploitation, principalement, la main d'œuvre, la consommation en eau et l'utilisation des engrais (ammonitrite et potasse) en recourant à la fertigation. Notre intérêt s'est porté sur les exploitants disposant d'une surface agricole irriguée (SAI) $\leq 0,2$ ha, représentant une strate limitée dans la rotation des cultures. Dans le cas étudié, cette strate comprend 36,2% des adhérents correspondant à 21,2% de la SAT et 7,3% de la SAI. Elle est caractérisée par un faible taux d'utilisation (13,1%), suite à un nombre faible de serres (2,4 serres/exploitation en moyenne). En effet, la rotation pratiquée généralement au niveau du périmètre est du type serriculture (piment) – Céréale secondaire (orge ou avoine), en bonne année, soit un taux d'utilisation de 50% et serriculture (piment) – jachère – jachère, en mauvaise année, soit un taux d'utilisation de 33%. Les superficies irriguées demeurent faibles et dominées à 94% par la serriculture. Cette dernière est à 98,4% du type piment, variété locale. En s'intéressant à la consommation en eau par système de culture, des différences au sein de cette strate ont été notées. Ainsi la comparaison de la consommation en eau du type goutte à goutte et du type gaine perforée pour des exploitants disposant en moyenne de 2 serres, met en évidence une réduction des quantités appliquées de 26.5% en faveur du type goutte à goutte. Il ressort de cette étude que la consommation en eau est d'autre part influencée par le nombre de serres dont dispose l'exploitant ainsi que par les cultures pratiquées sous serre et donc par les besoins en eau de chaque culture. Ce qui explique les écarts de consommation en eau obtenus pour les exploitants disposant en moyenne de 4 serres et utilisant les systèmes d'irrigation goutte à goutte et gaine perforée.

Cette étude met en évidence l'importance de la dose d'irrigation dans la production agricole et par conséquent le choix de la culture et du système d'irrigation à adopter dans un climat semi-aride en général. En effet, d'après les travaux de Singh et al. (1978) sur la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L. cv. "Kufri Chandramukhi"), le rendement de celle-ci augmente significativement lorsque la dose d'irrigation augmente. Le tableau n°1 illustre les résultats de ses essais.

Tableau 1. Variation des composantes du rendement de la pomme de terre en fonction de la dose d'irrigation

Dose d'irrigation	Rendement (t m / ha)		Nbre de tubercules / m ²		Poids moyen d'un tubercule	
	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année	1 ^{ère} année	2 ^{ème} année
ET ₁₀₀	33.4	27.5	48	55	98	59
ET ₇₅	27.6	21.1	33	40	100	53
ET ₅₀	20.5	14.7	31	42	86.8	36

Source : Singh *et al.*, 1978

Sachant que : - ET₁₀₀ : dose d'irrigation égale à 100 % de l'évapotranspiration,
 - ET₇₅ : dose d'irrigation égale à 75 % de l'évapotranspiration et
 - ET₅₀ : dose d'irrigation égale à 50 % de l'évapotranspiration.

Sachant que la dose d'irrigation constitue la différence entre l'évapotranspiration réelle (ETR) et la pluie efficace (Pe), la dose ET₁₀₀ assure un accroissement de la production de 21 et 63 % par rapport à ET₇₅ et ET₅₀ respectivement. La diminution du rendement entre ET₁₀₀ et ET₇₅ est due à une diminution du nombre de tubercules. Cependant, la réduction du poids moyen des tubercules a causé la baisse des rendements de ET₇₅ à ET₅₀. De plus, environ 35 % de la perte est attribuable à une diminution du calibre des tubercules suite à une diminution de l'irrigation de la dose ET₇₅ à la dose ET₅₀. Même si ces résultats ne sont pas obtenus sur des zones montagneuses, ils montrent l'importance de l'ET dans la production agricole. Cependant, dans un contexte semi-aride montagneux, les déséquilibres entre la demande climatique et les possibilités de transfert à partir du sol déclenchent, au niveau des plantes, des mécanismes de réduction de la transpiration - fermeture des stomates – qui freinent les échanges gazeux, dont ceux du gaz carbonique, indispensable au développement du processus de photosynthèse. Ces phénomènes, conjugués avec la réduction de l'alimentation minérale de la plante, ralentissent la production végétale en proportion du déficit, et d'autant plus gravement que la plante se trouve en période de croissance. L'irrigation est le moyen de supprimer les déséquilibres dans l'alimentation hydrique des cultures (Pelisser, 1978). Toutefois, en zone montagneuse la pente du terrain étant importante, une conduite spécifique de l'irrigation et du lessivage est nécessaire en vues d'une meilleure efficacité de l'utilisation des eaux et des éléments nutritifs et d'un contrôle de la pollution des sols et des eaux en aval.

En se référant à Singh *et al.* (1978), l'irrigation moyennant une eau chargée (conductivité : 10 mmhos / cm) a réduit le rendement des tomates de 35 % (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. " Pusa Ruby "). Cette diminution est due à une réduction du nombre de fruit (23 %) comme le montre le tableau n°2.

Tableau 2. Variation des composantes du rendement de la tomate en fonction de la salinité de l'eau d'irrigation

Dose d'irrigation	Rendement (t. m. / ha)	Nbre de fruit / cueillette	Poids moyen d'un fruit (g)
ET ₁₀₀ (eau douce)	59.4	91	34.4
ET ₁₀₀ (eau chargée)	43.9	74	31.5

Source : Singh *et al.*, 1978

D'après la même étude menée sur le PPI à Mahdia, nous avons remarqué que, les quantités en eau apportées par les exploitants de la strate SAI ≤ 0.2 ha, sont de loin plus importantes (plus que 50% des besoins en eau) que les normes recommandées. Cet excédent d'eau est destiné au lessivage des sels qui posent des problèmes de salinité secondaire au niveau des sols du PPI. Une question s'impose : quelle stratégie d'irrigation et de lessivage et pour quel système de culture faut-il opter pour gérer durablement les ressources en eau et en sol de ce périmètre?. Pour évaluer l'ampleur de ce problème, il a été procédé à un prélèvement d'échantillons de sol pour deux parcelles différentes d'un agriculteur pratiquant la serriculture et irrigant au goutte à goutte. La première parcelle est une jachère non labourée utilisée

auparavant par des serres (déplacement des serres dans l'espace), alors que la deuxième est une serre de piment, variété locale.

Au niveau de chaque parcelle, deux prélèvements ont été réalisés sur cinq horizons jusqu'à 70 cm de profondeur. L'analyse des échantillons de sols a permis de déduire qu'au niveau de la parcelle de plein champ (P) : au niveau amont de la parcelle (P1), la texture est homogène sur l'ensemble du profil (type "sandy-loam"). Au niveau aval de la parcelle (P2), on note une texture de surface plus fine ("loamy-sand") ; le reste étant "sandy-loam". Ceci est attribué à une érosion hydrique transportant les particules fines de la surface de l'amont vers l'aval, malgré la très faible pente (< 2%). Le même phénomène a été observé au niveau de la parcelle de sericulture (S), mais à un degré moindre vu que la serre est isolée du milieu extérieur pendant toute la durée de présence de la serre sur la parcelle. Par ailleurs, la Fig. 4 représente la variation de la salinité sur différents profils de sol et met en évidence une augmentation de la salinité au niveau du sol des deux parcelles; elle s'observe aussi bien au niveau de la parcelle de plein champ, amont et aval (P1 et P2 respectivement) que la parcelle irriguée, sous serre, amont et aval (S1 et S2 respectivement). Par suite de l'utilisation d'une eau d'irrigation de qualité médiocre (3,9 g/l de résidu sec), on note une augmentation généralisée de la salinité des sols, mais plus importante au niveau sous serre qu'en plein champ. Il est à signaler que la parcelle de plein champ n'a pas été cultivée depuis 3 ans. L'accumulation des sels s'est faite au niveau des horizons de surface. La salinité a tendance à diminuer en allant en profondeur. Cette diminution est d'autant plus importante sous serre qu'en plein champ. En effet, sous serre, l'accumulation des sels se fait en surface suite à de faibles doses d'irrigation, d'une part, et d'autre part à l'utilisation du goutte à goutte comme technique d'irrigation. En plein champ, les pluies importantes vont lessiver les sels accumulés dans les horizons superficiels du sol vers les horizons les plus profonds.

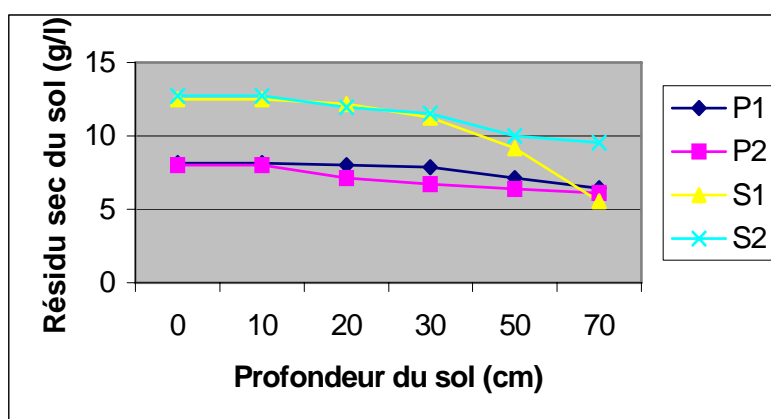


Figure 4. Variation de la salinité du sol en fonction de la parcelle et de l'horizon

Ces résultats observés sur des parcelles de plaines mettent en évidence l'effet pente sur l'érosion hydrique et sur le mouvement des sels dans le sol. Ce phénomène serait plus amplifié sur des sols situés en zone semi-aride montagneuse pour l'érosion hydrique, quant aux sels leur lessivage va être plus rapide et risque de polluer les sols et les eaux en aval. Ainsi, pour garantir un développement agricole durable en zone semi-aride montagneuse tunisienne un contrôle de l'érosion hydrique et des polluants est nécessaire?.

L'AMELIORATION DE L'OFFRE EN EAU

L'analyse de la situation actuelle de l'état de la ressource eau montre que dans un contexte tunisien caractérisé par une forte variabilité et agressivité climatique, une texture fine des sols, une faible fertilité des terres, une intensité des interactions entre les états de surface du sol et des ressources en eau de surface et souterraine, associé à une dynamique spectaculaire des

écosystèmes, la ressource eau constituée par les barrages et les nappes, est peu protégée de l'agression du milieu naturel perpétrée par l'explosion des activités économiques.

Les barrages construits pour répondre entre autre à des fins agricoles et de protection, sont menacés par l'envasement rapide et les risques d'eutrophisation. En effet, l'accélération de l'érosion hydrique au niveau des bassins versants alimentant ces barrages a entraîné une diminution accélérée de la capacité de rétention en eau de ces ouvrages. L'intensification de l'agriculture et le développement des activités industrielles et agroalimentaires en amont des grands barrages a engendré une dégradation de la qualité des eaux des barrages et un risque d'eutrophisation. Ainsi, la gestion des barrages doit passer par une gestion durable des sols et des ressources en eau au niveau des bassins versants. La détérioration de la qualité des eaux de surface et souterraine est liée en grande partie à une agriculture de plus en plus intensive associée à des pratiques culturales et des techniques d'irrigation souvent non appropriées. Ainsi, l'étude du mode d'action de certaines pratiques culturales et de certaines techniques d'irrigation sur les ressources en eau et des effets de ces pratiques culturales et techniques d'irrigation sur les ressources en eau en termes de quantité et qualité sont nécessaires, pour une meilleure gestion des ressources en eau au niveau des bassins versants alimentant des barrages. Pour ce faire, l'étude d'une part du comportement hydrologique d'un bassin versant donné en fonction des modes de gestion de ces terres et d'autre part de l'effet de ces modes de gestion sur la qualité des eaux, constitue un moyen permettant un aménagement intégré du bassin versant et une gestion durable de la ressource eau.

Dans le cadre de la politique de mobilisation des eaux du Ministère de l'Agriculture, plusieurs travaux publics ont été entrepris en matière de construction de lacs collinaires, soit 537 unités construites jusqu'à l'an 2000 (Hamdi, 2000). Ces lacs collinaires construits dans des zones semi-arides montagneuses dégradées, permettent la protection des terres contre l'érosion hydrique et la mise en valeur agricole. Cette dernière consiste en l'implantation d'espèces végétales pérennes conduites en sec en suivant des techniques de CES et nécessitant une irrigation d'appoint au début de leur cycle végétatif (olivier, amandier, acacia, luzerne arborescente, ...etc.), et la pratique de cultures intercalaires à base essentiellement de cultures maraîchères. Ces aménagements de CES pouvant modifier considérablement les paysages et affecter les ressources naturelles, il est utile et parfois indispensable de disposer d'informations sur les effets quantitatifs et qualitatifs de l'érosion hydrique ainsi que sur les caractéristiques hydrologiques, agronomiques, et socio-économiques après aménagement du milieu. A ce sujet, on signale que plusieurs modèles ont été utilisés comme moyen de prévision du ruissellement et de l'érosion hydrique après aménagement de CES. D'après Lajili-Ghezal et Souissi (2001), l'étude du comportement hydrologique et sédimentologique d'un micro bassin versant de 40 ha situé en zone semi-aride tunisienne, dans la région de Siliana, en appliquant le modèle hydrologique ANSWERS couplé au système d'information géographique GRASS, a permis d'obtenir les hydrogrammes et les turbidigrammes avant et après aménagement à l'exutoire du bassin versant (Figures 5 et 5b).

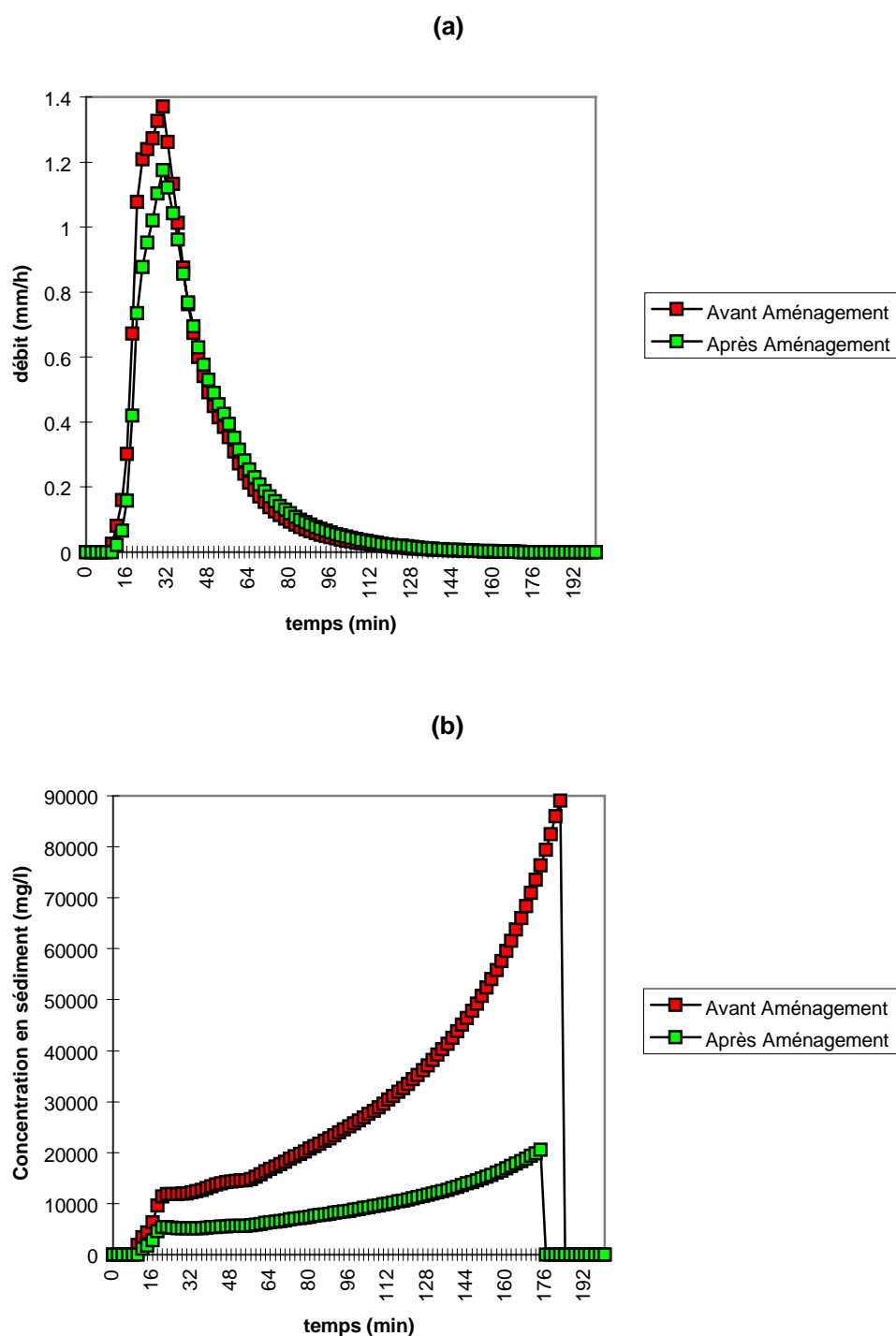


Figure 5. Variation des hydrogrammes (a) et des concentrations en sédiments (b) avant et après aménagement pour le modèle ANSWERS (averse du 03/10/94)

Un modèle hydrologique et sédimentologique à paramètres physiques distribués KINEROS, est utilisé et appliqué sur des petits bassins versants en zone semi-aride montagneuse (Siliana) sur une période s'étalant de 1994 à 1998. Ce modèle est appliqué en affectant aux différents paramètres du modèle des valeurs réalistes basées sur les résultats expérimentaux collectés

dans la littérature et établis sur la base de cartes de sol et d'occupation du sol. L'utilisation de ce modèle comme outil de simulation sur un micro bassin de 40 ha (Siliana), a montré que les meilleurs résultats ont été obtenus pour des averses de durée inférieure à 1 heure et à très forte intensité et dont la hauteur totale de pluie dépasse les 20 mm. Utilisé comme outil de prévision, l'application du modèle KINEROS nécessite la connaissance de l'occupation du sol à un instant donné. Pour ce faire, une carte d'aménagement agricole pour l'ensemble du bassin d'étude est établie. Elle correspond à la résultante de deux cartes élaborées; la carte culturale et la carte d'aménagement anti-érosif. Les résultats obtenus par l'application de ce modèle sur un bassin versant de 135.35 ha (Siliana), sont donnés dans le tableau n°3, qui montre que le modèle simule les apports liquide et solide sur le bassin versant de 135.35 ha pour des averses de durées supérieures ou égale à 80 minutes. Ainsi sur 7 averses simulées par le modèle KINEROS, 4 uniquement ont engendré un ruissellement. Les principaux ruissellements (au nombre de 3) sont générés pour des averses dont la hauteur de pluie totale est supérieure ou égale à 32 mm et l'intensité de pluie maximale pour un intervalle de temps de 20 minutes est supérieure ou égale à 24 mm/h.

Tableau 3. Quantification des apports liquides et solides par le modèle KINEROS

Averse	P (mm)	Lr (mm)	Vr (m ³)	Kr (%)	S (t)	Es (t/ha)
02/06/97	32	7.7	10421.9	24.1	2745	20.3
05/10/97	32.5	2.5	3383.7	7.6	940.7	6.9
12-13/11/97	11.5	0	0	0	0	0
23/11/97	18.5	0	0	0	0	0
23-24/9/98	36	3.4	4601.9	9.4	1229.1	9.1
10/10/98(a)	4	0	0	0	0	0
10/10/98(b)	13.5	1.3	1759.5	9.6	46.9	0.3
Moyenne/an	21.1	2.1	2842.35	9.9	708.8	5.2

L'analyse des résultats obtenus dans ce tableau montre que les apports liquides dans le lac collinaire sont sous estimés par le modèle, nécessitant un affinement de la composante hydrologique en termes d'estimation des paramètres et de procédure de calage. De même, les résultats d'érosion sont inférieurs de moitié à la norme régionale de ce site, qui est estimée à 10t/ha/an. Une amélioration de la composante d'érosion sera tributaire d'une meilleure précision des résultats hydrologiques.

La pollution des eaux, en particulier par les nitrates, constitue un autre volet de l'amélioration de l'offre en eau. En Tunisie, plusieurs études ont été menées sur les écoulements hydriques et sur les cinétiques d'évolution de certains éléments chimiques à la surface et à l'intérieur du sol. Parmi ces études, on peut citer en premier lieu le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines en Tunisie (BIRH-DGRE, 1998 et 1999), qui a été mis en place depuis 1998 et dont l'objectif principal est le suivi de la qualité des eaux souterraines des nappes aquifères de la Tunisie. En effet, avec l'accroissement continu de la demande en eau et dans le cadre de l'approche adoptée dans la stratégie de la gestion des ressources en eau à savoir la gestion contrôlée, le suivi de la qualité des eaux s'impose de plus en plus car l'évaluation des ressources en eau ne peut se faire dans l'avenir qu'en termes de "quantité à telle qualité". La maîtrise de la situation d'exploitation des ressources en eau en particulier celle souterraine nécessite un diagnostic global de la qualité des nappes. Ainsi, le réseau de suivi de la qualité des eaux mis en place par la Direction Générale des Ressources en Eau, Bureau d'Inventaire des Ressources Hydrauliques (BIHR) en collaboration avec la Direction Générale des Etudes des Travaux Hydrauliques (ETH), est donc un des moyens de contrôle de l'état de l'usage ou de l'exploitation d'une nappe d'eau. Le suivi de la qualité des eaux permet une accumulation d'informations pouvant servir à la simulation du comportement des nappes pour des situations futures et c'est finalement un outil d'aide à la décision quant à l'allocation future de telle ou telle ressource. Ainsi, l'analyse des résultats de deux années de mesures 1998 et 1999, montre que l'impact de l'utilisation des engrais azotés et phosphatés dans les régions à vocation agricole s'est fait sentir par des teneurs élevées en nitrates particulièrement dans les niveaux aquifères superficiels. A titre d'exemple et dans le Gouvernorat de Zaghuan (Carte 1), les teneurs en nitrates dépassent les 100 mg/l pour les nappes de Zaghuan et Oued R'Mel.

D'après Troch et Lajili-Ghezal (2002), la simulation des apports liquides et des concentrations en sédiments en appliquant le modèle ANSWERS sur le bassin versant de Oued R'Mel (Zaghouan), montre que la concentration en sédiments simulée au niveau du barrage R'mel dépasse les 150 g/l pour l'averse du 30/11/95 (Fig. 6). D'après les mêmes auteurs, le recours au système d'information géographique GRASS a permis une amélioration de la précision des résultats hydrologiques et sédimentologiques du modèle, en l'appliquant sur un micro bassin versant de 40 ha à Siliana, à travers une amélioration de la procédure d'estimation des paramètres topographiques, du sol et de ses états de surface.

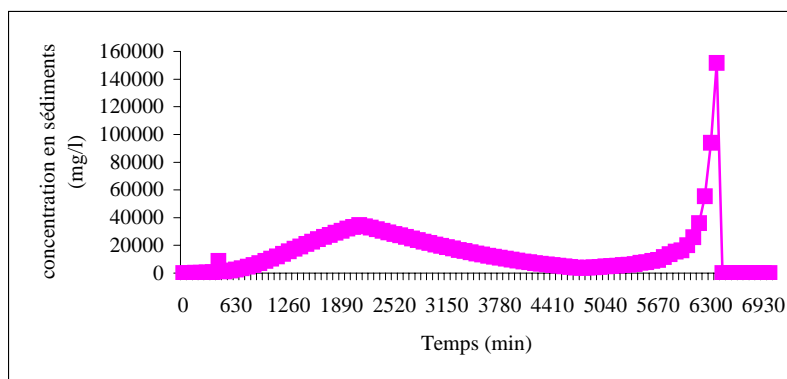


Figure 6. Variation de la concentration en sédiments dans le barrage R'Mel, simulée par le modèle ANSWERS (Averse du 30/11/95)

LES CULTURES CONSERVATRICES EN EAU ET EN SOL

En zone semi-aride montagneuse tunisienne, les systèmes de productions sont essentiellement basés sur la céréaliculture et l'élevage. Dans ces zones caractérisées par une pluviométrie relativement importante, des évapotranspirations plus faibles et des risques d'érosion hydrique plus importants, on a souvent recours aux techniques de CES des terres céréalières sur les versants. Pour connaître l'effet des techniques de CES sur le bilan hydrique du sol et les pertes en sol, affectant ainsi les rendements des cultures, plusieurs modèles agronomiques peuvent être utilisés dont on cite :

- Le modèle C.R.E.A.M.S. (Chemicals Run off and Erosion from Agricultural Management Systems) : c'est un modèle qui a été développé dans les pays de climat "tempérés" pour simuler l'effet de l'érosion hydrique
- Le modèle E.P.I.C. (Erosion Productivity Impact Calculator) : c'est un modèle développé par l'ASDA-ARS de Temple (USA), pour simuler les effets du sol, du climat, des pratiques et des rotations culturales sur l'érosion hydrique, puis l'effet à long terme de celui-ci sur le rendement des cultures.
- Le modèle WEPP (Water Erosion Prediction Project) : c'est un modèle à paramètres physiques distribués de simulation en continue et de prévision des effets de l'érosion hydrique sur la productivité agricole, intégrant le climat, la pente, le sol et les systèmes de conduite culturale (Flanagan, 1994).

D'après Louhichi (1997), le modèle E.P.I.C. a été appliqué dans la région de Zaghouan (Carte 1). Les aménagements de CES pratiqués sont essentiellement des banquettes en courbes de niveau. Ces ouvrages ont été consolidés par l'implantation d'atriplex sur les deux côtés, amont et aval des banquettes. De plus, il y a eu implantation de bandes enherbées et la reconstitution du tapis végétal des parcours en vue d'augmenter la production fourragère et de fixer et protéger le sol. L'analyse des résultats obtenus à partir de l'application du modèle EPIC montre qu'en moyenne, une amélioration assez importante des rendements du blé dur dans les sols aménagés est observée, et une stagnation pour le sol non aménagé est enregistrée. En effet, pour les mêmes années climatiques et les mêmes techniques de production, ces rendements passent de 10.4 qx / ha à 23 qx / ha pour le sol aménagé et de 8.8 qx / ha à 10.4

qx / ha pour le sol non aménagé. Cette amélioration est très remarquable surtout pour les années sèches. La précision des résultats obtenus est liée aux méthodes d'estimation des paramètres du modèle.

La céréaliculture associée à l'élevage en zone semi-aride montagneuse favorise la dégradation des ressources sol et eau, pouvant être contrôlée par des techniques de CES. Parmi ces techniques, les moyens de construction du sol consistent à minimiser la dégradation du sol et favorisent sa régénération à travers des mesures de restauration du sol et de gestion des cultures. Le choix d'espèces végétales protectrices du sol, résistantes aux conditions climatiques et valorisantes en eau, devient une nécessité pour garantir un développement agricole durable. Les légumineuses à graines répondent bien à ces critères. C'est dans ce sens qu'un essai agronomique a été mené en zone semi-aride dans le gouvernorat de Zaghouan, en utilisant une culture de Pois chiche de Printemps (variété locale), au cours de l'année 2002. Le choix de cette légumineuse était justifié par : 1) le climat (pluviométrie importante au printemps et bonne insolation) donc conservation de l'eau, 2) l'effet positif de cette culture sur la matière organique du sol engendrant une réduction de l'érosion hydrique et 3) la fixation biologique de l'azote par cette plante entraînant une réduction de la fertilisation azotée, réduisant ainsi les risques de pollution des eaux par les nitrates. Les résultats issus de cette étude, ont montré l'effet positif de cette culture sur la matière organique du sol (Fig. 7), variable en fonction de la pente du sol. Le même phénomène est observé pour l'azote total du sol en surface et sur des profils de sol (Fig. 8). Ces résultats obtenus sur de faibles pentes (<2%), vont être encore plus prononcés sur des parcelles à pentes plus élevées.

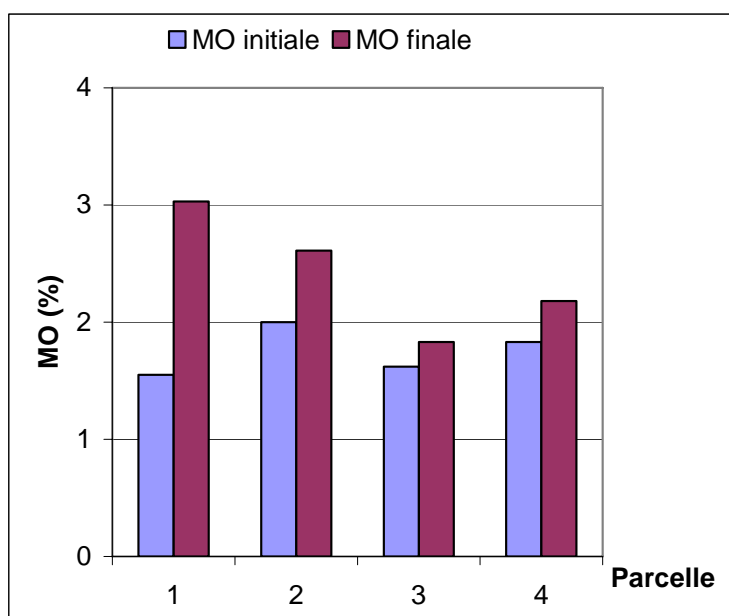


Figure 7. Effet de la culture de Pois chiche de printemps sur la teneur en matière organique du sol pour l'horizon 0-30 cm

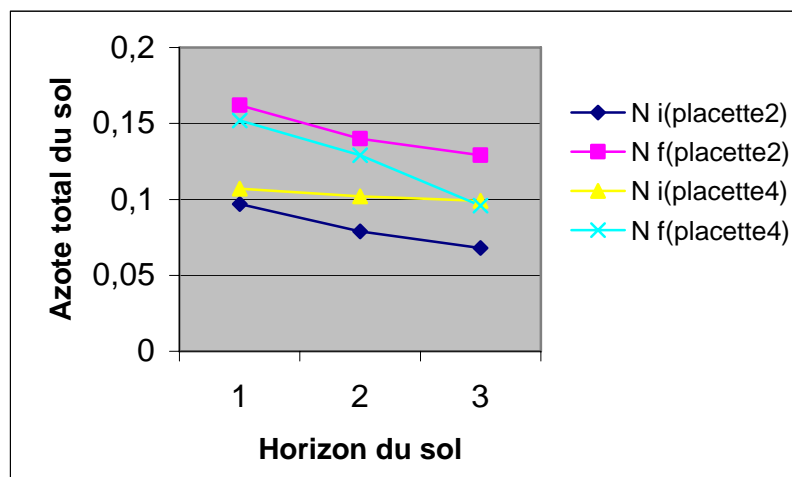


Figure 8. Variations des profils d'azote dans le sol avant et après la culture de Pois chiche de printemps pour les horizons 10, 20 et 30 cm des placettes 2 et 4

CONCLUSION

La gestion durable de l'eau dans les zones semi-arides montagneuses tunisiennes, est conditionnée en particulier par les caractéristiques climatiques de ces zones en termes d'irrégularité et d'agressivité des pluies, par le relief fort et accidenté ainsi que par la tenue des terres agricoles. L'adoption des systèmes agricoles de conservation des eaux et des sols dans ces zones, constitue un moyen pour le contrôle des risques de dégradation des ressources naturelles liée à l'eau. C'est ce qui est mis en évidence par cet article, à travers quatre actions proposées, qui sont : 1) L'aménagement intégré des bassins versants; 2) La valorisation de l'eau en agriculture par la mise en œuvre de stratégies d'irrigation et de lessivage en agissant sur les systèmes culturaux et les conduites culturales au niveau de la parcelle agricole; 3) L'amélioration de l'offre en eau dans ces milieux et 4) La recherche d'associations végétales valorisant au mieux les sols dégradés, l'eau rare et s'adaptant aux systèmes de productions de ces zones semi-arides montagneuses. L'outil proposé pour l'étude de l'application de ces actions dans un contexte semi-aride tunisien de montagne, est les modèles à paramètres physiques distribués. En effet, ces modèles permettent d'évaluer l'ampleur et l'étendue de l'érosion à différentes échelles spatiales, de prévoir les réponses des sols à différents traitements de CES et de prédire le comportement des bassins versants sur les plans hydrologiques et sédimentologiques suite aux changements d'utilisation et d'exploitation des terres de ces bassins versants. Les modèles à mailles, tel que le modèle ANSWERS est intéressant à appliquer pour l'étude de la pollution diffuse sur des petits et grands bassins versants, ainsi que pour la prévision de cette pollution suite à l'application d'aménagement de CES sur le bassin versant. Le modèle KINEROS est intéressant à appliquer sur des petits bassins versants alimentant des lacs collinaires, pour l'étude de l'effet de l'aménagement des terres agricoles sur l'érosion hydrique des parcelles et l'envasement des barrages en aval. La bonne estimation des paramètres nécessaires à l'application de ces modèles, affecte considérablement la qualité des résultats du modèle ainsi que sa manipulation. Ainsi, une meilleure identification de ces paramètres au niveau parcelle est nécessaire. L'inclinaison et le sens de la pente étant deux facteurs conditionnant l'écoulement de l'eau et le transport de masse, doivent être pris en considération pour la mesure des paramètres des modèles et par conséquent pour leur estimation. Le recours aux systèmes d'information géographique contribue à l'amélioration de l'estimation des paramètres de ces modèles à travers l'élaboration de données distribuées dans l'espace. La variation des modes de gestion des terres et des techniques culturales à la parcelle, affecte considérablement les paramètres topographiques, d'infiltration et d'érosion ainsi que la rugosité hydraulique, agissant sur les écoulements liquides et solides. La recherche de modèles de gestion des terres agricoles situées en amont des

grands barrages en Tunisie visant une conservation des ressources en eau et en sol, permettra de garantir une gestion durable de l'eau en zone semi-aride montagneuse tunisienne.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIRH-DGRE, (1998 et 1999). Réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de Tunisie. Publications BIRH-DGRE, Ministère de l'Agriculture de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques.

FLANAGAN, D.C. (1994). Water Erosion Prediction Project, Erosion Prediction Model, Version 94.7 User Summary. NSERL Report n°9. USDA - Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana, USA. August, 1994.

HAMDI, S. (2000). Stratégie nationale de conservation des eaux et des sols (1990 – 2000). Revue de l'agriculture n° 43, 22 – 26.

Laajili Ghezal, L., Aloui, T., Beji, M.A. et Zekri, S., (1998). Optimization of Soil and Water Conservation Techniques in a Watershed of the Tunisian Semi-Arid Region. *Advances in GeoEcology* 31, 341-354, CATENA VERLAG.

LAJILI, L., (1998). L'Erosion Hydrique en Zone Semi-Aride Tunisienne : Modélisation, Estimation des Paramètres et Application à l'Aménagement Anti-érosif. Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur en Sciences Biologiques Appliquées (Aménagement des Terres et des Forêts), de la Faculté des Sciences Agronomiques et Biologiques Appliquées de l'Université de Gand.

LAJILI-GHEZAL, L. (2000). Dégradation des terres et des ressources naturelles à Bargou. Observatoires des relations populations - environnement en milieu rural tunisien : pour une gestion durable des ressources naturelles, DYPEN II, Tome II, pp. 225-238.

LAJILI-GHEZAL, L. et SOUISSI, A. (2001). Use of Physically-Based and Distributed-Parameter Model Coupled to A Geographical Information System for Soil and Water Management in a Tunisian Semi-Arid Region. Conference of Sustainable Agricultural Development, Fayoum Faculty of Agriculture, March 28-30/2001, pp. 335-348.

LOUHICHI, K. (1997). Utilisation d'un modèle bio-économique pour analyser l'impact des politiques agri-environnementales : cas des techniques de conservation des eaux et du sol en Tunisie. Application à la ferme Sawaf. Master of science, IAM Montpellier, 93 p. +annexes.

PELISSER, F. (1978). Hydraulique agricole. L'hydraulique au service d'une politique de l'eau : évolution des problèmes de l'eau au cours de la dernière décennie. XV Journées de l'hydraulique, Toulouse 5, 6, 7 sept. 78.

SINGH, S. D., GUPTA, J. P. & SINGH, P. (1978). Water economy and saline water use by drip irrigation. *Agronomy journal*, volume 70, n° 6, pp. 948-951.

TROCH, P. A. et LAJILI-GHEZAL, L. (2002). Use of GIS for assessment of distributed parameters on watershed - application to water pollution control using the ANSWERS model coupled to GRASS. Proceedings of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, 7-10 January 2002, Tunis (EPCOWM '2002), 124-135.