

EFFET DES SYSTEMES DE GESTION SUR LE RUISELLEMENT, L'EROSION ET LE STOCK DU CARBONE DANS LES MONTS DE BENI-CHOUGRANE- ALGERIE

Morsli Boutkhil.*, Halitim Amor., Roose Eric *****

(*) *Agropédologue, Chargé de Recherche I.N.R.F BP 88 Mansourah Tlemcen Algérie.
Fax : (213) 045 86 74 Email : morbinrf@yahoo.Fr.*

(**) *Professeur Université de BATNA, Algerie*

(***), *Agropédologue, Lab. MOST, Centre IRD, BP 64501, F34394 Montpellier, France.*

Résumé

L'érosion des sols des montagnes algériennes est préoccupante. En effet la pression démographique s'accroît chaque jour et l'impact de l'érosion apparaît clairement au niveau des rendements. Malgré les grands moyens mécaniques développés pour la lutte contre l'érosion, celle-ci élimine la mince pellicule organo-minérale et peut enlever complètement la couche la plus fertile en une génération. Le système de gestion des sols est le facteur le plus important où l'homme peut intervenir pour modifier ce phénomène. Ce travail vise justement l'effet de certains systèmes de gestion très fréquents dans cette zone de montagne méditerranéenne, sur le ruissellement et les pertes en terre, en carbone et en éléments minéraux. Trois systèmes ont été étudiés: jachère nue, sol cultivé et jachère pâturée ou en défens. L'étude a été menée sur dix parcelles de 100 m² et sur deux types de sols représentatifs de montagnes méditerranéennes. Les résultats ont montré que le coefficient de ruissellement moyen (Kram) fut modeste : il est plus élevé sur sol nu (3.8 à 6.5%) que sur sol cultivé ou en jachère (1.3 à 2.2%). Le ruissellement max en 24 heures (K_{rmax}) a atteint 32% sur sol nu et 6 à 25% sous cultures. Les quantités de sédiments érodés ont atteint 4 à 6 t/ha/an sur sol nu et 0.2 à 1.6 t/ha/an sur les parcelles couvertes. Les teneurs en carbone organique (Co) du sol sont faibles, 0.9 à 1.2 % en surface (0 à 10 cm) et 0.6 à 1 % en profondeur (0 à 30cm). Le stock de Co du sol en surface a diminué en 5 ans de 13 et 15 % sur sol nu. Par contre sur un sol en jachère, le stock a connu une augmentation de 13 et 20 %. Les stocks de Co sont plus élevés sur les sols argileux que sur les sols limoneux. Les terres érodées sont 1.3 à 4 fois plus riches en Co que le sol en place : l'indice de sélectivité du Co diminue lorsque l'érosion augmente. Le billonnage et la jachère non pâturée semblent efficaces pour réduire l'érosion et augmenter les stocks de Co du sol. L'étude de la distribution des sols a montré qu'une partie des matériaux érodés reste piégée sur le versant.

Mots-clés : Algérie, Gestion des sols, Erosion, Ruissellement, Stock de carbone organique du sol, Erosion sélective du carbone.

Abstract:

Soil erosion of the Algerian mountain is very preoccupying. The demographic pressure increases every day and erosion accelerates the decline of the soil productivity. Although great mechanical actions were developed during 50 years to reduce erosion, it continues to eliminate the thin organo-mineral topsoil and can remove the most fertile layer in one generation. But land use management seems the most efficient way that man can use to reduce the effects of various erosion processes. This work aims the effect of certain land use

management, very frequent in this zone, on the runoff, and losses in soil and organic carbon. Three systems were studied: bare fallow, cultivated soil and grazed fallow. The survey has been led on then plots of 100 m² and on two types of representative soils (silty or clayey brown soils) and slopes (20 and 40%) of the Mediterranean mountains. The data showed that the average runoff coefficient was moderate in general, but greater on bare fallow ($K_{ram} = 3.8$ to 6.5 %) than on cultivated soil or grazed fallow (1.3 to 2.2 %). The maximal runoff coefficient (K_{rmax}) reaches 32 % on bare plots, but 5 to 25 % on vegetated soils. Erosion reached 4 to 6 t/ha/year on bare fallow but only 0.2 to 0.6 t/ha/year on protected plots. Ridging and protecting fallow seem efficient to reduce runoff and erosion. Content in soil organic carbon (Co) is weak, 0.9 to 1.2 % in the topsoil (0 to 10 cm) and 0.6 to 1% in depth (30 to 45 cm). The soil organic carbon stock is nearly constant during 5 years on the cultivated soils and decreased 15% on bare fallow on 10 cm. On protected fallow plots, the SOC stock increases up to 20%. The eroded sediments are 1.3 to 4 times richer in Co than the topsoil.

Key words: Algeria, Land use, Erosion, Runoff, Soil organic carbon, Selective erosion

INTRODUCTION

L'érosion est un phénomène connu depuis longtemps en Algérie, mais de nos jours, elle prend de plus en plus d'ampleur. Malgré les moyens importants mis en œuvre pour lutter mécaniquement contre l'érosion, elle reste une préoccupation majeure du développement agricole. Les zones de montagnes qui constituent un enjeu socio-économique important, sont les plus touchées. Ainsi les équilibres entre la végétation, le sol et l'eau se trouvent perturbés (Benchetrit, 1972). Le défrichement, le surpâturage, la mise en culture des terres en forte pente et les séquelles de la colonisation sont autant de facteurs liés à l'homme qui ont accentué les phénomènes de dégradation.

En conséquence, environ 6 millions d'hectares sont exposés aujourd'hui à une érosion active ; en moyenne 120 millions de tonnes de sédiments sont emportés annuellement par les eaux (Heddadj, 1997). Les pertes annuelles de stockage des eaux dans les barrages sont estimées à environ 20 millions de m³ dues à l'envasement (Remini, 2000). La subsistance des populations est de plus en plus menacée par l'érosion accélérée.

Au vu de la complexité de l'érosion, de ses conséquences dans le Tell occidental de l'Algérie et de la tendance actuelle à la reconversion des systèmes de production, un programme de recherche sur le ruissellement, l'érosion et les pertes de fertilité a été lancé dans les montagnes de Beni-Chougrane dans le cadre d'un projet national de recherche (MERS 01). L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence des systèmes de gestion traditionnels et améliorés sur les processus de ruissellement et d'érosion et sur la dynamique du carbone. La nécessité de ce projet est motivée par les résultats déjà acquis par l'équipe de l'Institut National de Recherche Forestière (INRF) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD ex ORSTOM) dans le cadre d'une convention bilatérale (Roose et al, 1993).

Sur ces zones de montagne et sur les sols continuellement cultivés, ou abandonnés, la pression démographique s'accroît chaque jour. Même si l'érosion en nappe n'est pas toujours très visible, son impact apparaît au niveau de la diminution des rendements des cultures. Les sols cultivés restent nus depuis la récolte et sont livrés sans protection à l'agressivité des pluies. Sur les pentes érodées, les horizons de surface sont souvent complètement décapés en une génération. Ce n'est qu'à partir du mois de novembre que les sols sont labourés et au mois de janvier que certaines cultures commencent à couvrir suffisamment le sol. Le mode de gestion des terres est le facteur le plus important où l'homme peut intervenir pour protéger et améliorer la productivité des ressources en eau et en sol.

MATERIELS ET METHODES :

La zone d'étude est située dans le nord ouest algérien, dans les monts de Beni-Chougrane (fig. 1). Ces derniers sont très dégradés et sont l'un des meilleurs exemples du Tell occidental, tant pour la diversité des problèmes d'érosion du sol que pour la préservation et la valorisation des terres de montagnes, au vu de la diversité de leurs caractéristiques et des différentes réalisations dont ils ont fait l'objet.

Ces monts sont caractérisés par :

- un climat de type méditerranéen semi-aride : les pluies annuelles varient de 280 mm à 450 mm. Les pluies sont caractérisées par une irrégularité spatio-temporelle et par un régime de courte durée et à forte intensité ;
- un relief très escarpé et fortement disséqué, ayant un réseau de drainage très dense ;
- une lithologie caractérisée par des roches en majorité tendres. (marne et grès tendre) ;
- des formations végétales très dégradées, caractérisées par de faibles densités de recouvrement et de mauvaises conditions de régénération.

Si les facteurs naturels jouent un rôle important dans les processus érosifs et leurs conséquences sur la fertilité des sols, il n'en demeure pas moins que l'accélération de ces phénomènes dépend largement des formes de gestion et de l'utilisation de l'espace.

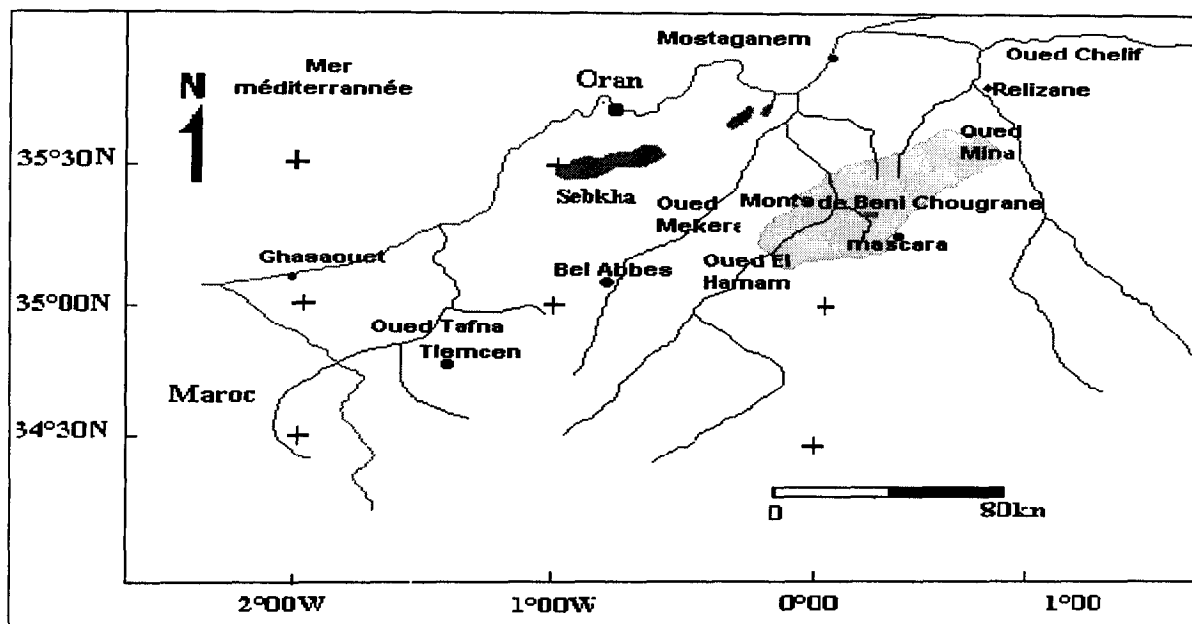


Fig. n°1 : Carte de situation des Monts de Beni Chougrane

Les expérimentations ont été menées sur deux types de sol, les plus représentatifs des montagnes méditerranéennes d'Algérie du nord ouest : un sol brun calcaire vertique argileux sur marne (SBA) et un sol brun calcaire limoneux sur grès (SBL).

Ces sols sont riches en calcaire. Le complexe adsorbant est saturé et dominé par le calcium et le magnésium. Le taux des matières organiques est faible et décroît de la surface vers la profondeur. Le rapport C/N, montre une bonne évolution des M.O.(tab. n°1). Ces sols sont très remaniés et fréquemment érodés.

Tableau 1: Principales caractéristiques analytiques des sols

Sol	sol brun calcaire limoneux		Sol brun calcaire argileux	
	0-15	15-45	0-15	15-45
Profondeur en cm	0-15	15-45	0-15	15-45
Calcaire total%	25.2	32.5	19.60	24.5
Argile%	17.2	16.1	57.1	57.2
Limons totaux%	56.2	60.4	32.6	33.1
Sables totaux%	25.8	23.3	10.1	9.1
Densité apparente	1.5	1.6	1.3	1.5
IS.	2 à 3		0.4 à 0.8	
M.O %	1.79	1.2	2.0	1.8
CO%	1.06	0.7	1.1	1.08
C/N	10.7	9.8	12.3	11.2
Azote total %	0.09	0.08	0.11	0.12
P2O5 (Olsen) ppm	10	4	13	6
pH eau	7.5	7.6	8.2	8.1
Complexe absorbant Ca++	22.3	24.2	28.4	26.4
méq/100g de terre Mg++	2.8	2.7	10.6	9.4
K+	0.9	0.8	1.1	1.0
Na+	0.3	0.3	0.2	0.2

L'approche méthodologique repose sur l'analyse du ruissellement, de l'érosion et de la dynamique du carbone au niveau des parcelles expérimentales de cent mètres carré de type Wischmeier (1978).

Dix parcelles d'érosion furent installées en 1993, dans le cadre d'un projet INRF-IRD (ex ORSTOM) : cinq sur SBL et les autres sur SBA. Le dispositif permet d'analyser l'effet des systèmes de gestion du sol, les plus fréquents : jachère nue labourée, cultures vivrières et jachères pâturées ou en défens, sur les risques de ruissellement et d'érosion et sur la dynamique du carbone. Les systèmes de gestion analysés sont les suivants :

- sol cultivé en céréale (PC) sur SBL (orge) et SBA (blé).
- sol cultivé en petit pois avec billons (PPP) sur SBL.
- sol cultivé en pois chiche (PPC) sur SBA.
- sol en jachère non travaillée et pâturée (JP) sur SBA et SBL, ressemblant au sol nu.
- sol en jachère protégée est laissé sans intervention particulière (JNP) sur SBL et avec une amélioration par une légumineuse sur SBA (système de gestion rare).
- sol nu : un témoin international appelé parcelle standard qui représente une jachère nue, travaillée durant toute l'année, correspond aux normes de Wischmeier (1978).

Les parcelles sur lesquelles a été menée l'étude, ont été installées au milieu d'un versant rectiligne sur une pente de 20% pour SBL et de 40% sur SBA.

Le ruissellement et les pertes en terre ont été mesurés après chaque pluie sur un dispositif composé de trois cuves en série, reliées par un partiteur. Les pertes en terre englobent les suspensions et les sédiments lourds.

Pour l'évaluation des stocks du carbone organique du sol, des prélèvements d'échantillons moyens (8 prélèvements pour chaque parcelle) pour deux épaisseurs de sol (0-10 et 0-30 cm) ont été effectués à la fin de l'été (septembre). Le Carbone organique (Co) est déterminé par la méthode de Anne.

Pour connaître les pertes en Co par érosion, des prélèvements ont été effectués sur les sédiments (les terres de fond dans la première cuve) et les suspensions (un échantillon d'un litre est prélevé de la 2ème ou la 3ème cuve, après homogénéisation de l'eau de ruissellement). L'analyse des échantillons a été centrée sur la détermination du carbone organique (Méthode Anne) et des nutriments (non abordés ici).

RESULTATS ET DISCUSSIONS :

Précipitations

Les précipitations durant ces cinq années sont déficitaires en général, 70 % des pluies ont une hauteur inférieure à 10 mm. Dans cette région, la pluviométrie est de l'ordre de 450 mm, mais elle a été très déficitaire durant ces cinq années de mesure (tab. n°2). Toute la région a connu des années pluviales déficitaires de 60 à 280 mm par rapport aux moyennes sur trente ans (Roose et al, 1993). La répartition des pluies est extrêmement variable d'une année à une autre. Les précipitations mensuelles sont également très irrégulières et concentrées sur quelques jours des mois les plus pluvieux, laissant apparaître des périodes sèches au cours de la saison pluvieuse.

Ruissellement

Le coefficient de ruissellement moyen annuel (Kram) fut modéré durant les cinq années de mesure : 4 à 6,5 % sur sol nu, 1,5 à 2% sur sol cultivé et 1,7 à 3,5% sur sol en jachère (tableaux 2 et 3). Par contre le ruissellement maximum (Kmax) a atteint des valeurs relativement élevées (32,3% sur sol nu et 5 à 25 % sous jachères). Le ruissellement provenant des versants peut atteindre 50 à 80% durant les averses exceptionnelles tombant sur les terres battues ou saturées (Roose et al, 1993)

Tableau 2: Effet des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion sous Pluies naturelles sur sol brun limoneux , pente 20% (1993-98).

Campagne	Pluie	Kram %					KRMAX %					Perte en terre (t/ha/an)				
		PS	JNP	PC	PPP	PJP	PS	JNP	PC	PPP	PJP	PS	JNP	PC	PPP	PJP
93-94	242	6.4	4.2	2.3	2.5	4.3	26.6	25.7	12.7	8.0	25.2	2.5	1.4	0.7	0.7	1.2
94-95	320	6.9	3.6	3.4	1.9	4.8	28.1	15.8	12.5	10.1	25.0	3.5	0.2	0.4	0.4	0.4
95-96	470	7.6	1.7	1.9	2.5	3.3	32.3	10.2	13.1	11.0	22.0	8.5	0.5	0.8	0.6	1.6
96-97	240	6.2	2.4	1.9	1.6	3.8	27.3	10.5	8.5	10.1	18.5	5.4	0.5	0.8	0.1	0.8
97-98	259	5.3	1.6	1.5	1.6	3.3	25.9	5.0	5.1	4.5	16.2	9.2	0.5	0.8	0.7	0.8

Tableau 3 : Effet des systèmes de gestion sur le ruissellement et l'érosion sous pluies Naturelles sur un sol brun argileux, pente 40%, (1993-98).

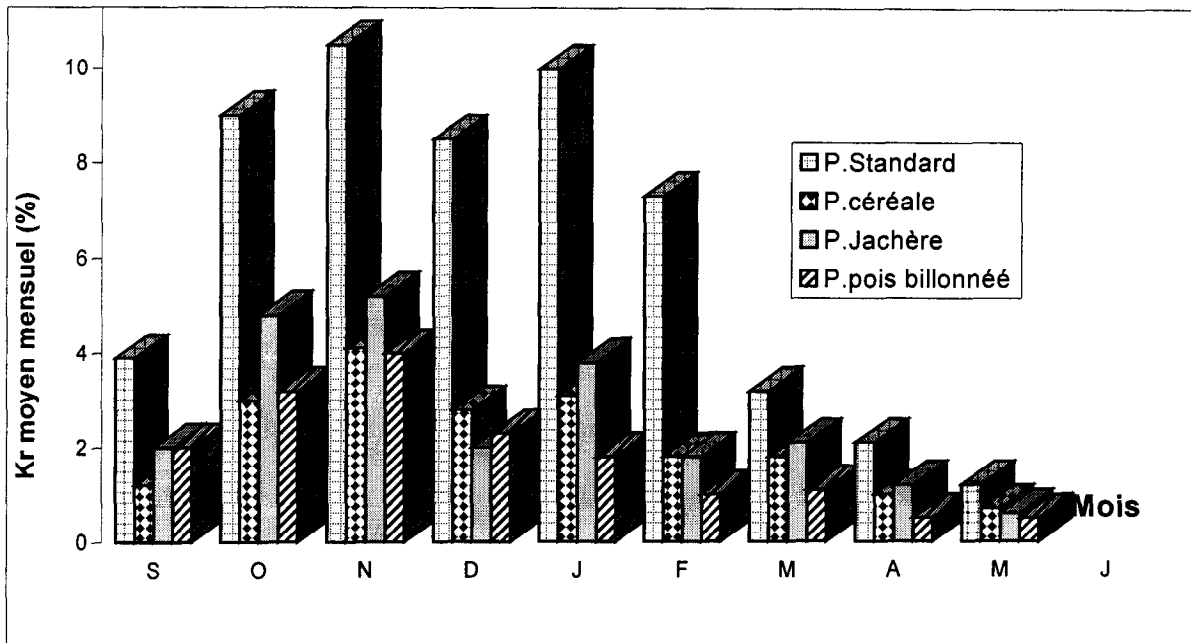
Campagne	Pluie Mm	Kram %					KRMAX %					Perte en terre t/ha/an				
		PS	JNP	PPC	PC	PJP	PS	JNP	PPC	PC	PJP	PS	JNP	PPC	PC	PJP
93-94	242	2.6	1.3	1.6	0.6	1.3	18.3	6.3	15.2	3.4	6.5	1.5	0.6	0.8	0.4	0.4
94-95	320	6.5	3.3	3.5	3.0	3.0	30.3	22.3	23.5	22.2	22.1	2.6	0.7	2.1	0.8	1.0
95-96	470	4.8	1.6	2.5	1.3	2.4	32.6	9.8	9.5	6.9	11.2	6.8	0.6	1.1	1.1	1.2
96-97	240	2.7	1.4	1.5	1.1	1.9	13.7	5.8	4.1	3.8	8.7	3.2	0.6	1.7	1.3	1.1
97-98	259	2.6	1.1	1.6	1.1	1.9	10.3	8.3	7.5	4.2	8.6	6.0	0.4	1.4	1.0	1.1

Les pluies qui ont entraîné du ruissellement sur la parcelle nue standard (PS), représentent 65% du nombre total des averses. Le ruissellement peut se déclencher même pour des pluies de hauteur ou d'intensité très faible lorsque les pluies sont consécutives et les sols engorgés. Une pluie de 2 mm a pu déclencher un ruissellement de 6 %. Ceci montre l'influence de l'humidité préalable du sol et de l'état de surface (sol totalement fermé et lisse). Les pluies fines de faible intensité, permettent une certaine infiltration et un risque de ruissellement moindre.

Le ruissellement (K_{ram} ou K_{rmax}) a été relativement faible durant les cinq années de mesures sur les parcelles cultivées (PC) et jachères protégées (JNP). La parcelle traitée en billons (PPP), s'est comportée, au début de la saison des pluies, comme la parcelle nue (PS). Mais depuis la réalisation des billons en janvier, la différence est très significative tant pour le ruissellement que pour l'érosion : le micro relief piège les sédiments et améliore l'infiltration. Lors d'une pluie saturante de 75 mm, les billons ont été rompus : les phénomènes érosifs ont alors été accentués. Les billons doivent donc être entretenus et les croûtes de battance détruites dès que possible.

Les taux de ruissellement les plus élevés ont été enregistrés entre octobre et février (fig.n°2), période où les conditions optimales de ruissellement sont réunies (pluies abondantes et relativement intenses, sol nu, croûte de battance...).

Figure 2. Variation mensuelle du ruissellement sur divers systèmes de gestion des cultures sur un sol brun calcaire limoneux sur grès (1993-98).



Au début de la saison pluvieuse, la différence est peu importante entre les différents traitements : le terrain est donc homogène. Ce n'est que lorsque le sol est labouré et que la culture ou les herbes commencent à couvrir le sol, que la différence de ruissellement devient nette. L'évolution du couvert végétal durant la saison des pluies et son interaction avec les techniques culturales influencent l'aptitude du sol au ruissellement et à l'érosion. Ces observations ont été confirmées par les résultats obtenus sous pluies simulées (Morsli et al, 2001).

Les pertes en terre

Les résultats montrent que l'érosion en nappe varie de 6 (SBL) à 4 t/ha/an (SBA) sur sol nu, de 0.4 à 1.3 t/ha/an sur les sols cultivés et de 0.2 à 1.4 t/ha/an sur sol en jachère. En région méditerranéenne, l'érosion en nappe reste modeste étant donné la richesse de la surface du sol en argile et en calcaire (Roose et al, 1993, Kouri, 1994). Les taux les plus élevés sont

enregistrés en automne. Le ruissellement et l'érosion sont plus élevés sur un sol nu que sur un sol cultivé. L'érosion est relativement faible sur jachère non pâturée où le taux de couverture permanente du sol est élevé. Les pertes en terre sont généralement liées aux fortes pluies, à la faible couverture végétale et à l'encroûtement de la surface du sol.

L'analyse des facteurs d'érosion et les résultats obtenus montrent que la coïncidence entre l'érosivité maximum des pluies et fragilité maximum du milieu cultivé s'observe principalement au début de la saison pluvieuse. Globalement, ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par Roose et al, (1993), Gomer, (1992) en Algérie et aussi Laouina et al, (2000) et Mouffadal, (2002) au Maroc.

Ces mesures d'érosion sur parcelles expérimentales de 100 m² sur les sols représentatifs des montagnes méditerranéennes du nord ouest de l'Algérie, confirment l'hypothèse défendue par Heusch, (1970) et Demmak, (1982), selon laquelle l'érosion en nappe sur les versants n'apporte qu'une petite contribution (0,2 à 10 t/ha/an) aux sédiments transportés par les oueds. Cependant, le ruissellement provenant des versants peut atteindre 32 à 80% durant les averses exceptionnelles tombant sur des terres compactées, engorgées ou encroûtées.

L'érosion dangereuse est due principalement au ruissellement exceptionnel. Ce dernier creuse les ravines, augmente les débits de pointe des oueds et provoque les glissements, l'érosion des berges et l'envasement rapide des barrages (Roose et al, 2000). Ce ruissellement est souvent favorisé par certains facteurs écologiques du milieu tel que les états de surface du sol, le couvert végétal, l'humidité préalable et la topographie.

La relation entre ruissellement et érosion n'est pas stable durant l'année (Meddi et al, 2001). On a observé de forts coefficients de corrélation entre le ruissellement ou l'érosion et divers paramètres explicatifs en séparant les données en fonction des saisons (tableau II.).

Tableau 4 : Relations entre l'érosion, la lame d'eau écoulée et les facteurs explicatifs.

Saison	Expression	Coefficient de corrélation (R)
Automne	$Lr=0.29P-2.06$	0.97
	$E=471.9P^{0.25} - 6.4431$	0.90
	$E= 244.65\text{Log.}(Lr)+309.91$	0.84
Hiver	$Lr=0.11P+0.041 \text{ IPA}-0.64$	0.92
	$E=64.25P-4.53 \text{ IPA}-2.04$	0.88
	$E=64.25Lr+1.45 \text{ IPA}+33.02$	0.95
Printemps	$Lr=0.12P+0.031 \text{ IPA}-0.42$	0.98
	$E=3.42P+53.3$	0.69
	$E=31.69Lr+72.26$	0.77

P : la pluie en mm ; I : l'intensité moyenne de la pluie en mm/h ; Lr : la lame d'eau ruisselée ; E : l'érosion en kg/ha ; IPA : l'indice représentant l'état d'humidité du sol (pluie des cinq jours précédant le jour considéré).

Même si les pertes en terre restent en général modérées par rapport aux seuils de tolérance admis (2 à 12 t/ha/an), cette érosion en nappe élimine continuellement la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol qui reste la source essentielle de la fertilité. Ceci modifie profondément les stocks du carbone et la dynamique de l'eau au niveau des horizons superficiels.

Stocks de carbone du sol et pertes par érosion

Le sol constitue le plus grand réservoir superficiel du Co (Cerri, 2002) et apparaît ainsi comme potentiellement important dans le contrôle des stocks et des flux du carbone. Les matières organiques des sols jouent un rôle prépondérant dans la fertilité des sols et dans la réduction du gaz à effet de serre en tant que source ou puit de carbone vis-à-vis de l'atmosphère (Hien, 2002) Donc, toute modification de l'usage des sols peut entraîner des changements des stocks. Les terres du Maghreb font l'objet de modifications majeures d'usage des sols (Coelho, 2002) et en particulier celles de l'Algérie. Le but de cette étude est l'évaluation de l'influence des systèmes de gestion traditionnels et améliorés sur la dynamique du carbone.

L'étude pédologique (MORSLI, 1996) du micro bassin où sont installées les parcelles d'érosion, a montré une grande variabilité spatiale du carbone organique du sol (SOC). La teneur du SOC, sur les différents types de sol, varie de 0,5 à 1,9 % sur l'horizon de surface. Cette variabilité est liée généralement à la biomasse, à un degré moindre à la texture ($r = 0,65$) et surtout à la position dans le paysage : en pente, les teneurs sont de l'ordre de 1%, dans les replats et les bas fonds où on peut rencontrer même des sols enfouis, le % de C peut dépasser 3%.

Les propriétés physiques du sol telles que la stabilité structurale ($0,4 < IS < 4$) et la densité apparente de l'horizon de surface ($1,3 < da < 1,7$) sont liées au taux de carbone organique ($r = 0,65$ pour Is et $r = -0,55$ pour da).

Les teneurs en carbone organique dans les dix premiers cm pour les deux types de sols étudiés, en 1993, étaient de 1,04% sur le SBL et de 1,07% sur SBA. Ces faibles taux s'expliquent en grande partie par l'exploitation minière par les cultures et par l'érosion du sol.

Les teneurs en Co diminuent de la surface vers la profondeur. Cette diminution varie de 14 à 35 % en fonction des systèmes de gestion et des types de sols (Tab. 5). A l'horizon C, les teneurs décroissent jusqu'à 60%. Sur le sol brun limoneux, la diminution du taux de Co est assez brutale en profondeur, par contre dans le SBA, il décroît progressivement vers la base du profil : ceci serait dû au brassage constant des horizons par les mouvements verticaux. Les teneurs en Co sont plus élevées sur sol argileux que limoneux.

Tableau 5 . Teneurs en carbone organique (C %) sur 10 et 30 cm de profondeur du sol pour les différents systèmes de gestion (1995-96).

Profondeur	Sol brun limoneux pente : 20%					Sol brun argileux pente : 40%				
	PS	PC	PP	PJP	PJNP	PS	PC	PPC	PJP	PJNP
%C 0-10cm	1.00	1.03	1.03	1.03	1.23	1.02	1.16	1.10	1.13	1.23
%C 0-30cm	0.65	0.75	0.74	-	0.90	0.75	0.85	0.82	0.88	1.05

Evolution des stocks de carbone

Les stocks de carbone ont été évalués sur 10 cm et sur 30 cm de profondeur, sur les deux types de sols étudiés. Les stocks mesurés en 1998 sur 0 -10 cm étaient de 13,5 à 13,8

t/ha sur sol nu, de 14,7 à 17,6 t/ha sur sol cultivé et s'élevait à 18,9 t/ha sur jachère mise en défens. Les stocks diminuent de la surface vers la profondeur du sol.

Durant les cinq années de mesure, les stocks de Co ont diminué de 13 % pour SBL et de 15% pour SBA, sur sol nu et ont augmenté de 13 % pour SBA et de 20 % pour SBL, sur sol en jachère mise en défens (fig. 3 et 4). Dans les autres traitements (PC, PPP, JP, PPC), la variation des stocks est faible (± 5 %).

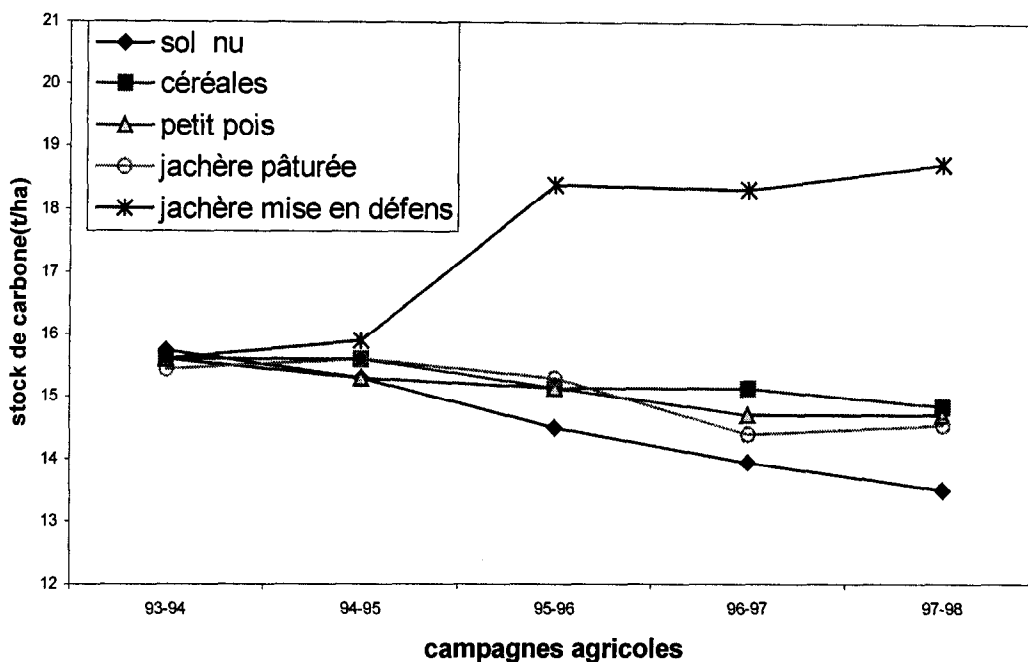


Figure 3. Evolution des stocks de carbone (0-10 cm) dans le temps en fonction des systèmes de gestion sur un sol brun calcaire limoneux (SBL)

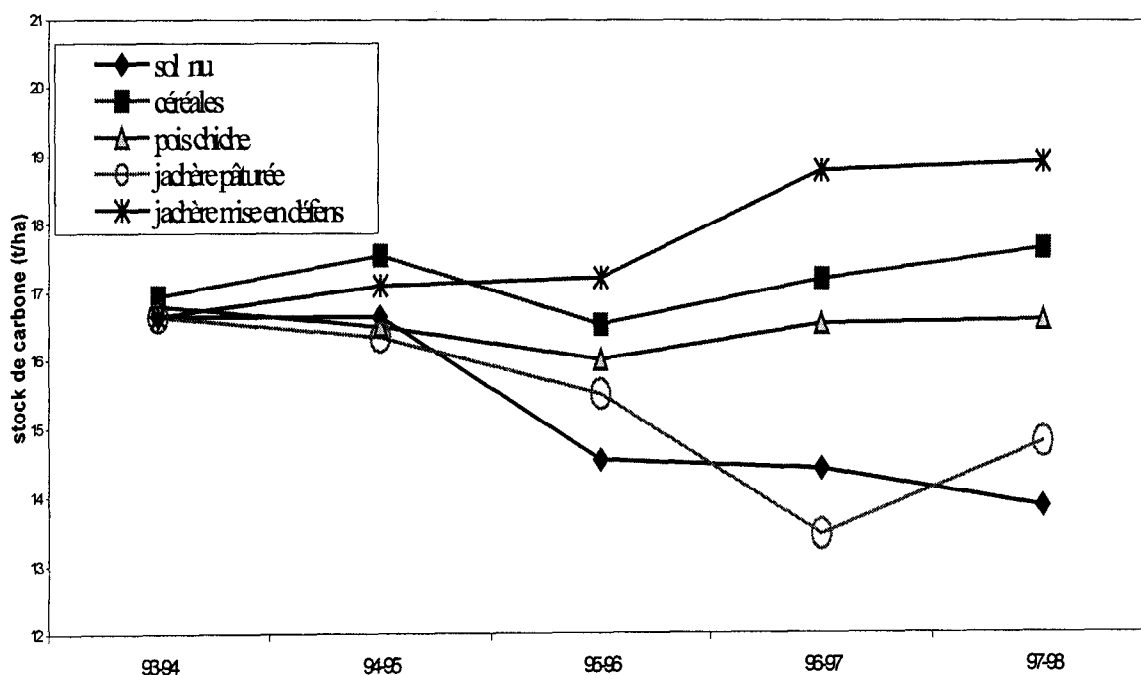


Figure 4. Evolution de stock de carbone (0-10cm) dans le temps en fonction des systèmes de gestion - sol brun calcaire vertique argileux (SBA) sur une pente de 40%.

Perte en carbone par érosion et indice de sélectivité

La perte de carbone par érosion en nappe sur forte pente, a varié en fonction des systèmes de gestion, de 95 à 136 kg/ha/an sous sol nu, de 17 à 41 kg/ha/an sous sol cultivé et de 19 à 41 kg/ha/an sous jachère pâturée et jachère mise en défens (table 6). Les pertes relativement élevées sur SBA sont dues à la forte pente (40%). Le système avec billons et les jachères mise en défens perdent moins de terre et de carbone que les autres cultures.

En outre du décapage de l'horizon de surface, l'érosion entraîne sélectivement le carbone (et les particules minérales fines). Les pertes sélectives en Co sont de 1.3 à 4 fois supérieures à celles auxquelles on pourrait s'attendre s'il n'y avait qu'un décapage du sol en place. La matière organique est la plus légère et par conséquent la première à être transportée en grande quantité par le ruissellement. Le bilan est généralement sous-estimé puisque on a pas pris en considération les éléments en solution dans les eaux de ruissellement.

L'indice de sélectivité du carbone (CER), varie selon le mode de gestion. Il varie de 1.3 à 1.6 % sur un sol nu, de 1.9 à 2.8 % sur un sol cultivé et de 2.4 à 4 % sur jachère (tab.6). Il est d'autant plus faible que l'érosion est élevée, les rigoles fréquentes et la pente forte.

Tableau 6 : Perte du carbone organique (C) par érosion en nappe en fonction des systèmes de gestion (1995-96).

Sol	Sol brun limoneux ; pente : 20%					Sol brun argileux ; pente : 40%				
	PS	PC	PP	PJP	PJNP	PS	PC	PP	PJP	PJNP
Traitements										
C% du sol de la parcelle	1.00	1.03	1.03	1.02	1.23	1.02	1.16	1.10	1.13	1.23
C% sur terre érodée	1.6	2.8	2.9	2.6	4.8	1.4	2.3	2.7	2.6	3.5
Pertes en C (kg/ha/an)	136	22.4	17.4	41.6	19.2	95.2	30.2	41.8	33.0	21.0
Indice de Sélectivité	1.6	2.7	2.8	2.6	4	1.3	1.9	2.4	2.3	2.8

Cette sélectivité est relativement plus élevée sur les parcelles en jachère protégée où la surface du sol est couverte par une mince litière. Cette dernière réduit la vitesse du ruissellement et par conséquent le transport est limité aux particules les plus légères de l'horizon de surface. Beaucoup de débris végétaux sont observés dans les sédiments de la parcelle sous jachère.

La granulométrie des sédiments révèle un entraînement préférentiel des particules les plus fines provenant probablement de la destruction des agrégats par le splash, surtout pour le sol brun limoneux (moins pentu). Le faible taux des M.O des sols ne fait qu'accentuer ce phénomène. Le taux argile + limons a augmenté de 10 à 20% sur les terres érodées. L'érosion entraîne la formation d'un voile de sable et de gravier à la surface du sol (Arabi et al, 2002). Ces résultats démontrent l'effet sélectif de l'érosion en nappe surtout sur un sol couvert et sur un sol limoneux.

Les pertes du C organique restent encore faibles par rapport aux stocks. La masse du C dans les sédiments est liée à la masse de terre érodée ($r = 0,65$). Par contre, la teneur en carbone des sédiments est peu liée à l'importance de l'érosion ($r = 0,25$). Les pertes en

carbone dépendent donc plus des volumes que des variations des teneurs au cours des saisons (Bep et al, 2002). Généralement, les grandes pertes de C ont lieu principalement lors des grandes averses où une grande perte en terre s'accompagne avec des teneurs moyennes à faibles en C. Les fortes teneurs correspondent généralement aux pluies non agressives et aux faibles pertes en terre.

A l'échelle de l'année, il y a une variation des teneurs au cours des saisons (fig. 5). En automne, les pertes en C sont plus importantes et même le CER est élevé lors des premières pluies d'automne du au balayage des matières organiques accumulées en surface : en 2001, lors d'un orage de 60 mm, des sédiments de 30cm d'épaisseur de 10 à 30 % de MO ont couvert de grandes superficies en aval d'un micro bassin versant dans les monts de Beni-Chougrane. De l'automne jusqu'au début de l'hiver, les eaux de ruissellement se distinguent par des turbidités élevées. En hiver les pertes en Co sont plus sélectives mais les flux totaux restent modérés en comparaison des flux observés en automne. Au printemps, les pertes sont moins importantes et moins sélectives. En automne, la plupart des systèmes de gestion étudiés favorisent l'érosion des sols avec un appauvrissement en surface d'éléments fins, riches en carbone organique.

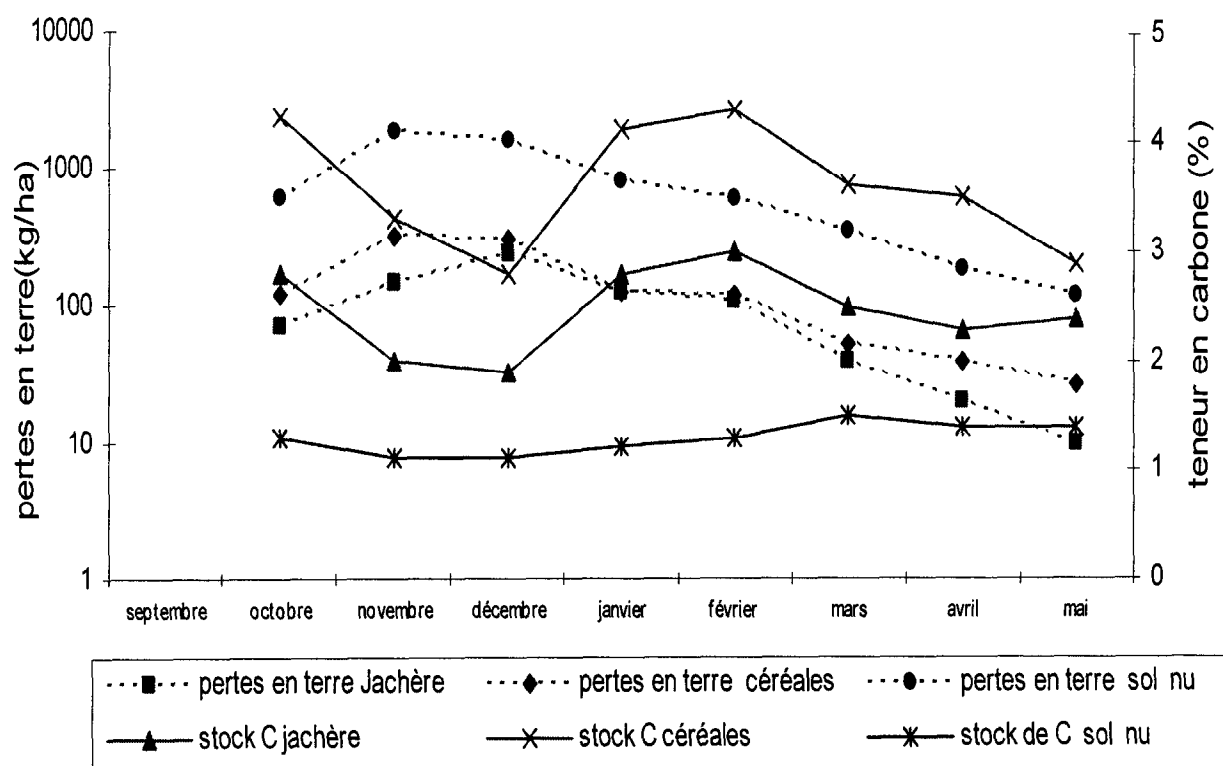


Fig. 5 : Variation des pertes de terre érodées et de leurs teneurs en carbone au cours des saisons

Les sols bruns limoneux (SBL) présentent un plus grand risque de dégradation que les bruns vertiques argileux (SBA). Ces derniers, par leur comportement particulier (gonflement et retrait) permettent un bon stockage de l'eau et du Co. Les eaux infiltrées par les fentes de retrait emportent vers les profondeurs des quantités appréciables de terre fine de la surface, riche en matière organique. Les sols bruns vertiques, pourraient constituer un puit efficace pour stocker le carbone.

Les terres de fond (TDF) constituent plus de 80 % des sédiments. Les MES exportées, qui ont traversé la cuve de sédimentation de fond, sont constituées en grande partie de limons fins, d'argile et de MO. Les concentrations en MES varient de 0.7 à 8 g/l et sont liées à l'agressivité des pluies. La teneur en C organique dans les MES varie de 2 à 8 % .

Les terres arrachées sont redistribuées dans les champs ou entraînées dans les talwegs. L'étude de la distribution des sols et des matières organiques (Morsli, 1996) a montré qu'une partie des matériaux érodés reste piégée sur le versant. La quantité de terre retenue sur le versant dépend des conditions topographiques et des modes de gestion des sols. Des dépôts importants sont observés dans les zones de ralentissement du ruissellement (replat, concavité, haies, talus...). L'érosion crée une redistribution de la fertilité des sols. D'après Lal (2002), une partie du C érodé au niveau des dépressions ou des talus est protégée et séquestrée. Une hétérogénéité des rendements s'observe d'ailleurs le long des toposéquences. Le relief apparaît donc, comme l'un des facteurs essentiels de la dynamique actuelle du carbone.

La compréhension de cette dynamique peut aider à mieux gérer cette hétérogénéité des potentialités du sol et à restaurer les stocks du Co dans le sol tant pour des questions de durabilité de l'exploitation agricole que pour des objectifs environnementaux plus larges.

Influence des systèmes de gestion

L'analyse des systèmes de gestion des sols a montré que l'exploitation continue et rationnelle des sols ne présente pas de grand risque érosif. C'est surtout les sols nus et /ou abandonnés et les jachères prolongées et pâturées qu'on observe les dommages les plus importants : diminution des stocks de Co du sol, augmentation du risque d'érosion et des pertes en Co. Généralement, un sol correctement cultivé présente moins de risque d'érosion qu'un sol nu, abandonné.

La jachère non pâturée ou améliorée réduit l'érosion jusqu'à 1/17 par rapport au sol nu et augmente les stocks en C de 20 %. Selon Tribak (1988), la jachère réduit efficacement l'érosion, cependant, elle ne reste pas sans effet négatif sur le ruissellement. Parfois il est possible de restaurer les sols au moindre coût en laissant faire la nature mais tout en la contrôlant. Une technique, comme la mise en défens a donné des résultats positifs sur la régénération et la production de biomasse. Elle est très pratiquée, ces dernières années, à grande échelle dans les parcours semi- arides algériens.

Le billonnage qui s'effectue sur plusieurs cultures semble efficace pour la gamme de pluies expérimentées. La parcelle billonnée est la moins érodée (Tab.6). Le travail minimum du sol et le billonnage sur les zones cultivées, de pente inférieure à 20%, ont une influence très marquée sur le risque de dégradation : ils retardent le déclenchement du ruissellement et augmentent l'infiltration. Mais, lors des fortes pluies (>60 mm) et en fortes pentes, les billons peuvent être rompus et donner naissance à des rigoles qui peuvent évoluer vers des ravineaux. Cette technique, si elle est bien entretenue et améliorée (billons isohypses, cloisonnés, micro-relief accentué...) peut diminuer considérablement le ruissellement et l'érosion et permet ainsi un bon stockage du carbone et de l'eau dans les sillons. Le billonnage isohypse est une technique très efficace dans la lutte anti-érosive sur pentes faibles (<10%) (Azontonde, 1996).

Les sols nus et les jachères pâturées présentent un grand risque pour le ruissellement. et les stocks en carbone, jusqu'à une diminution de 15 % de C. Le ruissellement est favorisé par une rugosité faible, une dominance des états fermés et une couverture végétale très faible.

CONCLUSION

Les mesures montrent que le ruissellement et l'érosion restent globalement faibles sur ces sols bruns sous pentes fortes. Seuls quelques événements pluviométriques exceptionnels sont à l'origine des dégradations spectaculaires. Ceci confirme les résultats déjà obtenus par de plusieurs auteurs en Afrique du Nord.

Cette érosion demeure modérée, mais elle altère fortement la mince pellicule organo-minérale de la surface du sol qui est la source essentielle de la fertilité. Les pertes de carbone organique varient de 17 à 136 kg/ha/an en fonction des systèmes de gestion et de type de sol.

Bien que l'érosion soit décapante, les analyses des terres érodées révèlent une sélectivité des l'érosion sur les particules fines et surtout le Co. Des quantités importantes de matière organique fraîche ont été transportées en particulier en automne. Les pertes en C, par érosion en nappe sont liées significativement à la masse des terres érodées et sont faibles par rapport aux stocks des dix premières cm du sol. Mais les pertes totales peuvent dépasser les 15% et le risque devient encore plus grand pour les sols peu profonds s'il n y a pas d'améliorations des pratiques de gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols.

Les systèmes de gestion traditionnels analysés, montrent que la culture continue des sols ne présente pas de grand risque comme celui des sols nus et/ou abandonnés et des jachères prolongées et pâturées. La culture en billons et la jachère mise en défens s'avèrent intéressantes à la fois pour la réduction de l'érosion et pour la production de la biomasse.

Les améliorations et les innovations (fertilisation, semences sélectionnées, arboriculture, agroforesterie, techniques culturales, etc...), introduites dans les systèmes de production traditionnels, dans le cadre des travaux de GCES, ont eu un effet appréciable sur la productivité (les rendements ont été multipliés par 2 à 4 fois sur parcelles améliorées), l'érosion et les stocks du carbone (augmentation jusqu'à 20% des stocks). De même, les techniques antiérosives (aménagement des ravines, cordons de pierres, plantations en courbe de niveau) expérimentées dans la zone ont montré leur efficacité dans la réduction de l'érosion et le piégeage des sédiments et du carbone.

Dans les zones où les travaux d'expérimentation sont avancés, la GCES a démontré qu'il est possible de développer la production (intensification et diversification) tout en conservant l'environnement (Arabi et Roose, 1992 ; Roose et al., 1993 ; Roose, 1994 ; Mazour, 2002 ; Hamoudi et al, 2003).

Actuellement, en Algérie où les terres font l'objet de modifications majeures d'usage des sols et de reconversion, les grands projets nationaux de développement rural s'appuient sur la logique de la GCES, celle du développement rural avec la participation des communautés rurales : les plantations arboricoles, l'améliorations des techniques culturales et de la gestion de l'eau, et même l'agroforesterie sont les actions les plus développées à l'échelle nationale.

Les solutions éventuelles pour freiner la dégradation des terres se situeraient surtout dans l'amélioration de la gestion de l'eau, facteur limitant, (billons, cuvettes, madjen, retenues collinaires, couverture du sol par les résidus de récolte), et de la production de la biomasse des sols (intensification et diversification des productions, arboriculture, agroforesterie, cultures couvrantes) avec le renforcement des techniques antiérosives (aménagement biologiques et mécanique des ravines et des versants : seuils, cordons en pierres, plantation en courbes de niveau, barrages semi-perméables).

Toutes les pratiques améliorant la croissance des cultures (engrais) et visant l'accumulation du carbone dans les sols cultivés de façon permanente, auront un effet positif sur la restauration des sols dégradés, la réduction de l'érosion et la séquestration du carbone.

Bibliographie

- Arabi M., et Roose E., 1992.** Water and soil fertility management (GCES). A new strategy to fight erosion in Algerian mountains. *In: 7th ISCO Conference Proc. Sydney*, 3, 3 : 341-347.
- Arabi M., et Roose E., 2002.** Influence des systèmes de production du sol sur l'érosion, le stock et les pertes en carbone en moyenne montagne méditerranéenne du NO de l'Algérie Résumés des actes du Coll. *Int « Gestion de la Biomasse, Erosion et Séquestration du Carbone »*, Montpellier, p.20.
- Azontonde A., 1996.** Dégradation et restauration des terres de barre au Bénin. *Cah.Orstom Pédol.* 28, 2 : 17-226
- Benchetrit M., 1972.** L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Paris, PFU, 126p.
- Bep Z. B., Boli Z. B. et Roose E., 2002.** Pertes de carbone par érosion hydrique et évolution des stocks de carbone sous rotation intensive coton / maïs sur des sols ferrugineux sableux du Nord Cameroun. Résumés des actes du Coll. *Intern gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone*, Montpellier , p.19.
- Cerri C., Moraes J C SA, Bernoux, M., 2002.** Influence du semis-direct sur la séquestration du carbone et l'érosion au Brésil. Résumés des actes du Coll. *Intern gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone*, Montpellier, p.98.
- Coelho C.A.O., Laouina, Ferreira, A.J.D., Regaya, K.Chaker, M., Nafaa, R., Naciri, R, Boulet, A., Carvalho, T., 2002.** The dynamics of land use changes in Moroccan and Tunisian sub-humid and semi-arid regions and the impact on erosion rates and overland flow generation. Résumés des actes du Coll. *Int. « Gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone »*, Montpellier , p.73.
- Gomer D., 1992 .** *Ecoulement et érosion dans des bassins versants à sols marneux sous climat semi-aride méditerranéen.* GTZ – ANRH 1992 ; 207 p.
- Demmak, A., 1982.** Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie Thèse de Doc. Ing. Paris VI, 323p.
- Hamoudi A., Morsli B., 2000.** Erosion et spécificité de l'agriculture de montagne réflexion sur la conservation et la gestion de l'eau et du sol au milieu montagneux. *Revue la Forêt Algérienne* 2003, 12 (04) : 18-25, .
- Heddadj D., 1997 .** La lutte contre l'érosion en Algérie. *Bull Réseau Erosion* 97 : 168 -175
- Heusch B., 1970.** L'érosion du Pré rif occidental : une étude quantitative de l'érosion hydrique. *Ann. De la recherche forestière du Maroc*, Tome 12, Rabat : 9-176
- Hien E., 2002 .** Effet de la déforestation et de l'érosion sur le statut organique du sol : cas d'un sol ferrugineux tropical sableux du SO du Burkina Fasso. Résumés des actes du Coll. *Int ; « Gestion de la Biomasse, Erosion et Séques. du Carbone »*, Montpellier , p .84.
- Kouri L., Vogt H. 1993.** Gully processes and types in Oued Mina basin, Algeria. Workshop " Soil Erosion in Semi-Arid Mediterranean Areas" October 28-30TH 1993, Taormina. European Society For Soil Conservation (ESSC). Centro Studi di Economica Applicata all Ingeneria (CSEI) Catania, Italy. Book of Abstracts p. 14.
- Laouina A, Nafaa R, Coelho C, Chaker M, Carvalho T, Boulet AN, Ferreira A., 2000.** "Gestion des eaux et des terres et phénomènes de dégradation dans les collines de Ksar El Kebir, Maroc ». *Bull Réseau Erosion* 20 : 256 -274.
- Lal Rattan 2002 .** Influence of soil erosion on carbon dynamics in the world. Abstracts Coll. *Int « Gestion de la Biomasse, Erosion et Séquestration du Carbone »*, Montpellier, p .7.
- Mazour M, Roose E., 2002.** Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans les bassins versants du Nord-ouest de l'Algérie. *Bull Réseau Erosion* 2002 ; 21 : 320 - 330.

- Meddi M., Morsli B., 2001.** Etude d'érosion et du ruissellement sur bassins versants expérimentaux dans les monts de Beni-Chougrane (Ouest d'Algérie). *Z.Gemorph.N.F.*, 45,4 : 443-452.
- Mouffadal K., 2002.** Les premiers résultats des parcelles de mesures des pertes en terre dans le bassin versant de Oued Nakhla dans le Rif occidental. *Bull Réseau Erosion* 2001 , 21 : 244 -254
- Morsli B., 1996 .** Caractérisation, distribution et susceptibilité des sols à l'érosion (cas des montagnes de Beni-Chougrane) Thèse de Magister INA, Alger, 170 p.
- Morsli B., Meddi M., Boukhari A., 2002 .** Etude de ruissellement et du transport solide sur parcelle expérimentale. Utilisation de la simulation des pluies. *Actes du Séminaire sur la gestion de l'eau*. Univ. Mascara Algérie,2002 : 80-88.
- Remini B., 2000 .**L'envasement des barrages. *Bull Réseau Erosion* 20 : 165 -171.
- Roose E., Arabi M., Brahmia K., Chebani R., Mazour M., Morsli B., 1993.** Recherche sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne *Cah.ORSTOM Pédol*, 28, 2: 289-307.
- Roose E., 1994.** Introduction à la GCES. *Bull.Pédologique* FAO, Rome , 70 : 420 p.
- Roose E., Chebbani R., Bourougaa L., 2000.** Ravinement en Algérie typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. *Sécheresse* , 11, 4 : 317 -26. .
- Tribak. A., 1988.** L'érosion du Prérif oriental : Contribution à l'étude de la dynamique actuelle dans quelques bassins prériefains au nord de Taza (Maroc).
Thèse Doc Univ. Joseph Fourier Grenoble, France, 258 p.
- Wischmeier WH, Smith DD., 1978 .** Predicting rainfall erosion losses. A Guide to soil conservation planning, Washington. USDA-ARS, Handbook 537 ; 58 p.