

11ème JOURNEES DU RESEAU EROSION
"L'environnement humain de l'érosion"
20 - 22 septembre 1994
ORSTOM / E.N.S. St. CLOUD-Université PARIS VII

L'EVALUATION ECONOMIQUE DES MESURES DE CES AU SAHEL¹

Jan de Graaff et Leo Stroosnijder

Université Agronomique de Wageningen;
Nieuwe Kanaal 11, 6709 PA Wageningen, Pays-Bas.

Résumé

Dans le cadre des évaluations économiques des mesures de conservation des eaux et du sol, on propose d'utiliser des méthodes et modèles existant pour déterminer les effets de ces mesures sur l'érosion et sur les bilans d'eau et d'éléments nutritifs et ensuite les effets des changements sur les rendements. Dans ce texte on présente des 'feuilles de calcul', y incluant ces bilans et effets, afin de calculer les bénéfices des mesures de CES. Un exemple concerne l'évaluation économique des cordons pierreux au Burkina Faso.

Mots-clés.

Erosion, évaluation économique, mesures anti-érosives, coûts-bénéfices, bilan d'eau, bilan d'éléments nutritifs.

1. Cette recherche, dans le cadre d'un projet de recherche sur l'évaluation économique de la conservation des eaux et du sol et du développement des bassins versants, est supportée par la Fondation néerlandaise pour l'avancement de la recherche tropicale (WOTRO).

L'analyse économique des mesures de CES

Les mesures de conservation des eaux et du sol (CES) ont premièrement pour but de réduire l'impact négatif de l'érosion, ce qui constitue surtout en pertes d'eau, et en pertes des éléments nutritifs et de la matière organique. L'érosion entraîne aussi des effets en aval, par exemple dû à la sédimentation et aux écoulements. Quand on ignore ces effets externes, les coûts d'établissement et de maintien des mesures doivent être compensés par les pertes de productivité évitées. Pour les mesures à long terme (diguettes, banquettes, cordons pierreux) elles concernent les pertes évitées pendant la durée de vie de ces mesures, c.a.d. une période de 10 - 15 ans.

Les effets des mesures de CES sont ici divisés en trois catégories, basés sur la manière dont les pertes de productivité sont réduites:

- en évitant la réduction de la zone enracinée
- en retenant l'eau
- en réduisant les pertes d'éléments nutritifs et de la matière organique

Chacun de ces trois aspects seront analysés séparément.

CES et la zone enracinée

Une méthode, disons traditionnelle, pour estimer les bénéfices à long terme des mesures CES attire l'attention sur la diminution de la zone enracinée (de Graaff, 1993). Cette méthode est basée sur l'hypothèse qu'il existe une certaine relation entre les rendements des cultures et la profondeur du sol. Il suffit de connaître la profondeur du sol actuel, le taux d'érosion annuel et les rendements moyens pour plusieurs profondeurs de sol. Les niveaux de profondeur les plus importants sont ceux pour lesquels le développement des racines est bloqué et les rendements commencent à baisser (D_m en Figure 1), et ceux pour lesquels on ne peut plus s'attendre à aucun rendement (D_z). Pour cette méthode, il faut un certain nombre d'analyses sur les cultures principales, afin d'estimer cette relation entre la profondeur du sol et les rendements dans des zones agro-écologiques homogènes (Gauchon, 1981).

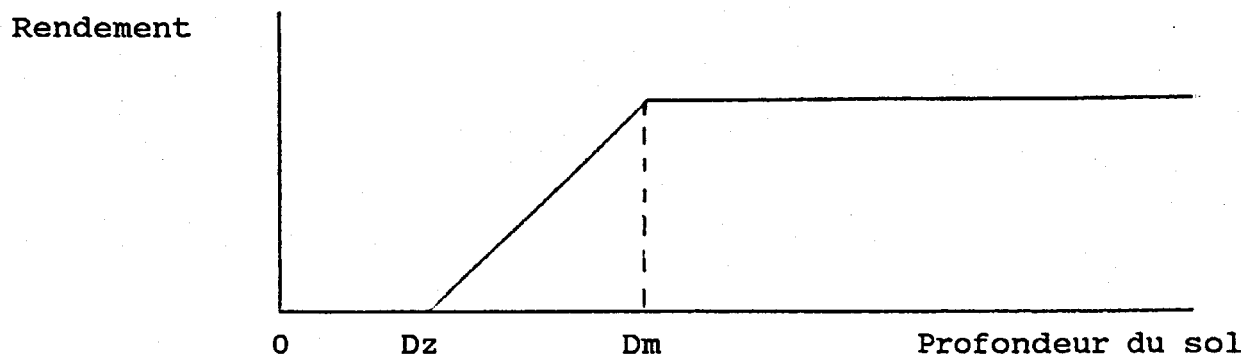


Figure 1. Relation simplifiée entre le rendement des cultures et la profondeur du sol, sur des sols exposés à l'érosion. (D_m est la profondeur minimale sans effet sur les rendements et D_z la profondeur sans aucun rendement: zéro).

Rendement/Revenues

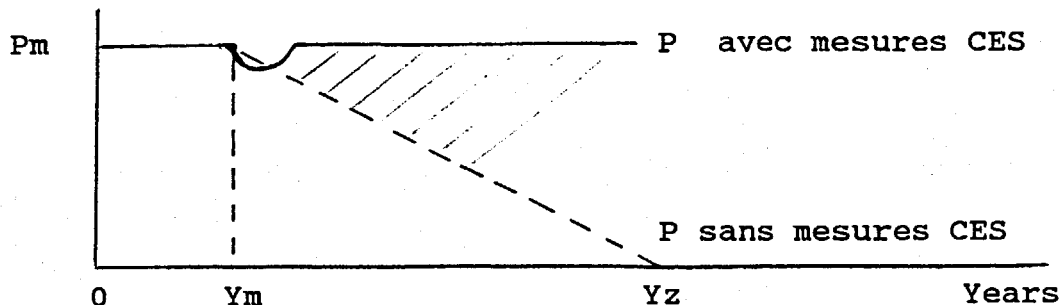


Figure 2. Production et revenus nets sur terre en pente, avec et sans mesures de CES.
(*Ym* est l'année où la profondeur *Dm* a été atteinte et *Yz* est l'année où il n'y a plus aucun rendement).

Avec cette méthode on suppose que les pertes physiques du sol constituent le facteur principal de la régression de la productivité. Quand il manque de la recherche sur l'érosion et sur les relations rendement-profondeur du sol on suppose souvent simplement que le déclin annuel des rendements constitue un certain pourcentage (par exemple 2 %). En ce qui concerne la situation avec des mesures de conservation, la méthode n'est pas très claire. On suppose que les rendements resteront constants, bien que l'on réalise que les rendements peuvent, après une baisse au début à cause des travaux, bien augmenter ensuite à cause d'une meilleure utilisation de l'eau et des éléments minéraux.

Ce sont surtout ces derniers effets (les pertes en eau et en éléments minéraux) qui déterminent le déclin ou la restauration de la productivité, suite à l'érosion et aux mesures de CES. Etant donné qu'on a déjà développé des méthodes et modèles pour déterminer les effets de changements des bilans d'eau et des bilans d'éléments nutritifs sur ces rendements (Stroosnijder et al, 1994), il faut mieux essayer d'utiliser ces méthodes dans l'évaluation économique des mesures de CES.

CES et le bilan d'eau.

Surtout dans les zones semi-arides avec leur pluviométrie limitée et aléatoire, le but des mesures de CES est de réduire l'impact des gouttes de pluie et d'augmenter l'infiltration d'eau dans le sol. Ainsi les plantes peuvent profiter d'une meilleure disponibilité d'eau. Pour déterminer l'efficacité des mesures de CES, on doit d'abord voir comment la mesure influence la disponibilité de l'eau pour la plante (bilan d'eau) et ensuite comment la plante réagit sur cette plus grande humidité ("response function"). Le bilan d'eau peut être décrit simplement comme: $P - R = ET + D + dS$, dont *P* constitue la pluviométrie, *R* le ruissellement (net), *ET* l'évapotranspiration, *D* la percolation (drainage) et *dS* le changement de l'eau stockée dans le profil enraciné.

On devra déterminer de manière quantitative, comment les mesures influencent les différents facteurs qui réduisent le ruissellement et augmentent l'infiltration. Après l'infiltration pas toute l'eau est disponible. Cette disponibilité dépend de la texture du sol. Withers et Vipond (1974) indiquent les valeurs moyennes suivantes (en mm par m de profondeur) pour la disponibilité d'eau pour les différents types de sols: Argileux 135 mm; Argilo-limoneux 150 mm; Sablo-argileux 120 mm Sableux 55 mm; Sableux fins 80 mm.

Les cultures réagissent sur un manque d'eau d'une manière indiquée par l'équation de Doorenbos et Kassam (1979):

$$1 - Y_a / Y_m = k_y (1 - E_{Ta} / E_{Tm}), \text{ dans laquelle}$$

Y_a et Y_m constituent les rendements actuel et maximal;
 E_{Ta} et E_{Tm} représentent l'évapotranspiration actuelle/maximale;
 k_y est le facteur de réaction ("yield response factor").

Ce facteur de réaction dépend de la culture et du stade de développement (Growing stage, GS) et dans beaucoup de cas est basé sur des expériences (Doorenbos et Kassam, 1979). Pour un certain climat, culture et période de croissance, l'évapotranspiration maximale est $(E_{Tm}) = K_c * E_{To}$. K_c est le coefficient de la culture (qui varie également par stade de développement) et E_{To} constitue l'évapotranspiration de référence et peut être calculée avec des données météorologiques. Des modèles de simulation de la croissance sont souvent utilisés pour analyser la réaction des cultures sur la (non-)disponibilité de l'eau. Mais dans le cadre de cette évaluation des activités de CES une méthode plus simple est envisagée. Une feuille de calcul ("spreadsheet") est développée afin de déterminer les périodes critiques de manque d'eau (souvent durant la floraison) et les réductions de rendements qui en sont le résultat.

Ensuite, on détermine à quel point les mesures de CES peuvent contribuer à une plus grande infiltration et peuvent réduire les manques d'eau et augmenter les rendements. On a besoin des données suivantes ("inputs"): la profondeur du sol enraciné et la disponibilité d'eau par mètre de profondeur qui, ensemble, déterminent la quantité maximale de l'eau disponible (SM_m); la pluviométrie (P) et un facteur de réduction pour l'interception et le ruissellement (de surface) afin de connaître la pluviométrie effective (P_{ef}); l'évapotranspiration de référence (E_{To}), et les facteurs K_c et K_y pour les cultures concernées pendant leurs stades de développement (GS), avec lesquelles on peut calculer la "reaction". La saison pour les cultures annuelles commence normalement au moment où la pluviométrie effective dépasse la moitié de l'évapotranspiration potentielle ($P > 0.5 * E_{Tm}$). Les calculs résultent ("output") des réductions (Y_{red} or $1 - Y_a / Y_m$) de rendements de référence (Y_{ref}).

A partir de la première période quand E_{Tm} dépasse P_{ef} (après la plantation), les déficiences accumulées en eau ($APWL$) sont présentées pour les périodes déficitaires qui suivent. Ensuite la disponibilité actuelle en eau (S_{Ma}) est calculée (Thorntwaite et Mather, 1955): $S_{Ma} = SM_m * \text{Exp}(-APWL / SM_m)$. L'évapotranspiration actuelle (E_{Ta}) est égale à E_{Tm} , quand il y a un surplus de pluie ($P_{ef} > E_{Tm}$), et est d'autrement égale à la pluviométrie effective moins le changement en eau dans le sol (dSM). Quand E_{Ta} est connue, on applique la méthode Doorenbos and Kassam (1979) afin de déterminer la réduction de rendement (Voir Figure 3 pour situation sans et avec mesures).

 Calculation of the water balance and yield reduction WITHOUT MEASURES

Location:Kaya Crops: Sorghum Prec:aver Runoff: Yref 100
 Burkina F Year: P>25:0.40 P Yact 82
 Soiltype Dept Sa SMm P<25:0.40 P Yp 81
 0.7 120 84 Mode: 2 (Sma does not reach SMm)

	P	Rof	Pef	GS	ETO	Kc	ETm	Psal	APWL	SMa	dSM	ETA	D	Ky	Yred
jan	0	0	0		187	0.1	9	-9	181	10	-1	1	0	0.0	0.00
feb	0	0	0		188	0.1	9	-9	190	9	-1	1	0	0.0	0.00
mar	0	0	0		216	0.1	11	-11	201	8	-1	1	0	0.0	0.00
apr	8	3	5		178	0.1	9	-4	205	7	-0	5	0	0.0	0.00
may	48	19	29	i	155	0.4	62	-33	239	5	-2	31	0	0.2	0.10
jun	105	42	63	d	136	0.7	95	-32	271	3	-2	65	0	0.6	0.19
jul	156	62	94	d	129	0.7	90	3	0	7	3	90	0	0.6	0.00
aug	214	86	128	m	116	1.1	128	1	0	7	1	128	0	0.5	0.00
sep	149	60	89	l	126	0.7	88	1	0	9	1	88	-0	0.2	0.00
oct	20	8	12		149	0.1	7	5	155	13	5	7	0	0.0	0.00
nov	0	0	0		165	0.1	8	-8	164	12	-1	1	0	0.0	0.00
dec	0	0	0		160	0.1	8	-8	172	11	-1	1	0	0.0	0.00
Tot	700	280	420		1905		525	-105				420	0	Peak	0.18

For mode 2: Psal pos: 10 APWLmin 155 APmax271
 Psal neg: 115 STmax 13 STmin 3

 Calculation of the water balance and yield reduction WITH MEASURES

Location:Kaya Crops: Sorghum Prec:aver Runoff: Yref 100
 Burkina F Year: P>25:0.15 P Yact 96
 Soiltype Dept Sa SMm P<25:0.15 P Yp 97
 0.7 120 84 Mode: 1 (Sma reaches SMm)

	P	Rof	Pef	GS	ETO	Kc	ETm	Psal	APWL	SMa	dSM	ETA	D	Ky	Yred
jan	0	0	0		187	0.1	9	-9	26	62	-7	7	0	0.0	0.00
feb	0	0	0		188	0.1	9	-9	35	55	-7	7	0	0.0	0.00
mar	0	0	0		216	0.1	11	-11	46	49	-7	7	0	0.0	0.00
apr	8	1	7		178	0.1	9	-2	48	47	-1	8	0	0.0	0.00
may	48	7	41	i	155	0.4	62	-21	69	37	-11	51	0	0.2	0.03
jun	105	16	89	d	136	0.7	95	-6	75	34	-3	92	0	0.6	0.02
jul	156	23	133	d	129	0.7	90	42	0	77	42	90	0	0.6	0.00
aug	214	32	182	m	116	1.1	128	54	0	84	7	128	47	0.5	0.00
sep	149	22	127	l	126	0.7	88	38	0	84	0	88	38	0.2	0.00
oct	20	3	17		149	0.1	7	10	0	84	0	7	10	0.0	0.00
nov	0	0	0		165	0.1	8	-8	8	76	-8	8	0	0.0	0.00
dec	0	0	0		160	0.1	8	-8	16	69	-7	7	0	0.0	0.00
Tot	700	105	595		1905		525	70				500	95	Peak	0.03

Growing stage (GS): Psal pos: 145
 i=intial; d=developing Psal neg: 75
 m=mid- & l=late season

Figure 3 Exemple pour calculer la disponibilité en eau (bilan d'eau) et la réduction des rendements ("yield response function"). (Texte en anglais)

CES et bilan d'éléments nutritifs.

Dans les zones semi-arides les agriculteurs enlèvent plus d'éléments nutritifs du sol qu'ils n'en remettent et ainsi l'épuisement chimique de la terre peut en soi être plus important que l'érosion, mais l'érosion contribue aussi à cette forme de dégradation ("soil mining", van der Pol, 1992).

Pour déterminer l'efficacité des mesures de CES pour améliorer ce bilan, on doit d'abord voir comment la mesure influence la disponibilité de nutriments pour les plantes (avec des bilans de nutriments) et ensuite comment la plante réagit sur cette plus grande disponibilité d'éléments nutritifs ("response function").

Stoorvogel and Smaling (1990) ont exécuté une étude sur les bilans des éléments nutritifs N, P et K en 1983, sur des sols cultivables dans 38 pays sub-sahariens. Chaque bilan d'un élément est constitué de plusieurs "input" (IN) et plusieurs "output" (OUT) catégories (Figure 4). Pour nos buts il faut déterminer ces bilans dans la situation sans et avec des mesures de CES, et ensuite voir la différence dans ces bilans.

Système agricole	
IN	OUT
1 Compost, fumier (Manu)	1 Résidus végétatifs (Resi)
2 Engrais (Fert)	2 Produits récoltés (Prod)
3 Déposition (Depo)	3 Pertes en gaz (Gase)
4 Fixation, etc (Fixa)	4 Erosion (Eros)
5 Sédimentation (Sedi)	5 "Leaching" (Leac)
Total IN (1-5) moins OUT (1-5) constitue le Bilan d'Elément	

Figure 4. Le flux d'éléments nutritifs dans un système agricole
Adapté de: Stoorvogel and Smaling, 1990.

La présence d'éléments nutritifs n'implique pas automatiquement que les plantes peuvent tous les absorber. Les éléments nutritifs se trouvent dans le sol, en formes diverses, dans un "pool" A avec des éléments nutritifs facilement disponibles pour les plantes; dans un "pool" B avec des éléments dans la matière organique; et un "pool" C, qui constitue la réserve minérale du sol (van der Pol, 1992).

Quand il s'agit d'engrais chimiques (pool A), on se réfère au "recovery fraction", pour indiquer quelle partie d'éléments fournis sera absorbée. Cette fraction peut varier entre 0.1 et 0.9, en fonction du type d'engrais, du mode d'application et des caractéristiques du sol (Lövenstein et al, 1993). Et dans les zones semi-arides, avec un niveau d'inputs très réduit, la relation entre l'absorption des éléments nutritifs et les rendements des cultures est linéaire: le "initial nutrient use efficiency" (INUE en produit récolté par kg d'élément nutritif fourni) peut être déduit pour l'azote en céréales avec l'équation (adapté de Lövenstein et al, 1993):

$$INUE = 1 / (N_{\text{grain}} + (W_{\text{paille}} / W_{\text{grain}}) * N_{\text{paille}})$$

dans lequel: N_{grain} et N_{paille} constitue la concentration en N minimale en grain et paille (à peu près 1 % et 0.4 % respectivement); W_{grain} and W_{paille} le poids sec (en kg/ha). Le Tableau 1 donne la teneur minimale et maximale en éléments nutritifs dans les produits et résidus exportés.

L'augmentation du rendement due à un kg d'azote retenu (d'engrais en pool A) sera égale à la multiplication du "recovery fraction" avec l' INUE (Centre for World Food Studies, 1985).

Mais dans les zones semi-arides, on utilise peu d'engrais et dans le sédiment retenu on trouve peu d'éléments dans le "pool A". Mais les mesures de CES permettent d'éviter la perte de matière organique du "pool B". De cette matière organique les éléments nutritifs sont fournis lentement par la minéralisation, avec une vitesse d'environ 2 % par an (Pieri, 1989).

Pour calculer un bilan, on a besoin des données suivantes: les quantités d'engrais et fumier appliquées, la conversion en éléments nutritifs purs, la pluviométrie moyenne annuelle pour estimer la déposition et le niveau de fixation d'azote. Dans cette étude les données et équations de Stoorvogel et Smaling (1990) sont utilisées, afin de déterminer les différents constituants du bilan.

Tandis que les pertes d'érosion peuvent être calculées avec l'équation RUSLE, la teneur en éléments nutritifs du sol érodé dépend du niveau de fertilité du sol. Au lieu de prendre des chiffres d'analyses pour chaque parcelle, Stoorvogel et Smaling (1990) ont catégorisé cette fertilité (inhérente) en trois classes. Pour l'azote la teneur varie de 0.05 % en classe 1 jusqu'à 0.20 % en classe 3.

Puisque les particules du sol les plus fines sont d'abord détachées et transportées, le sol normalement érodé contient plus d'éléments nutritifs et de matière organique que le sol original. Pour cela on doit estimer un facteur "d'enrichissement", qui est fixé ici à 2 pour les trois éléments nutritifs principaux.

Tableau 1. Teneur en éléments nutritifs dans les produits récoltés et les résidus.

	Produit récolté			Résidus (paille, etc)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O

	Teneur minimale et maximale (%)					
Maïs	0.9-2.2	0.16-0.8	0.2-0.6	0.4-1.4	0.04-0.4	0.4-2.4
Sorgho	1.0-3.2	0.13-0.6	0.2-0.7	0.3-1.2	0.05-0.3	0.8-2.8
Pommes d/T.	0.9-2.5	0.10-0.6	1.1-4.6	1.4-3.2	0.13-1.0	0.8 4.6
Cassava	0.2-0.9	0.08-0.2	0.3-1.4	0.5-1.8	0.09-0.5	0.4-1.8
Légumin.	2.5-5.8	0.25-0.7	0.7-2.2	1.0-2.9	0.06-0.3	0.8-3.5

Sources: Lövenstein et al, 1993.

La Figure 5 montre une feuille de calcul préparée pour l'exemple qui suit. Etant donné que l'utilisation d'engrais est minime, on n'utilise pas la formule d'INUE, mais on calcule la production future (colonne à droite) en fonction de l'épuisement du stock de la matière organique (partie gauche de la feuille).

Calculations with nutrient balances and response (N) WITH STONE BUNDS														
Country : Burkina F		Farm type: 3		Rainfall: 700 mm		Slope: 2 %								
Reg/site Kaya				Rain: uncertain										

Top soil charact:		Crops 1 2		Erosion		I n p u t s :								
Soiltype: S.loam		Sorghum n.a.		4 t/ha		FertN		Manu		Compost				
Fert. 1 class		Biom 5.3 Biom 0				Urea A/sul An.		Mix						
pH 6.0		Pr/Re 0.3 Pr/Re 0		N(F)0.05		3		400		100				
Depth 30 cm		Prod Resi Prod Resi		Enr 2.0		1.4		0 2.0		1.0				
Bulkd 1.5		Q kg 500 1500												
OrgM% 1.0		AvN% 1.5 0.4												
Ncont 5.0		MinN% 1.0 0.3						INE1 52.6		INE2 0				
Min% 2.0								Recov 0.4		Reco 0				
TotN 45 kg		Leg 0				Base 4.0		Yresp 21		Yres 0				

Miner. N from OM		Nutrient balance: - OUT + IN = Saldo										Saldo Prod		
Recov: 0.75		Oth. Prod Resi		Leac Gase		Eros Fert		Manu Depo		Fixa		futu		
StockN(OM) Min biom.												(kg)		
Year	2250	45.0	20.0	7.7	6.0	4.2	6.4	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-16	
1	2234	44.7	20.0	7.5	6.0	4.2	6.5	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-16	484
2	2218	44.4	20.0	7.2	6.0	4.3	6.5	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-16	469
3	2202	44.0	20.0	7.0	6.0	4.3	6.5	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-16	453
4	2186	43.7	20.0	6.7	6.0	4.3	6.5	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	438
5	2171	43.4	20.0	6.5	6.0	4.3	6.6	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	423
6	2155	43.1	20.0	6.3	6.0	4.3	6.6	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	408
7	2140	42.8	20.0	6.1	6.0	4.4	6.6	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	393
8	2125	42.5	20.0	5.8	6.0	4.4	6.6	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	378
9	2110	42.2	20.0	5.6	6.0	4.4	6.7	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-15	364
10	2096	41.9	20.0	5.4	6.0	4.4	6.7	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	350
11	2081	41.6	20.0	5.2	6.0	4.5	6.7	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	336
12	2067	41.3	20.0	5.0	6.0	4.5	6.7	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	322
13	2053	41.1	20.0	4.7	6.0	4.5	6.7	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	308
14	2039	40.8	20.0	4.5	6.0	4.5	6.8	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	295
15	2025	40.5	20.0	4.3	6.0	4.5	6.8	4.0	1.4	3.0	3.7	4.0	-14	281

Figure 5. Exemple de calcul de bilan d'éléments nutritifs (azote) et réaction sur les rendements (kg/ha). (Texte en anglais)

Analyse coûts-bénéfices des cordons pierreux au Burkina Faso.

Dans une grande partie de la zone sahélo-sudanaïenne en Afrique de l'Ouest, beaucoup d'efforts ont été faits pour réduire l'érosion afin d'éviter les pertes d'eau et du sol. Au Burkina Faso il s'agit surtout de la construction de cordons pierreux. A cause de la transportation des pierres les coûts sont souvent élevés et estimés en moyenne à FCFA 68,000 en ha in 1992 (de Graaff, 1993b). L'exemple se base sur une situation comme dans la Province de Sanmatenga, avec une pluviométrie moyenne de 700 mm et un sol sablo-argileux, moyennement profond (70 cm) et un horizon supérieur de 30 cm (Hoek et al, 1993). En utilisant l'équation RUSLE en combinaison avec les données de recherche sur l'érosion sur le Plateau Mossi, on a estimé que les cordons pierreux pourraient réduire l'érosion sur les pentes cultivées de 12 à 4 ton/ha.

Avec une profondeur de 70 cm on a déjà dépassé le point de Dm (Figure 1). Mais avec un taux d'érosion de 12 ton/ha, ou de 0.8 mm/ha par année, il faudra encore 500 ans avant que la zone enracinée ait atteint le niveau Dz, avec un rendement zéro. Aussi la zone enracinée en soi ne semble pas le facteur le plus limitant.

Le premier bilan d'eau dans la Figure 3 montre la situation sans mesures, dans laquelle il existe un manque d'eau au mois de juin. Ce manque d'eau pourra réduire les rendements d' à peu près 20 %, bien que ce manque d'eau se situe seulement au début du stade de développement. Avec des cordons pierreux ce manque d'eau sera presque éliminé. Suivant le bilan d'eau, CES n'influence pas beaucoup le rendement. Aussi il est invraisemblable que les agriculteurs veulent construire ces cordons pierreux seulement pour conserver l'eau, en se basant sur une année de pluviométrie moyenne. Mais en année de sécheresse l'augmentation de la disponibilité d'eau peut être significative.

La prochaine étape dans l'évaluation économique est de déterminer les effets des mesures sur la fertilité du sol. On ne respecte plus les périodes de jachère, on n'applique pas d'engrais et peu de fumier. Le taux de matière organique dans le sol est diminué jusqu'à 1%.

Tableau 2. Bilan d'azote¹ pour la production de sorgho dans les situations sans et avec cordons pierreux (kg N/ha).

Les facteurs dans le bilan: ²)											
	Fert	Manu	Depo	Fixa	Sedi	Prod	Resi	Leac	Gase	Eros	Solde
	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	=
I. <u>Situation sans cordons p.:</u>											
1	3	4	4	-	8	6	4	6	12	-	24
II. <u>Situation avec cordons p.:</u>											
1	3	4	4	-	8	6	4	6	4	-	16

1) Toute N disp. résulte de la minéralisation, donc de pool B.

2) Abréviations de: Fertilizers, manure, deposition, fixation, sedimentation; production, residue use, leaching, gaseous losses, erosion.

Le Tableau 2 montre un bilan d'azote pour la situation sans cordons pierreux et pour la situation avec cordons pierreux. Les chiffres du premier bilan (I) correspondent à ceux de Stoorvogel et Smaling (1990) pour la production céréalière dans les zones à pluviométrie basse et aléatoire au Burkina Faso.

Sur des terres surexploitées, appauvries, il est probable que ce sol érodé comme le sol original ne contienne que très peu d'éléments dans les "pool A". Avec les cordons pierreux on sauvegarde une couche de sol dont les éléments nutritifs ne peuvent être obtenus seulement qu'après la minéralisation de la matière organique ("pool B"). Due à cette minéralisation dans le sol retenu, le bilan N devient moins négatif (situation II dans Tableau 2: -16 au lieu de -24 kg/ha) et les rendements diminueront moins vite que dans la situation sans mesures. Donc, on ne peut pas attendre un effet spectaculaire (comme avec l'engrais) en conservant ces éléments. Mais l'effet est de longue haleine, parce qu'une quantité de sol retenue minéralise chaque année 2 % de sa matière organique (Stroosnijder, 1992). C'est pour cela que notre évaluation économique se situe sur une période assez longue de 15 ans, qui correspond à la durée de vie des cordons pierreux, bien entretenus.

En utilisant ces données sur les quantités d'éléments nutritifs retenues (ici comme exemple N seulement) sur la parcelle et les réactions des cultures sur cette disponibilité, on peut comparer coûts et bénéfices dans les tableaux de "cash flow" (Voir Figure 5 et Tableau 3). Sur une durée de 15 ans, le taux d'intérêt interne (IRR) est encore négatif, mais à partir de 18 ans le IRR devient positif.

Tableau 3. Tableau de "cash flow" pour la construction d'un ha de cordons pierreux (rendement initial de sorgho 500 kg/ha).

Coûts et Bénéfices:	Années:	0	1	2	3	4	15
Coûts de construction (FCFA 1000)		68					
Main-d'oeuvre pour maintenir les cordons (FCFA 1000)			2	2	2	2 ...	2
Rendement sans mesures CES (kg/ha)		476	453	430	407	...	174
Rendement avec mesures CES (kg/ha)		484	469	453	438	...	281
- Quand N seulement disponible après minéralisation graduelle:							
Quantité de N retenue (kg N)			8	8	8	7 ...	6
Réaction sur rendement (kg/ha)			8	16	23	31 ...	107
Valeur d'augmentation (FCFA 1000)		-	1	2	2	3 ...	9
Cash flow (FCFA 1000) (IRR = négative)		-68	-1	0	0	1 ...	7

On peut aussi utiliser la feuille de calcul pour analyser beaucoup de "scenario's", et par exemple pour déterminer combien d'engrais et/ou de matière organique il faut utiliser 'pour combler le trou'. On ne peut pas seulement ajouter 24 kg N sous forme d'engrais, parce que cela augmenterait directement la production ainsi que l'extraction. Sans mesures, il faut 175 kg d'urée par ha par an pour obtenir un bilan en équilibre (avec un rendement plus élevé de 750 kg/ha), et avec des cordons pierreux il faut seulement 130 kg d'urée par ha par an. Cette différence représente une valeur d'à peu près FCFA 6,750 par an en prix économique et FCFA 10,000 par an en prix financier. Mais avec une telle fertilisation le manque d'eau et la grande variabilité de la pluviométrie peuvent former les contraintes

an. Cette différence représente une valeur d'à peu près FCFA 6,750 par an en prix économique et FCFA 10,000 par an en prix financier. Mais avec une telle fertilisation le manque d'eau et la grande variabilité de la pluviométrie peuvent former les contraintes principales. On peut réutiliser la feuille de calcul 'bilan d'eau' pour le vérifier.

Discussion

En utilisant des bilans d'eau et des bilans d'éléments nutritifs on obtient une meilleure idée sur les vraies contraintes pour la production dans les zones semi-arides. Les feuilles de calcul permettent de vérifier rapidement ces contraintes et de faire des analyses de sensibilité. Et cela facilite l'évaluation économique des mesures de CES.

Il est clair que la construction de cordons pierreux en soi n'est pas une activité rentable et ne suffit pas pour une agriculture durable. C'est pour cela que maintenant beaucoup d'efforts sont faits pour initier d'autres activités afin d'améliorer la fertilité du sol (par exemple paillage, fosse fumière, etc). Mais il faut aller plus loin dans cette intensification en stimulant également l'usage des engrais.

Cette analyse explique pourquoi les agriculteurs hésitent à investir dans les cordons pierreux, mais semblent quand même contents de l'assistance reçue dans ce domaine. Ces mesures ont les avantages de garder dès la première année un peu plus d'eau, de diminuer le risque (avantages à court terme), et de former une condition préalable pour commencer une intensification à long terme.

References

- Bishop, J. and Allen, J., 1989. The on-site costs of soil erosion in Mali. Environmental working paper No 21. The World Bank, Washington, D.C.
- Centre for World Food Studies, 1985. Potential food production increases from fertilizer aid: a case study of Burkina Faso, Ghana and Kenya. Wageningen.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper No 33. FAO, Rome.
- Gauchon, M., 1980. Watershed management consultant's report for project FAO/JAM/78/006. Kingston, Jamaica.
- Graaff, J. de., 1993. Soil conservation and sustainable land use: an economic approach. Royal Tropical Institute, Amsterdam.
- Graaff, J. de., 1993b. The economic evaluation of soil and water conservation measures in Burkina Faso. In: Agriculture, economics, and sustainability in the Sahel. KIT, Amsterdam.
- Hoek, R. van der, Groot, A., Hottinga, F., Kessler, J.J. et Peters, H., 1993. Perspectives pour le développement soutenu des systèmes de production agrosylvopastorale au Sanmatenga, Burkina Faso. Université Agronomique, Wageningen.
- Lövenstein, H., Lantinga, E.A., Rabbinge, R. and van Keulen, H., 1993. Principles of theoretical production ecology. Lecture notes. Department of Theoretical Production Ecology, Agricultural University, Wageningen.

- Penning de Vries, F.W.T. & Djitèye (eds), 1982. La productivité des pâturages sahéliens; une étude des sols, des végétations et de l'exploitation de cette ressource naturelle. Agricultural Research Report 918, 525 p.
- Pieri, C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, Paris.
- Pol, F. van der, 1992. Soil mining; an unseen contributor to farm income in southern Mali. Bulletin 325. Royal Tropical Institute, Amsterdam.
- Roose, E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest; vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. ORSTOM, Paris.
- Stoorvogel, J.J. and E.M.A. Smaling, 1990. Assessment of nutrient depletion in Sub-saharan Africa: 1983-2000. The Winand Staring Centre, Wageningen.
- Stroosnijder, L., 1992. Désertification en Afrique sahélienne. Le Courier, No 133, p. 36-39. CEE, Bruxelles.
- Stroosnijder, L., Hoogmoed, W.B. and Berkhout, J.A.A., 1994. Modelling effects of water conservation tillage in the semi-arid tropics. In: Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale, p. 235 - 251. John Libbey, Paris.
- Thornthwaite, C.W. and Mather, J.R., 1955. The water balance. Drexel Institute of Technology. Centerton, New Jersey.
- Wischmeier, W.H and Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall-erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agr. Handbook No 537. Washington, D.C.
- Withers & Vipond, 1974. Irrigation, design and practice. B.T. Batsford Limited, London.