

Ruissellement et érosion d'un sol volcanique tropical cultivé en systèmes intensifs en Martinique

Bounmanh Khamsouk¹
Eric Roose²

¹ Société coopérative
des maraîchers (SOCOPMA)
Zone industrielle,
Place d'Armes,
97232 Lamentin,
Martinique
<khamsouk@wanadoo.fr>

² IRD Montpellier,
Avenue Agropolis,
BP 5045,
34032 Montpellier,
France
<Eric.Roose@mpl.ird.fr>

Résumé

Dans les Antilles françaises, les systèmes de culture (ananas, banane et canne à sucre) qui sont pratiqués intensivement sur des versants accidentés peuvent être sensibles à l'érosion hydrique en raison des pluies tropicales particulièrement agressives. C'est pourquoi une étude sur le terrain a testé l'influence de ces systèmes cultivés sur l'érosion du sol en Martinique. Celle-ci repose sur dix parcelles expérimentales cultivées (100-200 m²), situées sur un sol brun tropical volcanique, ou nitisol (classification FAO), présentant des pentes de 10, 25 et 40 %. Malgré des pluviosités annuelles différentes, les résultats de 1999 et 2000 sont comparables et permettent de distinguer le comportement des traitements testés face au ruissellement et à l'érosion. En effet, la plus grande partie des pertes en terre est due à une érosion concentrée, non sélective, dont l'écoulement évolue des rigoles aux fluages boueux quand la pente augmente. Mais quand les parcelles cultivées sont paillées par les résidus organiques de culture, le ruissellement et l'érosion deviennent très faibles, même sur de fortes pentes. Par conséquent, la lutte anti-érosive en culture intensive peut s'appuyer sur l'organisation du paillage qui permet de protéger efficacement le sol contre une érosion concentrée.

Mots clés : Science des sols ; Agronomie.

Summary

Runoff and erosion of a tropical volcanic soil (nitisol) cultivated in intensive crop systems in Martinique

In the French West Indies, intensive crop systems (banana, pineapple, sugarcane) in steep lands could seriously damage the soil by water erosion because of the strong tropical aggressiveness of the rainfall. So in Martinique, on a volcanic soil, or nitisol (FAO classification), a field study based on ten 100-200 m² runoff plots located on 10, 25 and 40% slopes was set up for assessing the effect of crop systems and slope on soil erosion. These runoff plots underwent the following mean treatments: during the years 1999 and 2000 on three 11, 25 and 40% slopes, three bare soils and three mulched sugar canes; on a mean 9% slope, a lasting banana plantation with mulched strips of crop residue, a conventional mechanised and furrowed pineapple and a superficial tillage pineapple with mulched strips. Parameters of rainfall, runoff and erosion are measured after each erosive episode. Other parameters linked to crop treatments (sheltering surface ratio and rill surface ratio) are monthly determined on the runoff plots. After two years of measurements, the first results are as follows. For the sheltering surface ratio, four situations are found: the bare soil with a weak sheltering surface ratio, the lasting banana plantation with a constant mulch, the mulched treatments with a full sheltering surface ratio and the conventional furrowed pineapple with a growing sheltering surface because of plant growth. Unlike cropped treatments where rills do not appear, the bare soils show that approximately 40% of the plot area are caused by rills due to great runoff activities. For runoff and erosion parameters, in spite of an average rainfall variation, the 1999 and 2000 results are fairly similar and they allow to distinguish the treatment behaviours, the runoff and soil loss processes. Indeed, the soil loss measured is not a selective linear erosion, which could turn from rill erosion into a creeping one when slope increases. On the other hand, when cultivated treatments are mulched by organic crop residues, runoff and soil loss are weak, even on steep slopes. So, a simple anti-erosion measure by mulched strips could protect the soil against rill erosion.

Key words: Soil sciences; Agronomy.

Dans les Antilles françaises, les sols volcaniques situés sur des versants accidentés sont devenus très prisés par les systèmes de cultures intensives en raison des fortes pressions foncières et démographiques. Souvent considérés comme très agrégés et très résistants à l'érosion, ces sols n'ont intéressé que très peu d'études expérimentales sur l'érosion comme l'a souligné un inventaire des travaux scientifiques en 1999 [1]. Pourtant, de récentes mesures sur un sol brun tropical volcanique cultivé en ananas, bananier et canne à sucre en Martinique ont montré qu'il est nécessaire de relativiser ces préjugés [2]. À cause de l'agressivité des pluies (tempêtes tropicales et cyclones) et du relief accidenté de l'île, l'érosion hydrique des sols volcaniques peut provoquer de gros dégâts tels que la dégradation des terres cultivées et la pollution des eaux douces. Ces répercussions sont d'autant plus dangereuses que les parcelles de ces systèmes intensifs, très imbriqués aux zones d'habitation, nécessitent souvent l'utilisation massive d'intrants. Par exemple, des études antérieures ont montré qu'en plantation bananière, les pertes chimiques dues à la fertilisation d'engrais sont liées à la répartition pluviométrique de l'île [3] ou encore que, sur un micro bassin-versant, la pollution des eaux de ruissellement due aux applications de pesticides, est liée elle aussi à la pluviosité [4]. Si de tels travaux expérimentaux ont souligné les risques de pollution chimique, peu ont abordé jusqu'à présent le domaine de l'érosion des sols. Cet article se propose donc de traiter le ruissellement et l'érosion d'un sol volcanique occupé par des systèmes de cultures locales (ananas, bananier et canne à sucre), puis d'apporter quelques éléments de décision pour une agriculture raisonnée, respectueuse de la conservation des ressources en sol.

Matériel et méthode

Description du site d'étude

Entourée par l'Océan Atlantique à l'est et par la mer des Caraïbes à l'ouest (latitudes : 14-16° N ; longitudes : 60-62° W), la Martinique est une île volcanique (1 080 km²) appartenant à l'archipel des Petites Antilles. Son relief est accidenté avec des montagnes volcaniques au nord et au sud séparées par de petites plaines. Le climat est tropical humide, caractérisé

par une pluviosité annuelle moyenne variant de 500 à 5 000 mm/an du sud au nord et par une température annuelle moyenne de 25 °C environ. Il y a deux saisons : le carême où la sécheresse peut sévir de janvier à juin, et l'hivernage où les pluies sont plus abondantes avec parfois des passages de tempêtes tropicales et de cyclones. La station d'étude se trouve dans la plantation « Rivière Lézarde » en région centrale de l'île. Le sol rencontré est du type sol brun à halloysite [5] ou nitisol (en classification FAO), dont les caractéristiques sont les suivantes : sol superficiel acide, peu dense, riche en argile et en matière organique et très résistant à la battance des pluies (tableau 1).

Parcelles expérimentales

Les processus d'érosion sont non seulement variables dans le temps, mais aussi dans l'espace [7]. Pour comprendre l'origine de l'érosion hydrique des sols cultivés, il est nécessaire de mesurer ses manifestations à l'aide de parcelles expérimentales de ruissellement et d'érosion décrites dans de nombreuses études références [8-11]. En comparaison avec d'autres méthodes d'étude de l'érosion, Hudson [12] souligne l'intérêt de ces parcelles pour estimer la perte en terre, montrer les dégâts conséquents ou encore déterminer un modèle de prédiction de l'érosion. C'est pourquoi de telles parcelles expérimentales qui intègrent les caractéristiques propres aux systèmes de culture (pratique culturale, densité des plants, effet des surfaces, etc.) ont été mises en place sur des versants acciden-

tés, dans la plantation « Rivière Lézarde ». Sur des pentes rectilignes longues de 20-25 m, ces parcelles expérimentales forment des surfaces rectangulaires fermées et cultivées qui débouchent à l'aval sur des cuves calibrées pour le stockage de l'eau et des sédiments [8-11]. La figure 1 montre un exemple de parcelle d'érosion portant un traitement cultivé en bananier. Ruissellement et érosion sont directement mesurés dans les cuves de stockage après chaque averse érosive. Ce dispositif permet une bonne précision (ruissellement à 0,01 mm près et érosion à 0,2 kilo près) pour la plupart des pluies (P < 200 mm) et une précision approximative (ruissellement à 10 mm près et perte en terre à 5 kilos près) pour les tempêtes (P > 200 mm).

Traitements testés

Durant deux années consécutives, 1999 et 2000, 10 parcelles de ruissellement (100 ou 200 m²) sont utilisées pour tester les traitements suivants soumis aux pluies naturelles.

– Le « sol nu » est le traitement standard permettant de déterminer le comportement du sol sous les averses érosives [8, 9]. Il y a trois parcelles en sol nu situées sur trois pentes à 11 % (Nu11), 25 % (Nu25) et 40 % (Nu40) : le sol est travaillé sur 20 cm, puis égalisé chaque année avant la campagne de mesure.

– La culture de la canne à sucre avec paillage de résidus de culture est un traitement proposé en jachère des systèmes intensifs pour réduire les risques d'érosion. Trois parcelles sont installées sur trois pentes à 11 % (Ca11), 25 % (Ca25) et

Tableau 1. Caractéristiques moyennes de la couche superficielle (0-20 cm) du sol brun à halloysite ou nitisol (FAO) d'origine volcanique.

Table 1. Mean characteristics of the superficial layer (0-20 cm depth) of the volcanic soil or nitisol (FAO).

	Caractéristiques
Classification FAO	Nitisol
Pentes (%)	10-40
Densité apparente (g/cm ³)	0,77-0,92
pH eau	4,9-5,7
Taux de sable (%)	16
Taux de limon (%)	16
Taux d'argile (%)	68
Taux de matière organique (%)	2,7-3,3
Indice d'érodibilité K*	0,08-0,1

* Selon le nomogramme de l'érodibilité [6].

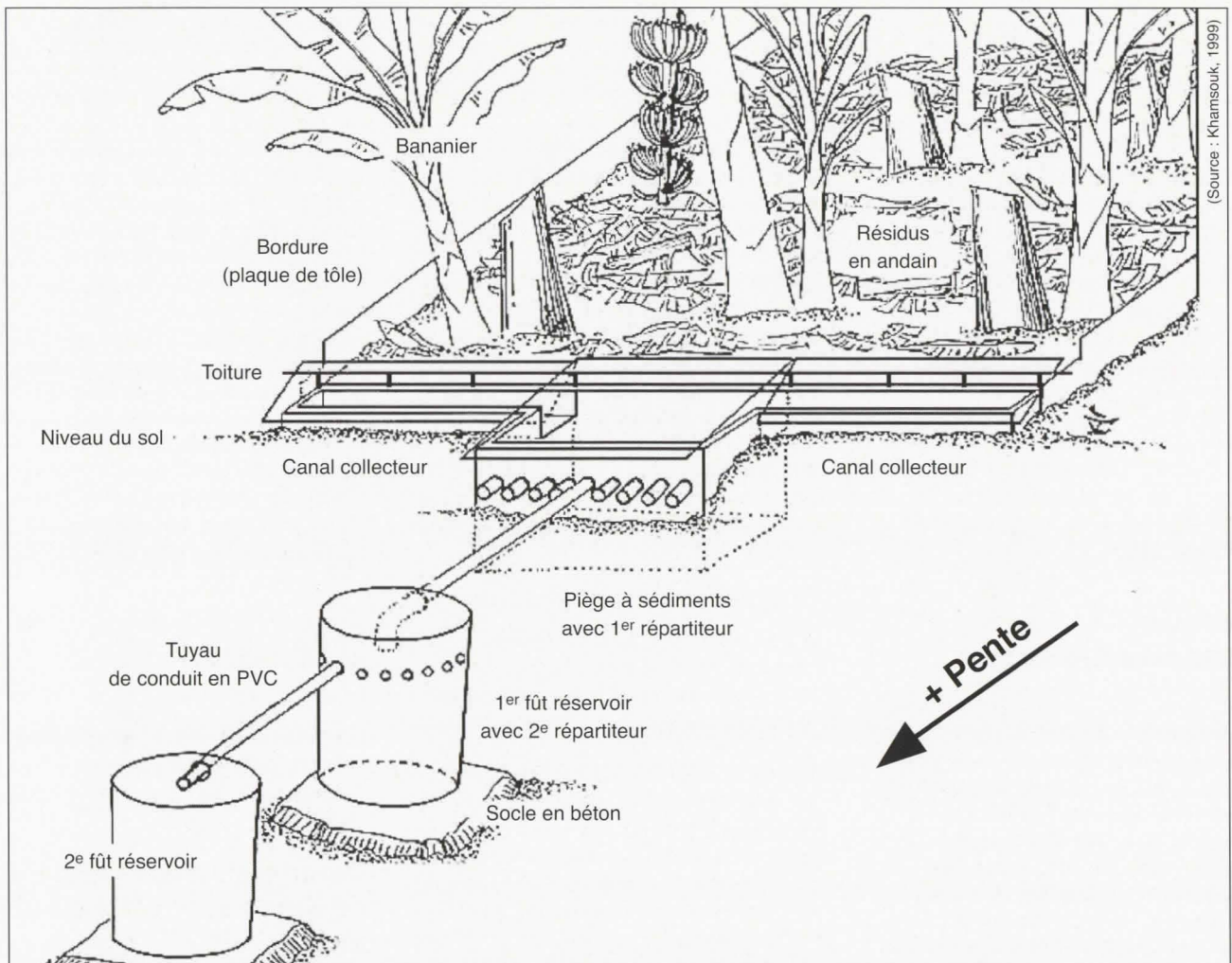


Figure 1. Exemple d'une parcelle d'érosion portant le traitement bananeraie « établie », avec un paillage des résidus en bandes perpendiculaires à la pente.

Figure 1. An example of runoff plot cultivated in the lasting banana plantation, with mulched strips.

40 % (Ca40) : les cannes sont plantées sur 13 lignes horizontales équidistantes de 1,5 m, avec un travail réduit du sol et un paillage des interlignes.

– La bananeraie « établie » est plantée depuis au moins deux ans et les résidus organiques sont mis en bandes de paillis perpendiculaires à la pente. Deux parcelles (à densité courante : 1 800 pieds/ha) sont mises en place sur des pentes voisines à 9 % (Ba9) et 11 % (Ba11) et aucun travail du sol n'a été réalisé durant les deux années de mesures.

– La culture de l'ananas mécanisée et billonnée dans le sens de la pente est un système intensif pratiqué chez les planteurs de l'île. Cette parcelle située sur une pente à 7 % (An7) a subi un travail du sol intensif avec enfouissement des résidus organique avant la plantation des ananas en sept rangs (densité : 42 500 pieds/ha).

– La culture de l'ananas planté à plat avec paillage des interlignes est un traitement inédit proposé en comparaison du traitement précédent. Cette parcelle se trouve sur une pente à 9 % (An9) et a nécessité un travail réduit du sol et un paillage des interlignes avant la plantation des ananas en sept rangs (densité : 40 000 pieds/ha).

Paramètres mesurés

Les trois paramètres pluie, ruissellement et érosion sont mesurés régulièrement.

La pluie se caractérise par sa hauteur d'eau, son intensité maximale en 30 minutes (mm/h) et son agressivité ($J/m^2/h$) établies d'après les données de la station météorologique automatique.

Le ruissellement peut se définir par deux paramètres : d'un côté, le coefficient de

ruissellement annuel moyen (Cram) qui correspond au rapport des hauteurs d'eau du ruissellement annuel sur la pluviosité annuelle et, de l'autre, le coefficient de ruissellement maximal (Cmax) qui représente le rapport des hauteurs d'eau entre ruissellement maximal et son averse.

L'érosion annuelle E (t/ha/an) est déterminée par le poids sec total des sédiments (éléments grossiers et particules en suspension) issus des épisodes érosifs. La proportion de particules en suspension (Susp %) dans la perte en terre totale permet de définir l'érosion hydrique. De plus, pour compléter la détermination de cette érosion sur les traitements sensibles, nous avons appliqué quatre tamisages standardisés à l'eau sur les sédiments érodés afin de déterminer le taux d'éléments grossiers ou macro-agrégats transportés (diamètre $D > 200 \mu m$).

D'autres paramètres liés aux caractéristiques des traitements testés sont mesurés mensuellement tels que les variations du taux de surface en rigoles (%) dues au ruissellement et celles du taux de surface couverte SC (%) par le paillage, le couvert végétal au ras du sol, les adventices, etc. Ces déterminations reposent sur le comptage mensuel de 400 points répartis le long des diagonales des parcelles et elles donnent des résultats satisfaisants, avec une précision à 10 % près [2, 13]. Il faut noter que nous ne traitons pas l'humidité du sol en raison de sa faible variation due à l'application de l'irrigation dans la station « Rivière Lézarde » durant la saison sèche.

Résultats

La pluviosité et ses caractéristiques

De 1978 à 2000, la pluviosité annuelle moyenne est de 2 420 mm/an et l'agressivité annuelle moyenne des pluies qui s'élève à 915 J/m²/h est caractéristique des climats tropicaux humides [8-10]. Les deux années de mesures ont des pluviosités distinctes : en effet, en saison des pluies 1999, ruissellement et perte en terre ont été essentiellement provoqués par trois tempêtes tropicales de 74 à 190 mm et d'intensité maximale de 37 à 76 mm/h en 30 minutes. Néanmoins, en l'absence de tempête tropicale, les risques d'érosion sont restés actifs durant la saison humide 2000 en raison de l'augmentation du nombre de petites pluies érosives.

Les paramètres de surface des traitements testés : rigoles et surface de couverture

Durant les deux années de mesures, il y a quatre situations distinctes dans l'évolution mensuelle des taux de surfaces couvertes SC (figure 2).

1) Les trois sols nus ont souvent un faible taux de couverture (soit moins de 15 % de la surface parcellaire) dû essentiellement aux cailloux et à la litière fine.

2) Les traitements paillés de cannes et d'ananas plantés à plat sont toujours couverts (plus de 60 % de la parcelle) par les résidus de culture mis dans les interlignes.

3) La bananeraie « établie » a un recouvrement constant (variant de 40 à 60 % de la surface parcellaire), maintenu par l'organisation continue des bandes de paillage.

4) L'ananas mécanisé et billonné a un taux de couverture croissant (de 35 à 80 % de la surface cultivée) dû principalement au développement des feuilles basses.

Les rigoles, quant à elles, ne sont apparues nettement que sur les parcelles en sol nu et deviennent plus profondes sur les fortes pentes. En saison des pluies, elles peuvent entailler la parcelle dénudée jusqu'à 40 % de sa surface et témoignent ainsi de l'activité intense du ruissellement (figure 3). Les autres parcelles ne présentent pas de rigoles apparentes en raison de l'influence des cultures et du paillage.

Ruissellement et érosion

Les résultats des mesures 1999 et 2000 sont synthétisés dans le tableau 2.

Pour le ruissellement, on constate que les parcelles ruisselant fréquemment sont aussi les plus sensibles aux pluies les plus agressives (association parallèle entre les deux coefficients Cram et Crmax). En effet, les traitements tels que les sols nus et l'ananas mécanisé et billonné sont les plus ruisselants tandis que les sols cultivés avec paillage ont une forte résistance au ruissellement. Par ailleurs, on note une diminution nette du ruissellement sur les sols nus quand la pente augmente (tableau 2).

Pour l'érosion, on distingue différents comportements des traitements. En effet, les sols nus et les cultures de l'ananas mécanisées et billonnées montrent de fortes pertes en terre tandis que les autres parcelles paillées ne s'érodent pratiquement pas. Par ailleurs, l'érosion sur les sols nus croît considérablement avec l'augmentation de la pente (tableau 2).

En regardant le taux de particules en suspension (Susp) et celui des macro-agrégats érodés, deux résultats importants apparaissent : d'une part, la manifestation d'un processus érosif non sélectif sur les parcelles en sol nu et en culture de l'ananas mécanisée et billonnée (entraînement des particules en suspension et sédimentées) et, d'autre part, l'influence du paillage sur le changement de ce processus (entraînement de sédiments en suspension essentiellement).

Discussion

Les résultats observés sur les systèmes de culture testés permettent de commenter quelques points importants décrits ci-dessous.

Comparaison des résultats mesurés avec ceux d'autres études

D'après les résultats sur les parcelles nues, le sol brun à halloysite semble très per-

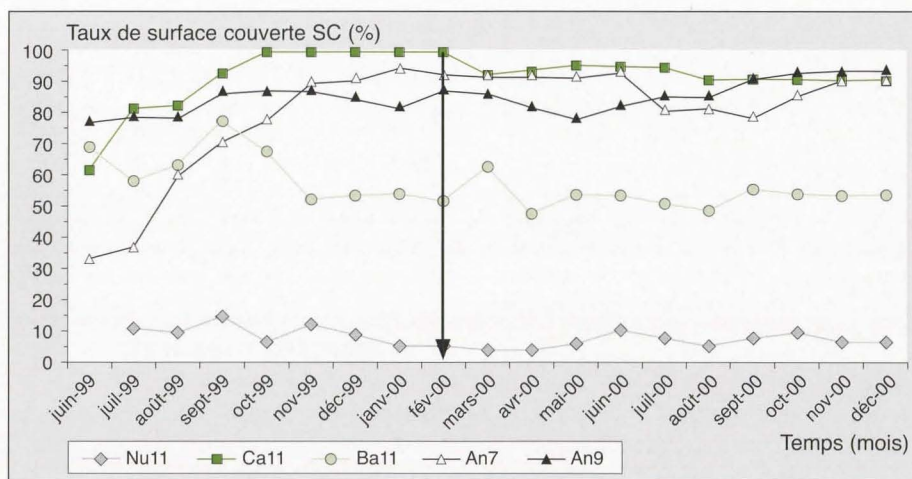


Figure 2. Évolution mensuelle des taux de surface couverte SC sur le sol nu (Nu11), la canne à sucre paillée (Ca11), la bananeraie « établie » (Ba11) et les deux ananas (An7 et An9). La flèche noire représente la remise à niveau des traitements pour la répétition des observations annuelles en 2000.

Figure 2. Monthly evolution of sheltering surface ratio SC on the bare soil (Nu11), the mulched sugar cane (Ca11), the lasting banana plantation (Ba11) and both pineapples (An7 and An9). The black arrow represents the set up of the treatments for the second measurements in 2000.

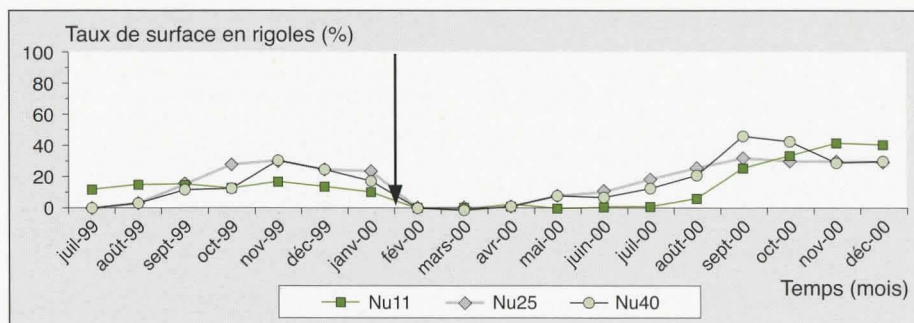


Figure 3. Évolution mensuelle des taux de surface en rigoles sur les trois sol nus (Nu11, Nu25 et Nu40). La flèche noire représente la remise à niveau des parcelles pour la répétition des observations annuelles en 2000.

Figure 3. Monthly evolution of rill surface ratio on the three bare soils (Nu11, Nu25 and Nu40). The black arrow represents the set up of the treatments for the second measurements in 2000.

méable et son faible ruissellement est analogue aux résultats d'études sur l'érosion hydrique des andosols en Équateur [14, 15]. Ces sols d'origine volcanique ont un comportement très distinct des sols ferrallitiques d'Afrique tropicale, plus ruisselants (Cram > 10 %) [10, 11, 16, 17]. En outre, l'érosion observée en Martinique est similaire aux résultats relevés sur les andosols équatoriaux où, sur des pentes similaires, la perte en terre peut atteindre près de 58 à 71 t/ha/an sur un sol sablo-limoneux de cendres volcaniques, ou encore s'élever à 204 ou 314 t/ha/an sur un andosol formé sur la *Cangabua*, une couche de cendre volcanique indurée [14, 15]. Par ailleurs, parmi les modes de culture testés, le comportement de parcelles plantées en ananas mécanisées et billonnées, nécessitant un travail énergétique du sol, est de loin celui qui rend le sol le plus sensible aux pluies érosives.

Les fortes valeurs du ruissellement et de l'érosion sont d'ailleurs comparables aux résultats trouvés en Afrique occidentale [10] et dans les îles volcaniques d'Hawaï [18] où cette culture est reconnue comme l'une des plus exposées vis-à-vis de l'érosion. Ce système intensif, pratiqué en Martinique, risque donc d'entraîner d'importantes pertes en terre et est peu recommandé dans une agriculture raisonnée et conservatrice du sol.

L'influence de la pente sur le ruissellement

La diminution du ruissellement sur ce sol volcanique quand la pente croît est identique aux résultats déjà relevés dans des études similaires sur des sols d'Afrique [10, 19, 20] ou sur des processus de ruissellement hortonien [21]. D'ailleurs, pour expliquer cette relation entre pente

et ruissellement, Heusch [19] suggère en 1971 l'existence d'un processus de pente hydraulique liée à la topographie : en milieu homogène, la baisse du ruissellement sur forte pente serait due à une circulation verticale par gravité plus rapide, permettant ainsi au sol d'absorber à nouveau de l'eau avant la saturation de sa porosité. Plus récemment, Govers [22] explique la diminution du ruissellement provoquée par la fissuration différentielle du sol situé sur forte pente.

Comportement du sol brun à halloysite et processus d'érosion

Sur les sols nus, les pertes en terre mesurées sont souvent caractérisées par une grande proportion de sédiments grossiers (plus de 75 % de macro-agrégats érodés) et par une très faible teneur de particules en suspension. Ces observations témoignent non seulement de la non-sélectivité de l'érosion, mais aussi de la grande résistance du sol volcanique à l'agressivité des pluies, comme l'ont indiqué le faible indice d'érodibilité K et la grande stabilité à l'eau des agrégats soumis à un test standardisé en laboratoire [23]. D'ailleurs, cette résistance se manifeste aussi en surface du sol par l'absence d'une croûte de battance ou de preuve d'une désagrégation du sol et d'une réorganisation superficielle par un lissage [24]. Malgré la grande résistance du sol, l'érosion est considérable sur les parcelles en sol nu et augmente avec la pente. En effet, quand la pente croît, l'énergie ciné-

Tableau 2. Paramètres synthétiques du ruissellement et de l'érosion mesurés sur les traitements testés en 1999 et 2000 en Martinique.

Table 2. Mean runoff and erosion parameters on the treatments tested throughout 1999 and 2000 in Martinique.

Traitements	Parcelles	Pente (%)	Paramètres du ruissellement		Paramètres de l'érosion		
			Cram (%)	Crmax (%)	E (t/ha/an)	Susp. (%)	MA (%)
Sol nu	Nu11	11	7,1	45	85,8	0,5	84
	Nu25	25	5,2	32	127,5	0,4	75
	Nu40	40	4,3	28	147,4	0,3	79
Canne à sucre paillée	Ca11	11	0,5	6	0,1	100	X
	Ca25	25	0,6	6	0,1	100	X
	Ca40	40	0,7	8	0,2	100	X
Bananeraie « établie »	Ba9	9	2,4	24	0,4	12,4	X
	Ba11	11	2,8	27	0,5	17,1	X
Ananas mécanisé et billonné	An7	7	11,4	51	17,2	2,4	78
Ananas à plat avec paillis	An9	9	0,6	7	0,1	100	X

Cram : coefficient de ruissellement annuel moyen ; Crmax : coefficient de ruissellement maximal ; E : érosion annuelle ; Susp : particules en suspension ; MA : taux de macro-agrégats érodés (diamètre D > 200 µm) ; X : non déterminé.

tique du ruissellement augmente et celle-ci pourrait entailler de plus en plus profondément la couche superficielle du sol et entraîner l'érosion des agrégats. Par conséquent, quand la pente s'élève de 10 à 40 %, les processus d'érosion concentrée pourraient changer d'une étape en rigoles à une autre par fluages (ou petites coulées boueuses) comme cela a été également souligné en Équateur [14, 15]. D'autres travaux ont établi une relation exponentielle entre pente et perte en terre [10, 25-27]. Dans notre cas, bien qu'aucune régression significative ne soit établie en raison des mesures réalisées sur seulement trois inclinaisons différentes, la relation entre pente et érosion semble linéaire et rappelle celle trouvée sur les sols volcaniques équatoriaux [14, 15].

Faisabilité de la conservation du sol

Face à cette érosion hydrique essentiellement provoquée par l'agressivité du ruissellement, recouvrir la surface du sol et maintenir une forte rugosité à l'aide de résidus de culture semble un moyen aisé et efficace pour protéger le sol. En effet, à travers les résultats obtenus sur les parcelles paillées, ruissellement et perte en terre sont faibles, même sur forte pente. D'ailleurs, ces parcelles ne ruissellent et ne s'érodent que lors du passage de tempêtes tropicales. Quelle que soit la culture testée, l'organisation du paillage est donc un excellent moyen de lutte anti-érosive ayant déjà fait ses preuves ailleurs [10, 11, 28, 29] et permettant en plus une meilleure infiltration au sol [30-33].

Conclusion

Finalement, cette étude expérimentale menée sur des versants accidentés en Martinique a montré que le ruissellement et l'érosion pouvaient sévir sévèrement sur les sols volcaniques cultivés et dénudés. Généralement considérés comme très agrégés et très résistants aux pluies érosives, ces sols deviennent sensibles à l'érosion quand ils sont dénudés, surtout en situation de forte pente. Face à ces risques d'érosion, il est possible en culture intensive de protéger le sol volcanique par de simples mesures anti-érosives : (i) premièrement, occuper le sol en jachère par des plants à forte

production de biomasse pour le recouvrir ; (ii) deuxièmement, se servir de cette biomasse produite pour pailler régulièrement le sol (bandes de paillis perpendiculaires à la pente) lors de la replantation des cultures d'exploitation. Ces propositions pour une agriculture durable visent donc à réduire les répercussions de ces systèmes intensifs sur l'environnement et à conserver les ressources en sol ■

Remerciements

Cette étude a été financée par le Cirad-FLHOR avec la collaboration de l'IRD Martinique-Caraïbes.

Les auteurs remercient Mme Yasmine Barry, le Dr E. Blanchart (IRD – laboratoire BOST Martinique) et le Dr Georges De Noni (IRD-LCSC Montpellier) pour leur aide.

Références

1. Cabidoche YM. Conservation des milieux insulaires volcaniques tropicaux et bonnes pratiques agricoles : état des lieux et axes de recherche. In : Inra Antilles-Guyane, ed. *Cinquantenaire Inra Antilles-Guyane - Table ronde sur l'agriculture raisonnée*. Petit Bourg : Presse Inra 1999 : 1-11.
2. Khamsouk B. *Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique (cas du sol brun rouille à halloysite)*. Montpellier : Thèse Doctorale Ensa, 2001 ; 214 p.
3. Godefroy J, Dormoy M. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans le complexe « sol-bananière-climat ». Application à la programmation de la fumure. IV – Cas des sols bruns à halloysite (fin). *Fruits* 1989 ; 44 : 3-12.
4. Dorel M, Lafforgue A, Breaud P, Le Breton M. *Étude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananière*. Guadeloupe : Cirad-FLHOR/Orstom, 1996 ; 28 p.
5. Colmet-Daage F, Lagache P. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cah Orstom, Ser Pedol* 1965 ; 3 : 91-121.
6. Wischmeier WH, Johnson CB, Cross BV. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J Soil, Water Conservation* 1971 ; 26 : 189-92.
7. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bulletin Pédologique FAO (Rome)* 1994 ; 70 : 422 p.
8. Wischmeier WH, Smith DD. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Am Geophys Union* 1958 ; 39 : 285-91.
9. Wischmeier WH, Smith DD. *Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning*. Washington : US Depart Agric Handbook, 1978 ; 282 : 58 p.

10. Roose E. *Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Collection Travaux et Documents. Paris : Orstom, 1981 ; 130 : 587 p.

11. Rishirumuhirwa T. *Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles dans les hauts plateaux de l'Afrique orientale (application au cas de la région Kimiro-Burundi)*. Lausanne : Thèse doctorale, École polytechnique fédérale, 1997 ; 320 p.

12. Hudson NW. *Mesures de terrain de l'érosion et de l'écoulement des eaux de surface*. Bulletin pédologique FAO (Rome), 1996 ; 324 p.

13. Roose E. Méthodes de mesure des états de surfaces du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés des montagnes. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 87-97.

14. De Noni G, Nouvelot JF, Trujillo G. *Erosion and conservation of volcanic ash soils in the highlands of Ecuador: a case study*. Sixth international soil classification workshop. Chile and Ecuador part 1. Washington ; Santiago de Chile : SMSS ; PUCC, 1984 : 263-74.

15. De Noni G, Nouvelot JF, Trujillo G. *Estudio cuantitativo de la erosión con fines de protección de los suelos: las parcelas de Alangasi y Ilalo*. Documentos de investigación, n° 6. Quito : Cedig-Orstom : 35-47.

16. König D. Contribution des méthodes agroforestières à la lutte anti-érosive au Rwanda. *Bull Réseau Erosion* 1991 ; 11 : 185-91.

17. Duchaufour H, Bizimana M. Restauration de la fertilité et conservation des eaux et des sols en région montagneuse au Burundi. *Bull Réseau Erosion* 1992 ; 12 : 161-78.

18. Winchester-Chromec F, El-Swaify SA, Lo AKF. *Erosion Problems and Research in Hawaii*. *Topic Appl Res Management* 1989 ; 1 : 143-74.

19. Heusch B. Estimation et contrôle de l'érosion hydrique. *Soc Sci Nat, Phys Maroc* 1971 ; 37 : 41-54.

20. Roose E, Arabi M, Brahamia K, Chebbani R, Mazour M, Morsli B. Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et infiltration de la production agricole pour la GCES. Synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. *Cah Orstom ser Pedol* 1993 ; 28 : 289-308.

21. Poesen J. The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Zeitschrift Geomorph* 1984 ; 49 : 117-31.

22. Govers G. A field study on topographical and topsoil effects on runoff generation. *Geomorph-Hydro-Soils, Catena suppl* 1990 ; 18 : 91-111.

23. Khamsouk B, Roose E, Dorel M, Blanchart E. Effets des systèmes de culture bananière sur la stabilité structurale et l'érosion d'un sol brun rouille à halloysite en Martinique. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 206-15.

24. Roose E, Khamsouk B, Lassoudière A, Dorel M. Origine du ruissellement et de l'érosion sur sols bruns à halloysite de Martinique. Premières observations sous bananiers. *Bull Réseau Erosion* 1999 ; 19 : 139-47.

25. Zingg AW. Degree and length of land slope as it affects soil loss and runoff. *Agric Engineering* 1940 ; 21 : 59-64.
26. Hudson NW, Jackson DC. Results achieved in the measurements of erosion and runoff in Southern Rhodesia. *CR 3 Inter Afric Soils Conf* 1959 ; 2 : 1-15.
27. Lal R. Soil erosion problems on an alfisol in Western Nigeria. Effects of slope, crop rotation and residue management. *Geoderma* 1976 ; 16 : 363-75.
28. Lal R. Soil erosion problem on an alfisol in Western Nigeria and their control. *IITA Techn Bull* 1979 ; 1 : 1-38.
29. Duchaufour H, Bizimana M, Mikokoro C. *Rapport annuel ISABU 1989-1990, Partie érosion*. Burundi : Département des études du milieu et des systèmes de production ISABU, 1991 ; 68 p.
30. Laften JM, Baker JL, Hartwig RO, Buchele WF, Johnson HP. Soil and water loss from conservation tillage systems. *Trans ASAE* 1978 ; 21 : 881-5.
31. Forster GR, Young RA, Römken MJM, Onstad CA. Processes of soil erosion by water. In : Follet RF, Stewart BA, eds. *Soil erosion and Crop Productivity*. Madison : ASA, CSSA, SSSA Press 1985 : 137-62.
32. Mills WC, Thomas AW, Langdale GW. Estimating soil loss probabilities for southern Piedmont cropping-tillage systems. *Trans ASAE* 1986 ; 29 : 948-55.
33. Box JE, Bruce JR, Bruce RR. The effect of surface cover on infiltration and soil erosion. In : Agassi M, ed. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. New-York : Dekker 1995 : 107-23.