

# **Impact des techniques de semis direct avec paillis sur la réduction de l'érosion et l'évolution des stocks de C dans des systèmes de maïs pluvial en zones semi-arides de l'ouest mexicain**

**E. Scopel<sup>1</sup>, A. Findeling<sup>2</sup> et E. Chavez Guerra<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> : eric@cpac.embrapa.br, CIRAD-CA, programme GEC.

<sup>2</sup> : findeling@cirad.fr, CIRAD-AMIS, programme Agronomie.

<sup>3</sup> : e.chavez@cgiar.org, CIMMYT, Natural Resources Group.

## **Résumé :**

Dans les zones semi-arides de l'Ouest mexicain, un projet de recherche INIFAP/CIMMYT/CIRAD a étudié la capacité de techniques de semis direct avec paillis de résidus (SDP) à stabiliser la production de maïs pluvial. Les quantités de résidus protégeant le sol étaient toujours faibles puisqu'une bonne partie des pailles est utilisée par les producteurs pour nourrir leurs animaux durant la saison sèche. L'impact de telles techniques sur le bilan hydrique et sur l'évolution des stocks de matière organique du sol (MOS) a notamment été étudié entre 1995 et 1997 sur un dispositif de lots de ruissellement établi sur un sol sablo-argileux représentatif de la région.

Ces études ont montré que, malgré les très faibles quantités de paillis utilisées (de 1,5 à 4,5 t ha<sup>-1</sup>), l'impact des SDP sur la lame d'eau totale ruisselée est considérable (-10 à -50% en fonction de la pente, des années et des quantités de résidus employées), si l'on prend comme référence les pratiques de gestion sans protection du sol. Ces différences de ruissellement se traduisent directement sur les pertes solides par érosion hydrique. On retrouve un effet important des SDP sur la réduction de ces pertes (-50 à -90%). Cet effet est encore plus marqué que sur le ruissellement car le pouvoir érosif de la lame ruisselée diminue avec la biomasse de paillis présente au sol.

Combinant les effets sur l'érosion et les différences de restitution de la matière organique (MO), on constate après 5 ans de SDP que les effets sur les stocks de C sont importants (+20 à +27% comparé à un sol non paillé). La MO tend à augmenter essentiellement dans les horizons de surface (0-5 cm), ce qui rend ce stockage précaire puisque tout travail même léger et superficiel du sol va tendre à dilapider rapidement ce capital par minéralisation.

**Mots-clefs : semis direct, paillis, ruissellement, érosion, matière organique, Mexique.**

## **Abstract :**

A research project was carried out by INIFAP, CIMMYT and CIRAD to study the ability of direct sowing associated with a residue mulch (SDP) to stabilize rainfed corn production, in a semi-arid zone of Western Mexico. The amount of residue which protected the soil were always small since a substantial part of the residue is used by the farmers to feed their cattle during dry season. The impact of such techniques on water balance and on the changes in soil organic matter content (MOS) was studied between 1995 and 1997 using a runoff plot device established on a sandy clay soil, which is representative of the area.

This work showed that, despite very small amounts of mulch (from 1.5 to 4.5 t ha<sup>-1</sup>), the impact of SDP on total cumulative runoff was substantial (from -10 to -50% depending on slope, year and amount of mulch), compared to the bare soil techniques used as the reference.

Runoff differences lead to differences on solid losses by water erosion. A strong effect of SDP on solid losses reduction was observed (from -50 to -90%). This effect was even stronger than that on runoff because the erosive power of runoff flow decreases with mulch biomass.

Taking mulch effect on erosion and different organic matter (MO) recycling rates into account, we observed a significant impact of SDP, after 5 years, on C soil content (from +20 to +27% compared to a bare soil). MO tended to increase mostly in the topsoil layer (0-5 cm), which made this stored C very vulnerable, since even a light and superficial soil tillage would quickly squander it by mineralization.

**Keywords : direct sowing, mulch, runoff, erosion, organic matter, Mexico.**

## **Introduction :**

Dans les zones semi-arides de l'Ouest mexicain, la pluviométrie oscille entre 400 et 800 mm. Malgré ces totaux pluviométriques faibles, les événements sont souvent de type orageux et peuvent être très intenses, ce qui provoque de fortes pertes par ruissellement et par érosion hydrique au niveau des parcelles. Le maïs, base de l'alimentation mexicaine, couvre la grande majorité des zones de production strictement pluviales (80% des surfaces). Ce dernier étant une plante relativement sensible au manque d'eau et exigeante d'un point de vue nutritionnel, une gestion inadaptée des sols peut conduire à d'importantes pertes de rendements en grains, à la fois à court terme par une mauvaise valorisation de la ressource en eau et à long terme par dégradation de la ressource sol et de sa fertilité naturelle. Cette situation est fort préjudiciable dans le cadre d'une petite agriculture familiale dont l'alimentation et le revenu dépendent beaucoup de la production de cette céréale. C'est pour cela que le semis direct avec paillis (SDP) se présentait comme une alternative intéressante pour la gestion du maïs pluvial de ces régions (Scopel, 1994).

Cette technique consiste à ne plus travailler le sol et à le maintenir couvert en permanence par un paillis de résidus de la culture antérieure. Toutefois, de par le climat, la capacité de production de biomasse est faible (6-10 tonnes/ha) et, localement, une partie des résidus est utilisée pour nourrir les animaux durant la saison sèche de 7 à 8 mois. C'est pourquoi la biomasse de paillis utilisable en SDP est toujours limitée, et n'assure qu'une couverture très partielle du sol à protéger (Scopel *et al.*, 1998). Certes, les effets d'un paillis sur le ruissellement et l'érosion sont bien connus (Alberts et Neibling, 1994 ; Steiner, 1994 ; Gilley *et al.*, 1987), mais avec d'aussi faibles protections, on peut se demander quel est l'impact réel de cette technique sur le bilan hydrique du maïs pluvial et sur l'évolution de la fertilité à long terme de ces parcelles. Un projet de recherche INIFAP/CIMMYT/CIRAD a débuté en 1994 pour étudier l'impact de cette technique dans les plaines de moyenne altitude de l'état de Jalisco, premier producteur national de maïs, essentiellement en conditions pluviales (80 à 90% du total produit). Dans le cadre de ce projet, un dispositif de lots de ruissellement a été mis en place pour étudier et quantifier les effets du SDP sur le ruissellement et l'érosion des sols.

## **Matériels et méthodes :**

Cette étude a été conduite sur le site de La Tinaja (Jalisco), dans une zone sèche sur un sol sablo-argileux (15% d'argiles) représentatif de la région. En 1995 une première série de six lots de ruissellement a été installée sur une partie du site à pente de 7%. Chaque lot était encerclé par des tôles verticales de 20 cm de haut enterrées à moitié. Il mesurait 20 m<sup>2</sup> (2m x

10m) et était installé dans le sens de la pente avec un système de collecte des eaux ruisselées ainsi que des pertes solides érodées. Les traitements suivis étaient : 1) Témoin sol nu, non travaillé, non semé (TSN), 2) Semis direct sans paillis (SD-0T), 3) Semis direct avec paillis de 1,5 t/ha de résidus (SDP-1,5T), 4) Semis direct avec paillis de 3 t/ha de résidus (SDP-3T), 5) Semis direct avec paillis de 4,5 t/ha de résidus (SDP-4,5T), 6) Travail traditionnel du sol aux disques (simulé) à 10 cm (TT).

Il est à noter que les restitutions de résidus végétaux ne se produisent que sur les traitements SDP. Ces résidus étaient totalement exportés pour les autres traitements, conformément aux pratiques locales<sup>1</sup>.

En 1997, une deuxième série de quatre lots a été installée à 50 mètres, sur une autre partie du site à 3% de pente. Les traitements SD-0T, SDP-1,5T, SDP-3T et TT y étaient observés.

Le ruissellement était calculé par mesure du volume ruisselé dans les bidons de collecte. Les pertes solides étaient estimées après filtration d'un litre représentatif du mélange eau plus terre recueilli.

Sur une partie contiguë entre 5 et 7% de pente, un essai classique en plus grandes parcelles (1000 m<sup>2</sup>) était conduit depuis 1994. Il s'agissait d'un dispositif en blocs complets avec deux répétitions où les traitements, SD-0T, SD-1,5T, SD-4,5T et TT étaient étudiés. Par souci de représentativité et étant donnée son plus long historique (cinq ans), les mesures sur la MOS ont été effectuées sur ce dispositif en 1998. Quatre répétitions ont été faites par traitement élémentaire et les horizons 0-2,5 cm, 2,5-5 cm, 5-10 cm et 10-20 cm ont été échantillonnés. Pour ce faire, le paillis était délicatement écarté jusqu'à laisser la surface nue pour les traitement SDP. La MO du sol a été estimée par la méthode Walkley et Black, tandis que le carbone a été analysé indépendamment par CHN dans les laboratoires du CIMMYT.

## Résultats :

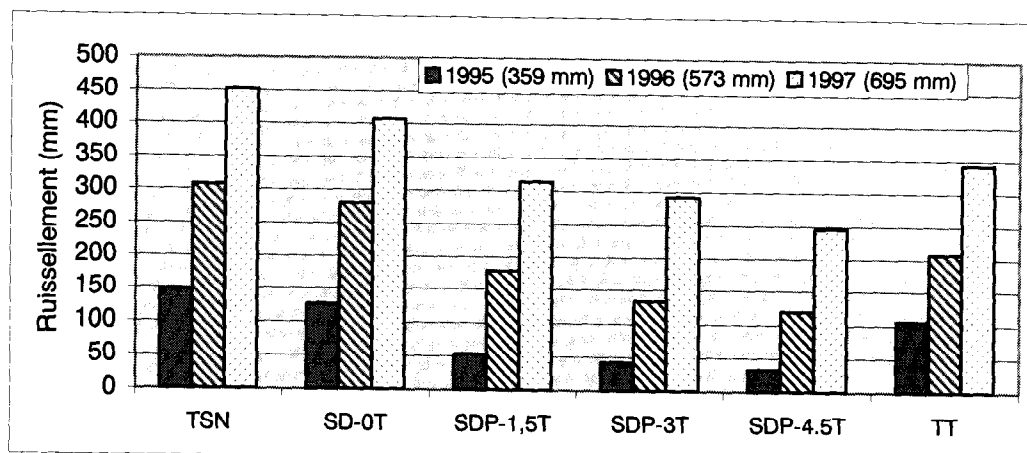
### Sur le ruissellement :

La lame totale ruisselée pour les années 1995, 1996 et 1997 a été calculée pour chaque traitement étudié (figure 1) sur le site à 7% de pente. On constate que ces ruissellements sont toujours importants par rapport à la pluviométrie (jusqu'à 65 % de la pluie perdue pour les traitements les plus ruisselants), ce qui illustre l'importance de ces pertes dans cette région pour ce type de sol. On observe également un effet année prononcé. Naturellement, les ruissellements dans l'absolu ont été plus forts au fur et à mesure que la pluviométrie est plus importante. De même, le coefficient de ruissellement (lame ruisselé sur lame de pluie) augmente également avec la pluviométrie (en 1997 la pluviométrie a été importante et les événements particulièrement intenses).

---

<sup>1</sup> Les résidus restant après pâture des animaux en saison sèche sont généralement brûlés.

**Figure 1 :** Lame annuelle totale ruisselée pour différents traitements de gestion du sol pour trois années contrastées à La Tinaja, Mexique.

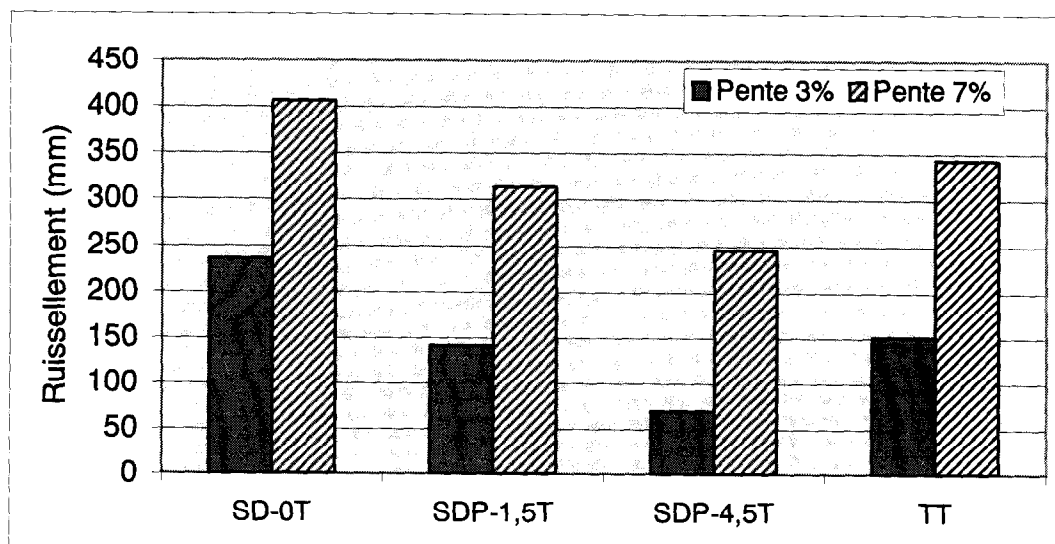


Si on s'intéresse aux effets des différents traitements, on constate que ceux-ci sont remarquablement stables à travers les années :

- On a de forts ruissellements en l'absence de paillis (40 à 60 % du total pluviométrique).
- Le ruissellement cumulé sur l'année est toutefois systématiquement moins fort avec travail du sol (TT) que sans (SD-0T).
- Il y a toujours un effet marqué du paillis qui réduit fortement le ruissellement par rapport aux traitement non paillés (-15 à -50%). Cet effet s'accroît quand la dose de paillis augmente.

Lorsque la pente passe de 7 à 3%, le ruissellement est approximativement diminué de moitié. L'effet des traitements reste toutefois appréciable : le SDP diminue considérablement les pertes ruisselées, surtout pour des quantités de paillis plus élevées (SDP-4,5T) (figure 2).

**Figure 2 :** Lame totale ruisselée en 1997 pour différents traitements de gestion du sol avec deux pentes différentes à La Tinaja, Mexique.



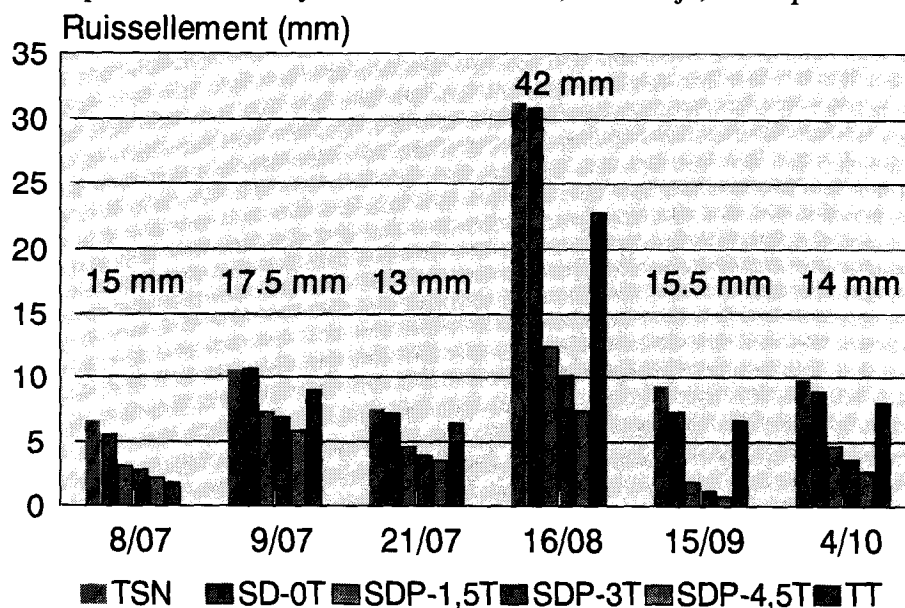
Lorsqu'on compare les lames ruisselées de ces différents traitements pour différents événements répartis tout au long du cycle pluvial (figure 3) on peut observer que :

- Ces effets sont aussi remarquablement stables sur tout le cycle de culture.
- Le travail du sol a un effet bénéfique sur le ruissellement en tout début de cycle (08/07/1995). Cet effet de début de cycle explique la position intermédiaire de ce traitement lorsqu'on considère le ruissellement cumulé sur le cycle de culture.
- Cet effet est éphémère puisque, dès le 9/07, TT ruisselle plus que les différents SDP et ce jusqu'à la fin du cycle.

Il a été montré par ailleurs (Scopel et Findeling, 2001) que le paillis agit en retardant le début du ruissellement et en diminuant son intensité. Les résidus, même en faible quantité, forment des barrières qui s'opposent au déplacement de l'eau de surface, créant des petites retenues et augmentant la tortuosité de l'écoulement. Ceci donne plus de temps pour que l'eau s'infilte dans le sol.

Par ailleurs, le taux d'infiltration reste aussi bien plus élevé sur les traitements paillés. L'activité plus importante de la macro-faune ainsi que la protection assurée par les débris végétaux en décomposition maintiennent une plus forte porosité qui explique la meilleure conductivité de surface que l'on observe sous SDP (Scopel et Findeling, 2001 ; Findeling, 2001).

Figure 3 : Lame ruisselée pour différents types de gestion du sol lors de six événements pluvieux répartis durant le cycle de culture 1995, La Tinaja, Mexique.



Sur les pertes solides :

Concernant les pertes solides, nous avons estimé la capacité érosive annuelle moyenne de la lame ruisselée en calculant la masse de sol emporté par chaque millimètre d'eau ruisselé, pour chaque événement et en faisant la moyenne sur l'année. Un test statistique à pu être appliqué en considérant chaque événement comme une répétition. On constate alors (tableau 1) que le paillis réduit significativement le pouvoir érosif de l'eau ruisselée : chaque millimètre emporte de 2 à 3 fois moins de sol.

**Tableau 1** : Capacité érosive moyenne de la lame ruisselée (kg/ha/mm ruisselé) sur l'ensemble des événements de l'année, en fonction des divers traitements de gestion du sol, La Tinaja, Mex., 1995 à 1997.

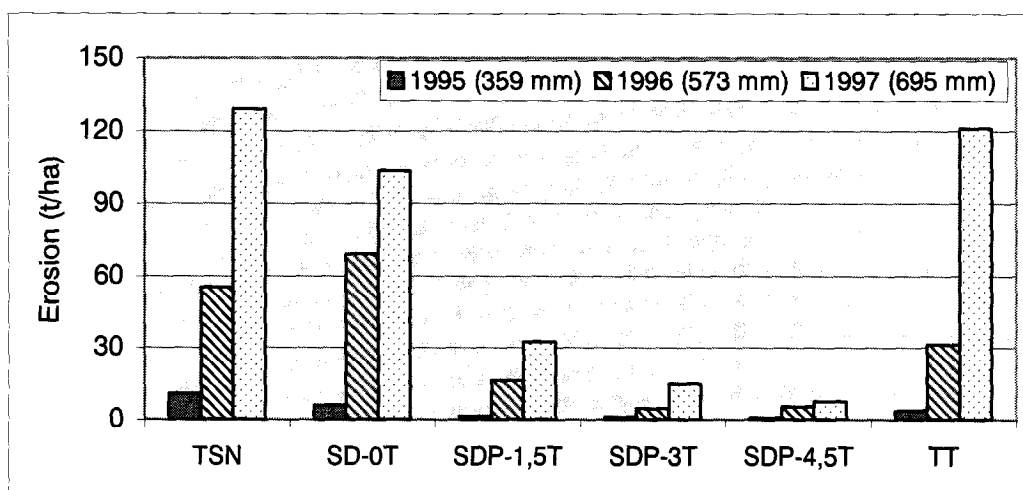
Année	Gestions du sol					
	TSN <sup>1</sup>	SD-0T	SDP-1.5T	SDP-3T	SDP-4.5T	TT
1995	61,2a <sup>2</sup>	38,8b	19,7c	20,8bc	16,7c	26,8bc
1996	127,2a	149,7a	49,1b	24,9b	24,6b	78,0b
1997	302,1a	297,1a	125,9abc	75,4c	105,9bc	277,0ab

<sup>1</sup> TSN = Témoin sol nu, SD = Semis direct sans paillis, SDP1.5T = Semis direct avec paillis de 1,5 t/ha, SDP3T = Semis direct avec paillis de 3 t/ha, SDP4.5T = Semis direct avec paillis de 4,5 t/ha, TT = Travail traditionnel aux disques.

<sup>2</sup> Les traitements avec les mêmes lettres ne diffèrent pas dans un test de Newman Keuls à 1%.

Même si la couverture assurée par ces paillis est très imparfaite (20% pour SDP-1,5T et 40% pour SDP-4,5T), ils contribuent à diminuer l'effet *splach* des gouttes d'eau en amont. De même, la lame d'eau circule plus lentement par effet barrage et augmentation de la tortuosité de l'écoulement. Cette moindre énergie cinétique se traduit par moins de transport solide d'origine hydrique. Nous n'avons pas fait d'analyse granulométrique de ces pertes solides, mais il est probable que la proportion de particules grossières augmentent en l'absence de paillis.

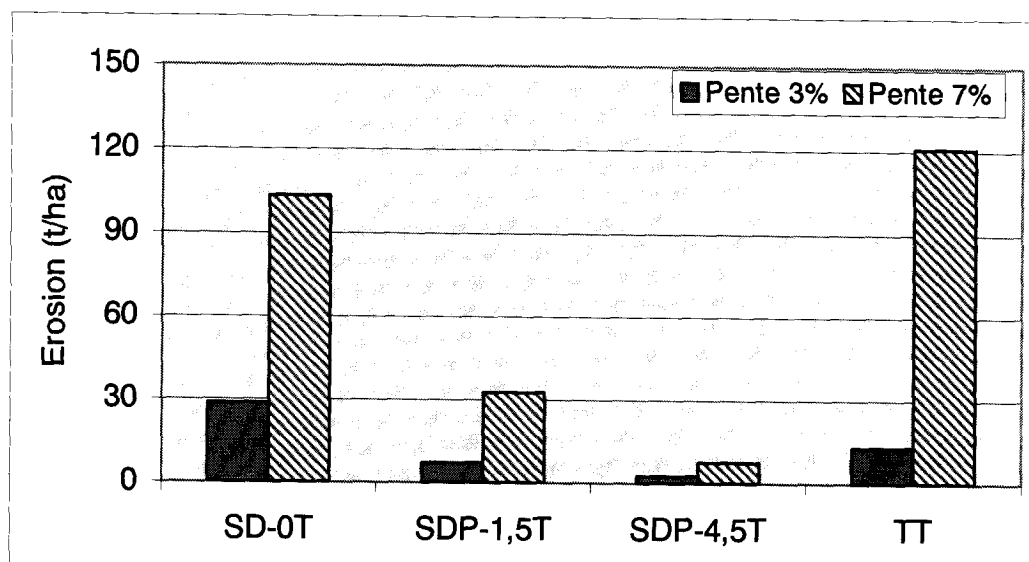
**Figure 4** : Pertes solides cumulées annuellement pour différents traitements de gestion du sol sur trois années contrastées à La Tinaja, Mexique.



En cumulant les effets sur le ruissellement et sur la capacité érosive de ce dernier, on observe des effets encore plus marqués sur les pertes de sol (figure 4). L'effet année est encore plus marqué, l'érosion étant très faible en 1995 et très importante en 1997. Les effets traitements sont drastiques et l'érosion est très fortement atténuée par le paillis de résidus (-60 à -70% en

moyenne). Cet effet s'accroît sensiblement avec la dose de paillis mais l'absence/la présence de paillis reste le facteur le plus explicatif des différences entre traitements.

**Figure 5** : Pertes solides cumulées en 1997 pour différents traitements de gestion du sol avec deux pentes différentes à La Tinaja, Mexique



De la même façon, l'érosion est très fortement atténuée lorsque la pente diminue (-60 à -80% en moyenne). Malgré cette atténuation les effets traitements restent notables et le contrôle de l'érosion est presque total en SDP, notamment avec une biomasse de paillis plus importante (figure 5).

Sur le carbone :

Nous n'avons pas pu faire d'analyse chimique des pertes liquides et solides recueillis sur ce dispositif et nous ne connaissons donc pas exactement les pertes en C liées chaque année à l'érosion hydrique. Toutefois on peut en avoir une estimation en utilisant les teneurs en C mesurées en 1998 dans l'horizon superficiel de chaque traitement sur le dispositif adjacent et en les appliquant aux quantités érodées mesurées sur les lots de ruissellement. Une telle approche ignore l'évolution au cours du temps de ces teneurs et n'utilise que des teneurs après cinq ans qui, nous le verrons, sont déjà différenciées entre traitements. Ces estimations auront donc tendance à surestimer les pertes de C sous SDP et à sous-estimer les pertes en traitements non paillés. Malgré cela on peut constater que les pertes en C sous SDP sont toujours largement inférieures à celles des autres traitements (tableau 2).

**Tableau 2 :** Pertes de C par érosion (t/ha) estimées annuellement pour différents traitements sur trois années contrastées à La Tinaja, Mexique.

Année	Gestions du sol			
	SD-0T <sup>1</sup>	SDP-1,5T	SDP-4,5T	TT
1995	0,048	0,019	0,012	0,025
1996	0,545	0,203	0,090	0,205
1997	0,816	0,410	0,112	0,787

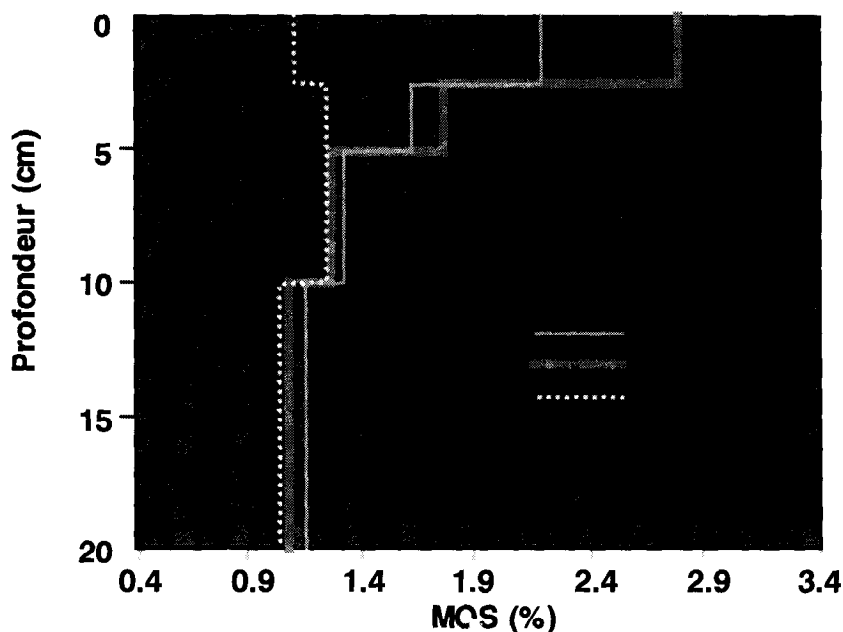
<sup>1</sup> SD-0T = Semis direct sans paillis, SDP-1,5T = Semis direct avec paillis de 1,5 t/ha, SDP-4,5T = Semis direct avec paillis de 4,5 t/ha, TT = Travail traditionnel aux disques.

Lors d'années très érosives comme en 1997, des parcelles gérées sans paillis perdent plus d'une demi-tonne de C, soit de 2 à 7 fois plus que des parcelles gérées en SDP.

En cumulant cet effet sur l'érosion et le fait que les traitements SD-0T et TT ne connaissent aucune restitution de matière organique des pailles, les profils de matière organique tendent à se différencier avec le temps entre ces traitements. Après cinq ans, on observe des teneurs en MO très significativement supérieures sous SDP sur les cinq premiers centimètres (figure 6). En dessous plus aucune différence n'est décelable.

Ce résultat illustre à la fois la capacité des SDP à favoriser une certaine accumulation de la MO, mais aussi la précarité de cette accumulation. En effet elle n'est concentrée que dans les 5 premiers cm et donc relativement exposée. Si pour une raison quelconque le producteur est obligé d'avoir recours à un outil pour retravailler son sol, même de manière superficielle, il risque fort d'accélérer la minéralisation de cette MO et de reperdre très rapidement ce capital de fertilité (Séguy *et al.*, 1996).

**Figure 6 :** Profils de matière organique du sol après cinq ans de différents types de gestions du sol, 1998, La Tinaja, Mexique





De même aucune étude de fractionnement n'a pu être réalisée sur ce dispositif, de sorte que nous n'avons aucune idée de la forme de cette MO. Il est fort probable, vu le degré d'intimité entre le sol et les résidus de maïs en décomposition en surface, qu'une bonne partie de cette MO n'ait encore qu'une forme grossière peu transformée. Elle serait alors beaucoup moins stable et serait susceptible de se minéraliser dès que les conditions le permettent (température, humidité, azote, oxygène) (Feller *et al.*, 2001).

**Tableau 3** : Stocks de C dans l'horizon 0-20 cm après cinq ans de différents types de gestion du sol, La Tinaja, Mexique

	Gestions du sol			
	SD-0T	SDP-1,5T	SDP-4,5T	TT
C total sur 0-20 cm (t/ha)	19.3	23.1	24.5	17.1
Différence de stock comparée à SD-0T (t/ha)	-	+ 3.8	+ 5.2	- 2.2
Différence de stock comparée à SD-0T (%)	-	+ 19.7%	+ 26.9%	- 11.4%

Lorsqu'on traduit ces différences en stocks de carbone sur la couche 0-20 cm (tableau 3), on constate de grandes différences quantitatives puisque, après cinq ans, les stocks de C sous SDP sont de 20 à 25 % supérieurs à SD-0T. En revanche, on trouve des stocks moins importants sous TT que sous SD-0T malgré un régime de restitution similaire et des pertes érosives globalement moins importantes. Il est probable que le travail du sol répété tous les ans favorise une minéralisation plus importante de la MO du sol (Reicoski, 1997), accentuant la baisse de teneur dans l'horizon superficiel comme cela a été fréquemment observé par ailleurs (Arshad, 1999 ; Balesdent *et al.*, 1990 ; Lal, 1997 ; Séguy *et al.*, 1996). De même, comme cela avait déjà été rapporté au Brésil (Sá *et al.*, 2001), ces différences de stocks sont accentuées par des différences significatives de densité apparente. Cette dernière est systématiquement inférieure avec TT dans l'horizon 0-10 cm. Après pulvérisation du sol par les outils à disques, les états de surface se dégradent rapidement sous l'effet des premières fortes pluies, par contre une certaine porosité est maintenue tout le cycle dans l'horizon travaillé (Scopel *et al.*, 2001).

En aucun cas ces comparaisons effectuées après cinq ans ne peuvent nous permettre de quantifier correctement la capacité de ces SDP à séquestrer du carbone puisque :

- Nous ne disposons du niveau initial des stocks pour aucun des traitements.
- Le traitement SD-0T ne peut servir de référence puisqu'il a probablement évolué durant ces cinq ans, en perdant du C par érosion et en ne bénéficiant pas de restitution de biomasse aérienne.

Le bilan net pour SDP est positif, grâce au climat très sec et la nature des résidus de maïs (C/N élevé) qui ralentissent les processus de minéralisation. Mais il est donc inférieur aux différences de stocks constatées entre SDP et SD-0T et probablement de l'ordre de quelques

centaines de kg/an, plus ou moins en fonction de la quantité de paillis. Cette accumulation reste faible à cause :

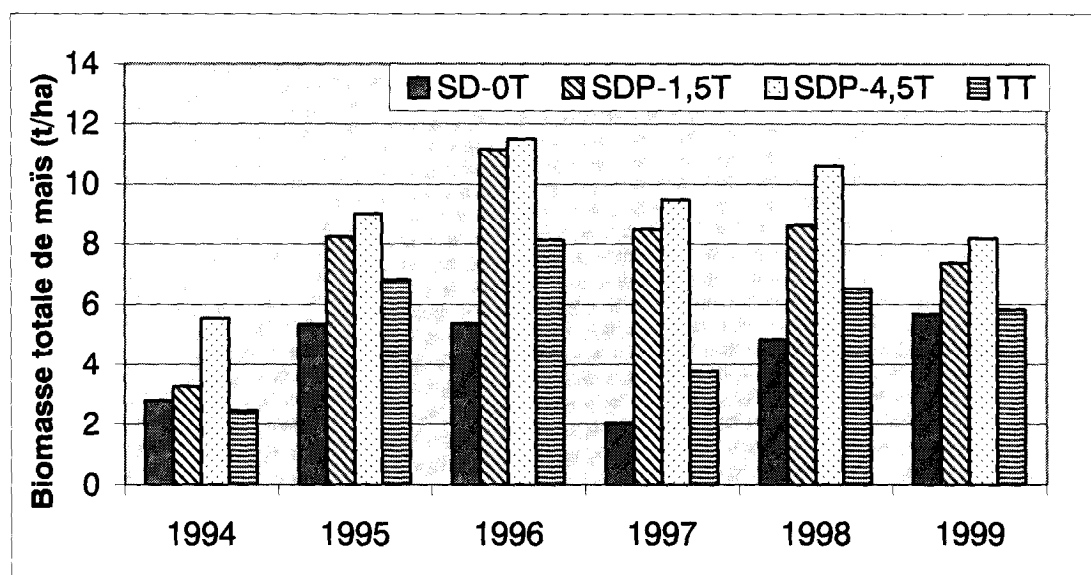
- Du faible potentiel de production de biomasse.
- De la faiblesse des restitutions possibles après pâturage des animaux.

L'intérêt de ces pratiques pour augmenter le puit de carbone dans le sol reste donc relativement limité dans ces zones semi arides. En comparaison, on peut obtenir des taux d'accumulation bien supérieurs dans des régions plus humides avec des SDP où l'on optimise les entrées de biomasse dans le système par plusieurs cultures par an et l'utilisation d'espèces très productives (Séguy *et al.*, 2001).

*In fine*, la production de biomasse du maïs a été suivie durant six ans sur l'essai contigu en grandes parcelles (figure 7). On constate que malgré la dégradation très nette des stocks de matière organique sur les traitements non paillés et une certaine augmentation de ceux-ci sous SDP, on ne retrouve pas, à l'échelle de 6 ans, d'effet de cette fertilité organique sur la productivité de la culture :

- Il n'a pas de tendance à une augmentation des différences de productivité entre SDP et les autres traitements avec le temps (tendance probablement masquée par l'application des engrais chimiques relativement importante pour cette région 120N et 30P).
- On observe, en revanche, une forte variabilité inter-annuelle de la productivité générale liée essentiellement aux conditions pluviométriques.
- On retrouve chaque année de forts contrastes entre les traitements en faveur des SDP, même les années les plus pluvieuses.

Figure 7 : Production de biomasse totale de maïs durant six ans avec différents types de gestions du sol, La Tinaja, Mexique



On peut conclure de ces observations que, dans le contexte de cet essai, les effets à court terme des SDP sur la valorisation de l'eau et éléments nutritifs (plus forte activité biologique, plus fort volume de sol colonisé par les racines, interaction positive entre N et eau...)(Reyes *et al.*, 2002) ont plus d'impacts sur la productivité du maïs que les effets à long terme sur le changement du statut organique des sols.

## Conclusion :

Les techniques de SDP, même avec de très faibles doses de résidus, sont très efficaces en zones semi-arides pour mieux valoriser la ressource pluviométrique. Les pertes par ruissellement sont considérablement réduites.

De façon liée, les pertes par érosion de sol et de matière organique sont diminuées de plus de moitié grâce à ces techniques. Le bilan net de C est positif et on constate une accumulation de MO dans les cinq premiers centimètres du sol. Il semble toutefois que l'impact environnemental des SDP, *via* la séquestration du C dans les sols, soit limité dans ces zones sèches.

Dans ce contexte, l'impact à court terme des SDP sur la productivité du maïs *via* le bilan hydrique et, de façon liée, la dynamique de certains éléments minéraux, est bien plus important que celui à long terme *via* l'amélioration du statut organique du sol. De très bons résultats peuvent être obtenus dès la première année d'application et les SDP permettent de régulariser la production dans le temps, en la rendant moins dépendante des aléas climatiques.

Enfin, si la politique mexicaine de subvention des fertilisants est suspendue et que les doses appliquées par les producteurs diminuent, il est fort probable que la fertilité naturelle des sols, *via* leur statut organique, redevienne plus importante sous SDP que sous traitement non paillé, assurant le maintien d'une bonne productivité des céréales. Les SDP constituent donc une alternative technique potentiellement très intéressante pour les petits producteurs de maïs pluvial de ces régions du Mexique.

## Références :

- Alberts E.E., Neibling W.H., 1994. Influence of crop residues on water erosion. In *Managing Agricultural Residues*, Unger P.W. (Eds.), Lewis Pub.: 20-39.
- Arshad M.A., 1999. Tillage and soil quality. Tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 53: 1-2.
- Balesdent J., Mariotti A., Boisgontier D. 1990. Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from <sup>13</sup>C abundance in maize fields. *Journal of Soil Science* 41: 587-596.
- Feller C. Balesdent B. Nicolardot B. Cerri C. 2001. Approaching 'functional' soil organic matter pools through particle-size fractionation: examples for tropical soils. Chap. 5, pp. 53-67. In Lal R., Kimble J.M., Follett R.F., Stewart B.A. (eds), Assessment Methods for Soil Carbon., *Advances in Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Findeling, A., 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Sciences de l'eau. Montpellier, ENGREF: 355.
- Gilley J.E., Finkner S.C., Varvel G.E., 1987. Slope length and surface residue influences on runoff and erosion. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 30, 148.
- Lal R. 1997. Long-term tillage and monoculture effects on a tropical Alfisol in Western Nigeria: II. Soil chemical properties. *Soil & Tillage Research* 42: 161-174.
- Reicoski D.C., 1997. Tillage-induced CO<sub>2</sub> emissions from soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 49: 273-285.
- Reyes Gomez V., Findeling A., Marlet S., Oliver R., Maraux F., Alves Moreira J.A., Douzet J.M., Scopel E., Recous S., 2002. Influence of no-tillage and cover plants on water and nitrogen dynamics in the Cerrados (Brazil). *XVII World Congress of Soil Science*, Bangkok, Thailand, September, 2002.
- Sá J. C. de M., Cerri C. C., Lal R., Dick W. A., Venzke Filho S. P., Piccolo M. C., Feigl B. 2001. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Sous presse
- Scopel, E. 1994. Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. PhD, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 334 p.
- Scopel, E., B. Muller, J. M. Arreola Tostado, E. Chavez Guerra and F. Maraux. 1998. Quantifying and modelling the effects of a light crop residue on the water balance: an application to rainfed maize in Western Mexico. *XVI World Congress of Soil Science - Montpellier, France, August, 1998*
- Scopel E., Findeling A., 2001. Conservation tillage impact on rainfed maize production in semi-arid zones of western Mexico: importance of runoff reduction. *I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid*, 1-5 October, 2001.
- Scopel E., Tardieu F., Edmeades G., Sebillotte M., 2001. Effects of conservation tillage on water supply and rainfed maize production in semiarid zones of West-central Mexico. NRG paper 01-01. Mexico, DF: CIMMYT. 18p.
- Séguy L., Bouzinac S., Trentini A., Côrtes N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. II- La gestion de la fertilité par le système de culture. *L'Agriculture Tropicale* 12: 18-37.
- Séguy L., Bouzinac S., Maronezzi A.C., 2001. Cropping systems and organic matter dynamics. *I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid*, 1-5 October, 2001.
- Steiner, J. L. 1994. Crop residue effects on water conservation. *Managing Agricultural Residues*, Unger P.W. (Eds.), Lewis Pub.: 41-76.



**Pour citer cet article / How to cite this article**

Scopel, E.; Findeling, A.; Chavez, E. G. - Impact des techniques de semis direct avec paillis sur la réduction de l'érosion et l'évolution des stocks de C dans des systèmes de maïs pluvial en zones semi-arides de l'ouest mexicain, pp. 311-322, Bulletin du RESEAU EROSION n° 23, 2004.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : [beep@ird.fr](mailto:beep@ird.fr)