

Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest mexicain : une histoire d'eau ?

Les systèmes de culture fondés sur le semis direct avec couverture végétale permanente du sol constituent actuellement des objets complexes et assez nouveaux pour la recherche agronomique. Les études de quantification et de modélisation des processus de fonctionnement du système sol-plante en sont rares. En zone sèche du Mexique, un travail expérimental a été conduit dans ce sens pour cerner les effets du paillis de résidus de maïs sur le bilan hydrique de la culture.

Dans la zone de Ciudad Guzmán, à l'intérieur de l'Etat de Jalisco au Mexique, le maïs occupe 80 % de la surface semée en culture pluviale, soit environ 140 000 ha. L'Etat de Jalisco est le premier producteur national de maïs (Inegi, 1997), avec des rendements supérieurs à la moyenne nationale — 3 t/ha au lieu de 1,5 t/ha. Ces résultats positifs ne reflètent cependant pas la réalité, plus mitigée : la majorité des terres agricoles présente des problèmes dus en grande partie à l'emploi d'outils à disques qui pulvérisent les sols (Sagar, 1996). Il s'en suit une dégradation par érosion éolienne et hydrique et par compactation, comme cela a été observé dans d'autres régions agricoles du Mexique et d'Amérique latine (SEGUY *et al.*, 1996). Certaines institutions mexicaines se sont donc intéressées au semis direct avec paillis de résidus car cette technique a apporté des réponses, dans certains contextes, aux principales difficultés des producteurs de maïs pluvial : réduction des pertes en sol par érosion, valorisation de l'eau de pluie, diminution des coûts de production (Fira, 1990 ; CLAVERON ALONSO et VELAZQUEZ GARCIA, 1997).

C'est dans ce cadre qu'en 1994, l'Inifap, le Cimmyt et le Cirad¹ ont lancé un projet d'étude de cette technique comprenant une recherche fine sur les mécanismes modifiés par la mise en place du semis direct avec paillis, l'adaptation aux conditions rencontrées dans l'ouest du Mexique et l'analyse des processus d'adoption par les producteurs. Le projet a permis une analyse détaillée des effets du semis direct avec paillis sur le bilan hydrique de la culture de maïs. Cet article rend compte des observations et des conclusions de cette analyse, spécialement avec un paillis en faible quantité car, dans ces zones du Mexique, seule une petite partie des résidus de récolte peut être utilisée comme paillis protecteur, l'essentiel étant destiné à nourrir le bétail en saison sèche. Les effets sur le bilan hydrique, ainsi que leurs conséquences sur la productivité du maïs pluvial, ont pu être quantifiés puis modélisés.

E. SCOPEL

Cirad-ca, BP 5035, 34032 Montpellier
Cedex 1, France

E. CHAVEZ GUERRA,
J.M. ARREOLA TOSTADO

Cimmyt, Mariano Jimenez n° 36,
48740 El Grullo Jalisco, Mexique

Clichés E. Scopel

1. Inifap : Instituto Nacional de Investigación Forestal y AgroPecuaria ; Cimmyt : Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz Y Trigo ; Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

réduites, de moins de 2 t/ha de matière sèche², pour les plantes entières et les résidus partiellement décomposés (figure 3). Leurs valeurs sont comparables, du fait de la présence des feuilles et spathes pour les premières ou de nombreux petits morceaux pour les seconds. En revanche, les résidus de tiges ont un taux de couverture plus faible, puisqu'il faut plus de 4 t/ha pour couvrir 30 % de la surface du sol. Cette différence est importante car, après la pâture qui dure plusieurs mois, la proportion de tiges dans les résidus encore sur le sol est élevée.

La relation entre le taux de couverture du sol et la quantité de paillis est représentée par un modèle exponentiel du type (SCOPEL *et al.*, 1998) :

$$C = 100 (1 - e^{-\alpha Q}) \quad (1)$$

avec C, taux de couverture du sol ; Q, quantité de résidus ; a, paramètre d'ajustement (ha/t) dépendant du type de paillis (plante entière $\alpha = 0,367$; résidus partiellement décomposés 0,271 ; tiges 0,092).

En 1995, le taux de couverture du sol a été suivi *in situ* pendant la culture sur des points d'observation permanents pour trois traitements et trois quantités de paillis (1,5, 3 et 4,5 t/ha). A chaque point d'observation (quatre par traitement) correspondant à un mètre linéaire, 10 points (un pour 10 cm) ont été caractérisés grâce à la mire verticale. Le taux de couverture a été ensuite converti en quantité de résidus grâce à la relation (1), parce que c'est le critère le plus parlant pour les paysans et parce que tous les processus modifiés par le paillis se réfèrent à cette quantité.

Malgré de petites variations au cours du temps, à cause de déplacements de résidus par le vent ou l'eau, le paillis évolue de façon similaire pour les trois traitements (figure 4) : une dégradation rapide le premier mois puis une stabilisation et une

2. Dans tout l'article, les quantités de matière végétale sont exprimées en matière sèche.

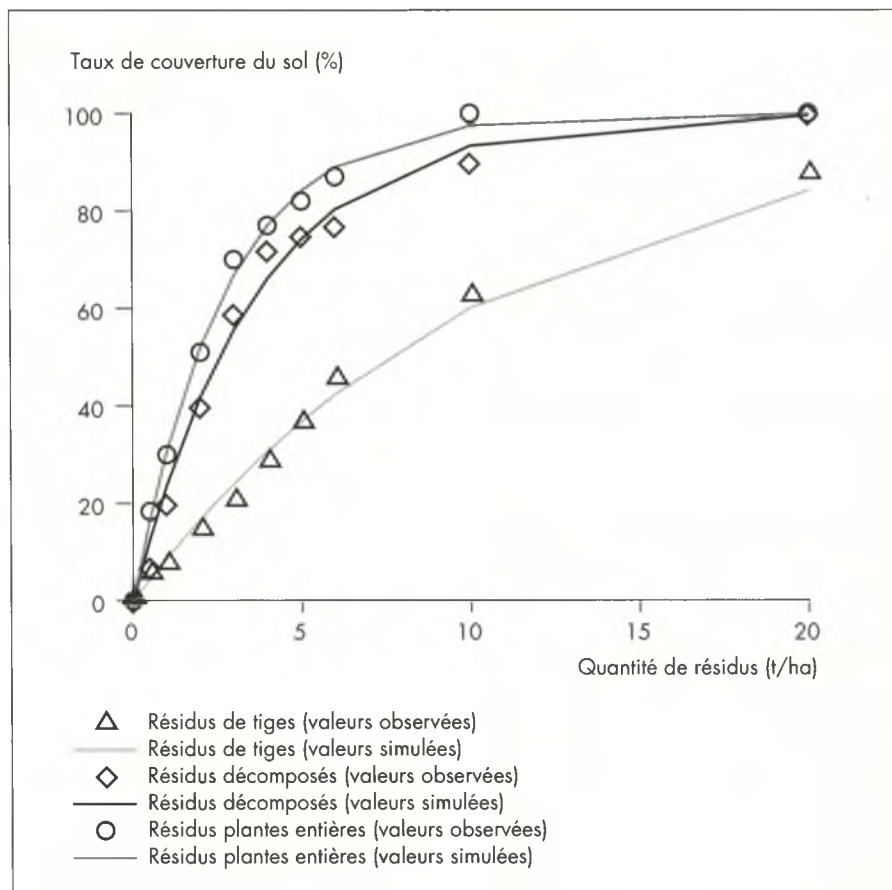


Figure 3. Evolution du taux de couverture du sol en fonction de la quantité et du type de résidus.

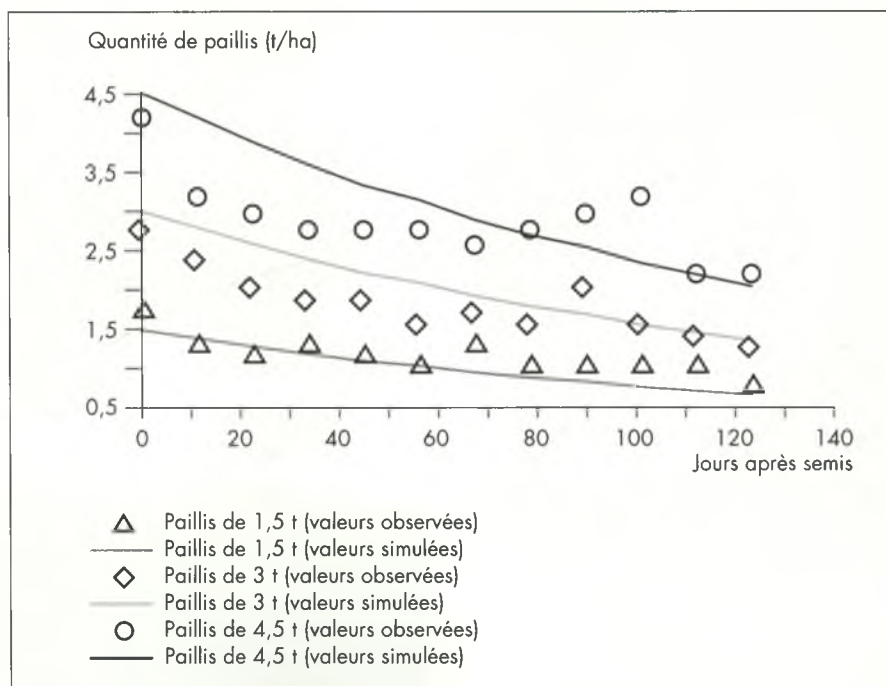


Figure 4. Evolution des quantités de paillis sur le sol pendant le cycle de culture du maïs.

dégradation plus lente. Les conditions sèches de 1995 et le ratio C/N élevé des résidus de maïs expliquent probablement cette faible dégradation malgré la fertilisation azotée forte (120 kg/ha). Ce sont surtout les feuilles et la partie médulaire des tiges qui se décomposent le plus vite. Par la suite, la partie externe des tiges, plus riche en lignine, se décompose lentement ; le paillis continue ainsi à couvrir le sol en prolongant ses effets, ce qui procure un avantage aux paillis les plus riches en tiges. Le modèle représentant le mieux cette évolution est une fonction exponentielle du type (SCOPEL *et al.*, 1998) :

$$Q = Q_0 e^{-\chi t} \quad (2)$$

avec Q , quantité de résidus ; Q_0 , quantité initiale de résidus ; t , nombre de jours après semis du maïs³ ; χ , coefficient d'extinction en fonction de t ($\chi = 0,007017$ pour des résidus partiellement décomposés par exemple).

L'interception du rayonnement

Les résidus ont été placés sur une plaque de verre de 0,75 m² (0,5 x 1,5 m) ; la différence entre le rayonnement incident et le rayonnement sous le paillis a été mesurée avec un picqhelios (Aéric, France) dans le visible (Par) et dans l'infra-rouge (Ir) entre 12 et 14 heures d'une journée ensoleillée. Les données mesurées ont été corrigées pour tenir compte du rayonnement directement intercepté par la plaque de verre.

L'interception du rayonnement dépend fortement du taux de couverture du paillis (figure 5). Le taux d'interception est élevé pour des résidus de plantes entières ou partiellement décomposées : plus de 30 % du rayonnement incident peut être intercepté avec 1,5 t/ha de

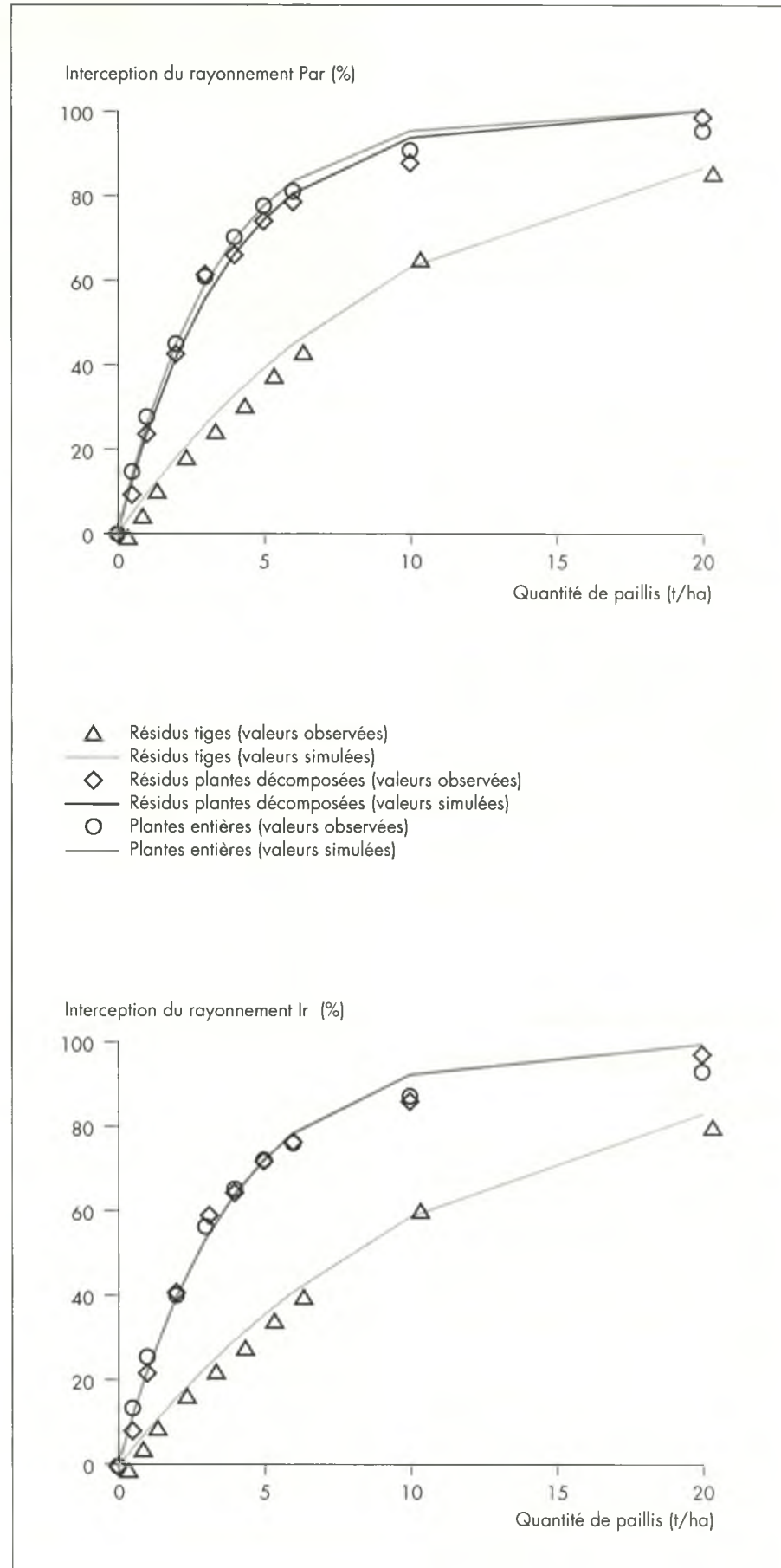


Figure 5. Interception du rayonnement Par et Ir en fonction de la quantité et du type de paillis.

3. Au moment du semis de la culture, les résidus sont en place depuis le cycle précédent.

résidus. Cette interception est moins marquée avec des tiges puisque seulement 10 % du rayonnement sont interceptés avec la même quantité. On comprend que les paillis riches en tiges de maïs sont moins efficaces pour réduire l'évaporation directe du sol, à quantités égales. On peut rendre compte de cette interception par un modèle exponentiel (SCOPEL *et al.*, 1998) :

$$R_f = R_i e^{-\beta Q} \quad (3)$$

avec R_f , rayonnement arrivant au sol à travers le paillis (W/m^2) ; R_i , rayonnement incident arrivant sur le système sol-paillis (W/m^2) ; Q , quantité de résidus (t/ha) ; β , paramètre d'ajustement dépendant du type de résidus et du type de rayonnement ($\beta = 0,268$ pour le Par et $\beta = 0,255$ pour l'Ir avec des résidus partiellement décomposés). Pour introduire l'effet d'interception du rayonnement dans un modèle où généralement l'évaporation du sol va être calculée en fonction de l'énergie totale reçue par rayonnement, il faut un coefficient b pour le rayonnement total. Pour cela, on peut utiliser la moyenne des deux coefficients obtenus pour le Par et pour l'Ir.

Stockage de l'eau et dynamique de séchage du paillis

La capacité maximale de stockage de l'eau pour chaque type de résidu a été estimée en les immergeant trois jours, en les laissant s'égoutter une heure pour évacuer l'eau excédentaire, en les pesant humides puis en les pesant après séchage complet à l'étuve.

La capacité maximale de stockage est moindre pour les résidus déjà partiellement décomposés (tableau 1). Ceci est surtout lié à une moindre quantité de parties médullaires de tiges dans lesquelles une bonne part de l'eau peut être stockée. Il est toutefois difficile de rendre compte de la dynamique de stockage : les résidus avec des tiges

Tableau 1. Capacité de stockage maximum de l'eau (CS) en % du poids sec des résidus ou en quantité d'eau totale immobilisée par le paillis (millimètres d'eau) pour les trois types de résidus.

	Plante entière	Résidus partiellement décomposés	Tiges
CS (%)	381,0 ± 31,5	222,3 ± 10,3	330,9 ± 28,8
1,5 t/ha de résidus			
CS (mm)	0,57	0,33	0,49
3 t/ha de résidus			
CS (mm)	1,14	0,67	0,99
4,5 t/ha de résidus			
CS (mm)	1,71	1,00	1,5

stockent l'eau sans doute moins vite que des résidus partiellement décomposés parce que leur structure externe est plus imperméable, obligeant l'eau à pénétrer plutôt par les extrémités. De toute façon, ces différences ne sont pas fondamentales puisque les quantités totales immobilisées par le paillis restent faibles, de moins de 1,7 mm, même avec 4,5 t/ha. Pour être certain de ne pas sous-estimer cet effet négatif, on peut considérer que l'eau de pluie commence d'abord par remplir complètement le réservoir paillis avant de remplir le réservoir sol.

La dynamique de séchage des résidus a été étudiée *in situ* pour les résidus partiellement décomposés en quatre quantités : 2,6, 4,4, 4,5 et 10,9 t/ha. Ils ont été placés humides sur six cadres de 0,25 m² avec un fond finement grillagé et posés à même le sol préalablement humidifié, et les cadres ont été pesés toutes les heures. Les paramètres climatiques, en particulier le rayonnement total, étaient enregistrés toutes les heures par une station automatique (Enerco 404, Cimel, France). Nous avons estimé l'énergie reçue par le paillis en corrigeant l'évapotranspiration potentielle de la journée (ETP Penmann) par le ratio du rayonnement global horaire sur le rayonnement global de la journée et en ne considérant que le rayonnement réellement intercepté par les résidus, en utilisant la relation (3) de la façon suivante (SCOPEL *et al.*, 1998) :

$$ETP_{ch} = (ETP_{Rh/Rd}) (1 - e^{-0,26 Q}) \quad (4)$$

avec ETP_{ch} , ETP reçue pendant l'heure (mm) ; ETP, ETP Penmann pour la journée (mm) ; R_h , rayonne-

ment global pendant l'heure (J/m^2) ; R_d , rayonnement global de la journée entière (J/m^2) ; Q , quantité de résidus (t/ha).

Les résidus sèchent rapidement (figure 6). En une journée, ils perdent quasiment toute leur eau même lorsque les quantités sont importantes (10,9 t/ha de résidus). On retrouve une relation directe entre ETP reçue et eau évaporée pour approximativement 70 % de l'humidité des résidus. Au delà, les résistances au transfert augmentent et le paillis sèche plus lentement. Pour modéliser l'évaporation du paillis, une relation linéaire directe peut être utilisée entre ces deux variables. Cette simplification nous amène à surestimer⁴ au maximum de 30 % l'évaporation réelle du paillis.

4. Il est difficile de quantifier cette surestimation car une bonne partie du rayonnement est interceptée par le couvert et il n'est pas sûr que les résidus arrivent à sécher complètement en une seule journée sous culture. De plus, si les résidus ne sèchent pas dans la même journée et qu'il pleut à nouveau le lendemain, ils se réhumidifient avant d'être secs. Or, c'est en phase finale qu'on surestime la perte en eau en la considérant comme directement proportionnelle à l'énergie reçue. A l'extrême, on peut ainsi imaginer qu'il pleuve tous les jours et que les résidus soient à moitié secs au moment de chaque pluie : on en arriverait à une estimation proche de la réalité. En conclusion, dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque les résidus sont totalement secs quand il pleut à nouveau, on peut seulement dire que la surestimation est au maximum de 30 %.

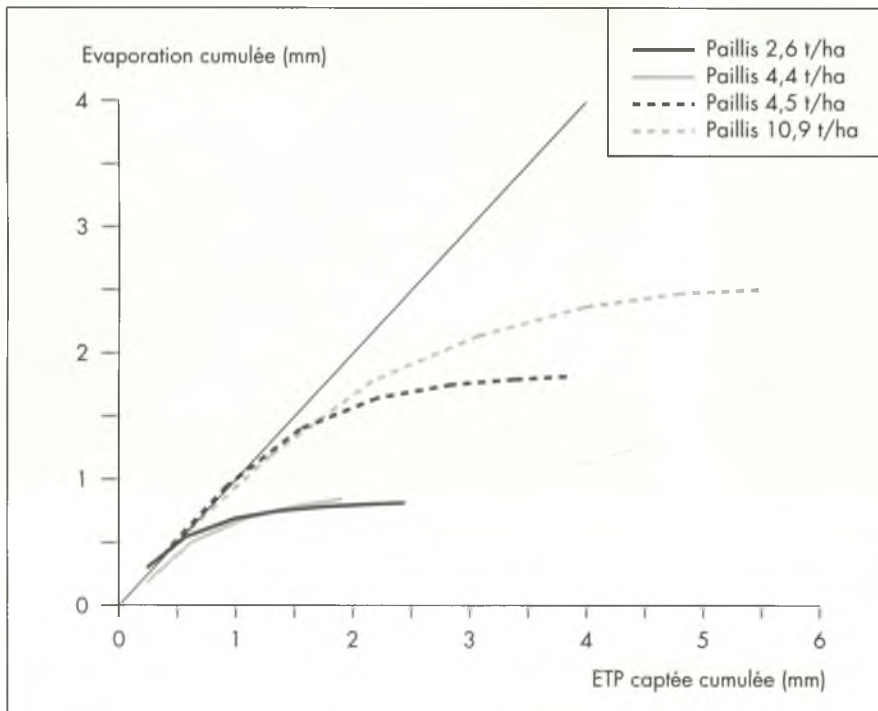
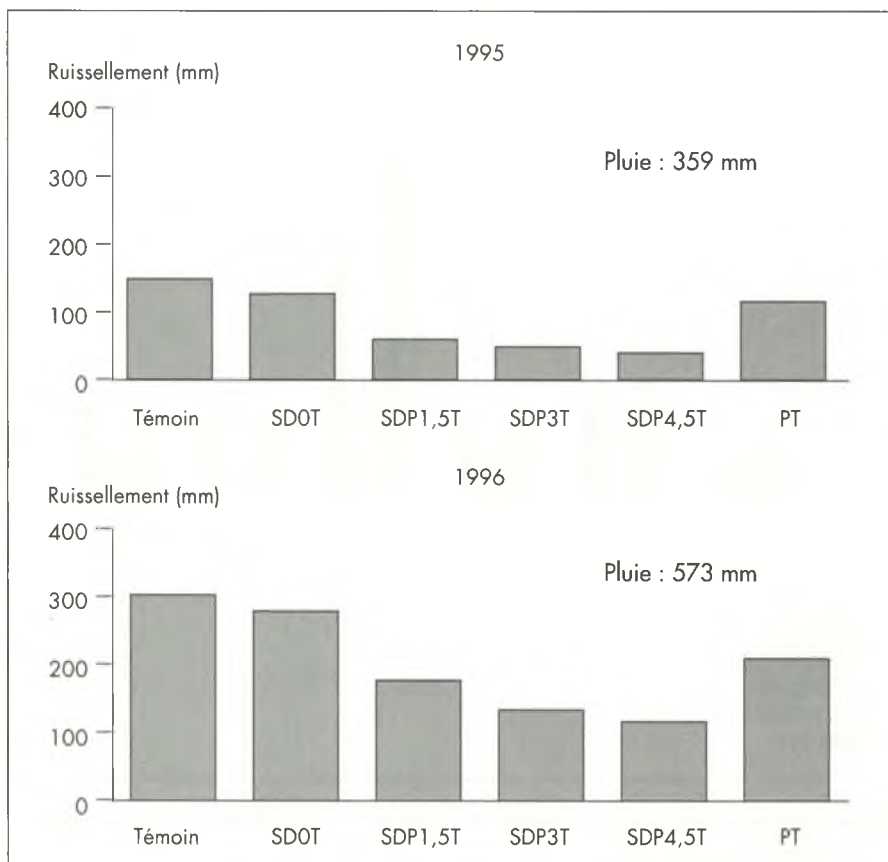


Figure 6. Dynamique de séchage des résidus en fonction de l'ETP et de leur quantité initiale. Note : s'il est vrai que cette figure ne montre pas directement que les résidus sont secs en moins d'une journée, comme cela est dit dans le texte, on observe toutefois qu'avec une ETP captée de 5-6 mm/j, les résidus, même les plus humides, sont pratiquement secs. Or l'ETP est de l'ordre de 5-6 mm/j même en saison des pluies. En saison sèche, lorsque ces expérimentations ont été conduites, l'ETP était de 8-9 mm/j : cela explique que chaque manipulation ait duré moins d'une journée.



Ruissellement et eau stockée dans le sol : un effet spectaculaire

L'impact le plus spectaculaire du paillis est son effet sur le ruissellement. Il a été étudié par parcelles de ruissellement de 20 m² (10 m x 2 m) à La Tinaja, un site de la zone sèche présentant un sol brun sablo-argileux et une pente de 7 % environ. Six traitements ont été établis :

- témoin sol nu (TEM) ;
- semis direct sans paillis (SDOT) ;
- semis direct avec 1,5 t/ha de résidus (SDP1,5T) ;
- semis direct avec 3 t/ha de résidus (SDP3T) ;
- semis direct avec 4,5 t/ha de résidus (SDP4,5T) ;
- préparation traditionnelle du sol, avec un travail léger (10-12 cm) aux disques (PT).

Nous reportons ici les résultats de deux années contrastées (figure 7) : l'année sèche 1995 (total pluviométrique annuel : 391 mm) et une année plus arrosée, 1996 (total pluviométrique annuel : 666 mm). Dans les deux cas, plus du tiers des pluies a été perdu par ruissellement dans les pires situations (témoin sol nu et semis direct sans paillis). A l'échelle du cycle, la préparation traditionnelle reste peu efficace pour améliorer le stockage de l'eau de pluie. Le paillis, même en quantité faible, a un effet très positif sur le stockage de l'eau puisque les pertes sont diminuées de 30 à 50 % par rapport au travail traditionnel. Enfin, le stockage augmente peu lorsque la quantité de résidus utilisés en paillis augmente.

Figure 7. Ruissellement cumulé sur le cycle de maïs (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco). Note : la pluviométrie indiquée (359 mm pour 1995 et 573 mm pour 1996) ne correspond pas au total annuel donné dans le texte, mais au total pluviométrique sur les événements pour lesquels le ruissellement a pu être mesuré, quelques rares événements ayant échappé au contrôle suite à des problèmes techniques.



Les conséquences néfastes de la préparation traditionnelle du sol aux disques (*offset*) : la recrudescence de la levée des mauvaises herbes, les processus d'érosion dus au ruissellement.



L'utilisation traditionnelle des résidus de culture du maïs en saison sèche pour l'élevage.

Ces effets sont assez stables sur l'ensemble du cycle de culture (figure 8). Le travail du sol diminue le ruissellement sur les premières pluies (antérieures au 8 juillet 1995) mais cet avantage est éphémère car, après la première pluie importante qui suit (15 mm), la structure superficielle du sol, totalement pulvérisée par les outils à disques, se dégrade fortement. Par la suite, les traitements avec paillis ont toujours de meilleurs résultats jusqu'à la fin du cycle. Cette permanence des effets du paillis est à mettre en relation avec la permanence de la couverture du sol : les structures de tiges restent en place et jouent un rôle clé comme barrière à l'écoulement superficiel de l'eau, lui donnant ainsi plus de temps pour s'infiltrer.

L'humidité de surface (horizon 0-10 cm) de ces six traitements a été suivie régulièrement par méthode gravimétrique ou par réflectométrie sur l'ensemble des deux cycles. Les traitements paillés présentent de façon systématique et significative des humidités supérieures à celle des trois autres traitements (figure 9). Comme les premiers sont aussi ceux qui ruissellent le moins, on peut penser que l'effet considérable du paillis diminue l'importance de l'humidité du sol pour expliquer les lames ruisselées, comme cela avait pu être observé dans d'autres circonstances tropicales (PEREZ, 1994).

Nous avons également observé le taux de couverture du sol assuré par la culture du maïs, pour chaque traitement, selon la même méthode que pour l'évolution des taux de couverture du paillis. Après une croissance initiale assez comparable jusqu'à 60 jours après semis (figure 10), le maximum de couverture atteint est toujours plus faible pour le semis direct sans paillis. En 1995, les maxi-

ma atteints ont été tous plus bas qu'en 1996 à cause de la pluviométrie moindre ; on constate aussi une décroissance accélérée de la couverture pour le semis direct sans paillis et pour la préparation traditionnelle, qui ont souffert d'une sénescence précoce des feuilles par manque d'eau. Généralement, ces taux de couverture restent faibles, même dans les meilleures situations (aucun

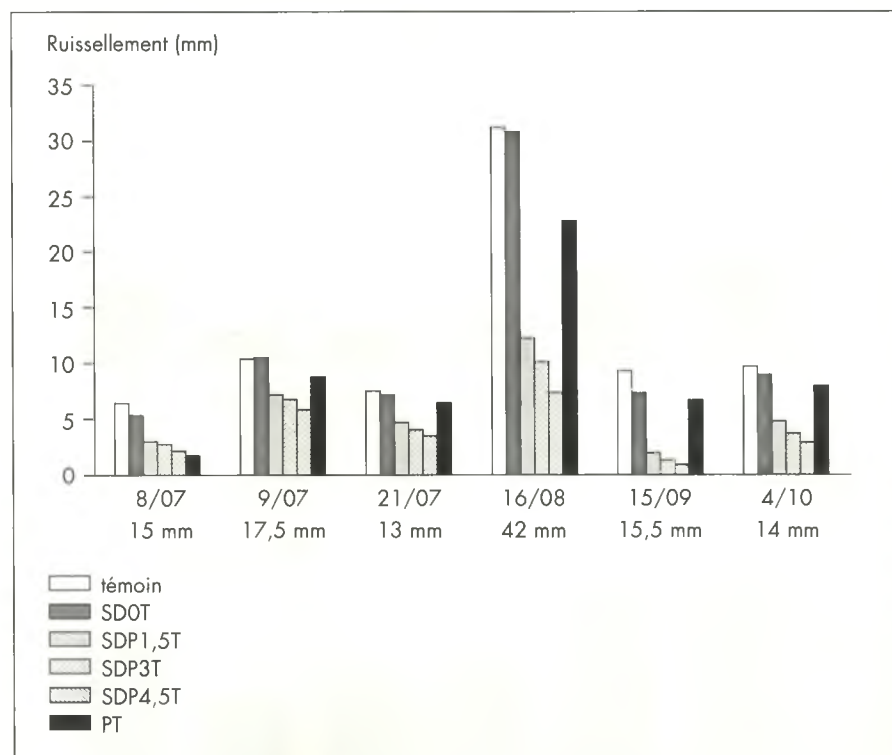


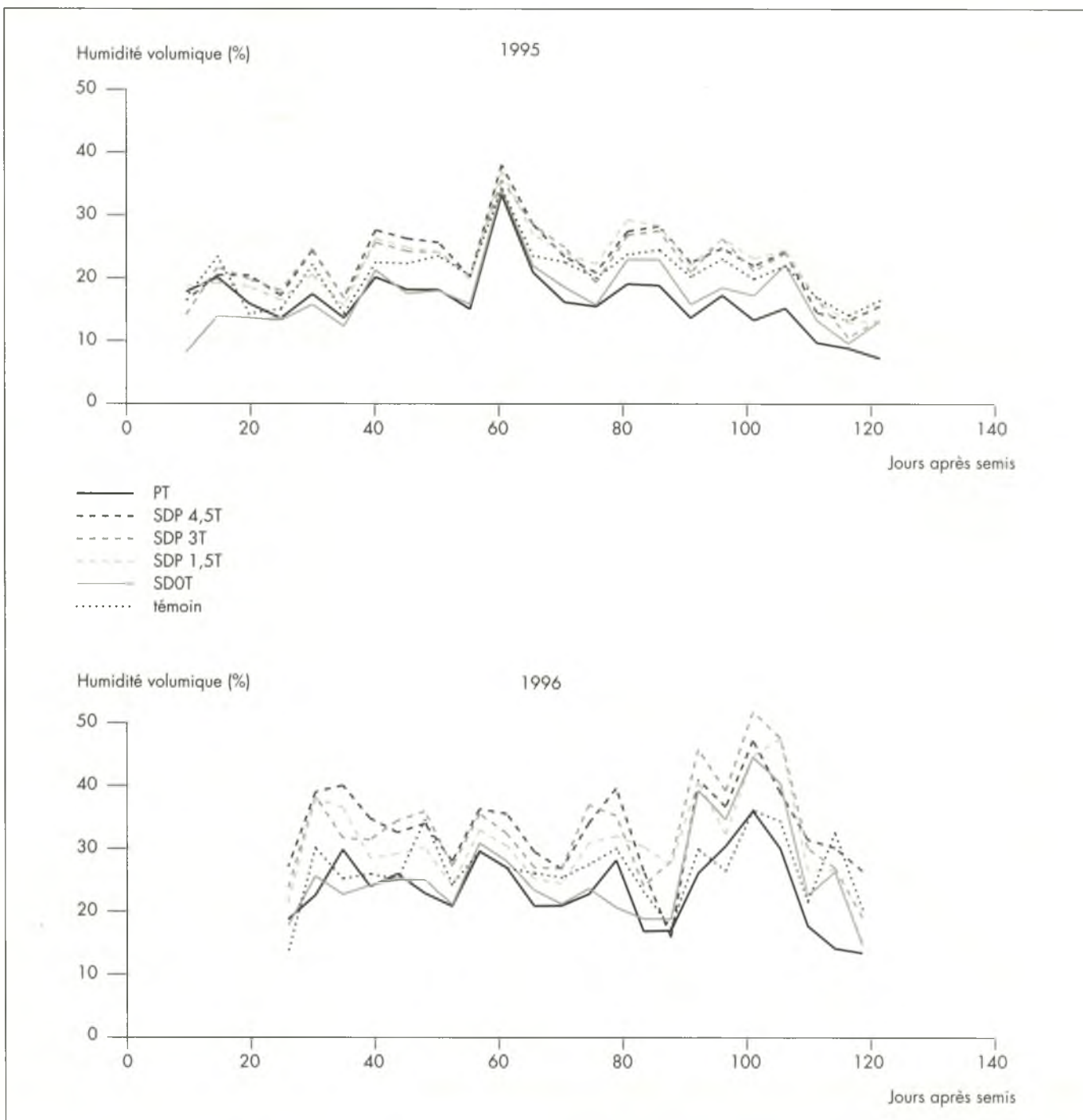
Figure 8. Ruissellement pour six événements pluvieux forts pendant le cycle de culture en fonction de la préparation du sol (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco, 1995).

traitement n'a dépassé 70 % en 1995). Les faibles densités, 40 000-50 000 plantes/ha avec un inter-rang de 0,80 m, et la croissance réduite des cultivars employés font que la culture n'arrive jamais à couvrir complètement le sol. La couverture vive ainsi créée semble avoir un effet limité sur les pertes par ruissellement (SCOPEL et CHAVEZ, 1997). Ceci explique probablement que, sur l'ensemble du cycle, il y ait eu peu de différence pour le ruissellement

entre le témoin sol nu et le semis direct sans paillis. Toutefois, les traitements avec paillis, qui ruissellent moins, sont aussi ceux qui présentent les meilleurs taux de couverture par les cultures, ce qui ne fait qu'accentuer leur avantage en fin de cycle.

En considérant chaque événement pluvieux de 1995, pour chaque traitement (figure 11), il est possible d'établir une relation linéaire entre hauteur d'eau précipitée et lame

Figure 9. Evolution de l'humidité de surface du sol (0-10 cm) pendant le cycle de culture en fonction de la préparation du sol (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco, 1995, 1996). 1995 : année sèche ; 1996 : année humide.



ruisselée du type (SCOPEL *et al.*, 1998) :

$$R = \epsilon (P-L) \quad (5)$$

avec R, lame ruisselée (mm) ; P, hauteur d'eau précipitée (mm) ; L, seuil de début de ruissellement (5 mm pour tout traitement) ; ϵ , coefficient de ruissellement (0,77 pour le témoin sol nu, 0,72 pour le semis direct sans paillis, 0,54 pour la préparation traditionnelle et [-0,33 Q +

0,33] pour les traitements avec paillis).

Nous avons utilisé un modèle linéaire car, en 1995, tous les événements de plus de 5 mm ont été d'intensités comparables (maxima en 30 mn, souvent supérieurs à 30 mm/h). En comparant les lames ruisselées observées en 1996 et celles calculées par ce modèle (figure 12), on constate que les valeurs calculées suresti-

ment généralement le ruissellement en début de cycle surtout pour la préparation traditionnelle. Ensuite, elles le sous-estiment pour les événements très forts et très intenses, en particulier pour les traitements paillés et un peu pour la préparation traditionnelle. Sur l'ensemble du cycle, le ruissellement du témoin sol nu, du semis direct sans paillis et de la préparation traditionnelle est correctement estimé mais celui du semis direct avec paillis est sous-estimé de 30 % environ. Même s'il rend compte de grandes différences de ruissellement en présence de paillis, ce modèle reste spécifique des conditions propres au site et demande à être validé, voire adapté, dans d'autres conditions de sol, de pente, d'intensité de pluies, etc.

La modélisation du bilan hydrique sous paillis

Les fonctions correspondant à l'interception de l'eau de pluie par les résidus, au ruissellement et à l'interception du rayonnement ont été introduites dans un modèle simple de bilan hydrique, qui rend ainsi compte de leurs interactions. Il s'agit du modèle BILHYNA développé par la chaire de bioclimatologie de l'Institut national agronomique de Paris-Grignon (TUZET *et al.*, 1992). C'est un modèle monoréservoir au niveau du sol, il calcule sur un pas de temps journalier, il sépare évaporation du sol et transpiration de la culture et, enfin, il est peu exigeant en variables d'entrée.

Il est donc compatible avec la prise en compte des effets du paillis décrits précédemment. Ces effets ont été introduits en rajoutant un réservoir supplémentaire correspondant au paillis, dans lequel la plante ne peut pas puiser d'eau. Chronologiquement, le modèle de ruissellement est d'abord appliqué à la pluie en fonction du traitement simulé, ensuite le premier réservoir

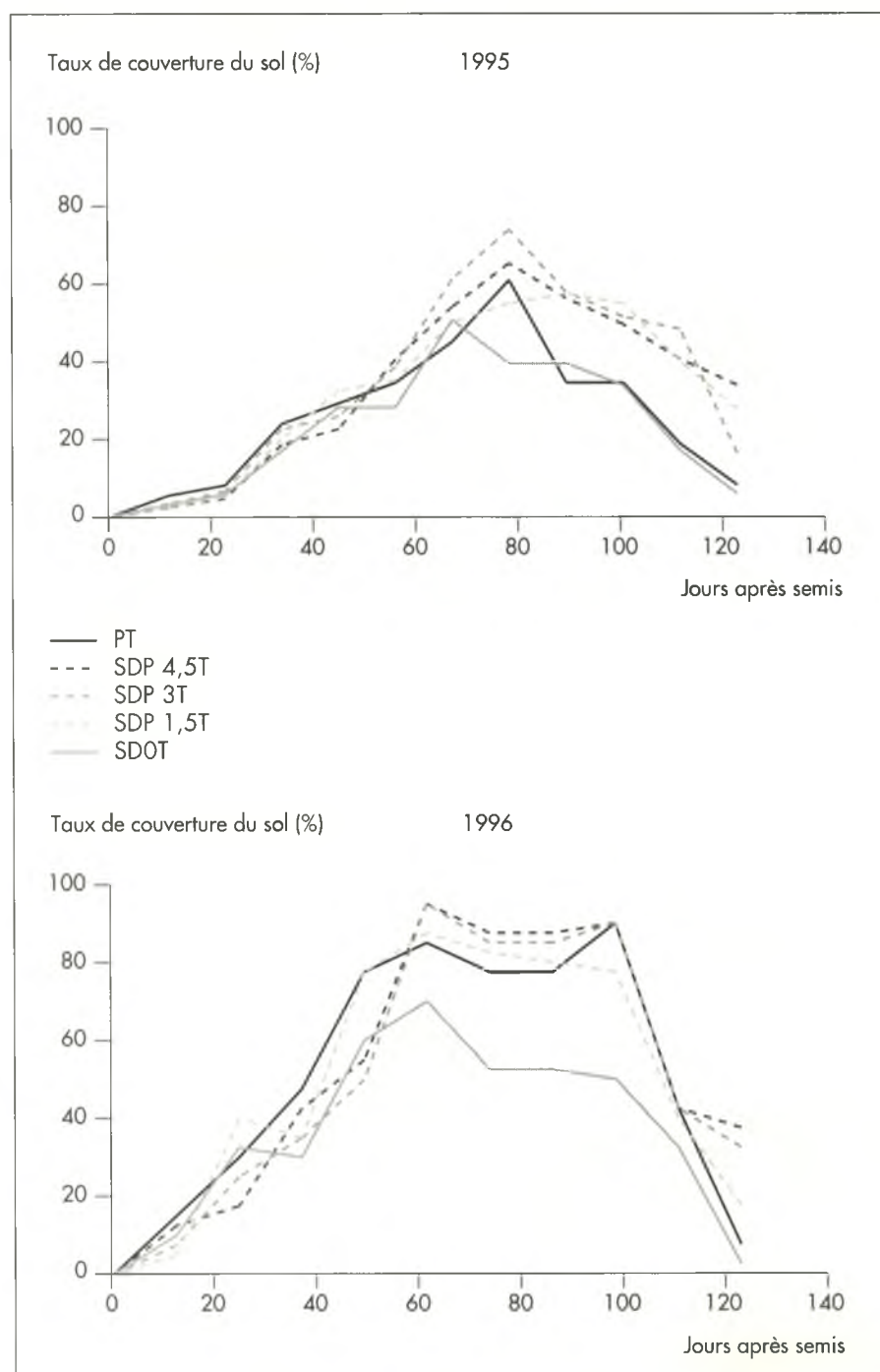


Figure 10. Evolution de la couverture du sol par la culture du maïs en 1995, année sèche, et en 1996, année humide (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco).

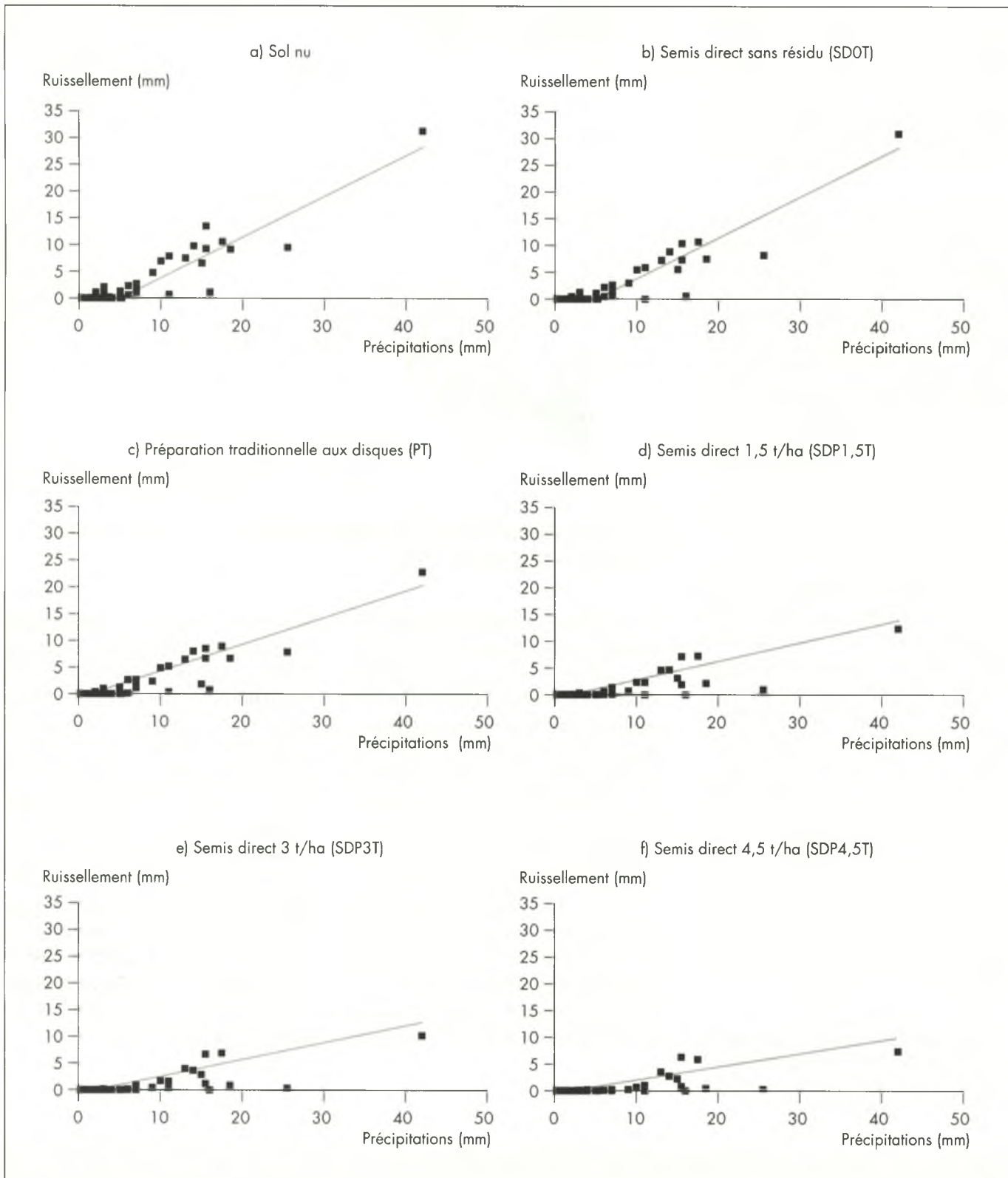


Figure 11. Relations entre lame ruisselée et pluie totale lors de différents événements pluvieux de 1995 pour six situations de préparation du sol (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco). Valeurs mesurés pour :

- a) Sol nu,
- b) Semis direct sans résidu (SDOT),
- c) Préparation traditionnelle aux disques (PT),
- d) Semis direct avec 1,5 t/ha (SDP1,5T),
- e) Semis direct avec 3 t/ha (SDP3T),
- f) Semis direct avec 4,5 t/ha (SDP4,5T).

paillis se remplit lorsqu'il est présent, enfin le réservoir sol se remplit à son tour. Le rayonnement est intercepté successivement par la culture, le paillis et le sol, de manière à calculer la demande évaporative pour le sol, pour le paillis et pour la plante.

L'application de ce modèle aux traitements étudiés en 1995 a permis de quantifier de façon comparative les effets du paillis (tableau 2). Les pertes dues à l'interception directe de l'eau par les résidus restent limitées : moins de 10 % sur le total des pluies. Rappelons que cet effet négatif du paillis est systématiquement surestimé par la modélisation retenue, tant par l'eau stockée que par la vitesse de séchage : il est donc sans commune mesure avec les deux effets positifs pris en compte. Le modèle montre toute l'importance de l'effet sur le ruissellement : les pertes ont diminué de 50 % en présence de paillis. On constate enfin que l'effet sur l'évaporation du sol est loin d'être négligeable, malgré les taux de couverture restreints qu'assurent les paillis étudiés : la diminution des pertes par évaporation est aussi de 50 %, du même ordre que celles sur le ruissellement. Il y a là matière à recherche, c'est pourquoi une étude plus précise sur l'effet évaporation du sol a été engagée dans le cadre d'un doctorat sur l'étude mécanistique très fine des effets du paillis sur chaque paramètre du bilan hydrique.

5. Cette réduction des pertes s'entend sur la totalité des événements pluvieux et pour chacun, puisque les effets sont stables sur l'ensemble du cycle.

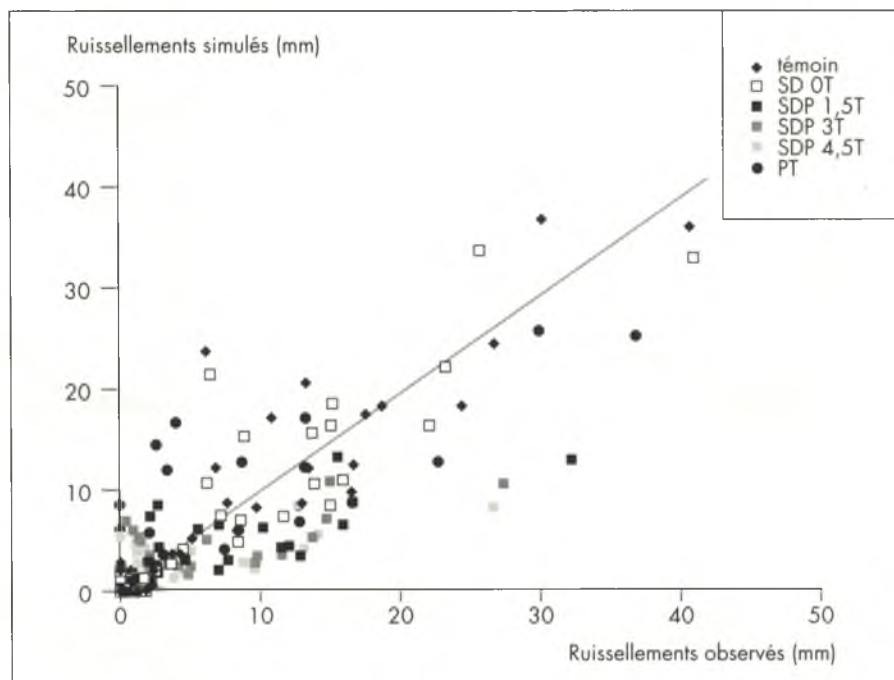


Figure 12. Comparaison entre le ruissellement observé et le ruissellement simulé (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco, 1996).

En effectuant la simulation du bilan hydrique par le modèle, on voit que les pertes en eau peuvent être réduites de moitié⁵, grâce à la présence du paillis, ce qui revient à une augmentation de l'eau disponible sur le cycle de plus de 30 % (tableau 2). Cela permet au maïs de transpirer plus en semis direct paillé et d'atteindre des taux de satisfaction de ses besoins largement meilleurs (> 75 % ; tableau 2) qu'avec les autres traitements (de l'ordre de 50 % seulement), malgré une demande plus élevée relative à des plantes plus grandes et à une année particulièrement sèche. Si on analy-

se la satisfaction de ces besoins dans le temps, on s'aperçoit qu'en semis direct sans paillis ou en préparation traditionnelle, le manque d'eau apparaît vers 80 jours après semis (ARREOLA, 1996), ce qui correspond au début de sénescence précoce des feuilles. On comprend alors pourquoi, dans ces zones sèches, les rendements sont toujours en faveur des traitements paillés dès les premières années d'application (figure 13). La production de grains peut être améliorée de 30 à 50 % avec le semis direct avec paillis de résidus, par rapport aux préparations traditionnelles du sol à l'offset.

Tableau 2. Valeurs simulées des composantes du bilan hydrique modifiées par la présence du paillis (355 mm de pluie sur la période étudiée en 1995).

	Ruissellement (mm)	Evaporation paillis (mm)	Evaporation sol (mm)	Total pertes (mm)	ETC (mm)	ETC/ETM (%)
SD0T	125	0	89	214	173	54
SDP1,5T	52	10	56	118	258	74
SDP4,5T	41	29	35	105	265	84
PT	94	0	103	197	169	53

ETC : transpiration réelle de la culture sur le cycle.

ETC/ETM : taux de satisfaction des besoins de la culture sur le cycle.

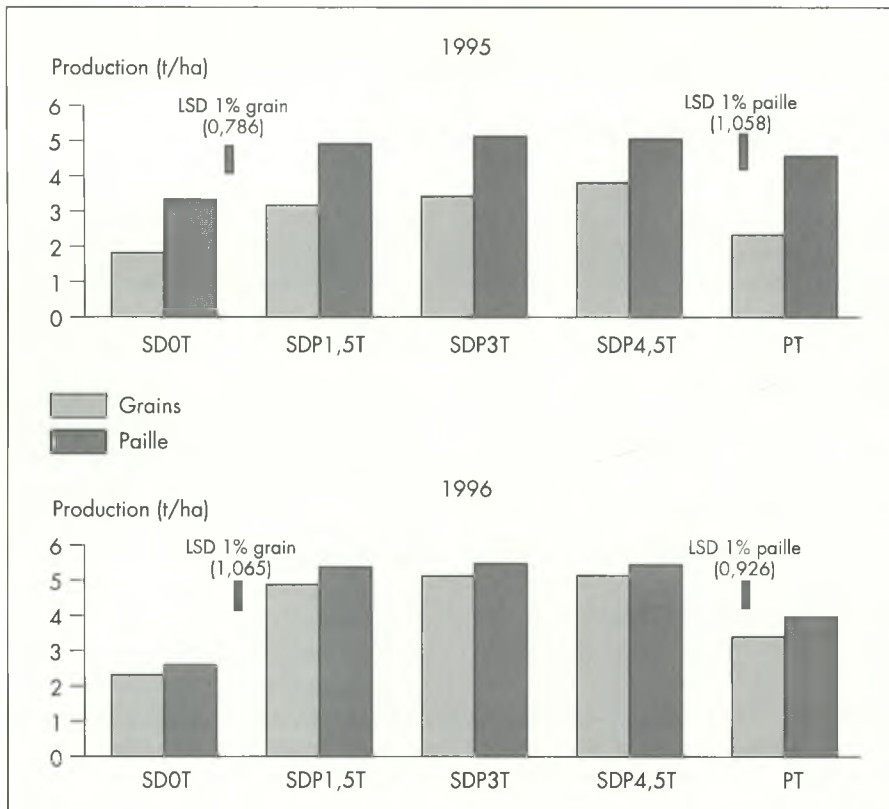


Figure 13. Rendements en maïs, en zone sèche, pour les deux années contrastées : 1995, année sèche, et 1996, année humide (La Tinaja, San Gabriel, Jalisco).



4. Les résidus de maïs jouent un rôle de barrière mécanique contre les processus d'érosion du sol dus au ruissellement.

Conclusion : des recherches plus pointues

Le semis direct avec paillis, même en faible quantité, présente un avantage indéniable pour mieux valoriser l'eau de pluie. L'impact potentiel sur la production de maïs pluvial peut changer complètement l'intérêt économique de cette culture dans les zones sèches où il continuera traditionnellement à être cultivé. Le semis direct avec paillis a aussi des avantages à long terme pour le sol — porosité générale, infiltration, activité biologique, augmentation de la matière organique du sol, stockage de carbone... —, avantages dont nous n'avons pas parlé ici mais qui illustrent une gestion plus équilibrée des ressources naturelles dispo-

nibles, sans que l'on puisse quantifier exactement leur influence sur la productivité du maïs pluvial (SCOPPEL et CHAVEZ GUERRA, 1999).

Les principaux effets d'un paillis partiel de résidus sur le bilan hydrique d'un maïs pluvial ont pu être décrits et quantifiés. Il n'en reste pas moins que la validité du modèle de ruissellement demeure spécifique des conditions du site : un travail de doctorat plus mécanistique est en cours pour expliquer comment agit mécaniquement le paillis à l'échelle de chaque événement pluvieux. Cela apportera des éléments de réflexion pour connaître jusqu'à quel point ces effets sont extrapolables à d'autres conditions sans devoir installer des dispositifs d'essais coûteux et complexes. L'autre point qui justifie une étude davantage mécanistique est le fait que l'évaporation, modélisée ici indirectement par le biais de l'interception du rayonne-

ment, semble avoir un poids un peu élevé par rapport à celui des taux de couverture, qui apparaît moins important.

Néanmoins, le résultat le plus marquant est que ces effets du paillis aient pu être modélisés et introduits dans un modèle simple de bilan hydrique, permettant le suivi le plus fidèle possible de la valorisation de l'eau selon différentes techniques de préparation de sol. Ainsi, dans le cadre d'un autre travail de doctorat, cet outil sera couplé à un système d'information géographique et à sa base de données spatialisées. Nous espérons alors obtenir une carte des potentialités du semis direct avec paillis de résidus à mieux satisfaire les besoins en eau du maïs en conditions pluviales. Ce type de résultats peut être intéressant pour la prise de décision des politiques, des groupements de producteurs ou même des scientifiques.

Des difficultés techniques freinent la diffusion : une nouvelle phase est engagée pour le projet

Les avantages, à court terme sur la valorisation de l'eau pluviale et à long terme sur la fertilité des sols (au sens large), ne doivent pas faire oublier que des problèmes techniques persistent qui, en conditions paysannes, peuvent annuler les bénéfices du semis direct sur paillis (SCOPEL, 1994). Des solutions doivent encore être développées pour la maîtrise des adventices, point important en culture de maïs (CLAVIER, 1998). Une lutte fondée exclusivement sur des herbicides chimiques rendrait le semis direct sur paillis peu abordable par les petits producteurs, par manque de trésorerie pour les acheter et parce que leur expérience des produits et de leur mode d'application est très limitée. De même, les semoirs actuellement disponibles au Mexique, en traction animale

ou en motorisation, sont peu performants pour les sols durs ou pierreux ou lorsque la quantité de résidus dépasse 5 à 6 t/ha (SCOPEL, 1999). Là aussi, il est possible d'adapter des innovations largement diffusées dans d'autres régions du monde. Enfin, un des facteurs les plus importants pour le semis direct en zone sèche est la compétition avec l'élevage. Une gestion intégrée de la biomasse est indispensable, comme l'amélioration de la ressource fourragère disponible pendant la saison sèche, soit de façon indépendante de la culture (pâturage maintenu en vert plus longtemps, haies d'arbres fourragers, etc.), soit liée à la culture (association de plantes, couverture vive, cultivars plus productifs, etc.). Ces questions de gestion s'abordent à l'échelle du systè-

me de culture, au sein de l'exploitation (complémentarité et accès aux ressources fourragères), elle-même élément d'un espace rural (contrôle des pâtures).

Ces problèmes ne s'expriment pas de la même façon selon les producteurs (JOURDAIN et SCOPEL, 1999). C'est pour cela que les systèmes fondés sur le semis direct avec paillis doivent encore être diversifiés en fonction des conditions rencontrées au Mexique. Cette adaptation sera réalisée en étroite collaboration avec les producteurs, qui sont les principaux demandeurs de solutions palliant les difficultés qu'ils affrontent dans un marché de plus en plus ouvert et compétitif : c'est l'objet d'une deuxième phase du projet qui commence en 1999 pour une durée de 3 à 5 ans.



L'effet du paillis sur l'alimentation en eau de la culture est directement visible, en particulier lors d'épisodes de sécheresse. A gauche, le maïs cultivé traditionnellement, dont les feuilles recroquevillées et flétries traduisent le déficit hydrique. A droite, le maïs cultivé en semis direct sur paillis partiel ne souffre pas de manque d'eau.

Bibliographie

ARREOLA TOSTADO J.M., 1996. Etude et modélisation de l'effet des paillis sur le bilan hydrique. Le cas du semis direct sous paillis au Mexique. Mémoire de Dea, Ustl, Montpellier, France, 82 p. + annexes.

CLAVERON ALONSO R., VELAZQUEZ GARCIA J.J., 1997. Avances de investigación en labranza de conservación en el Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias. In Memoria del taller, Transferencia de labranza de conservación para maíz de temporal en Jalisco, SCOPEL E. (Ed.), Cimmyt, Inifap, Cirad, Seder, Guadalajara, México, 11-13 mars 1996. Cimmyt, México, p. 3-5.

CLAVIER P., 1998. Les adventices et leur contrôle dans les systèmes de culture de maïs pluvial en semis direct avec paillis de résidus, État de Jalisco, Mexique. Mémoire, Cnearc, Montpellier, France, 55 p. + annexes.

Fira, 1990. Labranza de conservación: una alternativa para aumentar la producción del agro mexicano. Boletín informativo de FIRA, Morelia, Mich., Mexique, 44 p.

GLO J., MARTIN N., 1995. Le système maïs-élevage dans deux régions de l'état de Jalisco, Mexique : typologie, fonctionnement et discussion sur l'adoption de la technique du semis direct avec paillis de résidus. Mémoire, Cnearc, Montpellier, France, 78 p.

Inegi, 1997. Censo Agrícola y Ganadero 1994: datos definitivos (CD-ROM). INEGI, Aguascaliente, México.

JOURDAIN D., SCOPEL E., 1999. Impact of conservation tillage on maize cropping systems productivity and stability: a case study in western Mexico, Working Document. Cimmyt, México.

PEREZ P., 1994. Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum (Sénégal). Du diagnostic à l'aménagement de parcelle. Thèse de doctorat en sciences agronomiques, Cirad, Montpellier, France, 250 p.

Sagar, 1996. Estadística de cierre de cosecha del ciclo P.V. 1995 del DDR VII (cd. Guzmán). Departamento de Informática del Dist. de Des. Rural VII, Cd. Guzmán, Jal.

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. Thèse de doctorat, Ina-pg, Paris, France. 353 p. + annexes.

SCOPEL E., 1999. Le semis direct avec paillis de résidus, vers de nouveaux itinéraires techniques pour la production de maïs pluvial dans l'ouest mexicain. In Atelier international sur la gestion agrobiologique des sols et des systèmes de culture, Antsirabe, Madagascar, Cirad, Fofifa, Anae, Tafa, 23 au 29 mars 1998. Cirad, Montpellier, France.

SCOPEL E., CHAVEZ GUERRA E., 1997. Efectos de labranza de conservación sobre el balance hídrico del cultivo de maíz de temporal. In Avances de investigación en labranza de conservación, CLAVERAN ALONSO R., VELAZQUEZ GARCIA J., MUÑOZ VILLALOBOS J.A., TISCAREÑO LOPEZ M., SALINAS GARCIA J.R., NAJERA

RINCON M.B. (Eds), SAGAR/INIFAP- Produce/CENAPROS, Morelia, Michoacán, Mexique, p. 91-106.

SCOPEL E., CHAVEZ GUERRA E., 1999. Impacto agronómico de Labranza de Conservación sobre productividad de maíz de temporal en el occidente de México. Communication présentée à la XLV^e réunion annuelle du Pccmca, Guatemala city, Guatemala, 12 au 15 avril 1999.

SCOPEL E., MULLER B., ARREOLA TOSTADO J. M., CHAVEZ GUERRA E., MARAUX F., 1998. Quantifying and modeling the effects of a light mulch of residue on water balance. Application to rainfed maize in West Mexico. Communication présentée au 16^e congrès international de la science du sol, Montpellier, France, 20-26 août 1998.

SEGUY L., BOUZINAC S., TRENTINI N., CORTES N.A., 1996. L'agriculture brésilienne des fronts pionniers. Agriculture et développement 12 : 2-59.

STEPHAN A., 1996. Stratégies des producteurs de maïs dans l'Etat de Jalisco (Mexique). Mémoire de Dea, Ensam, Montpellier, France, 105 p. + annexes.

TUZET A., PERRIER A., MASSAD C., 1992. Crop water budget. Estimation of irrigated requirement. ICID Bulletin 41: 1-17.

UNGER P.W. (Ed.), 1994. Managing Agricultural Residues. Lewis Publishers, 448 p.



Semis direct du maïs sur un paillis d'environ 2 t/ha de matière sèche en parcelle paysanne. La couverture formée par le paillis est partielle et irrégulière.

Résumé...Abstract...Resumen

E. SCOPEL, E. CHAVEZ GUERRA, J.M. ARREOLA TOSTADO
— **Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest mexicain : une histoire d'eau ?**

Dans les zones à pluviométrie limitée comme celles de l'ouest mexicain, une bonne valorisation de l'eau est indispensable pour assurer une production de maïs pluvial satisfaisante et régulière. A ce titre le semis direct avec paillis de résidus de la récolte antérieure est une solution intéressante. Cependant, dans cette région du Mexique, une bonne partie des pailles de maïs est pâturée par le bétail à la saison sèche. On ne peut donc espérer utiliser qu'une quantité limitée de résidus pour assurer une protection très partielle du sol. L'Inifap, le Cimmyt et le Cirad ont engagé un projet sur le semis direct avec paillis de résidus, qui comprend une étude pour modéliser et quantifier les effets d'un paillis partiel de résidus sur les termes du bilan hydrique de la culture de maïs pluvial. Un paillis, même en quantité faible (1,5 t/ha), permet d'améliorer considérablement le stockage de l'eau de pluie (+ 50 %) tout en réduisant les pertes par évaporation directe du sol. On peut améliorer la disponibilité en eau pour la culture de l'ordre de 30 % et la récolte de 30 à 50 % en année sèche, par rapport aux techniques traditionnelles de préparation du sol aux outils à disques. Cet effort de recherche sur les mécanismes impliqués et leur modélisation nous permet de mieux comprendre les effets du semis direct avec paillis en zones sèches et de mieux extrapoler les avantages potentiels de cette technique selon les conditions d'application.

Mots-clés : semis direct, paillis, bilan hydrique, modélisation, maïs, région sèche, Mexique.

E. SCOPEL, E. CHAVEZ GUERRA, J.M. ARREOLA TOSTADO
— **Direct seeding with crop residue mulch in western Mexico: can it improve soil water contents?**

In zones with limited rainfall such as western Mexico, it is essential to make optimum use of what little water is available to ensure satisfactory, consistent rainfed maize yields. In this respect, direct seeding on a mulch comprising the residue of the previous crop is an interesting solution. However, in this region of Mexico, a high proportion of the maize residue is eaten by cattle during the dry season, leaving only a limited amount to use as mulch that consequently provides very partial soil protection. INIFAP, CIMMYT and CIRAD have embarked upon a project on direct seeding with crop residue mulch, which includes a study to model and quantify the effect of partial residue mulch on the soil water balance under rainfed maize. Even small quantities of mulch (1.5 t/ha) substantially improve rainwater storage (+ 50%), whilst cutting losses through direct evaporation from the soil. Water availability for the crop is improved by some 30% and yields by 30 to 50% in a dry year, compared to land prepared using traditional disc ploughing techniques. This research work on the mechanisms involved and on modelling them has provided a clearer understanding of the effects of direct seeding on mulch in dry zones and enabled a more effective extrapolation of the potential advantages of this technique depending on application conditions.

Keywords: direct seeding, mulch, water balance, modelling, maize, dry region, Mexico.

E. SCOPEL, E. CHAVEZ GUERRA, J.M. ARREOLA TOSTADO
— **La siembra directa con pajote de residuos en el oeste mejicano: ¿una historia de agua?**

En las zonas con pluviometría limitada como las del oeste mejicano, una buena valorización del agua resulta indispensable para asegurar una producción de maiz pluvial satisfactoria y regular. Por esta razón la siembra directa con pajote de residuos de la cosecha previa es una solución interesante. No obstante, en esta región de Méjico, una buena parte de las pajas de maiz es pastoreada por el ganado en temporada seca. Por lo tanto, no se puede esperar utilizar sino una cantidad limitada de residuos para constituir el pajote y asegurar una protección muy parcial del suelo. Inifap, Cimmyt y Cirad emprendieron un proyecto sobre la siembra directa parcial de residuos, que incluye un estudio para modelizar y cuantificar los efectos de un pajote parcial de residuos en los términos del balance hídrico del cultivo del maiz pluvial. Un pajote, hasta en cantidad baja (1,5 t/ha), permite mejorar considerablemente el almacenamiento del agua de lluvia (+ 50%) a la par de reducir las pérdidas mediante evaporación directa del suelo. Se puede mejorar la disponibilidad de agua para el cultivo del orden de un 30% y la cosecha de un 30 a un 50% en año seco, en comparación con las técnicas tradicionales de preparación del suelo con discos. Este esfuerzo de investigación sobre los mecanismos implicados y su modelización nos permite mejor comprender los efectos de la siembra directa con pajote en zonas secas y mejor extrapolar las ventajas potenciales de esta técnica acorde a las condiciones de aplicación.

Palabras-claves: siembra directa, pajote, balance hídrico, modelización, maiz, región seca, México.