

Mode de travail du sol, ruissellement et propriétés hydrodynamiques sur un dispositif expérimental de l'Ouest de la France

D. Heddadj₍₁₎, C. Gascuel-Oudou₍₂₎, P. Cotinet₍₁₎ et Y. Hamon₍₂₎

(1) Station expérimentale de Kerguehenec, Chambre d'agriculture du Morbihan, 56500 Bignan, France.

(2) UMR Sol Agronomie Spatialisation INRA-ENSAR, 65 Route de Saint Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes Cedex, France.

RÉSUMÉ

Les techniques sans labour sont en plein essor, alors qu'il existe peu de références en France de leur impact sur les caractéristiques hydrodynamiques des sols et le ruissellement. Un dispositif expérimental en rotation maïs/blé a mis en comparaison, dans le contexte de l'Ouest de la France, un travail du sol avec labour avec deux modalités en non labour depuis quatre ans, l'une en semis direct, l'autre en travail superficiel du sol. Aucune opération de décompaction du sol n'a été réalisée. Chaque modalité comporte trois sous parcelles sur lesquelles le ruissellement de surface a été suivi sur les périodes clés. Les mesures de conductivité hydraulique proche de la saturation et des tests de simulation de pluie complètent ce suivi. La sensibilité des sols au ruissellement est très variable selon les sous parcelles, mais reste globalement faible quelle que soit la modalité. En condition de pluies naturelles et à un événement près, seuls des événements hivernaux conduisent à du ruissellement durant les quatre années de suivi. Les mesures sous simulation de pluie montrent que la sensibilité des sols au ruissellement est : plus faible en non labour qu'en labour en conditions de printemps, où le ruissellement apparaît contrôlé par les états de surface du sol ; plus forte en non labour qu'en labour en conditions hivernales, où le ruissellement apparaît contrôlé par les propriétés hydrodynamiques et les conditions hydriques du profil de sol. Ces résultats conduisent à préconiser en hiver, dans certaines conditions pédo-climatiques et agronomiques, une gestion attentive des états structuraux du sol en non labour, notamment pour l'application hivernale de pesticides, afin de préserver la qualité des eaux de surface.

Mots clés

Non labour, ruissellement, conductivité hydraulique, sols limoneux.

SUMMARY

SOIL TILLAGE, OVERLAND FLOW AND HYDRODYNAMIC PROPERTIES ON AN EXPERIMENTAL FIELD IN WESTERN FRANCE

No-till systems are increasing, despite few references are available in France on the impact of these farming systems on hydrodynamic soil properties and overland flow. Three systems were compared on an experimental field cultivated under maize-wheat rotation since

four years in western of France : one conventionally tilled system, one reduced tilled system and one no-tilled system. Overland flow has been monitored on three plots per system during key periods of these four last years. Hydraulic conductivity near saturated conditions was measured and rainfall simulator tests was performed. Overland flow was very variable from one plot to another, but stay low under natural rainfalls in this study case. It occurred only during few winter rainfall events, excepted for one spring event. Rainfall simulator tests showed that overland flow was lower in two no-till systems in spring and summer and higher in winter than in tilled systems. The hypothesis is that overland flow was controlled by soil surface conditions in spring and summer and by hydrodynamics properties and hydric conditions of the soil profile in winter. These results required some caution on agricultural practices in no-till systems, particularly in winter and for some pedological and climatic conditions, particularly in using herbicides, in order to preserve water quality.

Key-words

No tillage, surface runoff, hydraulic conductivity, loamy soils.

RESUMEN**MODALIDADE DE TRABAJO DEL SUELO, ESCURRIMIENTO Y PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS DE LOS SUELOS CON “NO LABRANZA” SOBRE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DEL OESTE DE FRANCIA**

Las técnicas sin labranza son en desarrollo fuerte, mientras que existen pocas referencias en Francia de su impacto sobre las características hidrodinámicas de los suelos y del escurrimiento. Un dispositivo experimental en rotación maíz - trigo comparó, en el contexto del oeste de Francia, un trabajo del suelo con labranza con dos modalidades de no labranza, una en siembra directa, la otra en trabajo superficial del suelo. Cada modalidad comporta tres subparcelas sobre las cuales el escurrimiento de superficie se siguió durante cuatro años durante algunos periodos clave. Las medidas de conductividad hidráulica cerca de la saturación y las medidas de simulación de lluvia completan el seguimiento. La sensibilidad de los suelos al escurrimiento es muy variable según las subparcelas, pero queda globalmente pequeña cual sea la modalidad. En condición de lluvias naturales y salvo un acontecimiento, solamente acontecimientos invernales conducen a escurrimientos durante los cuatro años de seguimiento. Las medidas bajo simulación de lluvia muestran que la sensibilidad de los suelos al escurrimiento es mas pequeña en no labranza que en labranza en condición de primavera donde el escurrimiento aparece controlado por los estados de superficie del suelo, mas fuerte en no labranza en condiciones invernales donde el escurrimiento aparece controlado por las propiedades hidrodinámicas y las condiciones hídricas del perfil de suelo. Los resultados conducen preconizar en invierno en ciertas condiciones pedo-climáticas y agronómicas, una gestión atenta de los estados de superficie del suelo en no labranza, en particular para la aplicación invernal de pesticidas, afín de preservar la calidad de las aguas de superficie.

Palabras claves

No labranza, escurrimiento, conductividad hidráulica, suelos limosos.

Les techniques sans labour se sont développées de manière importante dans le monde durant les quarante dernières années. Aujourd'hui aux Etats-Unis, environ 40 % de la surface agricole utile est conduite sans labour. En Europe, ces techniques se sont développées mais restent marginales. En France, seuls 2,5 sur 33 millions d'hectares de SAU sont cultivés sans labour, soit un peu moins de 10 % de la SAU, mais cette surface ne cesse de croître. En Bretagne, région d'élevage, les techniques sans labour ne concerneraient que 2 % des surfaces en maïs et blé mais suscitent un grand intérêt auprès des agriculteurs (Gascuel-Oudoux et Heddadj, 1999 ; Heddadj et Gascuel-Oudoux, 2001). A titre d'exemple, sur le bassin versant du Frémur (17 km²), bassin versant de démonstration du programme Bretagne Eau Pure, 70 % des agriculteurs l'utilisent : 15 % depuis 10 ans, 35 % depuis 2-3 ans à titre régulier, 20 % depuis un an ou deux sur une partie de leur exploitation et à titre expérimental (Le Hénaff, 2002). Sur ce bassin versant, 75 % de la sole de maïs est en non-labour. Ce sont surtout les éleveurs hors sol ayant une exploitation de taille importante qui l'adoptent. Dans ce cas, comme de manière générale, les raisons invoquées pour l'adoption de ces techniques culturales en région d'élevage sont en premier lieu, au dire des agriculteurs, le gain de temps et la réduction des charges de mécanisation. Des raisons agronomiques et environnementales sont également mentionnées. Elles portent sur la valorisation des effluents d'élevage, le rendement des cultures, la conservation des sols. Cette évolution rapide fait également place à des inquiétudes. Dans certaines successions culturales, l'interculture est recommandée, voire incitée par des aides dans certains cadres contractuels (Zone d'Action Concertée, Contrat d'Agriculture Durable) qui vont en général de paire avec une interdiction de leur destruction chimique. Hors de ces cadres contractuels, le recours à la destruction chimique des intercultures reste une pratique courante, particulièrement en non-labour. Dans l'exemple du Frémur évoqué ci-dessus, 50 % des intercultures sont détruites chimiquement. L'enjeu environnemental de ces techniques porte donc aussi sur la qualité des eaux. Il est particulièrement important dans le contexte de l'Ouest de la France qui doit faire face à une dégradation continue de la qualité des eaux. Cet enjeu n'est cependant ni nouveau ni limité à ce contexte (Boiffin et Monnier, 1994 ; Guérif, 1994).

Le labour crée directement un fractionnement de la structure du sol favorable à l'infiltration, mais ce fractionnement est plus ou moins pérenne selon les contextes pédoclimatiques. Dans les techniques sans labour, ce fractionnement est attendu d'une meilleure activité biologique, la macrofaune du sol n'étant pas perturbée par le labour mais stimulée par la présence de résidus de végétation en surface. Des interventions techniques peuvent également permettre ce fractionnement (travail superficiel du sol, décompactage...). Par ailleurs, la protection des sols et l'augmentation de la détention superficielle par les résidus de végétation, et dans une moindre mesure, la concentration de la matière organique en surface, contribuent également à limiter le ruissellement dans les techniques sans labour (Jordahl et Karlen, 1993). L'importance de ces processus dépend du contexte pédoclimatique et du système de culture, des états de

surface, de l'état hydrique et structural du sol au moment de la pluie, située dans le cycle hydrologique et l'itinéraire cultural. La littérature fournit ainsi des résultats contradictoires. La limitation du ruissellement en condition de non-labour est soulignée par de nombreux travaux (Adams, 1966 ; Gilley *et al.*, 1986 ; Khan *et al.*, 1988 ; Mc Gregor *et al.*, 1990 ; Scopel, 1994). Elle n'est cependant pas observée de manière systématique. Certains auteurs signalent parfois, en non-labour, un tassement du sol (Voorhees et Lindstrom, 1983), une infiltrabilité plus faible (Dos Rei Castro, 1996), une augmentation du ruissellement (Gaynor *et al.*, 1995 ; Truman *et al.*, 2003). Cousin *et al.* (2004) soulignent également des résultats contradictoires sur l'influence des systèmes sans labour sur la structure et les propriétés de transfert de l'eau dans le sol. Des travaux récents ont permis d'améliorer la compréhension et la modélisation des processus de transfert dans ces systèmes de culture sans labour, notamment sur l'effet du mulch (Findeling, 2001). Leur utilisation pour prédire le ruissellement dans des situations pédoclimatiques très diverses reste cependant limitée du fait principalement de la difficulté à modéliser l'évolution temporelle des états de surfaces, de la structure et des propriétés hydrodynamiques des sols cultivés.

L'objectif de ce travail est d'apporter des références sur la sensibilité au ruissellement de sols cultivés en non labour : i) par la mesure de la fréquence et l'importance du ruissellement en conditions de pluies naturelles et contrôlées ; ii) par la mesure de la conductivité hydraulique des sols dans un domaine proche de la saturation. Ces références doivent permettre une discussion sur les facteurs explicatifs de la variabilité des situations observées. Ce travail s'appuie sur un essai mis en place depuis quatre ans, implanté dans le contexte de l'Ouest de la France, caractérisé par des sols limoneux, une saisonnalité marquée des états hydriques du sol et des processus de ruissellement, du fait de la présence de nappes libres proches de la surface en hiver (Cros-Cayot, 1996 ; Huang *et al.*, 2002).

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Site expérimental

Le site expérimental est situé sur le domaine de Kerguéhennec, à 35 km au nord-est de Vannes. L'essai est piloté par la Chambre d'Agriculture du Morbihan. La pluviométrie annuelle est de 890 mm. Les sols sont des Brunisols limoneux moyennement profonds sur micaschistes. Ils présentent trois horizons : un horizon L jusqu'à 25/30 cm, labouré ou anciennement labouré ; un horizon S, situé entre 25/30 cm et 45 cm ; un horizon C d'altération entre 45 et 90 cm. Les sols sont de texture limoneuse, riches en graviers de schistes et de quartz. Aucune trace d'hydromorphie n'est observée. La texture du sol est la suivante : 165 g.kg⁻¹ d'argile, 258 et 204 g.kg⁻¹ de limon fin et de limon grossier respectivement, 218 et 152 g.kg⁻¹ de sable fin et de sable grossier respectivement. Ils présentent une teneur en

Tableau 1 - Teneur en matière organique et rapport C/N à différentes profondeurs du sol**Table 1** - Organic matter content and C/N ratio at different soil depth

Modalité	Profondeur cm	MO g.kg ⁻¹	C/N
Labour	0 - 5	43	11
	5 - 10	42	11
	10 - 30	39	10
	30 - 50	24	9,6
Semi direct	0 - 5	47	10,9
	5 - 10	40	9,9
	10 - 30	37	9,9
	30 - 50	17	9,4
Travail superficiel	0-5	47	10,8
	5-10	42	10
	10 - 30	39	10,4
	30 - 50	21	10,2

matière organique de 44 g.kg⁻¹. Les analyses de sol faites au cours de l'hiver 2003 montrent un début de différenciation verticale de la teneur en matière organique, de l'ordre 10 g.kg⁻¹ entre la surface et 10 cm de profondeur (*tableau 1*). Le pH est faiblement acide, la capacité d'échange cationique inférieure à 10 %.

L'essai étudié, en rotation maïs-blé, a été mis en place en 2000 sur une parcelle de 1 ha, de pente 5,9 %. Cet essai fait suite à une rotation maïs-blé sans apport organique. Le maïs était présent au cours des printemps et été 2000, 2002 et 2004, le blé en 2001 et 2003. Un RGI a été mis en place, entre le blé et le maïs, au cours des hivers 2001-2002 et 2003-2004 (*tableau 2*). Le semis est réalisé dans le sens de la pente. La fertilisation est exclusivement minérale, de l'ordre de 150 unités d'azote pour le blé et de 120 pour le maïs.

L'essai comporte 10 sous parcelles de 6 m de large sur 50 m de long (*figure 1*). Ces sous parcelles sont isolées les unes des autres. Chacune est connectée à un collecteur des eaux de ruissellement par un réseau de gouttières. Cet essai a mis en comparaison une modalité en labour, à deux modalités en non labour, l'une en travail superficiel du sol, l'autre en semis direct. Aucune opération de décompaction du sol n'a été réalisée. Chacune de ces trois modalités comporte 3 répétitions. À ces neuf sous parcelles s'ajoute une sous parcelle en labour, maïs sans couverts végétaux, mise en place lors de l'hiver 2001 et dénommée « témoin ». Cette sous parcelle en sol nu comporte des repousses de blé assurant un recouvrement de la surface de l'ordre 50 %. Le labour est réalisé avec une charrue à socs classique qui retourne le sol sur 25 cm. Il est suivi d'une reprise à la herse rotative sur 5 cm d'épaisseur puis d'un semis combiné pour le blé et d'un semis décomposé pour le maïs.

Tableau 2 - Calendrier des interventions culturales et du suivi du ruissellement**Table 2** - Dates of agricultural operations and runoff monitoring

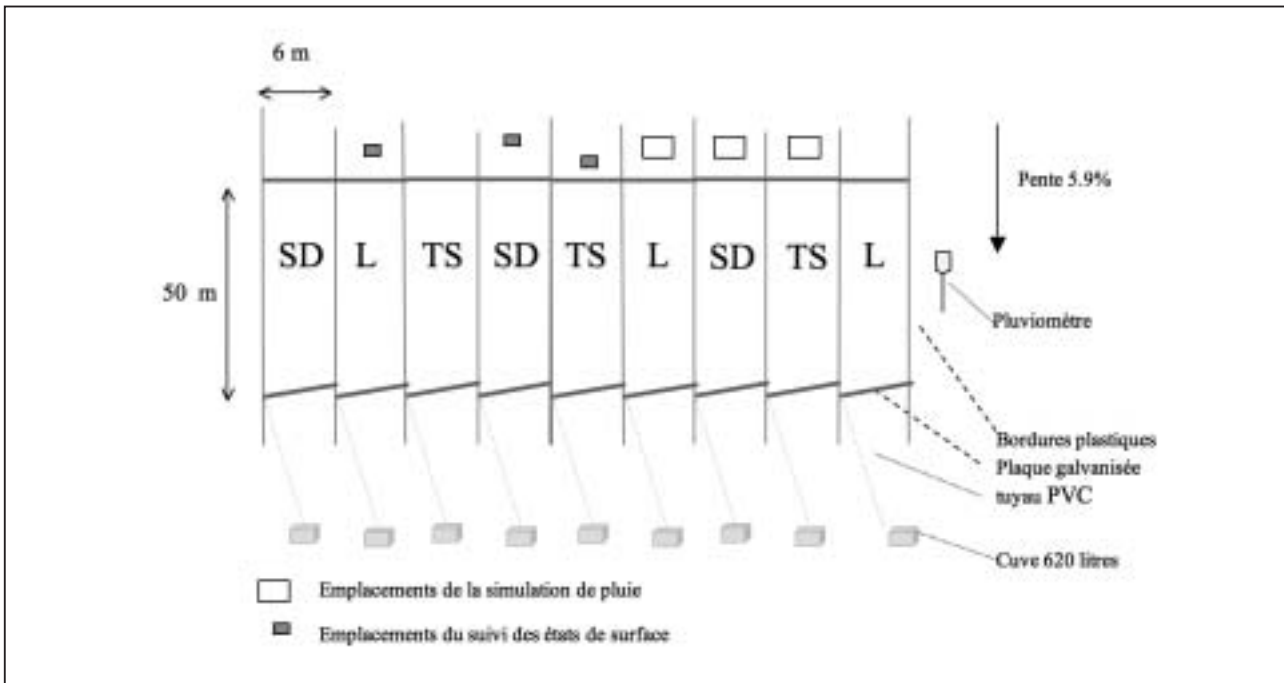
Culture	Intervention	date
Maïs 2000	Semis	4 mai 2000
	Début suivi ruissellement	30 mai 2000
	Fin de suivi et récolte	25 octobre 2000
Blé 2001	Labour+semis	27 octobre 2000
	Début suivi ruissellement	5 mars 2001
	Fin du suivi et récolte	10 août 2001
RGI 2002	Semis	4 septembre 2001
	Début suivi ruissellement	27 septembre 2001
	Fin du suivi	30 avril 2002
Maïs 2002	Semis	7 mai 2002
	Début suivi ruissellement	24 mai 2002
	Fin du suivi et récolte	fin octobre 2002
Blé 2003	Semis	5 nov.2002
	Début suivi ruissellement	19 décembre 2002
	Fin du suivi et récolte	4 août 2003
RGI 2004	Semis	7 septembre 2003
	Début suivi ruissellement	10 octobre 2003
	Fin du suivi	27 avril 2004
Maïs 2004	Semis	28 avril 2004
	Début suivi ruissellement	18 mai 2004
	Fin du suivi et récolte	fin octobre 2004

L'implantation du RGI est faite à l'aide d'un outil à dent. Le travail superficiel du sol est réalisé, quelle que soit la culture, avec un rotavator à dents qui travaille sur toute la surface sur une profondeur de 5 à 8 cm et associe un semis à la volée. Le semis direct n'engendre de travail du sol que sur la ligne de semis, sur une largeur de 2 à 3 cm par un semoir à disques pour le blé, et sur une largeur de 30 cm par un rotasemis pour le maïs.

Méthode

Sur la parcelle expérimentale, le ruissellement est collecté dans des cuves de 650 litres qui correspondent à l'interception, au maximum, d'une lame d'eau ruisselée de 2,5 mm. Le volume d'eau de ruissellement est mesuré après chaque événement pluvieux ruisselant, le débordement de cuve noté. Le suivi a été réalisé sur des périodes de quelques mois durant environ quatre années (*tableau 2*). Le ruissellement a également été mesuré en conditions de pluies contrôlées, par des simulations de pluie réalisées sous abri. Le simulateur de pluie utilisé est un simulateur de type IRD, comportant un asperseur animé d'un mouvement oscillant, une buse permettant d'assurer l'homogénéité de la pluie sur une

Figure 1 - Dispositif expérimental et instrumentation du site expérimental. L : labour ; TS : travail superficiel ; SD : semis direct
Figure 1 - Experimental site and devices. L : conventional tillage ; TS : reduced tillage ; SD : no tillage



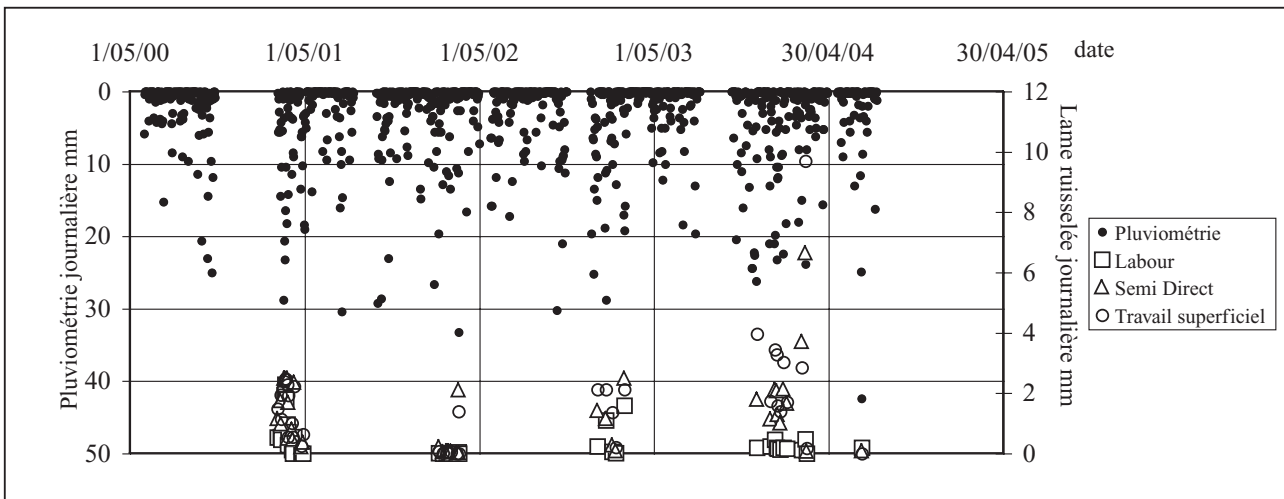
surface de quelques mètres carrés. La surface étudiée est de 1,5 m de large sur 4 m de long, considérée comme représentative de la parcelle, et comprenant, pour le maïs, deux inter-rangs, l'un tassé par passage de roue, l'autre non tassé. Une simulation de pluie a été réalisée au cours des printemps 2000, 2002 et 2004, sur maïs, au stade 3-4 feuilles, et au cours des hivers 2001, 2002 et 2003, respectivement sur blé et RGI, ce dernier assurant un recouvrement végétal du sol de l'ordre de 70 % de la surface. Des intensités de pluies de 50 mm.h⁻¹ au printemps avec une buse standard, de 30 et de 50 mm.h⁻¹ en hiver avec une buse produisant de fines gouttes, ont été appliquées afin de simuler, respectivement, des pluies orageuses de forte intensité pour la période de printemps, des pluies d'intensité modérée pour la période d'hiver. Ces pluies sont appliquées durant trois heures environ. Elles doivent être considérées plus comme des tests de sensibilité des sols au ruissellement à l'échelle de quelques mois plutôt qu'à l'échelle d'un événement pluvieux. Les simulations de pluies ont été conduites sur trois ou quatre jours consécutifs sans pluies naturelles, à raison d'une simulation de pluie par modalité et par jour, pour permettre la comparaison des différentes modalités. On peut considérer, dans le contexte du nord ouest de la France que l'état hydrique et structural de la surface est resté le même : en hiver l'ETP est proche de zéro, au printemps elle reste faible, de l'ordre de 1 à 3 millimètres par jour. Ces simulations de pluies ont été réalisées, tant en hiver qu'au printemps, sur une surface à poro-

sité partiellement fermée et à rugosité faible, correspondant à un état de surface de croûte structurale. Cet état de surface est très présent au cours du cycle cultural, ces sols n'atteignant pas l'état de croûte sédimentaire du fait de leur bonne stabilité structurale liée à une teneur en matière organique relativement élevée. Ce travail a fait l'objet de différents mémoires (Raison, 2001 ; Hanquez, 2003 ; Moreau, 2004).

Une analyse morphologique et physique des caractéristiques du sol a été réalisée sur les différentes modalités de l'essai le 25/3/2002. L'analyse a porté sur : la description des états de surface sur des placettes de 1 m² ; la description du profil cultural sur des fosses de 1,5 x 0,5 m ; la description du profil racinaire sur des faces verticales de 1,5 m x 1 m. Des mesures physiques ont complété cette approche morphologique. Le compactage du sol a été approché par un test de pénétrométrie. La conductivité hydraulique dans le domaine proche de la saturation a été mesurée à l'aide d'un infiltromètre à disques (Ankeny *et al.*, 1991 ; Reynolds et Elrick, 1991 ; Coquet *et al.*, 2000). Les mesures ont été effectuées à trois potentiels, 0,5, 2 et 6 hPa, à raison de quatre répétitions par potentiel et par site, la mesure étant réalisée sur un même emplacement, en allant du potentiel le plus élevé (6hPa) au potentiel le plus faible (0,5hPa).

Figure 2 - Pluviométrie journalière (mm) (rond noir) et lame ruisselée journalière (mm) pour les différentes modalités de travail du sol (motif blanc) en fonction du temps.

Figure 2 - Daily rainfall (mm) (black circle) and daily runoff (mm) for the different treatment (white pattern).



RÉSULTATS

Le ruissellement sous pluies naturelles

Le premier constat est une absence de ruissellement en période de printemps et d'été sur l'ensemble des quatre années suivies, que ce soit sur maïs ou sur blé, et ce quelle que soit la modalité, à l'exception d'un seul ruissellement au cours du printemps 2004 sur maïs (figure 2). Le ruissellement s'est donc limité à l'hiver, voire même à la fin de l'hiver. Ces ruissellements correspondent de manière quasi systématique aux cumuls journaliers de pluies supérieurs à environ 10 mm (figures 2 et 4). Ces ruissellements hivernaux sont assez importants durant l'hiver 2000-2001 dont la pluviométrie a été exceptionnelle. Ils restent très limités durant les trois autres hivers dont la pluviométrie est dans la moyenne. Pour les quatre hivers étudiés, le cumul de ruissellement sur l'hiver a été à peu près deux fois plus important en non labour qu'en labour, cette différence étant significative (figure 3). Sur blé, au cours de l'hiver 2001, on a observé un cumul moyen de 10 mm de ruissellement en labour (minimum de 6 mm et maximum de 13,5 mm pour les 3 répétitions), contre 20 mm en non-labour (minimum de 14 mm et maximum de 23 mm pour les trois répétitions), correspondant respectivement à 10 averses ayant produit du ruissellement en labour et 14 en non-labour. Au cours de l'hiver 2003, le cumul moyen de ruissellement a été de 3 mm en labour et de 7,5 mm en non-labour, correspondant dans un cas comme dans l'autre à 5 averses ayant produit du ruissellement. Sur ray-grass d'interculture, au cours des hivers 2002 et 2004, il n'y a pas eu de ruissellement sur la modalité labour, un cumul pour l'hiver compris entre 1 à 3 mm en non-labour, répartis sur 4-5 averses en 2002 et sur 8-9 en 2004. Durant ces quatre hivers, de

faibles différences sont observées entre les deux techniques de non-labour. Les différences s'inversent d'une année sur l'autre. Elles ne sont pas statistiquement établies. Le ruissellement semble réagir aux pluies de manière plus progressive en labour qu'en non-labour (figure 4).

Le ruissellement sous pluie contrôlée

En condition de printemps, sur maïs, le ruissellement est plus important en labour qu'en non-labour, plus important sous semis direct qu'en travail superficiel (figure 5a). La simulation de pluie réalisée en 2002 (figure 5) montre qu'un régime stationnaire d'infiltration s'établit en labour au bout de 140 minutes, pour une pluie de 50 mm.h⁻¹, soit un cumul de pluie de 115 mm, alors qu'il n'est atteint, pour le semis direct, pour une pluie de 50 mm.h⁻¹, qu'au bout de 180 minutes, soit un cumul de pluie de 150 mm, et n'est pas atteint pour le travail superficiel du sol. Cette dynamique traduit une évolution lente des états hydriques et structuraux du sol pour les trois modalités. Le risque de ruissellement en condition de printemps est faible. Dans des conditions extrêmes de pluviométrie, il est plus important cependant en labour qu'en non-labour. Les données acquises de l'année 2000 montrent une même hiérarchie des trois situations (tableau 3).

En condition hivernale, sur RGI, la hiérarchie des situations est partiellement inversée (figure 5b). Il n'y a pas de ruissellement pour une pluie de 30 mm.h⁻¹ en labour. Pour une pluie de 50 mm.h⁻¹ en labour et 30 mm.h⁻¹ en non-labour, le ruissellement est plus important en non-labour qu'en labour, plus important sous semis direct qu'en travail superficiel. Les temps d'imbibition sont plus faibles et les flux ruisselés sur différentes durées plus forts en semis direct qu'en travail superficiel, et bien plus fort qu'en labour. Les temps d'imbibition

Figure 3 - Cumul des ruissellements par culture (mm) : moyenne et écart-type par modalité.

Figure 3 - Cumulated runoff per crop (mm) : mean and standard deviation per treatment.

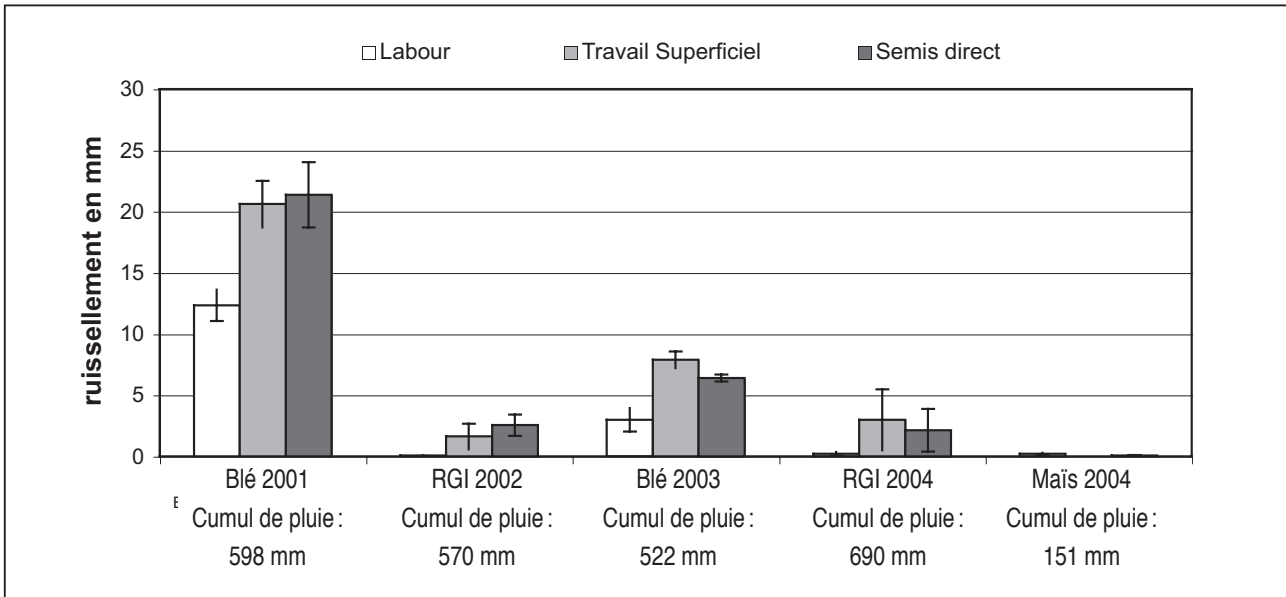


Figure 4 - Cumul du ruissellement (mm) en fonction du cumul de pluie (mm) par évènement pluvieux pour les données des hivers 2001, 2002 et 2003.

Figure 4 - Cumulated runoff (mm) versus cumulated rainfall (mm) per rainfall event for the winters of 2001, 2002 and 2003.

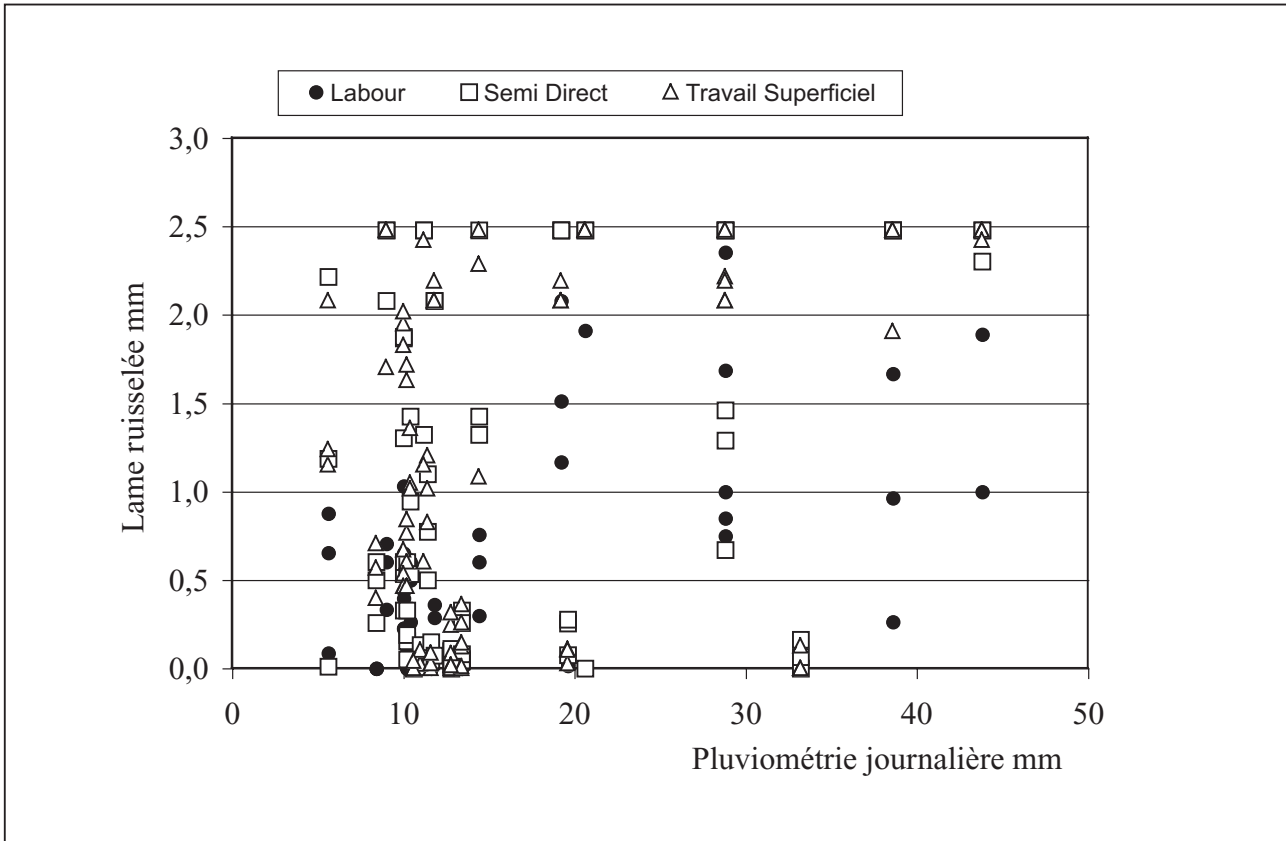


Figure 5 - Ruissellement sous simulation de pluie : a) sous maïs, en condition de printemps, avec une intensité de 50 mm.h^{-1} ; b) sous RGI, en condition d'hiver, avec une intensité de 30 mm.h^{-1} pour toutes les modalités sauf le labour (50 mm.h^{-1}) ; c) bilan des flux pour les quatre années.

Figure 5 - Runoff volume under simulated rainfall : a) rainfall intensity of 50 mm.h^{-1} in spring, on maize crop ; b) rainfall intensity of 30 mm.h^{-1} (50 mm.h^{-1} for tillage) in winter on RGI crop ; cumulated runoff for the four years.

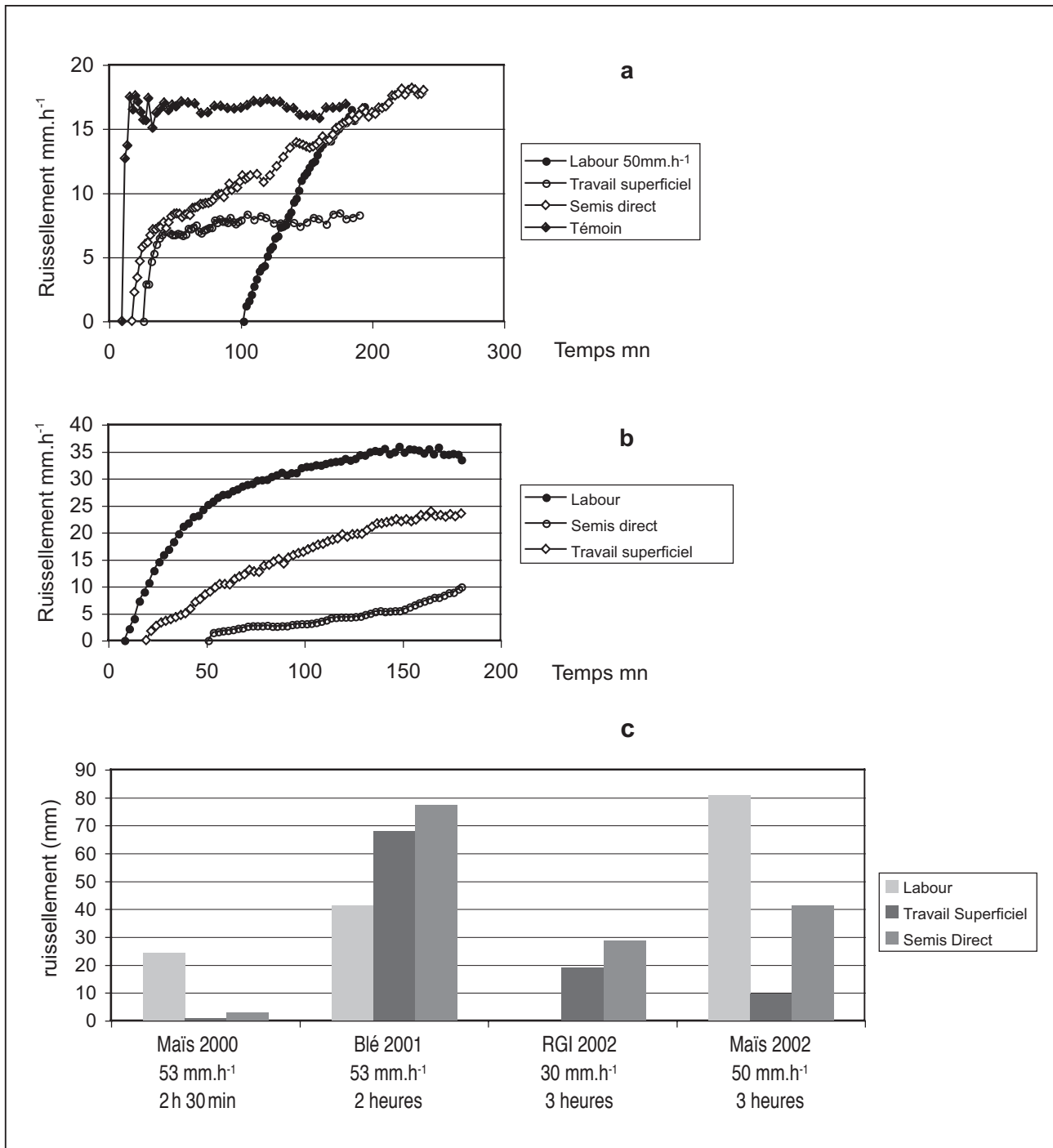


Tableau 3 - Indice d'Horton : ratio, en %, entre le cumul du ruissellement et le cumul des pluies sur différentes durées de simulation de pluie de 10, 30, 60, 90 et 120 mn

Table 3 - Horton index: ratio in % between the cumulated runoff and the cumulated rainfall for a duration of simulated rainfall of 10, 30, 60, 90 and 120 mn.

	En mm.h ⁻¹	I _{10 %}			I _{30 %}			I _{60 %}			I _{90 %}			I _{120 %}		
		L	SD	TS	L	SD	TS	L	SD	TS	L	SD	TS	L	SD	TS
Maïs 2000	53	0	0	0	1	0	0	4	0	0	10	0	0	15	1	0
Maïs 2002	50	2	0	0	6	3	0	16	8	0	31	14	2	47	19	3
Blé 2001	53	5	9	3	4	48	42	16	61	56	27	69	61	41	72	64
RGI 2002	30	0	0	0	0	5	1	0	15	11	0	20	15	0	23	16

sont : de l'ordre de 25 minutes correspondant à un cumul de pluie de 12,5 mm, pour les deux modalités en non-labour ; de l'ordre de 100 minutes, correspondant à un cumul de pluie de 85 mm, en labour. Les flux calculés sur différentes durées permettent de bien distinguer la modalité semis direct, plus sensible au ruissellement, de la modalité travail superficiel du sol (*tableau 3*). Alors qu'un régime stationnaire d'infiltration s'établit en travail superficiel au bout de 40 minutes, il n'est pas atteint au bout de trois heures tant pour le semis direct que pour le labour. La comparaison est cependant difficile du fait que les intensités de pluie appliquées sont différentes pour ces deux cas. Le risque de ruissellement apparaît néanmoins plus important en non-labour qu'en labour. Ces trois modalités présentent cependant toutes des flux de ruissellement nettement plus faibles que ceux de la modalité témoin, en sol nu et avec repousses de blé, qui ruisselle au bout de quelques minutes de pluie et atteint très rapidement un régime d'infiltration stationnaire, traduisant un état hydrique et structural stable correspondant à une infiltrabilité de l'ordre de 15 mm.h⁻¹. Ce témoin montre ainsi que le ruissellement est limité de manière importante par le recouvrement végétal du sol qui intervient comme un critère de premier ordre, avant toute considération sur le mode de travail du sol.

Les observations morphologiques et les mesures physiques

Caractéristiques morphologiques des sols au cours de l'hiver 2002

L'analyse des états de surface en 2002 montre une surface partiellement fermée, un recouvrement végétal du sol important, de l'ordre de 70 %. La rugosité est plus forte en labour (dénivelé moyen de 1,75 cm) qu'en non-labour (dénivelé moyen de 1 et 0,75 cm pour respectivement le travail superficiel et le semis direct). L'activité biologique, évaluée par la présence de turricules de vers de terre en surface, est assez comparable en labour et en travail superficiel. Elle paraît plus importante en semis direct.

L'analyse du profil cultural montre les discontinuités suivantes : un

horizon relativement massif sur les 5 premiers centimètres sur la modalité travail superficiel ; une semelle de labour non résorbée sur les deux modalités en non-labour et bien présente en labour. L'analyse des profils racinaires (*figure 6a*) indique une plus grande densité racinaire dans les premiers centimètres du sol. Les tests de pénétrométrie indiquent une augmentation de la résistance à la pénétration avec la profondeur, celle-ci se stabilisant vers 15 cm (*figure 6b*).

Conductivité hydraulique des sols au cours de l'hiver 2002

Les conductivités hydrauliques sont très variables (*figure 7*). Elles n'apparaissent pas statistiquement différentes d'une modalité à l'autre. La valeur moyenne est plus forte en labour qu'en non-labour aux potentiels 0,5 et 2 hPa, elle-même plus forte que sur le témoin à 0,5 hPa. A 6 hPa, la conductivité hydraulique est sensiblement identique sur les différentes modalités.

DISCUSSION

Méthodologie pour le diagnostic de la sensibilité des sols au ruissellement

Les essais sur les transferts d'eau et d'éléments chimiques ne prennent pas en compte de répétitions du fait de la lourdeur des suivis. On a ici trois répétitions par modalité. Ces répétitions indiquent une certaine variabilité d'une sous parcelle à l'autre pour une même modalité (*figure 8*). Cette variabilité n'est pas très importante mais correspond à des petits volumes de ruissellement. Elle s'accroît avec les volumes de ruissellement. Elle paraît légèrement plus faible en travail superficiel qu'en labour et en semis direct. La réponse à une pluie d'une sous parcelle donnée présente en général un écart dans le même sens par rapport à la moyenne. Ceci n'est cependant pas systématique, du fait du caractère très aléatoire de la réponse du sol à la pluie, très liée à une connectivité des chemins de l'eau qui évoluent d'une pluie à l'autre. Cette variabilité impose soit un dis-

Figure 6 - Densité racinaire (%) et résistance à la pénétration (Newton.cm²)

Figure 6 - Root density (%) and resistance to penetration (Newton.cm²)

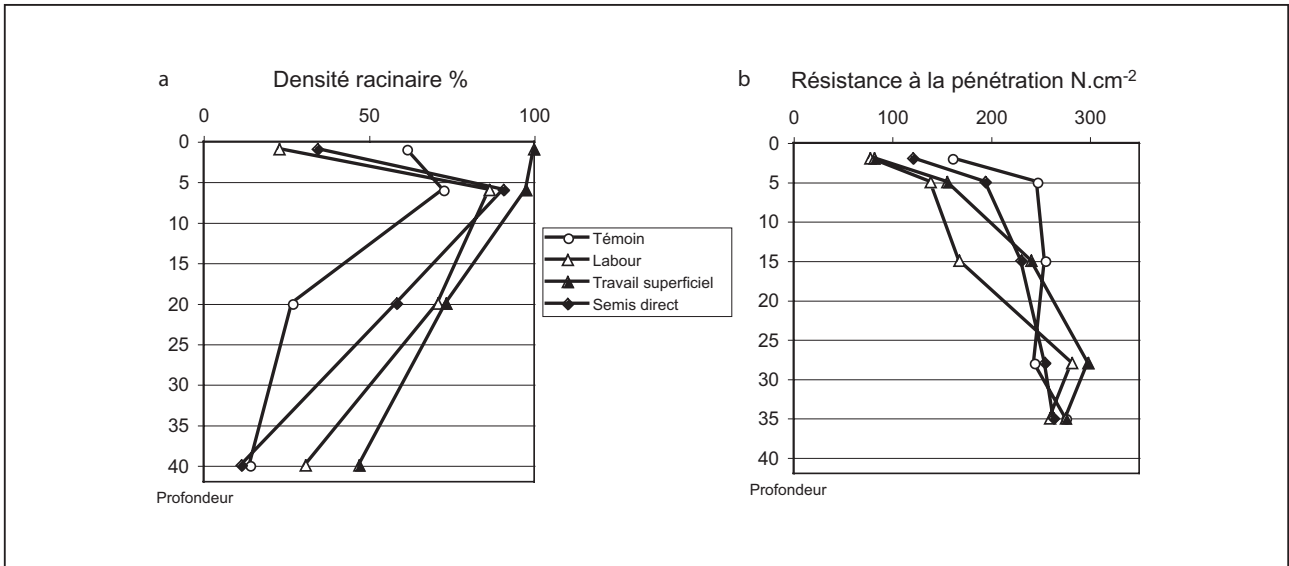


Figure 7 - Conductivité hydraulique du sol à trois potentiels

Figure 7 - Hydraulic conductivities at three potentials

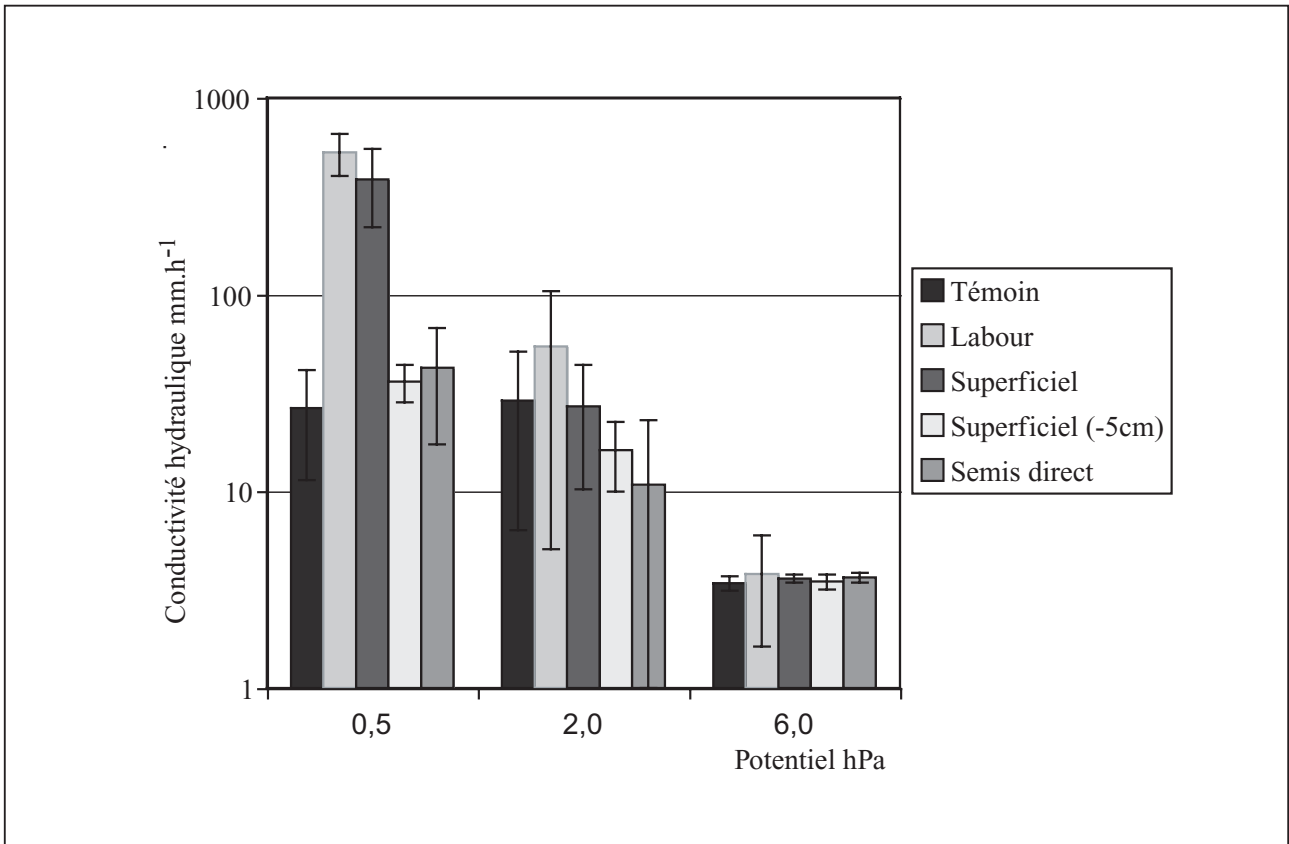
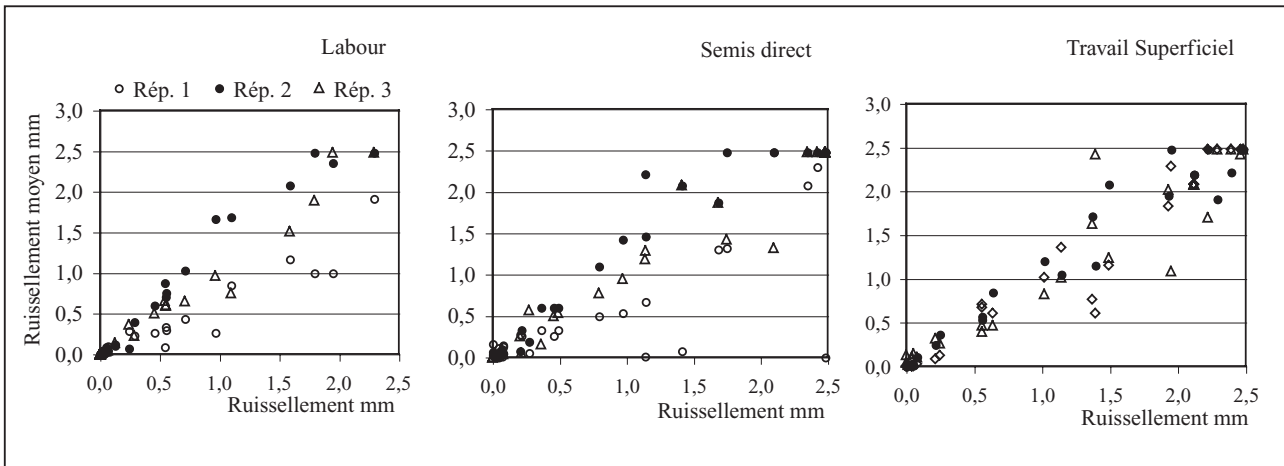


Figure 8 - Ruissellement (mm) pour une sous parcelle donnée, en fonction de la moyenne du ruissellement (mm) sur les trois parcelles pour un événement pluvieux donné (mm)

Figure 8 - Runoff (mm) for each plot, versus mean cumulative runoff for the three plots of a same treatment (mm) for each rainfall event.



positif avec répétitions, soit un suivi sur de nombreuses années. On a ici couplé les deux, ce qui confère à cet essai une certaine fiabilité en terme de résultats. La limite du dispositif expérimental mis en place est la taille des collecteurs qui permet de bien apprécier la fréquence du ruissellement, mais pas de le quantifier pour les événements les plus importants. On a ainsi observé sur quatre années, 9 événements pluvieux ayant conduit à un débordement des collecteurs de 650 litres, dont quatre ont conduit à faire déborder les trois collecteurs d'une même modalité (figures 4 et 8).

Les simulations de pluie, dont les caractéristiques sont relativement éloignées des conditions de pluies naturelles, ont mis très nettement en évidence deux résultats issus du suivi en conditions naturelles : la saisonnalité très différente de la sensibilité des sols au ruissellement ; l'interaction entre cette saisonnalité et l'incidence des modes de travail du sol sur le ruissellement. Cette approche par simulation de pluie permet en définitive d'appuyer des résultats de terrain en faibles nombres et avec une variabilité importante dans le temps.

L'occurrence du ruissellement et l'impact des pratiques de non-labour

L'occurrence du ruissellement est analysée à partir du suivi du dispositif expérimental et des simulations de pluies conduites dans différentes conditions hydriques et d'état de surface.

En conditions de printemps et d'été, sous culture de maïs, aucun ruissellement n'a été observé en 2000, 2002, années dont le cumul de pluie entre mai et juillet a été respectivement de 165,6 et 219,8 mm, comportant respectivement 4 pluies supérieures à 10 mm dont une supérieure à 20 mm et 8 pluies supérieures à 10 mm. Un

seul ruissellement a été observé en 2004 correspondant à un cumul journalier de 42,4 mm (le 7/7/2004), précédé la veille d'un cumul journalier de 24,9 mm n'ayant conduit à aucun ruissellement.

Les simulations de pluies montrent que le ruissellement n'a lieu que pour un cumul de pluie supérieur à 100 mm, à une intensité de 50 mm.h⁻¹, quelle que soit la modalité. Ces données montrent donc qu'au printemps, dans le contexte pédoclimatique du site expérimental, le risque de ruissellement est faible. Cependant, des observations faites en 1997 sur cette parcelle (Ferlin, 1997), avaient indiqué au printemps, sur maïs, des ruissellements, pour des pluies de cumul de respectivement 8,6 et 20,8 mm, d'intensité maximale sur 6 minutes de respectivement 38 et 60 mm.h⁻¹. L'année suivante, sur maïs également, 2 événements pluvieux de 26,4 mm et 36,6 mm d'intensité maximale sur 6 minutes de respectivement 16,5 mm.h⁻¹ et 30 mm.h⁻¹, ont également conduits à du ruissellement. Le risque de ruissellement à cette période est donc faible sans devoir être totalement écarté. Ces données ne peuvent être généralisées à l'ensemble du massif armoricain dont les sols présentent un net gradient est-ouest de la teneur en matière organique (Walter *et al.*, 1995). Cros-Cayot (1996) a en effet montré une fréquence notable du ruissellement de printemps sur des sols du bassin de Rennes à faible teneur en matière organique et à faible stabilité structurale. En 1997, huit pluies ruisselantes de printemps ou d'été ont été relevées sur le site de Rennes. Elles correspondent approximativement à un cumul pluviométrique journalier supérieur à 8 mm et une intensité pluviométrique maximale journalière au pas de temps de 6 minutes supérieure de 30 mm.h⁻¹. Pour l'année 1998, trois pluies ont conduit à du ruissellement et correspondent à un cumul journalier supérieur à 8 mm et une intensité pluviométrique au pas de 6 minutes supérieure à 10 mm.h⁻¹. À cette période de printemps et été, le ruissel-

lement est principalement contrôlé par les états de surface (Cros-Cayot, 1996). L'occurrence du ruissellement est très liée à l'état structural, la rugosité et le recouvrement végétal du sol. La teneur en matière organique joue un rôle important puisqu'elle influence la dynamique de désagrégation du sol. De faibles variations de matières organiques peuvent donc jouer un rôle majeur sur le ruissellement (Le Bissonnais *et al.*, 2002). Le non-labour, par une concentration de la matière organique en surface et une augmentation du recouvrement végétal du sol contribue à ralentir les processus de désagrégation de la structure du sol, et ainsi, limiter le ruissellement. Ceci est bien montré par les données sous pluie contrôlée. L'évolution du ruissellement au cours du temps, rapide en labour, est beaucoup plus lente en non-labour. D'autres facteurs liés à l'état structural et aux propriétés hydrodynamiques du sol jouent également un rôle puisque les deux modalités de non-labour se distinguent nettement. D'autres investigations seraient nécessaires pour discuter de ces différences. Quoiqu'il en soit, le non-labour diminue potentiellement le ruissellement. Dans la pratique, il ne le diminue que dans la mesure où le ruissellement est significatif. Dans cette période de printemps et d'été, le non-labour, sans jouer un rôle déterminant sur le site étudié et dans des conditions climatiques modérées, peut contribuer à limiter le ruissellement pour certaines années climatiques très défavorables ou pour certains sols à faible stabilité structurale.

En conditions hivernales, le ruissellement est faible au cours de l'hiver 2002, année de pluviosité moyenne, important au cours de l'hiver 2001 de forte pluviosité. Ces données confirment l'occurrence non négligeable du ruissellement hivernal dans le contexte du nord-ouest de la France (Huang *et al.*, 2002). En hiver, le ruissellement y est principalement contrôlé par l'état hydrique et structural du sol dans son ensemble, dans des systèmes hydrologiques à nappe superficielle, maintenant en hiver des conditions hydriques proches de la saturation, conditions pouvant elles-mêmes favoriser un tassement du sol et une évolution défavorable des propriétés hydrodynamiques des sols (Heddadj et Gascuel-Odoux, 1999). Dans ce contexte, le non-labour, en blé ou en interculture de RGI, accroît la sensibilité des sols au ruissellement, comme le montrent les mesures de ruissellement sur deux années. Les simulations de pluie discriminent bien ces deux modalités, montrant un déclenchement du ruissellement vers 20 mm de cumul de pluie en non-labour, vers 100 mm en labour. Le ruissellement est plus faible avec une culture de blé ou une interculture de RGI, que ce soit en labour ou en non-labour, comparativement à un sol nu avec repousse de blé. Le recouvrement végétal du sol limite fortement le ruissellement, mais ne l'annule pas. Le mode de travail du sol joue alors un rôle déterminant, le non-labour pouvant être considéré comme un facteur aggravant du ruissellement dans les conditions expérimentales analysées, celles d'un essai récent de culture en non-labour.

L'origine du ruissellement plus important en non-labour en hiver

Les mesures physiques permettent d'apporter quelques explications aux ruissellements hivernaux et de faire des hypothèses quant à leur généralité. La conductivité hydraulique mesurée en fin d'hiver 2002 est plus forte et présente une plus grande variabilité en labour qu'en non-labour, aux potentiels de 0,5 et 2 hPa. Le labour présente donc une plus forte conductivité hydraulique liée à une porosité du sol la plus grossière, qui se traduit par une meilleure infiltration de l'eau en labour qu'en non-labour. Cet effet ne porte que sur la gamme de porosité la plus grossière puisqu'à 6 hPa, la conductivité hydraulique n'est pas très différente sur les différentes modalités. Ces valeurs permettent de fournir une première explication. Cette première approche doit être poursuivie par une caractérisation plus complète des profils de sols permettant, par modélisation, de mieux analyser l'occurrence du ruissellement hivernal. Elle doit être également poursuivie pour mieux identifier et comprendre, au sein des pratiques de non labour, lesquelles sont susceptibles de limiter le ruissellement. L'hypothèse du caractère récent de l'essai peut expliquer l'absence de fractionnement du sol par l'activité biologique comme mentionné par différents travaux (Arshad *et al.*, 1999; Elliot et Efetha, 1999; Rasmussen, 1999; Tebrügge et Düring, 1999). D'autres facteurs peuvent également être avancés : i) les systèmes de culture précédents (importance des prairies) ; ii) les itinéraires techniques mis en place lors du passage en non labour (modes de fertilisation, outils de travail utilisés, profondeur de travail) ; iii) les caractéristiques du sol (texture, teneur en matière organique, activité biologique). La mise en place récente de suivis sur un réseau de parcelles en non labour depuis plusieurs années devrait apporter des réponses sur le rôle de ces différents facteurs.

CONCLUSION

Sur un essai mis en place depuis quatre ans dans l'Ouest de la France, le ruissellement est quasi inexistant en condition de printemps, en labour comme en non-labour. Cette absence de ruissellement de printemps est probablement liée à la relativement bonne stabilité structurale des sols, très liée dans le contexte de l'Ouest de la France à la teneur en matière organique des sols. Cette quasi-absence de ruissellement de printemps ne peut être généralisée à l'Ouest de la France, les teneurs en matières organiques y étant très variables tant à l'échelle d'un versant qu'à l'échelle régionale. En condition hivernale, le ruissellement est relativement fréquent en fin d'hiver. Même s'il reste très modéré, il peut contribuer à transporter divers éléments chimiques potentiellement polluants. L'installation d'un couvert d'interculture intervient comme un facteur de maîtrise du ruissellement de premier ordre. Le mode de travail du sol joue un rôle plus secondaire. Le ruissellement est plus fréquent et plus fort, de l'ordre de deux fois plus, en non-labour qu'en labour. Ces résultats confirment l'importance du ruissellement hivernal. En conditions de forte humidité, la structure du sol peut évoluer naturellement vers un

état défavorable à l'infiltration et la redistribution de l'eau dans des contextes de sol limoneux sur socle où la présence de nappes libres proches de la surface maintient le sol à une teneur en eau proche de la saturation. Le non-labour, que ce soit en condition de printemps où le ruissellement est insignifiant, ou en condition hivernale où il est plus soutenu, ne peut être considéré, dans cet essai, comme un système de culture limitant en soi le ruissellement. Cet essai montre que les modalités et les conditions pédoclimatiques dans lesquelles s'inscrit ce mode de travail du sol sont tout aussi déterminantes. Ces résultats doivent être approfondis en envisageant une diversité de situations techniques, notamment l'introduction d'un pseudo labour. Ils conduisent néanmoins et dès à présent à recommander une gestion adéquate des parcelles en non-labour par des systèmes de cultures, des itinéraires techniques ou des aménagements adéquats, en particulier dans la période qui suit leur mise en place, pour limiter les éventuels ruissellements et leurs conséquences en terme de transferts de polluants.

REMERCIEMENTS

Nous remercions C. Raison, S. Hanquez et S. Moreau, étudiants de l'ESA d'Angers, qui ont fait leur mémoire de fin d'étude sur le suivi des différents essais mis en place sur la station expérimentale de Kerguehenec.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams J., 1966 - Influence of mulches on runoff, erosion and soil moisture depletion. *Soil Science Society of America Journal*, 30, 110-114.
- Ankeny M.D., Ahmed M., Kaspar, T.C. et Horton R. 1991 - Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55, pp. 467-470.
- Arshad M.A., Franzluebbers A.J., et Azooz R.H., 1999 - Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 41-47.
- Boiffin J. et Monnier G., 1994 - Suppression du labour et érosion hydrique dans le contexte agricole français : bilan et possibilité d'application des références disponibles in Colloque numéro 65 INRA ITCF CEMAGREF. La simplification du travail du sol. INRA édition, pp. 63-103.
- Cousin I., Vogel H.J. et Nicoullaud B., 2004 - Influence de la variabilité spatiale de la structure des sols cultivés sur les transferts d'eau. Conséquences d'une réduction du travail du sol. *Et. et Gestion des Sols*, 11, pp. 69-79.
- Coquet Y., Boucher A., Labat, C., Vachier P. et Roger-Estrade J., 2000 - Caractérisation hydrodynamique des sols à l'aide de l'infiltromètre à disques. Aspects théoriques et pratiques. *Etude et Gestion des Sols*, 7, pp. 7-22.
- Cros-Cayot S. 1996 - Distribution spatiale des transferts de surface à l'échelle du versant. Contexte Armoricaïn. Thèse de L'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 218 p.
- Dos Rei Castro N.M., 1996 - Ruissellement et érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique du Sud du Brésil (Rio Grande do Sul). Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 224 p.
- Elliott J.A. et Efetha A.A. 1999 - Influence of tillage and cropping system on soil organic matter, structure and infiltration in a rolling landscape. *Canadian Journal of Soil Science*, 79, pp. 457-463.
- Ferlin C., 1997 - Expérimentation de techniques culturales en vue de maîtriser les transferts de surface en centre Bretagne et comparaison avec les données du bassin de Rennes. Mémoire de DAA, ENSAR, 61 p.
- 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. Thèse Sciences de l'eau, ENGREF, 422 p.
- Gascuel-Oudou C. et Heddadj D., 1999 - Maîtrise des transferts de surface dans le contexte armoricaïn. *Contrat Bretagne Eau Pure*, 61 p.
- Gaynor J.D., Mactavish D.C. et Findlay W.I., 1995 - Atrazine and metolachlore loss in surface and subsurface runoff from three tillage treatments in corn. *J. Environ. Qual.*, 24, pp. 246-256.
- Gilley Y, Kottwitz E., Spomer R. et Mielke L., 1986 - Runoff and erosion as affected by corn residue : I. Total losses. *ASAE*, pp. 157-164.
- Guérif J., 1994 - Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface. Conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques in Colloque numéro 65 INRA ITCF CEMAGREF. La simplification du travail du sol. INRA édition, pp. 13-34.
- Hanquez S., 2003 - Impact de différentes solutions à l'échelle de la parcelle sur la limitation du transfert de produits phytosanitaires dans le contexte armoricaïn. Mémoire de l'ESA d'Angers, 123 p.
- Heddadj D. et Gascuel-Oudou C., 1999 - Annual and topographic variations of hydraulic conductivity at the field scale. *European Journal of Soil Science*, 50, pp. 275-283.
- Heddadj D. et Gascuel-Oudou C., 2001 - Impact d'itinéraires culturaux du maïs sur les transferts d'herbicides par ruissellement. *Ingénierie*, pp. 115-123.
- Huang C.H., Gascuel-Oudou C. et Cros-Cayot S., 2002 - Hillslope moisture conditions, overland flow and erosion processes. In Auzet V., Poesen J. and Valentin C., editors, *Soil patterns as a key controlling factor of soil erosion by water*. Elsevier. *Catena Special Issue*, 46(2/3), pp. 177-188.
- Jordahl J.L. et Karlen D.L., 1993 - Comparison of alternative farming systems. III. Soil aggregate stability. *American Journal of Alternative Agriculture*, 8 (1), pp. 27-33.
- Khan M., Monke E. et Foster G., 1988 - Mulch cover and canopy effect on soil loss. *Transactions of the ASAE*, pp. 706-711.
- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot S. et Gascuel-Oudou C., 2002 - Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. *Agronomie*, 22, pp. 489-501.
- Le Henaff P., 2002 - Etude du comportement hydrique des parcelles agricoles et de l'évolution des pratiques agronomiques sur le bassin versant du Frémur. Mémoire de Maîtrise. Université de Bretagne occidentale, 55 p.
- McGregor K.C., Mutchler C.K. et Romkens M.J.M., 1990 - Effects of tillage with different crop residues on runoff and soil loss. *Transactions of the ASAE*, pp. 1551-1556.
- Moreau, S., 2004 - Impact de différentes solutions à l'échelle de la parcelle sur la limitation du transfert de produits phytosanitaires dans le contexte armoricaïn. Mémoire de l'ESA d'Angers, 137 p.
- Raison C., 2001 - Impact de différentes techniques culturales sur la limitation des transferts d'herbicides. Mémoire de l'ESA d'Angers, 80 p.
- Rasmussen K.J., 1999 - Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality : a Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 3-14.
- Reynolds W.D. et Elrick D.E., 1991 - Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 55, pp. 633-639.
- 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 de l'INA-PG, 334 p.
- Tebrügge F. et Düring R.A., 1999 - Reducing tillage intensity, a review of results from a long term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53, pp. 15-28.
- Truman C.C., Reeves D.W., Shaw J.N., Motta A., Burmester C.H., Raper R.L. et

Schwab E.B., 2003 - Tillage impacts on soil property, runoff, and soil variations from a rhodic paleudult under simulated rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation society*, 58, pp. 258-267.

Voorhees W.B. et Lindstrom M.J., 1983 - Soil compaction constraints on conservation tillage in the Northern corn belt. *Journal of soil and conservation*, pp. 307-311.

Walter C., Bouedo T. et Aourousseau P., 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'ENSAR. 30 p, 6 cartes.