

Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France)

Didier Blavet¹
Georges De Noni¹
Éric Roose¹
Ludovic Maillou²
Jean-Yves Laurent¹
Jean Asseline¹

¹ Institut de recherche
pour le développement (IRD),
BP 64501,
34394 Montpellier cedex 5,
France

<Didier.Blavet@mpl.ird.fr>
<Georges.DeNoni@mpl.ird.fr>
<Eric.Roose@mpl.ird.fr>

² Centre d'études et de recherches sur les
montagnes sèches et méditerranéennes
(CERMOSEM),
Le Pradel,
Domaine Olivier de Serres
07170 Mirabel,
France

Résumé

Dans le cadre des recherches sur la réduction des risques de ruissellement et d'érosion sous vigne, 36 pluies simulées ont été réalisées en Ardèche (France méridionale) pour tester six techniques culturales récemment mises en place sur un sol brun calcaire contenant 40 % de cailloux dans sa partie supérieure. Ces techniques sont : le désherbage chimique total ; un travail du sol par sarclage à 10 cm ; une couverture du sol par paillage ; un enherbement de graminées ; un sarclage avec dépierrage à 30 % de cailloux ; et un sarclage avec empierrage à 80 % de cailloux. Les données obtenues sur le ruissellement et les pertes en terre ont fait l'objet de classements multivariés, qui ont permis de regrouper les techniques culturales en trois groupes vis-à-vis de la réduction des risques : le paillage et le sarclo-empierrage sont apparus comme étant les techniques les plus favorables, à l'opposé des techniques de sarclo-dépierrage et de désherbage chimique total, tandis que les techniques de sarclage simple et d'enherbement ont fourni des réponses intermédiaires. Ces résultats ont été discutés lors de la recherche de facteurs explicatifs, et après analyse de leurs corrélations avec certaines caractéristiques de la surface et de la partie supérieure du sol. Cette analyse a montré que, durant les pluies, le ruissellement est significativement réduit par le taux d'ouverture de la porosité en surface du sol. Elle a montré aussi que la stabilité structurale, qui est liée au taux de matière organique, tend à réduire le ruissellement, par son rôle protecteur contre la désagrégation et le colmatage de la porosité. Enfin, elle indique que le taux de couverture du sol, dans lequel peuvent intervenir les cailloux posés à la surface du sol, réduit significativement le colmatage de la porosité et les pertes en terre. En définitive, cette étude met en avant l'intérêt des techniques de paillage et de sarclo-empierrage vis-à-vis de la réduction rapide des risques de ruissellement et de pertes en terre, tout en soulignant qu'il conviendrait d'effectuer un suivi à plus long terme du dispositif expérimental (en particulier pour l'enherbement), ainsi qu'une enquête sur l'acceptabilité par les viticulteurs des techniques culturales les plus efficaces.

Mots clés : Érosion hydrique ; Techniques culturales ; France.

Summary

Influence of cultural practices on the risks of runoff and interrill erosion under vineyard in Ardeche (France)

Within the framework of the research on how to reduce the risks of runoff and erosion in vineyards, 36 simulated rains were performed in Ardeche (Southern France), in order to test six farming techniques recently set up on a calcareous brown soil whose topsoil contains 40% of stones. These techniques are as follows: 1) full chemical

Fonds Documentaire IRD



010036116

weed control; 2) mechanical weeding in the upper 10 cm of the soil; 3) straw mulching; 4) graminaceous grass covering; 5) mechanical weeding with stone removal, leaving a topsoil with 30% of stones; and 6) mechanical weeding concentrating stones in the topsoil with 80% of the surface covered by stones. The data obtained on runoff and soil losses were subjected to multivariate classifications, allowing farming techniques to be broken down into three groups with regard to runoff and interrill erosion risk reduction: i) mulching and weeding & metalling techniques seemed to be the most favourable techniques, contrary to ii) weeding & stone removal techniques and to full chemical weed control; while iii) simple mechanical weeding and grass covering techniques provided intermediate answers. These results were discussed while searching for explanatory factors, and after analysing their correlations with certain characteristics of the soil surface and topsoil features. The analysis showed that, during the rains, runoff is significantly reduced by the soil surface porosity opening rate. It also showed that the aggregate stability, which is related to the organic matter rate, tends to reduce runoff owing to its protective role against slaking and porosity filling. Last, it indicates that the soil cover rate, where the stones layed out on the soil surface can intervene, significantly reduced porosity filling and soil losses. Ultimately, this study shows how mulching and weeding & metalling techniques can help quickly reduce runoff and soil loss risks, while stressing that it would be advisable to carry out a longer-term follow-up of the experimental devices (particularly for grass covering), as well as an analysis to find out how the most effective farming techniques are likely to be accepted by wine growers.

Key words: Water Erosion; Cultural Practices; France.

Les dégâts causés par le ruissellement et l'érosion dans le vignoble ardéchois, comme dans une grande partie du vignoble français, se sont aggravés au cours des trente dernières années [1-4]. Ce danger ne doit pas être sous-estimé, non seulement pour les conséquences touchant à la qualité des vins, mais aussi pour les conséquences sur l'évolution des paysages à l'échelle des bassins-versants. En effet, dans la nature, tous les mécanismes de circulation de l'eau et des sédiments sont liés, de telle sorte que ce qui se passe sur la parcelle viticole aura forcément des répercussions sur le régime des cours d'eau. Rappelons qu'en France et en zone méditerranéenne en général, les crues et les inondations représentent le risque naturel dominant [5], et qu'au cours des vingt dernières années, plusieurs catastrophes ont touché la partie méridionale du pays [6-8].

En Ardèche, dans le Bas-Vivarais, différents facteurs contribuent à accroître les risques d'érosion. En premier lieu, cet espace géographique étant situé aux confins des domaines méditerranéens et cévennols, les averses peuvent être abondantes (> 120 mm/j) et violentes, ce qui peut être à l'origine de forts ruissellements induisant l'érosion hydrique des sols. De plus, ceux-ci sont en général peu épais, pauvres en matière organique et développés sur des coteaux à forte pente qui ne résistent que faiblement à l'érosion lorsqu'ils sont cultivés. Par ailleurs, l'évolution de l'usage des sols et des techniques de culture fournit des arguments complé-

mentaires pour expliquer l'augmentation des effets de l'érosion. La vigne existe depuis plus de 2 000 ans en Ardèche, occupant les zones de plaine et de vallée. Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, les viticulteurs ont déplacé la vigne vers les terroirs de coteaux pour produire des vins de meilleure qualité. Aujourd'hui, si la vigne est devenue la principale ressource agricole de la région, tous les problèmes ne sont pas maîtrisés. Notamment, l'évolution des dernières décennies est à la source de l'accélération des risques de dégradation physique des sols : le désherbage chimique et la mécanisation réalisée dans le sens de la pente ont été adoptés par la plupart des viticulteurs, mais ils provoquent le tassement des sols, leur encreusement et la diminution de leur capacité d'infiltration [9].

Pour évaluer la possibilité de freiner cette dynamique érosive, une étude expérimentale a été menée par l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et l'université de Grenoble sur le site du domaine « Olivier de Serre », au Pradel (*figure 1*). L'objectif est double :

- i) d'une part, évaluer le ruissellement et les pertes en terre associées sur un même type de sol soumis à différentes techniques de culture de la vigne afin d'identifier les techniques les plus favorables pour réduire l'effet de ces phénomènes ;
- ii) d'autre part, rechercher les facteurs principaux permettant d'expliquer l'efficacité de telle ou telle technique dans le but d'aider les viticulteurs à lutter contre l'érosion des sols.

Matériel et méthode

Site d'étude

L'étude a été réalisée en Ardèche, dans l'ancien « pays du Vivarais », région de transition constituée de paysages contrastés qui s'étendent depuis les basses terres de la vallée du Rhône (moins de 100 m d'altitude) jusqu'aux hautes terres du Massif central, à plus de 1 500 m d'altitude.

Au nord, on trouve le Haut-Vivarais, plateau cristallin entaillé par quelques vallées profondes. Au sud, s'étend le Bas-Vivarais qui se distingue par son relief plus diversifié, associant plateaux calcaires, épanchements volcaniques et petites dépressions périphériques où est localisé le site d'étude. Celui-ci est inclus dans le bassin-versant du Gazel dont le relief vallonné est compris entre 526 m d'altitude à l'amont, en bordure du Coiron volcanique, et 236 m d'altitude à l'aval, dans des terres marno-calcaires. Le site d'étude proprement dit (*figure 1*) correspond à une parcelle viticole de la ferme expérimentale du domaine Olivier de Serres, à Pradel (44° 35' N - 4° 30' E), à 285 mètres d'altitude [10].

Cette parcelle est localisée sur un lambeau de glaciais d'érosion de pente moyenne de 12 %. Le substrat marno-calcaire est recouvert par des colluvions à forte charge en cailloux basaltiques et calcaires (40 % à la surface du sol). Le sol est brun calcaire à texture limono-argileuse, d'épaisseur variant entre 0,4 et 1,2 mètre,

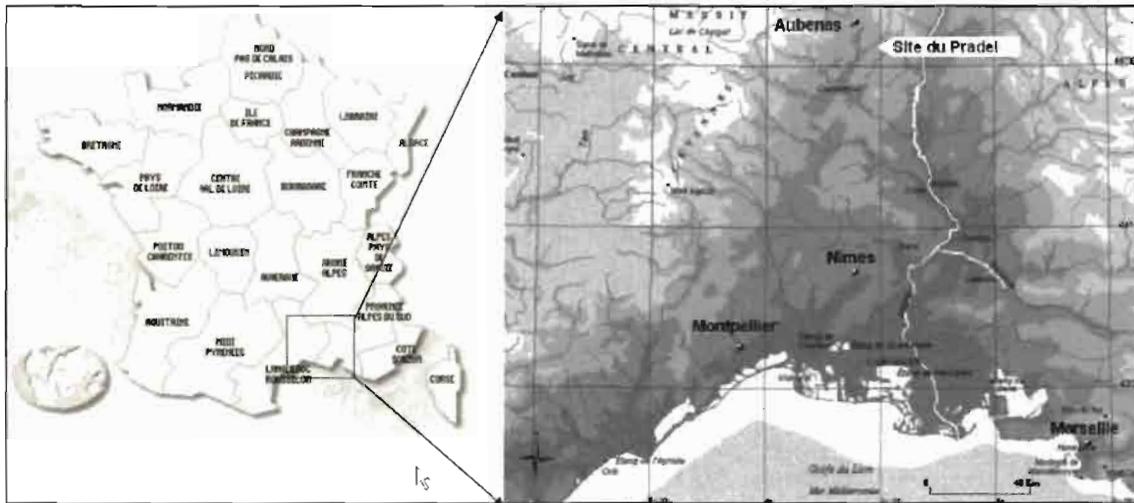


Figure 1. Localisation du site d'étude.

moyennement pourvu en matière organique (20 g.kg^{-1}) et en carbonates de calcium (320 g.kg^{-1}).

Les précipitations sont un des facteurs déterminants de la dynamique érosive de cette région. En effet, les événements sont en grande partie liés à un contexte climatique sous la double influence méditerranéenne et cévenole. Ainsi, les précipitations méditerranéennes concentrées essentiellement en automne et au printemps connaissent une exacerbation du fait de la proximité des Cévennes [7, 8]. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de $1\,000 \text{ mm/an}$, parmi lesquelles certaines pluies sont à l'origine d'intensités qui peuvent, chaque année, dépasser 40 mm/h , voire atteindre 100 mm/h [11].

Techniques culturales

La parcelle étudiée est une vigne palissée (cépage Syrah), âgée de 24 ans au moment de l'étude. Les ceps, distants les uns des autres de 1 mètre, sont encore en pleine production. Les inter-rangs, larges de 2,20 m, sont orientés dans le sens de la pente pour faciliter la mécanisation.

Quatre techniques de préparation des inter-rangs de vigne, parmi les plus usitées [12], ont été mises en place au printemps 1999 :

- désherbage chimique total (DCT) par herbicide systémique de pré-levée à la fin de l'hiver et herbicide systémique foliaire à la fin du printemps, qui correspond aux pratiques culturales actuellement mises en œuvre dans la région ;

- travail du sol par sarclage mécanique conventionnel à 10 cm, qui produit une surface désherbée avec 40 % de cailloux (SARC40), et correspond aux pratiques culturales utilisées antérieurement au désherbage chimique ;

- couverture du sol par paillage avec 25 t/ha de paille fraîche (PAIL) sur sol sarclé ;

- enherbement (ENHB) de graminées avec préparation du sol avant ensemencement, constitué de 30 % de « ray-grass anglais » (*Lolium perenne*) et de 70 % de fétuque rouge (*Festuca rubra*).

Deux variantes au sarclage ont été introduites sur des placettes expérimentales de 1 m^2 , afin d'étudier l'influence du taux de cailloux en surface :

- sarclage avec dépierrage manuel produisant une surface désherbée avec 30 % de cailloux (SARC30) qui s'apparente aux épierres traditionnellement effectués en milieu méditerranéen, d'une part ;

- sarclage avec empierage manuel produisant une surface désherbée avec 80 % de cailloux (SARC80) qui s'apparente aux mulchs de cailloux utilisés traditionnellement dans certains vignobles suisses, d'autre part [13].

Le calendrier de mise en place des expérimentations, incluant le fauchage de

l'herbe (FH) à partir de la situation initiale couverte par des adventices (AV), est rappelé dans le *tableau 1*.

Analyses sur placettes expérimentales

• Simulation de pluies

Pour chacune des six techniques culturales testées, des séquences de pluies simulées de 60 mm/h ont été réalisées dans les inter-rangs de vigne (juin 1999), sur des placettes de 1 m^2 . Afin de reproduire des pluies sur sol sec, puis sur sol humide, chaque séquence de pluies comportait une pluie de 30 minutes sur sol initialement sec, suivie d'une interruption de 15 minutes, puis une pluie de soixante minutes. Durant chaque pluie, le ruissellement a été mesuré toutes les minutes et l'eau de ruissellement a été prélevée toutes les 5 minutes, afin de déterminer la charge solide. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque technique culturale (soit 36 pluies au total). Ces pluies ont été réalisées à

Tableau 1. Calendrier de traitement des parcelles expérimentales.

Année	Date	Technique culturale			
		Rang 1 (DCT)	Rang 2 (ENHB)	Rang 3 (SAR)	Rang 4 (PAIL)
1998 (-1)	15/03	AV	AV	AV	AV
	30/03	FH	FH	FH	DCT
	14/05	SARC	SARC	-	SARC
	19/05	DCT	DCT	-	DCT
1999 (année de l'étude)	17/02	-	SARC	SARC	SARC
	18/02	DCT	-	-	PAIL
	23/02	-	ENHB	-	-
	15/06	-	Début des simulations de pluies		

AV : adventices ; FH : fauchage de l'herbe ; SARC : sarclage ; DCT : désherbage chimique total ; PAIL : paillage.

Tableau II. Modalités des caractéristiques globales de surface et éléments de surface correspondants.

Caractéristiques globales de surface		Éléments de surface
Type de couverture de la surface	Surface couverte Surface nue	Adventices vivantes ; canopée ; litière ; cailloux (reste) = sol directement touché par la pluie
Type d'ouverture de la surface	Surface fermée Surface ouverte	Cailloux inclus dans une croûte ; croûtes (sédimentaires ou tassement) (reste) = cailloux posés sur agrégats ; mottes ; fissures ; pores biologiques (faune ou racine).

l'oïde d'un mini-simulateur de type Orstom/IRD [14].

Les paramètres mesurés sont :

– les humidités pondérales initiales de la couche 0-10 cm du sol (au début de la première pluie et au début de la seconde pluie) ;

– plusieurs variables de ruissellement et de pertes en terre, qui se répartissent comme suit :

- Six variables de ruissellement :

Pi 1 et Pi 2 : pluies d'imbibition durant la 1^{ère} et la 2^e pluie (en mm) ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la 1^{ère} et la 2^e pluie (en % de la pluie) ; INF 1 et INF 2 : infiltration à la fin de la 1^{ère} et de la 2^e pluie (en mm/h).

- Quatre variables de pertes en terre :

TURBIM 1, TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de 1^{ère} et de 2^e pluie (en g/L) ; MES 1 et MES 2 : matière exportée en suspension lors de la 1^{ère} et de la 2^e pluie (en g/m²).

- Analyse des états de surface

Sur des placettes de 1 m² soumises aux simulations de pluies, les éléments de surface ont été observés avant et après les pluies, tous les 2 centimètres et le long de quatre transects espacés de 20 cm (soit un total de 196 points par placette). Ce comptage a permis, notamment, d'apprécier deux caractéristiques globales de la surface du sol : le taux de couverture qui intervient sur la protection de la surface du sol contre l'énergie des gouttes de pluies, et le taux d'ouverture qui intervient sur les possibilités d'infiltration de l'eau [15]. Les modalités de couverture, et d'ouverture/fermeture de la surface du sol, et les éléments de surface correspondants sont précisés dans le *tableau II*. On y distingue, en particulier, deux types de cailloux : les cailloux posés sur des agrégats de terre, qui constituent des surfaces ouvertes favorisant l'infiltration ; et les cailloux inclus dans une croûte, qui constituent des surfaces fermées réduisant l'infiltration [16, 17].

- Prélèvements de sol

Afin d'obtenir les humidités de la couche 0-10 cm du sol en début de chaque pluie simulée, un prélèvement de sol a été effectué en bordure immédiate de chaque pla-

cette de 1 m², dans la zone soumise directement à la pluie.

Par ailleurs, pour chaque type de technique culturale, trois prélèvements de sol ont été effectués dans la couche 0-5 cm du sol à proximité des placettes expérimentales, afin d'en déterminer la stabilité structurale, la texture et la teneur en matière organique.

Analyses en laboratoire

L'humidité du sol et la charge solide des eaux de ruissellement ont été évaluées par pesées après séchage à l'étuve.

La stabilité structurale a été estimée par une méthode produisant l'éclatement dans l'eau de la fraction [3 150-5 000 µm] du sol et la séparation des agrégats stables en plusieurs classes granulométriques de 0 à 5000 µm [18, 19]. Les indices de stabilité obtenus sont corrélables aux résultats de simulations de pluie sur sols calcaires nus [20] et ont été exprimés par le diamètre médian (MWD) des macroagrégats stables à l'eau [21].

Les analyses granulométriques (agrégats et texture de la fraction de sol 0-2 mm) ont été effectuées par diffraction laser et colonnes de sédimentation. La texture a été déterminée par cinq classes granulométriques : argiles, limons fins, limons grossiers, sables fins et sables grossiers, regroupés ultérieurement en trois classes : argiles, limons et sables.

La matière organique et les carbonates ont été dosés à l'aide du micro-analyseur Thermo Finnigan NA 2000. Les résultats du carbone organique du sol (SOC) ont été exprimés en g/kg de sol tamisé à 2 mm.

Traitement des données

Le calcul des valeurs de ruissellement et de pertes en terre a été effectué à partir des hydrogrammes et des turbidigrammes de chaque pluie.

Dans le cadre de la comparaison des techniques culturales, toutes les variables des secondes pluies ont été prises en compte (Pi 2, KR 2, INF 2, TURBIM 2 et MES 2). En revanche, pour les premières pluies, seuls la pluie d'imbibition (Pi 1) et le taux de ruissellement (KR 1) ont finalement été retenus dans la mesure où : i)

l'infiltration finale (INF 1) n'était pas stabilisée ; ii) la turbidité finale (TURBIM 1) ne pouvait être définie sous certaines techniques culturales en absence de ruissellement ; iii) au total, les matières exportées en suspension (MES 1) s'avéraient soit nulles, soit quantitativement faibles, avec une incertitude de mesure assez importante due au régime non stabilisé et à la faible durée du ruissellement par rapport à la périodicité des prélèvements d'eau.

Les analyses statistiques classiques (corrélations, comparaison de moyennes avec test de Newman-Keuls, classification ascendante hiérarchique) ont été effectuées à l'aide du logiciel Statistica v.6 (StatSoft™).

Un classement semi-automatique des techniques culturales a été obtenu par le calcul de notes d'appréciation, selon les étapes décrites ci-dessous.

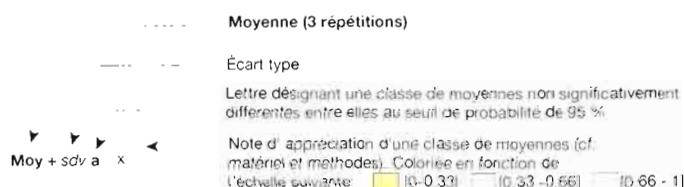
Dans une première étape, nous avons effectué un classement des valeurs moyennes obtenues pour chaque variable de ruissellement ou de pertes en terre (désignées ci-dessous par vari, avec i = nombre de variables) par comparaison de moyenne selon le test statistique de Newman-Keuls. Ce classement a fourni un nombre de classes statistiques (généralement distinguées les unes des autres par des lettres) au sein desquelles les moyennes ne sont pas significativement différentes. Les classes statistiques ont été transformées en autant de numéros de classes (nk_{vari}) que de nombre k_{vari} de classes. Le numéro de classe le plus faible ayant été fixé à 1 par convention, le numéro de classe le plus élevé a été affecté à la classe de valeurs la plus favorable, en posant que, pour les variables d'infiltration (Pi x et INF 2), la classe la plus favorable est celle qui présente les valeurs les plus élevées, tandis que pour les variables de ruissellement et de pertes en terre la classe la plus favorable est celle qui présente les valeurs les plus faibles. A partir de ces numéros de classe, une note d'appréciation standardisée (intitulée NStand_{vari,techj}) a été obtenue pour chaque variable de ruissellement ou de pertes en terre et chaque technique culturale (techniques intitulées techj, avec j = indice de technique culturale), de façon à ce que cette note se situe, par convention, sur une échelle de 0 à 1. Elle a

Tableau III. Données moyennes de ruissellement et de pertes en terre sous simulations de pluies avec regroupements statistiques des moyennes et classement semi-automatique des techniques culturales.

Variables de ruissellement et de pertes en terre	Techniques culturales											
	DCT	SARC30	ENHB	SARC40	SARC80	PAIL						
Pi 1 : pluie d'imbibition durant la 1 ^{ère} pluie (mm)	9,8 ± 3,1 c	0	19,8 ± 4,8 b	0,5	9,3 ± 4,2 c	0	23,8 ± 5,1 a	1	30 ± 0,5 a	1	30 ± 0,8 a	1
KR 1 : taux de ruissellement durant la 1 ^{ère} pluie (%)	27,5 ± 7,2 b	0	8,9 ± 7,3 a	1	17,9 ± 8,6 b	0	4,2 ± 5,8 a	1	0 ± 0 a	1	0 ± 0 a	1
Pi 2 : pluie d'imbibition durant la 2 ^e pluie (mm)	1,2 ± 0,4 b	0	1,1 ± 0,6 b	0	1,6 ± 0,2 b	0	4,8 ± 4,0 b	0	35,6 ± 23,1 a	1	22,7 ± 2,2 a	1
KR 2 : taux de ruissellement durant la 2 ^e pluie (%)	78,2 ± 5,1 c	0	61 ± 12,9 b	0,5	56,4 ± 9,8 b	0,5	24,5 ± 13,3 a	1	4,8 ± 4,6 a	1	12,2 ± 3,1 a	1
INF 2i : infiltration stabilisée à la fin de la 2 ^e pluie (mm/h)	8,3 ± 3,9 c	0	13,5 ± 8,1 c	0	18,5 ± 5,8 c	0	38,2 ± 8,1 b	0,5	55,3 ± 3,3 a	1	41,8 ± 9,3 b	0,5
TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de 2 ^e pluie (g/L)	2,2 ± 2,3 a	1	8 ± 0,3 c	0	2,1 ± 0,3 a	1	5,6 ± 1,7 b	0,5	5 ± 0,5 b	0,5	0,2 ± 0,3 a	1
MES 2 : matières exportées en suspension lors de la 2 ^e pluie (g/m ²)	105,3 ± 113,2 a	1	309,4 ± 67,8 b	0	71,6 ± 4,2 a	1	93 ± 76,0 a	1	12,2 ± 12,0 a	1	1,6 ± 1,9 a	1
↓ ↓												
Note moyenne de la technique culturale	0,29	0,29	0,36	0,71	0,93	0,93						

DCT : désherbage chimique total ; SARC : sarclage ; ENHB : enherbement ; PAIL : paillage.

Lecture du tableau :



été effectuée comme suit : note d'appréciation standardisée = (numéro de classe auquel appartient la technique culturale pour une variable donnée - 1) / (nombre de classes pour cette variable - 1), c'est-à-dire selon la formule $N_{Stand\ vari, techj} = (nk_{vari, techj} - 1) / (k_{vari} - 1)$. Finalement, une note globale NG_{techj} d'appréciation des techniques culturales a été obtenue en effectuant la moyenne des notes d'appréciations standardisées de chaque variable de ruissellement et de pertes en terre, c'est-à-dire selon la formule

$$NG_{techj} = \frac{\sum_i N_{Stand\ var\ i, techj}}{i}$$

Résultats et discussion

Comparaison des techniques culturales vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre

Le tableau III présente les moyennes et l'écart type des données de ruissellement et de pertes en terre sous simulations de pluies en fonction des six techniques culturales testées, ainsi que les comparaisons statistiques de moyennes effectuées selon le test de Newman-Keuls.

Ces données et leur regroupement statistique indiquent que durant la première

pluie, sur surface de sol relativement sèche (humidité pondérale moyenne entre 4 et 10 % pour la couche 0-5 cm), la pluie d'imbibition (variable Pi 1) est significativement plus élevée sous paillage (PAIL) et sous les techniques de sarclage (variables SARC80, SARC40, et SARC30 dans une moindre mesure) que sous les techniques de désherbage chimique et d'enherbement (variables DCT et ENH). En parallèle, durant cette première pluie, le taux de ruissellement est plus élevé sous ces deux dernières techniques.

Durant la seconde pluie, sur surface de sol humide (humidité pondérale moyenne entre 11 et 20 % pour la couche 0-5 cm), et quelle que soit la technique culturale, les taux de ruissellement sont significativement plus élevés que durant la première pluie (KR 1 = 0 à 27,5 % ; KR 2 = 4,8 à 78,2 %). Cependant, le paillage et le sarclo-empierrement se distinguent des autres techniques avec des pluies d'imbibition significativement plus élevées (Pi 2 = 22,7 et 35,6, respectivement, contre moins de 5 mm pour les autres techniques). Les taux de ruissellement sont minimaux, ainsi que le montre la figure 2a, sous ces deux techniques (KR 2 = 12,2 et 4,8, respectivement), tandis qu'à l'opposé, le taux de ruissellement sous désherbage chimique total est maximal (KR 2 = 78,2 %). En parallèle, l'infiltration stabilisée est maximale sous les deux techniques de paillage et de sarclo-

empierrement (INF 2 = 41,8 et 55,3 respectivement, contre moins de 39 mm/h pour les autres techniques).

En ce qui concerne les pertes en terre durant cette seconde pluie, la turbidité finale de l'eau de ruissellement s'avère significativement plus élevée sous les techniques culturales à base de sarclage (TURBIM 2 = 5 à 8 g/L), et plus particulièrement sous le sarclo-dépierrage (8 g/L) que sous les autres traitements (TURBIM 2 ≤ 2,2 g/L). Cependant, dans la mesure où les matières exportées en suspension dépendent à la fois du ruissellement et de la turbidité, les données obtenues (figure 2b) montrent qu'elles sont minimales sous paillage et sarclo-empierrement (MES 2 = 1,6 et 12,2 g/m², respectivement), et maximales sous désherbage chimique total et sarclo-dépierrage (MES 2 = 105,3 et 309,4 g/m², respectivement).

Le classement semi-automatique des techniques culturales permet d'apprécier globalement ces données et de hiérarchiser les techniques entre elles. D'après ce classement, avec une note d'appréciation globale de 0,93, le paillage et le sarclo-empierrement s'avèrent être les techniques les plus favorables. À l'opposé, le sarclo-dépierrage et le désherbage chimique total cumulent le plus d'inconvénients vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre (notes d'appréciation globales de 0,29). Enfin, et contrairement aux attentes initia-

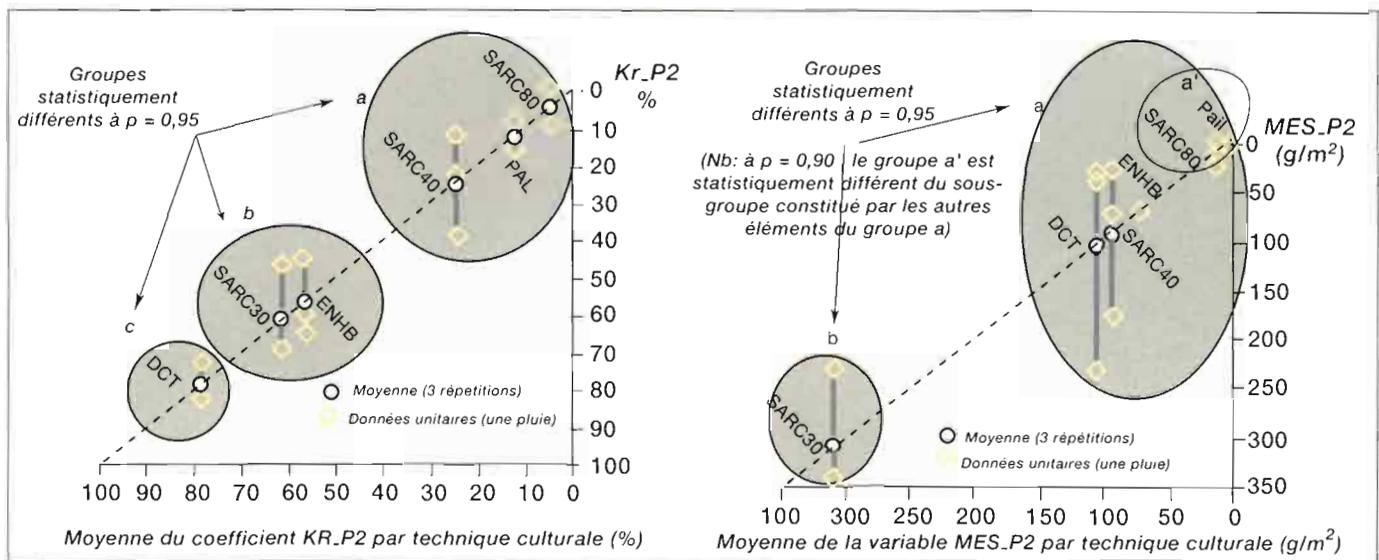


Figure 2. Taux de ruissellement et matières exportées en suspension durant la seconde pluie simulée, selon les différentes techniques culturales (données brutes et moyennes).

2.a. Taux de ruissellement, en % de la pluie (coefficient KR 2). 2.b. Matières exportées en suspension, en g/m² (variable MES 2).

les, on remarque que l'enherbement se classe relativement mal au sein de l'ensemble des techniques testées (note globale de 0,36 contre 0,71 pour le sarclage mécanique conventionnel). Ce fait est attribuable en grande partie à des caractéristiques de ruissellement défavorables (taux de ruissellement relativement élevé), qui peuvent, dans certains cas, se rencontrer sous enherbement [22, 23]. En l'occurrence, ces caractéristiques de ruissellement pourraient s'expliquer par un développement relativement faible de *Festuca rubra*, l'une des deux graminées semées trois mois auparavant [8].

Ce classement semi-automatique des techniques culturales, qui garde une certaine part de subjectivité, est confirmé, pour une large part, par une classification ascendante hiérarchique des six techniques culturales testées, qui inclut les trois répétitions de chaque technique culturale et qui repose sur les sept variables de ruissellement et de pertes en terre retenues (figure 3). En effet, mis à part le cas du sarclage mécanique conventionnel (SARC40), pour lequel il subsiste une assez forte variabilité entre les trois répétitions, cette classification agrège entre elles les répétitions d'une même technique culturale, et ordonne, sans leur affecter de jugement de valeur, les techniques culturales selon la séquence suivante : SARC30-DCT-ENHB-SARC80-PAIL.

Recherche de facteurs explicatifs des différences de ruissellement et de pertes en terre

Pour expliquer les différences de ruissellement et de pertes en terre observées entre

les techniques culturales, nous avons recherché l'existence éventuelle de relations entre les variables de ruissellement et de pertes en terre et deux ensembles de variables qui pourraient *a priori* les influencer [24-26] :

- d'une part, et à titre de contrôle, un ensemble de variables dont la variabilité, n'est, *a priori*, pas principalement dépendante des techniques culturales mais qui pourraient néanmoins influencer les variations de ruissellement et de pertes en terre observées. Notons que la pente, qui varie de 10 à 16 % selon les situations, a été écartée de ces variables, car elle n'intervient pratiquement pas à l'échelle du mètre

- carré dans cette fourchette de valeurs [27]. En définitive, les variables contrôlées ont été : i) la texture de la partie supérieure du sol, *a priori* liée à la variabilité du milieu, qui peut notamment jouer sur les propriétés d'infiltration et la stabilité structurale ; et ii) l'humidité des horizons de surface et de sub-surface qui pourrait jouer sur la conductivité hydraulique et la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer avant que le ruissellement ne se déclenche ;
- d'autre part, à titre d'hypothèse, un ensemble de variables dont la variabilité est, *a priori*, principalement dépendante des techniques culturales, et qui pourraient influencer les variations de ruissellement et

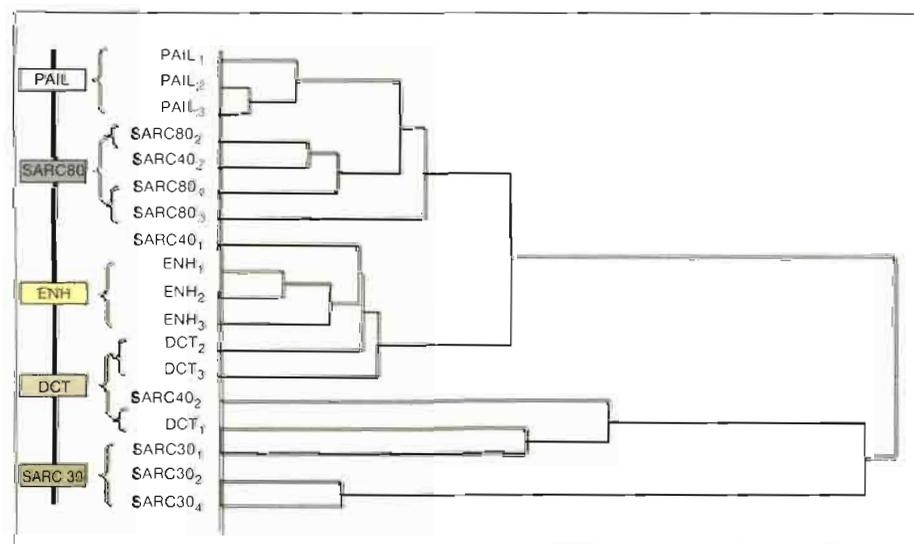


Figure 3. Classification ascendante hiérarchique des placettes étudiées selon les données de ruissellement et de pertes en terre.

Tableau IV. Facteurs potentiels des différences de ruissellement et de pertes en terre selon les techniques culturales.

Facteurs potentiels de ruissellement et de pertes en terre pris en compte				Techniques culturales						
				n	DCT	ENHB	SARC30	SARC40	SARC80	PAIL
Facteurs potentiels ne dépendant pas principalement, <i>a priori</i> , des techniques culturales (facteurs contrôlés)	Texture	ARGILE	0-5 cm	1(*)	34,62	–	34,59	34,59	34,59	33,03
		LIMONS	0-5 cm	1(*)	39,85	–	42,30	42,30	42,30	41,92
		SABLES	0-5 cm	1(*)	25,53	–	23,11	23,11	23,11	25,05
	Humidité du sol (g/kg de sol)	Début 1 ^{ère} pluie	0-5 cm	3	5 ± 0,9	4 ± 0,8	10 ± 4,1	7 ± 1,3	11 ± 4,3	6 ± 2,0
			0-10 cm	3	7 ± 0,9	4 ± 0,9	12 ± 5,2	9 ± 1,6	13 ± 5,4	8 ± 2,5
		Début 2 ^e pluie	0-5 cm	3	12 ± 2,1	11 ± 1,9	17 ± 5,9	15 ± 1,6	20 ± 5,7	12 ± 0,6
0-10 cm	3		11 ± 0,9	11 ± 1,9	16 ± 5,8	14 ± 1,6	19 ± 5,6	12 ± 0,6		
Facteurs potentiels dépendant principalement, <i>a priori</i> , des techniques culturales	Stabilité structurale (MWD µm)	0-5 cm	1(*)	130	–	197	197	197	280	
		SOC g/kg de sol 0-2 mm	0-5 cm	1(*)	12,4	–	16,7	16,7	16,7	17,3
	Couverture de la surface du sol	Cailloux %	[2,4]	49	26	27	38	83	0	
		Litière %	[2,4]	11	6	0	6	0	100	
		Adventices au graminées %	[2,4]	1	61	0	0	0	0	
		Taux de couverture du sol %	[2,4]	61	93	28	44	83	100	
		Taux de surfaces fermées en début de 1 ^{ère} pluie %	[2,4]	70	43	8	7	34	–	
	Fermeture de la surface du sol	Taux de surfaces fermées en fin de 2 ^e pluie %	[2,4]	100	87	93	78	63	–	

(*) moyenne de 3 répétitions ; DCT : désherbage chimique total ; ENHB : enherbement ; SARC : sarclage ; PAIL : paillage.

de pertes en terre observées. Il s'agit i) de la stabilité structurale des horizons de surface, qui pourrait notamment jouer, durant les pluies, sur la détachabilité des particules de terre et sur la formation plus ou moins importante de réorganisations superficielles peu perméables ; et ii) de caractéristiques de la surface du sol : son taux de couverture qui pourrait avoir un rôle de protection contre l'érosion, et son taux de fermeture qui pourrait influencer l'infiltration.

L'ensemble des données correspondant à ces variables est récapitulé au *tableau IV*.

- Facteurs contrôlés, *a priori* non principalement liés aux techniques culturales

Texture

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les teneurs en argile et en sable d'une part, et les variables de ruissellement et de pertes en terre, d'autre part, ce qui s'explique probablement par le fait que les valeurs de texture sont très similaires pour les différentes techniques culturales (*tableau IV*).

Humidité

Il n'apparaît aucune corrélation linéaire significative entre l'humidité en début de pluie (couches 0-5 cm et 0-10 cm) et les variables de ruissellement et de pertes en terre. L'étude des diagrammes de dispersion ne montre également pas de relation curvilinéaire évidente. Cette absence de corrélation peut probablement s'expliquer par une variation relativement faible d'humidité initiale entre les traitements

(*tableau IV*). Elle conduit à examiner plus avant les autres facteurs explicatifs potentiels.

- Facteurs explicatifs potentiels principalement liés aux techniques culturales

Stabilité structurale et facteur de stabilité des horizons de surface

Ainsi que le montre le *tableau V*, il existe des corrélations assez significatives ($p = 90\%$) entre, d'une part, l'augmentation de la stabilité structurale (MWD, ainsi que sa forme logarithmique $\ln(\text{MWD} + 1)$ qui permet d'obtenir des corrélations sensiblement plus élevées) et, d'autre part, l'augmentation de la pluie d'imbibition et la diminution du taux de ruissellement, lors de la première pluie. Pour la seconde pluie, on observe également les tendances suivantes avec l'augmentation de la stabilité structurale : augmentation de la pluie d'imbibition, diminution du taux de ruissellement, augmentation du coefficient d'infiltration stabilisé. L'ensemble de ces observations rejoint les résultats d'autres études sur sol calcaire [20] ou sur d'autres types de sol dans le midi de la France [28].

Dans le cas de cette expérimentation, l'absence de fortes corrélations pourrait s'expliquer par le fait que les variations de stabilité des agrégats entre les différentes techniques culturales restent relativement faibles en raison du caractère récent de leur mise en place (*tableau IV*).

Malgré les faibles différences de taux de carbone organique (SOC) selon les techniques culturales (*tableau IV*) qui peuvent aussi s'expliquer par le caractère récent

de l'expérimentation, il existe également des corrélations de même signe et de même ordre de grandeur que celles obtenues avec le MWD avec les variables de ruissellement. Cette observation s'explique très vraisemblablement par l'existence, pour ce type de sol, d'une relation étroite entre le taux de matière organique et la stabilité structurale [20]. En effet, dans le cas de cette expérimentation où les taux de matière organique restent inférieurs à 18 g/kg, cette relation peut être approchée par un modèle linéaire, avec $r = 0,81$ et $0,89$ pour $n = 5$ pour les relations SOC/MWD et $\text{SOC}/\ln(\text{MWD} + 1)$, respectivement.)

États de surface du sol

Outre les corrélations avec la stabilité structurale de la partie supérieure du sol, plusieurs relations apparaissent entre les variables de couverture et les variables de pertes en terre, d'une part, et entre les variables de fermeture/ouverture du sol et les variables de ruissellement, d'autre part. En premier lieu (*tableau VI, ligne 1*), de fortes corrélations inverses apparaissent pour toutes les techniques culturales confondues entre le taux de couverture du sol et les variables de pertes en terre (TURBIM 2 et MES 2). On peut assez facilement expliquer ces corrélations par l'effet protecteur de la couverture du sol contre l'énergie cinétique des gouttes de pluie [23, 26]. Ainsi, pour ce qui concerne les techniques culturales testées, cet effet serait maximal sous paillage (plus fort taux de couverture du sol, plus faibles pertes en terre) et minimal sous surface sarclo-

Tableau V. Corrélations linéaires entre i) indice/facteur de stabilité structurale du sol (MWD et carbone organique du sol) et ii) paramètres des simulations de pluies.

Stabilité structurale du sol (MWD) et facteur de stabilité (SOC)	n	Variables de ruissellement				Variables de pertes en terre		
		Première pluie		Seconde pluie		Seconde pluie		
		Pi 1	KR 1	Pi 2	KR 2	INF 2	TURBIM 2	MES 2
MWD μm (0-5 cm)	5	0,82* p = 91,1	-0,81* p = 90,3	0,49 p = 59,3	-0,71 p = 81,8	0,57 68,3	-0,31 38,3	-0,33 40,8
Lag(MWD + 1) (0-5 cm)	5	0,87* p = 94,3	-0,88 p = 94,9	0,50 p = 60,5	-0,75 p = 85,2	0,61 p = 72,8	-0,17 p = 22,1	-0,27 p = 34,2
SOC g/kg (0-5 cm)	5	0,88** p = 95,4	-0,96*** p = 99	0,46 p = 56,1	-0,76 p = 86,4	0,66 p = 77,5	0,27 p = 33,6	-0,06 p = 7,7

Les corrélations sont effectuées avec les moyennes par technique culturale des données de ruissellement et de pertes en terre. Pi 1 et Pi 2 : pluies d'inhibition durant la première et la seconde pluie ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la première et la seconde pluie ; INF 2 : infiltration à la fin de la seconde pluie ; TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de seconde pluie ; MES 2 : matière exportée en suspension lors de la seconde pluie.

dépierrée (plus faible taux de couverture du sol, plus fortes pertes en terre).

Par ailleurs, en considérant toujours toutes les techniques culturales dans leur ensemble, il n'apparaît pas de corrélation significative entre le taux de couverture du sol et les variables de ruissellement, ce qui s'explique probablement par le fait que cette couverture est très différente selon les techniques culturales, et que la surface du sol peut être plus ou moins ouverte sous un même taux de couverture. En revanche (tableau VI, ligne 2), en considérant un même type d'état de surface avec des taux de couverture différents, une relation entre le taux de couverture et le ruissellement peut apparaître : en effet, en ne comparant que des surfaces sarclées, les résultats suggèrent que le taux de couverture, constituée dans ce cas uniquement de cailloux, retarde de manière significative le ruissellement (variable Pi 1) et favorise l'infiltration (variable INF 2). Cette remarque, qui est en faveur de la technique de sarclage-empierrement (SARC80), rejoint différentes études sur le rôle des cailloux à la surface du sol [16, 17, 29]. Elle suggère que les cailloux posés sur les agrégats se comportent comme un mulch qui protège ces agrégats

contre la désagrégation et maintient la porosité préalablement ouverte dans la couche superficielle. Elle permet aussi de penser que la variabilité de réponse obtenue sous sarclage simple (SARC40) par la classification hiérarchique ascendante peut être liée, en grande partie, à la variabilité naturelle de la teneur en cailloux de la surface du sol.

L'effet de la fermeture de la surface du sol est mis en évidence dans les lignes 3 et 4 du tableau VI. En effet, le taux de fermeture initial du sol est étroitement corrélé au ruissellement durant la première pluie : celui-ci semble diminuer significativement la quantité d'eau nécessaire avant le déclenchement du ruissellement (corrélation négative avec la variable Pi 1) et augmenter le taux moyen de ruissellement durant cette première pluie (corrélation positive avec la variable KR 1). Ce taux de fermeture initial est peu corrélé aux variables de la seconde pluie, ce qui peut être attribué à une évolution non négligeable du taux de fermeture durant les pluies (figure 4). En revanche, le taux de fermeture final de la surface du sol s'avère particulièrement bien corrélé à toutes les variables de ruissellement.

Enfin, on doit remarquer qu'il existe une liaison entre la couverture et la fermeture du sol. En effet, l'évolution de la fermeture du sol durant la pluie est d'autant plus faible que le taux de couverture est élevé, puisqu'il existe une corrélation négative et significative à plus de 99 % entre le taux de couverture initial du sol et l'augmentation du taux de fermeture de la surface du sol durant les pluies ($r = -0,754$ pour $n = 13$ en considérant l'augmentation absolue du taux de surface fermées, $r = -0,812$ en considérant l'augmentation relative de ce taux).

En définitive, si l'on considère à la fois le classement des techniques culturales que nous avons obtenu et certains facteurs explicatifs pouvant se dégager de l'étude des corrélations, il semble que dans les conditions de cette expérimentation récemment mise en place, l'état de la surface du sol (couverture et taux de fermeture/ouverture) joue un rôle prépondérant sur le ruissellement et les pertes en terre. Ainsi, i) le taux de couverture serait plus particulièrement susceptible de régir les pertes en terre par son effet protecteur contre le détachement des particules. Il interviendrait également sur la réduction du ruissel-

Tableau VI. Corrélations linéaires entre i) taux de couverture, taux de fermeture de la surface du sol et ii) variables de ruissellement et de pertes en terre.

Variables d'états de surface	Variables de ruissellement				Variables de pertes en terre		
	Première pluie		Seconde pluie		Seconde pluie		
	Pi 1	KR 1	Pi 2	KR 2	INF 2	TURBIM 2	MES 2
1. Taux de couverture (toutes situations) n = 17	0,13 ns	-0,13 ns	0,43 ns	-0,40 ns	0,40 ns	-0,77**	-0,75**
2. Taux de couverture (situations sarclées avec couverture de cailloux) n = 9	0,82**	-0,67**	0,63 ns	-0,72**	0,78**	-0,70**	-0,82**
3. Taux de fermeture initial (début de la première pluie) n = 14	-0,55**	0,66**	-0,13 ns	0,43 ns	-0,32 ns	-0,68**	-0,30 ns
4. Taux de fermeture final (fin de la seconde pluie) n = 14	-0,79**	0,79**	-0,74**	0,97**	-0,94**	-0,22 ns	0,44 ns

(corrélations significatives marquées à $p > 95\%$).

Pi 1 et Pi 2 : pluies d'inhibition durant la première et la seconde pluie ; KR 1 et KR 2 : taux de ruissellement durant la première et la seconde pluie ; INF 2 : infiltration à la fin de la seconde pluie ; TURBIM 2 : turbidité de l'eau de ruissellement en fin de seconde pluie ; MES 2 : matière exportée en suspension lors de la seconde pluie.

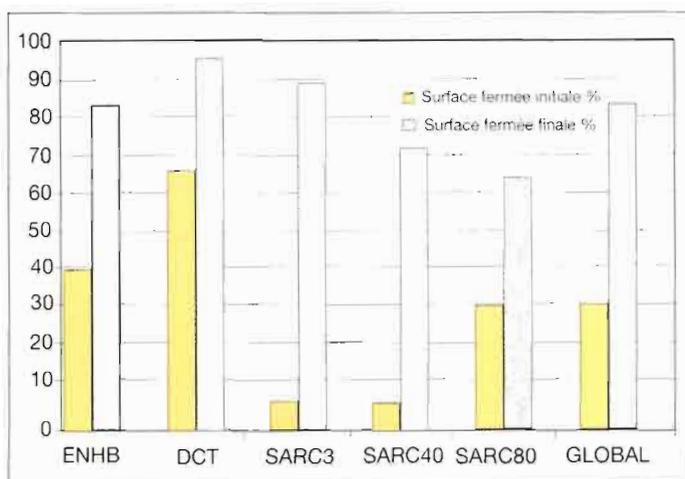


Figure 4. Évolution du taux de fermeture de la surface durant les pluies.

lement en protégeant le sol contre la fermeture de sa porosité ; ii) le taux d'ouverture/fermeture jouerait plus particulièrement un rôle sur le ruissellement par les possibilités d'infiltration qu'il induit. Il apparaît aussi, d'après ces résultats, que l'augmentation de la stabilité structurale, liée au taux de matière organique, peut déjà influencer la réduction du ruissellement sur sol sec. Bien entendu, une étude complémentaire des mécanismes mis en jeu et des relations de cause à effet pourrait permettre d'affiner ces constats.

Au vu de ces résultats, couvrir le sol et associer cette technique à un travail classique du sol, à 10-15 cm de profondeur, semble donc être une mesure efficace pour protéger le vignoble contre le ruissellement et les pertes en terre associés, ce qui rejoint les conclusions d'autres auteurs [22, 26]. À ce titre, les techniques de paillage et de sarclo-empierreage semblent plus efficaces que les techniques de désherbage chimique et de sarclo-dépierrage.

L'effet de l'enherbement reste discutable dans les conditions de notre expérimentation. D'une part, cet enherbement récent a été réalisé à l'aide de graminées qui mettent un certain temps à couvrir le sol, alors que celui-ci a été antérieurement soumis à des herbicides [8]. D'autre part, des relations significatives entre taux d'enherbement et augmentation de l'infiltrabilité ont pu être mises en évidence sous vigne [30, 31]. Enfin, il est prévisible que la stabilité structurale augmente sensiblement, sur ce type de sol, au-dessus d'un certain seuil de matière organique [20]. Il est donc possible que cet enherbement permette, à l'avenir, de réduire le ruissellement et les pertes en terre plus sensiblement que dans cet essai.

Conclusion

Cette étude montre que le paillage à 100 % et le sarclo-empierreage à 80 % des inter-rangs de vigne, peuvent réduire significativement les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne, grâce à leur rôle de protection de la surface contre la désagrégation et la fermeture de la porosité du sol. En revanche, les techniques les moins efficaces s'avèrent être le sarclo-dépierrage et le désherbage chimique, ce dernier étant la technique la plus utilisée actuellement. L'enherbement permettrait de réduire rapidement les pertes en terre, mais des observations complémentaires seraient nécessaires pour évaluer son comportement vis-à-vis du ruissellement en expérimentant sur une plus longue durée l'effet de différentes espèces végétales et de différents modes de préparation du sol [32].

Plus généralement, les résultats obtenus soulignent aussi la nécessité d'effectuer un suivi à plus long terme du dispositif expérimental pour quantifier l'impact des techniques culturales testées sur les propriétés du sol (stabilité structurale et stock organique notamment), lesquelles peuvent modifier le comportement de ces techniques vis-à-vis du ruissellement et des pertes en terre. En outre, les pluies simulées ont été effectuées trois mois après l'installation des techniques culturales, ce qui avantage manifestement les techniques de couverture comme le paillage et le sarclo-empierreage alors qu'on n'appréhende pas la dégradation probable de leurs propriétés de protection du sol avec le temps.

Enfin, il apparaît nécessaire d'effectuer une enquête sur l'acceptabilité pratique des techniques culturales les plus efficaces, et en particulier des techniques de paillage et de sarclo-empierreage, en terme de coût

et de pénibilité du travail pour les viticulteurs.

Références

- Schwing JF. Les manifestations graves et les événements catastrophiques d'érosion des sols dans le vignoble alsacien. *Recherches Géographiques à Strasbourg* 1978 ; 9 : 29-46.
- Mesmer T. Soil erosion measurements on experimental plots in Alsace vineyards (France). In : De Boodt M, Gabriels G, eds. *Assesment of Erosion* Chichester (Great Britain) : John Wiley, 1980 : 455-62.
- Ballif JL. Erosion dans le vignoble champenois. Influence des techniques culturales. *Cah Orstom Sér Pédol* 1989 ; 25 : 151-6.
- Lelong F, Roose E, Darthout R, Trevisan D. Susceptibilité au ruissellement et à l'érosion de divers types texturaux de sols cultivés ou non cultivés du territoire français. Expérimentation au champ sous pluie simulée. *Science du Sol* 1993 ; 31 : 251-79.
- Poesen JW, Hooke JM. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography* 1997 ; 21 : 157-99.
- Davy L. Une catastrophe naturelle : l'averse nîmoise du 3 octobre 1988 et ses conséquences hydrologiques. *Hydrologie Continentale (FRA)* 1989 ; 4 : 75-92.
- Maillo L. Influence des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion sur les coteaux viticoles du Bas-Vivarais (Ardèche). Thèse de doctorat de géographie. Grenoble : Université Joseph Fourier, 1989 ; 173 p. + annexes.
- Léonard M. L'érosion hydrique des sols cultivés : Analyse systématique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale. Thèse de doctorat de géographie. Grenoble : Université Joseph Fourier, 2003 ; 545 p. + annexes.
- Guibourdenche H. L'évolution récente de la viticulture ardéchoise. *Revue du Vivarais* 2001 ; n° spécial : 137-74.
- Bozon P. *L'Ardèche : la terre et les hommes du Vivarais*. Coll. Les hommes et les lettres. Lyon : Hermès, 1978 ; 249 p.
- Météo-France. *Variabilité des précipitations en Ardèche, analyse factorielle en composantes principales*. Aubenas : Comité Météorologique Départemental, Conseil Général de l'Ardèche, 1993 ; 36 p.
- Litzler C. *Maîtrise de l'érosion en vignoble de coteaux. Aspects agronomiques*. Mâcon : Ministère de l'Environnement et de l'Agriculture ; Institut technique de la vigne et du vin (ITVV) ; Chambre d'agriculture, Saône et Loire, 1988 : 54 p.
- Nachtergaele J, Poesen J, Van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil & Tillage Research* 1998 ; 46 : 51-9.
- Asseline J, Valentin C. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah Orstom Sér Hydrol* 1978 ; 15 : 321-49.
- Roose E. Méthodes d'estimation des états de surface en relation avec le ruissellement et l'érosion en nappe. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 87-97.
- Poesen J, Ingelmo-Sanchez F, Mûcher H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as

affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes And Landforms* 1990 ; 15 : 653-71.

17. Poesen J, Torri D, Bunte K. Effect of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scale : a review. *Catena* 1994 ; 23 : 141-66.

18. Le Bissonais Y, Le Souder C. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols* 1995 ; 2 : 43-56.

19. Le Bissonais Y. Aggregate stability and assessment of crustability : 1. theory and methodology. *European J Soil Sci* 1996 ; 47 : 425-37.

20. De Noni G, Blavet D, Laurent JY, Le Bissonais Y, Asseline J. Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution. « Confronting new realities in the 21st century », 17th World Congress of Soil Science, August 2002 Symposium 05. Bangkok, 2002, Paper 1783, 13 p.

21. Yoder RE. a direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J Am Soc Agronomy* 1936 ; 28 : 337-51.

22. Gril JJ. L'érosion dans le vignoble du Beaujolais : étude comparative des techniques culturales sur la commune de Pammiers. *Cemagref* 1984 ; 317 : 47-52.

23. Arshad MA, Asseline J, Blavet D, De Noni G, Laurent JY, Leprun JC. Soil properties as affected by different land use practices in the Languedoc region of southern France. In : Bech J, ed. *Sixth international meeting on soils with Mediterranean type of climate*. Barcelone : Université de Barcelone, 1999 : 618-21.

24. Boiffin J. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse de doctorat ingénieur. Paris : Ina-Paris-Grignon, 1984 ; 320 p. + annexes.

25. Roose E. *Érosion et ruissellement en Afrique de l'ouest : Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales*. Coll. Travaux et documents n°78. Paris : Orstom éditions, 1977 ; 108 p.

26. Roose E. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). *Bull Pédol FAO* (Rome) 1994 ; (70) : 420 p.

27. Roose E, Cavalié F. *New strategy of water management and soil conservation : application in deve-*

loped and developping countries. ISCO V Land conservation for future generation, Bangkok, 1988 : 913-23.

28. Barthès B, Albrecht A, Asseline J, De Noni G, Roose E, Viennot M. Pratiques culturales et érodibilité du sol dans les Rougiers de Comarès (Aveyron). *Etude et Gestion des sols* 1998 ; 5 : 157-70.

29. Poesen J, Lavee H. Rock fragments in topsoils : significance and processes. *Catena* 1994 ; 23 : 1-28.

30. Viguier JM. *Mesure et modélisation de l'érosion pluviale. Application au vignoble de Vidauban (Var)*. Thèse de doctorat. Grenoble : Université Joseph Fourier, 1993 ; 335 p.

31. Andrieux P, Léonard J. Variabilité spatiale de l'infiltrabilité sur parcelles de vigne en milieu méditerranéen. *Bull Réseau Erosion* 1996 ; 16 : 276-9.

32. De Noni G, Viennot M, Asseline J, Trujillo G. *Terres d'altitude, terres de risque : la lutte contre l'érosion dans les Andes équatoriennes*. Coll. Latitudes n° 23. Paris : IRD, 2001 ; 219 p.