

Caractérisation et modélisation de l'écoulement de l'eau sur le sol d'un vignoble.

Influence du compactage et de l'enherbement

Characterization and modelling of water flow on vineyard soil. Effect of compaction and grass cover

Pierre CURMI^{1*}, Marion CHATELIER^{1,2} et Gérard TROUCHE¹

1 : Établissement National d'Enseignement Supérieur Agronomique de Dijon,
26 bd du Dr Petitjean, 21079 Dijon cedex, France

2 : Université de Bourgogne, UMR INRA A 111 « Microbiologie et Géochimie des sols »,
Centre des Sciences de la Terre, 6 bd Gabriel, 21000 Dijon cedex, France

*Corresponding author: Tel. +33 (0)3 80 77 25 65, Fax +33 (0)3 80 77 25 51, p.curmi@enesad.fr

Abstract: In the Burgundy vineyard, frequent tractor traffic and management of inter-rows alternating grass cover and chemical weed-control lead to structural soil contrast between row and inter-row. The aim of this study was to characterize and model water flow in relation with topsoil structure modifications induced by these practices. Void ratio of the different soil volumes were determined using bulk density measurements. Water flow was measured with tensiometers under two simulated rainfalls. Hydraulics properties of soil volumes defined at the profile level was characterized by water retention curve and infiltrometer measurements. Hydrus 2D software was used for 2D modelling of water flow on a transect perpendicular to the rows. Compaction of the 25 first centimetres of inter-row topsoil was observed in the two types of interrows. It led to a void ratio reduction of 37% and a reduction of the saturated hydraulic conductivity generating less infiltration than in rows. Grass-covered inter-rows were characterized by a macroporous mat root at the soil surface (0-3 cm) in the upper part of the underlying compacted volume. More infiltration was measured in inter-rows with grass cover than in chemically weed-controlled inter-rows. Modelling fairly reproduced contrast of water flow contrast in relation with soil structure for the first 25 centimetres. However, modelling was unable to reproduce flow in volume likely to be affected by preferential flow. Between 25 and 70 centimetres depth, soils containing numerous vine roots would be the seat of preferential flow pathways distributing water laterally from rows to inter-rows. Effectiveness of preferential pathways would increase with soil moisture and rainfall intensity.

Key words: hydraulics properties, tensiometer, resistivity, infiltration, preferential flow

Introduction

La contamination des eaux superficielles et souterraines par les pesticides utilisés dans le vignoble est l'une des problématiques environnementales majeures, à laquelle la profession viticole bourguignonne est actuellement confrontée (Hurault *et al.*, 2005). A l'origine de ces contaminations, des modifications des transferts d'eau, vecteur principal des pesticides, en relation avec des pratiques culturales (non travail du sol, passage fréquent d'engins) affectant la structure du sol sont invoquées (Ballif, 1997). Van Dijck et van Asch (2002) ont montré, dans un vignoble du sud de la France, que les inter-rangs compactés par les passages de roues présentaient une capacité de rétention en eau inférieure aux rangs. Pour pallier au ruissellement provoqué par la compaction des inter-rangs, de nouveaux modes d'entretien de la surface du sol sont apparus parmi lesquels l'enherbement. Battany et Grismer (2000) ont montré que l'infiltration dans les vignobles en pente était positivement corrélée à la surface enherbée.

Dans ce contexte, où de nombreuses recherches se sont attachées à l'effet de la structure du sol sur les transferts de surface, l'étude suivante se propose de caractériser et de modéliser les transferts d'eau dans le sol en relation avec les contrastes de structure au sein d'un sol viticole.

Matériels et méthodes

Site expérimental. Le site expérimental est localisé sur le domaine Louis Latour à Aloxe-Corton au sud-ouest de Dijon (Côte d'Or, France). Le sol est un calcosol limono-argileux développé sur une série marno-calcaire de l'Oxfordien moyen. Le site se concentre sur six inter-rangs situés en amont d'une parcelle viticole où la pente atteint 5%. Les rangs de vigne sont orientés dans le sens de la pente et espacés de 1 m. Les inter-

rangs recensent onze à vingt-deux passages d'engins par an depuis vingt ans. Un inter-rang sur deux est enherbé semé (*Poa pratensis* L. et *Festuca rubra* T.) depuis dix ans, les autres inter-rangs et les rangs étant chimiquement désherbés.

Profil de sol. Un profil de 7 m de large et de 60 cm de profondeur a été réalisé perpendiculairement aux rangs. La description du profil a permis d'identifier et de délimiter des volumes aux caractéristiques structurales différenciées.

Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des volumes de sol. Les courbes de rétention en eau $\theta(h)$ ont été réalisées à la table à succion sur des cylindres de 100 cm³ aux potentiels $h = [0; -0,25; -1; -5; -10]$ kPa. Les conductivités hydrauliques proches de la saturation $K(h)$ ont été réalisées avec un infiltromètre à disque de \varnothing 8 cm. Les flux en régime quasi permanent ont été mesurés aux potentiels $h = [-0,05; -0,2; -0,6]$ kPa. Les équations de van Genuchten (1980) et de Mualem (1976) ont été retenues afin d'obtenir les paramètres θ_s et θ_r les teneurs en eau volumique à saturation et résiduelle, n et α les paramètres empiriques du modèle et K_s la conductivité hydraulique à saturation nécessaires à la modélisation. Les courbes $\theta(h)$ et $K(h)$ ont été simultanément ajustées aux données expérimentales avec le logiciel RETC (van Genuchten *et al.*, 1991). Une seconde estimation de K_s a été obtenue par extrapolation à partir des exponentielles $K(h)$ pour la portion $h = [-0,2; -0,05]$ kPa (Jarvis et Messing, 1995).

Simulations de pluie. Deux pluies correspondant à une fréquence de retour décennale ont été simulées à l'aide d'un double asperseur à rampe rotative le 17 mars 2005 pendant 2 h 04 d'intensité 19 mm h⁻¹ et le 18 mars 2005 pendant 1 h 28 d'intensité 24 mm h⁻¹. La surface moyenne irriguée est de 70 m².

Suivi tensiométrique. L'évolution du potentiel total H du sol a été suivie du 17 au 22 mars 2005. Des profils verticaux de potentiels ont été réalisés grâce à l'installation de six batteries de tensiomètres installés à 7, 26, 45 et 70 cm de profondeur : dans un inter-rang désherbé (a et b), dans un inter-rang enherbé (c et d) et dans deux rangs (e et f).

Modélisation. Les transferts d'eau dans les 50 premiers centimètres de sol ont été modélisés à l'aide du modèle bidimensionnel Hydrus 2D qui résout l'équation de Richard pour le transport de l'eau en milieu poreux homogène saturé ou insaturé (Simunek *et al.*, 1999). Hydrus 2D autorise la délimitation, dans un plan vertical, de régions aux caractéristiques hydrodynamiques différentes et rend compte, à des pas de temps définis, de l'état hydrique du sol (h et θ). Le profil de sol a été représenté par un rectangle de 780 x 80 cm. Un maillage de 10 562 éléments a été défini, la taille des mailles augmentant avec la profondeur. Sur le maillage, les volumes de sol identifiés sur le profil ont été différenciés en régions (fig. 3) caractérisées par les paramètres θ_r , θ_s , K_s , n et l obtenus sous RETC. Les conditions aux limites ont été définies de la manière suivante : flux latéraux nuls, flux atmosphérique en surface, drainage libre en profondeur. Les points d'observation ont été placés aux profondeurs 7, 26, 45 cm, là où se trouvaient les tensiomètres. Dans les inter-rangs désherbés et enherbés, les conditions initiales sur les 26 premiers centimètres correspondent à des profils tensiométriques moyens (état initial 1, fig. 4). Dans les rangs (e) et (f) aux profils tensiométriques initiaux différents, les conditions initiales correspondent aux potentiels observés.

Résultats

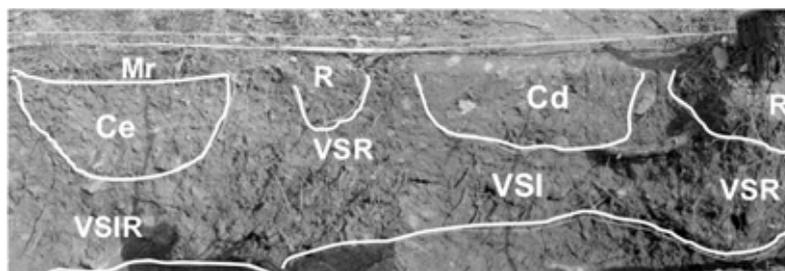
Un sol aux structures contrastées

La description du profil de sol a permis de délimiter six volumes de sol aux caractéristiques structurales contrastées (fig. 1) : dans les rangs, les volumes rang (R) et structural sous rang (VSR) à macroporosité importante sous l'influence des racines de vigne et de l'activité de la macrofaune ; dans les inter-rangs enherbés, un volume mât racinaire (Mr) macroporeux sus-jacent à un volume compacté (Ce) à macroporosité inexistante résultant du passage fréquent d'engins viticoles. Les passages de roues conduisent à une réduction de 37% de l'indice de vide par rapport à R; dans les inter-rangs désherbés, un volume compacté (Cd) aux caractéristiques similaires à Ce et enfin, sous-jacent à Ce et à Cd, un volume structural sous inter-rang (VSIR) aux caractéristiques semblables à VSR, mais présentant une densité racinaire moins importante.

Caractéristiques hydrodynamiques des volumes de sol

Les volumes macroporeux R, VSR, VSIR et Mr (fig. 2a, c) ont une teneur en eau volumique à saturation et une capacité de rétention en eau supérieures aux volumes compactés Ce et Cd (fig. 2b). Le volume compacté enherbé Ce montre une teneur en eau volumique à saturation et une capacité de rétention en eau supérieure au volume compacté désherbé Cd. Le mât racinaire Mr se distingue de tous les volumes par ses plus fortes

teneurs en eau volumiques. Les volumes compactés Ce et Cd montrent des conductivités hydrauliques similaires et nettement inférieures à celles des autres volumes (fig. 2d, e, f).



Localisation / Typologie	Profondeur (cm)	Texture	Structure	Macro porosité	ρ_a (kg m ⁻³)	Indice de vide	EG (%)
Rang (Rg)							
Rang (R)	0 - 15	LSA	grumeleuse polyédrique sub angulaire fine à moyenne	+++	1380*	0,92*	10
Volume structural sous rang (VSR)	15 - 50	LA		+++	1540*	0,72*	15
Inter-rang enherbé (IRe)							
Mât racinaire (Mr)	0 - 3	L	micro-grumeleuse	++++	850**	2,11**	0
Compacté enherbé (Ce)	3 - 25	LA	massive	-	1670*	0,58*	25
Volume structural sous inter-rang (VSIR)	25 - 50	LA	polyédrique moyenne	++(+)	1520*	0,74*	15
Inter-rang désherbé (IRd)							
Compacté désherbé (Cd)	0 - 25	LA	massive	-	1690*	0,56*	25
Volume structural sous inter-rang (VSIR)	25 - 50				Idem IRe		

Figure 1 - Caractéristiques pédologiques des volumes de sol

Macroporosité : ++++ : fortement développée ; +++ : développée ; ++(+): développée pouvant être localement réduite ; - : inexistante
EG : éléments grossiers > 2 mm ρ_a : masse volumique apparente * calculée sur terre fine sur un volume moyen de 650 cm³ avec un densitomètre à membrane ** calculée sur un volume moyen de 50 cm³ ;

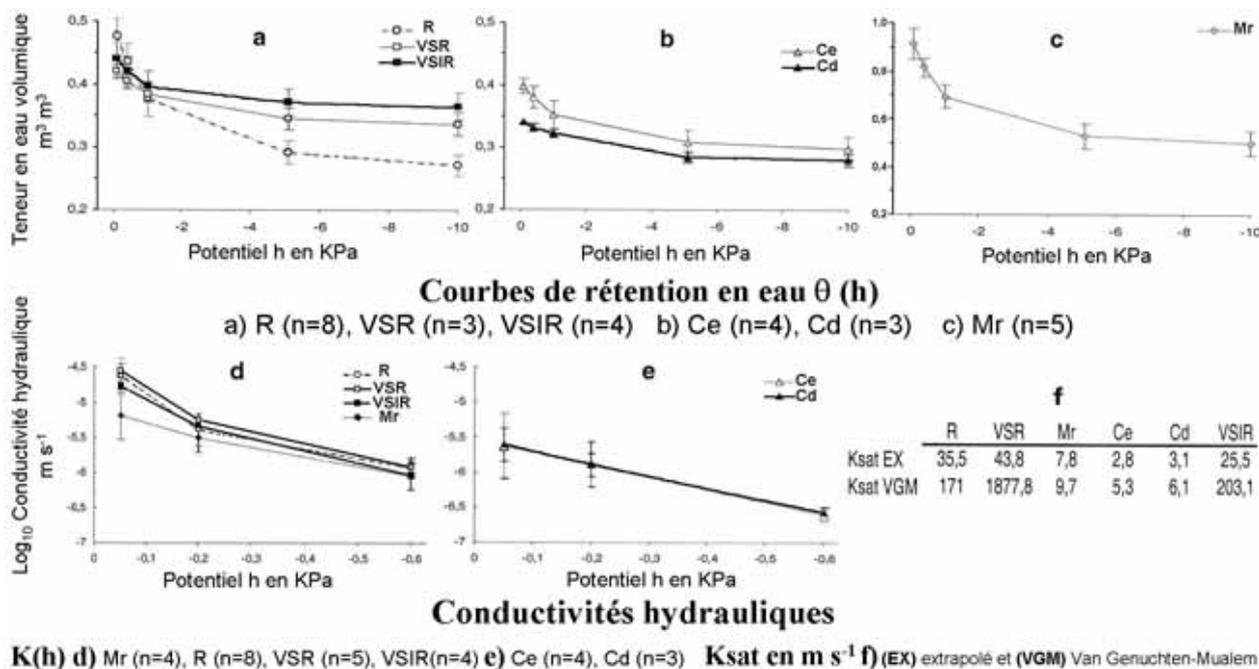


Figure 2 - Caractéristiques hydrodynamiques $\theta(h)$ et $K(h)$

du rang (R), du mât racinaire (Mr), des volumes compactés enherbés (Ce), des volumes compactés désherbés (Cd), des volumes structuraux sous rang (VSR) et des volumes structuraux sous inter-rangs (VSIR).

Paramétrisation du modèle

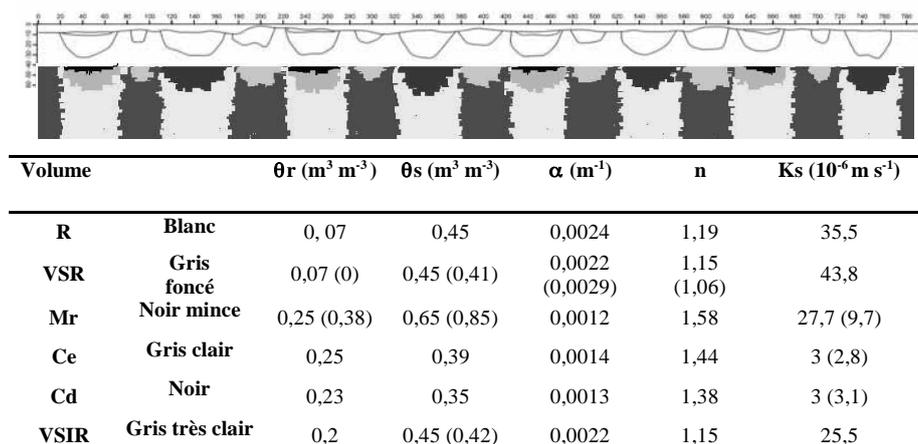


Figure 3 - Paramètres de la modélisation. Entre parenthèses, paramètres initiaux ajustés.

La figure 3 présente la géométrie utilisée dans le modèle et les paramètres attachés à chaque volume de sol. Certains paramètres obtenus sous RETC ne permettant pas au modèle de converger ont été ajustés. Les estimations de K_s des volumes R, VSR et VSIR obtenues par extrapolation (fig. 2) ont été choisies pour leur valeur plus réaliste vis-à-vis de la littérature. Il en a été de même pour K_s , θ_r , θ_s , du mât racinaire.

Profils hydriques observés et simulés

En réaction aux pluies, dans les inter-rangs, la saturation s'observe jusqu'à 50 cm de profondeur minimum. Les inter-rangs enherbés montrent toujours un potentiel au-delà de la saturation supérieur à celui des inter-rangs désherbés. En réaction aux pluies, la variabilité des potentiels est importante dans les rangs et entre 50 et 70 cm dans les inter-rangs. Quelle que soit la modalité, les potentiels mesurés à 70 cm de profondeur après la 2^e pluie sont supérieurs à ceux mesurés après la 1^{ère} pluie.

L'évolution du potentiel a été modélisée sur les 50 premiers centimètres. Au cours des pluies, le potentiel modélisé dans l'inter-rang enherbé est supérieur à celui de l'inter-rang désherbé. Après la 1^{ère} pluie, l'ensemble des modalités présente un profil proche de la saturation, une différence persiste cependant dans l'inter-rang désherbé où les transferts vers la profondeur sont plus modérés. Le modèle sous-estime globalement la saturation mesurée notamment lors de la 2^e pluie.

En comparaison avec les profils tensiométriques mesurés (a), (c), (e) et (f), on note qu'une heure après la 1^e pluie, dans les inter-rangs désherbés, la saturation du profil n'est pas représentée et le modèle indique, à l'inverse, des transferts limités vers la profondeur (50 cm). Le modèle sous-estime globalement la saturation dans les inter-rangs enherbés. Dans les rangs, la réponse du modèle est correcte pour le rang (e), mais incorrecte pour le rang (f) à 50 cm de profondeur avec des transferts d'eau progressifs vers la profondeur qui ne sont pas observés sur la figure 6. Une heure après la 2^e pluie, les profils modélisés ne retranscrivent pas la réponse des tensiomètres sur le terrain. On observe notamment des profils de sol non saturés et une sous-estimation générale des potentiels.

Discussion

Des modalités d'infiltration fonction de la structure du sol

Les résultats de la modélisation ont indiqué une variation de teneur en eau volumique moyenne en réponse aux pluies de $0,07 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ dans les inter-rangs désherbés, de $0,11 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ dans les inter-rangs enherbés et de $0,15 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ dans les rangs. La modélisation retranscrit donc la diminution d'infiltration en corrélation avec la compaction du sol et l'augmentation de l'infiltration dans les inter-rangs enherbés par rapport aux inter-rangs désherbés avec notamment un potentiel au-delà de la saturation dans IRe indiquant un apport d'eau massif du mât racinaire vers le volume compacté. Comme Coquet *et al.* (2004), la modélisation a donc permis de mettre en avant des transferts d'eau en relation avec les contrastes de structures observés à l'échelle du profil.

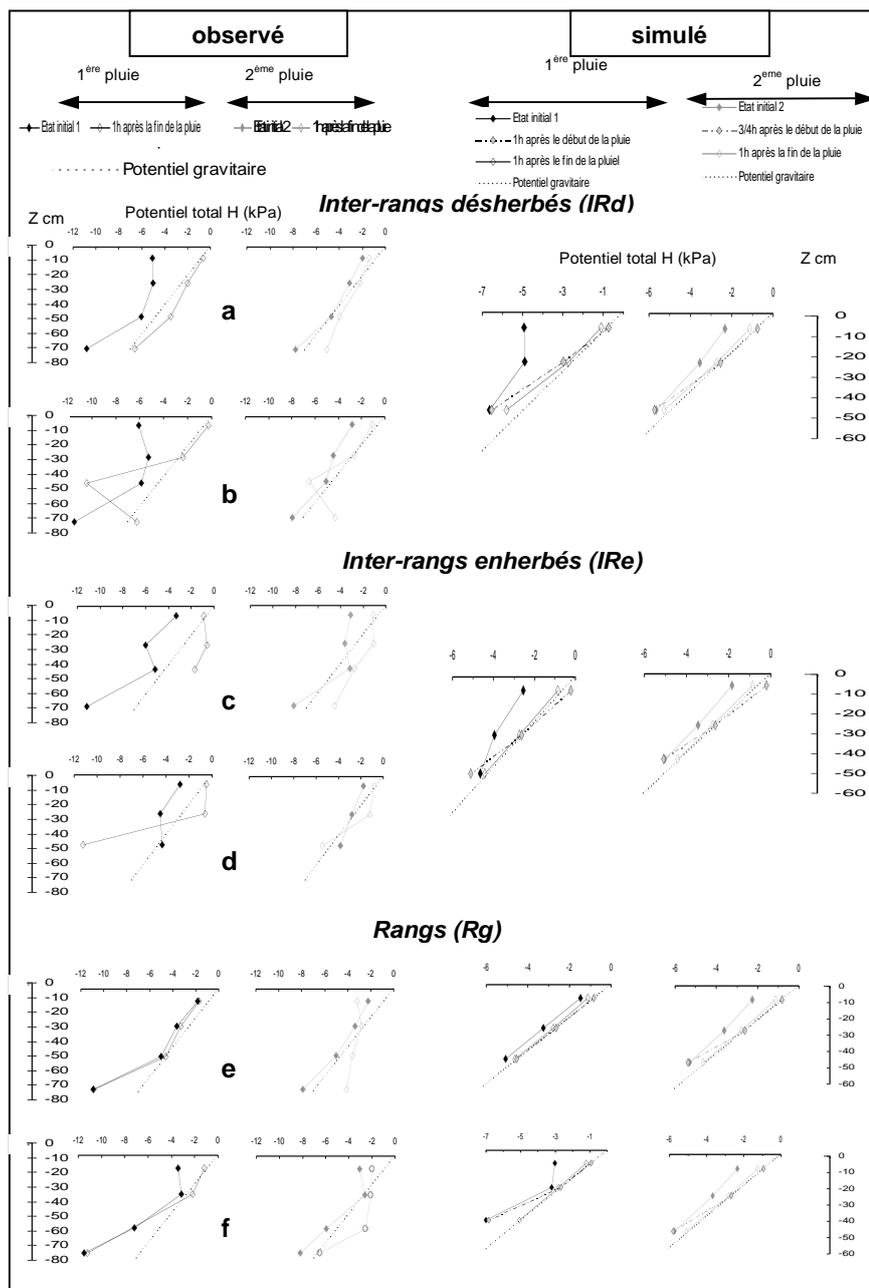


Figure 4 - Évolution du potentiel total H observé et simulé au cours de l'expérimentation

L'existence probable de transferts préférentiels

Le modèle sous-estime la saturation à 45 cm de profondeur dans les inter-rangs et lors de la deuxième pluie. Cela pourrait de l'existence, dans les volumes R, VSR et VSIR, de zones de transferts préférentiels n'étant plus régies par l'équation de Richards en milieu poreux homogène. Nous avons en effet mis en évidence sur le profil de sol l'extension des racines de vigne, si elle était maximale sous les rangs (R et VSR), ne se limitait cependant pas à ces volumes et prospectait latéralement dans VSIR en descendant profondément (> 60 cm). Ces racines pourraient être à l'origine de transferts latéraux et verticaux rapides de l'eau et expliquer ainsi la saturation observée à 50 cm et 70 cm de profondeur sous les volumes Ce et Cd, volumes qui normalement limitent les transferts vers la profondeur du fait de leur faible K_s (Coquet *et al.*, 2004). Les transferts préférentiels de l'eau par la macroporosité sont dépendants de l'état d'humidité du sol. Lorsque le sol est plus humide, la macroporosité est plus efficace, car les pertes latérales (suction de la matrice environnante) sur la paroi des macropores sont moins importantes (Beven et Germann, 1982 ; Flury *et al.*, 1994). Nous avons remarqué que le sol était plus humide avant la seconde pluie. Ceci pourrait

expliquer une saturation plus importante à 70 cm de profondeur à la suite de la seconde pluie. Un autre facteur augmentant l'efficacité des macropores dans les transferts rapides de l'eau est constitué par l'intensité de la pluie (Beven et Germann, 1982). Pour un même volume d'eau appliqué, l'augmentation de l'intensité de la pluie (de 19 mm h⁻¹ à 24 mm h⁻¹) aurait augmenté la quantité d'eau transférée en profondeur.

Afin d'améliorer le modélisation, il serait nécessaire de coupler une caractérisation plus fine des caractéristiques hydrodynamiques avec un modèle à double porosité (Gerke et van Genuchten, 1993) plus adapté aux sols présentant des phénomènes de transferts préférentiels.

Conclusion

Cette étude a confirmé que les transferts dans les 25 premiers centimètres de sol étaient régis par le contraste de structure rang / inter-rang compacté désherbé / inter-rang compacté enherbé. L'enherbement des inter-rangs s'est présenté alors comme une technique adéquate pour limiter le transport des pesticides par les eaux de ruissellement et pour favoriser leur rétention et leur dégradation au sein du mât racinaire riche en matière organique. Cependant, en favorisant l'infiltration vers un volume compacté, l'enherbement génère des zones saturées en eau pouvant se révéler défavorables à l'activité de la microflore aérobie, agent actif de la dégradation des pesticides.

Cette étude a aussi montré qu'en profondeur, l'effet des transferts préférentiels de l'eau provenant des rangs pouvaient se surimposer aux transferts verticaux, l'efficacité des transferts préférentiels augmentant avec l'humidité du sol et l'intensité de la pluie. Ainsi, si la contamination des eaux est généralement abordée en termes de transport des pesticides par les eaux de ruissellement vers les eaux superficielles, les résultats de cette étude montrent que la contamination des eaux souterraines *via* des transferts préférentiels de l'eau n'est pas à négliger. Une caractérisation de ces transferts par des techniques de « tracé visuel » (résistivité électrique, colorant) apporterait un complément d'informations aux mesures tensiométriques et permettrait ainsi d'envisager une modélisation du transport des pesticides par l'eau, ceci dans l'objectif de proposer des solutions à la profession viticole, notamment en termes d'entretien des sols.

Remerciements : Cette étude a été rendue possible grâce au soutien du Domaine Louis Latour et du Bureau interprofessionnel des vins de Bourgogne.

Références bibliographiques

- BALLIF JLP., 1997. *Ruissellement et érosion en Champagne sur sols de vignes et de cultures*. Editions Johanet.
- BATTANY MC. et GRISMER ME., 2000. Rainfall runoff and erosion in Napa Valley vineyards: effects of slope, cover and surface roughness. *Hydrological Processes*, **14**, 1289-1304.
- BEVEN K. et GERMAN P., 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, **18**(5), 1311-1325.
- COQUET Y., DESBOURDES-COUTADEUR C., VACHIER P., SIMUNEK J. et ROGER-ESTRADE J., 2004. Influence de la variabilité spatiale de la structure des sols cultivés sur les transferts de l'eau et de l'ion bromure. *Etude et Gestion des Sols*, **11**(1), 81-92.
- FLURY M., FLÜLHER H., JURY WA. and LEUENBERGER J., 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resources Research*, **30** (7), 1945-1954.
- GERKE HH. and VAN GENUCHTEN MT., 1993. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Research*, **29** (2), 305-319.
- HURAUULT J., PAPUT MC., CREUZOT G. et GRAVIER MH., 2005. *Réseau de suivi des pesticides dans les eaux de en région Bourgogne*. Rapport de présentation des résultats de l'année hydrologique d'août 2003 à juillet 2004, GRAPPE, Fredon Bourgogne.
- JARVIS NJ. and MESSING I., 1995. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, **59**, 27-34.
- MUALEM Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, **12**, 513-522.
- ŠIMUNEK J., ŠEJNA M. and VAN GENUCHTEN MT., 1999. *The HYDRUS-2D software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. Version 2.0, IGWMC-TPS-53, Colorado School of Mines, Golden, CO;
- VAN DIJCK SJE. and VAN ASCH TWJ., 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil and Tillage Research*, **63**, 141-153.
- VAN GENUCHTEN MT., 1980. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, **44**, 892-898.
- VAN GENUCHTEN MT., LEIJ FJ., YATES SR., 1991. *The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. EPA/600/2-91/065, US EPA, Office of research and development, Washington, DC.