

Influence de la structure de l'enherbement des sols viticoles sur le ruissellement et l'érosion hydrique

Xavier Morvan^{1*}, Christophe Naisse¹, Oumarou Malam Issa¹

¹ : Université de Reims Champagne-Ardenne, GEGENA²-EA 3795, CREA, 2 Espl. R. Garros 51100 Reims

* : Personne à contacter xavier.morvan@univ-reims.fr

1- Introduction

Cette étude s'inscrit dans le contexte de la contamination des eaux superficielles et souterraines et de l'érosion des sols. Dans son rapport sur l'état de l'environnement en France - Edition 2006, l'Institut Français de l'Environnement précise que les apports diffus d'origine agricole, nitrates et pesticides, polluent de façon significative une grande partie des cours d'eau et des nappes (IFEN, 2006). De plus, les teneurs en métaux lourds dans les cours d'eau montrent que la qualité du milieu s'est améliorée sur l'ensemble du territoire depuis une trentaine d'années même si le suivi dans la plupart des cours d'eau est très insuffisant, et même si cette qualité reste très moyenne : 70 % des points de mesure affichent une qualité moyenne à mauvaise (IFEN, 2006). Ces résultats montrent la nécessité d'étudier les comportements de ces polluants dans l'environnement. L'étude du transfert de polluants du sol vers les eaux superficielles et souterraines nécessite la prise en compte de différentes composantes du cycle de l'eau, l'eau étant le principal facteur permettant le transport des polluants dans le milieu. Il est donc nécessaire d'étudier en même temps que le lessivage des polluants, différents compartiments du cycle de l'eau comme le ruissellement superficiel et l'érosion hydrique (Lecomte, 1999 ; Lecomte *et al.*, 2001).

D'autre part, cette étude s'inscrit dans le contexte de la protection des sols et plus particulièrement de l'érosion des sols. Sur le plan national, cette menace pesant sur les sols a été prise en compte en 2003 dans le cadre de la loi sur les risques naturels (n°2003-699 du 30/07/2003, JO n°175 du 31/07/2003). Plus récemment, la protection des sols a fait l'objet d'une proposition de directive cadre par l'Union Européenne (European Commission, 2006). Celle-ci a défini différentes menaces notamment l'érosion des sols.

L'évaluation des risques d'érosion des sols à l'échelle de la France indique que les régions viticoles sont particulièrement sensibles (Le Bissonnais et Andrieux, 2007). Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'apparition du ruissellement superficiel dans les vignes, phénomène à l'origine de l'érosion hydrique des sols : une forte intensité de pluie, une forte pente, une implantation des vignes dans le sens de la pente, et/ou un mode d'occupation et d'entretien de la vigne favorisant le tassement des sols (Ballif, 1989). Afin de limiter le ruissellement sur des parcelles viticoles, Le Bissonnais et Andrieux (2007) précisent qu'il est préférable qu'un sol soit meuble en amont afin de retarder l'apparition du ruissellement et tassé en aval afin d'offrir une bonne résistance à l'incision. De plus, l'utilisation d'une couverture de sol permet lutter efficacement contre l'érosion des sols. La couverture du sol peut être constituée d'un mulch qui est défini comme une couche peu épaisse à l'interface entre le sol et l'air et dont les propriétés sont différentes de celles de la surface du sol (Stigter, 1984). Sur les parcelles viticoles, le mulch correspond à un dépôt d'écorces d'arbre et de résidus de tiges provenant de la taille de la vigne qui est déposé sur le sol. En constituant un obstacle physique pour les écoulements superficiels, ils permettent d'agir efficacement contre le ruissellement (Baldy et Stigter, 1993). C'est un système particulièrement adapté pour les zones méditerranéennes et semi-arides (Baldy, 1986). Un autre type de couverture de sol est l'enherbement des vignes. L'intérêt de ce type de système de culture complexe est d'offrir au sol une couverture végétale sur une très large période, voire tout au long de l'année, au lieu de laisser le sol nu entre les rangs de vignes. L'enherbement a plusieurs avantages. Il permet i) d'offrir une couverture physique qui amortit la chute des gouttes d'eau de pluie et limite donc la formation de croûte de battance, ii) de lutter contre l'action érosive et dessiccative du vent, iii) de favoriser l'infiltration de l'eau et iv) de mieux structurer le sol grâce à la formation du

système racinaire de l'herbe. L'enherbement permet donc de diminuer significativement le phénomène d'érosion et donc de diminuer la quantité de solutés transportés (éléments traces métalliques et pesticides) par rapport à une vigne cultivée sans couverture de sol dans les inter-rangs (LIFE project, 2007).

Il est donc nécessaire d'étudier et de comprendre l'influence des différentes pratiques culturales qui permettent de limiter le ruissellement superficiel et l'érosion des sols et qui, par conséquent, participe à une amélioration de la qualité des eaux.

Les objectifs de cette étude ont été i) de quantifier l'influence de l'enherbement des inter-rangs d'une parcelle viticole sur la genèse du ruissellement superficiel et ii) de mieux comprendre l'influence de la structure de l'enherbement sur la quantité d'eau ruisselée et sur le volume de sol érodé. Pour cela, des simulations de pluie *in situ* ont été réalisées sur différentes placettes d'une parcelle viticole du vignoble champenois avec des structures d'enherbement différentes.

2- Matériel et méthodes

2-1- Présentation du site d'étude

Le bassin versant de la Vesle, affluent de l'Aisne, qui se jette ensuite dans l'Oise avant de rejoindre la Seine, est situé à environ une centaine de kilomètre au nord est de Paris et a une surface de 1475 km² (Figure 1). La pluviométrie moyenne sur le bassin, calculée à partir des données de 5 pluviographes, est de 640 mm par an.

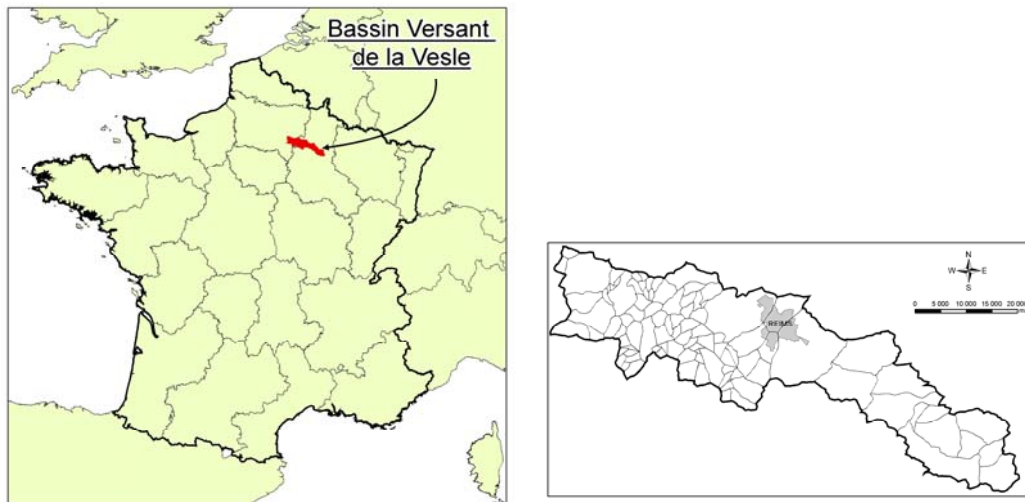


Figure 1 : Le bassin versant de la Vesle.

Dans la région de Reims, la plaine alluviale de la Vesle se trouve majoritairement sur la craie blanche du Campanien. Sur les coteaux du bassin (Mont Berru, Montagne de Reims), les formations géologiques rencontrées datent de l'ère tertiaire. On retrouve les sables et les marnes du Thanétien (e1-2, e2-3, Figure 2), les argiles et les sables à lignites du Sparnacien (e3), les sables du Cuisien (e4), les marnes vertes du Lutétien (e5C), les bancs de calcaires et de marne du Bartonien (formation bleue) et les argiles à meulière du Stampien (g1M) au sommet de la montagne de Reims.

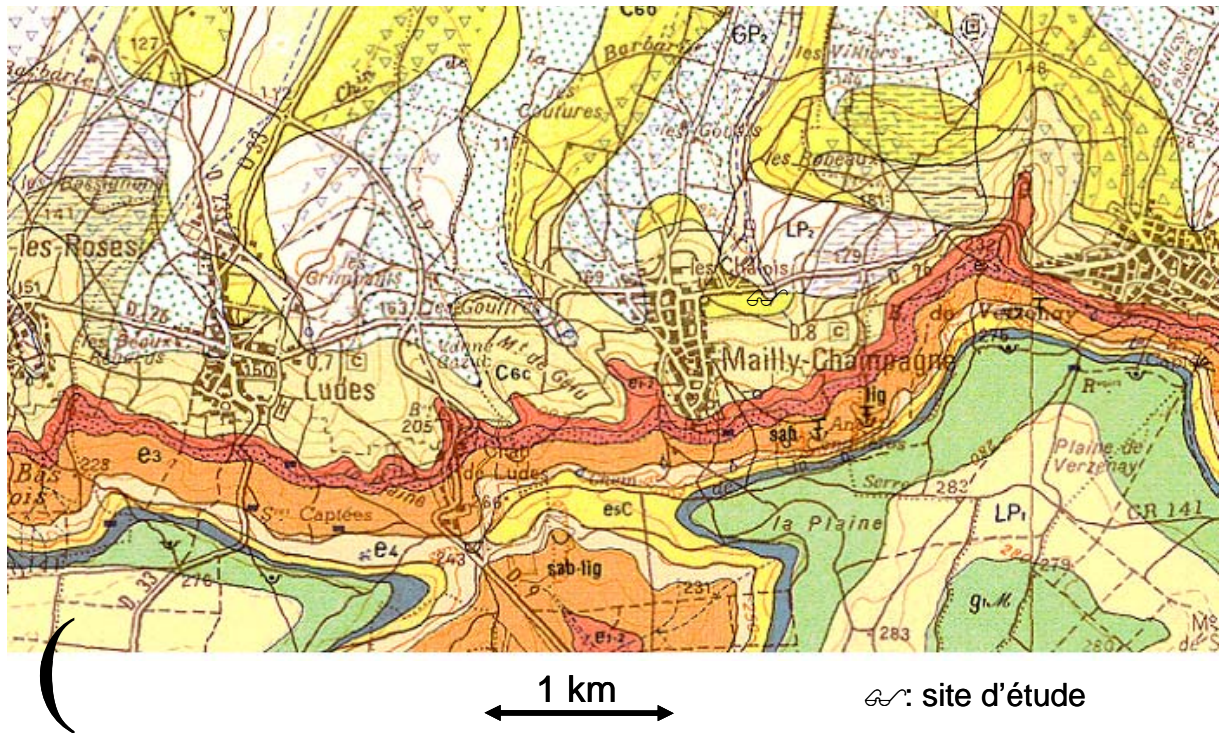


Figure 2 : Carte géologique du site d'étude

La carte pédologique des sols viticoles du bassin versant de la Vesle a été réalisée par le comité interprofessionnel du vin de Champagne (CIVC). La couverture pédologique de la zone viticole est composée de rendzines et de sols bruns.

Ce bassin versant est essentiellement constitué de terres arables et de forêts, le vignoble étant localisé et concentré sur les coteaux (Figure 3).

Les simulations de pluie ont eu lieu pendant le mois d'avril 2009 sur la parcelle des Chalois qui se situe dans la commune de Mailly-Champagne. La formation géologique sous jacente est la craie blanche. La couverture pédologique de la parcelle des Chalois est constituée d'un sol brun peu carbonaté. La pente est de l'ordre de 7% en haut de la parcelle, et de 5% dans le bas de la parcelle. Dans la parcelle étudiée, comme dans la plupart des vignes enherbées du vignoble champenois, la largeur des inter-rangs enherbée est d'environ 60 cm. A la station météorologique de Mailly-Champagne, pendant la période de 2000 à 2007, la hauteur d'eau de pluie maximale mesurée pendant une journée est de 54 mm le 6 juillet 2001 et l'intensité maximale mesurée pendant cette période a été de 29,8 mm/h le 20 août 2002.

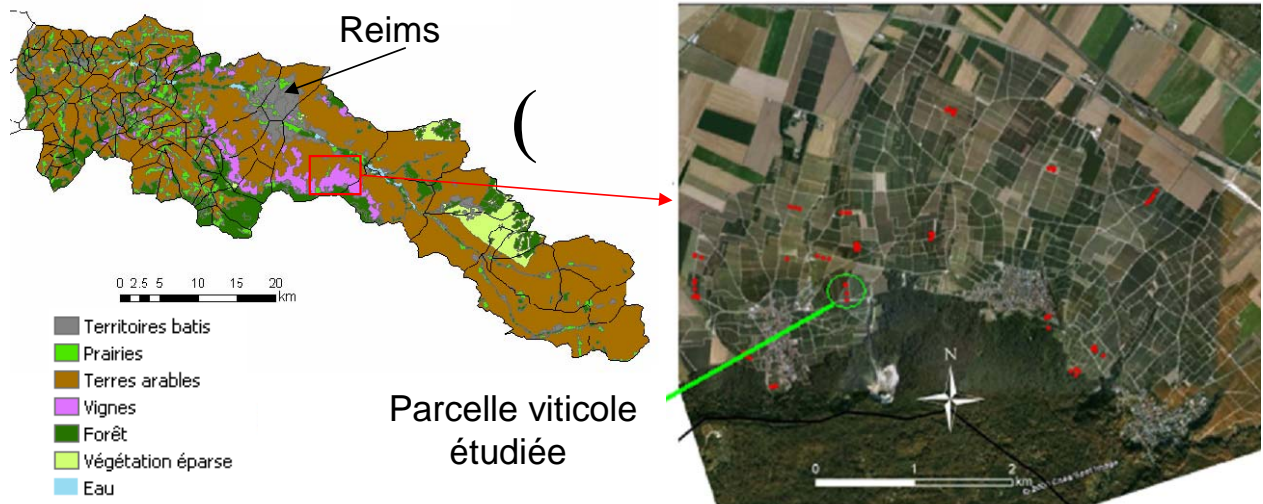


Figure 3 : mode d'occupation du sol sur le bassin versant de la Vesle d'après Corine Land Cover

2-2- Dispositif expérimental

Des simulations de pluie d'une durée d'environ 90 minutes ont été réalisées dans la parcelle les Chalois sur cinq placettes carrées de 50 cm de côté. Les placettes étaient situées au niveau des inter-rangs des vignes, sur la zone enherbée. Pour reproduire un événement pluvieux, un simulateur de type ORSTOM a été utilisé. Les trois premiers essais ont été réalisés dans le haut de la parcelle, alors que les essais 4 et 5 ont été réalisés dans le bas de la parcelle. Lors de chaque simulation de pluie, l'intensité a été mesurée à plusieurs reprises, pendant des intervalles de 10 minutes à l'aide de quatre béchers situés aux quatre coins de la placette. Afin de recueillir l'eau de ruissellement, la placette a été enfoncée dans le sol (Figure 4). Le volume d'eau ruisselée a été mesuré et prélevé dans des flacons en plastique toutes les 5 à 15 minutes suivant l'intensité du ruissellement. Pour chacun des prélèvements, le coefficient de ruissellement (CR) a été calculé, en faisant le rapport du volume d'eau ruisselée par rapport au volume d'eau de pluie reçue. L'eau de ruissellement recueillie a également servi à la détermination de la quantité de sol érodé. Afin d'étudier l'influence de la topographie de la placette sur la quantité d'eau ruisselée, un relevé du relief a été effectué. D'autre part, un échantillon de sol a été prélevé sur chaque placette pour déterminer la granulométrie.



Figure 4 : Placette expérimentale placée dans l'inter-rang enherbé

2-3- Méthodes analytiques

2.3.1. Mesure de la quantité de sol érodé lors de la simulation de pluie

Le volume d'eau a été récolté à la sortie de la placette et placé dans des flacons traités pour résister à un séjour prolongé à l'étuve. Après évaporation de l'eau, les flacons ont été pesés afin de déterminer la charge solide dans les flacons. La quantité de sol érodée est calculée par multiplication du volume ruisselé et de la charge solide et est exprimée en $\text{g.h}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

2.3.2. Rugosité – topographie relative de la zone de simulation

Une microtopographie relative de la surface de chaque placette expérimentale a été établie à la fin de chaque simulation. L'altitude relative de la placette a été relevée tous les dix centimètres à l'aide d'une règle pausée sans pression sur la couverture végétale. En tout, 25 mesures ont été réalisées sur chaque placette. Le relevé tient ainsi compte de la densité du peuplement d'herbe, ainsi que de la vigueur de ce dernier. La modélisation de ces surfaces a été établie de façon à ne rendre compte que des variations de relief de la surface du sol, indépendamment de la pente de chaque placette.

2.3.3. Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée sur des échantillons prélevés dans la tranche de 0 à 5 cm du sol sur les cinq sites de simulations. Ces échantillons ont été séchés une semaine dans une étuve à 45°C. Un tamisage à 2 mm a ensuite permis de séparer la fraction fine des éléments grossiers. Lors de l'étape de tamisage, la fraction fine (< 2 mm) a été séparée des débris végétaux, des débris d'écorces, des racines et des fragments de plastique visibles à l'œil nu.

Puis, 2 grammes de la fraction fine du sol ont été prélevés et dispersés, d'une part chimiquement par l'adjonction dans 100 ml d'eau ultra pure, de 0,2 g d'Hexamétaphosphate de sodium et de 5 gouttes d'ammoniaque, et d'autre part mécaniquement par agitation rotative durant la nuit précédant l'analyse. Il est à noter que les carbonates et la matière organique n'ont pas été éliminés avant de déterminer la granulométrie des échantillons. Les échantillons ont été analysés à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser de type Mastersizer 2000, qui détermine le pourcentage de particules dont la taille est comprise entre 0,01 μm et 200 μm .

3- Résultats et discussion

3-1- Caractéristiques des sols

La granulométrie des 5 sites de simulations a été mesurée. La teneur en argile dans la tranche 0-5 cm du sol est faible, elle est inférieure à 6% sur l'ensemble des sites (Tableau 1) et est proche des résultats déjà réalisés sur cette parcelle en 2005. Ces derniers résultats ont mis en évidence un enrichissement des horizons en argile jusqu'à une valeur d'environ 10% au-delà de 20 cm de profondeur (données non publiées). La teneur en éléments grossiers n'a pas été représentée en raison de la faible quantité de sol prélevée, en effet, l'échantillon de sol n'excédant pas 200g, il ne permet pas d'obtenir une donnée représentative pour cette fraction.

Suivant les triangles de texture, la texture des 5 sols varie de limoneuse à sablo-limoneuse (Tableau 1). Les textures sont proches les unes des autres. Les sols des essais 1 et 3 ont toutefois des textures plus sableuses que les 3 autres.

Tableau 1 : Granulométrie des sols des 5 placettes

	Argile	Limon	Sable	Texture (Jamagne <i>et al.</i> , 1977)	Texture (USDA, 1951)
Essai 1	3,4	45,9	50,7	Limon léger sableux	Limon sableux
Essai 2	6,0	54,3	39,7	Limon léger sableux	Limon fin
Essai 3	2,3	36,2	61,5	Sable limoneux	Limon sableux
Essai 4	5,4	53,2	41,4	Limon léger sableux	Limon fin
Essai 5	5,3	50,3	44,4	Limon léger sableux	Limon sableux

Les variations de microtopographie des sites de simulation permettent d'identifier les variations de la surface rendue invisible par la végétation. Des dépressions ainsi que des chemins d'écoulements des eaux de ruissellement peuvent être mis à jour par ce relevé et apporter des éléments qui permettront une meilleure compréhension des quantités d'eau ruisselée enregistrées à l'exutoire.

La surface de l'essai 1 (Figure 5) se caractérise par la formation d'un sillon central non enherbé, se terminant par une légère dépression en aval au niveau de l'exutoire. L'ensemble de la région droite est plus élevé que la région gauche.

Le deuxième site de simulation forme une large dépression en région centrale avec en périphérie droite et gauche un relief plus important. Ce relief devient moins marqué à l'approche de la gouttière (Figure 5). Deux zones possèdent une faible densité de couverture végétale, en centre haut et en bas à droite, alors que le reste de la placette se trouve être densément enherbé.

Le relief de la placette de l'essai 3 présente une cuvette importante en amont, un chemin d'écoulement décalé vers la droite et une large zone relativement pauvre en herbe le long de la gouttière de recueillement.

La microtopographie de l'essai 4 est relativement homogène d'amont en aval et présente un chemin d'écoulement central. La végétation est homogène, mais peu dense et de petites zones périphériques restent sans couverture.

Le site de l'essai 5 est marqué par un relief se caractérisant par un monticule central faisant obstacle à la circulation de l'eau. Cette surface offre une forte densité d'enherbement à l'exception d'une zone marginale moins dense sur la gauche en amont.

Sur l'ensemble des placettes, on distingue un sillon central plus profond qui est le résultat probable du passage de roue des engins agricoles. Ce sont donc des zones probablement plus denses et qui laissent moins d'eau s'infiltrer en profondeur.

3-2- Essais de simulation de pluie

L'intensité de la pluie a été mesurée lors de chaque simulation. L'intensité de la pluie est variable au cours des cinq simulations en raison du contrôle réduit dont bénéficie le manipulateur au cours de l'expérimentation. Elle varie de 26,0 mm/h pour l'essai 5 à 45,2 mm/h pour l'essai 1 (Tableau 2).

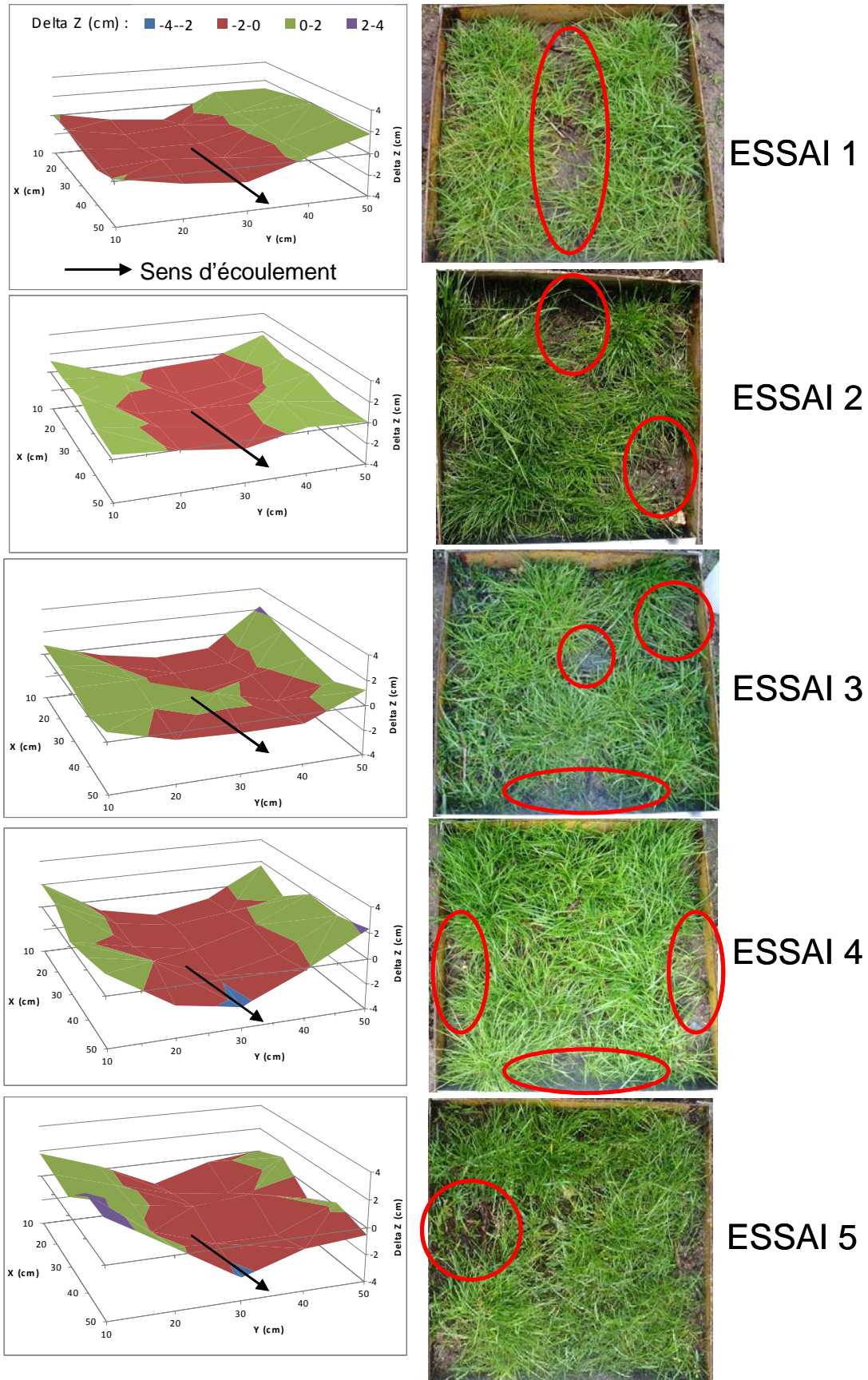


Figure 5 : microtopographie relative et structure de l'enherbement lors des 5 essais de simulation de pluie

Les coefficients de ruissellement (CR) sont très hétérogènes (Tableau 2). Les essais 2 et 5 se caractérisent par un faible CR, inférieur à 1% alors que les essais 1, 3 et 4 sont marqués par un ruissellement important. Les CR sont respectivement pour les essais 1, 3 et 4 de 86,1%, 48,8%, et 29,7%.

Les volumes d'eau ruisselés sont importants lorsque les placettes sont situées sur un inter-rang dont l'enherbement est faible en son centre. Ces fortes valeurs sont probablement dues à la formation d'une dépression résultant de l'action du tassement du sol par les enjambeurs. C'est en effet dans cette configuration, lors de l'essai 1, que le plus fort CR de la campagne de simulation a été enregistré.

Il est probable que la densité de l'enherbement influe de manière importante sur le ruissellement, spécialement devant la gouttière de récupération des eaux de ruissellement. Les placettes des essais 2 et 5, qui présentent une forte densité d'enherbement proche de l'exutoire de la placette, se caractérisent en effet par un très faible CR, respectivement de 0,7% et 1,0%. La placette de l'essai 2 comporte des zones vierges de peuplement végétal, notamment au bord droit de la placette, qui en raison de la texture limoneuse du sol, favorise la formation de croûte de battance. Ces zones ont entraîné une rétention superficielle de l'eau. Cette eau n'est pourtant pas parvenue jusqu'à l'exutoire, car, en raison du relief, le flux d'eau a été dirigé vers la zone centrale densément enherbée et infiltrée totalement.

Les essais 3 et 4, peu enherbés le long de la gouttière, se caractérisent respectivement par un CR de 48,8% et de 29,7%, dû à la formation de petites flaques d'eau directement récupérées par la gouttière.

Tableau 2 : Mesure de l'intensité de pluie, du CR, et de la perte en terre lors des essais de simulations de pluie

Essai	Structure de l'enherbement	Intensité pluie (mm.h ⁻¹)	Coefficient de ruissellement	Perte en terre (g.h ⁻¹ .m ⁻²)
1	sillon central compact non enherbé jusqu'à l'exutoire	45,2	86,1%	13,4
2	Dense avec zone non enherbée en amont de la placette	33,9	0,7%	< 1
3	Zone non enherbée le long de la gouttière au niveau de l'exutoire	38,6	48,8%	4,3
4	Dense avec une zone non enherbée sur les bords et au niveau de l'exutoire	29,9	29,7%	3,5
5	Dense à l'exception d'un bord de la placette	26,0	1,0%	< 1

La masse de sol érodé, mesurée dans les eaux de ruissellement, est liée au CR. Les essais 2 et 5, qui présentent un CR inférieur à 1%, se caractérisent par une masse de terre érodée inférieure à 1 g/h/m² (Tableau 2). La masse de sol érodé n'a pas pu être mesurée car elle était trop faible.

En comparant les essais 1, 3 et 4, on remarque que plus le CR et l'intensité de pluie sont élevés, plus la perte en terre est importante (Tableau 2). En effet c'est au cours de l'essai 1 que le plus fort CR a été mesuré et que la perte en terre a été la plus importante avec 13,4 g/h/m². Ceci s'explique par le fait que plus le CR et l'intensité de pluie sont forts, plus le volume d'eau ruisselé est important. Comme les simulations de pluie durent la même durée, cela signifie que la vitesse de l'eau est plus importante et donc que sa capacité à éroder le sol est plus importante.

3-3- Discussion

Les résultats des différentes études répertoriées (Le Bissonnais, 1990 ; Igounet, 1997 ; LIFE project, 2007) sont difficilement comparables entre eux compte tenu de la différence de surface des placettes étudiées : de 0,25 m² à 500 m². D'après Le Bissonnais (1996), les mesures de ruissellement effectuées sur des placettes de 1 m² obtiennent des charges en particules érodées moitié moindres de celles obtenues sur placettes de 20 à 500 m², en raison de la faible vitesse qu'atteint la lame d'eau sur de

petites placettes. Cette faible vitesse ne permet pas de transporter une grande quantité de particules de sol. Ainsi on peut estimer que la perte en sol sur les placettes de 0,25 m² est sous estimée et n'est pas représentative de la quantité de sol érodé à l'échelle d'une parcelle viticole ou du bassin versant pour une pluie de même intensité.

Les résultats obtenus lors d'une campagne de simulation de pluie similaire au cours de l'automne 2008 sur le même bassin versant, révèlent que le coefficient de ruissellement n'est pas directement corrélable au pourcentage de recouvrement de l'enherbement. En effet, des inter-rangs présentant un recouvrement de 20% conduisent à un CR de 1,60%, alors qu'un inter-rang avec un enherbement de 60% se caractérise par un CR de 5,30%. Lors de cette campagne de simulation de pluie, le CR plus important a été mesuré sur un inter-rang nu, il est de 86,60%. Ce résultat est comparable à celui obtenu au cours de notre étude, lors de l'essai 1 (CR de 86,05%), où le relief marque un sillon central non enherbé. Ceci indique que l'enherbement n'est pas suffisant à lui seul pour limiter le ruissellement. La structure de l'enherbement au sein de la placette paraît donc jouer un rôle plus important sur l'incidence du ruissellement que le pourcentage de recouvrement.

Une étude menée à Baslieux-sous-Châtillon (51) indique que le volume d'eau ruisselée sur des vignes enherbées n'est pas significativement différent du volume d'eau ruisselée mesuré sur des vignes conduites sous mulch (LIFE project, 2007). Néanmoins des parcelles avec du mulch ou de l'enherbement conduisent à un volume d'eau ruisselée plus faible qu'une parcelle de vigne conduite avec des sarments ou avec un sol laissé nu en inter-rang. Les CR relevés dans cette étude, de l'ordre de 3,7 à 1,5% sont nettement plus faibles que ceux que nous avons déterminés expérimentalement. Ceci s'expliquant par une approche méthodologique différente, puisque ces résultats ont été obtenus à partir de pluie réelle d'une intensité généralement de 8 à 10 mm.h⁻¹. L'étude menée par Ballif (1989) va dans le même sens : le CR enregistré à Ecueil (51) sur compost urbain, lors d'une pluie d'intensité inférieure à 10 mm.h⁻¹, est inférieur à 1%. Les simulations de pluie réalisées dans le cadre de notre étude, avec des intensités comprises entre 26 et 45 mm.h⁻¹, correspondent à des épisodes orageux. Il est donc normal que les CR obtenus soient plus importants que ceux obtenus lors du projet LIFE (LIFE project, 2007).

4- Conclusion et perspectives

Les objectifs de cette étude étaient de quantifier l'influence de l'enherbement des inter-rangs des parcelles viticoles sur la genèse du ruissellement superficiel et de mieux comprendre l'influence de la structure de l'enherbement sur la quantité d'eau ruisselée et sur le volume de sol érodé sur des placettes expérimentales de 0,25 m².

Les travaux réalisés ont mis en évidence la variabilité des résultats obtenus. Pour une couverture de sol identique (inter-rang enherbé), les coefficients de ruissellement (CR) varient de 0,7% à 86,1% et les quantités de terre érodée varient de moins de 1 g.h⁻¹.m⁻² à 13,4 g.h⁻¹.m⁻². La couverture de sol ne permet donc d'expliquer à elle seule la variabilité de la quantité d'eau ruisselée observée.

La variabilité de la quantité d'eau ruisselée et de la perte en terre peut s'expliquer en partie par la structure de l'enherbement dans les inter-rangs de vigne. Un inter-rang avec un sillon central peu enherbé en son centre entraîne un CR très élevé, alors qu'un sillon central avec une densité d'enherbement importante conduira à un faible CR. Le microrelief et la densité de l'enherbement dans le sillon central peuvent favoriser le ruissellement superficiel ou le limiter en formant des dépressions.

La surface des placettes joue également un rôle non négligeable. Les résultats sur une même parcelle viticole avec une même couverture de sol sont très variables. La présence ou l'absence d'une touffe d'herbe juste en amont de l'exutoire peut en effet faire passer le CR de 0,7% à 86,1%. Compte tenu de cette variabilité, les résultats obtenus ne sont donc pas aisément extrapolables à une plus grande surface, telle que la parcelle viticoles dans laquelle ces essais de simulation de pluie ont été menés. Toutefois, cette étude met en évidence le fait qu'enherber une vigne ne suffit pas à limiter le ruissellement superficiel et l'érosion des sols. Il est en effet nécessaire que l'enherbement soit dense notamment au niveau du passage de roue des engins agricoles dans le sillon central. A ce niveau, le sol

doit être un minimum couvert par de l'herbe afin de ne pas obtenir des CR proche de ceux obtenus avec une couverture du sol nulle.

Les perspectives qui s'offrent à cette étude sont la détermination de l'influence du ruissellement et de l'érosion des sols non plus à l'échelle de la placette expérimental mais à l'échelle de 2 sous bassins versants de la Seine : celui de la Vesle (Marne, 51) et celui de la Renarde (Essonne, 91). Pour répondre à cette question, une modélisation sera menée à l'aide du modèle STREAM (Sealing and Transfert by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Managment, Lecomte, 1999 ; Cerdan *et al.*, 2001). Cette modélisation permettra également d'étudier l'influence du ruissellement superficiel et de l'érosion des sols sur le transfert de solutés jusqu'au réseau hydrographique.

Bibliographie

Baldy C., 1986. Agrométéorologie et développement des régions arides et semi-arides. Ed. INRA (Paris), 114 p.

Baldy C. et Stigter C. J., 1993. Agrométéorologie des cultures multiples en régions chaudes, Ed CTA -INRA, 246p.

Baffif J.-L., 1989-90. Erosion dans le vignoble champenois : influence des techniques culturales (France). Cahiers ORSTOM Pédologie, vol. 25, n° 1-2, pp 151-156.

Cerdan O, Souchère V, Lecomte V, Couturier A, Le Bissonnais Y. 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff and erosion model STREAM (Sealing Transfer Runoff Erosion Agricultural Modification). Catena 46: 189–205.

European Commission. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the soil protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. COM (2006)232 Brussels, 22/09/2006, 2006a, 30pp. last accessed: 04/04/2007: <http://ec.europa.eu/environment/soil/>.

IFEN, 2006. Rapport sur l'état de l'environnement en France - Edition 2006. Etat des lieux de l'environnement en France et de son évolution. Les synthèses de l'IFEN. 504 pp.

Igounet O., 1997. Modifications des états de surface des sols viticoles par paillages artificiels et par enherbement : incidences sur le microclimat de la vigne et la conservation des sols. Thèse de l'université Louis Pasteur (Strasbourg I), 147 p.

Jamagne M., Betremieux R., Begon J.C., et Mori A. 1977, Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols, Bulletin technique d'information, 324-325, 627-641.

Le Bissonnais Y., 1990. Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation de croûtes superficielles – Apport à la notion d'érodibilité des sols. Cahiers ORSTOM Pédologie, vol 25, n° 1-2, pp. 31–34.

Le Bissonnais Y., 1996. Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m² au bassin-versant élémentaire agricole. In Géomorphologie n°3, Ed. SEDES - Paris 92 p.

Le Bissonnais Y. et Andrieux P., 2007. Impact des modes d'entretien de la vigne sur le ruissellement, l'érosion et la structure des sols ; mécanismes et résultats expérimentaux. Compte rendu des conférences de Mondaviiti Décembre 2006; Progrès Agricole et Viticole, 2007, 124, N°10.

Lecomte, V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant—processus, déterminisme et modélisation spatiale. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Spécialité Science de l'Eau, 212 pp. annexes.

Lecomte V., E. Barriuso, L.-M. Bresson, C. Koch and Y. Le Bissonnais, 2001. Soil surface structure effect on isoproturon and diflufenican loss in runoff, *J. Environ. Qual.* 30 (2001), pp. 2113–2119.

LIFE project, 2007. Rapport technique final. SWAP-CPP: Surface water protection against diffuse crop protection products release, n° du projet LIFE : LIFE04 ENV/FR/000350.

Stigter C.J., 1984. Mulching as a traditional method of microclimate management. *Archives of Meteorology, Geophysics and Bioclimatology B*, v.35, p.147-154.

United States Department of Agriculture (USDA), 1951. Soil survey manual, U.S. Dept. Agriculture handbook, Washington DC, 18.