

Genèse de l'Erosion en milieu viticole méditerranéen à sols bruns calcaires (Calcosols) : Modalités, Déterminants et Indicateurs potentiels.

Blavet D.^(a), De Noni G.^(a), Le Bissonnais Y.^(b), Leonard M.^(c),
Laurent J.Y.^(a), Asseline J.^(b), Roose E.^(a)

^(a) : UR IRD SeqBio, Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, France.

^(b) : UMR INRA-IRD Lisah, Institut National de la Recherche Agronomique, Montpellier, France.

^(c) : UMR CNRS-IEP/UPMF-UJF Pacte, Université Joseph Fourier, CERMOSEM, Le Pradel, France.

Abstract

We studied the early stages of hydric erosion in several agricultural and experimental situations on calcic luvisol in the French mediterranean vineyard. Eight landuse practices were compared and submitted to simulated rainfalls of 60 mm/h (10 plots in all with 3 rainfalls / plot) : scrubland, fallow and 6 modes of vine growing including chemical and mechanical weeding of the inter-rows, grass covering, straw mulching, stone mulching and stone removal. The study revealed that scrubland was sensitive to runoff. We observed the higher runoff rates and soil losses under chemically weeded vineyards, and a fast protective effect against runoff and erosion in straw and stone mulched vineyards. The control of grass covering appeared to be more complex but was promising for the durability of the agrosystem. Finally, we identified two indicators of soil erosion sensitivity : i) the soil cover which reduced significantly soil surface crusting and runoff and ii) the soil aggregate stability, which was strongly related to SOC rate, and reduced the soil surface sealing and the surface water turbidity.

1. Introduction.

En milieu méditerranéen, l'évolution récente de l'espace viticole et des pratiques culturales, et l'existence d'aléas météorologiques fortement érosifs (Le Bissonnais et al, 2002) qui sont potentiellement aggravés par le réchauffement climatique, conduisent à l'augmentation des risques d'érosion des sols viticoles. Dans l'état actuel, l'avenir et la durabilité de la viticulture et de son environnement n'y sont donc pas garantis, et il apparaît de plus en plus nécessaire de se prémunir contre l'érosion depuis l'origine de ce processus, plutôt que de lutter a posteriori contre ses conséquences en aval. On peut, pour cela, tenter de réduire la sensibilité des sols à l'érosion par l'intermédiaire de techniques culturales adaptées. Ceci nécessite la recherche de données i) sur les mécanismes qui président à la genèse de l'érosion et sur leurs effets (déterminants et modalités), en fonction des techniques culturales et des types de sol et ii) sur des indicateurs de sensibilité à l'érosion facilitant la localisation spatio-temporelle des risques d'érosion.

Pour obtenir de telles données, nous avons mené une étude dans plusieurs situations sur un type de sol représentatif (Calcosol) afin i) d'analyser les modalités et déterminants des effets de phénomènes érosifs déclenchés sous différents modes d'occupation du sol, puis ii) de rechercher certains indicateurs de sensibilité des sols face à l'érosion.

2. Matériel et méthodes.

Deux situations principales ont été choisies entre 43°30'N-3°20'E et 44°36'N-3°55'E dans le vignoble méditerranéen français. Elles sont localisées sur des versants représentatifs à substrat marno-calcaire et sols bruns calcaires (RPF : Calcosols ; FAO : Calcic Luvisol , USDA : Haploxeralf), à pente de 6 à 12 %. Les précipitations sont de l'ordre de 1000 mm/an et peuvent dépasser une intensité de 50 mm/h pendant plus d'une heure. La situation "S1" correspond à 3 stations agricoles localisées à Corconne (Gard), St. Mathieu (Hérault) et La Jasse (Hérault). Cette situation permet d'analyser l'effet sur la genèse de l'érosion de techniques culturales actuellement pratiquées par les viticulteurs, et basées sur le désherbage chimique total des inter rangs de vigne (Arshad et al, 1999). Elle comporte une séquence de parcelles avec différents modes d'occupation du sol : parcelles en garrigue (G) / parcelle en jachère (J) de 25 ans après culture traditionnelle de vigne (= témoins) / parcelles de vignes âgées de 4 à 21 ans et désherbées chimiquement (DCT) par herbicide systémique. La situation "S2" consiste en un essai agronomique en Ardèche sur des parcelles de vigne ayant subi un désherbage chimique des inter rangs durant 24 ans et sur lesquelles cinq techniques culturales alternatives au DCT ont été mises en place dans les mois précédant cette étude (Léonard, 2003) : 1) une couverture des inter rangs par paillage avec 25 t/ha de paille fraîche; 2) un enherbement des inter rangs constitué de 30 % de « ray-grass anglais » (*Lolium perenne*) et de 70 % de fétuque rouge (*Festuca rubra*), 3) un travail du sol par sarclage mécanique conventionnel à 10 cm, qui produit une surface désherbée avec 40 % de cailloux, et correspond aux pratiques culturales utilisées antérieurement au désherbage chimique, avec deux variantes : 4) sarclage avec épierage manuel (30 % de cailloux en surface) qui s'apparente aux épierages traditionnellement effectués en milieu méditerranéen et 5) sarclage avec empierage manuel produisant une surface désherbée avec 80 % de cailloux, qui s'apparente aux mulchs de cailloux utilisés traditionnellement dans certains vignobles suisses (Nachtergaele et al., 1998).

Les méthodes d'analyses sont fondées sur des pluies simulées de 60 mm/h qui ont été effectuées sur sol sec (fin de printemps) durant 60 mn (S1) et 90 mn (S2) sur des placettes de 1m², à l'aide d'un mini-simulateur. L'état initial d'humidité du sol et l'intensité de ces pluies ont permis de reconstituer des conditions analogues à celles d'orages sur sol sec. Ces pluies ont été accompagnées de relevés des états de surface avant et post-pluies et de prélèvements de sol. Au laboratoire, plusieurs opérations ont été effectuées à partir des relevés et prélèvements in situ : obtention de variables d'infiltration/ruissellement et de pertes en terre ; déterminations sur la couche 0-5 cm de l'humidité anté et post-pluie, de la densité apparente et de la stabilité des agrégats, et de paramètres associés (texture, carbone organique et inorganique sur sol tamisé à 0-2mm). Pour certaines parcelles en situation S1, la teneur en carbone organique de différentes fractions physiques du sol (Feller & Beare, 1997) et la granulométrie des sédiments ont également été déterminées.

3. Résultats et discussion.

Le tableau synthétique 1 présente quelques caractéristiques de la surface et de la couche 0-5 cm du sol relevées sur sol sec avant les simulations de pluie pour l'ensemble des parcelles étudiées. Parmi les différences remarquables, on peut observer que dans les parcelles témoins sous garrigue et jachère, la teneur en carbone organique et la stabilité des agrégats (diamètre médian des agrégats stables et taux d'agrégats > 200 µm) sont significativement plus élevées que dans toutes les stations sous vigne. On note également que la teneur en argile et la densité apparente sont moindres sous garrigue et jachère que sous vigne désherbée. Par ailleurs le taux de surface fermée, créée essentiellement par des croûtes de battance antérieures, est maximal sous vignes désherbées chimiquement. Ces différences de caractéristiques opposant garrigue et jachère, d'une part, et vignes désherbées chimiquement, d'autre part, peuvent s'accompagner d'une ablation complète des horizons A sous vigne, sans que celle-ci puisse être systématiquement imputable au ravinement.

| Variables analysées | Parcelles S1 (milieu agricole) | | | | Parcelles S2 (milieu expérimental) | | | | | |
|--|--------------------------------|---------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------|
| | Garrigue | Jachère | Vigne DCT 21 ans sarments | Vigne DCT 4 ans | Vigne DCT 24 ans | Vigne Enherbée | Vigne Paillée | Vigne Sarclo- Dépierrée | Vigne Sarclée | Vigne Sarclo - Empierrée |
| Surface : | | | | | | | | | | |
| Pente (%) | 9 | 5 | 7 | 5 | 12 | 15 | 17 | 10 | 14 | 10 |
| Couv vég. (%) (*) | 100 | 100 | 21 | 1 | 12 | 93 | 100 | 1 | 4 | 0 |
| Cailloux (%) | 24 | 15 | 33 | 7 | 49 | 3 | 0 | 27 | 33 | 84 |
| Surface couverte (%) (*) | 100 | 100 | 54 | 8 | 61 | 93 | 100 | 28 | 33 | 83 |
| Surface fermée (%) (*) | 24 | 15 | 42 | 56 | 70 | 43 | < 10 | 8 | 7 | 39 |
| Sol 0-5 cm : | | | | | | | | | | |
| D _{app.} (g/cm ³) | 1,16 | 1,2 | 1,47 | 1,47 | ~ 1,4 | ~ 1,4 | ~ 1,4 | ~ 1,4 | ~ 1,4 | ~ 1,4 |
| Humidité vol (g/cm ³) | 0,23 | 0,22 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,09 | 0,12 | 0,1 | 0,14 |
| CaCO ₃ (g/kg) | 540 | 550 | 570 | 570 | 320 | 290 | 340 | 300 | 300 | 300 |
| C _{org} (g/kg) | 39 | 29 | 8 | 5 | 12 | 15 | 17 | 16 | 16 | 16 |
| C/N | 15 | 15 | 13 | 10 | 8 | 7 | 10 | 8 | 8 | 8 |
| A (%) | 24 | 24 | 34 | 34 | 35 | 34 | 33 | 35 | 35 | 35 |
| S (%) | 22 | 25 | 22 | 22 | 25 | 25 | 26 | 23 | 23 | 23 |
| MA ₂₀₀ (%) (**) | 84 | 90 | 33 | 36 | 42 | 43 | 45 | 54 | 54 | 54 |
| MWD (µm) (**) | 3148 | 3 738 | 132 | 136 | 120 | 128 | 158 | 153 | 153 | 153 |

Moyennes établies sur 3 répétitions pour les variables de surface et 5 répétitions pour les variables du sol.

(*) La couverture végétale comprend la canopée, les adventices et la litière ; la surface couverte regroupe la couverture végétale et les cailloux à la surface du sol. La surface fermée est constituée des croûtes (de battance, de sédimentation et de tassement ainsi que des cailloux inclus dans la surface du sol). (**) : indices de stabilité des agrégats stables à l'eau, selon Le Bissonnais (1998) : MA₂₀₀ = taux d'agrégats > 200 µm ; MWD = diamètre médian (en µm) des agrégats.

Tableau 1 : Caractéristiques de la surface et de la couche 0-5 cm du sol des parcelles avant les pluies.

En terme de **modalités de ruissellement et de pertes en terre**, il ressort des pluies simulées (tableau 2) que les parcelles sous garrigue et jachère subissent des pertes en terres insignifiantes, malgré l'existence de ruissellement sous garrigue. A l'opposé, des coefficients de ruissellement et des pertes en terre élevés sont relevés dans les parcelles de vignes désherbées chimiquement (S1 et S2) ainsi que dans la parcelle sarclo-dépierrée (S2), le maximum étant obtenu en milieu agricole dans la parcelle de vigne désherbée la plus récemment mise en culture (S1). On observe dans ces parcelles à fort ruissellement et pertes en terre une forte augmentation des surfaces fermées durant les pluies, due à la formation de croûtes de battance. Entre ces deux pôles de comportement, on peut noter une réduction significative du ruissellement et/ou des pertes en terre sous vigne en fonction de certaines techniques culturales : réduction sensible des pertes en terre en milieu agricole, lorsqu'il y a conservation des sarments de vigne sur la parcelle et très forte réduction du ruissellement et des pertes en terre, en milieu expérimental, dès la première année de mise en œuvre des techniques de paillage et de sarclo-empierrage. Un classement

global par notation semi-automatique (Blavet et al, 2004) permet finalement d'opposer les parcelles de vigne qui ruissellent peu et présentent peu de pertes en terre (parcelles en jachère, ou paillée ou sarclo-empierreées) et les parcelles désherbées chimiquement qui ruissellent beaucoup et présentent beaucoup de pertes en terre. En terme d'érosion, la parcelle sous garrigue rejoint toutefois les situations les plus favorables (pertes en terre insignifiantes). Le cas de l'enherbement, en situation de classement intermédiaire peut sembler étonnant, mais ceci doit être relié au fait qu'il n'a pas été complètement maîtrisé durant l'année de sa mise en place.

| Variables analysées | Parcelles S1 (milieu agricole) | | | | Parcelles S2 (milieu expérimental) | | | | | |
|-------------------------------------|--|----------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|----------|-----------------|-------------|--------------------|
| | Garrigue | Jachère | Vigne | Vigne | Vigne | Vigne | Vigne | Vigne | Vigne | Vigne |
| | | | DCT | DCT | DCT | Enherbée | Paillée | Sarco-Dépierrée | Sarclée | Sarco - Empierreée |
| | | 25 ans | 21 ans | 4 ans | 24 ans | | | | | |
| Surface fermée | 24 | 15 | 42 | 56 | 70 | 43 | < 10 | 8 | 7 | 39 |
| avant pluie | | | | | | | | | | |
| croutes et cailloux inclus | + 0 | + 0 | + 58 | + 44 | + 29 | + 44 | + 0 | + 84 | + 69 | + 35 |
| après pluie | | | | | | | | | | |
| (%) | 24 | 15 | 100 | 100 | 99 | 87 | < 10 | 92 | 76 | 74 |
| Pluie d'imbibition (mm) | 23 ± 2,1 | 42 ± 0,0 | 9 ± 3,1 | 8 ± 1,0 | 10 ± 3,1 | 9 ± 4,2 | 53 ± 2,8 | 20 ± 4,8 | 24 ± 5,0 | 48 ± 15,7 |
| Coefficient de ruissellement (%) | | | | | | | | | | |
| à 30 mn | 11 ± 6,7 | 0 ± 0,0 | 25 ± 13,8 | 38 ± 9,1 | 26 ± 8,0 | 17 ± 9,0 | 0 ± 0,0 | 8 ± 6,9 | 2 ± 1,9 | 0 ± 0,4 |
| à 60 mn | 49 ± 12,8 | 0 ± 0,0 | 56 ± 10,0 | 55 ± 11,0 | 48 ± 6,3 | 34 ± 8,1 | 1 ± 0,3 | 31 ± 11,4 | 9 ± 6,8 | 6 ± 8,8 |
| à 90 mn | / | / | / | / | 60 ± 6,6 | 45 ± 8,8 | 9 ± 3,0 | 45 ± 12,0 | 17 ± 9,6 | 12 ± 13,0 |
| Pertes en terre (g/m ²) | | | | | | | | | | |
| à 30 mn | 0 ± 0,6 | 0 ± 0,0 | 29 ± 4,7 | 76 ± 45,2 | 45 ± 29,2 | 26 ± 13,2 | 0 ± 0,0 | 14 ± 12,8 | 2 ± 2,6 | 0 ± 0,0 |
| à 60 mn | 3 ± 0,6 | 0 ± 0,0 | 89 ± 8,3 | 242 ± 132,0 | 111 ± 84,7 | 67 ± 11,9 | 0 ± 0,2 | 148 ± 54,8 | 42 ± 28,0 | 11 ± 1,0 |
| à 90 mn | / | / | / | / | 207 ± 141,4 | 112 ± 16,0 | 2 ± 2,0 | 355 ± 87,2 | 113 ± 77,3 | 29 ± 8,9 |
| | Classement des parcelles par notes d'appréciation (0 à 1) : | | | | | | | | | |
| Imbibition et KR | 0,33 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0,28 | 1 | 0,44 | 0,72 | 0,89 |
| Pertes en terre | 1 | 1 | 0,38 | 0 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,75 | 0,88 |
| Note globale | 0,6 | 1 | 0,15 | 0 | 0,1 | 0,37 | 1 | 0,47 | 0,73 | 0,88 |

Données issues des simulations de pluies : les moyennes sont établies sur 3 répétitions pour chaque variable.

Notes d'appréciation : 0 = très défavorable ; 1 = très favorable. Le calcul des notes d'appréciation porte uniquement sur la pluie d'imbibition et les paramètres de ruissellement et de pertes en terre à 30 et 60 mn qui sont disponibles sur l'ensemble des parcelles en S1 et S2. Ce calcul semi-automatique est fonction des groupes de valeurs déterminés à l'aide d'un test statistique de comparaison de moyennes (test de Newman-Keuls). Pour le détail du mode de calcul : cf Blavet et al, 2004.

Tableau 2. Ruissellement et pertes en terre issues des pluies simulées et classement des parcelles.

On peut également observer une érosion accélérée du carbone organique sous vigne désherbée chimiquement : en effet, dans les stations de La Jasse et de St Mathieu (situation S1), pour un sol contenant, en moyenne, 12 g C_{org}.kg⁻¹ dans la couche 0-5 cm, les sédiments issus de pluies simulées en contiennent 22 g C_{org}.kg⁻¹. Ceci peut s'expliquer par i) le fait que les fractions granulométriques < 20 µ (argile + limon fin) concentrent à elles seules les deux tiers du carbone organique (8 g C_{org}.kg⁻¹) et ii) que le ruissellement exerce une exportation sélective de ces éléments fins, puisque, dans ce cas, les sédiments sont constitués de 95 % de ces éléments fins contre 58 % pour la couche 0-5 cm du sol. On retrouve cette sélectivité dans la station de Corconne (S1) où les sédiments sous vigne présentent une granulométrie plus fine que le sol dont ils sont issus.

En matière de **déterminants des différences de ruissellement et d'érosion**, plusieurs éléments ressortent d'une analyse de corrélations entre, d'une part, les données de ruissellement et de pertes en terre (8 variables de ruissellement dont les coefficients de ruissellements et les lames ruissellées + 13 variables de pertes en terre dont pertes totales en terre et turbidité des eaux de ruissellement ...) et d'autre part certaines caractéristiques *a priori* potentiellement déterminantes : caractéristiques de la surface du sol (12 variables dont la pente, le taux de couverture du sol, le taux de cailloux et le taux de fermeture de la porosité) et de la couche supérieure du sol (14 caractéristiques dont l'humidité initiale et la stabilité des agrégats). Pour cette analyse, notons que les données de simulation de pluie utilisées sont les moyennes obtenues à partir de 3 simulations de pluies/parcelle :

- 1) les variations de pente et d'humidité initiale de la couche 0-5 cm du sol ne sont pas corrélées aux variations de ruissellement et de pertes en terre.
- 2) des corrélations statistiquement significatives existent entre l'importance du ruissellement et l'importance des pertes en terre (par exemple : r = 0,95 pour n = 10 parcelles entre lame ruissellée et pertes en terre durant 30 mn).

- 3) le ruissellement n'est pas directement lié au taux de couverture du sol mais à la fermeture de la porosité de surface par augmentation des croûtes de battance (par exemple : $r = 0,74$ pour $n = 9$ parcelles entre lame ruisselée durant 30 mn et taux de fermeture initial de la porosité de surface) et celles-ci sont d'autant plus abondantes que le sol est faiblement couvert, comme sous vigne désherbée.

- 4) la turbidité des eaux n'apparaît pas significativement liée aux variables de ruissellement, mais elle diminue avec l'augmentation de la couverture du sol (par exemple $r = -0,88$ pour $n = 9$ parcelles entre turbidité au temps $t = 60$ mn et taux de surface couverte) et avec l'augmentation de la stabilité des agrégats (par exemple : $r = -0,85$ pour $n = 7$ parcelles entre diamètre médian des agrégats et turbidité de l'eau à 30 mn). En outre la stabilité des agrégats est d'autant plus faible que le taux de carbone organique est faible, tandis que celui-ci diminue avec la diminution de la couverture végétale.

- 5) in fine, l'augmentation des pertes en terre est statistiquement liée à la diminution du taux de couverture du sol (par exemple : $r = -0,84$ pour $n = 10$ parcelles entre pertes en terre à 60 minutes et taux moyen de couverture du sol).

Ces données de ruissellement et d'érosion montrent l'effet positif du sarco-empierreage car les cailloux posés à la surface du sol peuvent protéger la porosité sous-jacente, tout en brisant l'énergie des gouttes de pluie et du ruissellement. Il en est de même pour la paille ajoutée à la surface du sol. Cependant, il faut souligner que la distinction des effets des techniques culturales reste ici limitée puisque l'effet à plus long terme de la restitution de matière organique au sol par les techniques à base de couverture végétale (paillage et enherbement) n'a pu être pris en compte.

Enfin, plusieurs types **d'indicateurs** de la sensibilité des sols face aux pertes en terre sont suggérés par l'analyse des modalités et déterminants de la genèse du ruissellement et de l'érosion :

- **le mode d'utilisation du sol** (vigne désherbée, sarclée, empierreée, jachère, etc.) apparaît comme un bon indicateur synthétique de la sensibilité des sols face au ruissellement et à l'érosion.

- **l'état de surface**, caractérisé notamment par la couverture végétale et le taux de cailloux à la surface du sol apparaît comme un indicateur potentiel particulièrement intéressant puisqu'il est possible de déterminer son évolution spatio-temporelle à partir d'images aériennes.

- **les propriétés de la partie supérieure du sol** et notamment des indices de stabilité structurale ($MA200_{LB}$, MWD_{LB}) apparaissent également intéressantes puisque directement liés à la détachabilité des agrégats et à la turbidité des eaux de ruissellement. Des études antérieures réalisées dans le même type d'environnement ont d'ailleurs montré qu'il existe des relations curvilinéaires avec des effets de seuils entre d'une part, la teneur en carbone organique, la texture et la teneur en carbonate de calcium et d'autre part, la stabilité des agrégats (De Noni et al, 2002).

4. Conclusion et perspectives.

Cette étude souligne tout d'abord la sensibilité à l'érosion hydrique des vignes désherbées chimiquement, et l'intérêt de la protection des cultures de vigne par la couverture (végétale ou non) des sols. Les relations statistiques établies suggèrent l'existence de déterminants et indicateurs de la protection des sols contre l'érosion : en premier lieu, la couverture du sol (végétation, paillage ou empierreage) qui protégerait le sol du ruissellement en limitant la fermeture de la porosité de surface induite par l'énergie des gouttes de pluie et, en second lieu, la stabilité des agrégats liée à la teneur en carbone organique qui protégerait le sol contre le détachement des particules et le colmatage de la porosité de surface. Ceci milite en faveur du développement de méthodes permettant d'appréhender les variations spatio-temporelles de tels indicateurs.

En pratique, parmi les pratiques culturales testées sous vigne, seules les techniques de paillage et de sarco-empierreage semblent susceptibles de protéger à la fois rapidement et efficacement le sol contre le ruissellement et l'érosion. Cependant, l'effet protecteur de l'enherbement des inter-rangs de vigne n'est pas à négliger car il devrait pouvoir augmenter très sensiblement dans le temps avec l'augmentation de la teneur en matière organique du sol et l'augmentation concomitante de sa stabilité structurale. Enfin, cette étude montre également la sensibilité au ruissellement du milieu naturel (la garrigue), ce qui laisse présager des risques non négligeables d'érosion encourus en cas de défrichage de ce milieu.

5. Références bibliographiques

- Arshad M.A., Asseline, J., Blavet D., De Noni G., Laurent J.Y. & Leprun J.C. – 1999. Soil properties as affected by different land use practices in the Languedoc region of southern France. In: Sixth intern. meeting on soils with Mediterranean type of climate (ed. J. Bech), pp 619-621. Univ. Barcelona.
- Blavet D., De Noni G., Roose E., Maillo L., Laurent J. Y. & Asseline J. – 2004. Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion sous vigne en Ardèche. Sécheresse, 15,1: 111-20

- De Noni G., Blavet D., Laurent J. Y., Le Bissonnais Y. & Asseline J. – 2002 - Proposal of soil indicators for spatial analysis of carbon stocks evolution. Paper 1783. Symposium 05. In: 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14-21 August 2002. 11 p.
- Feller C., Beare, M.H. – 1997. Physical control of SOM dynamics in the tropics. *Geoderma* 79: 69-116.
- Le Bissonnais Y. , Montier C., Jamagne M., Daroussin J., & King D. – 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. *Catena* 46, 207-220.
- Léonard M. – 2003. L'érosion hydrique des sols cultivés : Analyse systémique et propositions de gestion. Application aux vignobles d'Ardèche méridionale. Thèse de Doctorat de Géographie. Grenoble : Université Joseph Fourier, 545 p. + annexes.
- Nachtergaele J., Poesen J. & Van Wesemael B. – 1998. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland. *Soil & Tillage Research* 46 : 51-59.