

Sciences Eaux & Territoires

Article hors-série numéro 60

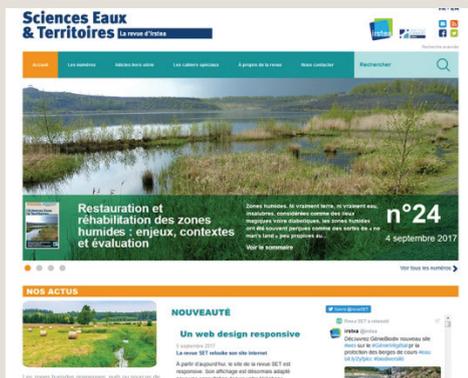
La gestion du sol influence l'export du cuivre dans des parcelles d'un vignoble alsacien

Gwenaël IMFELD, Ève DUROCHER, Matthieu GUINOISEAU, Fatima MEITE, Charline WIEGERT, Benoît GUYOT, Éric PERNIN, Aude LANGENFELD, Najat NASSR, Christine KLEIN et Sylvain PAYRAUDEAU



© V. Pagneux (Irstea)

www.set-revue.fr



Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 60 – 2019

Directeur de la publication : Marc Michel

Directrice éditoriale : Emmanuelle Jannès-Ober

Comité éditorial : Nicolas de Menthère, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Alette Maillard, Charlotte Mermier, Thierry Mougey et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Sabine Arbeille

Secrétaire de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DRISE-IE

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © V. Pagneux (Irstea)



La gestion du sol influence l'export du cuivre dans des parcelles d'un vignoble alsacien

Le cuivre est depuis longtemps utilisé pour le traitement des maladies fongiques de la vigne. Mais la nouvelle réglementation européenne impose aux viticulteurs une baisse significative de son usage en raison de ses impacts sur l'environnement. En attendant une alternative efficace, il est nécessaire de mieux comprendre le devenir du cuivre après son application. En Alsace, des scientifiques étudient plus particulièrement l'influence de la gestion du sol sur la mobilisation du cuivre et sur la qualité à l'échelle de la parcelle viticole, en comparant deux modes de gestion, une gestion « classique » et une gestion sans utilisation d'herbicides de synthèse.

La gestion du sol influence-t-elle l'export du cuivre à partir des parcelles viticoles ?

Un des objectifs de l'agriculture biologique (AB) est de préserver la qualité des eaux et du sol. La progression des conversions en AB s'accompagne d'une modification des pratiques agricoles, comme le désherbage mécanique, pour contrôler les adventices, et l'utilisation de certains produits de biocontrôle autorisés en AB. En particulier, le contrôle mécanique des adventices (travail du sol ou fauche) a comme effet potentiel de limiter la perturbation liée à la pratique agricole sur l'environnement. La gestion d'une végétation spontanée semble notamment améliorer la qualité du sol par rapport au travail du sol en augmentant le carbone organique, la rétention en eau, la biomasse et la biodiversité microbienne du sol (López-Piñero *et al.*, 2013). Cependant, peu d'études se sont penchées sur l'impact des modes de gestion du sol viticole sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de la vigne, incluant la mobilisation d'éléments chimiques, tels que les nutriments, les éléments traces métalliques et les résidus de pesticides.

Le sol est considéré avec le climat comme une composante essentielle de la qualité du terroir, lui-même modulant la qualité du vin (Van Leeuwen et Sequin, 2006). La plupart des sols viticoles sont pourtant considérés

comme dégradés du fait de l'érosion et de la diminution des réserves de nutriments (Martinez-Casnovas et Ramos, 2009), de l'accumulation de métaux (dont le cuivre (Cu) – encadré ①, et le zinc (Zn)) et de polluants organiques (Babcsányi *et al.*, 2016 ; Komarek *et al.*, 2010), ou encore de la compaction résultant des passages répétés de tracteurs (Lagacherie *et al.*, 2006). Des teneurs élevées en cuivre peuvent avoir des effets toxiques vis-à-vis des organismes du sol en fonction de sa disponibilité, ce qui peut à long terme, réduire sa fertilité, et/ou générer un stress phytotoxique, en particulier dans les sols acides (pH < 6). Lors d'événements pluvieux, le cuivre, principalement lié aux matières en suspension, peut s'introduire dans les écosystèmes aquatiques en aval et modifier leur structure et leur fonctionnement. C'est pourquoi il est nécessaire d'évaluer comment les modes de gestion des sols viticoles affectent la qualité du sol et les flux hydriques et de cuivre en lien avec les variations hydro-climatiques.

L'objectif de notre étude est de comparer à l'échelle de la parcelle viticole l'influence d'un mode de gestion du sol, dénotée ici comme « classique », et un mode sans utilisation d'herbicides de synthèse, dénotée ici « pied-à-pied », sur la qualité du sol et la mobilisation du cuivre en lien avec les conditions hydrologiques (encadré ②).

Un site viticole aux caractéristiques hydrologiques bien particulières

Le site d'étude est un bassin versant viticole de 42,7 ha situé dans le piémont alsacien (47°57'9 N, 07°17'3 E) (Grégoire *et al.*, 2010). La pente moyenne du bassin versant est de 15 %. Le bassin versant est principalement occupé par des vignes (59 %), de la forêt et des pâturages (29 %), des bandes enherbées et des fossés (7 %), ainsi que des routes et des chemins (5 %). Les routes et les chemins représentent la principale voie d'écoulement superficiel de l'eau (Lefrancq *et al.*, 2013). Les précipitations ont été suivies grâce à une station météorologique de Météo France (Lefrancq *et al.*, 2013). Les pluies entre avril et octobre sont en moyenne de 438 ± 86 mm (1998-2016) avec 387 mm en 2015 et 428 mm en 2016.

Les écoulements du bassin versant sont intermittents et ne se produisent que lors d'événements de pluie. Le ruissellement apparaît lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration des routes, chemins ou parcelles. Une contribution significative des écoulements de sub-surface au débit des parcelles ou du bassin versant est peu probable en raison des fortes pentes (15 %) et de la conductivité hydraulique à saturation verticale élevée limitant l'écoulement latéral dans les couches superficielles du sol vers l'exutoire. Le drainage vertical moyen à 2 m de profondeur d'une parcelle voisine des parcelles étudiées a été estimé à 128 ± 25 L m⁻² an⁻¹, soit $23 \pm 4,7$ % de la recharge efficace par la pluie (différence pluie – évapotranspiration réelle) sur deux années hydrologiques (1998-1999 et 1999-2000) (Tournebize, 2001).

Des parcelles expérimentales à la gestion contrastée

Les deux parcelles expérimentales de 1 486 m² chacune ($\approx 37,4 \times 17$ m) ont été implantées en 1998 en Riesling avec le porte-greffe 161-49. Chaque parcelle comporte 10 rangs de vigne, avec un inter-rang sur deux enherbé. L'écartement inter-rang est de 170 cm et l'espacement interceps est de 130 cm, la densité de plantation est d'environ 4 000 pieds ha⁻¹, correspondant à une densité classique en Alsace. Les parcelles expérimentales sont séparées hydrologiquement des parcelles adjacentes par une bordurette de 30 cm de hauteur.

L'enherbement maîtrisé par des fauches un inter-rang sur deux constitue le mode d'entretien du sol le plus utilisé en viticulture en Alsace (Wilmes, 2014), pratiqué sur 69 % des parcelles viticoles sur le bassin versant (selon

enquête auprès des viticulteurs). Les parcelles sont classées en type C (SCS-CN, 1997) du point de vue de l'aptitude au ruissellement, comme 45 % du vignoble du bassin versant, et présentent une pente de 10,8 % (valeur moyenne \pm déviation standard pour les parcelles de vigne du bassin : $14,4 \pm 7,6$ %).

1 LE PROBLÈME DU CUIVRE EN VIGNE

Les fongicides cupriques jouent aujourd'hui un rôle essentiel dans la viticulture conventionnelle et biologique, la culture du houblon, de fruits et de pommes de terre et restent indispensables, en particulier en agriculture biologique, par manque d'alternatives efficaces.

Depuis la fin du dix-neuvième siècle, le traitement des vignes par le cuivre a engendré une augmentation de sa teneur dans les sols viticoles (souvent > 100 mg/kg, alors que la moyenne mondiale des sols, sans ajouts de cuivre anthropique, est de 20-30 mg/kg). Le cuivre s'accumule et peut atteindre des taux préoccupants dans les sols et dans les eaux et les sédiments des écosystèmes aquatiques, suite à des phénomènes de transport par dérive, ruissellement et érosion. En Alsace, la viticulture représente la principale culture pérenne utilisatrice du cuivre et la connaissance du cycle du cuivre en contexte viticole demeure faible. La substance active, l'ion Cu²⁺, est disponible en cinq formes inorganiques, hydroxyde de cuivre, oxychlorure de cuivre, mélange de Bordeaux, sulfate de cuivre tribasique et oxyde de cuivre(I). Aujourd'hui généralement entre 2 et 4 kg/ha/an de cuivre élémentaire est appliqué sous différentes formes en viticulture conventionnelle comme biologique. Historiquement, la bouillie bordelaise était massivement utilisée contre le mildiou à des doses allant jusqu'à 20 kg/ha par application (ou 80 kg/ha/an) dans les années 1950. Le cuivre est un élément, et donc ne se dégrade pas, et s'accumule typiquement dans les 10-15 premiers centimètres du sol par des processus de liaison à la matière organique, aux hydroxydes métalliques, aux phases minérales et/ou par précipitation avec des carbonates souvent présents dans les sols viticoles. Les processus de rétention des fongicides cupriques (contenant du cuivre) varient selon le type de sol.

Les apports de matière organique sur les sols peuvent donc modifier à la fois la spéciation du cuivre, sa biodisponibilité et sa mobilité. Dans les vignobles, l'existence de sols nus ou faiblement enherbés et de pentes élevées (10-15 %), favorisent l'érosion et le ruissellement ce qui augmente alors la mobilité du cuivre. La lixiviation du cuivre (vers la nappe) est plus importante pour les sols sableux que pour les sols riches en argiles ou en matière organique. Dans les lames ruisselantes, le cuivre, principalement transporté sous forme solide (lié aux matières en suspension), s'introduit en quantités importantes dans les écosystèmes aquatiques en aval. Ces milieux aquatiques sont vulnérables, car à forte concentration de l'ion cuivre dans l'eau (> 15 µg/L), le cuivre peut modifier profondément leurs structures communautaires et leur fonctionnement. Des teneurs élevées en cuivre peuvent avoir des effets toxiques vis-à-vis des organismes du sol en fonction de sa disponibilité, ce qui peut à long terme, réduire sa fertilité, et/ou générer un stress phytotoxique, en particulier dans les sols acides (pH < 6).

2 LE PROJET DE « PLATEFORME ALSACIENNE DU CUIVRE D'ORIGINE VITICOLE » (2014-2018)

L'accumulation et la mobilisation du cuivre dans des sols viticoles et son transfert vers les écosystèmes aquatiques lors de ruissellements dans les bassins versants viticoles sont des processus peu connus. Le projet de « Plateforme alsacienne du cuivre d'origine viticole (PACOV) »* a permis d'évaluer quantitativement (approche par bilan de masse) (i) l'accumulation et le transport du cuivre à l'échelle d'un bassin versant viticole septentrional, et (ii) l'impact d'une gestion « pied-à-pied » et « classique » sur la mobilisation du cuivre dans un vignoble septentrional (Rouffach, Alsace, France) durant deux saisons culturales contrastées (avril à octobre 2015 et 2016). Le projet PACOV a permis l'étude détaillée et quantitative du cuivre d'origine viticole, en développant une connaissance et une capacité d'expertise sur le comportement du cuivre dans les sols viticoles et de son transport vers les hydro-systèmes.

* Projet co-financé par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse et le Conseil interprofessionnel des vins d'Alsace (CIVA), en partenariat avec l'Établissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricole Les sillons de Haute Alsace, l'association des viticulteurs d'Alsace (AVA), l'Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), la Chambre d'agriculture d'Alsace, l'Institut français de la vigne et du vin (IFV), l'Institut national de recherche agronomique (INRA), les Missions eau alsaciennes, l'Organisation professionnelle des producteurs de l'agriculture biologique en Alsace (OPABA).

Les sols des deux parcelles sont de type limono-argileux calcaires et ont une densité apparente de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, développés sur un sous-sol de loess (Tournebize, 2001). Les principaux types de sols du bassin versant sont des sols bruns calcaires et des sols bruns calciques (Party, 1990). Les parcelles expérimentales sont enherbées en permanence tous les deux inter-rangs pour limiter l'érosion des sols et faciliter le passage des engins sur ces inter-rangs. La couverture végétale s'est développée trois à quatre ans après la plantation de vigne en 1998. Les deux modalités présentent des profils de granulométrie similaires d'après une expertise réalisée jusqu'à une profondeur de 1,5 m et les analyses granulométriques laser (LAS, EOST, Strasbourg) réalisées sur trois profondeurs (données non présentées). La densité apparente des deux parcelles est également similaire sur les trois horizons échantillonnés. La densité apparente reflète la compaction du sol, utilisée pour calculer les masses de cuivre à partir des concentrations.

Les parcelles se distinguent par le mode de gestion de l'entretien du sol. La protection fongicide des deux parcelles est identique et gérée avec du cuivre et du soufre, utilisables en AB.

La parcelle dite « classique » constitue le mode d'entretien du sol le plus représenté en Alsace. Elle est composée d'un inter-rang sur deux en enherbement spontané, maîtrisé par fauche, d'un inter-rang sur deux dés herbé mécaniquement par travail du sol et d'un dés herbage chimique du cavaillon (sous la ligne de ceps). La fréquence du dés herbage consiste généralement en deux dés herbages chimiques : un premier au débourrement de la vigne (avril) et un second début août. Entre deux et cinq fauches sont effectuées par an. Pour le travail du sol, entre trois et cinq passages sont réalisés, alternant un travail grossier et profond, à l'aide d'un outil à dents rigides, et un travail plus fin et plus superficiel par herse rotative.

La modalité « pied-à-pied » vise à limiter le surcroît de temps de travail généré par l'absence d'utilisation d'herbicides de synthèse sur le cavaillon. La parcelle est enherbée un inter-rang sur deux de pied-à-pied et les deux demi-cavaillons attenants sont en enherbement spontané. L'autre inter-rang ainsi que les deux demi-cavaillons attenants sont travaillés mécaniquement. Chaque cavaillon est donc pour moitié enherbé et fauché, et pour moitié travaillé. Cette gestion permet un fauchage ou un travail simultané de l'inter-rang et du cavaillon, en combinant un cultivateur à dents (10-30 cm de profondeur) ou un girobroyeur pour l'inter-rang, à des interceps de fauche ou de travail du sol pour le cavaillon.

Les conditions hydrologiques, le facteur principal déterminant les flux

En termes de fonctionnement hydrologique, les deux parcelles ont été caractérisées en 2015 et 2016 par un état de réserve en eau mensuelle toujours inférieure à la réserve utile, limitant ainsi les flux verticaux et la genèse de ruissellement.

Afin d'établir le bilan hydrique, l'eau de ruissellement provenant des deux parcelles a été collectée grâce à une gouttière couverte située en aval de la parcelle et

débouchant sur deux collecteurs en acier inoxydable de 68 L disposés en série avec répartiteur. Les gouttières et les collecteurs ont été recouverts d'un film en PTFE (polytétrafluoroéthylène) afin de limiter l'adsorption des métaux et les contaminations lors du passage des machines agricoles. Le débit à l'exutoire des parcelles a été suivi en continu à l'aide d'un capteur de hauteur ultrason (ISMA) relié à un débitmètre et combiné à un canal Venturi à section exponentielle (ISMA).

Pour évaluer les teneurs en eau dans les sols, des fosses ont été ouvertes sur chaque parcelle en décembre 2014 pour installer à 40 et 80 cm de profondeur (i) des plaques lysimétriques ($40 \times 30 \text{ cm}$) permettant de récupérer par gravité des solutions de sols dans des regards situés en aval des fosses et (ii) des sondes d'acquisition en continu (15 min) des teneurs en eau et de la température (Sondes CS655 Campbell). La localisation des deux fosses, à l'interface du cavaillon et de l'inter-rang enherbé, a été retenue pour des contraintes de sensibilité du dispositif au passage des engins agricoles. Cette localisation permet de comparer les données collectées par les capteurs sous le cavaillon des deux parcelles expérimentales.

2015 et 2016 : des profils hydrologiques bien distincts !

Les deux saisons culturales 2015 et 2016 montrent des profils très contrastés en termes de pluviométrie, d'intensité des pluies, d'occurrence et d'intensité de ruissellement sur les deux parcelles. La saison culturale 2015 a été moins pluvieuse que 2016 (80 % des semaines avec une pluviométrie non nulle pour un total de 387 mm en 2015, et 90 % de semaines pluvieuses pour un total de 428 mm en 2016). Une analyse, réalisée sur les 107 épisodes de pluie ayant généré du ruissellement à l'échelle du bassin versant (48 en 2015 contre 59 en 2016) souligne que l'intensité moyenne des pluies a été deux fois plus importante en 2015 qu'en 2016 (4,3 mm/heure contre 2,5 mm/heure). Le volume total ruisselé en 2015 sur les deux parcelles a été de 1 259 L en modalité classique contre 1 117 L en pied-à-pied. En 2016, ce volume ruisselé est inférieur de 80 % et 87 % à celui de 2015 respectivement pour les modalités classiques (252 L) et pied-à-pied (149 L). Exprimé en pourcentage de la pluie (i.e., coefficient de ruissellement), le ruissellement hebdomadaire ne représente en 2015 que $0,15 \pm 0,36 \%$ (moyenne \pm écart type) en modalité classique, et $0,13 \pm 0,34$ en pied-à-pied. Le coefficient de ruissellement maximum observé a atteint 1,37 % en classique et 1,28 % en pied-à-pied lors de l'orage du 22 juillet 2015 (36,8 mm en 54 mn avec une intensité maximale sur 6 minutes de 84 mm/h).

Ces valeurs maximales sont cependant très faibles par rapport aux valeurs maximales rapportées dans d'autres vignobles comme par exemple dans le Champenois (12 % de ruissellement sur parcelles enherbées et de 20 à 60 % de ruissellement sur parcelles enherbées un rang sur deux) (Tuyon *et al.*, 2017). En 2016, le coefficient de ruissellement hebdomadaire atteint seulement $0,03 \pm 0,04 \%$ en classique et $0,02 \pm 0,03 \%$ en pied-à-pied. Les valeurs maximums observées en 2016 (0,15 % en classique et 0,08 % en pied-à-pied la semaine du 22 au 29 juin) sont d'un ordre de grandeur inférieur au maximum de 2015.

Le bilan hydrique révèle l'absence de flux verticaux

La figure 1 synthétise le bilan hydrique des modalités classique et pied-à-pied. Ce bilan repose sur le calcul de la réserve utile sur 1,5 m de sol dépendant de la proportion relative d'argile, de sable, de matière organique (Rawls *et al.*, 1982). L'évapotranspiration réelle (ETR) a ensuite été estimée à partir de l'évapotranspiration potentielle mesurée sur site par Météo France en fonction de la réserve en eau du sol (UVED, 2011). La réserve utile (RU) calculée sur les deux modalités diverge peu du fait de la similitude de la granulométrie et de la matière organique prise en compte. La réserve utile sur 1,5 m est estimée à 301 mm sur la modalité classique et à 321 mm sur la modalité pied-à-pied. Entre mars 2015 et mars 2016, les deux parcelles ont été en déficit agronomique, c'est-à-dire caractérisées par un stock d'eau inférieur à la réserve utile, calculé sur une base mensuelle (UVED, 2011). Toujours sur une base mensuelle, l'excédent hydrique calculé par (Pluie – ETR – (RU – Réserve initiale)) (UVED, 2011) est nul, limitant l'occurrence et l'intensité des flux verticaux. L'absence de flux collectés au niveau des plaques lysimétriques à 40 et 80 cm durant la période culturale de mars à octobre en 2015 et 2016 confirme que les flux verticaux générés sont insuffisants pour permettre une évaluation de l'intensité et de la chimie des eaux drainées. La reprise des infiltrations à 40 cm et 80 cm est observée en janvier et février 2016, correspondant à 2,2 % de la pluviométrie de ces deux mois en classique et à 12 % en pied-à-pied. La très faible contribution des termes de ruissellement et d'infiltration profonde dans le bilan hydrologique durant la période culturale de mars à octobre souligne l'importance des processus d'évaporation et de prélèvements par la vigne et la végétation herbacée des inter-rangs sur le premier mètre de sol.

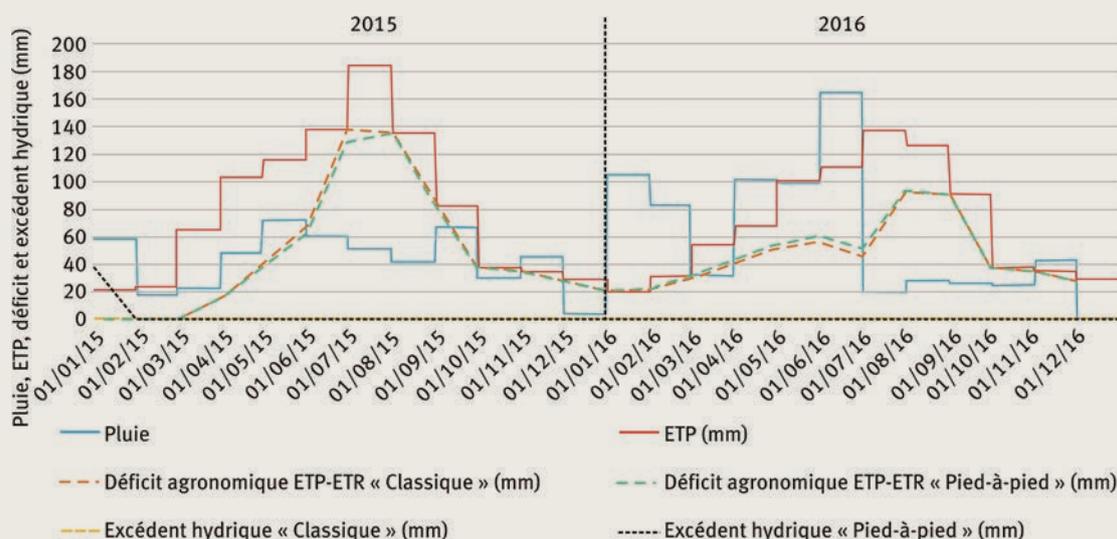
Les teneurs en eau diminuent avec la profondeur du sol

Le suivi des teneurs en eau à haute fréquence temporelle (toutes les 15 minutes) a permis d'identifier une teneur en eau systématiquement plus élevée à 40 cm qu'à 80 cm sur les deux modalités. À 40 cm de profondeur, la teneur en eau est plus élevée en modalité pied-à-pied et semble moins sensible aux épisodes de pluie par rapport à la modalité classique. La différence de conductivité hydraulique à saturation entre les deux modalités (i.e. 10 et 35 mm h⁻¹ respectivement pour les modalités pied-à-pied et classique) atténue l'impact de la pluie et explique en partie ce comportement. La dynamique verticale de la teneur en eau, relativement plus faible en pied-à-pied qu'en classique, semble refléter une différence moyenne de 9 % (2015) et 6 % (2016) de la teneur en eau volumétrique entre 40 et 80 cm en pied-à-pied contre seulement 3 % (2015) et <0,1 % (2016) en modalité classique. En termes de dynamique saisonnière, l'évaporation potentielle associée aux conditions climatiques et la demande en eau de la vigne se traduisent par une diminution de 10 % de la teneur en eau à chaque profondeur pour les deux modalités, puis d'une remontée en automne.

Ce dispositif de mesure *in situ* démontre l'existence de flux verticaux bien qu'une collecte d'eau au niveau des plaques lysimétriques n'a pas pu être effectuée durant la période culturale. La quantification fine des flux infiltrés et leur reprise par évapotranspiration sur les deux premiers mètres de sol nécessiterait la mise en œuvre d'un modèle hydrodynamique comme celui appliqué sur la parcelle immédiatement à l'amont des parcelles expérimentales par Tournebize *et al.* (2012), en tenant compte de la végétation.

1 Bilan hydrique mensuel de janvier 2015 à décembre 2016 en modalités classique et pied-à-pied.

Le bilan est établi sur la base des pluies, de l'évapotranspiration potentielle (ETP), et du calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) à partir de l'évolution de stock d'eau et de la réserve utile calculée (Rawls *et al.*, 1982) à partir des paramètres granulométriques des sols des deux parcelles.



L'état de surface, le taux de recouvrement par la végétation, et la biodiversité floristique reflètent le mode de gestion du sol

La couverture végétale, tant pour le cavaillon que pour les inter-rangs, est plus importante sur la modalité pied-à-pied mais sans impact majeur en termes de diversité floristique. La fréquence plus importante des fauches dans la modalité pied-à-pied semble favoriser certaines espèces adaptées aux perturbations fréquentes. Décaler et espacer les dates de fauche, ou utiliser des outils comme des rouleaux permettraient d'éviter une perte de diversité au fil des années.

Les états de surface du sol reflètent le travail du sol

La caractérisation des états de surface, inspirée de la méthode de Roose (Roose, 1996), a été réalisée sur les cavaillons et sur les inter-rang travaillés (l'inter-rang enherbé étant enherbé sur 100% de sa surface et contribuant très peu au ruissellement) afin (i) de dissocier les éléments grossiers et les mottes selon leur taille et leur forme, (ii) d'identifier les macropores, (iii) d'estimer le taux d'encroûtement structural et sédimentaire, (iv) de déterminer le taux de couverture par la végétation et sa hauteur, et (v) de déterminer la hauteur des seuils à franchir pour une éventuelle lame ruisselante afin d'évaluer la rugosité du sol.

Concernant l'état de surface, un encroûtement total du sol en surface a été observé dans 70% des évaluations de l'état de surface en 2015 et dans 40% des cas en 2016. Les travaux du sol détruisent ponctuellement la croûte structurale, en partie lors d'un travail grossier et en totalité lors d'un travail fin. Les pluies peuvent cependant rapidement altérer la porosité créée. En effet, en 2015, sur l'inter-rang de la modalité pied-à-pied, l'encroûtement varie de 0% le 16 juillet à 100% le 24 juillet, ce qui peut s'expliquer par le cumul de pluies entre ces deux dates (45,6 mm) et leur intensité (orage de 36,8 mm en 54 min le 22 juillet). De même en 2016, l'encroûtement de la modalité classique varie de 9% le 27 avril à 100% le 26 mai, du fait de l'absence de travail de sol et d'un cumul de précipitation de 80 mm durant cette période. Par ailleurs, un travail du sol grossier (cultivateur à dents rigides) crée davantage de mottes qu'un travail fin de type hersage. La rugosité est alors plus importante. La hauteur des seuils à franchir par une éventuelle lame ruisselante est estimée de 1 à 2 cm. L'eau peut toutefois s'écouler entre les mottes lorsque la surface est totalement encroûtée et que les mottes sont scellées à la matrice.

Les travaux du sol permettent donc momentanément une meilleure infiltration de l'eau dans le sol par une plus grosse porosité structurale. Cet effet est cependant transitoire et sa durée dépend du cumul et de l'intensité des pluies. Il est intéressant de noter que le taux de croûte structurale du cavaillon désherbé chimiquement est toujours supérieur à 70%, alors que celui du cavaillon de la modalité pied à pied peut descendre en dessous de 10%.

La diversité floristique et le recouvrement végétal reflètent la gestion globale du sol

Trois inventaires floristiques ont été réalisés durant la saison 2015 et 2016, en différenciant les inter-rangs travaillés et enherbés, ainsi que le cavaillon. Le taux

de recouvrement des espèces majoritaires a été évalué dans des quadrats d'un mètre carré afin de déterminer les types d'adventices et de les relier aux phénomènes observés.

La couverture végétale est plus importante sur la modalité pied-à-pied (15 à > 80%) que sur la modalité classique (0 à 30%), aussi bien pour le cavaillon que pour les inter-rangs (figure 2). En 2016, le nombre plus important d'interventions de travail du sol entre juin et août limite le développement de la végétation. Le type de travail semble primordial : un travail grossier ne détruit pas totalement les adventices présentes, contrairement à un travail fin. Cette différence marquée de couvert végétal entre les deux modalités ne se traduit cependant pas par une différence significative de la richesse floristique (i.e., le nombre d'espèces végétales présentes). Cependant, on observe une différenciation selon les compartiments : l'inter-rang enherbé est plus riche en espèces que l'inter-rang travaillé, alors que le cavaillon désherbé chimiquement est le moins riche. Le suivi de quadrats dans les inter-rangs enherbés a permis de mettre en évidence les espèces dominantes, c'est-à-dire les espèces occupant le plus d'espace. On retrouve ainsi une espèce de la famille des Poacées (*Poacea F.*), le Ray-grass anglais (*Lolium perenne*), le Trèfle blanc (*Trifolium repens*), le Plantain lancéolé (*Plantago lanceolata*) et le Pissenlit (*Taraxacum officinale*).

L'indice de diversité de Shannon, prenant en compte le taux de recouvrement des espèces, a été calculé pour les deux modalités. La diversité spécifique de la modalité pied-à-pied en 2016 est significativement inférieure à la modalité classique ($p < 0,01$). Ceci indique une prédominance de certaines familles (e.g., Poacées) et d'espèces, au détriment d'autres. Le nombre plus important de fauches dans la modalité pied-à-pied a pu avoir comme effet de favoriser certains taxa, plus adaptés aux perturbations régulières comme la famille des Poacées ou les espèces traçantes comme le trèfle rampant (*T. repens*).

Les flux de cuivre dépendent fortement du travail du sol

Les résultats soulignent également l'impact majeur du travail du sol sur le ruissellement, l'érosion et les flux de cuivre associés. Pour limiter l'export massif de cuivre principalement associé aux particules érodées, il semble nécessaire de limiter un travail du sol destructurant la couche superficielle avant les périodes orageuses.

Afin d'établir un bilan de masse du cuivre à l'échelle de la parcelle, les échantillons d'eau de ruissellement ont été recueillis proportionnellement au débit lors de chaque événement ruisselant (100 mL tous les 3 L) entre mars et octobre 2015 et 2016 grâce à un échantillonneur automatique réfrigéré asservi au débit (ISCO) dans des flacons en polyéthylène. Les échantillons ont été combinés chaque semaine en un échantillon composite. Des échantillons composites de sol ont été également recueillis mensuellement en surface (0-3 cm) tous les dix mètres au centre de deux inter-rangs travaillés et sous le cavaillon associé. Ils ont ensuite été regroupés en un échantillon pour chaque parcelle par date d'échantillonnage. Les caractéristiques physico-chimiques des échantillons de sol sont décrites par ailleurs (Duplay

et al., 2014). Le Cu géogénique (naturellement présent dans le sol) a été quantifié à partir d'un sol de référence (qui n'a jamais été cultivé) échantillonné à une profondeur de 70 cm (à proximité de la roche-mère) dans la zone boisée, en amont du bassin versant. Les caractéristiques physico-chimiques du sol, y compris la teneur en matière organique du sol (par perte au feu), ont été déterminées comme décrit précédemment (Duplay et al., 2014). Les analyses hydrochimiques (NCOP, DOC, NTK, PO_4^{4-} , Ptot, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Fe_{tot} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , et K^+) ont été effectuées comme décrites précédemment (Lucas et al., 2010). Les échantillons de sol ont été séchés, tamisés (2 mm), broyés avant fusion alcaline et dissolution totale dans des acides pour l'analyse de la composition chimique par ICP-MS (Dequincey et al., 2006). Les échantillons d'eaux ont été filtrés sur membranes de 0,45 μm , afin de séparer les matières en suspension (MES) du filtrat (appelé ci-dessous « phase dissoute »). Le filtrat a été acidifié à pH ~ 2 à l'aide d'acide nitrique bidistillé, avant quantification du cuivre par ICP-MS.

Les apports et les concentrations de cuivre dans les sols viticoles restent constants !

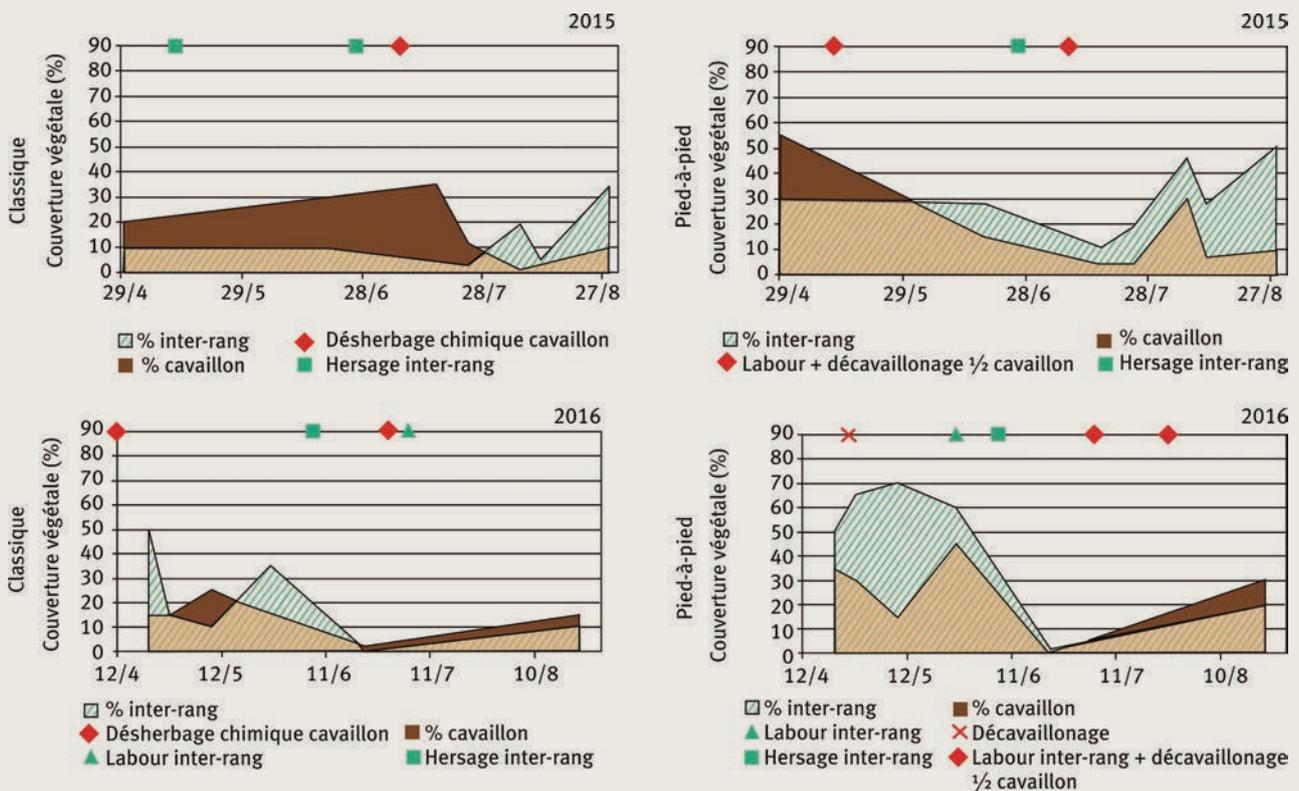
À l'échelle du bassin versant, la variabilité des applications de cuivre a été estimée en 2015 et 2016 sur la base d'enquêtes auprès des 35 viticulteurs. Les fongicides cupriques ont été appliqués directement sur les feuilles de la vigne pour lutter contre le mildiou (*Plasmopara viticola*) (MacKie et al., 2012). En moyenne, $2,1 \pm$

$1,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ de fongicides Cu (exprimés en cuivre) ont été appliqués sur quasiment tout le bassin versant (> 97 %) de mai à août sous forme de sulfate de cuivre (bouillie bordelaise, $CuSO_4 + Ca(OH)_2$), d'oxyde de Cu (Cu_2O), hydroxyde de Cu ($Cu(OH)_2$) et d'oxychlorure de Cu ($3Cu(OH)_2 \cdot CuCl_2$). L'apport du Cu atmosphérique sur le bassin versant au cours de la période (~ 83 g) est négligeable ($\leq 0,5\%$ de la masse de fongicides ; Chabaux et al., 2005).

Malgré une pluviométrie plus importante en 2016 (428 mm) qu'en 2015 (387 mm), le total de cuivre appliqué sur les deux parcelles est inférieur à 3 kg de cuivre par hectare ($2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ pour 2015 et $2,8 \text{ kg ha}^{-1}$ pour 2016) (figure 9). Malgré une attaque du mildiou importante en 2016, la quantité de cuivre appliquée est similaire à celle appliquée 2015. En 2016, la pression mildiou a en effet nécessité l'utilisation complémentaire d'un fongicide de synthèse (Grip Top, non homologué en AB) sur les deux modalités. Il est à noter que le calendrier de traitement, les produits et les doses ont été les mêmes sur les deux modalités.

Les concentrations en cuivre dans la couche superficielle du sol (0-3 cm) se situent entre 100 et 150 mg de cuivre par kg de sol à l'exception des deux premiers points de la modalité classique en 2015 autour de 200 mg de cuivre par kg de sol. La constance des concentrations en cuivre dans le sol des deux parcelles reflète la stabilité du pool de cuivre dans la couche superficielle de sol et une variabilité mensuelle liée principalement à l'hétérogénéité de l'échantillonnage. La stabilité du pool de cuivre dans le

2 Évolution temporelle de la couverture végétale estimée en taux de recouvrement de l'inter-rang travaillé et du cavaillon et superposition des travaux du sol pour la parcelle classique et la parcelle pied-à-pied en 2015 et 2016.



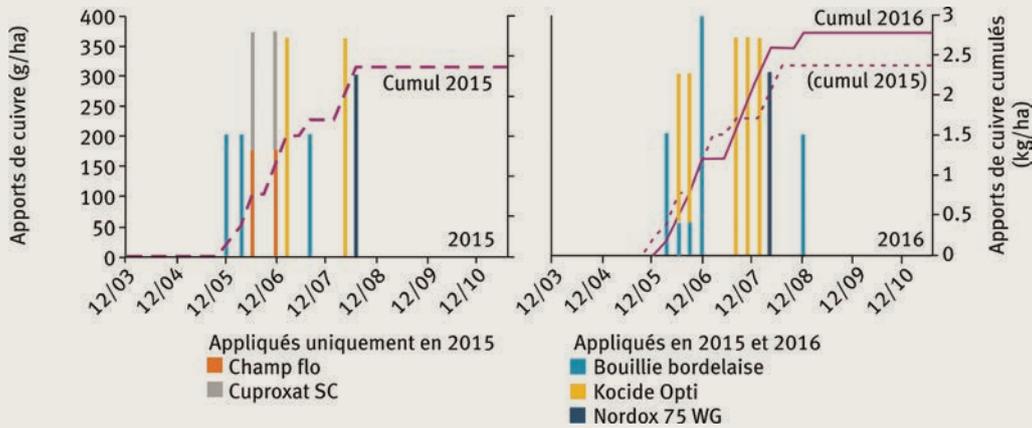
sol est due à la faible contribution des apports annuels de cuivre dans le budget global (entre 3,6% et 5,1 % du stock initialement présent dans la couche superficielle du sol selon les modalités et l'année).

Le cuivre s'exporte avec les particules de sol

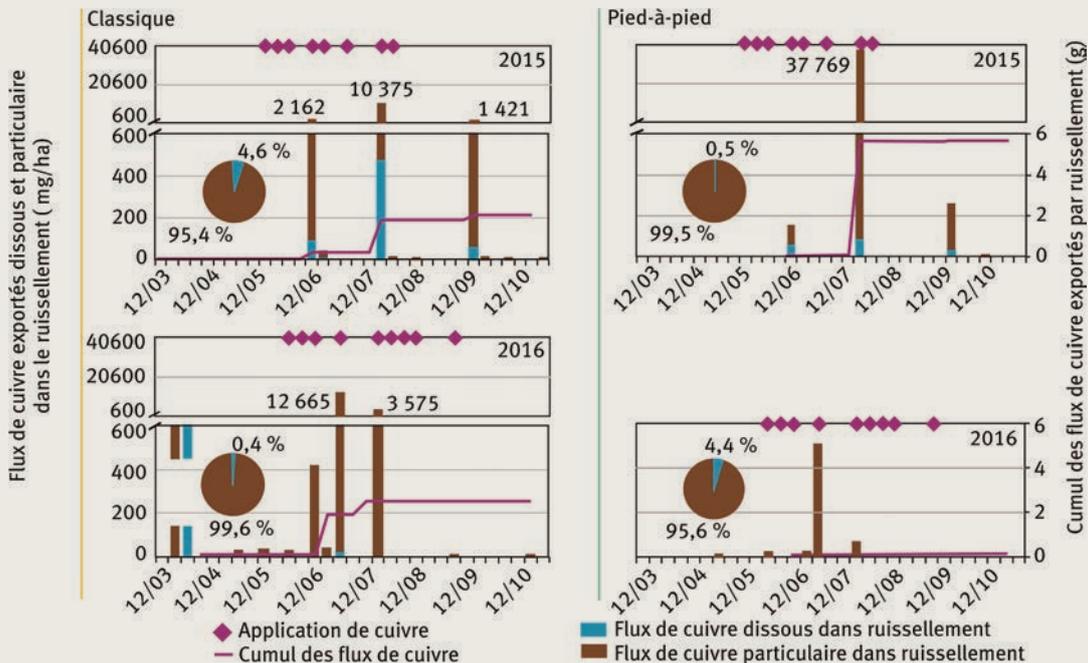
La masse de cuivre exportée dans le ruissellement sous forme particulaire représente plus de 95 % de la masse totale de cuivre exportée sur les deux saisons et les deux parcelles (figure 4). La différence de masse de cuivre exportée est de cinq ordres de grandeur plus élevée pour les semaines les plus pluvieuses comparées aux semaines les moins pluvieuses. Ceci souligne l'influence

majeure des conditions hydrologiques sur l'export saisonnier de cuivre. L'export de cuivre en 2015 sur les deux modalités, et en 2016 sur la modalité classique, a principalement eu lieu durant trois semaines caractérisées par un volume ruisselé supérieur à 80 L et un coefficient de ruissellement supérieur à 0,1 %. Sur la modalité pied-à-pied en 2016, le ruissellement maximal observé ne dépassait pas 60 L (coefficient de ruissellement maximal de 0,07 %). La semaine durant laquelle l'export de cuivre a été le plus important en 2015 représente 74 % de l'export saisonnier du cuivre en modalité classique et 99 % en pied-à-pied, contre 75 % (classique) et 78 % (pied-à-pied) en 2016.

3 Traitements fongiques cupriques en 2015 (à gauche) et 2016 (à droite) et cumul de cuivre élémentaire appliqué (trait violet pointillé pour 2015 et trait plein 2016). Le cumul 2015 est reporté en 2016 pour comparer les calendriers d'application 2015 et 2016. La stabilité du pool de cuivre dans le sol est due à la faible contribution des apports annuels de cuivre dans le budget global (entre 3,6 % et 5,1 % du stock initialement présent dans la couche superficielle du sol selon les modalités et l'année).



4 Masse spécifique de cuivre (mg ha⁻¹) exportée en phase dissoute et particulaire et cumul des masses de cuivre exportées sur chaque modalité.



Le travail du sol influence le ruissellement, l'érosion et les flux de cuivre associés

L'export total de cuivre par ruissellement en 2015 est de 2,2 g en modalité classique et de 5,7 g en modalité pied-à-pied. Les flux de cuivre associés aux eaux de ruissellement sont plus faibles pour la modalité pied-à-pied, à l'exception d'un événement ruisselant majeur en juillet (figure 4). Cet événement intervient après un travail de labour sur la parcelle pied-à-pied. En 2015, l'export saisonnier représente 0,6 % et 1,6 % du cuivre appliqué en modalité classique et pied-à-pied, respectivement. En 2016, l'export de cuivre (2,5 g) ne change pas significativement pour la modalité classique mais diminue drastiquement pour la modalité pied-à-pied (0,1 g, figure 4). En 2016, l'export saisonnier de la parcelle classique (soit 0,6 % du cuivre appliqué) était 30 fois supérieur à celui en modalité pied-à-pied (0,02 % du cuivre appliqué). Cela s'explique par l'absence d'événements ruisselants significatifs en modalité pied-à-pied. Le coefficient de ruissellement maximum en 2016 était de 0,08 % en pied-à-pied contre 1,5 en classique, reflétant notamment l'impact du couvert végétal et de la gestion du sol.

Concernant la contribution du transport vertical à l'exportation de cuivre, les prélèvements réalisés en période hivernale (janvier et février 2016) correspondent à 0,006 % et 0,012 % des applications de 2015, respectivement, pour les parcelles classique et pied-à-pied. Des expériences de lessivage du cuivre des sols de Rouffach en laboratoire ont également confirmé le faible risque de transport vertical du cuivre dans la matrice du sol (Meite *et al.*, 2018). ■

Remerciements

Cette étude a été financée par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM), le Conseil interprofessionnel des vins d'Alsace (CIVA), France AgriMer, en partenariat avec l'Association des viticulteurs d'Alsace (AVA), l'Association pour la relance agronomique en Alsace (ARAA), la Chambre d'agriculture d'Alsace, l'Institut français de la vigne et du vin (IFV), l'Institut national de recherche agronomique (INRA), les Missions eau alsaciennes, l'Organisation professionnelle des producteurs de l'agriculture biologique en Alsace (OPABA). Nous remercions l'ensemble du personnel du Domaine de l'école et de l'Établissement public local d'enseignement et de formation professionnelle agricole Les sillons de Haute Alsace. Nous remercions particulièrement Rémi Koller pour les discussions utiles et les commentaires de fond sur cet article, ainsi que l'équipe AGISEM (UMR LAE Nancy-Colmar, INRA-Université de Lorraine) pour les relevés floristiques.

Les auteurs

Gwenaël IMFELD, Fatima MEITE, Charline WIEGERT, Benoît GUYOT, Éric PERNIN et Sylvain PAYRAUDEAU

Laboratoire d'hydrologie et de géochimie de Strasbourg (LHyGeS), Université de Strasbourg/ENGEEES, CNRS, 1 rue Blessig, F-67084 Strasbourg Cedex, France.

✉ imfeld@unistra.fr

Ève DUROCHER, Matthieu GUINOISEAU et Christine KLEIN

EPLEPPA Les sillons de Haute Alsace, 8 aux remparts, F-68250 Rouffach, France.

✉ christine.klein@educagri.fr

Aude LANGENFELD et Najat NASSR

RITTMO Agroenvironnement®, ZA Biopôle, 37 rue de Herrlisheim, CS 80023, F-68025 Colmar Cedex, France.

France.

✉ Aude.LANGENFELD@rittmo.com

✉ Najat.NASSR@rittmo.com

EN SAVOIR PLUS...

📄 **BABCANYI, I., CHABAU, F., GRANET, M., MEITE, F., PAYRAUDEAU, S., DUPLAY, J., IMFELD, G., 2016**, Copper in soil fractions and runoff in a vineyard catchment: insights from copper stable isotopes, *Science of the Total Environment*, n° 557-558, p. 154-162.

📄 **DUPLAY, J., SEMHI, K., ERRAIS, E., IMFELD, G., BABCANYI, I., PERRONE, T., 2014**, Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices, *Geoderma*, n° 230-231, p. 318-328.

📄 **KOMAREK, M., CADKOVA, E., CHRASTNY, V., BORDAS, F., BOLLINGER, J., 2010**, Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects, *Environment International*, n° 36, p. 138-151.

📄 **MEITE, F., ALVAREZ-ZALDIVAR, P., CROCHET, A., WIEGERT, C., PAYRAUDEAU, S., IMFELD, G., 2018**, Impact of rainfall patterns and frequency on the export of pesticides and heavy-metals from agricultural soils, *Science of the Total Environment*, n° 616-617, p. 500-509.

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE BIO, Chiffres de la bio en France, consultable sur : <https://www.agencebio.org/vos-outils/les-chiffres-cles/>
- BABCSÁNYI, I., IMFELD, G., GRANET, M., CHABAUX, F., 2014, Copper stable isotopes to trace copper behavior in wetland systems, *Environ. Sci. Technol.*, n° 48, p. 5520-5529.
- BORA, F.-D., BUNEA, C.-I., RUSU, T., NASTASIA, P., 2015, Vertical distribution and analysis of micro-, macroelements and heavy metals in the system soil-grapevine-wine in vineyard from North-West Romania, *Chem. Cent. J.*, 9:19.
- BRIAR, S.S., GREWAL, P.S., SOMASEKHAR, N., STINNER, D., MILLER, S.A., 2007, Soil nematode community, organic matter, microbial biomass and nitrogen dynamics in field plots transitioning from conventional to organic management, *J. Appl. Ecol.*, n° 37(3), p. 256-266.
- CALVET, R., CHENU, C., HOUOT, S., 2011, *Les matières organiques des sols : Rôles agronomiques et environnementaux*, Éditions France Agricole, 347 p., consultable sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01192274>
- CELETTE, F., WERY, J., CHANTELOT, E., CELETTE, J., GARY, C., 2005, Belowground Interactions in a Vine (*Vitis vinifera* L.)-tall Fescue (*Festuca arundinacea* Shreb.) Intercropping System: Water Relations and Growth, *Plant Soil*, n° 276, p. 205-217.
- CHABAUX, F., RIOTTE, J., SCHMITT, A.D., CARIGNAN, J., HERCKES, P., PIERRET, M.C., *et al.*, 2005, Variations of U and Sr isotope ratios in Alsace and Luxembourg rain waters: origin and hydrogeochemical implications, *C. R. Geosci.*, n° 337, p. 1447-1456.
- DEQUINCEY, O., CHABAUX, F., LEPRUN, J.C., PAQUET, H., CLAUER, N., LARQUE, P., 2006 Lanthanide and trace element mobilization in a lateritic toposequence: inferences from the Kaya laterite in Burkina Faso, *Eur. J. Soil Sci.*, n° 57, p. 816-830.
- DUPLAY, J., SEMHI, K., ERRAIS, E., IMFELD, G., BABCSÁNYI, I., PERRONE, T., 2014, Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices, *Geoderma*, n° 230-231, p. 318-328.
- GAVIGLIO, C., GONTIER, L., 2013, Conduite de la vigne sans herbicides : des résultats agronomiques en micro- parcelles au transfert à grande échelle, une remise en question de l'organisation du travail, in : AFPP, 22^e Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes, consultable sur : https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2018/12/Vigne_sans_herbicides.pdf
- GRÉGOIRE, C., PAYRAUDEAU, S., DOMANGE, N., 2010, Use and fate of 17 pesticides applied on a vineyard catchment, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, n° 90, p. 406-420.
- ITV, 2006, Entretien des sols viticoles en Alsace et respect de l'environnement, 15 p., consultable sur : http://saturne.io.reseau-concept.net/saisie/upload/137029/Sols_1_13.pdf
- KOMÁREK, M., CADKOVÁ, E., CHRASTNÝ, V., BORDAS, F., BOLLINGER, J., 2010 Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects, *Environment International*, n° 36, p. 138-151.
- LAGACHERIE, P., COULOUMA, G., ARIAGNO, P., VIRAT, P., BOIZARD, H., RICHARD, G., 2006, Spatial variability of soil compaction over a vineyard region in relation with soils and cultivation operations, *Geoderma*, n° 134(1-2), p. 207-216.
- LEFRANCQ, M., IMFELD, G., PAYRAUDEAU, S., MILLET, M., 2013, Kresoxim methyl deposition, drift and runoff in a vineyard catchment, *Sci. Total Environ.*, n° 442, p. 503-508.
- LEFRANCQ, M., PAYRAUDEAU, S., GARCÍA VERDÚ, A.J., MAILLARD, E., MILLET, M., IMFELD, G., 2014, Fungicides transport in runoff from vineyard plot and catchment: contribution of non-target areas, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, n° 21, p. 4871-4882.
- LÓPEZ-PIÑEIRO, A., PENA, D., ALBARRAN, A., SÁNCHEZ-LLERENA, J., BECERRA, D., 2013, Behavior of MCPA in four intensive cropping soils amended with fresh, composted, and aged olive mill waste, *J. Contam. Hydrol.*, n° 152, p. 137-146.
- LUCAS, Y., SCHMITT, A.D., CHABAUX, F., CLÉMENT, A., FRITZ, B., ELSASS, P., *et al.*, 2010, Geochemical tracing and hydrogeochemical modelling of water-rock interactions during salinization of alluvial, *Appl. Geochem.*, n° 25(11), p. 1644-1663.
- IMFELD, G., VUILLEUMIER, S., 2012, Measuring the effects of synthetic pesticides on bacterial communities in soil: a review, *Eu. J. Soil Biol.*, n° 49, p. 22-30.
- MAILLARD, E., IMFELD, G., 2014, Pesticide mass budget in a stormwater wetland, *Environ. Sci. Technol.*, n° 48, p. 8603-8611.
- MARTÍNEZ CASASNOVAS, J.A., CONCEPCION RAMOS, M., 2009, Soil alteration due to erosion, ploughing and levelling of vineyards in north east Spain, *Soil Use and Management*, n° 25 (2), p. 183-192.
- MEITE, F., ALVAREZ-ZALDÍVAR, P., CROCHET, A., WIEGERT, C., PAYRAUDEAU, S., IMFELD, G., 2018, Impact of rainfall patterns and frequency on the export of pesticides and heavy-metals from agricultural soils, *Science of the Total Environment*, n° 616-617, p. 500-509.
- PARTY, J.-P., 1990, *Les unités de paysage et les sols du vignoble alsacien*, Programme de recherche développement sur la qualité des vins d'Alsace et leurs terroirs, CIVA, ARAA, Région Alsace, 150 p.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L., SAXTON, K.E., 1982, Estimating Soil Water Retention from Soil Properties, *J. Irrig. Drain. Eng.*, n° 108(IR2), p. 166-171.
- REYNIER, A., 2005, *Manuel de viticulture*, 9^e édition, Ed. Tec et Doc Lavoisier, Paris, 549 p.
- ROOSE, E., 1996, Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants des montagnes, *Bulletin Réseau Érosion*, n° 16.
- SCS, 1997, Hydrology, Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Soil. Chap. 7, Hydrologic Soil Groups, Natural Resources Conservation Service Conservation Service, USDA, Washington, D.C., consultable sur : <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22526.wba>
- TOURNEBIZE, J., 2001, Impact de l'enherbement du vignoble alsacien sur le transfert des nitrates, Thèse Université de Strasbourg, 306 p., consultable sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003768/document>
- TOURNEBIZE, J., GRÉGOIRE, C., COUPE, R.H., ACKERER, P., 2012, Modelling nitrate transport under row intercropping system: vines and grass cover, *J. Hydrol.*, n° 440-441, p. 14-25.
- TUYON, Y., VAUCHAUSSADE, X., MORVAN, X., LANDEMAINE, V., DESPRATS, J.-F., 2017, *Analyse de l'érosion des sols sur le vignoble champenois de la Marne*, Rapport final BRGM/RP- 66688-FR, Gegen², BRGM, 79 p.
- UVED, 2011, Calcul du bilan hydrique. Cours en ligne UVED (Université Virtuelle Environnement et Développement Durable), Université du Maine, Université de Rennes, Université Michel de Montaigne Bordeaux 3.
- VAN LEEUWEN, C., SEGUIN, G., 2006, The concept of terroir in viticulture, *Journal of Wine Research*, n° 17 (1), p. 1-10.
- WILMES, C., 2014, Un désherbage mécanique sur vigne qui progresse au-delà des producteurs bio, AGRESTE Alsace, n° 27, 6 p., consultable sur : <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R4214A15.pdf>
- ZENG, C., WANG, Q.J., ZHANG, F., ZHANG, J., 2013, Temporal changes in soil hydraulic conductivity with different soil types and irrigation methods, *Geoderma*, n° 193-194, p. 290-299.