

Transfert des polluants agricoles par le ruissellement et l'érosion diffuse et couplage des modèles STREAM et SENEQUE dans le bassin versant de la Vesle

Oumarou Malam Issa¹, Béatrice Marin¹, Jean-Baptiste Dessogne¹, Edith Chopin¹

¹ GEGENA-EA 3795, CREA 2, Esplanade Roland Garros 51100 REIMS

| | | |
|-------|--|---|
| 1. | Objectifs | 1 |
| 1.1. | Objectifs généraux..... | 1 |
| 1.2. | Objectifs spécifiques | 1 |
| 2. | Synthèse des activités réalisées en 2006..... | 2 |
| 2.1. | Rappels des résultats antérieurs à 2006 et présentation des activités 2006 | 2 |
| 2.2. | Caractéristiques physiques | 3 |
| 2.2.1 | Conductivité hydraulique à saturation..... | 3 |
| 2.2.2 | Granulométrie..... | 4 |
| 2.2.3 | Résistance à la pénétration | 4 |
| 2.2.4 | Densité apparente | 6 |
| 2.3. | Etude du transfert des ETM du sol à la plante (<i>Vitis vinifera L.</i>)..... | 7 |
| 2.3.1 | Concentration et répartition géochimique des ETM dans le sol..... | 8 |
| 2.3.2 | Transfert des ETM du sol à la plante et accumulation dans la plante | 8 |
| 3. | Conclusion et perspectives | 9 |

1. Objectifs

1.1. Objectifs généraux

Cette contribution rentre dans la problématique du projet TRANSPOLL proposé par le GEGENA dans le cadre du contrat d'objectifs AQUAL (Lutte contre les pollutions diffuses en milieu rural). Elle constitue également le 2^{ème} volet de l'action EROSPACE (Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des versants pour la modélisation de l'érosion des sols à l'échelle du bassin). Le projet de couplage STREAM-SENEQUE sur le bassin versant de la Vesle constitue l'axe central de notre contribution au sein du PIREN-SEINE.

Au total, trois objectifs principaux sont visés :

- 1. étudier les processus physiques et géochimiques, liés aux constituants et aux états hydriques du sol, qui régissent l'adsorption, le transfert et la redistribution des polluants agricoles en général, et les éléments traces métalliques en particulier ;
- 2. adapter le modèle STREAM en fonction des résultats de l'étude du bassin versant de la Vesle ;
- 3. contribuer à l'élaboration de SENECAM, un outil adapté à l'étude de la répartition spatiale des activités agricoles sur la qualité de l'eau à l'échelle de petits bassins versants (50 – 500 km²).

1.2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques de notre contribution comprennent une phase d'acquisition de données et une phase d'adaptation et d'utilisation du modèle STREAM.

La phase d'acquisition de données comprend les activités suivantes :

- l'acquisition de données sur les caractéristiques des sols ;
- la quantification du ruissellement et de la perte en terres en laboratoire et *in situ* ;

- la caractérisation physique et chimique des particules érodées ;
- les mesures *in situ* des capacités d'infiltration de différentes unités de sols homogènes définies sur la base des données cartographiques existantes (pédologique, géologique...), de visites de terrain et de l'occupation du sol ;
- des mesures en laboratoire (simulation de pluie, mesures de la conductivité hydraulique) et calage des données obtenues sur le terrain.

Ces données sont nécessaires à la paramétrisation de STREAM et la prédiction de la pollution diffuse dans le bassin versant de la Vesle.

La phase d'adaptation et d'utilisation du modèle STREAM comprend :

- la constitution d'une base de données ;
- l'intégration des données dans un SIG ;
- l'utilisation de STREAM pour prédire l'impact des pollutions métalliques par le ruissellement et l'érosion diffuse, et tester l'influence de la modification des pratiques agricoles.

2. Synthèse des activités réalisées en 2006

2.1. Rappels des résultats antérieurs à 2006 et présentation des activités 2006

Les activités antérieures à 2006 ont été menées sur des trois sols de caractéristiques granulométriques et chimiques différentes, représentatifs du secteur viticole du bassin versant de la Vesle. Elles ont permis de déterminer les réponses au ruissellement et les capacités d'infiltration de ces sols, d'évaluer leur degré de contamination par les éléments traces métalliques et enfin de comprendre un aspect des modalités de transfert de ces éléments associés au matériel érodé.

Les travaux réalisés au cours de l'année 2006 ont porté sur :

- 1. la mesure des caractéristiques physiques. Le but principal de ces mesures est de constituer une base de données nécessaire à la paramétrisation du modèle STREAM dans le bassin versant de la Vesle. Nous avons poursuivi les mesures de conductivité hydrauliques sur les différentes unités de sols pas encore étudiées. La Figure 1 montre la carte de répartition des unités de sol dans le secteur viticole de la vallée de la Vesle. Cette carte montre également les points de mesures de conductivité hydraulique, géoréférencés à l'aide d'un GPS (points rouges). Les premiers résultats de conductivité hydraulique avaient montré une forte variabilité spatiale indépendante des unités de sols. Afin de comprendre celle-ci et dans le but d'établir des règles de décisions nécessaires à la paramétrisation du modèle STREAM, nous avons entrepris l'étude d'autres paramètres physiques. Il s'agit de la distribution granulométrique des particules, la résistance à la pénétration et la densité apparente. Ces mesures ont été réalisées sur l'ensemble des sols pour lesquels des valeurs de conductivité hydraulique ont été acquises.
- 2. l'étude du transfert des éléments traces métalliques du sol à la plante. Cette troisième composante du transfert des éléments doit être prise en compte dans l'évaluation de la quantité en ETM stockée et celle transportée par ruissellement. Le compartiment biologique peut en effet constituer un piège temporaire ; de plus, le contenu en ETM de la plante est un indicateur de l'impact de la contamination des sols sur la chaîne alimentaire.

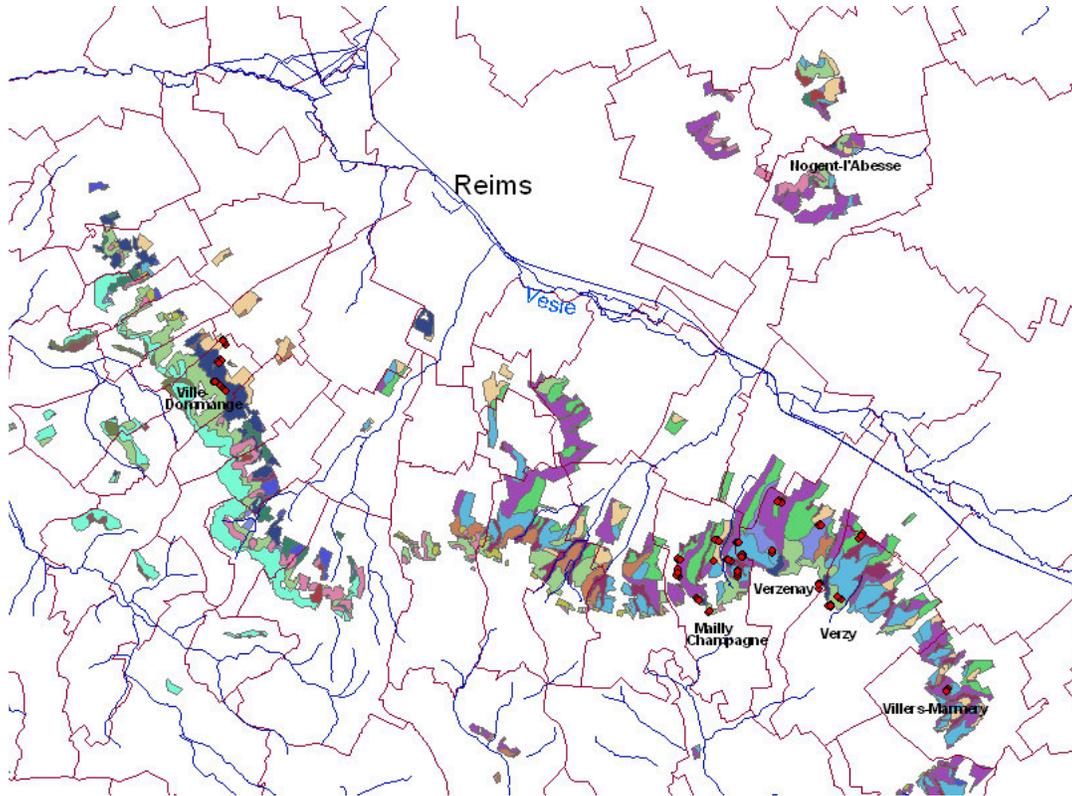


Figure 1 : Carte de répartition du sol et localisation des points de mesures de conductivité hydraulique à saturation. Les plages colorées représentent les unités de sols. Les points rouges correspondent aux sites étudiés.

2.2. Caractéristiques physiques

2.2.1 Conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique à saturation est mesurée *in situ* à l'aide d'un perméamètre de Guelph. Les mesures sont menées sur une profondeur de sol de 10 cm. Trois à cinq mesures sont effectuées pour chaque parcelle.

Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues varient de 0,1 à 300 mm.h⁻¹ et traduisent une variabilité importante indépendante des unités de sol (Figure 2). L'analyse statistique de ces données (ANOVA, tests de Tukey et Fisher, 95 % de confiance) a permis de distinguer trois groupes de sols :

- groupe 1 : ces sols se caractérisent par des valeurs de conductivité faibles comprises entre 0 et 10 mm.h⁻¹ (Figure 2) ;
- groupe 2 : les sols montrent des valeurs de conductivité hydraulique à saturation faibles à moyennes comprises entre 0 et 60 mm.h⁻¹ (Figure 2) ;
- groupe 3 : les sols se caractérisent par des valeurs de conductivité hydraulique élevées. Les valeurs mesurées sont comprises entre 100 à 200 mm.h⁻¹ (Figure 2).

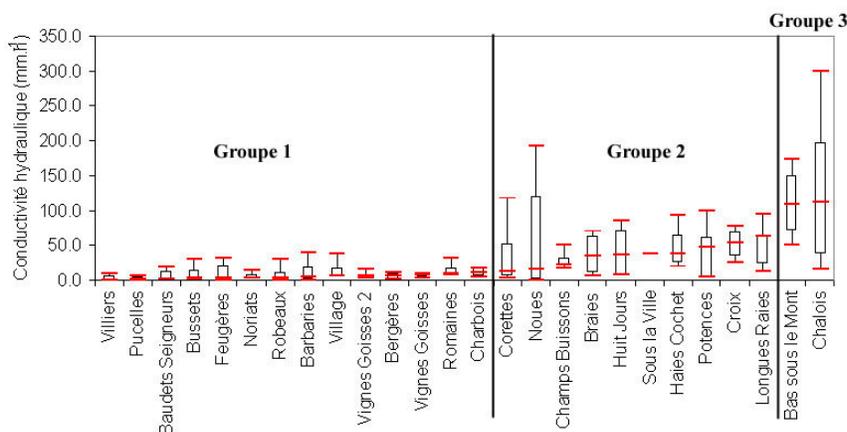


Figure 2 : Conductivité hydraulique à saturation pour les 26 parcelles étudiées.

2.2.2 Granulométrie

L'analyse granulométrique a été réalisée sur les 3 groupes de sols définis ci-dessus. La teneur en éléments grossiers a été déterminée par tamisage des sols à 2 mm. La distribution granulométrique de la terre fine (< 2 mm) a été analysée à l'aide d'un granulomètre à diffraction laser de type Mastersizer 2000. Les échantillons de sols ont été soumis à une dispersion mécanique (par agitation) et chimique (par ajout d'hexamétophosphate de sodium et solution ammoniacale).

Les sols étudiés se caractérisent par une texture limono-sableuse à limono-argileuse. Leurs teneurs en limons (47-62 %) et en sables (24 à 48 %) ne montrent pas de différence significative (Figure 3). En revanche, les teneurs en argiles et en éléments grossiers sont significativement différents selon les groupes de sol établis sur la base des mesures de conductivité hydraulique à saturation. En effet, les sols du groupe 3 se caractérisent par des proportions en éléments grossiers significativement supérieures à celles des groupes 1 et 2 (12 à 25 % contre 5 à 12 % ; Figure 3), tandis que les sols du groupe 2 montrent des teneurs en argiles significativement inférieures comparées aux autres groupes (4 à 8 % pour le groupe 2, 6 à 14 % pour les groupes 1 et 3 ; Figure 3).

2.2.3 Résistance à la pénétration

La résistance du sol à la pénétration est déterminée à l'aide d'un pénétromètre analogique dynamique à charge variable (PANDA). Chaque parcelle a fait l'objet de 5 sondages notamment aux quatre extrémités et au centre de celle-ci. Pour toutes les parcelles, les mesures ont été réalisées sur une profondeur comprise entre 0 et 10 cm. Certaines parcelles, comme par exemple celle des Chalois, ont fait l'objet de mesures de résistance à la pénétration sur l'ensemble de leurs profils, c'est-à-dire de la surface du sol au substrat géologique (0-50 cm).

Les résultats des mesures sont regroupés dans les Figure 4-Figure 6. Les valeurs de résistance à la pénétration obtenues varient de 1 à 2 MPa entre 0 et 5 cm de profondeur (Figure 4), alors qu'elles varient de 2 à 4 MPa dans la tranche de 5 à 10 cm de profondeur (Figure 5). Les résultats obtenus sur les parcelles des Chalois montrent une augmentation de la résistance à la pénétration jusqu'à 20 cm de profondeur. (Figure 6). L'augmentation de la résistance à la pénétration avec la profondeur traduit un tassement de la surface du sol lié aux passages des engins agricoles. La comparaison entre les 3 groupes de sols définis ci-dessus n'a pas permis de détecter de différence significative de résistance à la pénétration. Il n'existe donc pas de relation évidente entre la capacité d'infiltration des différents sols et la compaction de leurs horizons de surface.

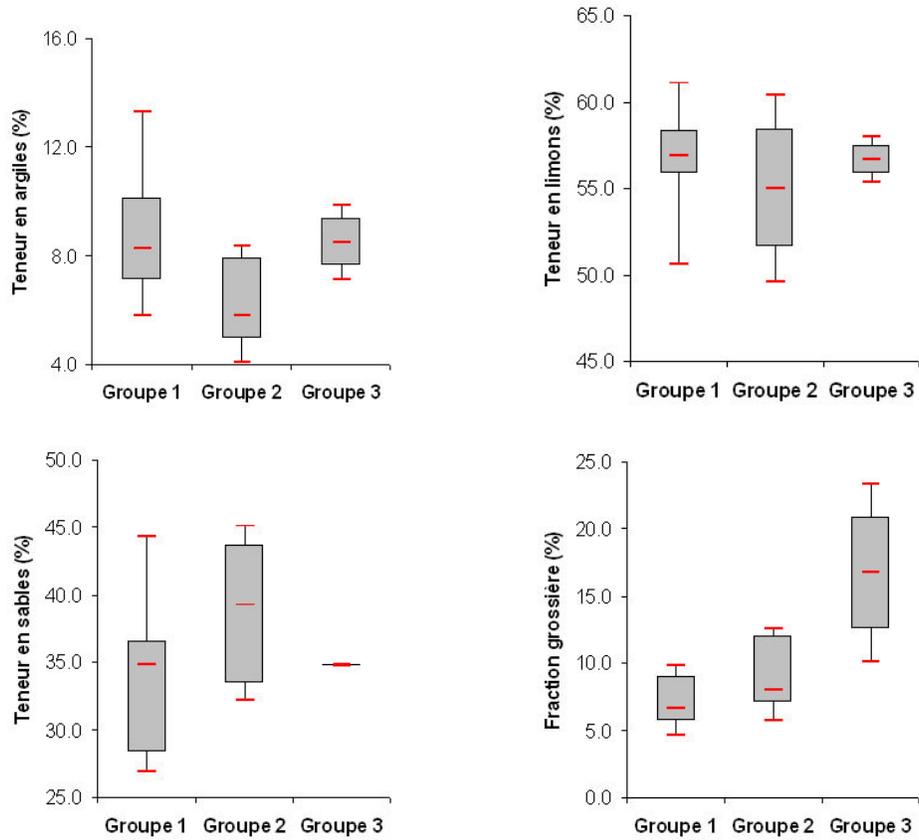


Figure 3 : Teneurs en argiles, limons, sables et éléments grossiers des trois groupes de sols. Les groupes de sols ont été discriminés sur la base de l'analyse statistique (Test de Tukey, 95 %) des valeurs de conductivité hydraulique. Les valeurs représentées sont la médiane, le 1^{er} et 3^{ème} quartiles des valeurs obtenues.

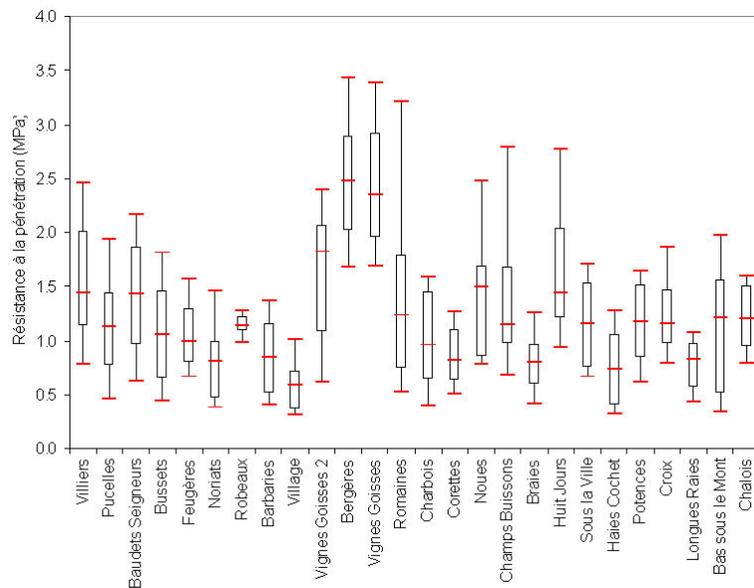


Figure 4 : Résistance à la pénétration mesurée entre 0 et 5 cm de profondeur sur les sols des 26 parcelles étudiées.

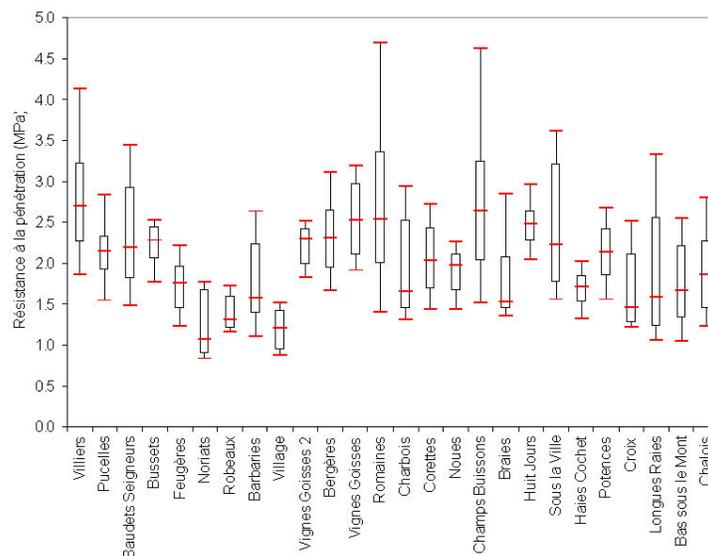


Figure 5 : Résistance à la pénétration mesurée entre 5 et 10 cm de profondeur sur les sols des 26 parcelles étudiées.

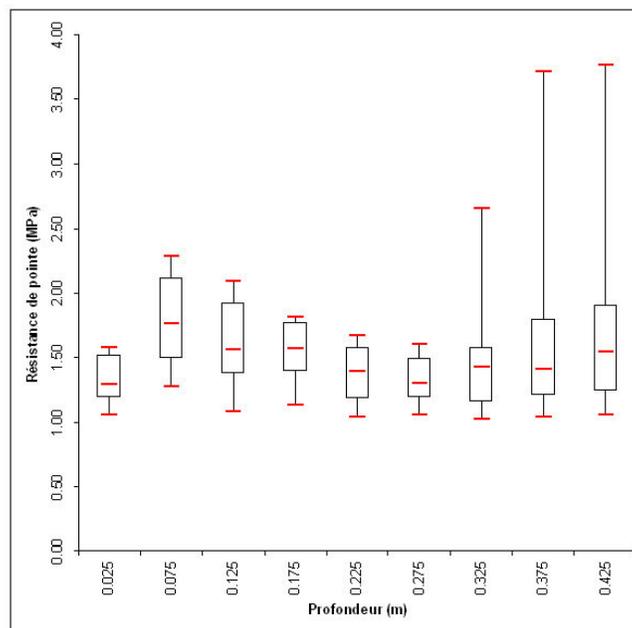


Figure 6 : Profil de résistance à la pénétration du sol de la parcelle des Chalois

2.2.4 Densité apparente

La densité apparente des sols est déterminée à l'aide d'un densitomètre à membrane. Comparées aux mesures réalisées par la méthode des cylindres, les mesures au densitomètre à membrane sont basées sur un plus grand volume de sol. Ceci permet une meilleure prise en compte de l'hétérogénéité des sols. Pour chaque parcelle, les mesures ont été effectuées en 3 points et en 3 répétitions par point de mesures.

Les Figure 7 et Figure 8 regroupent les valeurs de densité apparente obtenues respectivement entre 0 et 5 cm et entre 5 et 10 cm.

Les valeurs de densité apparente mesurées entre 0 et 5 cm varient de 0,8 à 1,5 (Figure 7). Ces valeurs se caractérisent par de fortes variabilités. Les valeurs obtenues entre 5 et 10 cm varient de 1,5 à 1,8 (Figure 8). Ces valeurs sont pour la plupart des sols supérieures à celles obtenues entre 0 et 5 cm. On n'observe pas de différence significative entre les différents sols.

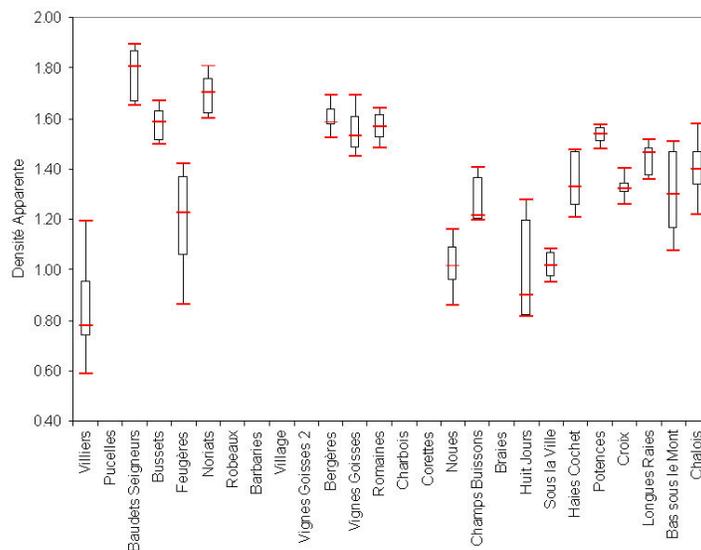


Figure 7 : Densité apparente entre 0 et 5 cm pour les 26 parcelles étudiées

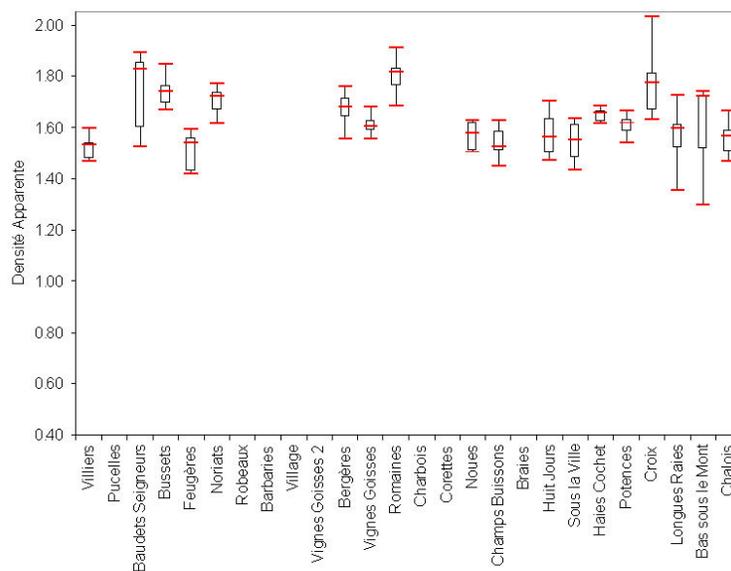


Figure 8 : Densité apparente entre 5 et 10 cm pour les 26 parcelles étudiées

2.3. Etude du transfert des ETM du sol à la plante (*Vitis vinifera L.*)

La mobilité et la biodisponibilité des ETM associés aux matières fertilisantes et autres produits anthropiques apportés aux sols viticoles conditionnent leur absorption par la végétation et la pérennisation des cultures. De plus, le piégeage des ETM par la plante peut limiter la contamination des eaux superficielles et souterraines et constitue donc une troisième composante à prendre en compte dans l'étude du transfert des ETM.

L'étude a été menée dans une parcelle viticole de Mailly-Champagne (commune située au sud de Reims) développée sur un substrat crayeux et soumise à un apport en compost urbain avant sa mise en culture. Le sol et les racines (radicelles et racines de diamètre supérieur à 2 mm) de *Vitis vinifera* L. ont été prélevés en cinq points à deux profondeurs (subsurface, 10 cm et limite sol/substrat, 40 cm) durant l'hiver 2005-2006.

Le contenu total en Cu, Pb et Zn a été déterminé dans le sol et les racines. La concentration totale dans les sols ne permettant pas d'évaluer la mobilité et la biodisponibilité des ETM, leur répartition géochimique parmi différentes phases solides du sol a été déterminée grâce à la procédure d'extractions séquentielles recommandée par le BCR.

2.3.1 Concentration et répartition géochimique des ETM dans le sol

Les concentrations totales en Cu, Pb et Zn dans les sols montrent qu'ils sont relativement contaminés et homogènes avec la profondeur (Tableau 1). Cette distribution verticale est liée aux pratiques culturales qui consistent à régulièrement étaler en haut de la parcelle le sol transporté par ruissellement et déposé au bas de celle-ci.

Tableau 1 : Concentrations totales en Cu, Pb et Zn dans les sols et les racines (moyenne \pm écartype) et taux d'accumulation dans les racines (concentration dans les racines/concentration dans le sol).

| | | Concentration totale (mg.kg ⁻¹) | | | Taux d'accumulation | | |
|-------|----------------|---|---------------|--------------|---------------------|-------|------|
| | | Cu | Pb | Zn | Cu | Pb | Zn |
| 10 cm | Sol | 226 \pm 28 | 122 \pm 23 | 272 \pm 85 | | | |
| | Radicelles | 60 \pm 14 | 4,5 \pm 2,2 | 126 \pm 39 | 0,25 | 0,03 | 0,42 |
| | Racines > 2 mm | 17 \pm 5 | 1,4 \pm 0,6 | 49 \pm 15 | 0,07 | 0,01 | 0,15 |
| 40 cm | Sol | 248 \pm 51 | 83 \pm 36 | 223 \pm 82 | | | |
| | Radicelles | 35 \pm 7 | 1,3 \pm 0,9 | 33 \pm 9 | 0,16 | 0,02 | 0,19 |
| | Racines > 2 mm | 19 \pm 7 | 0,3 \pm 0,2 | 23 \pm 5 | 0,09 | 0,003 | 0,11 |

La répartition géochimique de Cu, Pb et Zn parmi les fractions acido-soluble (échangeable et carbonates), réductible (oxy-(hydr)oxydes de Fe et Mn), oxydable (matière organique et sulfures) et résiduelle (minéraux primaires) est présentée sur la Figure 9. Les trois premières fractions sont susceptibles de libérer les ETM associés lors de changements des conditions physico-chimiques du milieu. La dernière fraction peut être considérée comme étant immobile.

La fraction acido-soluble renferme une part significative du contenu total en Zn alors qu'elle est négligeable pour Cu et Pb (Figure 9). La fraction réductible représente respectivement 18, 60 et 53 % des contenus totaux en Cu, Pb et Zn. La fraction oxydable constitue la fraction mobilisable la plus importante pour Cu.

2.3.2 Transfert des ETM du sol à la plante et accumulation dans la plante

A l'inverse de ce qui a été observé dans la phase solide du sol, les concentrations et les taux d'accumulation en ETM dans les radicelles, et dans une moindre mesure dans les racines de diamètre supérieur à 2 mm, présentent une nette diminution verticale (Tableau 1). Ceci traduit une absorption des ETM par la plante plus importante en subsurface qu'en profondeur.

L'accumulation en ETM est systématiquement plus forte dans les radicelles. Leur participation aux apports en éléments essentiels (Cu et Zn) est donc plus importante que celle des racines de diamètre supérieur à 2 mm mais leur contribution à la contamination en éléments toxiques (Pb) sera également plus forte. De plus, l'accumulation préférentielle de Zn et Cu au détriment de Pb par les racines répond typiquement aux besoins de la plante. L'absorption de Zn et Cu par la plante serait conditionnée par les parts significatives de ces deux éléments dans la fraction acido-soluble (Zn) et oxydable (Cu). Cependant, l'activité racinaire pourrait contribuer au transfert sol-plante par

désorption, acidification et/ou oxydation dans la rhizosphère. La localisation préférentielle de Pb dans la fraction réductible et sa toxicité seraient à l'origine de son absorption négligeable par les racines. Ainsi, la mobilité et la biodisponibilité de Cu, Pb et Zn seraient conjointement régies par la répartition géochimique des ETM dans les sols et les besoins de *Vitis vinifera L.*

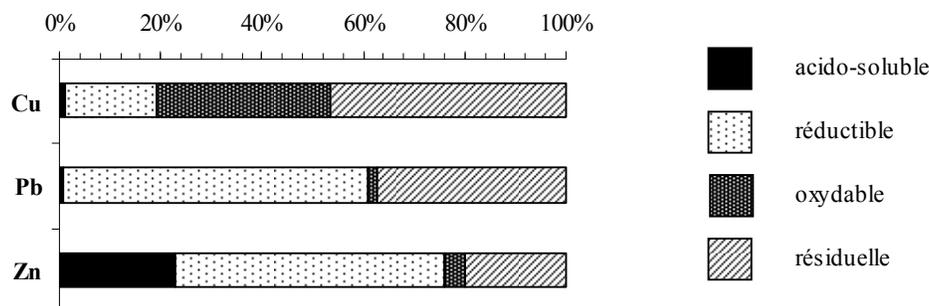


Figure 9 : Répartition géochimique de Cu, Pb et Zn parmi les quatre fractions solides du sol (isolées grâce à la procédure d'extractions séquentielles du BCR), exprimée en pourcentage relatif par rapport au contenu total.

3. Conclusion et perspectives

Les activités menées au cours de l'année 2006 ont consisté en l'acquisition de données sur les propriétés physiques des sols et sur les modalités de transfert des ETM dans les différents compartiments. Les principaux résultats obtenus concernent les capacités d'infiltration et le transfert des ETM du sol à la plante.

Les sols du bassin versant se répartissent en trois groupes selon leurs capacités d'infiltration et leurs caractéristiques granulométriques. Les sols de capacité d'infiltration faible (Groupe 1) montrent des teneurs en éléments grossiers faibles et des teneurs en argiles élevées. Les sols de capacité d'infiltration intermédiaire se caractérisent par des teneurs en éléments grossiers et en argiles faibles, tandis que les sols de capacité d'infiltration élevée (Groupe 3) se caractérisent par des teneurs en éléments grossiers et en argiles relativement élevées. Ces règles de décision obtenues à partir de la combinaison de deux paramètres constituent un outil indispensable à une spatialisation des propriétés hydrodynamiques des sols.

L'étude des concentrations totales en Cu, Pb et Zn dans les sols et les parties souterraines de *Vitis vinifera L.* a montré que le métabolisme racinaire est différent en subsurface et en profondeur et que les radicelles contribuent de manière plus importante à l'absorption élémentaire que les racines de diamètre supérieur à 2 mm. L'absorption des ETM par la plante est fonction de la répartition géochimique des ETM parmi les différentes fractions solides du sol et des besoins nutritifs de la vigne. Les faibles taux d'accumulation dans les racines indiquent qu'elles ne constituent pas un piège important pour les ETM. Dans une perspective de transfert à la chaîne alimentaire, cette faible accumulation revêt un caractère positif.

L'ensemble de ces données sera utilisé dans le cadre de la modélisation du transfert des ETM à l'échelle du bassin versant de la Vesle. Cet objectif final nécessite :

- d'affiner les règles de décision définies sur la base des mesures de capacité d'infiltration et la distribution granulométrique des particules. La mesure d'autres paramètres physiques comme la stabilité structurale sera effectuée. L'historique culturel des parcelles et le taux du couvert végétal seront également pris en compte.
- de poursuivre l'étude du transfert des ETM dans les différents compartiments du bassin versant. Les phases porteuses des ETM dans des sols provenant de différentes unités, ainsi que dans les particules érodées obtenues par simulations de pluies seront étudiées. La détermination des concentrations en ETM dans les parties aériennes de la vigne (feuilles et fruits) viendra compléter l'étude de leur transfert dans la plante.