

# Détermination de la fonction de ruissellement dans la modélisation du transfert des pesticides : simulations de Phytodel à l'échelle de placettes expérimentales

Fabrizio Botta<sup>1\*</sup>, Elodie Moreau-Guigon<sup>1</sup>, Schott Céline<sup>2</sup>, Marc Chevreuil<sup>1</sup>, Helene Blanchoud<sup>1</sup>

<sup>1</sup>EPHE – UMR Sisyphe, UPMC, 4 place Jussieu, BC 105, 75252 Paris cedex 05, France

\*[botta@ccr.jussieu.fr](mailto:botta@ccr.jussieu.fr)

<sup>2</sup>INRA- SAD, 662 avenue Louis Buffet Mirecourt, 88500 France

## 1 Introduction

La contamination des eaux de surface et souterraines par les pesticides est un enjeu majeur et les agences de l'eau étudient actuellement les possibilités de réduction de cette contamination dans le cadre de la directive européenne. Comprendre et prévoir les risques de contamination des eaux implique que soient identifiées et décrites les voies de dissémination des produits : volatilisation, transferts associés à la circulation de l'eau, adsorption par le sol, transformation physico-chimique ou biologique, formation de "résidus liés". Les mécanismes impliqués sont encore mal connus et constituent un objet de recherche majeur pour la chimie du sol. La mise en place des réseaux de mesures dans les eaux de surface depuis 1997 montre une contamination importante par les produits phytosanitaires. La liste des molécules recherchées s'étant considérablement allongée (environ 160 molécules), les problèmes liés à l'utilisation des pesticides paraissent encore plus flagrants. Les retraits d'homologation et les nouvelles autorisations de mise sur le marché entraînent un changement considérable dans les risques de contamination des eaux. C'est pourquoi le choix d'un modèle de transfert des pesticides vers les eaux superficielles, simple et adaptable à toutes les molécules a été fait. Ainsi, couplé à une base de données sur les apports à l'échelle du bassin versant, les résultats permettront de définir plus précisément les risques de contamination liés aux utilisations. Ces travaux ont démarré sur le bassin versant de la Vesle dans le cadre du programme AQUAL depuis 4 ans et ont fait l'objet d'une thèse (Guigon-Moreau E., 2006). Les différentes études se sont concentrées sur les modalités de transfert des pesticides en vue de leur modélisation vers les eaux de surface et un modèle de transfert a été créé « *Phytodel* ». Dans ce but, des expérimentations ont été menées à différentes échelles, de la placette de sol au bassin versant et ont mis en évidence l'importance du ruissellement dans le transfert des pesticides en milieu viticole. Phytodel est un modèle de transfert des produits phytosanitaires destiné à simuler de façon simplifiée les concentrations en pesticides dans la rivière, les retombées atmosphérique et l'air. Le transfert par ruissellement est représenté au niveau d'une couche d'interface entre le sol et l'atmosphère. Afin de vérifier la représentation du ruissellement dans Phytodel, le modèle a été modifié pour fonctionner à l'échelle d'une placette expérimentale. Des traitements phytosanitaires ont été réalisés et les concentrations dans le ruissellement et l'infiltration ont été mesurées et comparées aux résultats de simulation de Phytodel.

Ce travail a eu pour objectif de tester le modèle dans les mêmes conditions que celles des expérimentations sur le ruissellement afin d'améliorer la description du transfert des pesticides par ruissellement.

## 2 Le ruissellement en milieu viticole

### 2.1 Description des expérimentations

Le vignoble est un milieu propice au ruissellement car préférentiellement implanté sur les coteaux. Dans le bassin versant de la Vesle, une typologie des sols a été réalisée dans le cadre du programme AQUAL pour représenter la variabilité des parcelles au transport des métaux par ruissellement associé au MES. Pour l'étude de l'entraînement des pesticides par ruissellement, des simulations de ruissellement ont été réalisées en laboratoire. Cette expérimentation a été accomplie avec la collaboration de l'équipe de l'Université de Reims (GEGENA) qui travaille sur le transport de métaux et de matières en suspension (MES) par ruissellement et de l'unité des Sciences du Sol de l'INRA d'Orléans.

Trois séries d'expériences ont été menées avec 3 sols d'origine viticole mais de lieux différents provenant du

bassin versant de la Vesle (Reims). Le premier sol provient d'une parcelle de Nogent l'Abbesse , le 2ème de Mailly Champagne, et le 3ème de Bergères (Guigon-Moreau E., 2006 ; Botta F., 2006 ; Malam Issa O., 2006).



**Figure 1 : Exemple de bacs de simulation**

Les bacs de simulation, ayant 5° d'inclinaison, ont été remplis avec la terre prélevée sur les parcelles, préalablement séchée à l'air et calibrée à 2 cm. Ensuite une solution à base de simazine et d'atrazine a été pulvérisée sur la surface, 24 heures avant le début des simulations de pluie (Figure 1).

Plusieurs simulations de pluie ont été réalisées sur les bacs toutes les 24 heures pour les sols de Nogent l'Abbesse et de Mailly-Champagne. Pour le sol de Bergères, deux pluies ont été simulées avec un intervalle de 3h.

Lors des simulations de pluie, des prélèvements d'eau infiltrée et d'eau ruisselée ont été effectués à intervalle régulier pour le suivi des pesticides. Pour le ruissellement, ils ont été réalisés en alternance avec ceux pour les métaux et les MES.

Dans ce rapport, nous décrivons les résultats pour le sol de Mailly-Champagne et pour l'atrazine. En effet, la modélisation a été réalisée pour ce sol et cette molécule. Vous trouverez le détail des résultats expérimentaux pour les deux autres sols dans la thèse de Elodie Guigon-Moreau (2006).

## 2.2 Résultats des expérimentations

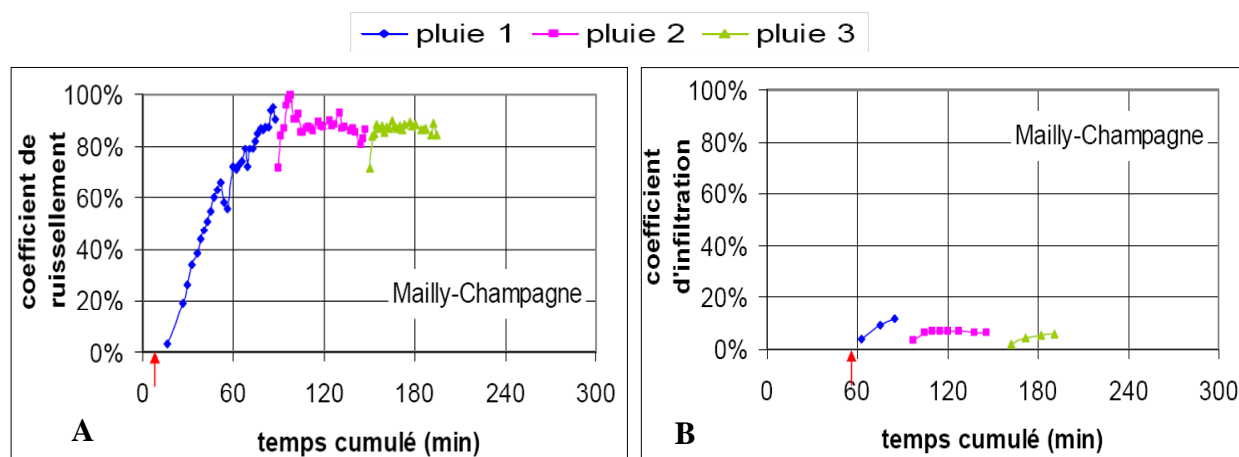
Les caractéristiques des simulations de pluie pour le sol de Mailly-Champagne sont décrites dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Caractéristiques des différentes simulations pour le sol de Mailly-Champagne**

	MAILLY Pluie 1	MAILLY Pluie 2	MAILLY Pluie 3
Durée de la pluie	88,5 min	60,5 min	46,5 min
Intensité de la pluie (mm.h-1)	50,87	50,87	50,87
Temps entre le début de la pluie et le début de l'infiltration	55 min	4 min	8 min
Temps entre le début de la pluie et le début du ruissellement	8 min	1 min	45 sec

L'infiltration se met en place environ 60 minutes après le début de la pluie. Le coefficient d'infiltration augmente très faiblement par rapport au ruissellement (Figure 2), qui se déclenche au début de la pluie et augmente très rapidement. Ensuite le coefficient de ruissellement reste très haut. Lors des deux autres simulations de pluie à 24 heures d'intervalle, les coefficients reviennent rapidement à la valeur de la veille.

Ce sol présente une rapide dégradation de la structure du sol qui entraîne la formation d'une croûte superficielle et du ruissellement peu de temps après le début de la pluie.



**Figure 2 : Coefficients de ruissellement (A) et d'infiltration (B) pendant les trois pluies**

Les concentrations en atrazine sont plus élevées dans l'eau de ruissellement que d'infiltration, avec des valeurs supérieures à 100 µg/l. Par contre dans l'eau ruisselée, les concentrations diminuent selon une fonction puissance pour les 3 pluies successives (Figure 3). Une diminution des concentrations dans le ruissellement selon une fonction puissance ou exponentielle, a également été observée dans d'autres études (Lecomte, 1999).

Au début de la deuxième et de la troisième pluie, les concentrations sont plus élevées par rapport à celles dans les derniers échantillons de la pluie précédente. Entre les deux pluies, l'eau présente dans le sol se met en équilibre avec les pesticides adsorbés et donc lors de la pluie suivante les pesticides sont remobilisés avec l'eau.

Dans l'eau d'infiltration, les concentrations diminuent mais celle-ci ne se fait pas selon une fonction puissance comme pour le ruissellement.

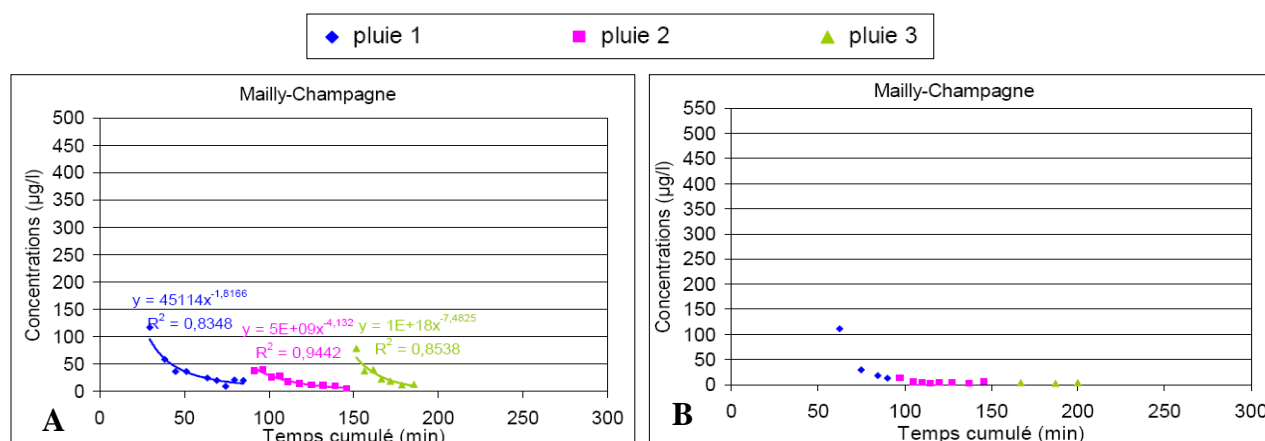


Figure 3 : Evolution des concentrations dans le ruissellement (A) et dans les eaux d'infiltration (B)

Ces résultats sont observables pour l'atrazine comme pour la simazine, avec cependant des concentrations différentes pour les 2 pesticides, montrant le rôle des propriétés physico-chimiques des molécules dans le transfert des pesticides. Pour ce sol, le ruissellement est la voie préférentielle de transfert.

L'étude des 2 autres sols indique également que les caractéristiques physico-chimiques des molécules (e.g. la solubilité et le coefficient de partage  $K_{oc}$ ) déterminent l'importance des modes de transfert des pesticides par ruissellement et par infiltration. Plus une molécule sera soluble et faiblement adsorbée (comme l'atrazine), plus elle sera exportée.

La teneur en matières organiques et en argiles semblent expliquer le comportement différent des trois sols par rapport aux quantités d'eau infiltrée et ruisselée (Guigon-Moreau E., 2006).

### 3 Le modèle *Phytodel*

#### 3.1 Description du modèle et des modifications

Le modèle Phytodel a été développé pour évaluer les concentrations en pesticides à l'échelle d'un bassin versant. En particulier, le compartiment atmosphérique a été pris en compte. L'objectif final de Phytodel est d'évaluer les risques et d'aider à la planification des campagnes de terrain afin de suivre la contamination. Le modèle est composé essentiellement de deux parties : l'hydrologie et le transfert des pesticides. Le modèle hydrologique est divisé en quatre compartiments: atmosphère, surface, sol et nappe. Afin d'évaluer les transferts d'eau, on utilise les données de pluie et d'évapotranspiration. La couche appelée "surface" représente l'interface entre le sol et le compartiment atmosphérique. La quantité d'eau présente dans la couche du sol est variable selon le rapport pluie-évapotranspiration, la porosité du sol, le volume d'eau infiltré vers la nappe et celui transféré vers la rivière. Le déclenchement du ruissellement a lieu quand le volume d'eau dépasse la capacité de rétention du sol. Par contre, le volume d'eau présent dans la nappe dépend de la porosité, de la quantité d'eau infiltrée à partir du sol et des transferts vers la rivière. La présence de coefficients de transfert conditionne l'écoulement vers la rivière et l'infiltration. Les transferts de pesticides entre les différents compartiments s'effectuent en forme dissoute. Les processus de dégradation dans chaque compartiment, le coefficient d'adsorption dans le sol et aussi la fraction de carbone organique sont pris en compte dans le modèle. Les pesticides sont appliqués sur la couche de surface. La quantité disponible pour le transfert est sous la forme dissoute, elle est calculée en se basant sur le coefficient de partition instantané (le coefficient entre la phase solide et la phase dissoute). Le compartiment atmosphérique est très important, car il intègre la volatilisation et le lessivage pendant un événement pluvieux. Dans le compartiment « surface », la volatilisation est calculée par l'équation de la loi de Henry qui régit l'équilibre entre les phases gazeuse et la phase dissoute. Le lessivage est le phénomène inverse de la volatilisation. Pour

calculer la concentration des pesticides dans l'air, on considère le compartiment atmosphérique homogène et bien mélangé. La concentration de la phase gazeuse dans l'air est égale à celle à l'équilibre dans la couche de surface. Si les molécules rejoignent l'atmosphère, celles-ci peuvent être dégradées et lessivées. Pour estimer la demi-vie atmosphérique on a utilisé le logiciel Aop-Win fournis par US EPA (Guigon E. et al. 2006).

Pour cette étude, le modèle a été testé pour vérifier la prise en compte du ruissellement dans le transfert des pesticides. Il était donc intéressant d'utiliser les expériences faites sur placettes expérimentales pour voir les calages qui seraient possibles de faire en fonction des types de sols. Ces expériences ne reflètent pas la réalité du transfert des pesticides à l'échelle du bassin versant mais permettent de hiérarchiser le fonctionnement des différents sols. Ainsi, tous les sols étant asséchés et remaniés (calibration de la taille des mottes), la pente des sols ainsi que l'intensité de pluie étant les mêmes, la réponse mesurée sera essentiellement dépendante de la composition du sol et son comportement vis-à-vis des pesticides.

Le modèle n'étant pas adapté à cette échelle, des modifications ont été apportées (Figure 4) :

1. La partie souterraine n'est pas prise en compte car elle est inexistante à l'échelle de la placette. Le volume d'eau récupéré sous les placettes est donc considéré comme étant le coefficient d'infiltration entre les compartiments « SOL » et « NAPPE ».
2. La période de simulation journalière a été amenée à 2 minutes pour permettre une simulation à l'échelle de temps des mesures faites sur placette.
3. Le flux horizontal du « SOL » vers la rivière est nul car les placettes sont délimitées sur les bords.
4. La couche de surface a du être modifiée pour répondre au changement d'échelle. Cette couche a été définie comme faisant 40 mm de hauteur et une capacité d'infiltration a du être intégrée.

Un paramètre a également été ajouté : c'est la capacité d'infiltration de la couche de surface. Elle permet de décrire le volume d'eau que le sol peut infiltrer. Dès que la pluie dépasse ce volume alors le ruissellement se déclenche. Donc seulement le ruissellement et l'infiltration ont été représentés (Botta F. *et al.*, 2007).

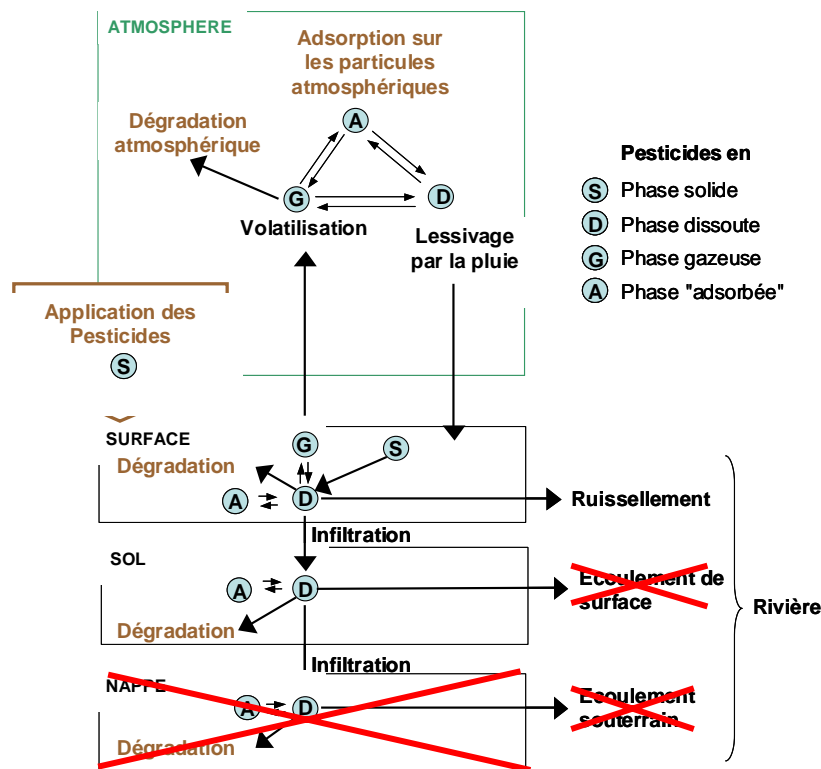


Figure 4 : Schématisation du modèle Phytodel avec les modifications

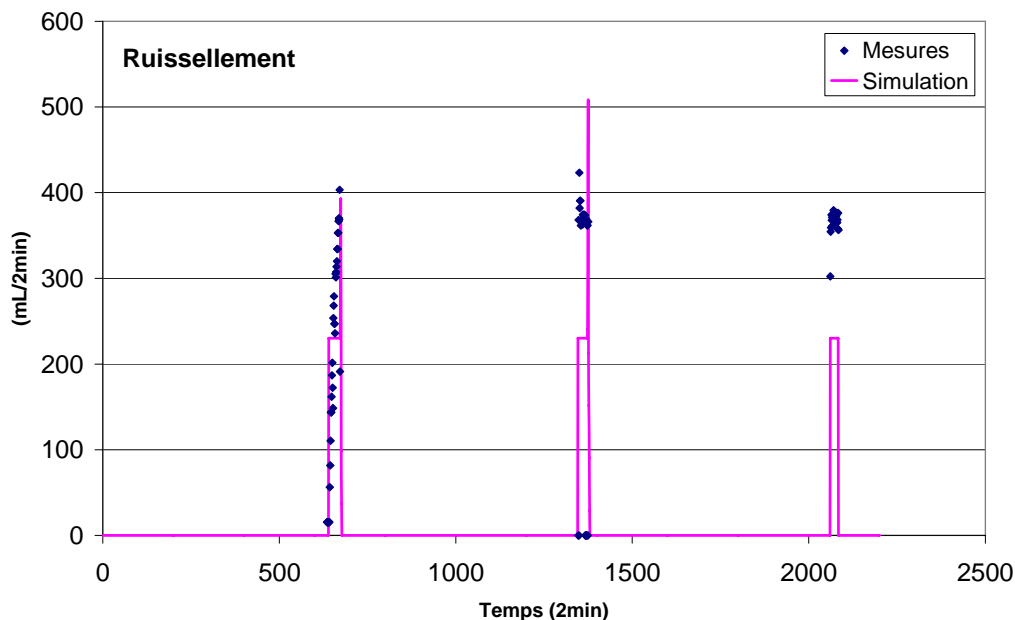
### 3.2 Résultats de la modélisation

Les premiers résultats de modélisation ont été obtenus pour le sol de Mailly-Champagne. D'abord on a calibré la partie hydrologique parce que le transfert des pesticides est lié à l'écoulement de l'eau. Le modèle a été calé avec les paramètres décrits dans le tableau 2 et en tenant compte du délai entre deux pluies (Botta, et *al.*, 2007). Le modèle montre une très forte sensibilité par rapport à deux paramètres comme la porosité du sol et la capacité d'infiltration de la surface.

**Tableau 2 : Paramètres du modèle**

paramètre	valeur
Pas de temps	2 min
Épaisseur de la couche « surface »	40 mm
Épaisseur de la couche « sol »	60 mm
Porosité	36.87 %
Capacité d'infiltration du « sol »	0,774 mm
Paramètre d'infiltration	0,0111

La simulation est correcte pour la 1ère pluie. La 2ème et la 3ème pluie présentent une surestimation du ruissellement et une sous estimation de l'infiltration. Dans le cas de la 1ère pluie, le ruissellement (Figure 5) apparaît 8 minutes après la pluie et l'infiltration après 55 minutes, correspondant au temps d'imbibition du sol de la placette. Une fois le sol hydraté, le déclenchement de l'infiltration est rapide à se mettre en place (4 et 8 minutes pour les pluies 2 et 3 successivement), mais les volumes en eau restent faibles par rapport au ruissellement. Ces résultats montrent une faible différence de réactivité en fonction de l'état hydrique du sol. Les 3 pluies successives semblent avoir les mêmes effets sur le ruissellement par rapport à l'infiltration. L'effet des pluies successives se voit par la rapidité du début de l'exportation de l'eau et les volumes en eau nécessaires pour atteindre un équilibre dans les écoulements sont plus faibles.



**Figure 5 : Flux d'eau ruisselée pendant les trois pluies**

Par contre, le modèle ne simule pas correctement l'infiltration. En effet, l'eau écoulee par infiltration s'arrête rapidement après l'arrêt de la pluie alors que le modèle simule des volumes d'eau écoulee. *Phytodel* n'étant pas un modèle physique, il n'est pas possible de reproduire la force de capillarité qui pourrait expliquer ce



phénomène. Ces résultats montrent la limite de *Phytodel* pour simuler des processus aussi fins. Pour l'infiltration, les résultats de simulation sont de même ordre de grandeur que ceux de l'expérimentation. Par contre, lors de l'expérimentation, le volume d'eau infiltrée diminue au cours des trois pluies alors que dans le cas de la modélisation, le volume augmente (Figure 6).

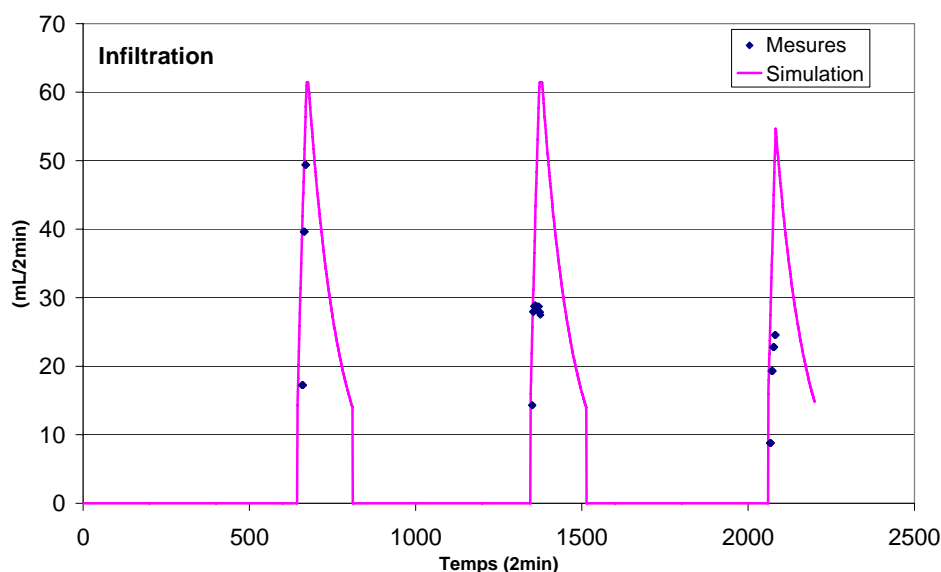


Figure 6 : Flux des eaux d'infiltration pendant les trois pluies successives.

La comparaison des concentrations en atrazine observées et simulées dans le ruissellement et l'eau infiltrée montre plusieurs points intéressants. Les concentrations observées et simulées dans le ruissellement montrent une évolution similaire pour chaque pluie, avec une diminution exponentielle au cours du temps correspondant à un effet de dilution des quantités d'atrazine disponibles (figure 7).

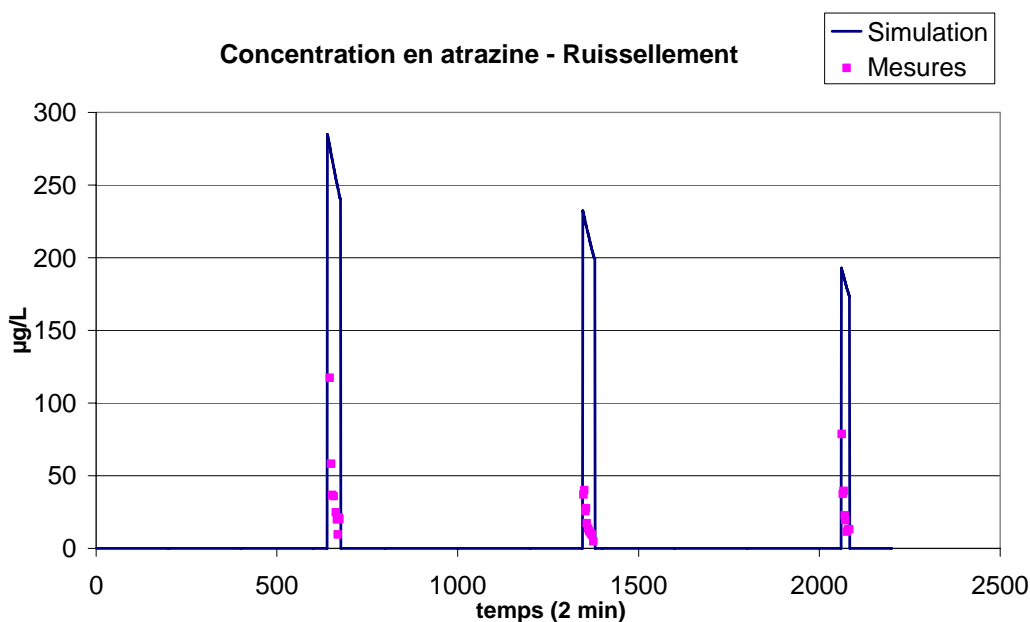


Figure 7 : Concentrations en atrazine mesurées et simulées dans les eaux de ruissellement

Le temps d'attente entre 2 pluies permet une re-dissolution de l'atrazine qui redevient rapidement disponible dès le début de la pluie suivante. Si les concentrations obtenues dans l'eau infiltrée sont similaires aux mesures (figure 8), il est plus difficile de mettre en relation les quantités exportées. Dans le modèle, l'infiltration simulée dure plus longtemps que celle mesurée. Il y a donc une large surestimation des quantités

infiltrées par rapport à celles mesurées. Ces résultats de simulation de l'infiltration expliquent très certainement la sous estimation des concentrations dans le ruissellement.

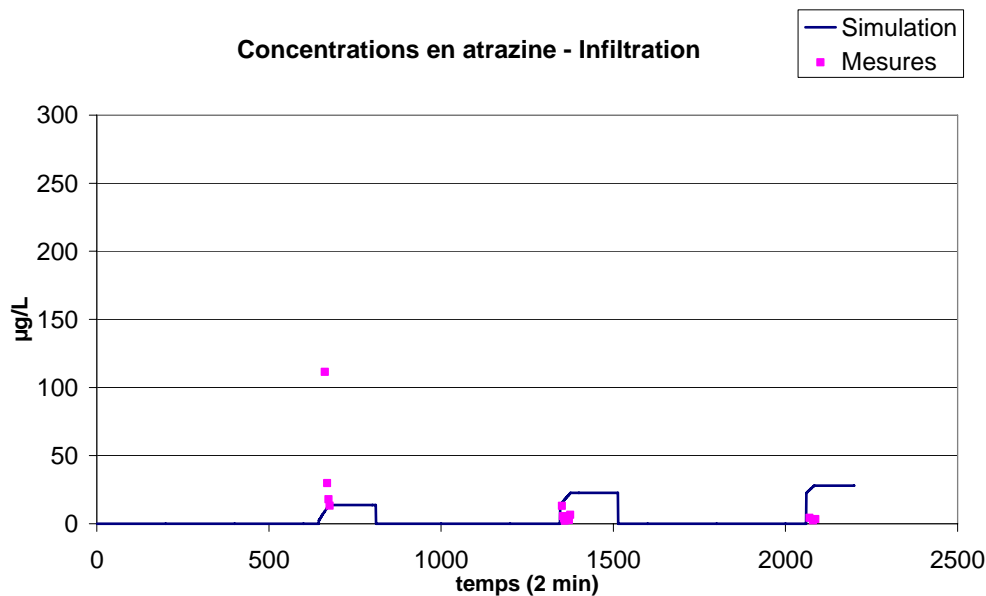


Figure 8 : Concentrations en atrazine mesurées et simulées dans les eaux d'infiltration

## 4 Conclusion

Les concentrations en pesticides observées montrent une valeur très forte pendant les premières minutes de chaque pluie, ensuite elles diminuent avec une fonction exponentielle pour tous les types des sols and pendant chaque pluie. L'atrazine présente une évolution régulière de ses concentrations soit pour les eaux de ruissellement soit pour les eaux d'infiltration.

Cette étude en laboratoire a permis de mettre en évidence que les caractéristiques granulométriques du sol et les propriétés physico-chimiques des molécules jouent un rôle important dans les transferts des pesticides, spécialement pour le ruissellement.

Les premiers essais de modélisation ont été effectués sur le sol de Mailly-Champagne ; les résultats de simulation montrent les limites de *Phytodel* dans la représentation des transferts hydriques à l'échelle de la placette. Les processus physiques ne peuvent pas être correctement représentés et les erreurs peuvent être considérables à si petite échelle. Ceci ne présuppose pas que *Phytodel* ne fonctionne pas à l'échelle du bassin versant, mais la calibration du ruissellement doit se faire de manière différente.

L'idée de départ était d'utiliser les placettes expérimentales qui servent à la calibration de STREAM pour définir le ruissellement. Si *Phytodel* n'est pas à même de gérer le ruissellement, il est dans ce cas envisageable d'utiliser STREAM pour le faire. Dans le cadre du programme AQUAL, ces expériences sur placettes sont utilisées pour réaliser une typologie des sols dans le vignoble champenois (Mallam Issa et *al.*, 2006). Cette typologie est intéressante car elle permet de définir la potentialité des sols au ruissellement et définir ainsi un facteur de risque exploitable pour le transfert des pesticides.

## 5 Remerciements

Nous adressons également nos remerciements à Béatrice Marin et Oumarou Malam-Issa de l'université de Reims (GEGENA) et l'équipe de l'unité des Science du Sol de l'INRA d'Orléans pour leur collaboration sur l'étude du ruissellement.



## 6 References

Botta F., Moreau-Guigon E., Schott C., Chevreuil M. & Blanchoud H. (2007): *Modelling of pesticide transfer in Champagne vineyard: the Vesle's catchment case* – Environmental Fate and Human Health Effects of Pesticides, 3-6 September, 2007 in Piacenza - Italy

Botta F. (2006) - *Influence des caractéristiques du sol dans le transfert des pesticides par ruissellement dans le vignoble champenois* - Rapport de Master 2 HHGG, 58 p.

Guigon-Moreau E. (2006) - *Transferts des pesticides vers les eaux superficielles et l'atmosphère : Caractérisation et modélisation sur le bassin versant de la Vesle* – Mémoire de Thèse Université Paris VI - Pierre et Marie Curie - UFR Sciences de la Terre

Guigon E., Chevreuil M. and Blanchoud H. (2006) *Analyse et modélisation du transfert des pesticides vers les eaux de surface : exemple du bassin versant de la Vesle* - Rapport d'activité du Programme Piren-Seine, 23 p.

Guigon E. (2003) *Répartition des pesticides dans les phases gazeuse, dissoute et particulaire du compartiment atmosphérique : influence sur le transport à longue distance* - Rapport de DEA HHGG, [www.cig.ensmp.fr/~hhgg/arch/memoires2003/Guigon2003.pdf](http://www.cig.ensmp.fr/~hhgg/arch/memoires2003/Guigon2003.pdf).

Index Phytosanitaire (2003) - - ACTA, Paris, 768 p.

Lecomte V. (1999) *Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant : Processus, déterminisme et modélisation spatiale* - Thèse: Sciences de l'eau, Paris: Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 213 p.

Malam Issa O., B. Marin, J.B. Dessogne, E. Chopin (2006) *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* – Rapport d'activité du Programme Piren-Seine, 9 p.