



HAL
open science

Evaluation de l'efficacité vis-à-vis du ruissellement de surface et des transferts latéraux dans le sol de différentes options de gestion utilisant (ou non) un couvert enherbé: Application en vue de limiter la contamination des eaux par les pesticides dans le contexte du Beaujolais viticole de coteaux

Véronique Gouy, X. Peyrard, Lucie Liger

► **To cite this version:**

Véronique Gouy, X. Peyrard, Lucie Liger. Evaluation de l'efficacité vis-à-vis du ruissellement de surface et des transferts latéraux dans le sol de différentes options de gestion utilisant (ou non) un couvert enherbé: Application en vue de limiter la contamination des eaux par les pesticides dans le contexte du Beaujolais viticole de coteaux. [Rapport de recherche] irstea. 2015, pp.129. hal-02606343

HAL Id: hal-02606343

<https://hal.inrae.fr/hal-02606343>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**Convention de partenariat Irstea – Agence de l'Eau RM&C
n°2011 0816**

Fiche action n°36

**Evaluation de l'efficacité vis-à-vis du
ruissellement de surface et
des transferts latéraux dans le sol
de différentes options de gestion utilisant
(ou non) un couvert enherbé**

***Application en vue de limiter la contamination des
eaux par les pesticides dans le contexte du
Beaujolais viticole de coteaux***

Véronique Gouy, Xavier Peyrard, Lucie Liger
UR Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions

Groupement de Lyon-Villeurbanne
5 rue de la Doua
69626 VILLEURBANNE Cedex

Novembre 2015

Fiche action établie au démarrage du projet :

<p align="center">N° ACTION :</p> <p align="center">36</p>	<p align="center">GROUPEMENT</p> <p align="center">CEMAGREF</p> <p align="center">LYON</p>	<p align="center">UNITÉ DE RECHERCHE</p> <p align="center">MAEP</p>
<p>Intitulé</p>	<p>Evaluation de l'efficacité <i>vis-à-vis du ruissellement de surface et des transferts latéraux dans le sol</i> de différentes options de gestion utilisant (ou non) un couvert enherbé (zones tampons rivulaires ou de versant, enherbement inter-rang) pour limiter la contamination des eaux par les pesticides dans le contexte du Beaujolais viticole de coteaux</p>	
<p>Contexte</p>	<p>Le Beaujolais viticole constitue une zone d'action prioritaire pour la Cellule Régionale d'Observation et de Prévention de la Pollution par les pesticides du fait d'une forte contamination de ses cours d'eau. Le nord du Beaujolais est plus problématique : les conditions locales de pente, sol, climat, les aménagements anti-érosifs (rases, fossés) induisent un transfert rapide et souvent concentré en surface. L'enherbement, action phare en Beaujolais, y est plus difficile et s'il permet d'appliquer moins d'herbicides, se pose la question de son efficacité à limiter le transfert des fongicides, dont la réduction d'usage est plus délicate que pour les autres produits phytosanitaires.</p>	
<p>Objectifs</p>	<p>On propose d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes, dans le contexte du Nord Beaujolais :</p> <ul style="list-style-type: none"> - dans quelle mesure une zone tampon enherbée rivulaire recevant un écoulement concentré de surface est-elle capable de réduire significativement le transfert des pesticides sans engendrer une contamination de la nappe d'accompagnement du cours d'eau, via le transfert latéral dans le sol, des pesticides infiltrés ? - dans quelle mesure une infiltration répartie plus en amont dans la parcelle peut-elle contribuer à l'atténuation des transferts de pesticides ou, au contraire, engendrer également une contamination via des écoulements latéraux ? - dans quelle mesure un enherbement inter-rang peut-il influencer le transfert et la rétention des pesticides (fongicides notamment) ? 	
<p>Intérêt opérationnel</p>	<p>Les résultats acquis doivent permettre d'orienter les choix de gestion vers les options les plus appropriées selon la figure en annexe 1. En particulier, selon l'efficacité des zones tampons pour atténuer le ruissellement concentré et les écoulements latéraux on peut orienter les actions en priorité vers leur mise en place ou leur restauration ; en cas d'efficacité insuffisante suspectée (position riveraine, largeur insuffisante) de ces dernières, on pourra préconiser la mise en place complémentaire de bandes enherbées transversales de versant ou d'un enherbement inter-rang. Si ces solutions s'avèrent insuffisantes, (sols sont peu propices à la rétention des pesticides), une action renforcée de réduction d'usages sera à envisager. Ces informations pourront être utilisées en appui au programme d'action du contrat de rivières en Beaujolais.</p>	

Description de l'opération	<p>Le projet s'appuie sur trois sites expérimentaux. Le premier s'adresse au 1° objectif visé ci-dessus. Il est constitué d'une parcelle de vigne bordée d'une prairie rivulaire. Il représente une situation à risque du point de vue du transfert parcellaire de surface, fréquemment rencontrée dans le Beaujolais de coteaux sur les fortes pentes difficilement enherbables, ie : une vigne totalement désherbée et aménagée de rases concentrant le ruissellement et l'évacuant rapidement hors de la parcelle. On étudie, ici, l'efficacité de la zone tampon rivulaire et de l'ensemble du versant à atténuer les transferts de pesticides ruisselés et infiltrés. Le deuxième site répond au 2° objectif : il est constitué d'une parcelle de vigne totalement désherbée marquée par une pente moyenne à forte et par la présence d'une rupture de perméabilité dans le sol à faible profondeur. On tente, ici, de quantifier les transferts latéraux de sous-surface des pesticides infiltrés dans la parcelle ainsi que l'atténuation possible des concentrations et des flux dans le sol. Le troisième site est dédié au 3° objectif. Il est constitué d'une parcelle sur pente moins marquée rendant possible un enherbement et sur laquelle seront comparées une modalité avec enherbement semé en inter-rang et une modalité non enherbée. Sur chaque site sont mises en place une métrologie et une stratégie d'échantillonnage permettant d'évaluer l'influence des différentes modalités étudiées aussi bien sur les transferts rapides de surface que sur les transferts latéraux dans le sol pouvant rediriger les pesticides vers la nappe d'accompagnement et/ou le cours d'eau. Le projet est suivi par un comité technique réunissant les agents d'Irstea impliqués ainsi que des représentants du Comité de Développement du Beaujolais et de l'Agence de l'Eau RM & C.</p>
Rattachement aux orientations thématiques de l'accord-cadre	<p>QIII.11 – Quels rejets en pesticides ?</p> <p>Il s'agit de : « acquérir des données et développer des modèles pour évaluer la pression liée aux rejets en pesticides (P2) »</p>
Résultats et indicateurs de suivi	<p>Divers indicateurs sont suivis au cours du projet (CF annexe 2) :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Pour évaluer l'efficacité de la zone tampon rivulaire (ZTR) à épurer le ruissellement concentré, l'infiltration de ce dernier et les transferts latéraux dans le sol. * Pour évaluer l'efficacité de l'enherbement à limiter le transfert de fongicides. Notamment : le % d'abattement des concentrations et des flux dans les écoulements latéraux et le ruissellement avec ou sans enherbement, ...
Comité de suivi	<p>Ce projet a bénéficié d'un comité de suivi composé de représentants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse : Laurent Cadilhac, Denis Rousset puis Hélène Pringault-Bodet, - de la Chambre d'Agriculture du Rhône : Audrey Pagès et Caroline Le Roux, - d'Irstea : Lucie Liger, Xavier Peyrard, Guy Le Hénaff et Véronique Gouy

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse pour son soutien financier et son suivi technique. Ils remercient également les autres personnes, de la chambre d'agriculture du Rhône et d'Irstea qui ont participé au comité de suivi de l'action. Enfin, ils remercient également chaleureusement les viticulteurs du site de Saint Joseph qui ont mis à disposition leur parcelle de vigne pour cette étude et sans qui ces travaux n'auraient pas pu être réalisés.

Résumé

Le Beaujolais viticole constitue une zone d'action prioritaire pour la Cellule Régionale d'Observation et de Prévention de la Pollution par les Pesticides du fait d'une forte contamination de ses cours d'eau par ces substances. Le nord du Beaujolais est plus problématique, les conditions locales de pente, sol, climat, les aménagements anti-érosifs (rases, fossés) induisant un transfert rapide et souvent concentré en rigoles ou fossés et rendant l'enherbement des parcelles plus délicat à réaliser. Dans ce contexte, ce projet a souhaité apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- dans quelle mesure une zone tampon enherbée rivulaire recevant un écoulement concentré de surface est-elle capable de réduire significativement le transfert des pesticides dans le ruissellement sans engendrer une contamination de la nappe d'accompagnement du cours d'eau ?

- dans quelle mesure une infiltration répartie plus en amont dans la parcelle peut-elle contribuer à l'atténuation des transferts de pesticides ou engendrer une contamination via des écoulements latéraux ?

- dans quelle mesure un enherbement inter-rang peut-il influencer le transfert et la rétention des pesticides (fongicides notamment) ?

Ce projet s'appuie sur trois sites expérimentaux situés sur le bassin de la Morcille (commune de Villié Morgon). Le premier (site de St Joseph) est constitué d'une parcelle de vigne bordée d'une prairie rivulaire et représente une situation à risque du point de vue du transfert parcellaire de surface, fréquemment rencontrée dans le Beaujolais de coteaux sur les fortes pentes difficilement enherbables : on a étudié sur ce site l'efficacité de la zone tampon rivulaire à atténuer les transferts de pesticides ruisselés et infiltrés. Pour l'étude des transferts latéraux, deux sites différenciés ont été étudiés : le site de St Joseph correspondant à une situation d'écoulement latéral au sein d'une nappe de versant peu profonde et le site de Ruyère correspondant à une situation d'écoulement latéral de sub-surface lié à la présence d'une rupture de perméabilité du sol à faible profondeur. Le troisième site de Bellevue a permis d'étudier l'effet d'un enherbement sur le transfert de fongicides et insecticides. Sur chaque site on a suivi aussi bien les transferts rapides de surface que les transferts latéraux dans le sol pouvant rediriger les pesticides vers le cours d'eau.

→ Cette étude a montré que sur le site de St Joseph, une bande enherbée interceptant un ruissellement concentré permet de réduire significativement le risque de transfert par ruissellement jusqu'au cours d'eau grâce à une infiltration rapide dans le sol. En dépit de la rapidité des écoulements en jeu, une atténuation croissante des concentrations dans l'eau infiltrée de l'amont vers l'aval de la bande enherbée est observée. La contamination peut atteindre la nappe superficielle sous-jacente mais avec une atténuation importante des concentrations en surface de nappe, comparativement à la concentration initiale dans le ruissellement de surface (83 à 96% de réduction). Ces observations mettent en avant l'intérêt de tels dispositifs rivulaires. Dans les situations à risque (proximité du cours d'eau) ils pourront toutefois nécessiter d'être complétés par des dispositifs de limitation des transferts plus en amont dans le versant. Ces transferts sont cependant bien moins concentrés que le ruissellement de surface (10 à 100 fois plus concentré) et une atténuation des transferts de l'amont vers l'aval a été mise en évidence en fonction des propriétés de mobilité des substances actives.

→ Le suivi de la nappe de versant de St Joseph a montré que la plupart des substances retrouvées sont des substances interdites ou des produits de dégradation. Il semble se dégager un gradient d'atténuation des concentrations de l'amont vers l'aval de la bande enherbée, sauf pour certaines substances (métabolites notamment). L'étude sur le site de Ruyère a permis de mettre en évidence l'existence de transferts latéraux de substances phytosanitaires, en présence d'une rupture de perméabilité dans le sol à faible profondeur.

→ Le suivi comparatif d'un inter-rang enherbé et d'un inter-rang désherbé sur le site de Bellevue a montré qu'a priori l'enherbement joue un rôle positif dans l'atténuation des concentrations en produits phytosanitaires dans le ruissellement sans pour autant augmenter les transferts par percolation qui, au contraire, sont moindres comparativement à la modalité désherbée.

Afin d'orienter les choix de gestion, les résultats acquis ont été utilisés pour esquisser un arbre de décision permettant de définir les options les plus appropriées selon les conditions locales. En particulier, selon la présence ou non de zones tampons pour atténuer le ruissellement concentré et les écoulements latéraux on peut orienter les actions en priorité vers leur mise en place ou leur restauration ; en cas d'efficacité insuffisante suspectée (absence de zone tampon ou largeur insuffisante, position riveraine), on pourra préconiser la mise en place complémentaire d'un enherbement inter-rang. Si cette solution s'avère difficile (parcelle très pentue, inter-rangs insuffisamment espacés, risque de concurrence hydrique, ...), une action renforcée de réduction des usages sera à envisager. Par ailleurs, dans le contexte du Beaujolais où on rencontre un grand nombre d'aménagements (rases, fossés) susceptibles de collecter les écoulements latéraux de faible profondeur dès l'intérieur des parcelles, il pourra être utile d'évaluer dans quelle mesure ces rases et fossés pourraient être aménagés (végétalisation, paillage, ...) afin de limiter leur capacité de transfert des substances phytosanitaires. Ce projet a fait l'objet de la thèse de Xavier Peyrard qui rassemble plus en détail les résultats acquis sur le site de Ruyère.

Sommaire

Contexte de l'étude.....	12
Objectifs	14
Démarche adoptée et sites d'étude.....	15
1. Présentation générale	15
2. Présentation du site de Saint Joseph (S1).....	17
a. Description générale.....	17
b. Instrumentation	19
c. Stratégie de suivi mise en œuvre.....	19
3. Présentation du site de Ruyère (S2).....	22
a. Description générale.....	22
b. Instrumentation	24
c. Stratégie de suivi mise en œuvre.....	29
4. Présentation du site de Bellevue (S3)	33
a. Description générale.....	33
b. Instrumentation	34
c. Stratégie de suivi mise en œuvre.....	35
Présentation des résultats.....	37
1. Etude des transferts latéraux de pesticides au sein de la nappe de versant de Saint Joseph ..	37
a. Etat de contamination de la nappe par les pesticides.....	37
b. Dynamique de transfert de solutés et de pesticides au sein de la nappe.....	40
c. Effet d'une infiltration massive au sein de la bande enherbée.....	51
2. Etude des transferts latéraux de sub-surface au sein du versant de Ruyère.....	57
a. Suivis en conditions naturelles	57
b. Expérimentation de traçage	64
3. Etude de l'effet d'un enherbement inter-rang sur le transfert de pesticides sur le site de Bellevue	72
a. Bilans hydriques	72
b. Transferts des produits phytosanitaires suivis sur la période culturale	73
Conclusions et perspectives	78

Références bibliographiques.....	83
Rapport d'étudiants financés dans le cadre du projet :	85
Annexe 1 : Type d'arbre opérationnel visé	86
Annexe 2 : Indicateurs utilisés.....	87
Annexe 3 : Localisation des trois sites d'étude et du pluviomètre	88
Annexe 4 : Profondeur des piézomètres et coupes de forage sur le site de St Joseph	89
Annexe 5 : Recensement des substances actives (SA) utilisées par le viticulteur du versant suivi à Saint Joseph.....	95
Annexe 6 : « Statut » des substances actives retrouvées dans la nappe de St Joseph au niveau de la prairie de bas de versant.....	97
Annexe 7 : Conditions piézométriques des années de suivi sur le site de St Joseph.....	98
Annexe 8 : Evolution des niveaux piézométriques de la nappe de St Joseph du 20 avril au 20 mai 2015 au sein des piézomètres BE1P, BE2P et BE6	100
Annexe 9 : Cartes piézométriques issues de l'extrapolation des mesures en 2013 sur le versant de St Joseph	101
Annexe 10 : Profils de résistivité obtenus sur le versant de St Joseph	102
Annexe 11 : Protocole mise en œuvre pour le suivi fin de la dynamique de la contamination de la nappe du site de St Joseph suite à des événements pluvieux en conditions naturelles (2015)	103
Annexe 12 : Périodes de pose des tiges silicone au cours du suivi en conditions naturelles en 2015 sur le site de St Joseph	110
Annexe 13 : Protocole de mise en œuvre d'un épisode de ruissellement artificiel sur la placette de St Joseph, le 13 mai 2014	111
Annexe 14 : Evolution des masses de pesticides piégées sur les tiges silicone (TS) après une exposition de 6 h, 1 j et 7 j à partir du début de l'application de l'épisode de ruissellement artificiel (désignée sous le terme de simulation de ruissellement) sur le site de <St Joseph	119
Annexe 15 : Comparaison « qualitative » du suivi ponctuel et du suivi intégratif durant la deuxième semaine suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel (désignée sous le terme de simulation de ruissellement) sur le site de St Joseph	120
Annexe 16 : Schémas de mise en place des lysimètres sur le site de Bellevue	121
Annexe 17 : Détail des plaques lysimétriques et du système de collecte du ruissellement sur le site de Bellevue	123
Annexe 18 : Dates d'applications 2014 et 2015 sur le site de Bellevue.....	124
Annexe 19 : Suivi des concentrations en pesticides dans le ruissellement (IRD et IDE) et la percolation (IRD) du site de Bellevue	125

Table des figures

<i>Figure 1. Représentation schématique de l'UCS 1 avec différenciation des UTS 1 et 2.....</i>	16
<i>Figure 2. Représentation schématique de l'UCS 2.....</i>	16
<i>Figure 3. Photo du bas de versant montrant la succession parcelle de vigne-prairie et Morcille. Site St Joseph..</i>	17
<i>Figure 4. Différentes vues et schéma du dispositif expérimental utilisé pour évaluer la capacité d'une placette enherbée à atténuer le ruissellement concentré issu d'une parcelle de vigne. Site de St Joseph.....</i>	18
<i>Figure 5. Schéma des processus de transfert potentiels à la surface et dans le sol du versant d'étude. Site de St Joseph.....</i>	19
<i>Figure 6 : Schéma d'emplacement des piézomètres visant à suivre la dynamique de nappe et le transfert des pesticides au sein de la prairie de bas de versant. Site de St Joseph.....</i>	20
<i>Figure 7. Schéma de positionnement des lysimètres. Site de St Joseph.</i>	21
<i>Figure 8. Schéma du dispositif de collecte et d'échantillonnage. Site de St Joseph.</i>	21
<i>Figure 9. Photo du dispositif avant rebouchage de la tranchée. Site de St Joseph.</i>	21
<i>Figure 10. Délimitation de la zone d'étude et position des principales instrumentations (pluviomètres, piézomètres, et tranchée expérimentale pour le suivi des écoulements latéraux dans le sol et canal venturi pour le suivi du ruissellement. Site de Ruyère.....</i>	22
<i>Figure 11. Description succincte des différents horizons du sol du site de Ruyère.....</i>	23
<i>Figure 12. Photo de l'intérieur de la tranchée mise en place et de l'équipement associé pour la mesure et la collecte des écoulements de sub-surface sur le site de Ruyère.</i>	25
<i>Figure 13. Dispositif de mesure et de collecte du ruissellement, bloc contenant la centrale d'acquisition des données et pluviomètre, aperçu du préleveur affecté à la collecte de l'eau de sub-surface sur le site de Ruyère.....</i>	27
<i>Figure 14. Schéma représentant l'instrumentation du versant de Ruyère selon un axe ouest-est (piézomètres, tranchée, canal venturi et préleveurs automatiques associés).</i>	27
<i>Figure 15. Délimitation de la surface contribuant aux écoulements de sub-surface interceptés par la tranchée sur le versant du site de Ruyère et vue sur le toit de tranchée et le préleveur automatique.</i>	28
<i>Figure 16. Délimitation de la surface contribuant au ruissellement mesuré sur le versant du site de Ruyère et vue du canal venturi.....</i>	28
<i>Figure 17. Schéma de positionnement des tranchées d'injection et d'interception ainsi que des piézomètres pour le suivi du panache des solutés injectés dans la tranchée d'injection au niveau de la zone saturée. Site de Ruyère.</i>	30
<i>Figure 18. Vue transversale du versant étudié entre tranchée d'injection et tranchée d'interception avec représentation schématique du transfert du panache de soluté. Site de Ruyère.</i>	31
<i>Figure 19. Vue de la parcelle choisie pour l'étude du rôle de l'enherbement inter-rang sur le transfert des pesticides. Site de Bellevue.....</i>	33
<i>Figure 20. Dispositif mis en place sur le site de Bellevue : vue de dessus. Site de Bellevue.....</i>	34
<i>Figure 21. Schéma du dispositif de Bellevue : vue en coupe montrant les systèmes de collecte de l'eau de percolation (plaque lysimétrique) et du ruissellement en aval d'IR. Site de Bellevue.</i>	35

<i>Figure 22. Concentrations en pesticides (analyse complète) au sein de la nappe de St Joseph au niveau des piézomètres BE2 et BE2P. Site de St Joseph.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 23. Concentrations moyennes dans la nappe sur la période de suivi (2012-2014) en pesticides de l'amont (BE1-BE4 BE1P et BE4P) vers l'aval (BE3-BE6) et dans la Morcille. Site de St Joseph.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 24. Schéma de positionnement des piézomètres sur le versant de St Joseph.</i>	<i>41</i>
<i>Figure 25. Schéma récapitulatif des hypothèses de sens de circulation de l'eau au sein de la nappe de versant de St Joseph.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 26. Chronique de restitution au sein du piézomètre BE2P du traceur injecté au BE1P en 2012 et 2013, en regard de la pluviométrie et du niveau de nappe au sein du BE2P exprimé par rapport à la surface du sol. Site de St Joseph.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure 27. Chroniques de concentration en traceur au sein des piézomètres suivis au cours de l'essai de traçage 2013, selon le transect amont-aval (BE2-BE2P → BE3 – BE6) et selon la profondeur de prélèvement, du niveau de nappe exprimé par rapport à la surface du BE1P. Site de St Joseph.</i>	<i>44</i>
<i>Figure 28. Evolution des concentrations du norflurazon et de son produit de dégradation en fonction du temps dans le piézomètre BE2 Surface et du niveau piézométrique mesuré dans le BE2P. Site de St Joseph.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 29. Evolution des concentrations des autres substances retrouvées dans la nappe dans le piézomètre BE2 Surface en fonction du temps et du niveau piézométrique mesuré dans le BE2P. Site de St Joseph.</i>	<i>47</i>
<i>Figure 30. Concentrations en substances phytosanitaires mesurées dans les piézomètres BE2 (20 cm sous la surface de la nappe) et BE2P (340 cm sous la surface du sol) le 30 avril 2015 et concentrations maximales observées dans le BE2 (20 cm sous la surface de la nappe) sur la période du 5 au 7 mai 2015. Site de St Joseph.</i>	<i>48</i>
<i>Figure 31. Masses totales de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones sur l'ensemble du suivi (4 semaines) selon le lieu et la profondeur de pose (en surface : piézomètres BE1 à BE6 ou en profondeur (P) et dans la Morcille), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance. Site de St Joseph.</i>	<i>49</i>
<i>Figure 32. Masses de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones placées dans le BE2 en surface (20 cm sous le toit de la nappe) selon les périodes d'exposition (période S0 à S3), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance. Site de Saint Joseph.</i>	<i>50</i>
<i>Figure 33. Masses de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones placées dans le BE2P (340 cm sous la surface du sol) selon les périodes d'exposition (période S0 à S3), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance. Site de Saint Joseph.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 34. Evolution temporelle des débits de ruissellement simulé et de percolation au sein du lysimètre A ainsi que des niveaux piézométriques au sein des piézomètres BE2P et BE6. Site de St Joseph.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 35. Evolution, au sein des lysimètres A et C ainsi que du piézomètre BE2-Surface, des concentrations ponctuelles normalisées par la concentration moyenne d'entrée dans le ruissellement simulé, pour le traceur ionique (bromure) et les trois pesticides étudiés. Site de St Joseph.</i>	<i>52</i>
<i>Figure 36. Confrontation des dynamiques de transfert hydrique et chimique à la surface de la nappe au sein du piézomètre BE2 Surface. Site de St Joseph.</i>	<i>53</i>
<i>Figure 37. Taux d'atténuation des concentrations en bromures et pesticides dans les lysimètres (A à D) et dans le piézomètre BE2 Surface relativement à la concentration initiale dans le ruissellement. Site de St Joseph.</i>	<i>54</i>
<i>Figure 38. Evolution des masses piégées sur les échantillonneurs passifs (tiges silicone) au sein des piézomètres BE2 en surface et BE2P au fond, au cours des 3 semaines suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel et pour les trois pesticides étudiés. Site de St Joseph.</i>	<i>55</i>

<i>Figure 39. Evolution des masses piégées sur les échantillonneurs passifs (tiges silicone) au sein des piézomètres BE2 en surface (amont) et BE6 (aval), au cours des 3 semaines suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel et pour les trois pesticides étudiés. Site de St Joseph.....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 40. Pluie cumulée et flux de sub-surface moyenné sur 3h de mi-mai au 4 août 2014. Site de Ruyère.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 41. Débits observés sur la campagne de suivi en conditions naturelles sur le site de Ruyère pour le ruissellement de surface et les écoulements latéraux dans le sol, en correspondance du suivi pluviométrique. .</i>	<i>59</i>
<i>Figure 42. Flux de sub-surface moyenné sur 3h, concentrations en chlorpyrifos-méthyl, en spiroxamine, en tébuconazole et en diméthomorphe mesurées dans les écoulements de sub-surface au cours des événements A, B et C, du 1^{er} juillet au 4 août 2014. Site de Ruyère.</i>	<i>60</i>
<i>Figure 43. Boîtes à moustache des concentrations en chlorpyrifos-méthyl, spiroxamine, tébuconazole, et diméthomorphe sur la période d'observation. Site de Ruyère.</i>	<i>61</i>
<i>Figure 44. Volume de sub-surface cumulé au sein de la tranchée d'interception du 17/03/2014 au 17/03/2015 et Bilan des masses des substances phytosanitaires étudiées dans l'eau collectée au sein de la tranchée sur la même période, exprimé en % de la quantité appliquée sur la surface contributive estimée. Site de Ruyère.</i>	<i>62</i>
<i>Figure 45. Volume de ruissellement cumulé passé au niveau du canal venturi du 17/03/2014 au 17/03/2015 et Bilan des masses des substances phytosanitaires étudiées dans l'eau de ruissellement collectée sur la même période, exprimé en % de la quantité appliquée sur la surface contributive estimée. Site de Ruyère.</i>	<i>63</i>
<i>Figure 46. Conditions hydrologiques au cours de l'expérimentation de traçage (pluie horaire et cumulée, niveau d'eau dans les piézomètres et débit dans la tranchée d'interception). Site de Ruyère.</i>	<i>64</i>
<i>Figure 47. Chroniques de restitution du bromure dans les piézomètres et la tranchée d'interception aval. Site de Ruyère.</i>	<i>65</i>
<i>Figure 48. Chroniques de restitution des substances phytosanitaires dans la tranchée d'injection, le piézomètre central intermédiaire Half 3 et la tranchée d'interception. Site de Ruyère.</i>	<i>66</i>
<i>Figure 49. Masse cumulée relative de chaque substance en fonction du volume passé cumulé au sein de la tranchée d'interception. P1 : Phase 1, P2 ; Phase 2 et P3 : Phase 3. Site de Ruyère.</i>	<i>68</i>
<i>Figure 50. Représentation du ratio entre la masse de substance mesurée sur chaque TS au sein des piézomètres intermédiaires, le long de la tranchée d'interception et des deux piézomètres aval relativement à la masse mesurée en amont de la zone de traçage, au sein d'un piézomètre de référence. Site de Ruyère.</i>	<i>70</i>
<i>Figure 51. Cumuls d'eau de ruissellement et de percolation collectés sur le site de Bellevue en 2014 et en 2015, selon les modalités Inter-rang désherbé (IRD) ou enherbé (IRE). Site de Bellevue.....</i>	<i>72</i>
<i>Figure 52. Cumuls d'eau de ruissellement et de percolation collectés sur le site de Bellevue de fin mars à mi-juillet 2014 et de fin mars à début juillet 2015, selon les modalités Inter-rang désherbé (IRD) ou enherbé (IRE). Site de Bellevue.</i>	<i>73</i>
<i>Figure 53. Cumuls d'eau ruisselée (Ruis) ou percolée (Lys) collectés dans les inter-rangs désherbés (D) ou enherbés (E) au cours des 3 épisodes échantillonnés pour analyses de produits phytosanitaires. Site de Bellevue.</i>	<i>74</i>
<i>Figure 54. Concentrations moyennes mesurées dans les échantillons cumulés de ruissellement et de percolation sur les IR désherbé (IRD) ou enherbé (IRE) sur les périodes du 2 au 15 juillet 2014 et du 6 au 13 octobre 2014. Site de Bellevue.</i>	<i>76</i>
<i>Figure 55. Masses mesurées dans les échantillons cumulés de ruissellement et de percolation sur les IR désherbé (IRD) ou enherbé (IRE) cumulées sur les 2 périodes de collecte : du 2 au 15 juillet 2014 et du 6 au 13 octobre 2014. Site de Bellevue.</i>	<i>77</i>

<i>Figure 56. Période de retour de la pluie susceptible de générer le ruissellement simulé selon que l'on considère un coefficient de ruissellement de 10% ou 20 % pour un ratio surfacique placette enherbée/parcelle de vigne de 1/110 Site St Joseph.</i>	<i>112</i>
<i>Figure 57. Position des points d'échantillonnage de sol pour mesure d'humidité initiale sur la placette enherbée. Site St Joseph.</i>	<i>113</i>
<i>Figure 58. Photo du site expérimental (vue de l'amont vers l'aval du versant) : placette enherbée équipée de lysimètres (A à D), piézomètres suivis (BE2, BE2P, BE6) avec préleveur automatique utilisé au BE2 en Surface. Site St Joseph.</i>	<i>115</i>
<i>Figure 59. Schéma de l'instrumentation de la placette enherbée étudiée : lysimètres (A à D), piézomètres anciens peu profonds (A à H) et nouveaux piézomètres (BE1P, BE2, BE2P, BE3 et, BE6) Site St Joseph..</i>	<i>116</i>
<i>Figure 60. Coupe longitudinal du versant suivi : piézomètres suivis et position des dispositifs d'échantillonnage actif et passif. Site St Joseph.</i>	<i>117</i>
<i>Figure 61. Schéma de mise en œuvre et de suivi au cours de la simulation de ruissellement du 13 mai 2014. Site St Joseph.</i>	<i>118</i>
<i>Figure 62. Masses de pesticides piégées sur les tiges silicones exposées 6 h, 1 j et 7 j à partir du début de la simulation de ruissellement au sein des piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond et BE2P Fond Site St Joseph.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 63. Masses en pesticides piégées au sein des Tiges Silicones (TS) exposées dans les piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond, BE2P-fond, BE6 du 7° au 14° jour suivant la simulation de ruissellement. Site St Joseph.</i>	<i>120</i>
<i>Figure 64. Concentrations en pesticides mesurées ponctuellement le 10° jour suivant la simulation de ruissellement dans les piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond, BE2P Fond, BE6. Site St Joseph.</i>	<i>120</i>

Table des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques et hydrodynamiques du sol de la placette enherbée étudiée, site St Joseph. _____	19
Tableau 2. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires étudiées au cours de l'événement artificiel de ruissellement (mai 2014). Site de St Joseph. _____	21
Tableau 3. Textures, teneurs en matière organique, porosités et conductivités hydrauliques à saturation (Ks) de l'horizon de surface et de l'horizon sous-jacent plus argileux du site de Ruyère. _____	24
Tableau 4. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires suivies en conditions naturelles ou lors de l'expérimentation de traçage sur le site de Ruyère. _____	29
Tableau 5. Propriétés physicochimiques des autres substances phytosanitaires suivies lors de l'expérimentation de traçage sur le site de Ruyère. _____	31
Tableau 6. Concentrations en substances phytosanitaires et bromure de la solution d'injection. Site de Ruyère.	32
Tableau 7 : Valeurs des K_{oc} en fonction des sols pour chaque pesticide. Site de Ruyère. _____	32
Tableau 8. Principales caractéristiques des inter-rangs de la parcelle d'étude. Site de Bellevue. _____	33
Tableau 9. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires suivies sur le site de Bellevue. _____	35
Tableau 10. Concentrations en pesticides dans les piézomètres suivis sur le site de Saint Joseph. Analyse complète. Site de St Joseph. _____	39
Tableau 11. Pesticides étudiés en conditions naturelles : dates et taux d'application en 2014. Site de Ruyère. _	57
Tableau 12. Temps de transfert, taux d'atténuation des concentrations aux pics, concentration moyenne sur une dizaine de jour tels que restitués au sein du piézomètre central intermédiaire et de la tranchée d'interception. Site de Ruyère. _____	67
Tableau 13. Taux de récupération en % de chaque substance à la fin de l'expérimentation (6 mois) au sein de la tranchée d'interception et en g/g par unité de volume passé pour les trois phases de transfert identifiées. Site de Ruyère. _____	69
Tableau 14. Récapitulatif des types, fréquences de prélèvements et du nombre d'échantillons au sein du BE2 en Surface par période de prélèvement _____	113
Tableau 15. Piézomètres équipés d'échantillonneurs passifs et durée d'exposition après le début de la simulation. _____	114

Contexte de l'étude

Le Beaujolais viticole constitue une zone d'action prioritaire pour la Cellule Régionale d'Observation et de Prévention de la Pollution par les pesticides du fait des forts niveaux de contamination observés dans ses cours d'eau. Un contrat de rivières est en cours d'élaboration sur cette zone. Le nord du Beaujolais est particulièrement problématique dans la mesure où il combine un milieu fragile (des sols peu profonds propices aux écoulements rapides et à l'érosion), une culture peu couvrante et sensible aux maladies cryptogamiques, aux ravageurs et à la concurrence hydrique et azotée, des pluies printanières et estivales pouvant être de très forte intensité (Toutan, 2001). Cela se traduit aujourd'hui par un recours encore fréquent aux produits phytosanitaires (fongicides, herbicides et dans une moindre mesure, insecticides) et une contamination marquée des cours d'eau (DREAL RA, 2010 ; Gouy et Nivon, 2007). L'usage des herbicides est en pleine évolution, suite à l'interdiction du diuron suivi de l'établissement au niveau européen d'une liste de substances candidates à la substitution telles que la flumioxazine, le glufosinate ou encore l'aminotriazole. Dans ce contexte, on observe que certains viticulteurs font le choix d'enherber leurs parcelles, ce qui limite partiellement le recours aux herbicides racinaires. La diminution de l'usage des fongicides est plus délicate, compte tenu des incidences importantes qu'un traitement manqué peut occasionner sur la culture. Pour le Beaujolais, la valeur repère pour l' $IFT_{\text{herbicides}}$ est de 1.92 et de 14 pour l' $IFT_{\text{fongicides et insecticides}}$ (2008).

L'intérêt des couverts enherbés bien positionnés vis-à-vis des écoulements de surface est qu'ils sont susceptibles de limiter le transfert par ruissellement de surface (à l'origine de pics de concentration dans les cours d'eau, Dabrowski et al., 2002) aussi bien des fongicides, des herbicides que des insecticides. En particulier, la thèse de Jean-Guillaume Lacas, (Lacas, 2005) et le post-doctorat d'Arnaud Boivin (Boivin *et al.*, 2007 ; Gouy *et al.*, 2008) ont bien montré qu'une prairie rivulaire était très efficace pour limiter des apports importants de produits phytosanitaires par ruissellement (plus de 90% d'abattement des flux ruisselés) en favorisant leur infiltration dans le sol dès l'amont de la bande. Ils ont également montré que les substances infiltrées subissaient une réduction de concentration et de flux par dilution et rétention dans les premiers centimètres du sol (de 25 à 50%¹ d'abattement des concentrations et de 40 à 70%¹ de réduction des flux à 50 cm de profondeur sous la bande, selon les substances). Cependant, un des points d'interrogation qui reste entier réside dans **le potentiel du reliquat de produits infiltrés à rejoindre le cours d'eau via des écoulements latéraux** qui seraient susceptibles de « soutenir » les concentrations élevées en crue et/ou les concentrations chroniques. A ce niveau, on peut distinguer deux grands types de fonctionnements pouvant générer des transferts latéraux : 1) un écoulement au sein d'une zone saturée suffisamment pérenne (nappe superficielle de versant) ou 2) un écoulement hypodermique (au niveau d'une rupture de perméabilité) par saturation temporaire du sol à l'échelle d'un événement pluvieux. Les deux situations sont présentes sur le bassin de la Morcille et il semble donc essentiel de mieux cerner en quelle mesure elles peuvent participer aux transferts des produits phytosanitaires vers le cours d'eau.

¹ Selon les propriétés physico-chimiques des substances, notamment leur Koc.

Une autre piste pour limiter la contamination par les produits phytosanitaires au plus près des zones traitées consiste en un enherbement inter-rang qui induit, a priori, à la fois une réduction d'usage des substances et une diminution de leur transfert. La diminution du recours aux herbicides (jusqu'à 0 traitement) est la plus flagrante. Une baisse d'usage de fongicides est aussi évoquée dans la littérature : l'herbe peut diminuer la vigueur de la vigne ce qui peut avoir pour conséquence de réduire la surface foliaire à traiter et d'atténuer l'attractivité de la vigne vis-à-vis des nuisibles. Ainsi, certains ont noté une atteinte moindre par les maladies fongiques et notamment le botrytis en présence d'enherbement (Butault *et al.*, 2010 ; Chantelot *et al.*, 2003). La réduction d'usage des fongicides reste cependant limitée comparativement aux herbicides. De ce fait un aspect à mieux cerner et encore peu exploré concerne l'évaluation de **l'efficacité de l'enherbement inter-rang vis-à-vis du transfert de ces substances**. Il existe quelques références dans le sud de la France (site de Puisserguier dans l'Hérault (LISAH) (Andrieux *et al.*, 2007) et un site en sols de Boulbènes près de Toulouse (Schreck, 2009)), qui montrent, la première, une influence positive de l'enherbement sur la limitation du transfert du glyphosate dans le ruissellement de surface et, la seconde, une limitation plus générale des transferts dans le ruissellement et dans le drainage, mais pour des sols nettement moins sableux et perméables que ceux du Beaujolais.

Ces questionnements sont exacerbés dans le contexte du Nord Beaujolais compte tenu des éléments suivants :

- les sols présentent une plus faible réserve utile et des pentes plus marquées que dans le Sud Beaujolais ; le mode de conduite de la vigne est majoritairement en gobelet, induisant une forte densité de pieds de vigne ainsi qu'un espace inter-rang réduit ; ces éléments rendent l'enherbement délicat (implantation, entretien, concurrence),
- ces sols souvent peu profonds sont propices à l'infiltration mais également à la redirection des écoulements sur une couche moins perméable, notamment l'altérite de granite, des accumulations plus argileuses ou le socle granitique lui-même,
- ils sont pauvres en matières organiques et en argile et donc peu susceptibles de retenir les substances phytosanitaires si ce n'est dans la couche racinaire d'un couvert enherbé suffisamment pérenne,
- la présence fréquente sur les fortes pentes d'aménagements destinés à la lutte anti-érosive (rases², demi-buses, fossés, ...) contribue à la concentration fréquente des écoulements de surface au cours des pluies de forte intensité. Des volumes importants de ruissellement sont ainsi acheminés directement au cours d'eau.

On précise que dans la suite on utilise indifféremment les termes « produits phytosanitaires » et « pesticides » pour désigner les substances utilisées pour la protection de la vigne.

² Rigoles peu profondes et subhorizontales aménagées environ tous les 10 m transversalement à la pente principale.

Objectifs

L'objectif général de ce projet est de mieux cerner, dans le contexte spécifique du vignoble du Nord Beaujolais, l'intérêt et les limites de différentes options de gestion notamment basées sur l'usage d'un couvert enherbé pour la réduction de la contamination des eaux de surface par les pesticides. On désigne sous le terme de « couvert enherbé » : les zones tampons (prairies ou bandes enherbées) rivulaires, les bandes enherbées installées dans les versants perpendiculairement au sens des écoulements de surface et l'enherbement des inter-rangs de vigne.

On propose, notamment, d'apporter des éléments de réponse aux questions suivantes, dans le contexte du Nord Beaujolais :

- Question 1. Dans quelle mesure un sol de zone tampon enherbée située en bordure de cours d'eau et recevant une arrivée importante de ruissellement concentré est-il capable de réduire significativement le transfert des pesticides ruisselés sans engendrer dans le même temps une contamination de la nappe d'accompagnement du cours d'eau via la reprise des pesticides infiltrés par des écoulements latéraux ?
- Question 2. Dans quelle mesure une infiltration répartie plus en amont dans la parcelle³ peut-elle contribuer à l'atténuation des transferts de pesticides dans le sol de la parcelle ou, au contraire, être redirigée vers le cours d'eau via des écoulements latéraux ? On distingue ici deux cas selon que l'on a présence ou non d'une nappe pérenne.
- Question 3. Dans quelle mesure un enherbement inter-rang peut-il atténuer le transfert des pesticides (fongicides notamment) dans le sol des parcelles ?

³ Cas classique au cours des pluies peu intenses mais qui peut être facilité au cours des pluies de forte intensité par la mise en place d'une bande enherbée transversale à la pente ou un enherbement des inter-rangs.

Démarche adoptée et sites d'étude

1. Présentation générale

Pour répondre aux questions posées, une approche expérimentale de terrain a été mise en place, en privilégiant des suivis en conditions naturelles lorsque cela était possible, et en ayant recours à des expérimentations en conditions semi-contrôlées sinon.

La diversité des questions a impliqué de couvrir une diversité de situations (en termes de type et profondeur de sol, de mode de conduite de la vigne, de présence d'une prairie de bas de pente). Dans ce sens, il a été nécessaire d'avoir recours à trois sites différenciés correspondant à des situations types rencontrées sur le bassin versant de la Morcille, chacune se reportant à un type de questionnement (annexe 3) :

Questions 1 et 2 (pour le cas où les transferts latéraux ont lieu au sein d'une nappe pérenne) : le site choisi, dit site de Saint Joseph (noté S1), consiste en un versant composé d'une parcelle de vigne totalement désherbée dont le ruissellement, concentré par des aménagements (rases et fossés bétonnés), se disperse sur une zone tampon enherbée rivulaire,

Question 2 (pour le cas où les transferts latéraux ont lieu en l'absence d'une nappe pérenne) : le site retenu, dit site de Ruyère (noté S2), consiste en une parcelle de vigne totalement désherbée positionnée dans un versant de transition entre le plateau sud-ouest du bassin (UCS2) et la Morcille. L'ensemble de ce secteur est caractérisé par des sols susceptibles de générer des écoulements latéraux du fait d'une rupture de perméabilité à faible profondeur (moins d'1 m de sol) combinée à des pentes importantes,

Question 3 : le site retenu, dit de Bellevue, est une parcelle de vigne dont tous les inter-rangs sont initialement enherbés (noté S3).

Les sols de vigne concernés par l'étude sont des sols sablo-limoneux développés sur des altérites granitiques ou directement sur le granite sein, ce qui correspond à une situation fréquente dans le vignoble du Nord Beaujolais. Ces sols se différencient d'un site à l'autre par leur profondeur (plusieurs mètres pour S1 et moins d'1 m pour S3) ou par la présence d'un enrichissement en éléments plus fins et la présence d'une couche limono-argileuse à faible profondeur (S2). Compte tenu des textures de ces sols marqués par une forte perméabilité de surface et par une faible teneur en matières organiques (notamment pour les sols non enherbés), on peut faire l'hypothèse d'un transfert d'eau par infiltration important. Se pose alors la question de la capacité de tels sols à retenir les substances phytosanitaires infiltrées ou, au contraire, à permettre leur transfert soit vers une nappe superficielle lorsqu'elle existe (S1), soit vers le réseau hydrographique via des écoulements transitoires de sub-surface sur la rupture de perméabilité (S2). Enfin, l'enherbement inter-rang est susceptible d'avoir une influence sur le transfert des substances, la présence d'herbe pouvant induire à la fois une augmentation de l'infiltration mais également une augmentation de la rétention et de la dégradation des substances au sein du mat racinaire (S3).

Les trois sites peuvent être rattachés aux unités cartographiques de sol (UCS) suivantes :

- S1 et S3 : UCS 1 : Sols sableux sur altérite (unité de sol 1 (UTS1) pour S1) ou sur granite (unité de sol 2 (UTS2) pour S3) (Figure 1),
- S2 : UCS 2 : Sols sableux sur argile du plateau en rive droite (Figure 2).

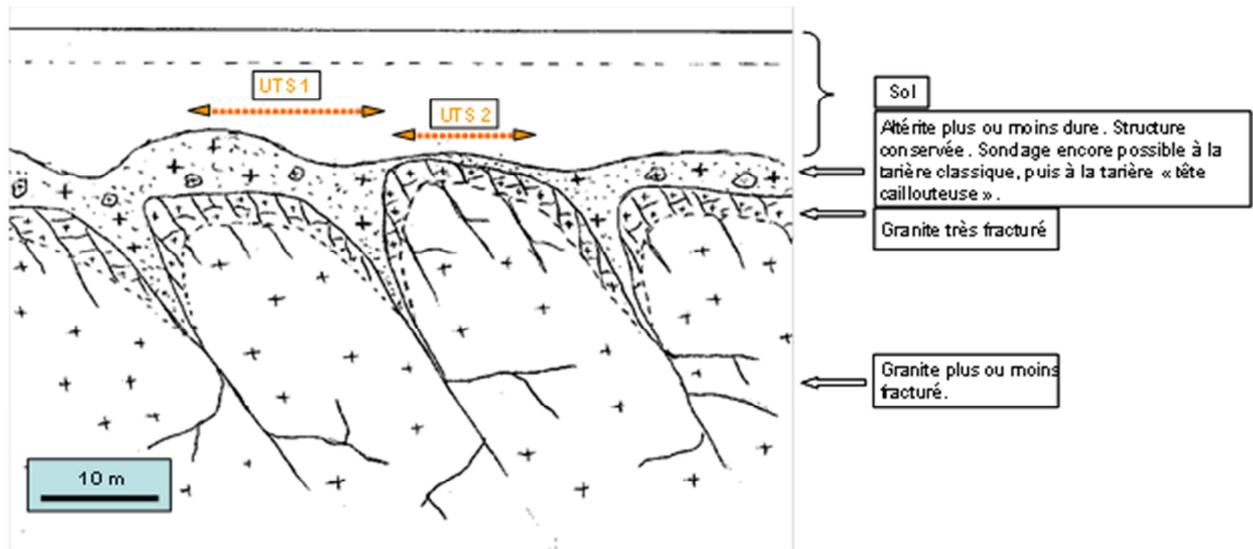


Figure 1. Représentation schématique de l'UCS 1 avec différenciation des UTS 1 et 2 (Van den Bogaert 2011).

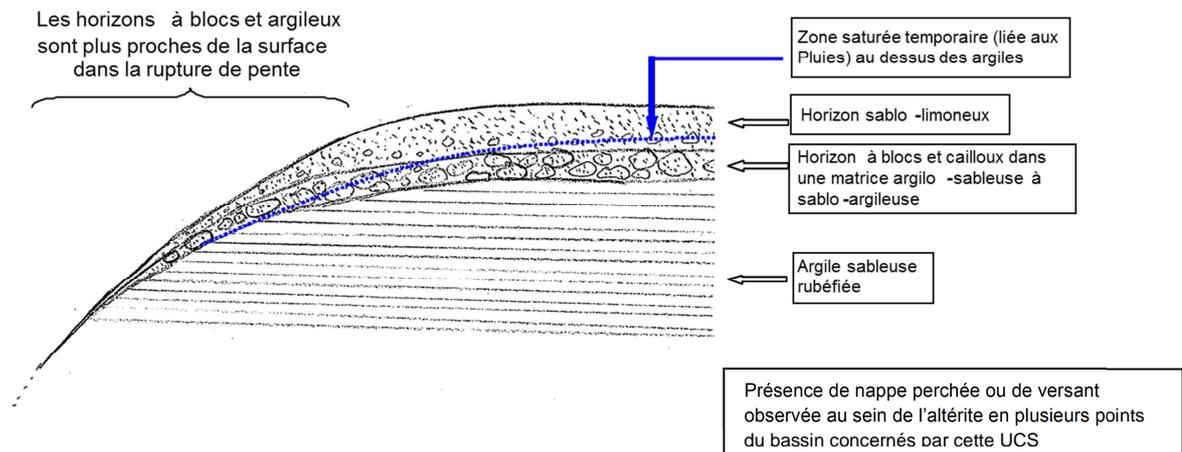


Figure 2. Représentation schématique de l'UCS 2 (Van den Bogaert, 2011).

Les UCS et les UTS associées, sont décrites dans les rapports de Frésard, 2010 et Van den Bogaert, 2011.

2. Présentation du site de Saint Joseph (S1)

a. Description générale

On souhaite ici mieux cerner la capacité épuratoire vis-à-vis des produits phytosanitaires transférés par voie hydrique (ruissellement de surface, écoulement latéral de nappe superficielle de versant), d'une prairie ancienne positionnée entre une parcelle de vigne et le cours d'eau de la Morcille.

La zone étudiée est située au lieu-dit de Saint-Joseph (commune de Villié Morgon), chez M. Jean-Pierre Ducroux. Elle est constituée d'un versant comprenant une succession (parcelle de vigne-prairie-cours d'eau). La parcelle de vigne est relativement pentue (30%) et caractérisée par la présence de rases re-dirigeant le ruissellement de surface vers un collecteur bétonné se déversant lui-même au sein de la prairie en aval (Figure 3). Ce type d'aménagement est relativement fréquent en Beaujolais de coteaux dès lors que les pentes dépassent 20% (une forte pente entraînant une érosion des sols et une difficulté d'enherbement accrues). Les rases ont pour rôle de réduire l'érosion du sol de la parcelle en limitant la longueur d'accumulation du ruissellement dans le sens de la pente. Mais une autre conséquence est une évacuation rapide et canalisée de l'eau à la surface du sol, eau potentiellement chargée en produits phytosanitaires. Du point de vue de la nature des sols, on se situe dans l'Unité Cartographique de Sol numéro 1 (UTS 1) (Figure 1) avec des sols relativement profonds. Par ailleurs, on note la présence d'une nappe superficielle de versant sous la prairie (à 5 m de profondeur en amont de la prairie et à moins d'1 m en aval), dont l'extension sous la parcelle de vigne en amont est mal connue. Même si la profondeur de cette nappe fluctue tout au long de l'année, elle semble pérenne. Elle est en contact avec la nappe d'accompagnement de la Morcille.

Il est donc important, sur ce site, d'évaluer dans quelle mesure la prairie de bas de versant peut atténuer la contamination issue :

- 1) des écoulements latéraux dans le sol en provenance du versant amont (suite à l'infiltration et au transfert de nappe au sein de la parcelle de vigne),
- 2) de l'infiltration massive du ruissellement concentré de surface issu de la parcelle de vigne sans induire un risque accru de contamination de la nappe sous-jacente.



Figure 3. Photo du bas de versant montrant la succession parcelle de vigne-prairie et Morcille. Site de St Joseph.

Comme évoqué ci-dessus, ce site a déjà fait l'objet de travaux de recherche qui ont mis en évidence la forte capacité de la prairie à limiter le ruissellement de surface (thèse de Lacas, 2005 ; post-doc de Boivin, 2007) (Figure 4). Ils ont également permis de mettre en évidence une rétention partielle des substances infiltrées, notamment au niveau du mat racinaire. Cependant, une fraction variant de 30 à 60% des flux infiltrés selon les propriétés d'adsorption des substances est susceptible de migrer sous les 50 premiers centimètres du sol. Par ailleurs, des mesures piézométriques ont montré la forte réactivité de la nappe de versant aux événements pluvieux. On ne dispose cependant pas de données qualitatives pour estimer son niveau de contamination ni l'influence de l'infiltration rapide, au sein de la prairie, du ruissellement concentré issu de la parcelle de vigne.

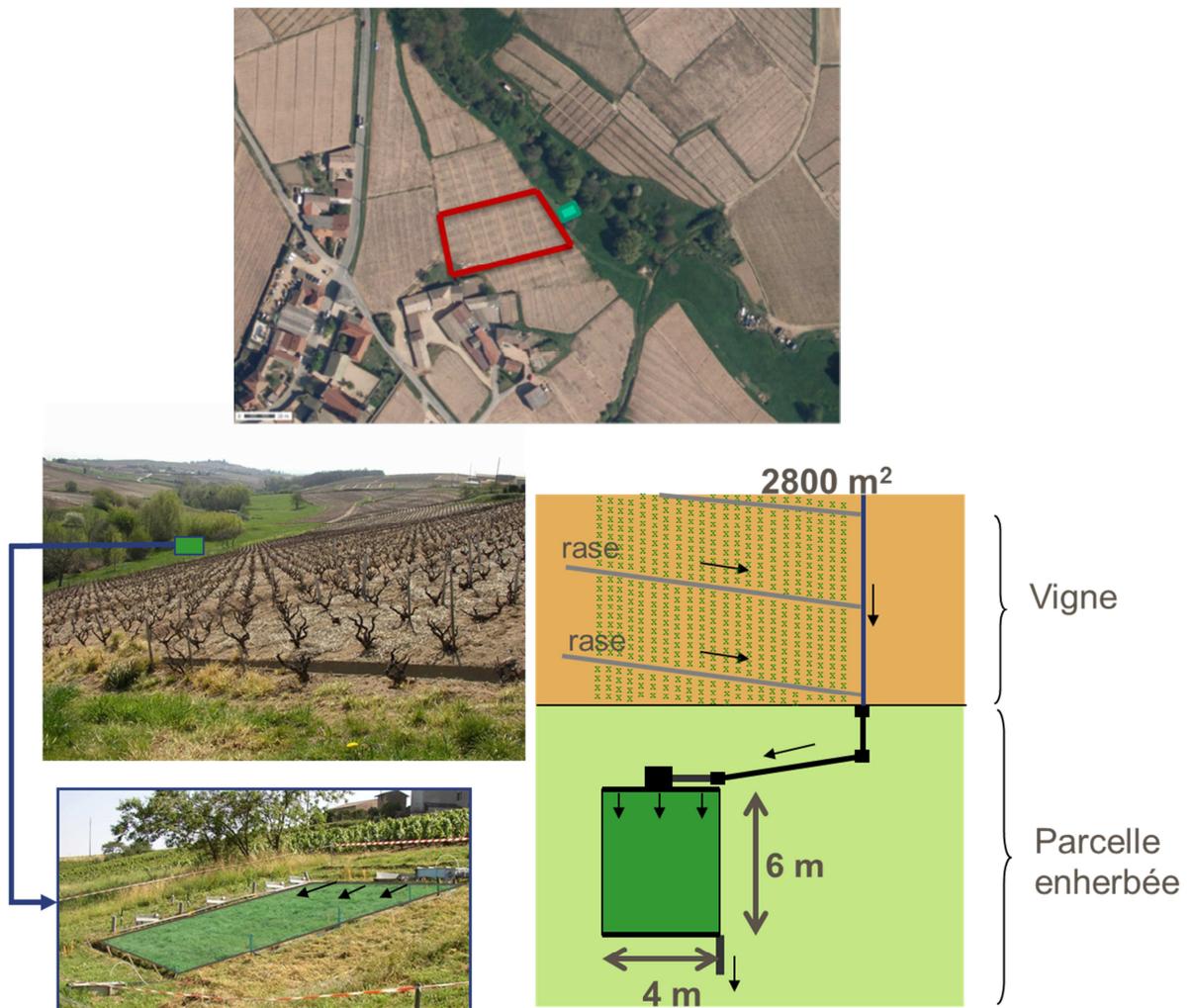


Figure 4. Différentes vues et schéma du dispositif expérimental utilisé pour évaluer la capacité d'une placette enherbée à atténuer le ruissellement concentré issu d'une parcelle de vigne (Lacas, 2005). Site de St Joseph.

Pour apporter des éléments de réponse dans ce sens, il a été nécessaire de mettre en place un équipement et une stratégie de mesure adaptés, notamment pour le suivi de la nappe aussi bien en termes quantitatifs que qualitatifs.

b. Instrumentation

Compte tenu de la grande variabilité des conditions environnementales, on a souhaité que l'instrumentation mise en place dans le cadre du projet puisse permettre de prendre en compte les variations spatio-temporelles de la dynamique de la nappe ainsi que de la contamination par les pesticides associée. On a également souhaité dissocier l'effet de la prairie sur l'atténuation 1) de la contamination de la nappe de versant du fait de l'infiltration et des transferts latéraux issus de la parcelle de vigne et 2) de la contamination liée à l'infiltration massive du ruissellement concentré issu de la parcelle de vigne au sein de la placette enherbée (Figure 5).

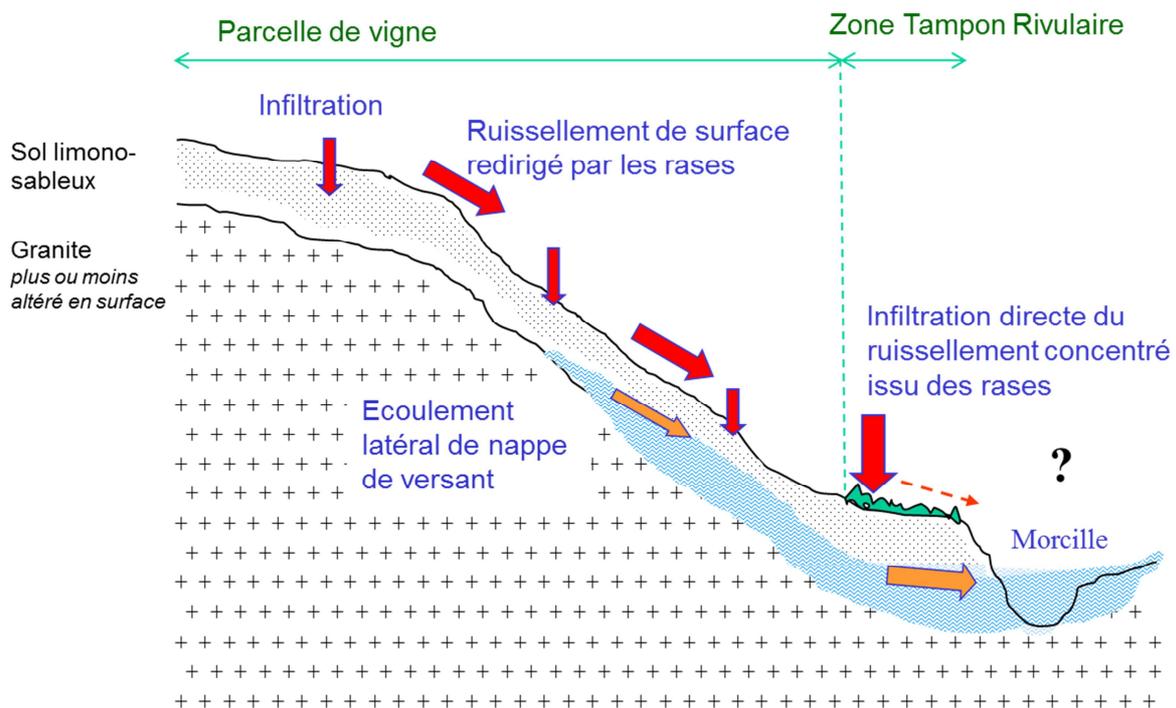


Figure 5. Schéma des processus de transfert potentiels à la surface et dans le sol du versant d'étude. Site de St Joseph.

Dans ce sens, on a réalisé des suivis hydriques et chimiques au sein d'une portion de versant englobant la connexion parcelle de vigne et prairie ainsi que la placette enherbée équipée et étudiée par Lacas, 2005 (Figure 3). Les caractéristiques du sol de la placette enherbée étudiée sont présentées dans le Tableau 1. La perméabilité en dessous de 90cm de profondeur est estimée à $9.16.10^{-5}$ m/s (Lacas, 2005). Les matériels et équipements mis en œuvre pour assurer ces suivis sont détaillés ci-après.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques et hydrodynamiques du sol de la placette enherbée étudiée, site St Joseph.

Prof. (cm)	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)	C.O. (%)	pH _(eau) (%)	Porosité (-)	Θ_{sat} (cm ³ .cm ⁻³)	K(s) (cm/j)
5-20	15	21	64	1.9	5.1	0.48	0.45	961
20-50	13	21	66	0.9	5.0	0.43	0.4	266
50-100	13	22	65	0.4	5.7	0.41	nd	nd

Données de Lacas, 2005 ; C.O. carbone organique; nd (non déterminé)

Mesures pluviométriques

Les mesures de pluviométrie utilisées dans cette étude sont celles du pluviomètre situé au lieu-dit « le Calvaire », leur fiabilité et leur précision étant supérieures au pluviomètre du site de Saint Joseph. Ce pluviomètre fonctionne avec un auget basculeur au volume connu et un enregistreur pour mesurer le nombre de basculement en fonction du temps lors d'épisode pluvieux. Des lames d'eau horaires sont ainsi calculées puis ramenées à des pluies journalières, mensuelles et annuelles.

Mesures piézométriques

Les anciens piézomètres installés lors de la thèse de J.G Lacas, 2005 ne permettaient pas, en raison de leur faible profondeur, de suivre les fluctuations de nappe en dehors des fortes montées d'eau. Par ailleurs, leur diamètre étant limité (moins de 5 cm), ils n'étaient pas aisés à équiper simultanément de sondes piézométriques et de dispositifs de prélèvement d'eau.

Ainsi, dix piézomètres plus gros et plus profonds ont été mis en place en février 2012 par la société Antémys. Afin de mieux cerner la variabilité spatiale de la nappe et des transferts associés, ils sont organisés selon deux transects parallèles et trois niveaux de suivi d'amont en aval (Figure 6).

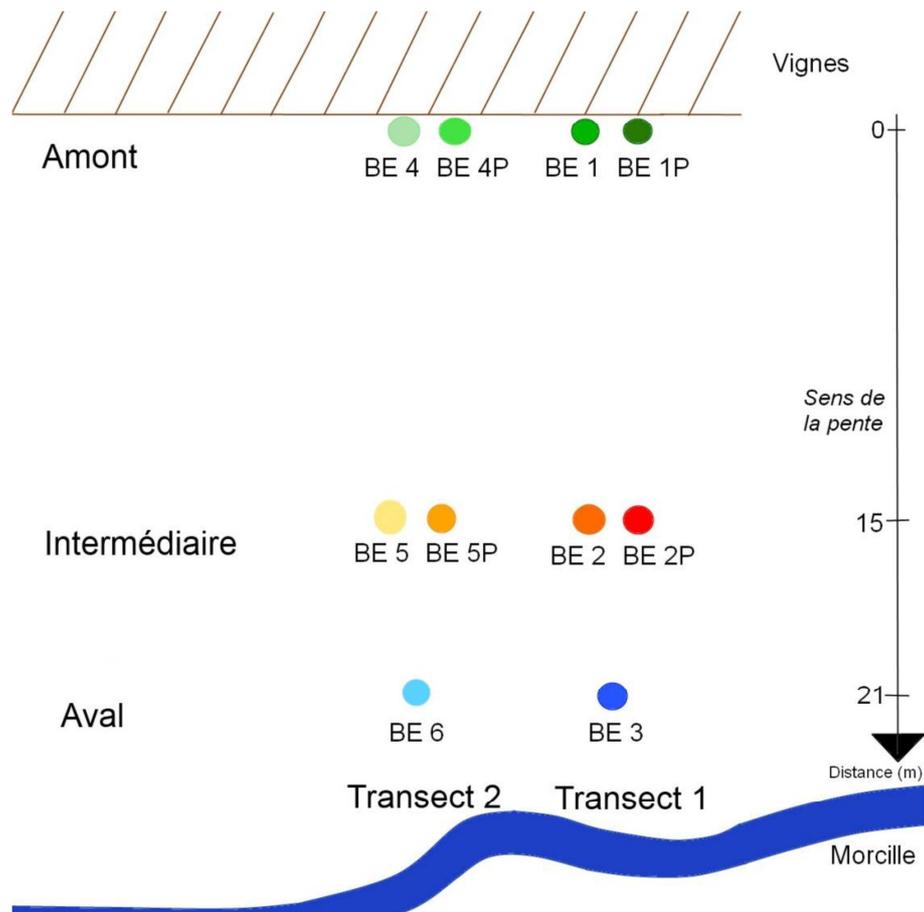


Figure 6 : Schéma d'emplacement des piézomètres visant à suivre la dynamique de nappe et le transfert des pesticides au sein de la prairie de bas de versant (Druguet, 2012). Site de St Joseph.

De plus, les niveaux amont et intermédiaire (BE1, BE2, BE4 et BE5), où la nappe est plus profonde, ont été équipés d'un jeu de deux piézomètres avec des profondeurs et des hauteurs crépinées différentes de telle sorte qu'il soit possible d'échantillonner l'eau dans la surface ou dans la profondeur de la nappe (symbole P) (annexe 4).

Des sondes Divers ont été installées dans plusieurs de ces piézomètres pour suivre l'évolution de la piézométrie en fonction du temps, de l'espace et des conditions météorologiques. Les mesures de pression qu'elles relèvent sont ramenées à une hauteur d'eau grâce à la sonde Baro mesurant la pression atmosphérique de la zone. Des mesures de profondeur d'eau par rapport à la surface du sol sont finalement obtenues. Des contrôles de calage manuels sont effectués régulièrement.

Mesures lysimétriques

Afin d'évaluer le potentiel d'infiltration des pesticides au sein de la prairie, on a utilisé le dispositif de lysimètres atmosphériques mis en place par Lacas, 2005, à savoir quatre plaques positionnées à 50 cm de profondeur sous un sol non remanié et selon un gradient amont-aval (Figure 7).

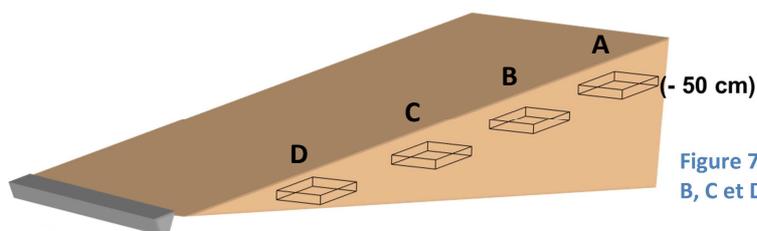


Figure 7. Schéma de positionnement des lysimètres (A, B, C et D). Site de St Joseph.

Des tuyaux en téflon permettent d'aspirer l'eau de percolation recueillie dans des bidons en polypropylène (2 bidons de 10 L chacun) (Figure 8 et Figure 9).

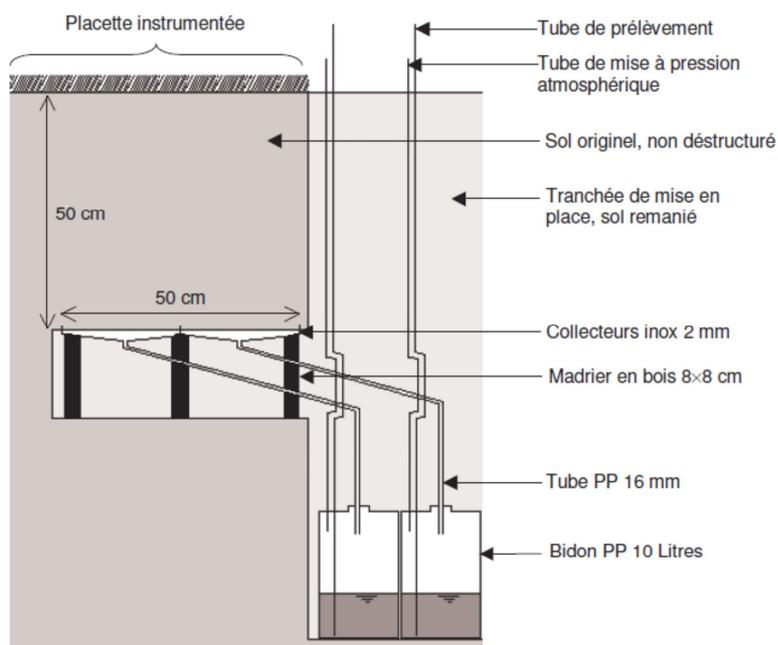


Figure 8. Schéma du dispositif de collecte et d'échantillonnage. Site de St Joseph.



Figure 9. Photo du dispositif avant rebouchage de la tranchée. Site de St Joseph.

Suivi qualitatif

Pour le suivi qualitatif, on a recours soit à des mesures par sondes automatiques (conductivité, température), soit à des échantillonnages manuels d'eau de ruissellement, d'eau de percolation ou de nappe.

Dans le cas de l'eau de nappe, on a aussi recours à des prélèvements automatisés au moyen d'échantillonneurs asservis au temps avec déclenchement initial manuel. On a également utilisé des échantillonneurs passifs qui permettent, à moindre coût, de réaliser des échantillons intégrés dans la nappe sur la période d'immersion de l'échantillonneur. Bien que semi-quantitative, cette information permet une analyse comparative, dans le temps ou l'espace, de la contamination de la nappe, substance par substance (en l'absence d'un calibrage, il n'est en revanche pas possible de remonter à une concentration dans l'eau ni de comparer les substances entre elles, ces dernières présentant des affinités différentes pour la phase réceptrice de l'échantillonneur).

Les prélèvements manuels ayant pour but d'évaluer un niveau de contamination global de la nappe d'amont en aval de la bande enherbée sont précédés d'une vidange complète de chaque piézomètre. Le prélèvement s'effectue seulement une fois que le niveau d'eau est quasiment rétabli et en se positionnant en milieu de crépine, au moyen d'un tube en téflon relié à une pompe (à main ou automatique à vide). Une analyse complète est réalisée sur ces échantillons (analyse au Laboratoire de la Drôme).

Les prélèvements manuels ou automatiques ayant pour objectif de mieux cerner la dynamique temporelle des transferts en lien avec l'occurrence des événements pluvieux sont effectués à différentes profondeurs et sans vidange préalable, mais toujours en regard d'une surface de tube crépinée. On privilégie ici l'analyse de substances ciblées dans un objectif de compréhension des processus (analyse au LAMA) mais on a également réalisé ponctuellement des analyses complètes sur certains échantillons dans un objectif de diagnostic plus large des substances en jeu.

Les échantillonneurs passifs utilisés sont des tiges en silicone (TS) placées au sein de certains piézomètres à des profondeurs différentes afin d'évaluer de manière plus intégrée le gradient amont-aval et selon la profondeur de la contamination de la nappe par les pesticides. Ces échantillonneurs sont exposés dans le milieu durant une semaine maximum et renouvelés si besoin pour un suivi sur plusieurs semaines (Martin et al., 2015).

c. Stratégie de suivi mise en œuvre

Deux types d'approche de terrain ont été mis en œuvre pour mieux cerner le fonctionnement de la nappe de versant, son niveau de contamination et la capacité épuratoire de la prairie sus-jacente :

- 1) le recours à des suivis en conditions naturelles pour estimer le niveau de contamination globale de la nappe dans le temps et l'espace ainsi que sa réactivité vis-à-vis des événements pluvieux. Ce suivi est mené en l'absence d'infiltration massive de ruissellements concentrés au sein de la zone d'étude, en privilégiant une analyse complète,

2) le recours à des expérimentations de traçage (traceurs ioniques et produits phytosanitaires ciblés, non utilisés par le viticulteur) afin :

- de mieux cerner les sens de circulation dans la nappe, la variabilité spatio-temporelle des transferts et les possibilités d'atténuation des concentrations d'amont en aval,
- d'évaluer l'effet d'une infiltration massive dans la placette enherbée, notamment en termes de contamination possible de la nappe sous-jacente.

Suivis en conditions naturelles

- Une première série de mesures manuelles au sein de tous les piézomètres, avec vidange préalable, a été réalisée en mars et août 2012, février 2013, mai 2014 et mai 2015. Une analyse complète a été réalisée à chaque fois afin de diagnostiquer l'état de contamination de la nappe dans le temps et dans l'espace.

- En 2015, a été réalisé un suivi plus spécifique de la dynamique de contamination en période d'événements pluvieux occasionnant une réponse hydrodynamique suffisante de la nappe (montée supérieure à 10 cm en quelques jours). Le transect BE1/BE2/BE6 a été retenu pour cette étude car identifié comme « connecté ». Au niveau du piézomètre BE2, on a eu recours à un préleveur automatique pour échantillonner finement, (pas de temps de 6 à 18h), la montée et la descente piézométrique en surface de la nappe (orifice de prélèvement placé à moins de 20 cm de profondeur) et sans vidange préalable du piézomètre. Des échantillonneurs passifs ont également été placés au sein des piézomètres BE1, BE1P, BE2, BE2P et BE6 au cours de 4 périodes d'exposition de 5 à 7 jours consécutifs (annexe 12) (thèse Alexis Martin en cours, Irstea). Une mise en place « en surface » (TS maintenue à moins de 20 cm sous le toit de la nappe à l'aide d'un flotteur dans BE1 Surface, BE2 Surface et BE6) et « en profondeur » (TS fixe à 595 cm sous la surface du sol dans le BE1P et à 340 cm sous la surface du sol dans le BE2P) a été réalisée. La pluviométrie ainsi que la limnimétrie (manuelle sur BE1, BE1P, BE2 et automatique par divers sur BE2P et BE6) sont réalisées sur la durée du suivi chimique. Le protocole précis de ce suivi est donné en annexe 11.

Au cours de ce suivi, 11 substances ont été recherchées dans les échantillons d'eau (le chlorpyrifos E, le chlorpyrifos M, le diuron, le DCPMU (produit de dégradation du diuron), le fénitrothion, le flufénoxuron, la flumioxazine, le norflurazon, le norflurazon desmethyl (produit de dégradation du norflurazon), la procymidone et la spiroxamine) et 28 ont été recherchées sur les échantillonneurs passifs (acetochlore, atrazine, azoxystrobine, boscalid, carbendazime, chlorfenvinphos, Chlorpyrifos Ethyl, le Chlorpyrifos Méthyl, chlortoluron, DCPMU, dichloroaniline, diflufénicanil, dimétomorphe, diuron, fénitrothion, flazasulfuron, flufénoxuron flumioxazine, immidacloprid, isoproturon, linuron, métolachlore, norflurazon, norflurazon desmethyl, procymidone, simazine, spiroxamine et tébuconazole). Une analyse complète a été réalisée sur deux échantillons d'eau prélevés manuellement (sans vidange des piézomètres) à 20 cm sous le toit de la nappe dans le BE2 et à 145 cm sous le toit de la nappe dans le BE2P, le 5 mai 2015.

Traçages mis en œuvre

Deux grands types d'expérimentation de traçage ont été mis en œuvre pour répondre aux deux objectifs du point 2) mentionné ci-dessus :

- un traçage par introduction de substances chimiques non réactives (KI ou NaBr) directement dans la zone saturée en amont de la bande enherbée (injection ponctuelle et instantanée au sein des

piézomètres BE1P et BE4P) et suivi, sur les semaines suivantes, de l'évolution dans le temps et l'espace de leur niveau de présence au sein des piézomètres en aval ; ce, en distinguant plusieurs profondeurs d'échantillonnage, afin d'évaluer la variabilité verticale des concentrations. Deux traçages de ce type ont été réalisés, aux printemps 2012 et 2013 (Druguet, 2012 ; Sarr, 2013) ce qui a permis de prendre en compte l'influence de la pluviométrie, ces deux années ayant été très différentes sur la période d'étude.

- un traçage par introduction des substances chimiques (KBr et une gamme de substances phytosanitaires jamais utilisées par le viticulteur) dans un ruissellement de surface artificiel réparti sur la largeur amont de la placette enherbée étudiée avec suivi du ruissellement en aval, de la percolation dans le sol à 50 cm de profondeur (lysimètres) et dans la nappe sous-jacente (piézomètres). Cette expérimentation a eu lieu en mai 2014, en reprenant le principe des expérimentations similaires menées par Lacas, 2005 et Boivin, 2007. Le protocole précis mis en œuvre est donné en annexe 13. L'épisode simulé est un épisode extrême de période de retour bisannuelle (Figure 56), avec des niveaux de concentration en produits phytosanitaires élevés (150 à 250 µg/L) (ces valeurs initiales dans le ruissellement sont du même ordre de grandeur que les valeurs maximales observées pour les deux substances vigne sur le terrain en sortie de parcelle) ; ce afin de minimiser les difficultés analytiques, notamment dans la nappe. Les substances phytosanitaires utilisées sont deux fongicides de la vigne (diméthomorphe et tébuconazole) et un herbicide du blé (isoproturon) auquel on a recours compte tenu de sa mobilité connue. Cela a permis de disposer d'une gamme de propriétés physicochimiques (Tableau 2). On a recours à un échantillonnage manuel ou automatique, ainsi qu'à des échantillonneurs passifs (Liger et al., 2015) (thèse Alexis Martin en cours, Irstea).

Tableau 2. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires étudiées au cours de l'événement artificiel de ruissellement (mai 2014). Site de St Joseph.

Molécule	Abréviation	Usage	Solubilité (mg/L)	log Kow	Koc (mL/g)	DT50/eau (j) hydrolyse	DT50/sol (j)	Concentration initiale
Tébuconazole	TBZ	F	36	3,7	769	stable	63	147 µg/L
Diméthomorphe	DMM	F	29	2,68	348	70	57	227 µg/L
Isoproturon	IPU	H	70,2	2,5	122	1560	12	205 µg/L
Bromure	Br	-	119 000	-	-	-	-	807 mg/L

source : base Footprint

Spécifications analytiques :

Filtration 0.7 µm uniquement des échantillons présentant une turbidité visible (fibre de verre),

Pesticides : Extraction Phase Solide ou injection directe selon le niveau de concentration,

HPLC-MS/MS.

Bromures : chromatographie ionique (ICS 1500 Thermo scientific).

3. Présentation du site de Ruyère (S2)

a. Description générale

Ce site se situe sur le versant rive droite de la Morcille, au lieu-dit de « Ruyère » (annexe 3), au sein de l'Unité Cartographique de Sol numéro 2 (Figure 2), caractérisée par la présence d'une rupture texturale de perméabilité du sol à faible profondeur (moins d'1 m). Il est positionné dans la rupture de pente faisant suite au plateau et se caractérise par des pentes fortes : de 10 à 35% (moyenne 20%) sur les 100 m (longueur) par 60 m (largeur) de la zone d'étude (Figure 10). Le versant considéré est essentiellement occupé par une parcelle de vigne, exploitée par M. Patrick Bouland. Cette vigne est ancienne, taillée en gobelets (inter-rangs inférieurs à 80 cm) et conduite traditionnellement. Elle est entièrement désherbée et marquée par la présence de rases environ tous les 10 m pour lutter contre l'érosion, pratique fréquemment rencontrée sur les parcelles de vignes pentues du Beaujolais de coteaux, comme déjà évoqué précédemment.

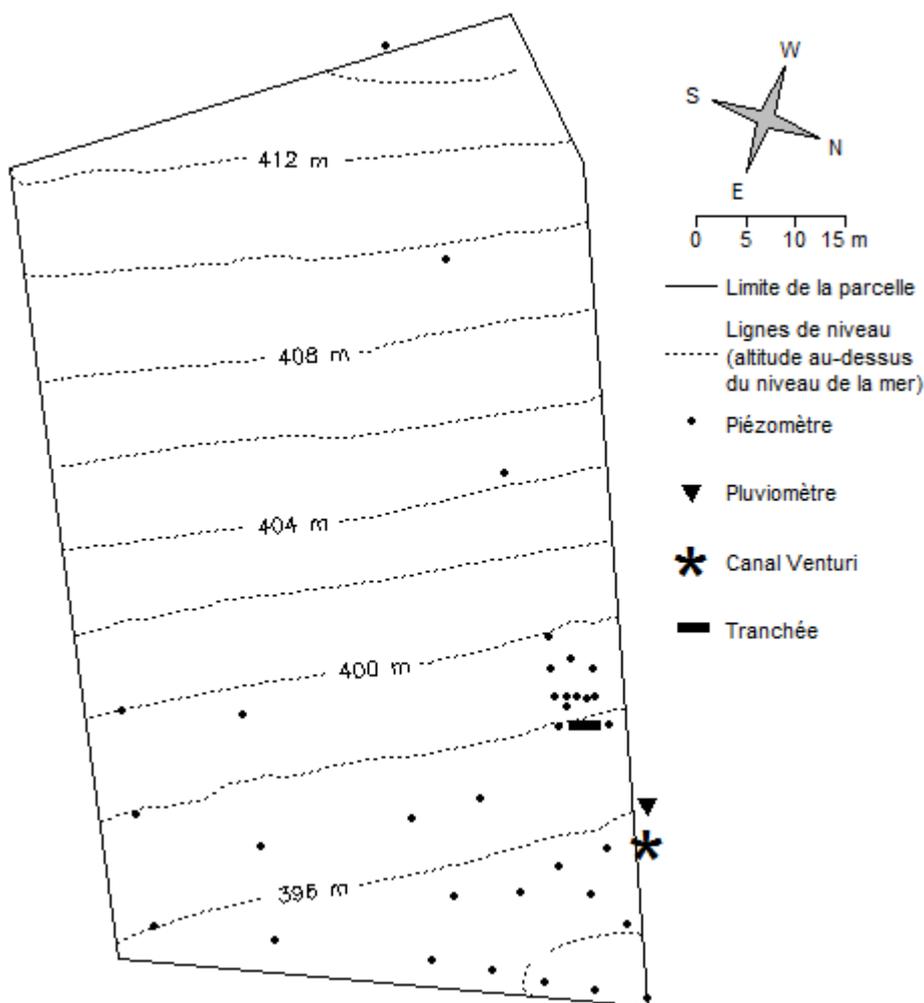


Figure 10. Délimitation de la zone d'étude et position des principales instrumentations (pluviomètres, piézomètres, et tranchée expérimentale pour le suivi des écoulements latéraux dans le sol et canal venturi pour le suivi du ruissellement. Site de Ruyère.

La figure ci-dessous présente un profil de sol avec les différents horizons rencontrés.

- Horizon 1

Possède une texture limono-sableuse et est riche en matière organique. Cet horizon est d'environ 5 à 10 cm d'épaisseur. Différentiable par sa couleur foncée

- Horizon 2

Avec une texture proche de l'horizon 1 mais plus pauvre en matière organique, il mesure entre 25 et 50 cm d'épaisseur

- Horizon 3

Il constitue une barrière à l'écoulement vertical de l'eau en raison de sa texture plus argileuse, provoquant une rupture de perméabilité avec l'horizon 2 sus-jacent. Son épaisseur peut aller jusqu'à 150 cm.

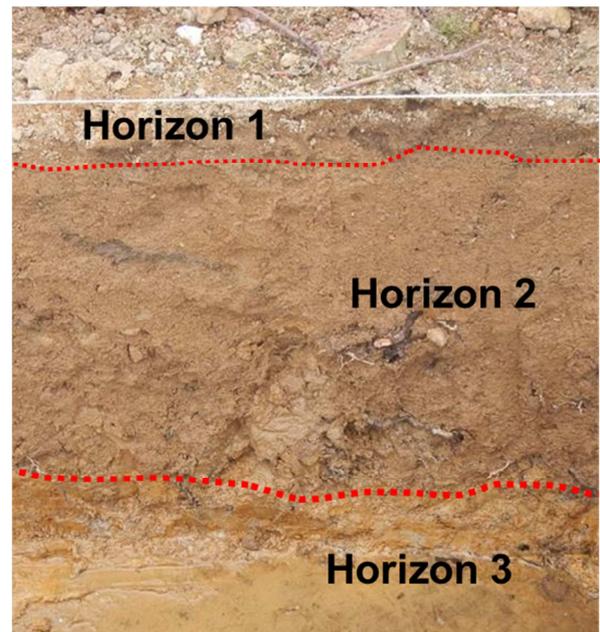


Figure 11. Description succincte des différents horizons du sol du site de Ruyère.

Le Tableau 3 donne les principales caractéristiques du sol de ce site : il est relativement pauvre en matière organique et on observe bien un enrichissement en argile avec la profondeur. Des mesures de conductivité hydraulique à saturation (K_s) ont été réalisées avec la profondeur par infiltrométrie, complétées par des mesures au double anneau de Müntz (Smith and Mullins, 1991) pour mieux caractériser la contribution des macropores. Ces mesures montrent bien que K_s peut être deux ordres de grandeur plus faible dans la couche la plus argileuse comparée au sol sus-jacent.

Des mesures piézométriques visant à mieux caractériser la pertinence du site pour suivre les écoulements latéraux, ont mis en évidence la présence d'une nappe perchée temporaire, située dans la partie aval de la zone d'étude (Figure 10, correspond à la zone dont l'altitude est inférieure à 394 m NGF). En revanche, plus en amont, c'est essentiellement une saturation très transitoire, en lien avec les épisodes pluvieux, qui a été observée, au niveau du changement de texture du sol. Ces observations rendent bien compte de l'existence d'écoulements latéraux dans le sol à faible profondeur (la Figure 11 permet de visualiser ces écoulements en bas de profil). L'étude de ces processus et de leur potentiel à transférer les substances phytosanitaires a fait l'objet de la thèse de Xavier Peyrard (Peyrard, 2016).

Tableau 3. Textures, teneurs en matière organique, porosités et conductivités hydrauliques à saturation (K_s) de l'horizon de surface et de l'horizon sous-jacent plus argileux du site de Ruyère, (quand mentionné, n représente le nombre de mesures considérées pour réaliser la moyenne).

		Horizon 2	Horizon 3
Texture	Sable	63 %	45 %
	Limon	25 %	35 %
	Argile	12 %	20 %
Texture (FAO)		Sable limoneux	Limons sablo-argileux
Matière organique		< 1 %	< 1 %
Porosité (Std.), n = 3		0.41 (0.035)	0.36 (0.009)
K _s moyenne (min – max)	Infiltromètre à membrane	$1.06 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ $(6.27 \times 10^{-7} - 2.22 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1})$ n = 6	$2.07 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ $(4.31 \times 10^{-8} - 1.04 \times 10^{-6})$ n = 7
K _s moyenne (min – max)	Double anneau de Müntz	$4.33 \times 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ $(7.07 \times 10^{-6} - 2.31 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1})$ n = 4	$4.59 \times 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ $(3.09 \times 10^{-8} - 6.81 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1})$ n = 2

b. Instrumentation

Équipement visant à suivre les écoulements latéraux dans le sol :

En 2012, dix-huit mini-piézomètres (tube PVC de 4 cm de diamètre et 1 m de hauteur, crépinés sur les 20 derniers centimètres) ont été installés juste à la limite entre l'horizon sableux et l'horizon sous-jacent plus argileux (Figure 10). L'ajout de bentonite autour des piézomètres minimise le risque d'infiltration directe d'eau de ruissellement. Six piézomètres ont été équipés de sondes automatiques permettant des mesures en continu. Les autres ont été suivis manuellement, notamment après les pluies.

En mars 2014, une tranchée (Figure 10) a été installée dans l'objectif d'accéder à la mesure des flux d'eau et de substances phytosanitaires entraînés dans les écoulements de sub-surface générés au niveau de la couche de sol plus argileuse (Figure 12). Cette tranchée mesure 3 m de long, 0.6 m de large et 0.8 m de profondeur (la couche plus argileuse ayant été rencontrée entre 0.5 et 0.6 m de profondeur au niveau de la tranchée). Dans l'équipement de la tranchée, on a veillé à ce que, dans la mesure du possible, tous les matériaux amenés à être en contact avec les substances phytosanitaires mesurées présentent un faible potentiel d'adsorption, à un coût acceptable.

Afin de retenir le sol en place, la face amont de la tranchée est équipée d'un grillage fin en fibres de verre (maillage millimétrique) lui-même maintenu par une tôle perforée rigide, en acier (maillage centimétrique). Un système de gouttières en zinc, placées sous la limite de rupture de texture du sol et disposées en V, permet de collecter les écoulements de sub-surface générés sur la couche plus argileuse. Un siphon a été installé juste sous la jonction centrale (PVC) des deux gouttières afin de disposer d'un volume minimal suffisant à l'échantillonnage puis l'analyse des pesticides dans l'eau

(0.5 L). L'écoulement est dirigé (via un tube en PTFE) vers un débitmètre à augets basculeurs (0.1L par auget et débit maximum mesurable de 300 L.h⁻¹) relié à une centrale d'acquisition permettant d'enregistrer les mesures de débit en continu (CR800, Campbell Scientific). L'eau est finalement évacuée en aval par gravité grâce à un tuyau enterré. Les côtés et la face aval de la tranchée sont consolidés grâce par une armature en bois. Au final, la tranchée est entièrement recouverte par une plaque d'acier afin d'éviter l'entrée de l'eau de pluie et pour permettre le passage du tracteur (Figure 15). Juste en amont de la tranchée, un dispositif a été mis en place pour éviter l'entrée de l'eau de ruissellement dans la tranchée (bordurettes plastiques dans un premier temps remplacées par une bordure en béton avec évacuation de l'eau sur les côtés de la tranchée).

L'eau de sub-surface est collectée au niveau du siphon, grâce à un échantillonneur automatique asservi au volume passé. Selon la configuration utilisée, il dispose de 24 flacons verre de 350 mL pour les échantillons instantanés ou d'un flacon totalisateur en verre de 10 L pour les échantillons cumulés. Ce dispositif n'est pas réfrigéré mais isolé thermiquement et rechargé régulièrement en pains de glace pour maintenir les échantillons au frais jusqu'à leur récupération pour transport au laboratoire. Cette dernière a lieu rapidement après chaque événement pluvieux, dont l'occurrence est connue à distance grâce à une connexion par modem.

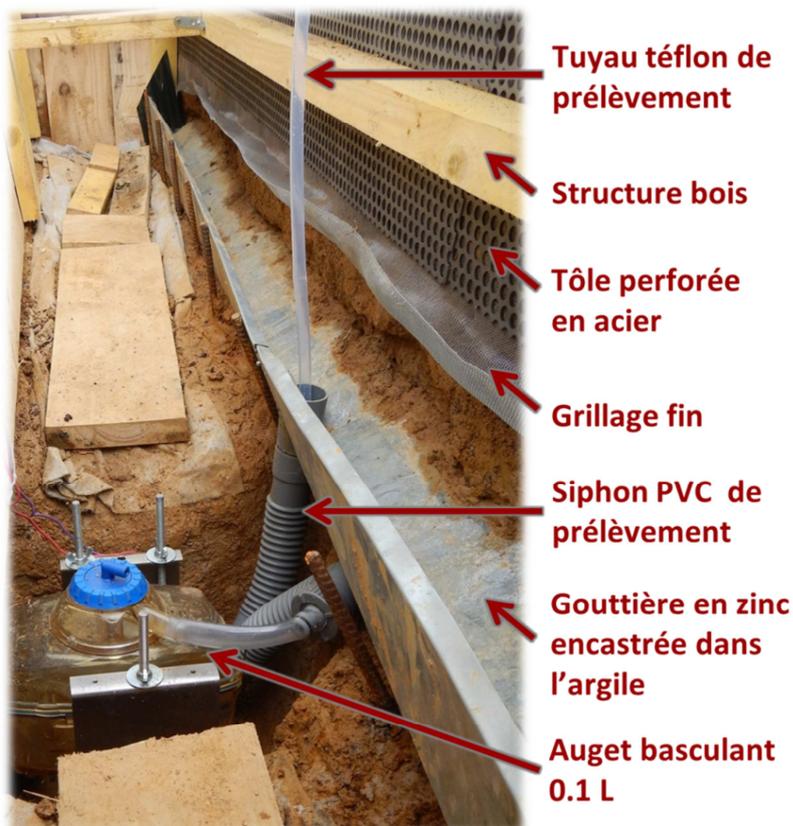


Figure 12. Photo de l'intérieur de la tranchée mise en place et de l'équipement associé pour la mesure et la collecte des écoulements de sub-surface sur le site de Ruyère.

Equipement visant à suivre le ruissellement de surface :

Le choix d'une collecte partielle du ruissellement de l'ensemble de la zone d'étude a semblé le plus adapté puisqu'il permet un compromis entre 1 – la représentativité de la zone collectée par rapport à la parcelle et 2 – la faisabilité technique de la mise en œuvre. L'implantation choisie (Figure 10 et Figure 16) permet de capter le ruissellement de la zone sud ainsi que de la zone nord-est, ce qui correspond à environ 2600 m², c'est-à-dire la moitié de la parcelle de vigne.

Afin de mesurer le débit de ruissellement, un canal venturi (gamme de mesure allant de 0.5 à 9.3 L/s) a été mis en place et équipé d'une sonde de pression de type bulle-à-bulle reliée à une centrale d'acquisition. Afin d'éviter le dépôt de sédiments (zones relativement soumises à l'érosion) au sein du canal venturi, une zone de décantation a été creusée en amont permettant de stocker jusqu'à 100 L. Les dépôts sont déblayés le plus rapidement possible après les événements érosifs. Le ruissellement est échantillonné au niveau du canal venturi au moyen d'un échantillonneur automatique permettant des échantillonnages fractionnés ou cumulés en fonction du volume passé. Comme pour les échantillons de sub-surface, ce dispositif n'est pas réfrigéré mais isolé thermiquement et rechargé régulièrement en pains de glace pour maintenir les échantillons au frais jusqu'à leur récupération.

Equipement pour le suivi pluviométrique :

Les précipitations sont mesurées sur le site au moyen d'un pluviomètre à augets basculeurs relié à la centrale d'acquisition CR800.

Isolation hydraulique :

La zone d'étude présente l'intérêt d'être relativement isolée hydrauliquement : à sa limite ouest, le ruissellement susceptible de provenir des parcelles en amont, est récupéré et redirigé en aval par des buses. Par ailleurs, du fait de la présence d'un talus sur la limite amont de la zone d'étude, les écoulements de sub-surface en provenance des parcelles en amont du site d'étude sont a priori exfiltrés à la base de ce talus et évacués de la même façon que le ruissellement. De fait, les premiers suivis piézométriques dans la zone d'étude (2013-2014) ont montré qu'il n'y avait quasiment jamais de saturation du sol en limite amont. Les limites nord et sud n'ont pas été isolées physiquement dans la mesure où les lignes de courant, estimées grâce aux mesures de niveaux au moyen du réseau de piézomètres mis en place, ont montré un gradient principal dans le sens de la pente de surface du sol.

La Figure 13 et la Figure 14 récapitulent les équipements mis en place sur le site de Ruyère afin de suivre les écoulements d'eau et de produits phytosanitaires en surface et en sub-surface.



Figure 13. Dispositif de mesure et de collecte du ruissellement (au centre), bloc contenant la centrale d'acquisition des données et pluviomètre (second plan à droite) et aperçu du préleveur affecté à la collecte de l'eau de subsurface (au fond) sur le site de Ruyère.

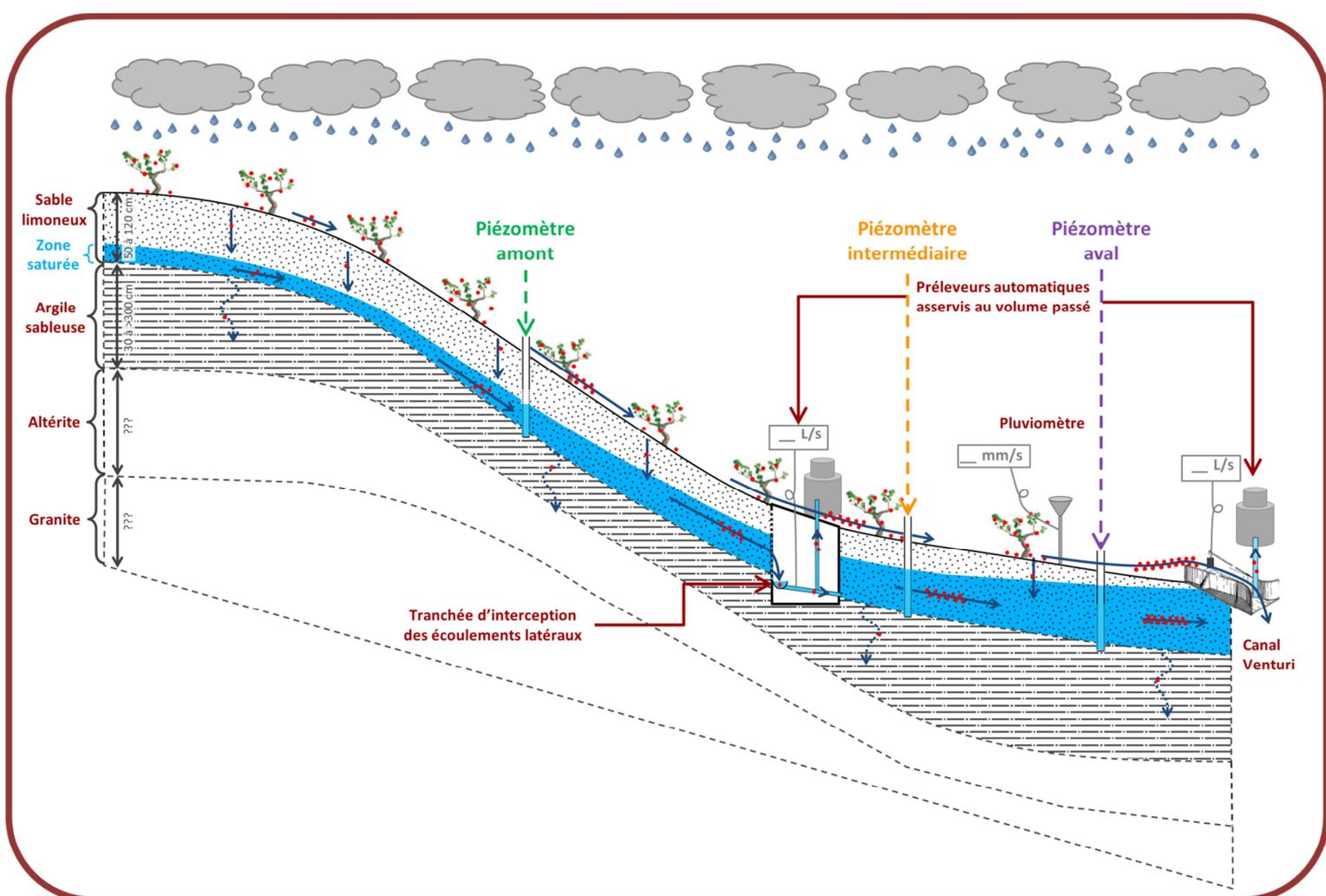


Figure 14. Schéma représentant l'instrumentation du versant de Ruyère selon un axe ouest-est (piézomètres, tranchée, canal venturi et préleveurs automatiques associés).

Estimation des surfaces contributives :

- aux écoulements de sub-surface dans la tranchée :

Pour pouvoir ramener les flux observés dans la tranchée à une surface traitée en amont, il est nécessaire de cerner la zone contributive aux écoulements latéraux collectés dans la tranchée. Cette estimation est forcément entachée d'incertitudes dans la mesure où on ne connaît pas précisément les hétérogénéités du sous-sol ni la surface de la zone contributive potentielle, effectivement sollicitée dans la genèse des écoulements latéraux ; cette dernière variant probablement aussi en fonction des pluies et de l'humidité initiale du sol. On se limite donc à l'estimation d'une surface contributive potentielle en considérant les caractéristiques connues de la zone d'étude.

Ainsi, considérant l'isolation hydraulique amont de la zone, et la régularité du gradient hydraulique mesuré en amont de la tranchée (d'ouest en est), on peut estimer que la tranchée intercepte approximativement une surface amont de la parcelle de 3 m de large et 75 m de long soient environ 225 m² (Figure 15).

- aux écoulements de surface dans le canal venturi :

Comme déjà précisé plus haut, l'implantation du canal venturi (Figure 16) permet de capter le ruissellement de la zone sud ainsi que de la zone nord-est de la parcelle de vigne, ce qui correspond à environ 2600 m².

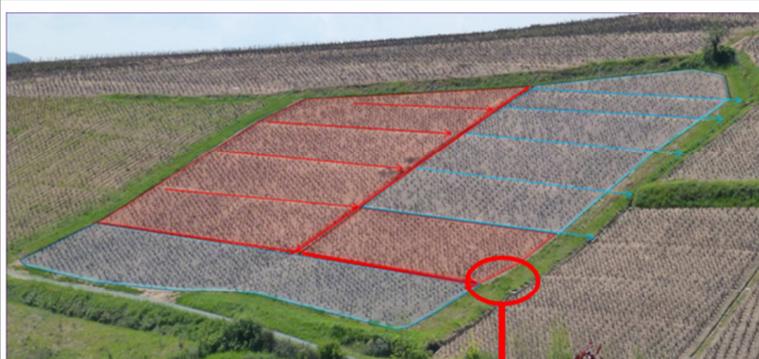


Figure 15. Délimitation de la surface (en bleuté) contribuant aux écoulements de sub-surface interceptés par la tranchée sur le versant du site de Ruyère (en haut) et vue sur le toit de tranchée et le préleveur automatique (en bas).

Figure 16. Délimitation de la surface (en rouge) contribuant au ruissellement mesuré sur le versant du site de Ruyère (en haut) et vue du canal venturi (en bas).

c. Stratégie de suivi mise en œuvre

Comme sur le site de Saint Joseph, deux types d'approche de terrain ont été mis en œuvre pour mieux cerner les écoulements de surface et de sub-surface :

- 1) Le recours à un suivi en conditions naturelles (respectivement au sein du canal venturi et au sein de la fosse), afin d'acquérir des informations sur la dynamique temporelle de ces écoulements et sur le transfert de pesticides associé,
- 2) Le recours à une expérimentation de traçage en amont de la tranchée, afin de mieux identifier les temps de transferts et la capacité de rétention et de transfert des pesticides dans la zone saturée.

Suivi en conditions naturelles :

Le protocole complet est décrit dans l'article Peyrard et al., 2015-a. L'échantillonnage est déclenché automatiquement en fonction du volume passé : tous les 15 à 30 L pour la sub-surface et tous les 300 à 500 L pour le ruissellement.

Le débit de sub-surface est calculé au pas de temps horaire grâce à une moyenne glissante de 3h.

Le suivi s'est focalisé sur les principales substances utilisées par le viticulteur analysables en routine au laboratoire d'Irstea et effectivement retrouvées dans les eaux de surface et de sub-surface lors de mesures préliminaires (Tableau 4).

Tableau 4. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires suivies en conditions naturelles ou lors de l'expérimentation de traçage sur le site de Ruyère.

	Koc ¹ (mL.g ⁻¹)	Solubilité ¹ (mg.L ⁻¹)	DT50/sol ¹ (j)	DT50/eau ¹ hydrolyse (j)	Période d'application terrain
Chlorpyriphos méthyl	4645	2.74	3	21	Mai-Juillet
Diméthomorphe	348	29	57	70	Juin
Flumioxazine	889	0,79	22	1	Mars
Spiroxamine	14567 (Kfoc, 1/n = 0.821)	405	25	Stable	Juin
Tébuconazole	769	36	63	Stable	Mai-juin

¹ source : base Footprint

Expérimentation de traçage :

Le protocole complet est décrit dans l'article Peyrard et al. 2015-b. On en retient ici les principales caractéristiques. L'expérience consiste en l'apport d'une solution de substances phytosanitaires et de traceur directement dans la zone saturée quelques mètres en amont de la fosse d'interception présentée plus haut, afin de suivre la propagation des solutés au sein des écoulements latéraux. Pour ne pas interférer avec le suivi en conditions naturelles et pour se placer dans une situation propice à la présence soutenue et suffisamment stable des écoulements latéraux étudiés, l'expérimentation a été mise en œuvre au mois de novembre 2014 et le suivi a duré jusqu'en avril 2015.

Afin de suivre au mieux les transferts latéraux au cours de ce traçage, l'instrumentation du site a été complétée par (Figure 17 et Figure 18) :

- 1) l'installation d'une fosse d'injection d'un mètre de longueur (perpendiculairement à la pente), 40 cm de profondeur (jusqu'à la limite de l'horizon 3) et 20 cm de largeur, mise en place environ 5,5 m en amont de la tranchée d'interception. Les faces amont et aval de la fosse d'injection sont équipées d'une toile en fibre de verre soutenue par une tôle perforée rigide (système identique à celui de la tranchée d'interception).
- 2) L'installation de piézomètres complémentaires à mi-distance entre les deux tranchées et de part et d'autre de la tranchée d'injection et de la tranchée d'interception afin de suivre la dispersion latérale du panache.

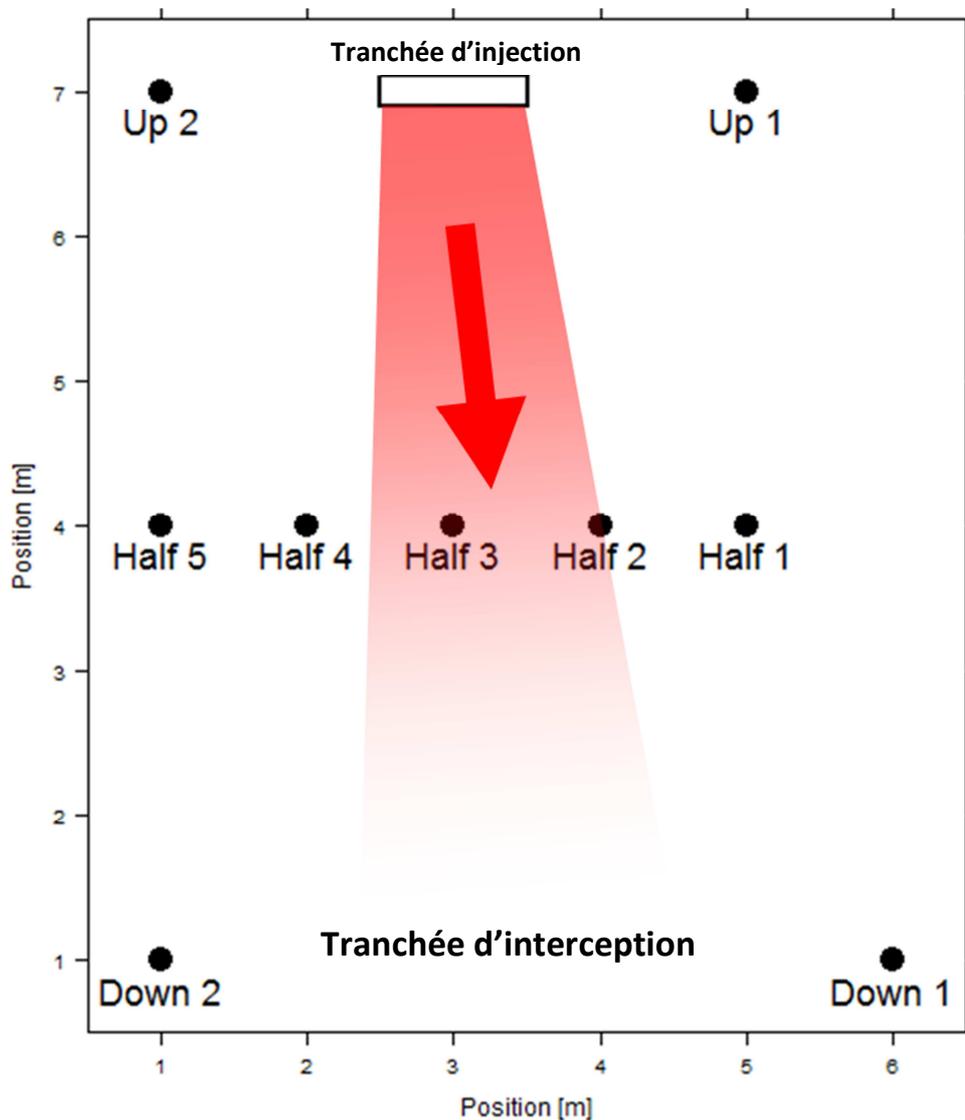


Figure 17. Schéma de positionnement des tranchées d'injection et d'interception ainsi que des piézomètres pour le suivi du panache des solutés injectés dans la tranchée d'injection au niveau de la zone saturée. Site de Ruyère.

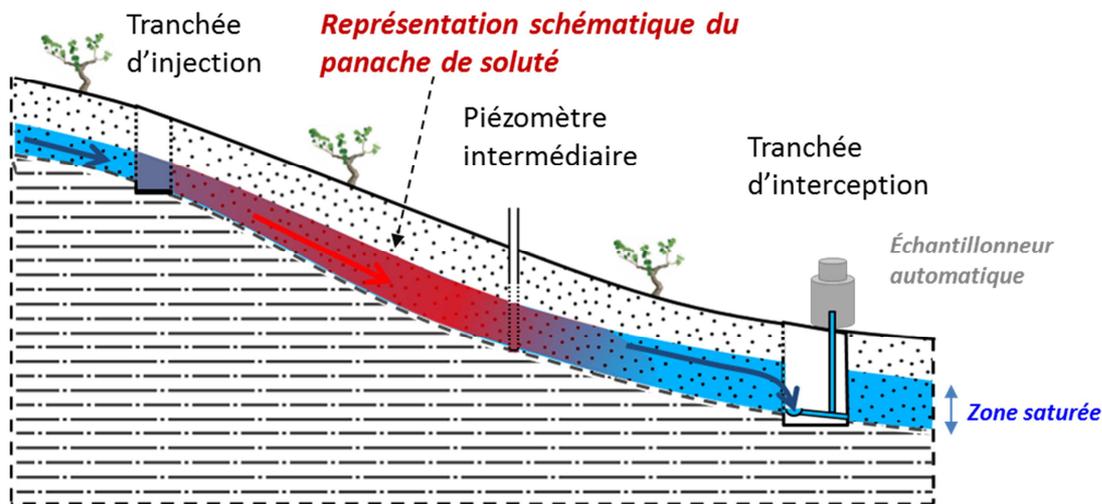


Figure 18. Vue transversale du versant étudié entre tranchée d'injection et tranchée d'interception avec représentation schématique du transfert du panache de soluté. Site de Ruyère.

Pour la réalisation de cette expérience, on a eu recours à une gamme de substances en considérant les critères suivants : interférer le moins possible avec le suivi en conditions naturelles et choisir des substances différenciées du point de vue de leurs propriétés d'adsorption. Au final, les substances retenues sont le chlorpyrifos méthyl, la flumioxazine (tous les deux utilisés par le viticulteur et suivis en conditions naturelles mais présentant une faible demi-vie), l'azoxystrobine (produit vigne non utilisé par le viticulteur), le chlortoluron et le linuron (non utilisés en viticulture) (Tableau 4 et Tableau 5). La réalisation d'échantillons d'eau dans la tranchée d'interception avant le lancement de l'expérimentation a confirmé que ces substances étaient soit non détectées soit en concentration négligeable par rapport aux concentrations attendues au cours du traçage. En complément, on a eu recours à un traceur ionique supposé non interactif avec le milieu : les ions bromures⁴. Le Tableau 6 indique les concentrations initiales de la solution injectée dans la tranchée. Le volume de solution injecté était faible comparativement au volume d'eau déjà présent dans la tranchée du fait de la saturation naturelle du sol (7 L au total injectés pour 100L déjà présents initialement). On a pris soin de bien mélanger la solution injectée au sein de la fosse d'injection.

Tableau 5. Propriétés physicochimiques des autres substances phytosanitaires suivies lors de l'expérimentation de traçage sur le site de Ruyère.

	Koc ¹ (mL.g ⁻¹)	Solubilité ¹ (mg.L ⁻¹)	DT50/sol ¹ (j)	DT50/eau ¹ hydrolyse (j)
Azoxystrobine	589	6,7	78	Stable
Chlortoluron	196	74	45	Stable
Linuron	739	63,8	48	Stable

¹ source : base Footprint

⁴ Des essais préalables de toxicité des ions bromures et iodures ont été effectués en parcelle de vigne qui ont orienté le choix vers les bromures (Dutremble, 2014-b).

Tableau 6. Concentrations en substances phytosanitaires et bromure de la solution d'injection. Site de Ruyère.

	Bromure	Chlortoluron	Azoxystrobin	Flumioxazine	Linuron	Chlorpyrifos -méthyl
Concentrations d'injection Phytosanitaires [$\mu\text{g.L}^{-1}$]	18,5	1300	900	410	760	500
Bromure [g.L^{-1}]						
Produits phytosanitaires		Tolurgan 50 SC	Amistar	Pledge	Analytical standard	Reldan 2M

En termes de techniques et stratégies d'échantillonnage, on a eu recours à des prélèvements manuels d'eau au sein de la tranchée d'injection et au sein des piézomètres avant et tout au long des premières semaines de l'expérimentation de traçage. Afin de disposer d'un suivi fin dans la tranchée d'interception, un échantillonnage automatique a été mis en œuvre. Enfin, des échantillonneurs passifs ont été mis en place au sein des piézomètres et de la tranchée d'interception afin d'évaluer en quelle mesure ils peuvent rendre compte d'une variation spatiale de la contamination au cours de la première semaine de suivi du traçage (thèse Alexis Martin en cours, Irstea).

La stratégie d'échantillonnage manuelle a consisté en un suivi à pas de temps fin (toutes les 2 h) juste après le lancement du traçage pour ne pas rater de possibles écoulements préférentiels. Puis Les pas de temps ont été adaptés en fonction des résultats de mesure de conductivité rendant compte de la progression du panache de bromure. Le préleveur automatique collectant l'eau de la tranchée d'interception a initialement été asservi au temps pour réaliser des échantillons rapprochés susceptibles de capter de possibles écoulements préférentiels à ce niveau. Puis après 15 jours, il a été asservi au débit pendant 2 semaines avant de passer à un échantillonnage cumulé pendant trois semaines. La durée totale du suivi a été de 6 mois pour rendre compte des transferts à plus long terme.

Mesures complémentaires des coefficients d'adsorption :

Compte tenu de la grande dépendance des coefficients d'adsorption des substances vis-à-vis des conditions locales de sol, des mesures spécifiques ont été réalisées pour les substances suivies sur le sol de la parcelle de Ruyère en distinguant les trois horizons mentionnés plus haut (Figure 11). Les résultats sont présentés dans le Tableau 7 (Gimenez, 2015).

Tableau 7 : Valeurs des K_{oc} en fonction des sols pour chaque pesticide. Site de Ruyère.

K _{oc} (ml/g)	Spiroxamine	Linuron	Diméthomorphe	Tébuconazole	Azoxystrobine	Chlorpyrifos M	Chlortoluron
Horizon 1	553	250	232	1524	304	2021	60
horizon 2	1920	222	295	1319	198	928	87
horizon 3	15360	183	968	413	312	327	85

Le calcul n'a pas été possible pour la flumioxazine en raison de sa dégradation rapide lors de l'analyse.

Spécifications analytiques :

Filtration 0.7 μm pour les analyses de phytosanitaires et 0,45 μm pour les bromures (fibre de verre),
Extraction Phase Solide ou injection directe selon le niveau de concentration,
HPLC-MS/MS.

4. Présentation du site de Bellevue (S3)

a. Description générale

La parcelle expérimentale choisie pour l'étude de l'effet de l'enherbement sur les transferts des produits phytosanitaires, et notamment de fongicides, est située dans le bassin versant de la Morcille sur la commune de Villié-Morgon à proximité du château de Bellevue (annexe 3) et est gérée par M. Michel Cuzenard, pour le compte du château des Jacques. Les ceps de vignes ont été plantés au début des années 1990 et les inter-rangs (IR) sont tous enherbés depuis plus de 3 ans (Figure 19). Les rangs sont désherbés chimiquement au glyphosate. Les IR sont orientés dans le sens de la pente. Leurs principales caractéristiques sont données dans le Tableau 8.



Figure 19. Vue de la parcelle choisie pour l'étude du rôle de l'enherbement inter-rang sur le transfert des pesticides. Site de Bellevue.

Tableau 8. Principales caractéristiques des inter-rangs de la parcelle d'étude. Site de Bellevue.

Caractéristiques des Inter-Rangs étudiés	
Largeur des IR	1.40-1.50 m
Largeur de la zone enherbée	30-60 cm
Etat de la zone enherbée	Bon état (quelques rangs un peu moins homogènes)
Espacement entre les ceps de vigne	60 à 70 cm
Topographie	Pente moyenne (estimation de 5 à 10%)

On rappelle que ce site se situe dans l'Unité Cartographique de Sol numéro 1 (Unité Typologique de Sol 2) (Figure 1), le socle granitique altéré étant rencontré à environ 1 m de profondeur.

b. Instrumentation

Le dispositif expérimental a pour objectif de comparer les transferts de pesticides dans l'eau de ruissellement et dans l'eau de percolation selon deux modalités : un inter-rang enherbé (IRE) et un inter-rang désherbé (IRD). Dans ce sens, deux inter-rangs similaires ont été choisis. La parcelle expérimentale, bien que relativement homogène du point de vue de la nature du sol, la profondeur du socle et la pente, présente quelques différenciations spatiales dont on a essayé de s'affranchir. Ainsi, il a été décidé de placer la modalité désherbée dans l'IR qui présentait une pente légèrement plus faible. Ce choix est justifié par le fait que l'enherbement diminue a priori les phénomènes de ruissellement par la présence d'une couverture végétale. Ainsi une diminution de volume ruisselé dans la modalité enherbée ne pourra pas être attribuée à une plus faible pente mais bien à la présence de l'enherbement. De plus, l'IR correspondant à la modalité désherbée étant initialement enherbé, il a subi un désherbage chimique (glufosinate) régulier à partir de juillet 2013.

Les deux IR (24 m x 1.5 m) choisis ont été isolés hydrauliquement en surface sur toute leur longueur. Les eaux infiltrées sont récupérées à l'aide de plaques lysimétriques enfoncées latéralement dans le sol non déstructuré et celles ruisselées sont interceptées par l'intermédiaire d'une plaque de ruissellement installée en aval de chaque IR (Figure 20 et Figure 21) (annexes 16 et 17) (Irstea, 2013).

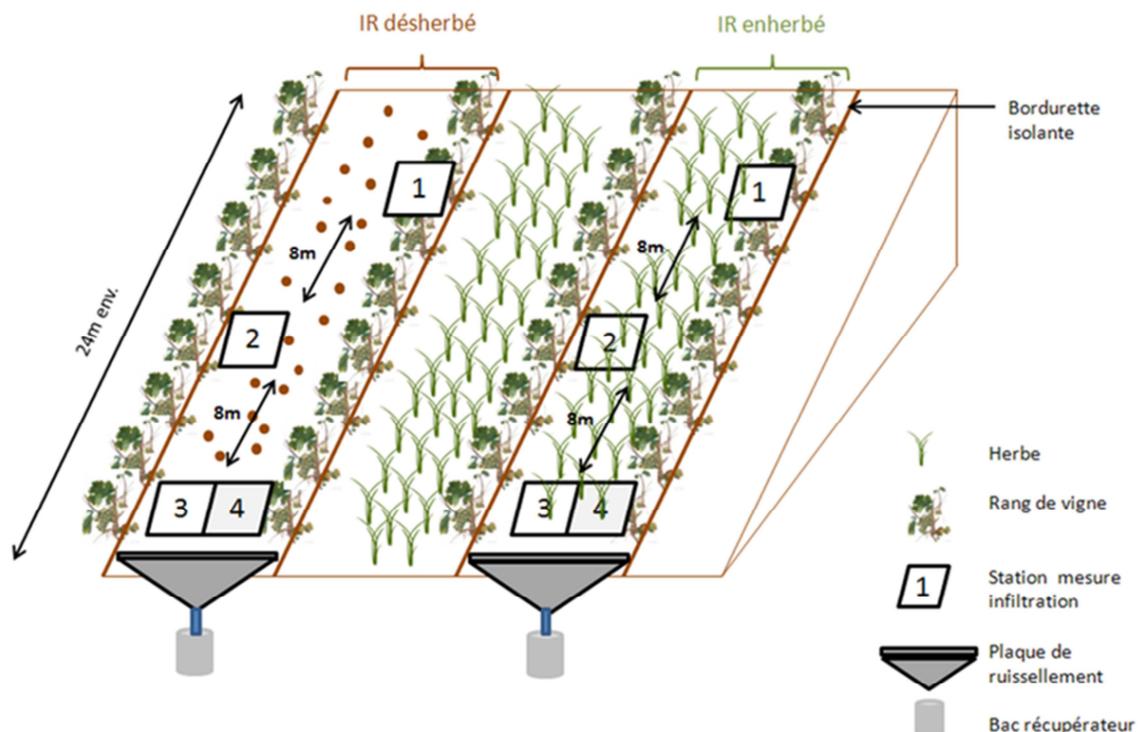


Figure 20. Dispositif mis en place sur le site de Bellevue : vue de dessus. Site de Bellevue.

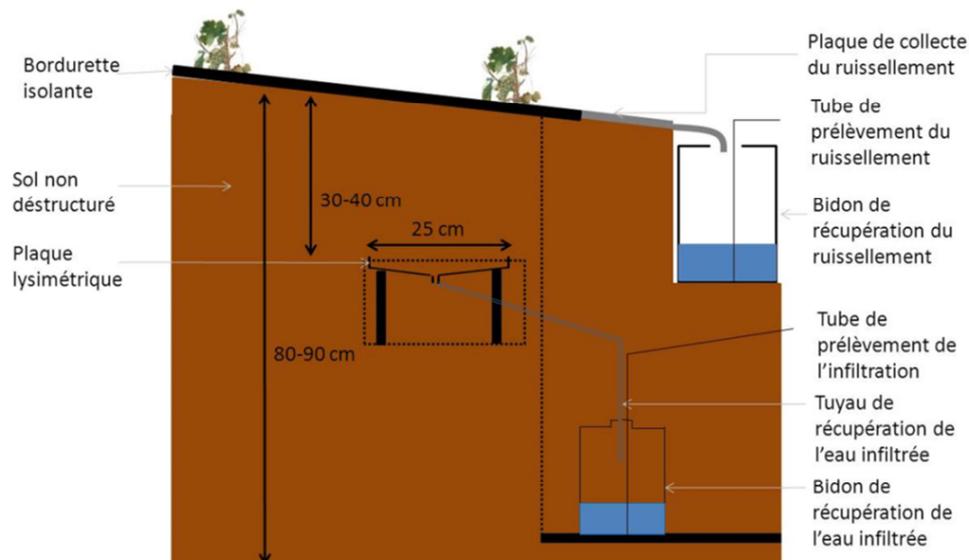


Figure 21. Schéma du dispositif de Bellevue : vue en coupe montrant les systèmes de collecte de l'eau de percolation (plaque lysimétrique) et du ruissellement en aval d'IR. Site de Bellevue.

c. Stratégie de suivi mise en œuvre

L'installation du dispositif a été finalisée en juillet 2013. Les suivis hydriques ont débuté en août 2013 par la mesure des cumuls d'eau ruisselés et infiltrés. Le suivi chimique a été ciblé en priorité sur la période de traitement de la vigne (mai à juillet) et sur les épisodes suscitant suffisamment d'écoulement pour être échantillonnés.

Une vingtaine de substances a été initialement recherchée et au final ce sont essentiellement le tébuconazole, le diméthomorphe, la spiroxamine et le chlorpyrifos méthyl qui ont été retenus ayant été quantifiés et présentant des propriétés physico-chimiques différenciées. Il s'agit respectivement de trois fongicides et d'un insecticide. Les propriétés de ces molécules sont données dans le Tableau 9.

Tableau 9. Propriétés physicochimiques des substances phytosanitaires suivies sur le site de Bellevue.

	Koc ¹ (mL.g-1)	Koc terrain (mL.g-1)	Solubilité ¹ (mg.L-1)	DT50/sol ¹ (jours)	DT50/eau ¹ (j) hydrolyse	Période d'application terrain
Chlorpyrifos méthyl	4645	2021	2.74	3	21	juillet
Diméthomorphe	348	232	29	57	70	juin
Spiroxamine	14567 (Kfoc, 1/n = 0.821)	553	405	25	Stable	juillet
Tébuconazole	769	1524	36	63	Stable	Mai-juin

¹ source : base Footprint

² valeurs mesurées dans l'horizon de surface du sol sur le site de Ruyère

Dans la mesure où dans cette étude, on réalise des échantillons cumulés sur une durée suffisante pour obtenir suffisamment d'eau à collecter pour l'analyse (a minima 500 mL), les résultats sont plutôt à interpréter en termes comparatifs entre une modalité et l'autre. En effet, bien que les substances retenues présentent une certaine stabilité dans l'eau (à l'exception toutefois du chlopyriphos), il est possible que des phénomènes de dégradation aient lieu dans les bidons avant la collecte des échantillons.

Spécifications analytiques :

Filtration 0.7 μm des échantillons dans le ruissellement (fibre de verre),

Extraction Phase Solide ou injection directe selon le niveau de concentration,

HPLC-MS/MS.

Présentation des résultats

1. Etude des transferts latéraux de pesticides au sein de la nappe de versant de Saint Joseph

a. Etat de contamination de la nappe par les pesticides

Le Tableau 10 présente les résultats des analyses complètes de pesticides réalisées dans la nappe du versant de Saint Joseph au sein des différents piézomètres étudiés (localisation des piézomètres en Figure 6) et pour différentes dates. On constate que les substances retrouvées sont essentiellement des produits de dégradation ou des substances interdites (annexe 6). Sur les plus de 300 substances recherchées, 18 ont été quantifiées au moins une fois aux dates suivies. Le terbuméton déséthyl et le norflurazon desméthyl montrent les plus fortes concentrations qui peuvent dépasser 1 µg/L. Les substances les plus retrouvées à la fois en termes de fréquence de quantification et de niveau de concentration sont par ordre décroissant :

terbuméton déséthyl > norflurazon desméthyl > norflurazon > terbuthylazine deséthyl ≈ terbuthylazine > atrazine désisopropyl

Parmi les substances fréquemment utilisées par le viticulteur sur la parcelle surplombant la zone d'étude (annexe 5), seule la spiroxamine est retrouvée et seulement en 2015 mais à des concentrations non négligeables (> 0,3 µg/L).

L'aminotriazole est peu retrouvé en dépit d'un usage quasi chaque année enquêtée. L'AMPA, produit de dégradation du glyphosate n'est retrouvé qu'une seule fois mais à une concentration non négligeable (>0,2 µg/L). Les substances les plus utilisées d'après les enquêtes réalisées (cymoxanil, difénoconazole, mancozèbe, fosétyl-aluminium) ne sont pas retrouvées. Il faut noter cependant que le mancozèbe n'est pas analysé et que le fosétyl-aluminium ne l'a été qu'à partir de 2014, les méthodes analytiques étant complexes.

En revanche, certaines substances non recensées au cours des enquêtes ont été retrouvées (boscalid et florasulam (ce dernier n'ayant été analysé qu'à partir de 2014)).

Le terbuméton et la simazine sont retrouvés au voisinage de leurs limites de quantification. En revanche, l'atrazine désisopropyl, qui est un des produits de dégradation de cette dernière, montre des concentrations encore élevées. Le diuron et le DCPMU (métabolite du diuron interdit d'usage fin 2008) sont systématiquement inférieurs à 0,1 µg/L, montrant une cinétique de dissipation dans le milieu plus rapide que les autres substances interdites quantifiées.

Il n'est pas aisé d'identifier des tendances dans le temps à partir des échantillons ponctuels réalisés (Figure 22). Ce constat peut être associé au fait que les conditions hydrométriques ne sont pas les mêmes d'une année à l'autre à la date de chaque prélèvement (annexe 7). On a aussi tenté de mettre en évidence une évolution spatiale (de l'amont vers l'aval du versant) à partir de ces mesures ponctuelles en moyennant les résultats obtenus au sein des piézomètres correspondants à une même cote dans l'axe amont-aval et pour toutes les années de suivi (Figure 23).

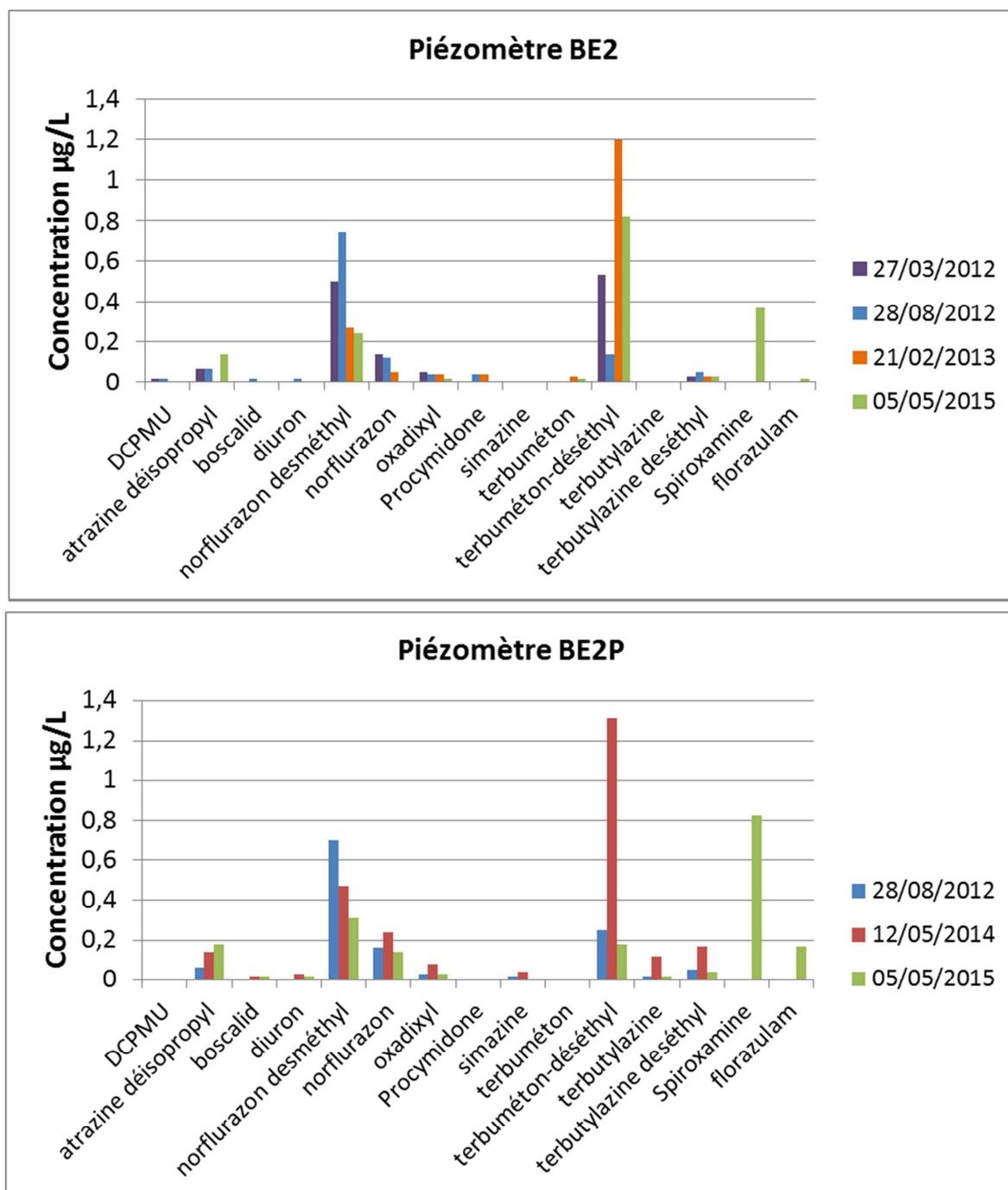


Figure 22. Concentrations en pesticides (analyse complète) au sein de la nappe de St Joseph au niveau des piézomètres BE2 (en haut) et BE2P (en bas). Site de St Joseph.

Tableau 10. Concentrations en pesticides dans les piézomètres suivis sur le site de Saint Joseph. Analyse complète (surlignées en jaune : valeurs > 0,1 µg/L ; en rouge : valeurs > 1 µg/L).
n.r. : non recherché ; LQ : limite de quantification. Site de St Joseph.

Date d'échantillonnage	N°piézo / Morcille	Avec ou sans vidange du piézomètre	atrazine déisopropyl	boscalid	DCPMU	desethyl desisopropyl atrazine	diuron	florasulam	norflurazon	norflurazon desméthyl	oxadixyl	procymidone	Simazine	spiroxamine	terbuméton	terbuméton-déséthyl	terbuthylazine	terbuthylazine deséthyl	AMPA	aminothiazole	glyphosate
27-mars-12	BE1P	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	0,07	n.r.	0,643	0,801	0,08	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,06	0,75	0,44	0,24	<LQ	<LQ
	BE2	avec vidange	0,07	<LQ	0,02	n.r.	<LQ	n.r.	0,14	0,5	0,05	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,53	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
	BE4P	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	0,03	n.r.	0,28	0,42	0,06	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,35	0,05	0,12	<LQ	<LQ	<LQ
	BE5	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,06	0,21	0,03	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,14	<LQ	0,02	<LQ	0,11	<LQ
28-août-12	BE1P	avec vidange	0,68	0,05	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,59	0,84	0,2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,374	0,1	0,2	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2P	avec vidange	0,06	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,16	0,7	0,03	<LQ	0,02	<LQ	<LQ	0,25	0,02	0,05	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2	avec vidange	0,07	0,02	0,02	n.r.	0,02	n.r.	0,12	0,744	0,04	0,04	<LQ	<LQ	<LQ	0,14	<LQ	0,05	<LQ	<LQ	<LQ
	BE3	avec vidange	0,12	0,06	<LQ	n.r.	0,03	n.r.	0,48	1,76	0,08	0,06	0,04	<LQ	<LQ	0,55	0,06	0,09	<LQ	<LQ	<LQ
	BE5	avec vidange	0,05	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,06	0,24	0,05	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,28	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
	BE6	avec vidange	<LQ	<LQ	0,02	n.r.	<LQ	n.r.	0,21	0,8	0,06	0,04	<LQ	<LQ	<LQ	0,18	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
21-févr.-13	BE1P	avec vidange	<LQ	0,04	<LQ	n.r.	0,07	n.r.	0,39	0,49	0,1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,17	0,11	0,18	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,05	0,27	0,04	0,04	<LQ	<LQ	0,03	1,2	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
	BE4P	avec vidange	0,09	<LQ	<LQ	n.r.	0,04	n.r.	0,16	0,25	0,05	<LQ	0,02	<LQ	<LQ	1,47	0,06	0,1	<LQ	<LQ	<LQ
	BE5	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	<LQ	0,11	0,02	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,66	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	BE3	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	<LQ	0,36	0,03	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,32	<LQ	0,02	<LQ	<LQ	<LQ
	BE6	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	<LQ	0,22	0,02	<LQ	<LQ	<LQ	0,02	1,13	<LQ	0,02	<LQ	<LQ	<LQ
12-mai-14	Morcille		<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	<LQ	0,09	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,15	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2P	avec vidange	0,14	0,02	<LQ	n.r.	0,03	n.r.	0,24	0,47	0,08	<LQ	0,04	<LQ	<LQ	1,31	0,12	0,17	<LQ	<LQ	<LQ
	BE6	avec vidange	<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	0,11	0,37	0,06	0,04	<LQ	<LQ	<LQ	0,88	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
5-mai-15	Morcille		<LQ	<LQ	<LQ	n.r.	<LQ	n.r.	<LQ	0,12	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,02	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2	sans vidange (surface)	<LQ	<LQ	<LQ	0,14	<LQ	0,02	<LQ	0,24	0,02	<LQ	<LQ	0,367	0,02	0,82	<LQ	0,03	<LQ	<LQ	<LQ
	BE2P	sans vidange (profondeur)	<LQ	0,02	<LQ	0,18	0,02	0,17	0,14	0,31	0,03	<LQ	<LQ	0,827	<LQ	0,18	0,02	0,04	<LQ	<LQ	<LQ

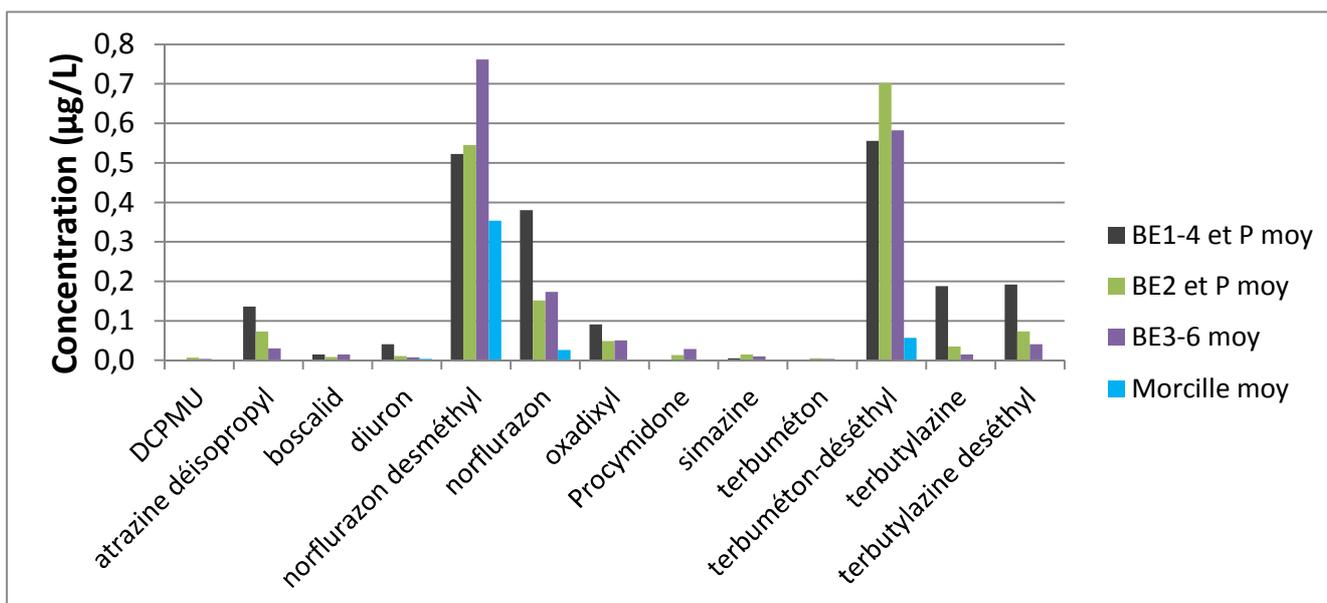


Figure 23. Concentrations moyennes dans la nappe sur la période de suivi (2012-2014) en pesticides de l'amont (BE1-BE4 BE1P et BE4P) vers l'aval (BE3-BE6) et dans la Morcille. Site de St Joseph.

On peut identifier une diminution des concentrations moyennes de l'amont vers l'aval de la prairie et au sein de la Morcille pour la plupart des substances (notamment atrazine désisopropyl, diuron, norflurazon, oxadixyl, terbutylazine, terbutylazine deséthyl). En revanche, c'est moins net pour le norflurazon desméthyl et le terbuméton deséthyl qui semblent présenter des concentrations assez uniformes le long du versant avec, toutefois, une diminution des concentrations dans la Morcille.

En conclusion :

- ➔ La nappe est contaminée essentiellement par des substances anciennement utilisées sur la vigne mais aujourd'hui interdites et par des produits de dégradation,
- ➔ Il peut exister une grande variabilité temporelle et spatiale de la contamination selon les substances et la date de suivi,
- ➔ Il semble qu'il existe un gradient amont – aval décroissant des concentrations dans la nappe pour la plupart des substances mesurées à l'exception du norflurazon desméthyl et du terbuméton deséthyl qui semblent présenter des concentrations assez uniformes le long du versant.

b. Dynamique de transfert de solutés et de pesticides au sein de la nappe

b. 1. Etudes préliminaires du fonctionnement hydrologique de la nappe :

On rappelle qu'afin de mieux connaître le fonctionnement de la nappe de versant, sa dynamique et les chemins de transfert de l'amont vers l'aval, des essais de traçage ont été effectués en 2012 et 2013, à partir de l'injection d'une solution concentrée de sels (bromures ou iodures) directement dans la nappe au sein des piézomètres BE1P et BE4P.

Le suivi de 2012 (Druguet, 2012) a mis en évidence que seul le transect BE1-BE1P → BE2-BE2P → BE3 ou BE6 témoignait d'une circulation effective du traceur injecté en BE1P, avec un gradient secondaire de BE1P vers BE5 et BE5P dans les situations de nappe basse (Figure 25) (confirmé par le suivi 2013, annexe 9). En revanche, le traceur injecté en BE4P n'a pas été retrouvé au sein des piézomètres BE5, BE5P ni BE6. La mise en place au cours du traçage d'un piézomètre N positionné latéralement au transect BE5-BE5P → BE6, dans la direction de l'écoulement dans la Morcille a montré une circulation effective entre le BE4P et N (Figure 24 et Figure 25). Les écoulements dans la nappe semblent donc déviés par rapport à la pente principale du sol, en cohérence avec le sens de l'écoulement du cours d'eau.

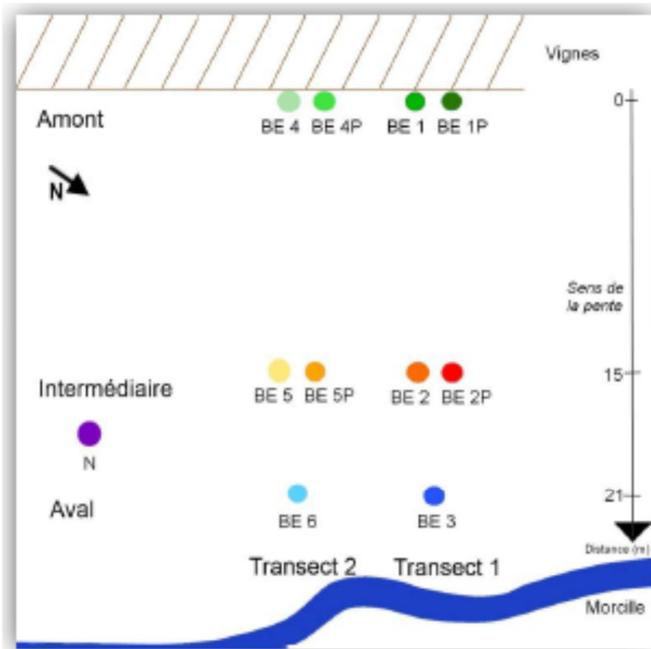


Figure 24. Schéma de positionnement des piézomètres sur le versant de St Joseph.

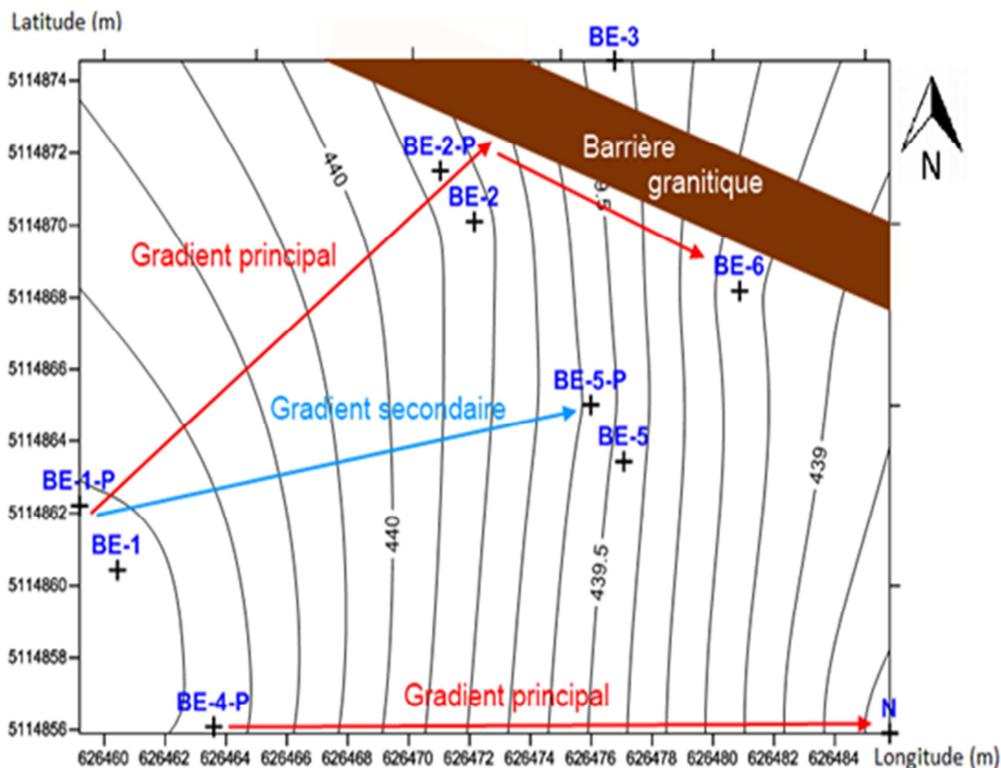


Figure 25. Schéma récapitulatif des hypothèses de sens de circulation de l'eau au sein de la nappe de versant de St Joseph (Druguet, 2012).

En ce qui concerne le transect BE1-BE1P → BE2-BE2P → BE3 ou BE6, les résultats chimiques montrent que très peu de traceur a été effectivement mesuré dans le BE3 durant les suivis 2012 et 2013, quelle que soit la hauteur de la nappe, alors que des concentrations non négligeables ont été mesurées dans le BE6. Les hypothèses faites quant à cette observation seraient 1) que la Morcille située juste en bas de versant entraîne une déviation des écoulements vers BE6 conformément au sens du courant et 2) qu'il pourrait exister une barrière physique (remontée de socle granitique ?) en amont du piézomètre BE3 qui entraverait les transferts du BE2 et du BE2P vers le BE3. Les profils de résistivité électrique réalisés sur le site sont cohérents avec cette dernière hypothèse (annexe 10).

Dans la suite de l'étude, on se concentre sur le transect piézométrique BE1-BE1P → BE2-BE2P → BE6 (et BE3) pour le suivi des chroniques de traceur retrouvé en aval du piézomètre d'injection BE1P. On note que les conditions hydrométéorologiques différentes entre 2012 et 2013 ont engendré une dynamique de restitution du traceur beaucoup plus fluctuante et intense en 2013, dont le printemps a été marqué par un cumul de pluie plus important (232 mm sur avril-mai 2013 contre 182 mm sur avril-mai 2012) et des pluies plus fréquentes qu'en 2012) (Figure 26). Même si la réponse de la nappe aux pluies dépend fortement des conditions initiales et de la pluie, il semble qu'elle réagisse de façon significative (variation du niveau piézométrique > 10 cm) à partir d'une pluie cumulée sur 3 jours d'au moins 15 mm. Le temps de début de montée piézométrique est de l'ordre de 30 à 72 h.

On a pu mettre en évidence une différenciation importance de l'amont vers l'aval des niveaux de concentration en traceur dans la nappe (BE2P 340 cm > BE6 340 cm) ((Figure 27). Il existe également une différenciation de la surface vers la profondeur (BE2P 340 cm > BE2 260 cm ; BE6 340 cm > BE6 240 cm ; BE3 340 cm > BE3 240 cm). On observe que la dispersion latérale est faible (BE2P 340 cm > BE5P 370 cm) : ainsi, dans le cas étudié d'une injection de traceur ionique au sein de la nappe dans le BE1 P, les concentrations observées sont plus élevées en profondeur qu'en surface de nappe et on observe une atténuation marquée des concentrations de l'amont vers l'aval (on observe ainsi une atténuation entre les concentrations maximales observées au BE2P et au BE6 de 41% en 2012 et 66% en 2013).

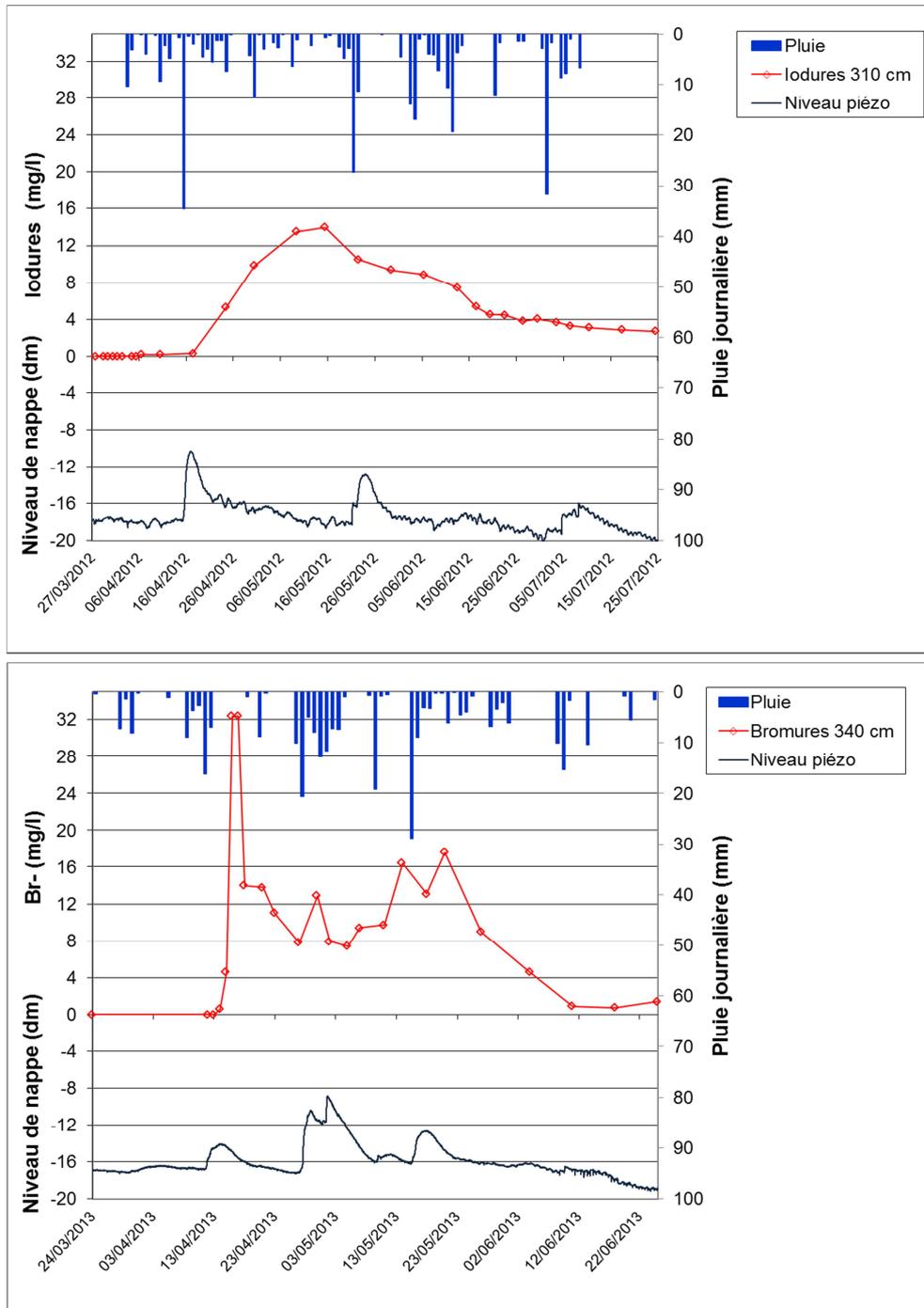


Figure 26. Chronique de restitution au sein du piézomètre BE2P du traceur injecté au BE1P en 2012 (en haut) et 2013 (en bas), en regard de la pluviométrie et du niveau de nappe au sein du BE2P exprimé par rapport à la surface du sol. Site de St Joseph.

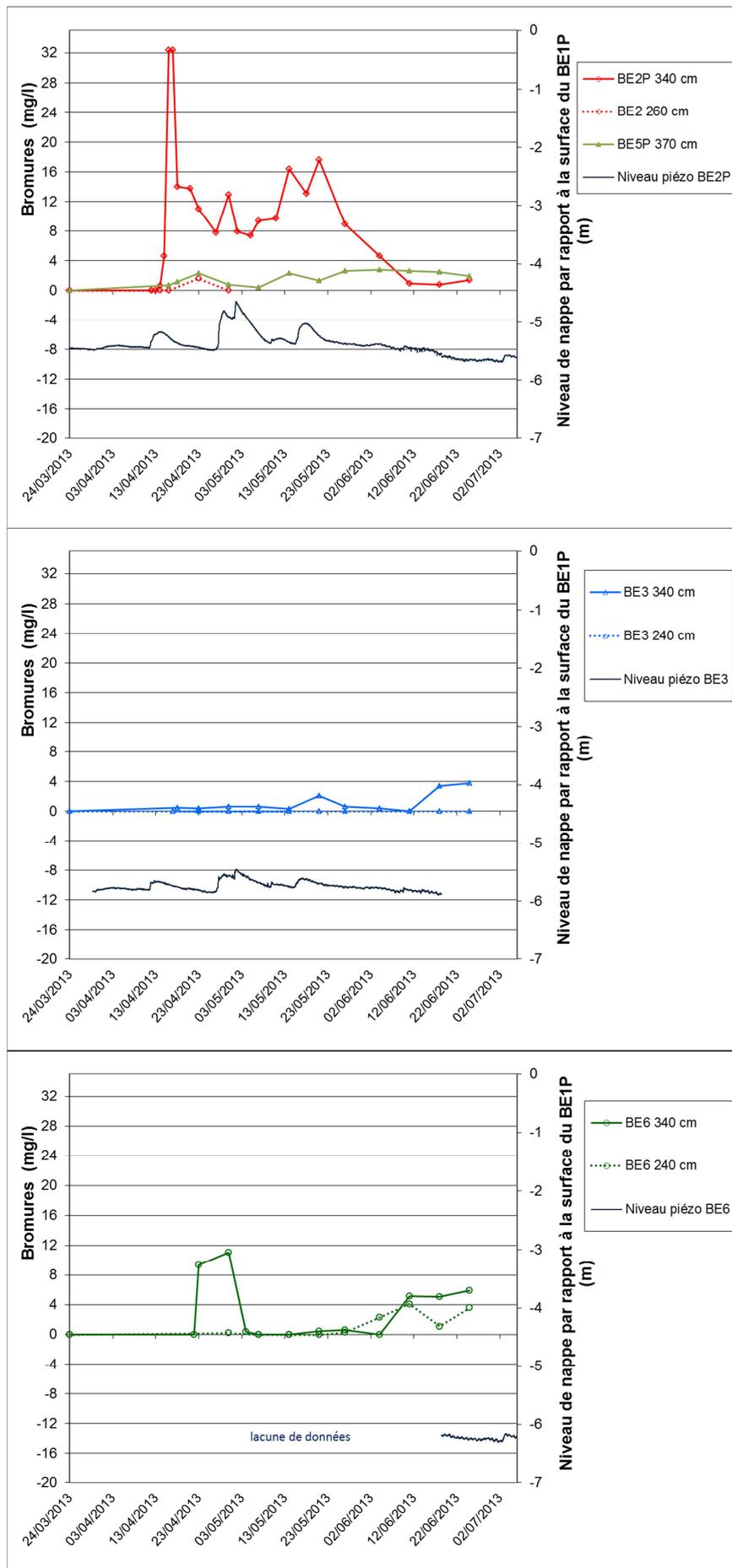


Figure 27. Chroniques de concentration en traceur au sein des piézomètres suivis au cours de l'essai de traçage 2013, selon le transect amont-aval (BE2-BE2P → BE3 – BE6) et selon la profondeur de prélèvement, du niveau de nappe exprimé par rapport à la surface du BE1P. Site de St Joseph.

En conclusion :

Ces études préalables ont permis :

- ✓ d'identifier les voies de circulation de l'eau de l'amont vers l'aval et, donc, de repérer les transects de piézomètres « connectés » entre eux : notamment le transect BE1-BE1P → BE2-BE2P → BE6.
- ✓ de mettre en évidence une atténuation des concentrations maximales mesurées de l'amont vers l'aval (sans préjuger des processus en cause : dispersion, dilution, rétention physique temporaire, ...).
- ✓ de mettre en évidence une différenciation des concentrations de traceur transféré entre la surface et la profondeur de la nappe : ce résultat montre l'importance, pour cerner les transferts dans la nappe, de prendre en compte la profondeur de réalisation de la mesure.
- ✓ d'acquérir des informations sur la réactivité de la nappe en termes de réponse piézométrique et de transfert de traceur suite aux événements pluvieux.

b. 2. Suivi en conditions naturelles des concentrations en pesticides dans la nappe de bas de versant au cours d'un épisode de montée piézométrique

Compte tenu de la grande réactivité aux pluies de la nappe de versant de Saint Joseph, mise en évidence ci-dessus, et suite aux conclusions de l'expérimentation qui a consisté à générer un événement de ruissellement artificiel (CF partie suivante) qui montre un transfert privilégié à la surface de la nappe, de l'eau infiltrée dans la bande enherbée, on a émis l'hypothèse que les concentrations en pesticides pouvaient fluctuer fortement en surface de nappe en lien avec les épisodes pluviométriques et les pratiques agricoles. On a donc cherché à suivre spécifiquement l'évolution des concentrations en pesticides dans les premiers décimètres de la nappe (au sein du piézomètre BE2) pour identifier si des pics de concentration pouvaient être observés à ce niveau, à la suite d'épisodes pluvieux pendant la période d'application. On rappelle que ce suivi fin a été réalisé grâce à un échantillonneur automatique asservi au temps et qu'en complément, on a également mis en place un réseau d'échantillonneurs passifs afin de permettre une comparaison surface/profondeur et amont/aval de la contamination.

Ce suivi a été mis en place en 2015 dont le printemps a été relativement sec. Ainsi, un seul événement de montée et descente piézométrique (encadré sur la dernière figure de l'annexe 7 et annexe 8) a pu être suivi et on note qu'il est relativement peu marqué par rapport aux événements observés sur la même période en 2012 et 2013. Ceci peut s'expliquer par les faibles cumuls des pluies antérieures : 232 mm sur avril-mai 2013 contre 83 mm sur avril-mai 2015.

Parmi les 11 substances recherchées plus spécifiquement dans les échantillons d'eau de nappe et de la Morcille (CF partie méthodologique p20), ont essentiellement été quantifiées des substances interdites (diuron, norflurazon, simazine, procymidone) ainsi que leurs produits de dégradation (DCPMU, norflurazon déméthyl). Parmi les substances recherchées et utilisées par le viticulteur en 2012, 2014 ou 2015 (annexe 5), la spiroxamine a également été mesurée mais à de très faibles concentrations. En revanche, la flumioxazine, appliquée en 2012 et 2014 sur la parcelle en amont, n'a pas été détectée.

Le suivi à pas de temps fin à la surface de la nappe au sein du piézomètre BE2 a permis de mettre en évidence deux pics de concentration en lien avec une première légère montée piézométrique le 02/05 puis suite à la montée plus marquée du 06/05 montrant une dynamique rapide d'évolution des concentrations (Figure 28 et Figure 29).

En complément, on rappelle qu'une analyse complète a été réalisée par le Laboratoire de la Drôme sur un échantillon d'eau prélevé le 5 mai au sein du BE2 à 20 cm sous le toit de la nappe et au sein du BE2P à 145 cm sous le toit de la nappe (sans vidange préalable). Elle met en évidence la présence d'autres substances que celles suivies dans la liste restreinte sur laquelle on s'est concentré pour le suivi à pas de temps fin : ce sont essentiellement des produits de dégradation ou des substances interdites (deséthyl desisopropyle atrazine, oxadixyl, terbuméton, terbuméton deséthyl, hydroxyterbuthylazine, terbutylazine déséthyl), mais également deux substances autorisées mais non répertoriées au cours des enquêtes antérieures sur la parcelle de vigne de St Joseph (boscalid et florasulam) (annexe 5). Parmi les substances communes aux deux suivis, on retrouve le norflurazon, le norflurazon desméthyl, la spiroxamine et le diuron. Les concentrations observées au cours de l'analyse complète du 5 mai 2015 sont, pour la plupart, similaires à celles mesurées au cours de l'analyse restreinte des 4 et 7 mai 2015. Une exception notable est la spiroxamine qui a été quantifiée à des concentrations beaucoup plus élevées au cours de l'analyse complète (facteur 100) qu'au cours de l'analyse restreinte. Aucune cause analytique n'ayant été trouvée, cela pourrait indiquer une variation très rapide des concentrations (de l'ordre de quelques heures séparant les deux échantillonnages) mais qui ne se retrouve pas pour les autres substances...

Par ailleurs, l'analyse restreinte a mis en évidence des substances non quantifiées dans l'analyse complète (simazine, DCPMU, procymidone), du fait de limites de quantifications beaucoup plus basses (de l'ordre du ng/L contre 20 à 50 ng/L respectivement).

En dépit de la dynamique rapide mise en avant à la surface de la nappe, on note, que les concentrations maximales mesurées restent dans l'ensemble faibles et dans la plupart des cas plus faibles que les concentrations mesurées en profondeur (exception de la procymidone qui montre des concentrations toujours plus élevées en surface de nappe) (Figure 30). Il est donc possible que la montée du niveau piézométrique, suite à la pluie, entraîne une remontée de l'eau profonde (effet piston), et un mélange avec l'eau de surface, initialement moins concentrée, pouvant expliquer les pics mesurés en surface de façon relativement synchrone avec le pic de niveau piézométrique.

Compte tenu de ces résultats, on peut faire l'hypothèse que les molécules interdites, produits de dégradation ou molécules appliquées depuis plusieurs années, sont, pour la plupart (exception de la procymidone et dans une moindre mesure la spiroxamine), en plus fortes concentrations plutôt dans le fond de la nappe et fluctuent ponctuellement, notamment en surface, avec les pluies.

Pour les molécules encore appliquées, il est supposé que le niveau initial de la nappe et l'amplitude de variation du niveau piézométrique (liée à la recharge de la nappe), au cours de l'événement pluvieux, jouent un rôle important sur leur transfert mais cela n'a pas pu être mis en évidence ici du fait de l'épisode trop peu marqué échantillonné en 2015. Il serait nécessaire de suivre des événements plus conséquents pour vérifier cette hypothèse.

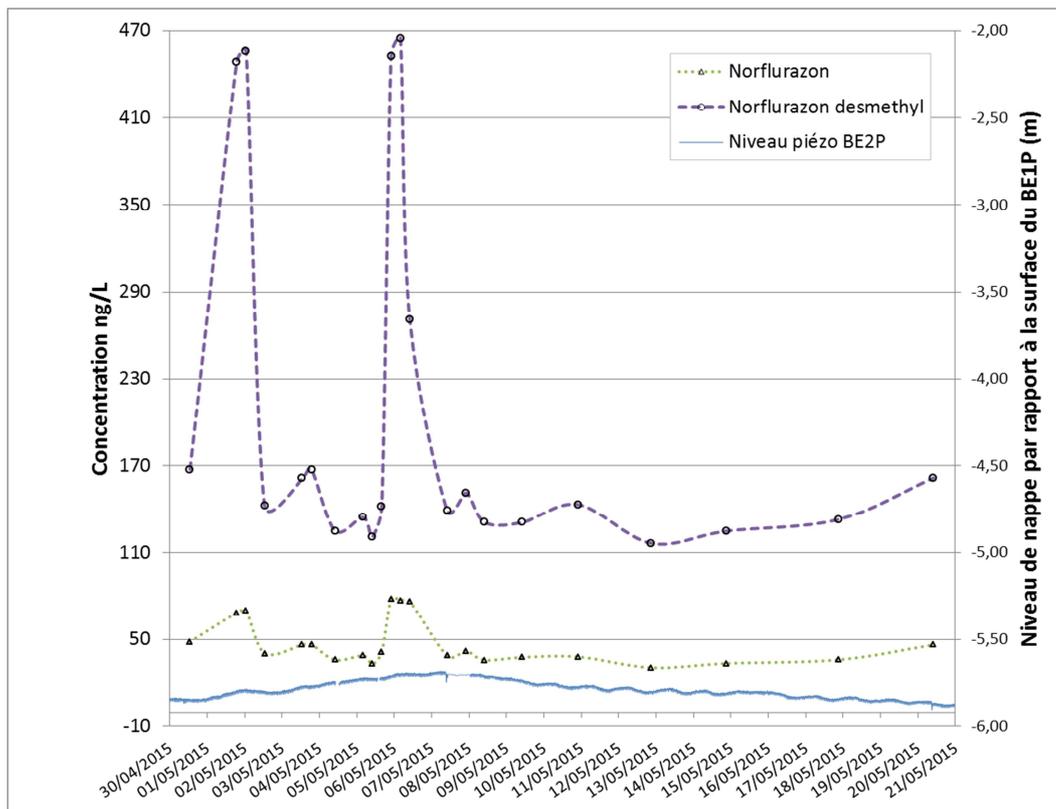


Figure 28. Evolution des concentrations du norflurazon et de son produit de dégradation en fonction du temps dans le piézomètre BE2 Surface et du niveau piézométrique mesuré dans le BE2P. Site de St Joseph.

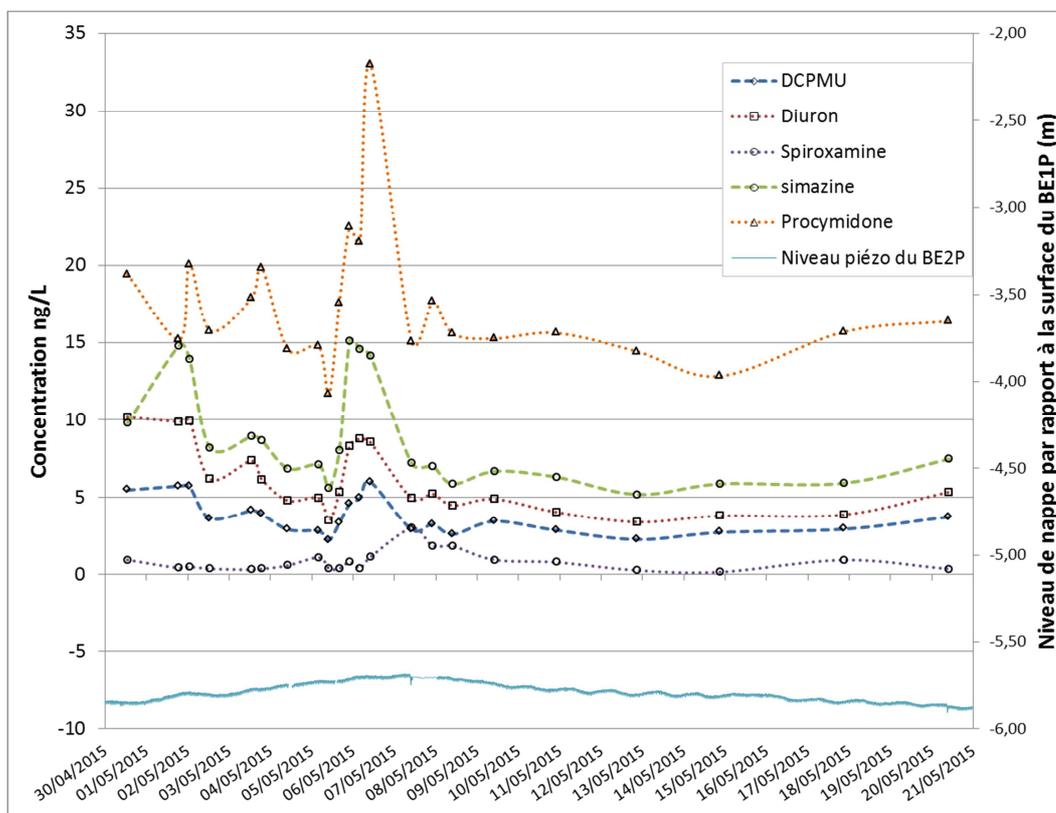


Figure 29. Evolution des concentrations des autres substances retrouvées dans la nappe dans le piézomètre BE2 Surface en fonction du temps et du niveau piézométrique mesuré dans le BE2P. Site de St Joseph.

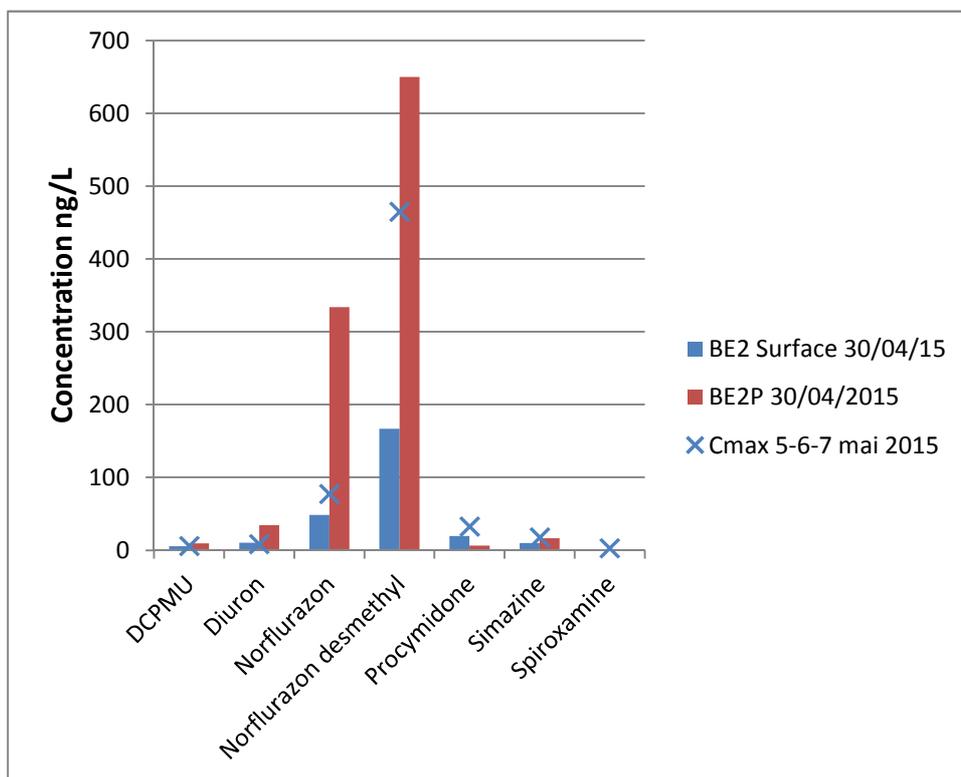


Figure 30. Concentrations en substances phytosanitaires mesurées dans les piézomètres BE2 (20 cm sous la surface de la nappe) et BE2P (340 cm sous la surface du sol) le 30 avril 2015 (bâtons) et concentrations maximales observées dans le BE2 (20 cm sous la surface de la nappe) sur la période du 5 au 7 mai 2015 (croix). Site de St Joseph.

Les résultats des mesures qualitatives obtenues grâce à la mise en œuvre des échantillonneurs passifs sont présentés ci-après. On rappelle que, dans la mesure où il n'y a pas eu de calibration spécifique, il n'est pas possible de comparer les substances entre elles. En effet, elles ne présentent pas forcément la même affinité pour la tige silicone (pour une même concentration, certaines se fixent beaucoup et d'autres moins). Seul le calcul des taux d'échantillonnage au laboratoire peut permettre de pallier cette limite. Dans le cadre de cette étude, où on a raisonné uniquement en termes comparatifs, substance par substance, cet outil, même non calibré, a montré son intérêt pour approcher des différenciations spatiale et temporelle.

Ces mesures moyennées sur la semaine permettent de confirmer les résultats précédents obtenus à pas de temps fin en termes de différenciation des concentrations dans la nappe entre la surface et la profondeur, et selon la substance (Figure 31). A la lecture de ce graphique, on observe, en effet, que certaines substances sont d'avantage quantifiées en profondeur (boscalid, diuron, norflurazon), alors que la procymidone et la spiroxamine sont essentiellement retrouvées en surface. En revanche, au pas hebdomadaire, le norflurazon désméthyl et la simazine sont retrouvés de façon équivalente en surface et en profondeur.

Par ailleurs, si on analyse l'évolution de l'amont vers l'aval des masses échantillonnées selon le transect BE1 → BE2 → BE6 en surface (20 cm sous la surface de la nappe), on observe une atténuation pour la plupart des substances du BE2 vers le BE6 et la Morcille (Figure 31), sans préjuger des processus en jeu (dispersion, dilution, rétention physique ou chimique, dégradation). L'atténuation amont-aval est moins marquée pour le norflurazon désméthyl, comme cela avait déjà été observé grâce au suivi ponctuel interannuel pour cette même molécule et pour le terbuméton déséthyl (partie

résultats, 1) a)), ce qui peut s'expliquer par la possible transformation des molécules mères au sein de la prairie.

Par ailleurs, on note que la masse échantillonnée en spiroxamine est bien plus élevée au sein des piézomètres BE1Surface et BE6 Surface comparativement au BE1 P et au BE2 Surface et BEP. Une hypothèse explicative pourrait être liée au fait que la spiroxamine est une substance toujours utilisée, de façon générale, sur le bassin de la Morcille et, plus spécifiquement, sur la parcelle de vigne en amont de la zone enherbée étudiée :

- ainsi, sa présence plus importante dans le BE1 Surface, qui se situe en bordure de parcelle de vigne, pourrait être expliquée par les apports du sol de la parcelle amont (eau d'infiltration ou percolation)

- en revanche, les masses en spiroxamine dans le BE6 Surface, bien plus élevées que celles retrouvées dans le BE2 Surface et le BE2P, pourraient plutôt s'expliquer par un apport via la Morcille et sa nappe d'accompagnement, elles-mêmes susceptibles d'être contaminées par les apports de l'ensemble du bassin versant en amont.

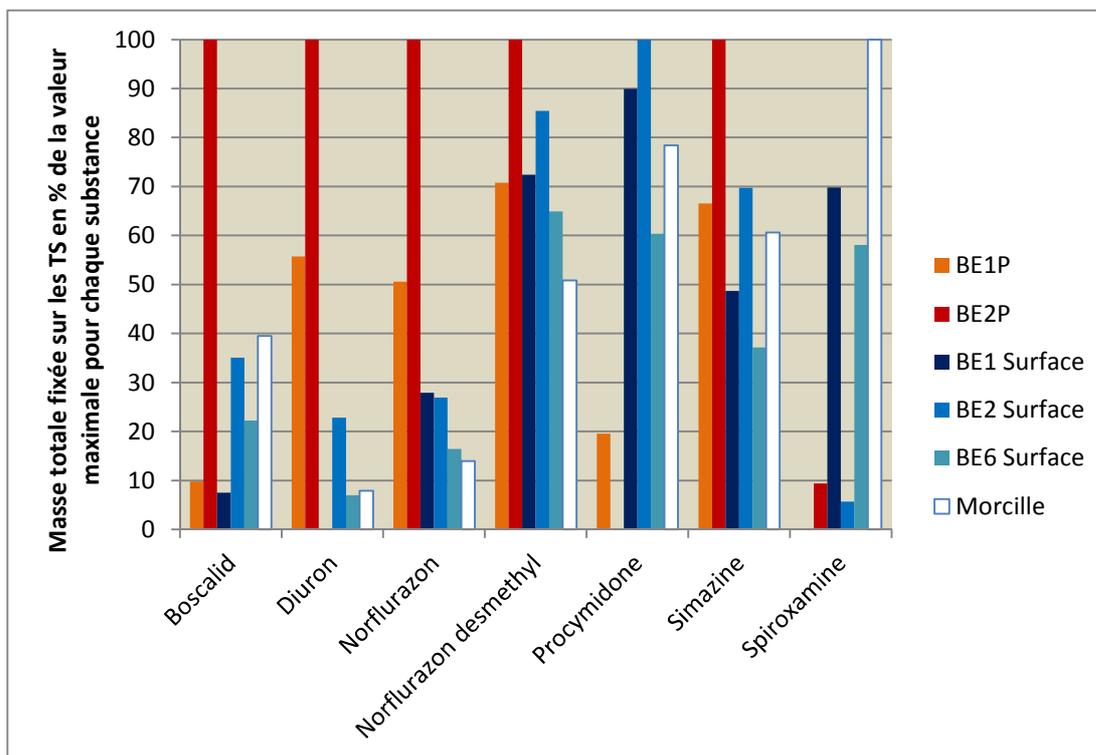


Figure 31. Masses totales de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones sur l'ensemble du suivi (4 semaines) selon le lieu et la profondeur de pose (en surface : piézomètres BE1 à BE6 (bâtons en tons de bleu) ou en profondeur (P) (bâtons en tons de rouge/orange) et dans la Morcille (bâtons blancs)), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance (rappel : BE1P à 595 cm sous la surface du sol et BE2P à 340 cm sous la surface du sol). Site de St Joseph.

Par ailleurs, on constate que la réactivité des tiges silicones (cinétique de fixation des substances de l'ordre de l'heure) peut aussi permettre de rendre compte d'une évolution temporelle des concentrations au cours des quatre semaines de suivi (Figure 32 et Figure 33). L'annexe 12 précise les périodes de pose (semaine S0 à S3). On constate que les trois premières périodes (S0 à S2) correspondent à des masses fixées assez proches en surface (périodes de transfert) alors que la semaine S3 montre une diminution assez systématique des masses fixées (fin d'événement) (moins marqué pour la procymidone). En profondeur, l'évolution semble plus fluctuative entre S0 et S1 mais on observe également une diminution des masses fixées en S3.

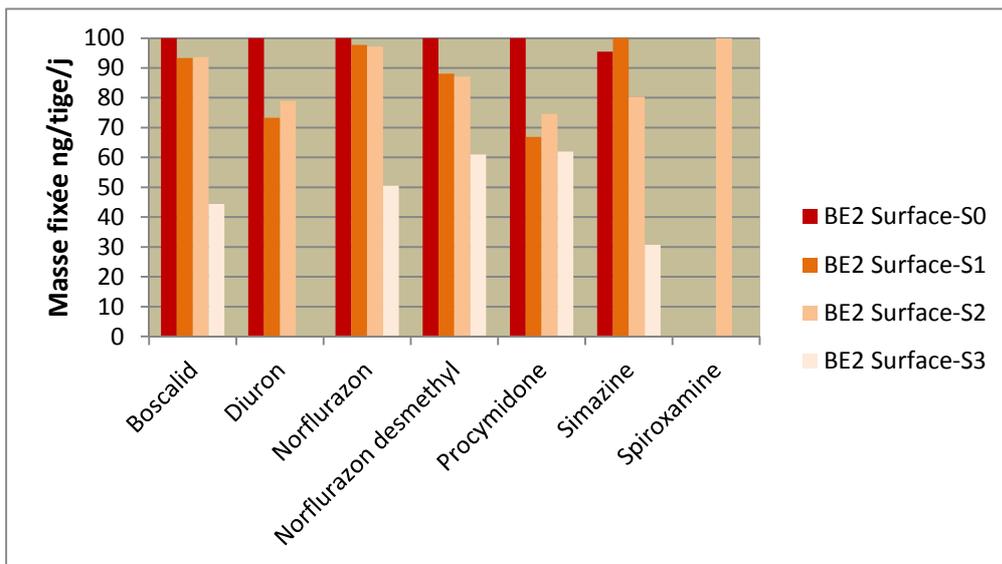


Figure 32. Masses de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones placées dans le BE2 en surface (20 cm sous le toit de la nappe) selon les périodes d'exposition (période S0 à S3), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance. Site de Saint Joseph.

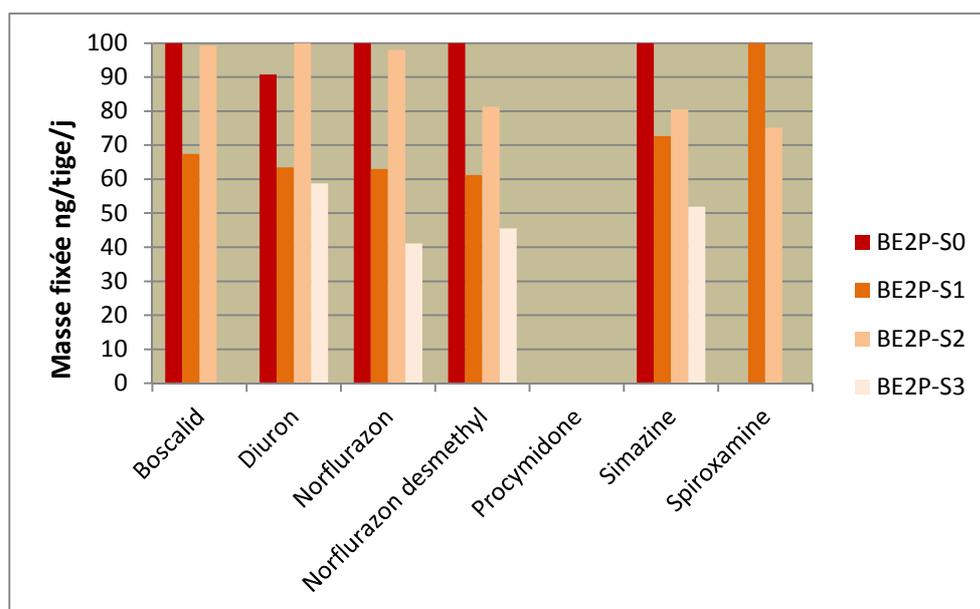


Figure 33. Masses de chaque substance récupérées sur les Tiges Silicones placées dans le BE2P (340 cm sous la surface du sol) selon les périodes d'exposition (période S0 à S3), exprimées en % de la masse la plus élevée observée pour chaque substance. Site de Saint Joseph.

En conclusion :

- Le suivi à pas de temps fin de l'évolution en produits phytosanitaires dans la nappe de bas de versant du site de Saint Joseph a mis en évidence une fluctuation qui peut être rapide des concentrations en lien avec l'occurrence d'un événement pluvieux entraînant une montée du niveau piézométrique.
- On retient qu'au cours de ce suivi, ce sont essentiellement des substances interdites ou des métabolites qui ont été quantifiées. Parmi les substances utilisées par le viticulteur et recherchées dans cette étude, seule la spiroxamine a été quantifiée. La mesure d'un épisode de transfert plus significatif que celui qui a pu être suivi au printemps 2015 serait utile pour mieux cerner l'apport possible d'autres substances encore utilisées, du sol de la parcelle de vigne à la nappe, via l'eau de recharge.
- Même en l'absence de calibration, qui permettrait de mettre en correspondance les masses piégées sur les tiges silicone avec des concentrations estimées dans le milieu, on constate que les échantillonneurs passifs, de par leur caractère intégratif, permettent de rendre compte de gradients spatiaux d'évolution de la contamination en pesticides, au sein d'une nappe de versant.

c. Effet d'une infiltration massive au sein de la bande enherbée

Cette partie présente les résultats de l'expérimentation qui a consisté à générer un épisode de ruissellement artificiel sur la placette enherbée délimitée au sein de la prairie de bas de versant du site de Saint Joseph. On rappelle que l'objectif poursuivi est d'identifier en quelle mesure un ruissellement concentré arrivant en amont de la zone enherbée peut engendrer une contamination de la nappe superficielle sous-jacente.

Tout d'abord, on observe que le ruissellement généré au cours de l'événement artificiel a été totalement infiltré sur les trois premiers mètres amont de la placette enherbée. Les lysimètres A et B (Figure 7) ont réceptionné l'eau infiltrée à 50 cm de profondeur dès les premières minutes qui ont suivi le début du ruissellement, ce qui témoigne de transferts relativement rapides. Cette infiltration massive a entraîné une montée du niveau piézométrique environ 30 min après le début du ruissellement (Figure 34).

Ces résultats sont cohérents avec les travaux antérieurs (Lacas, 2005, Boivin et al., 2007) quant à la forte perméabilité de ce sol et la vitesse des écoulements. Ils montrent la grande réactivité de la nappe à l'apport massif d'eau depuis la zone non saturée. La Figure 35 donne les concentrations relatives (par rapport aux concentrations initiales dans le ruissellement simulé) en traceur et pesticides mesurées au sein des lysimètres A et C, ainsi qu'à la surface de la nappe (maximum 20 cm sous le toit de la nappe), au niveau du piézomètre BE2 Surface en aval immédiat de la placette enherbée.

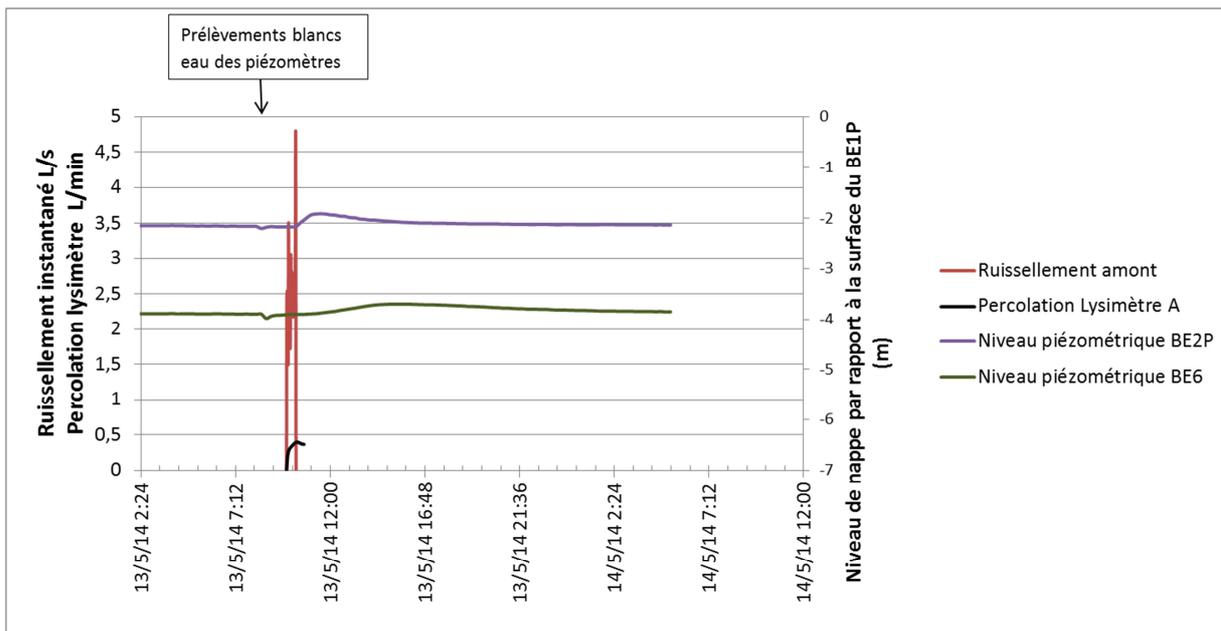


Figure 34. Evolution temporelle des débits de ruissellement simulé et de percolation au sein du lysimètre A ainsi que des niveaux piézométriques au sein des piézomètres BE2P et BE6. Site de St Joseph.

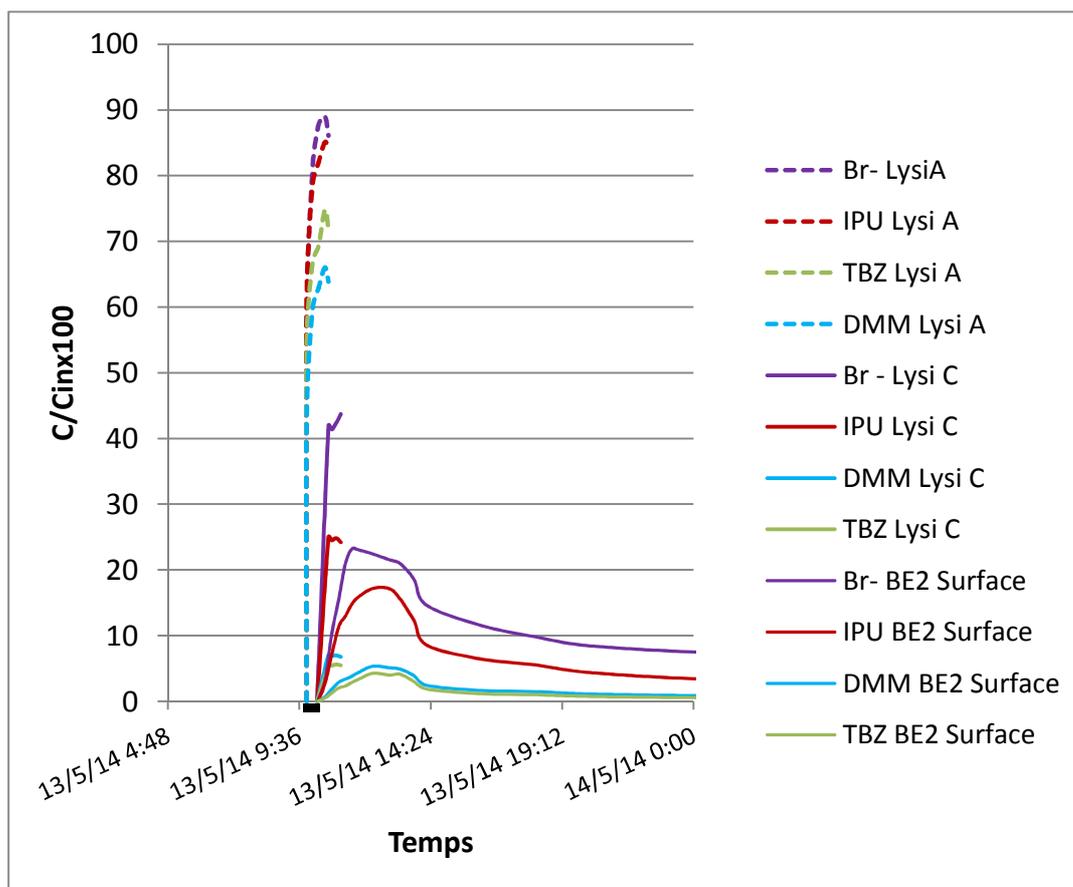


Figure 35. Evolution, au sein des lysimètres A et C ainsi que du piézomètre BE2-Surface, des concentrations ponctuelles normalisées par la concentration moyenne d'entrée dans le ruissellement simulé, pour le traceur ionique (bromure) et les trois pesticides étudiés (IPU : isoproturon, TBZ : tébuconazole, DMM : diméthomorphe). Le rectangle noir sur l'axe des abscisses représente la durée du ruissellement simulé. Site de St Joseph.

On constate un faible abattement des concentrations entre l'eau de ruissellement et l'eau infiltrée au sein du lysimètre A, situé quasiment à l'aplomb de la gouttière de déversement du ruissellement. Ces dernières sont nettement plus atténuées au sein du lysimètre C (et sont intermédiaires dans le lysimètre B). On observe une dynamique rapide de transfert des solutés à la surface de la nappe (BE2 Surface) avec des concentrations atténuées de 75 à 95% de façon cohérente avec le coefficient d'adsorption des substances (Figure 36).

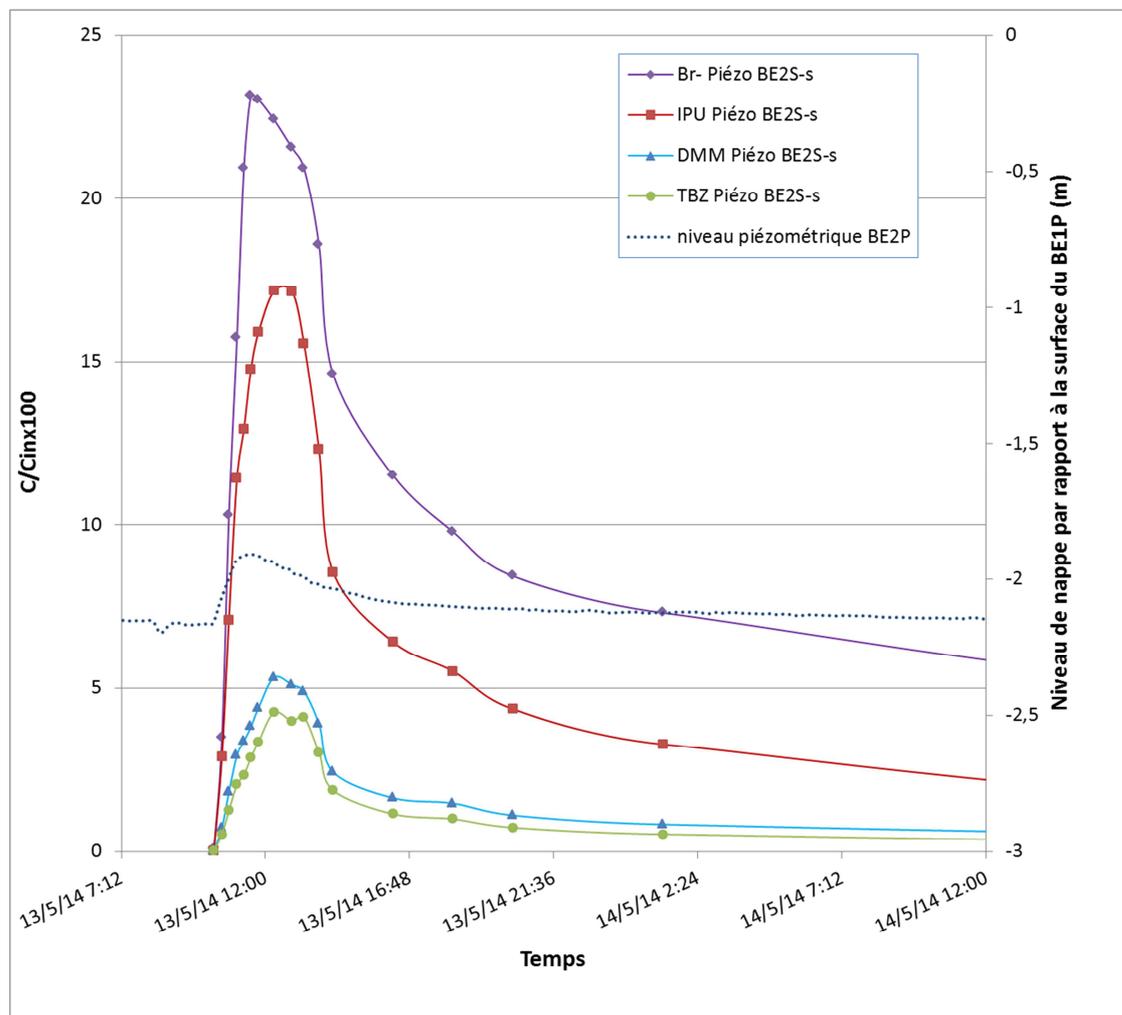


Figure 36. Confrontation des dynamiques de transfert hydrique et chimique à la surface de la nappe au sein du piézomètre BE2 Surface. Site de St Joseph.

La Figure 37 donne les atténuations moyennes de concentration observées au sein des lysimètres A à C et du piézomètre BE2 Surface pour chaque substance en considérant la période depuis le début de l'expérimentation (13 mai à 9h47) jusqu'au 13 mai à 20h. Ce graphique permet de mettre en évidence qu'il existe, pour les pesticides, des processus d'atténuation supplémentaires à ceux auxquels le traceur est soumis (dilution, rétention dans la microporosité, dispersion, ...) que l'on peut attribuer à de la rétention chimique (adsorption).

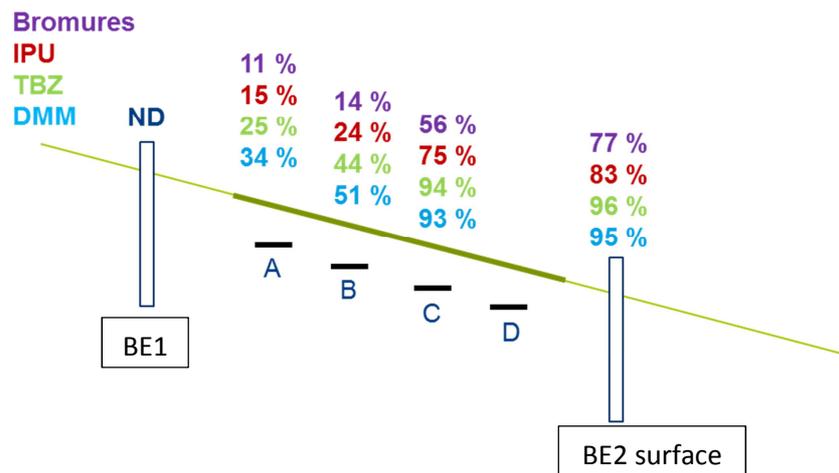


Figure 37. Taux d'atténuation des concentrations en bromures et pesticides dans les lysimètres (A à D) et dans le piézomètre BE2 Surface relativement à la concentration initiale dans le ruissellement. Calcul effectué sur les concentrations maximales observées pendant le transfert. Substances Non Détectées dans le piézomètre en amont de la placette enherbée (BE1). Site de St Joseph.

Les mesures sur les échantillonneurs passifs, bien que qualitatives, ont permis de comparer les évolutions spatiale et temporelle de la contamination dans la nappe de versant au cours et après l'application du ruissellement artificiel (Martin et al., 2015 ; Liger et al., 2015). Quelle que soit la substance, les masses les plus élevées sont observées dans le piézomètre BE2 en surface et en profondeur. Les bien moindres valeurs observées dans le piézomètre BE2P Fond (crépiné à partir 2,60 m de profondeur) bien que situé à proximité du BE2 Surface (crépiné à partir de 1,15 m de profondeur) (annexe 4), laissent supposer qu'il n'y a qu'une faible propagation verticale des substances dans la nappe (Figure 38). La grande similitude des masses piégées aux points BE2Surface et BE2 Fond serait donc plutôt à attribuer à une dispersion et homogénéisation relativement rapide des concentrations au sein du piézomètre BE2 Surface depuis la surface du piézomètre. Le même type de conclusion peut être tiré des résultats obtenus à pas de temps plus fin, au cours de l'expérimentation (annexe 14).

On peut donc faire l'hypothèse d'un transfert privilégié à la surface de la nappe, de l'eau et des substances infiltrées. Cette hypothèse peut être rapprochée des observations de Arlot, 1999, pour le nitrate, en milieu drainé (qui note : le nitrate [appliqué à la surface du sol] rejoint alors le drain en migrant rapidement, parallèlement au toit de la nappe [...] Une petite fraction du nitrate migre dans la nappe pour arriver en fond de profil, avec des vitesses beaucoup plus faibles).

Au cours de la première semaine de suivi, les taux d'atténuation spatiale des masses observées pour chaque substance, entre le BE2 Surface et le BE6 (échantillonneurs placés à 20 cm sous le toit de la nappe dans les deux cas), sont importants (Figure 39) : de 83% pour l'isoproturon, 91% pour le diméthomorphe et 96% pour le tébuconazole, ce qui est cohérent avec les coefficients d'adsorption des molécules (Tableau 2).

Bien que la contamination s'atténue rapidement dans le temps, elle persiste encore après trois semaines. Les résultats d'un test de cohérence entre les masses piégées sur les échantillonneurs passifs et les concentrations ponctuelles mesurées durant la deuxième semaine suivant l'application du ruissellement artificiel sont donnés en annexe 15.

Si on se base sur les mesures ponctuelles réalisées 10 jours après le début de l'expérimentation, on observe des taux d'atténuation de concentration dans la nappe supérieurs à 99% de la concentration initiale présente dans le ruissellement (concentrations de 200 à 2000 fois plus faibles dans la nappe que dans le ruissellement simulé, respectivement pour l'isoproturon et le tébuconazole, le diméthomorphe étant intermédiaire).

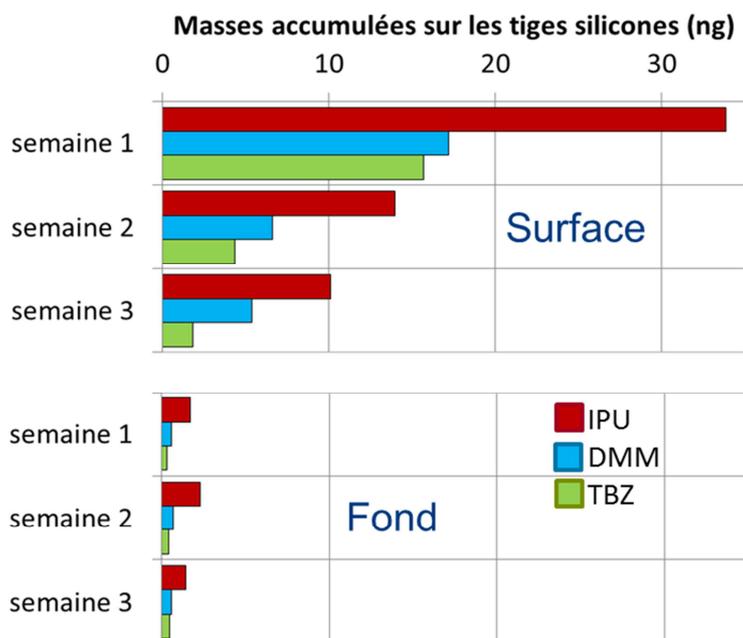


Figure 38. Evolution des masses piégées sur les échantillonneurs passifs (tiges silicone) au sein des piézomètres BE2 en surface et BE2P au fond, au cours des 3 semaines suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel et pour les trois pesticides étudiés (IPU : isoproturon, DMM : diméthomorphe, TBZ : tébuconazole). Site de St Joseph.

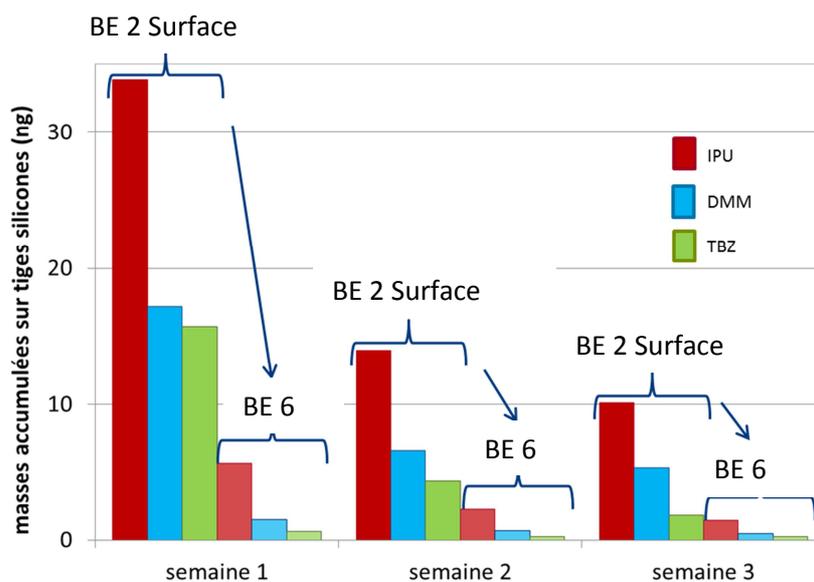


Figure 39. Evolution des masses piégées sur les échantillonneurs passifs (tiges silicone) au sein des piézomètres BE2 en surface (amont) et BE6 (aval), au cours des 3 semaines suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel et pour les trois pesticides étudiés (IPU : isoproturon, DMM : diméthomorphe, TBZ : tébuconazole). Site de St Joseph.

En conclusion :

Cette expérimentation confirme, pour un épisode simulé de période de retour proche de 2 ans et dans le contexte testé (sol très perméable, pente marquée et présence d'une nappe de versant superficielle), qu'un ruissellement concentré (en termes hydrologique et chimique), entrant en amont d'une placette enherbée est susceptible d'impacter la nappe sous-jacente. Les transferts hydriques et chimiques observés sont relativement rapides :

- Les pics de niveau piézométrique surviennent en moins de 2h et moins de 6h respectivement, dans les piézomètres BE2P et BE6,
- Les pics de concentration mesurés dans les 20 premiers centimètres de la nappe au BE2 Surface surviennent simultanément au pic de hauteur d'eau pour le traceur et environ 1h plus tard pour les pesticides (facteur de retard mis en évidence).

Il semble que les transferts latéraux rapides observés ne concernent que la surface de la nappe (transferts accélérés sur le toit de la nappe) et que les transferts plus profonds soient beaucoup plus lents et bien moindres.

En dépit de la rapidité de ces transferts on observe une forte atténuation des concentrations dans la nappe comparativement au ruissellement entrant (75 à 95% d'abattement sur les concentrations maximales observées au BE2 Surface) ; les résultats étant en général cohérents avec les propriétés d'adsorption des substances. La contamination s'atténue rapidement avec le temps (concentrations de 2 500 à 25 000 fois plus faibles dans la nappe au niveau du BE6, que dans le ruissellement simulé, après 10 jours).

Ces résultats ont été présentés au congrès du Groupe Français des Pesticides, 2015.

2. Etude des transferts latéraux de sub-surface au sein du versant de Ruyère

a. Suivis en conditions naturelles

La première année de suivi des niveaux d'eau et des concentrations en pesticides dans les piézomètres sur le site de Ruyère a permis de mettre en évidence l'existence d'écoulements de sub-surface sur le site de Ruyère, mais c'est véritablement à partir de l'installation de la tranchée d'interception qu'il a été possible de quantifier ces écoulements et de mieux cerner leur dynamique temporelle. On présente donc dans la suite le suivi 2014 et les principales conclusions que l'on peut en tirer quant à l'importance des écoulements latéraux dans le transfert des pesticides vers les eaux de surface et quant aux principaux facteurs en cause.

Les quatre substances suivies sont rappelées dans le Tableau 11 ainsi que leurs dates et taux d'application en 2014 (pulvérisation au canon).

Tableau 11. Pesticides étudiés en conditions naturelles : dates et taux d'application en 2014. Site de Ruyère.

Dates d'application	Taux d'application (g.ha ⁻¹)			
	Chlopyriphos-méthyl (CPM)	Spiroxamine (SPI)	Tébuconazole ¹ (TBZ)	Diméthomorphe ¹ (DMM)
2014/05/18	337.5	-	107.5	-
2014/05/29	-	-	107.5	-
2014/06/11	-	-	107.5	-
2014/06/27	-	300	-	226
2014/07/16	337.5	300	-	-

¹ substance appliquée pour la première fois sur cette parcelle en 2014.

a.1. Résultats hydrologiques :

Bien que le suivi ait démarré au début du mois de mars 2014, aucun écoulement de sub-surface n'a été mesuré avant juillet, en raison de précipitations printanières de faible volume ou de trop forte intensité (Figure 40). Trois événements d'écoulements de sub-surface (A, B et C) ont été enregistrés en juillet 2014. L'événement A suit une pluie cumulée de 29 mm (premier pic) et de 22 mm (second pic). Les événements B et C surviennent après une pluie cumulée de 34 mm et 31 mm respectivement.

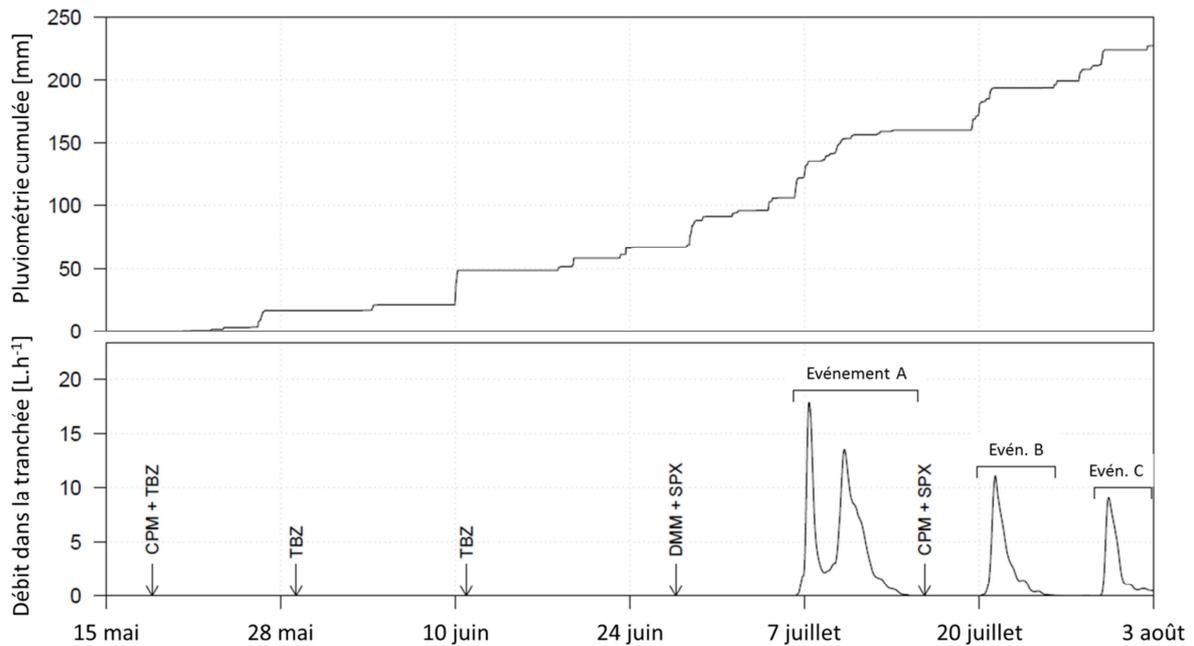


Figure 40. Pluie cumulée (en haut) et flux de sub-surface moyenné sur 3h (en bas) de mi-mai 2014 au 4 août 2014. Dates d'application des substances indiquées par les flèches. A, B, C désignent les trois épisodes de sub-surface mesurés. Site de Ruyère.

On constate que le déclenchement des écoulements de sub-surface est très dépendant du volume des pluies antérieures et de leur intensité. En particulier, les pluies intenses favorisent plutôt le ruissellement du fait d'une moindre infiltration. Des pluies longues et de moindre intensité favoriseront au contraire l'infiltration et la recharge de la zone saturée dont le cumul aura une incidence directe sur l'occurrence des écoulements de sub-surface. Toutefois, le nombre de données observées est trop faible pour cerner plus précisément le déterminisme de ces transferts latéraux. Le recours à la modélisation pourrait pallier cette limite.

Comparaison ruissellement et sub-surface. Si l'on compare les débits ruisselés et les débits mesurés dans la sub-surface sur le suivi 2014, on constate que les débits ruisselés sont nettement plus importants (max 15 L/s pour le ruissellement contre max 18 L/h pour la sub-surface) (Figure 41). On observe cependant que les transferts dans le ruissellement sont très brefs (infra-horaire à quelques heures) comparativement aux transferts dans la sub-surface qui peuvent durer une dizaine de jours.

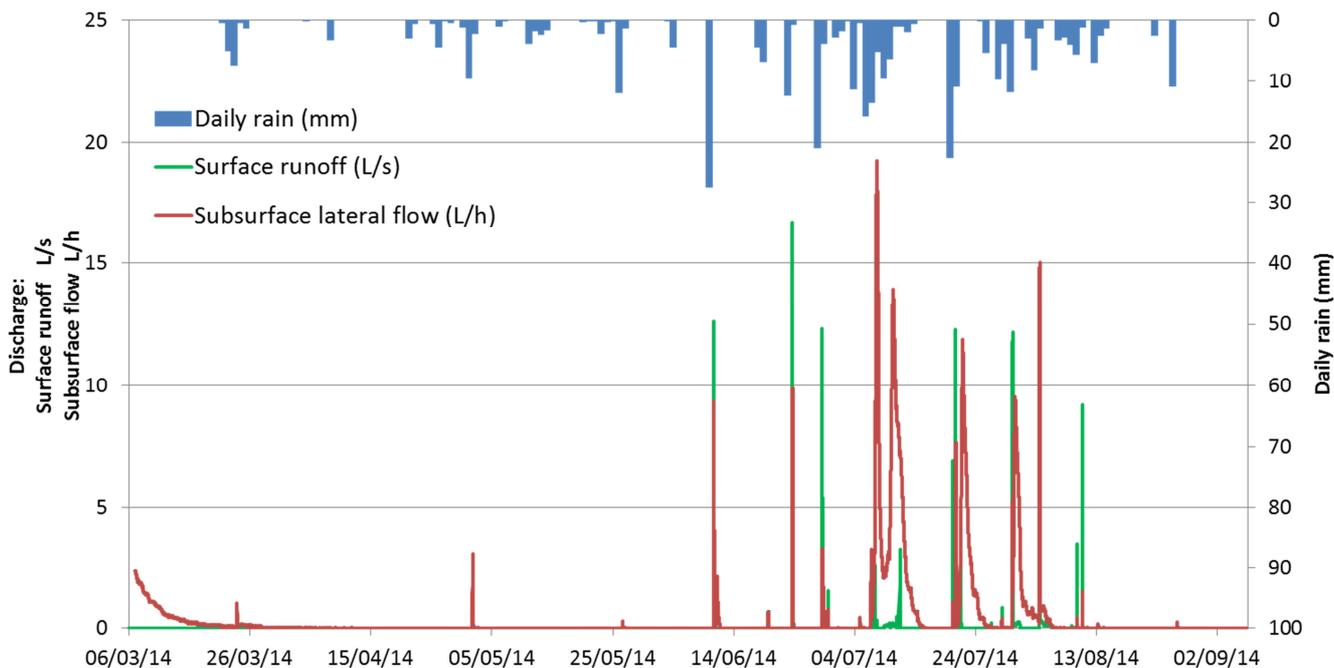


Figure 41. Débits observés sur la campagne de suivi en conditions naturelles sur le site de Ruyère pour le ruissellement de surface et les écoulements latéraux dans le sol, mis en correspondance du suivi pluviométrique.

a.2. Dynamique des pesticides dans les écoulements de sub-surface :

La stratégie d'échantillonnage au volume passé mise en œuvre dans la tranchée d'interception a permis de collecter 85 échantillons de sub-surface répartis sur les trois événements cités plus haut. En dépit de ce nombre élevé d'échantillons, on souligne toutefois que le tout début de l'événement A n'a pas pu être échantillonné en raison de problèmes techniques. De même, le milieu de la première décroissance de ce même événement n'a pas pu être échantillonné en raison d'un débit de sub-surface trop élevé par rapport au volume d'asservissement de l'échantillonnage, ce qui a conduit à un dépassement de la capacité du préleveur. Au total, 45 échantillons, choisis pour représenter au mieux les événements suivis, ont été analysés.

De façon générale, toutes les substances recherchées ont été quantifiées dans l'eau de sub-surface et ont montré une variation au moins d'un ordre de grandeur sur l'ensemble de la période suivie, mettant en avant la grande variabilité temporelle des concentrations observées. En particulier, sur les événements B et C qui ont été échantillonnés de façon complète, on observe de fortes concentrations en début d'événement, notamment le B, suivies d'une décroissance rapide. Les mêmes tendances sont observables sur l'événement C mais avec des concentrations initiales bien moindres, notamment pour le chlorpyriphos méthyl (Figure 42).

De tels pics de concentration en produits phytosanitaires en début d'apparition des écoulements de sub-surface ont également été mis en évidence par d'autres recherches (Johnson et al., 1996) avec, cependant, des amplitudes moindres. La principale hypothèse explicative est celle de la contribution d'écoulements préférentiels au sein de la macroporosité ou de fissures du sol. Dans le cas du site de Ruyère, de nombreuses racines de vigne se sont développées horizontalement au-dessus de l'horizon 3 et des études de profils de sols réalisés peu après des événements pluvieux ont effectivement révélé la présence d'écoulements privilégiés au niveau de ces racines. On peut aussi supposer qu'en début

d'événement, les substances dans la solution du sol sont directement disponibles pour les transferts (selon la distribution initiale entre matrice solide et eau du sol) mais que cette disponibilité diminue rapidement en lien avec les cinétiques de désorption des substances de la matrice vers la solution du sol au fur et à mesure de sa dilution par l'eau de pluie (Wallach et al. 1992).

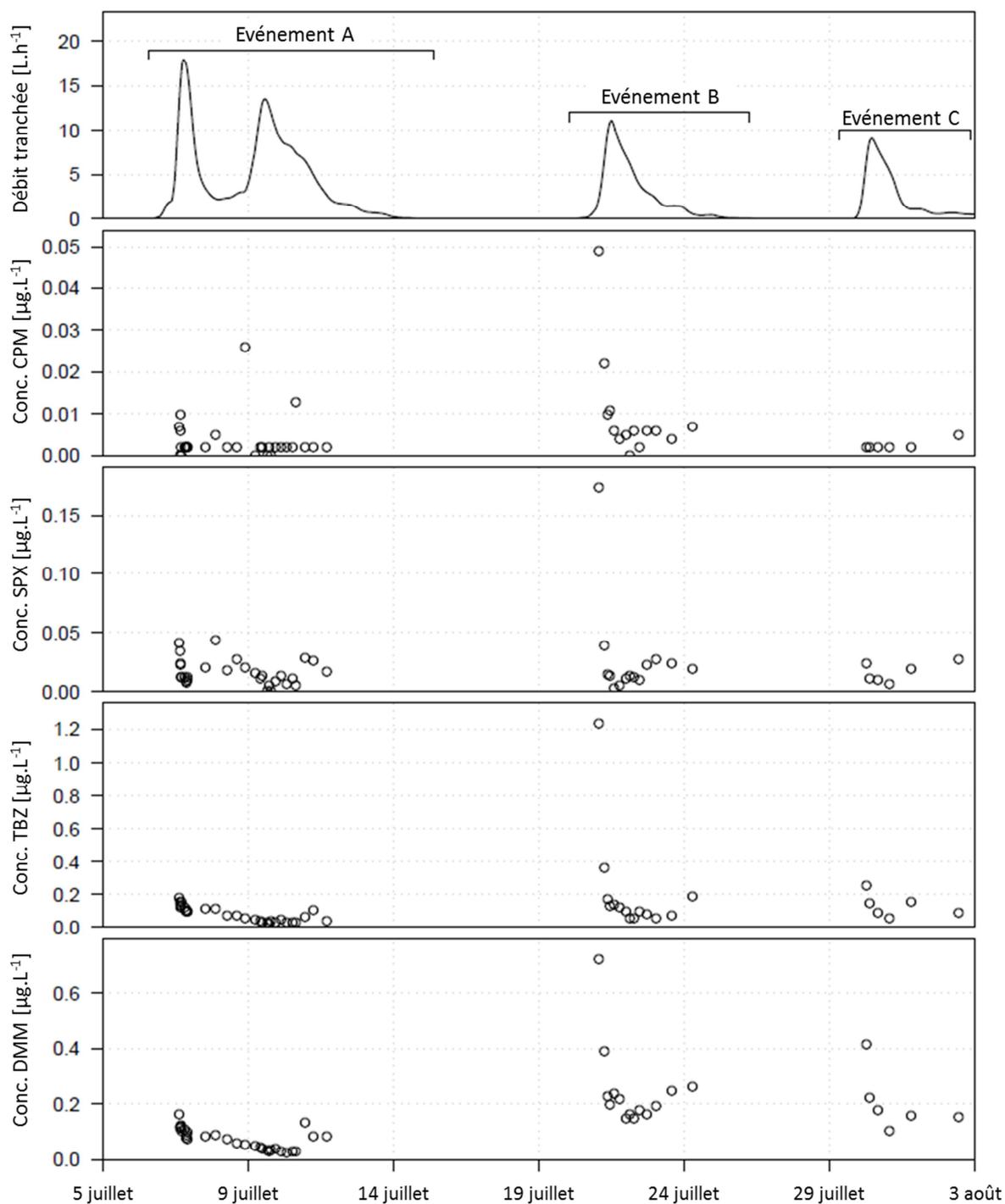


Figure 42. De haut en bas : flux de sub-surface moyenné sur 3h, concentrations en chlorpyriphos-méthyl (CPM), en spiroxamine (SPI), en tébuconazole (TBZ) et en diméthomorphe (DMM) mesurées dans les écoulements de sub-surface au cours des événements A, B et C, du 1^{er} juillet au 4 août 2014. Site de Ruyère.

A partir de l'ensemble des résultats obtenus, il a été possible de hiérarchiser les substances suivies selon leur concentration moyenne sur la période complète de suivi (Figure 43). Le diméthomorphe et le tébuconazole (dont on rappelle qu'ils n'avaient pas été appliqués les années antérieures) montrent des concentrations moyennes significativement plus élevées que celles de la spiromaxine et du chlorpyriphos-méthyl.

On observe donc des dynamiques de transfert et des niveaux de concentrations différenciés en fonction des dates d'application, des quantités appliquées et des propriétés de mobilité des substances (coefficient d'adsorption et demi-vie) ce qui est cohérent avec les résultats de Kahl et al., 2007 qui ont observé des taux de récupération plus importants pour les substances ayant les plus faibles coefficients d'adsorption.

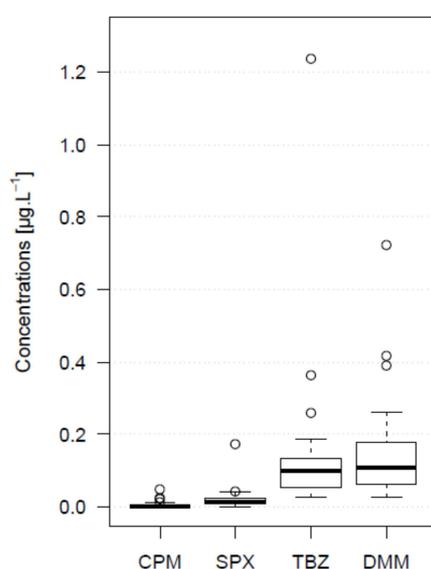


Figure 43. Boîtes à moustache des concentrations en chlorpyriphos-méthyl (CPM), spiromaxine (SPX), tébuconazole (TBZ), et diméthomorphe (DMM) sur la période d'observation. Site de Ruyère.

A l'issue de ces observations en conditions naturelles, il n'est cependant pas aisé d'évaluer l'influence respective des conditions hydrologiques et des propriétés des substances sur les transferts au sein des écoulements de sub-surface et ce, d'autant que les dates et les doses d'application diffèrent d'une substance à l'autre. L'expérience de traçage décrite ci-après a été mise en œuvre pour palier certaines de ces limites.

Comparaison ruissellement et sub-surface. Les concentrations maximales retrouvées dans le ruissellement sont supérieures d'un facteur 10 à 100 à celles mesurées dans les écoulements de sub-surface. La Figure 44 et la Figure 45 représentent le calcul des masses récupérées de mars 2014 à mars 2015 dans la sub-surface et dans le ruissellement relativement aux quantités appliquées sur les surfaces contributives estimées (Figure 15 et Figure 16). Cette estimation indique que les pertes dans la sub-surface seraient dix fois inférieures à celles dans le ruissellement.

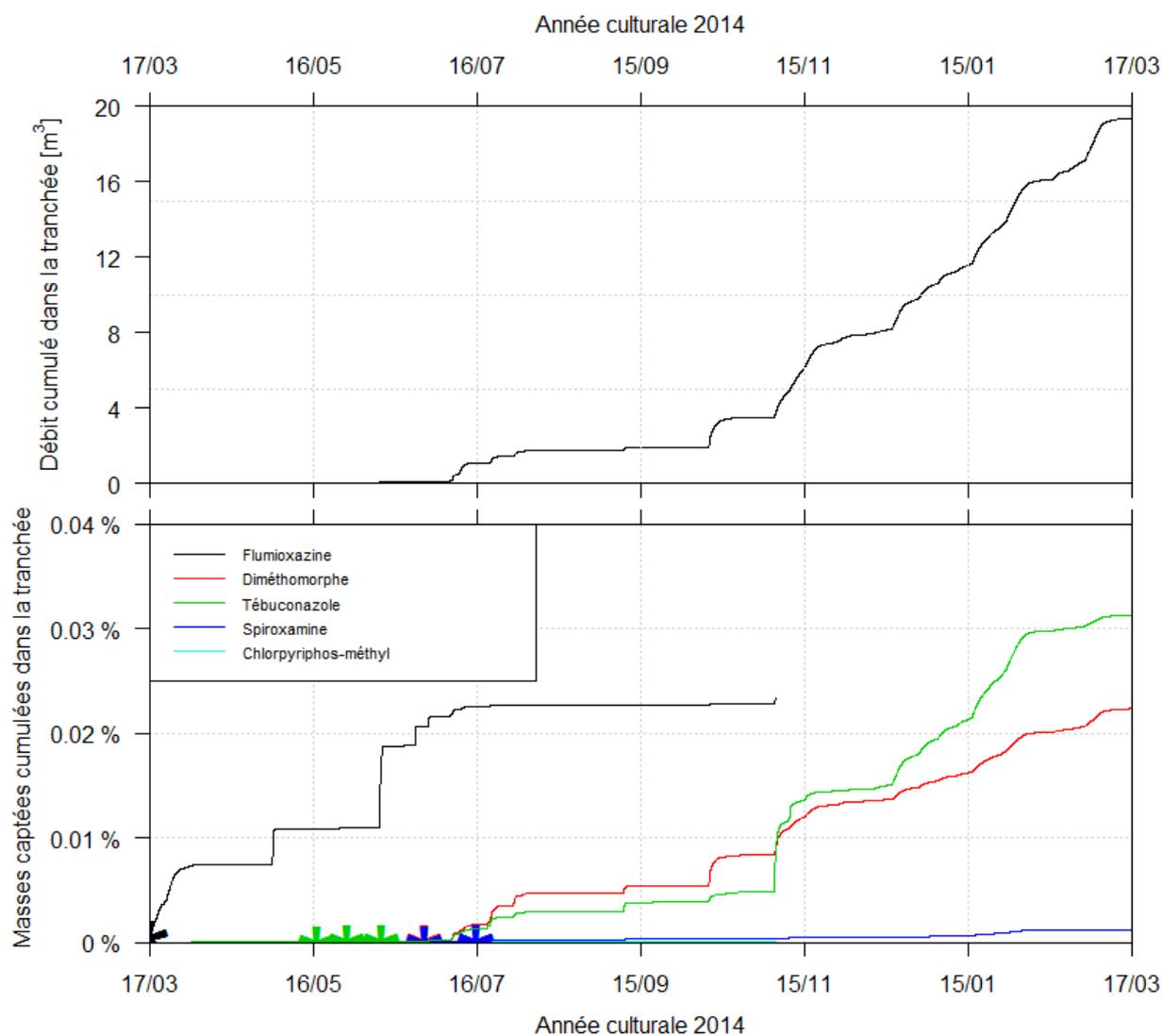


Figure 44. Volume de sub-surface cumulé au sein de la tranchée d'interception du 17/03/2014 au 17/03/2015 (en haut) et Bilan des masses des substances phytosanitaires étudiées dans l'eau collectée au sein de la tranchée sur la même période, exprimé en % de la quantité appliquée sur la surface contributive estimée (Figure 15). Les étoiles indiquent les périodes de traitement, la couleur faisant référence à chaque substance. Les mesures pour le chlorpyriphos méthyl et la flumioxazine s'arrêtent le 15/11/2014 en raison de la mise en œuvre du traçage (en bas). Site de Ruyère.

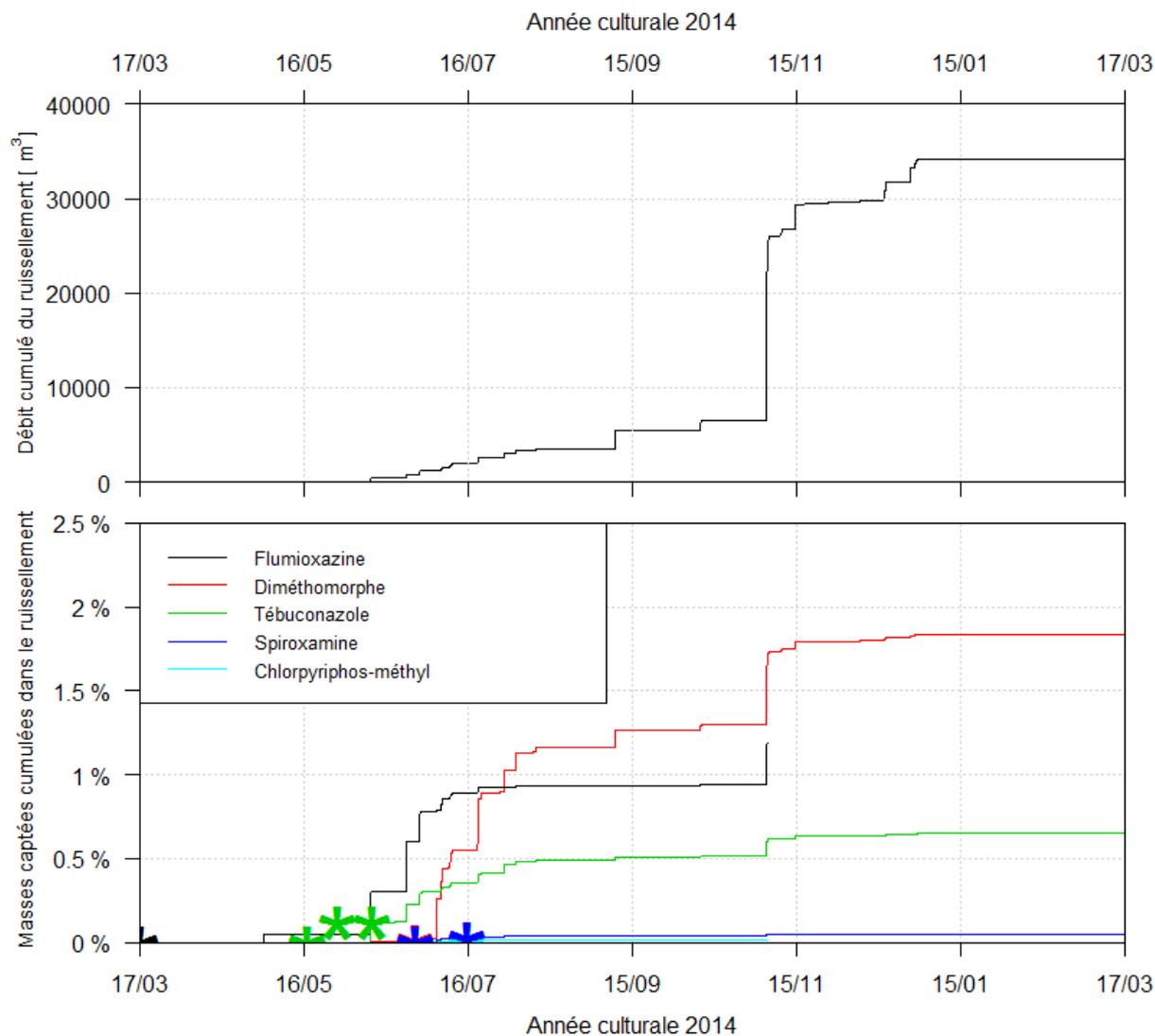


Figure 45. Volume de ruissellement cumulé passé au niveau du canal venturi du 17/03/2014 au 17/03/2015 (en haut) et Bilan des masses des substances phytosanitaires étudiées dans l'eau de ruissellement collectée sur la même période, exprimé en % de la quantité appliquée sur la surface contributive estimée (Figure 16). Les étoiles indiquent les périodes de traitement, la couleur faisant référence à chaque substance. Les mesures pour le chlorpyriphos méthyl et la flumioxazine s'arrêtent le 15/11/2014 en raison de la mise en œuvre du traçage. Site de Ruyère.

b. Expérimentation de traçage

b.1. Résultats hydrologiques :

La Figure 46 présente les mesures pluviométriques et hydrologiques au sein du versant étudié, sur les 15 premiers jours du traçage. On constate que l'on a bénéficié de conditions permettant d'observer un écoulement de sub-surface soutenu et relativement continu sur la période d'étude. Le profil de sol a même été saturé ponctuellement. Sur le reste du suivi (jusqu'en avril 2015), on note la présence d'une saturation suffisante du sol pour engendrer un écoulement de sub-surface continu dans la fosse d'interception. Les conditions étaient donc propices au transfert des produits phytosanitaires.

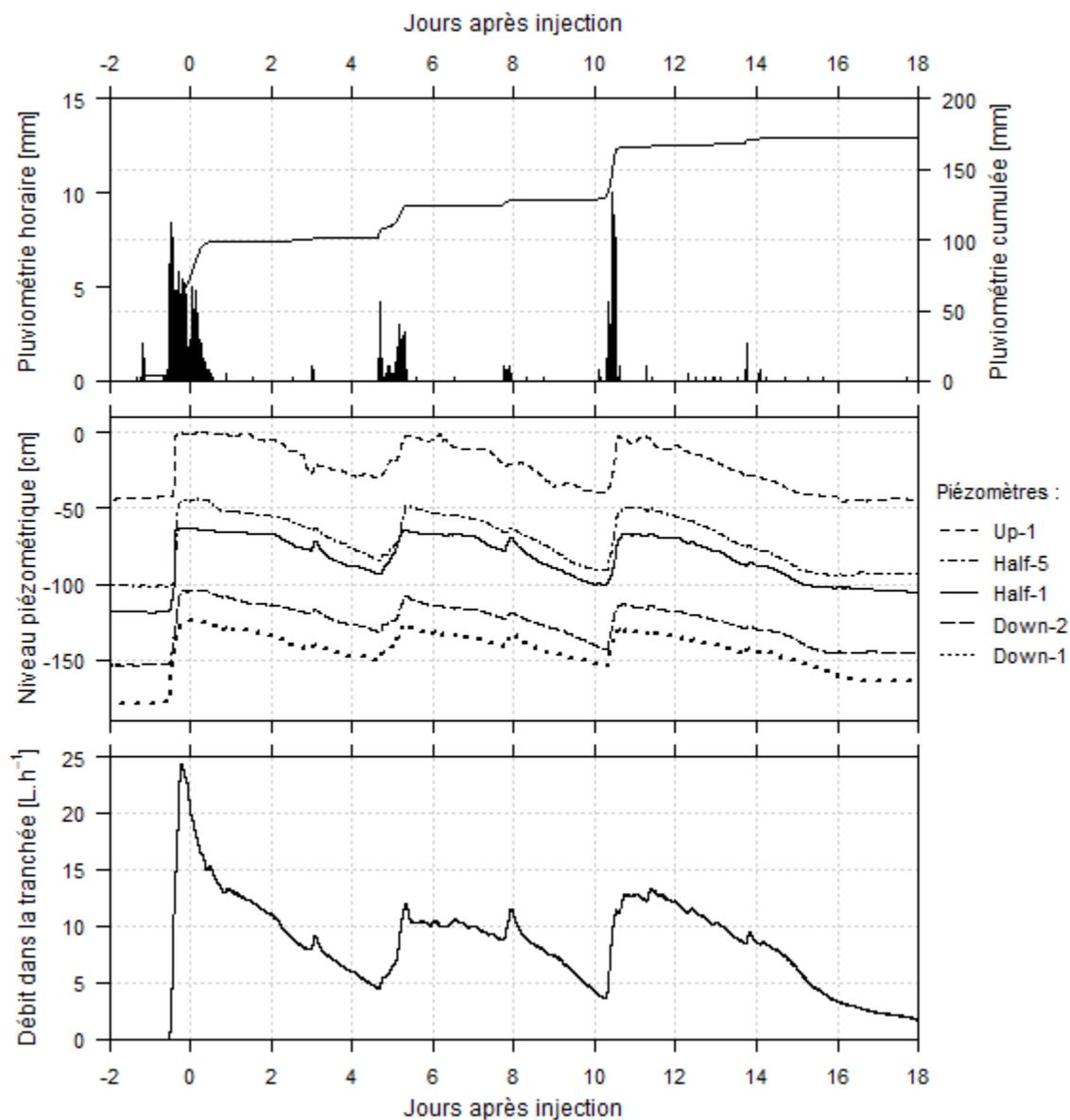


Figure 46. Conditions hydrologiques au cours de l'expérimentation de traçage (pluie horaire et cumulée, niveau d'eau dans les piézomètres et débit dans la tranchée d'interception). Site de Ruyère.

b.2. Dynamique et flux des pesticides dans les écoulements de sub-surface :

Transfert du bromure. Avant d'interpréter les résultats relatifs au transfert des produits phytosanitaires, on se concentre sur les résultats de transfert du traceur qui nous permettent de dégager des informations importantes en termes de nature d'écoulement et de dispersion latérale du panache de soluté. La Figure 47 montre en particulier que la progression du bromure se fait essentiellement selon un axe amont-aval (fosse d'injection – piézomètre intermédiaire Half3 – fosse d'interception) selon le gradient principal de la pente. La dispersion latérale est très faible (Half 1, 2, 4 et 5 montrent des concentrations négligeables en bromure), ce qui permet de dire que la majorité du panache transitant au sein de l'écoulement latéral est bien interceptée par la fosse aval.

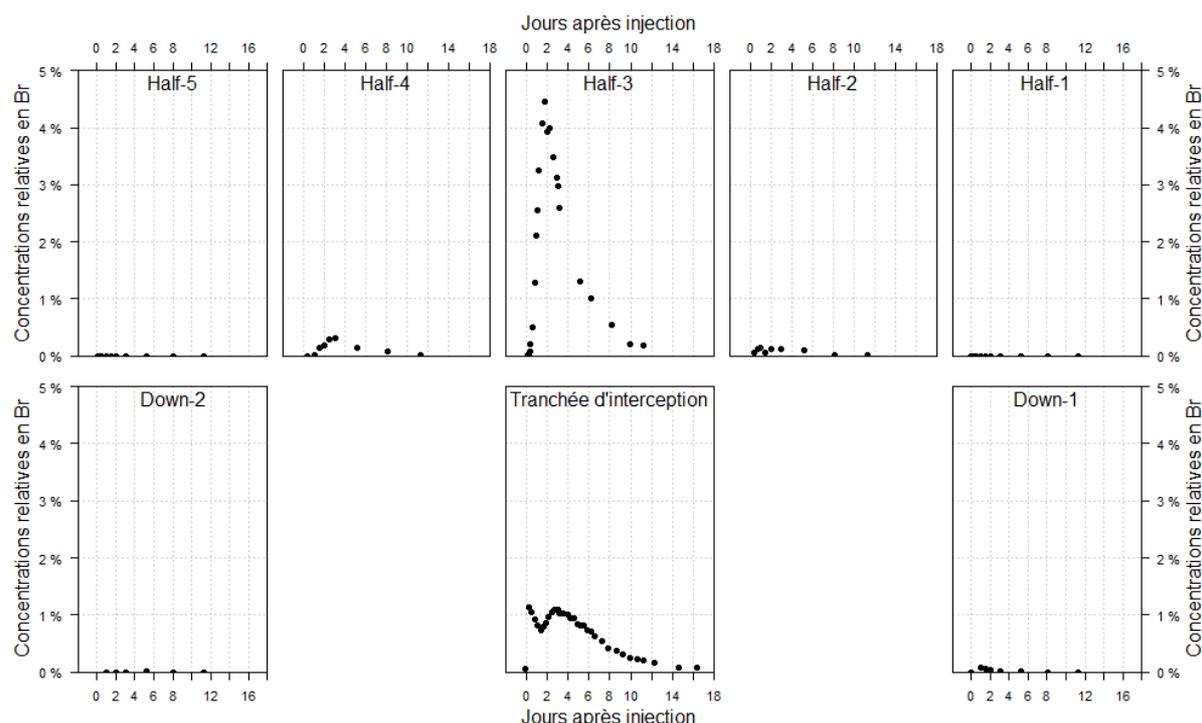


Figure 47. Chroniques de restitution du bromure dans les piézomètres et la tranchée d'interception aval. Site de Ruyère.

Alors que l'on n'observe qu'un seul pic de bromure au niveau du piézomètre intermédiaire (Half 3), deux pics sont nettement identifiables au sein de la tranchée d'interception.

Le premier arrive très tôt (moins de 4 heures après l'injection dans la fosse amont). Les vitesses de transfert calculées (plus de 1.6 m.h-1) ne sont pas compatibles avec les conductivités hydrauliques à saturation de la matrice du sol (2.2×10^{-3} – 8.3×10^{-1} m.h-1) et laissent penser que ce premier pic est lié à des écoulements préférentiels. Comme évoqué précédemment, des observations de profils de sol ont effectivement permis d'observer que les racines de vigne peuvent contribuer à accélérer les transferts latéraux (diamètres de racines observés allant de 0.1 à 1 cm, avec des extensions latérales sur plus de 60 cm de longueur de racines de 0.5 cm de diamètre).

En ce qui concerne le second pic de bromure observé dans la tranchée, l'hypothèse la plus probable est qu'il correspond au flux matriciel du sol. Cela est corroboré par les vitesses de transfert calculées à ce niveau (0.07 – 0.09 m.h-1) qui sont du même ordre de grandeur que celles calculées au niveau du piézomètre Half 3 et sont compatibles avec les mesures de conductivités hydrauliques à saturation du sol.

On constate donc que les écoulements latéraux dans ce sol sont liés à la fois à un transfert rapide préférentiel et à un transfert plus lent au sein de la matrice du sol. Il est important de noter que les écoulements préférentiels n'ont pas pu être détectés par le suivi piézométrique. De fait, compte tenu i) de l'hétérogénéité spatiale des transferts préférentiels et ii) du caractère spatialement ponctuel du suivi piézométrique, il est vraisemblable que ces dispositifs ne soient pas adaptés à la mesure des écoulements préférentiels. Ce constat montre, en revanche, l'intérêt de la mise en œuvre d'une tranchée d'interception pour rendre compte de ces écoulements.

Transfert des produits phytosanitaires. La Figure 48 présente les chroniques de solutés (bromure et produits phytosanitaires) observées sur les 15 premiers jours de suivi, selon le gradient amont-aval : de la fosse d'injection à la fosse d'interception, en passant par le piézomètre intermédiaire Half 3.

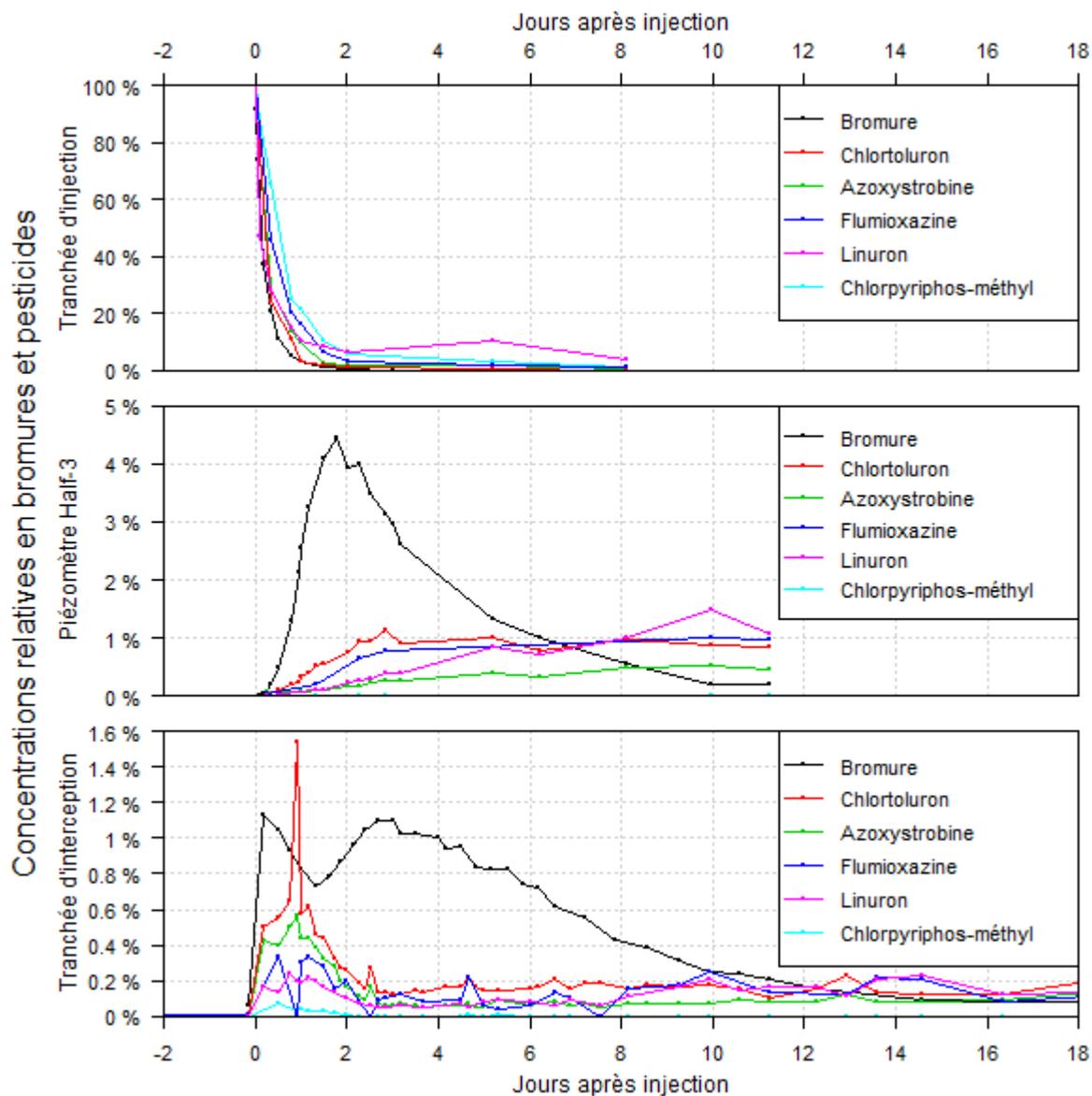


Figure 48. Chroniques de restitution des substances phytosanitaires dans la tranchée d'injection, le piézomètre central intermédiaire Half 3 et la tranchée d'interception. Site de Ruyère.

On observe tout d'abord une rapide décroissance des concentrations dans la tranchée d'injection, liée à la fois à la dilution par l'eau du sol et à la convection/dispersion des solutés vers l'aval. Conformément à ce qui a été observé précédemment pour le bromure, on observe une seule montée en concentration des produits phytosanitaires au niveau du piézomètre intermédiaire (Half3). On observe aussi un pic rapide de substances phytosanitaires au sein de la tranchée d'interception suivi d'une restitution plus lente et plus atténuée.

Dans tous les cas, les temps d'arrivée des phytosanitaires à leur concentration maximale sont plus longs que le temps d'arrivée du bromure (26 à 200 heures de retard sur le bromure selon les substances au niveau du piézomètre Half3) et les concentrations moyennes en phytosanitaires (exprimées en concentrations relatives à la concentration initiale dans la fosse d'injection) sont plus atténuées que celles en bromure (facteur 1.75 à 1600 au niveau du piézomètre Half 3 selon les substances) (Tableau 12). Ce retard et cette atténuation peuvent être mis en relation avec les propriétés d'adsorption/désorption et de dégradation des substances phytosanitaires.

On observe ainsi que les chroniques de concentrations de substances phytosanitaires au sein du piézomètre intermédiaire (Half 3) et les chroniques de concentration au sein de la tranchée d'interception faisant suite au pic rapide (écoulement matriciel supposé) se hiérarchisent de manière cohérente avec la valeur du coefficient d'adsorption de chaque substance mesurée au sein de l'horizon de sol 3. En revanche, au niveau du pic rapide et précoce identifié au sein de la tranchée d'interception (écoulement préférentiel supposé), la hiérarchisation des chroniques de concentrations des phytosanitaires est plutôt cohérente avec les coefficients d'adsorption des substances mesurés au sein de l'horizon 2. Cela est particulièrement flagrant pour l'azoxystrobine qui montre des valeurs très différentes de coefficients d'adsorption entre ces deux horizons de sol (Tableau 7). On note que le chlorpyriphos méthyl, qui présente à la fois un fort coefficient d'adsorption et une faible demi-vie, atteint rapidement sa limite de quantification.

Tableau 12. Temps de transfert, taux d'atténuation des concentrations aux pics, concentration moyenne sur une dizaine de jour tels que restitués au sein du piézomètre central intermédiaire et de la tranchée d'interception. Site de Ruyère.

		Bromure	Chlortoluron	Azoxystrobine	Flumioxazine	Linuron	Chlorpyriphos-méthyl
Half-3	Temps à la conc. max. [hrs]	42	68	240	240	240	6
	Conc.max. [%]	4.5	1.1	0.52	1.0	1.5	0.017
Half-3, du jour 0 à 11	Conc. moy ± Dev Std. [%]	1.4 ± 1.2	0.83 ± 0.22	0.34 ± 0.14	0.78 ± 0.26	0.74 ± 0.42	0.0023 ± 0.0028
Tranchée d'interception, Composante rapide	Temps au pic (hrs)	≤ 4	22	22	12	18	12
	Conc. au pic. [%]	1.1	1.5	0.56	0.34	0.24	0.067
Tranchée d'interception, du jour 2 à 18	Conc. moy. [%]	0.41 ± 0.35	0.16 ± 0.028	0.081 ± 0.019	0.13 ± 0.054	0.13 ± 0.052	0.00098 ± 0.0014

Si l'on raisonne maintenant en termes de flux et de masses totales de substances récupérées à l'issue de l'ensemble du suivi, on constate des taux de récupération inférieurs à 26 %, valeur obtenue pour le bromure, de la masse initiale injectée (Figure 13). Compte tenu de la faible dispersion latérale du traceur mise en évidence au sein du transect de piézomètres intermédiaires, on peut formuler deux hypothèses quant au devenir du reste du bromure non mesuré dans la tranchée d'interception. Une

première hypothèse est que la couche de sol de l'horizon 3, bien que présentant une forte rupture de perméabilité avec la couche sus-jacente, n'est, cependant, pas imperméable. Une fraction du bromure a donc pu migrer verticalement ou latéralement au sein de cette couche et ne pas être interceptée par la tranchée aval, dont la gouttière de collecte est placée, on le rappelle, au niveau de l'interface entre les horizons 2 et 3. La seconde hypothèse émise pour expliquer le faible taux de récupération du bromure est qu'une partie des flux aient pu transiter via des écoulements préférentiels non mis en évidence par les piézomètres et sortant du champ de récupération de la tranchée aval.

Les taux de récupération des substances phytosanitaires sur les six mois de suivi s'étalent de 0.36% (chlorpyrifos méthyl) à 19% (chlortoluron). A l'exception du chlorpyrifos méthyl qui disparaît rapidement et présente donc un taux de récupération très faible, on peut dire que les taux de récupération des autres substances au bout de six mois de suivi montrent des valeurs du même ordre de grandeur, y compris la flumioxazine qui théoriquement présente une capacité d'hydrolyse rapide. Deux hypothèses peuvent contribuer à expliquer ce résultat. La première est que durant la période de suivi (novembre 2014 à avril 2015) les températures étaient proches de 10°C ce qui a pu atténuer la biodégradation des substances. Il est aussi probable que les caractéristiques du sol de l'horizon 3 soient moins propices à la dégradation (faible taux de matière organique, pH faible).

Dans la tranchée, on peut distinguer trois phases de restitution des flux en fonction du volume d'eau dans l'écoulement latéral passé sur la totalité du suivi : une première phase de restitution rapide (correspondant à l'écoulement rapide préférentiel) suivie de deux phases de restitution plus faible traduisant probablement des disponibilités des substances au transfert latéral décroissantes dans le temps (épuisement des quantités disponibles ? formation de résidus liés ?) (Figure 49).

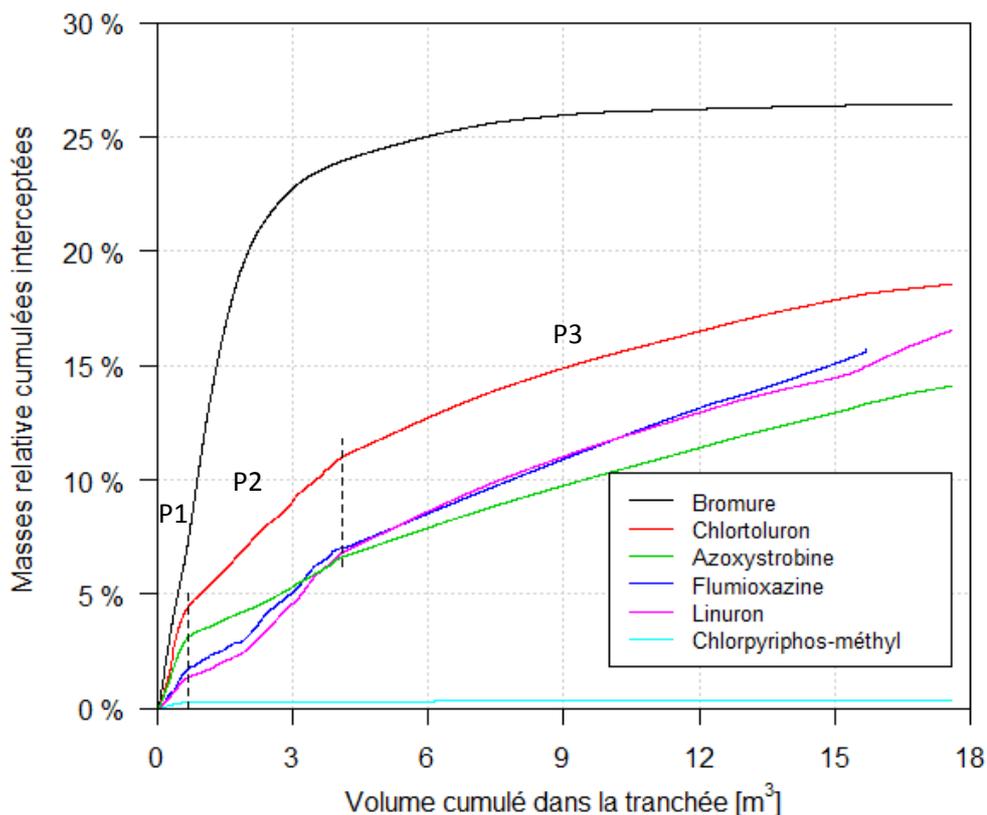


Figure 49. Masse cumulée relative de chaque substance en fonction du volume passé cumulé au sein de la tranchée d'interception. P1 : Phase 1, P2 ; Phase 2 et P3 : Phase 3. Site de Ruyère.

Tableau 13. Taux de récupération en % de chaque substance à la fin de l'expérimentation (6 mois) au sein de la tranchée d'interception et en g/g par unité de volume passé pour les trois phases de transfert identifiées. Site de Ruyère.

	Bromure	Chlortoluron	Azoxystrobine	Flumioxazine	Linuron	Chlorpyriphos-méthyl
Taux de récupération final [%]	26	19	14	16	17	0.36
1 ^{ière} phase Taux de récupération [g.g ⁻¹ .m ⁻³]	n.a.	7.7×10^{-2} (r ² = 0.98)	5.2×10^{-2} (r ² = 0.99)	2.8×10^{-2} (r ² = 0.99)	2.3×10^{-2} (r ² = 0.99)	4.5×10^{-3} (r ² = 0.98)
<i>Fin de la 1^{ière} phase, début de la 2^{ème} phase: 2 jours après injection (0.7 m³ de volume cumulé)</i>						
2 ^{ème} phase Taux de récupération [g.g ⁻¹ .m ⁻³]	n.a.	1.9×10^{-2} (r ² = 0.99)	1.0×10^{-2} (r ² = 0.99)	1.7×10^{-2} (r ² = 0.99)	1.8×10^{-2} (r ² = 0.98)	1.0×10^{-4} (r ² = 0.86)
<i>Fin de la 2^{ème} phase, début de la 3^{ème} phase: 27 jours après injection (4.1 m³ de volume cumulé)</i>						
3 ^{ème} phase Taux de récupération [g.g ⁻¹ .m ⁻³]	n.a.	5.4×10^{-3} (r ² = 0.98)	5.5×10^{-3} (r ² = 0.99)	9.3×10^{-3} (r ² = 0.95)	6.8×10^{-3} (r ² = 0.99)	4.7×10^{-5} (r ² = 0.99)
<i>Fin de l'expérimentation : 200 jours après injection (18 m³ de volume cumulé)</i>						

La Figure 50 représente les résultats obtenus grâce aux échantillonneurs passifs (tiges silicones) placés au sein des piézomètres ou de la tranchée d'interception au cours de la première semaine de traçage. Les résultats sont différenciés selon le statut des substances recherchées que l'on peut classer en trois groupes :

- Pour les substances injectées dans le cadre du traçage, (graphique de gauche), les résultats confirment le suivi décrit précédemment, à savoir un transfert axial de l'amont vers l'aval, avec une forte atténuation des ratios calculés, selon cet axe,
- Pour les substances non utilisées dans le traçage mais appliquées en 2014 par le viticulteur, (graphique du centre), on observe une présence plus généralisée et fluctuante (le ratio augmente du piézomètre de référence aux piézomètres aval mais s'avère plus comparable au ratio de référence au sein de la tranchée d'interception),
- Pour les substances interdites (ou leur métabolite), (graphique de droite), leur présence semble assez homogène dans l'ensemble des dispositifs échantillonnés. En particulier, on n'observe pas d'atténuation amont-aval.

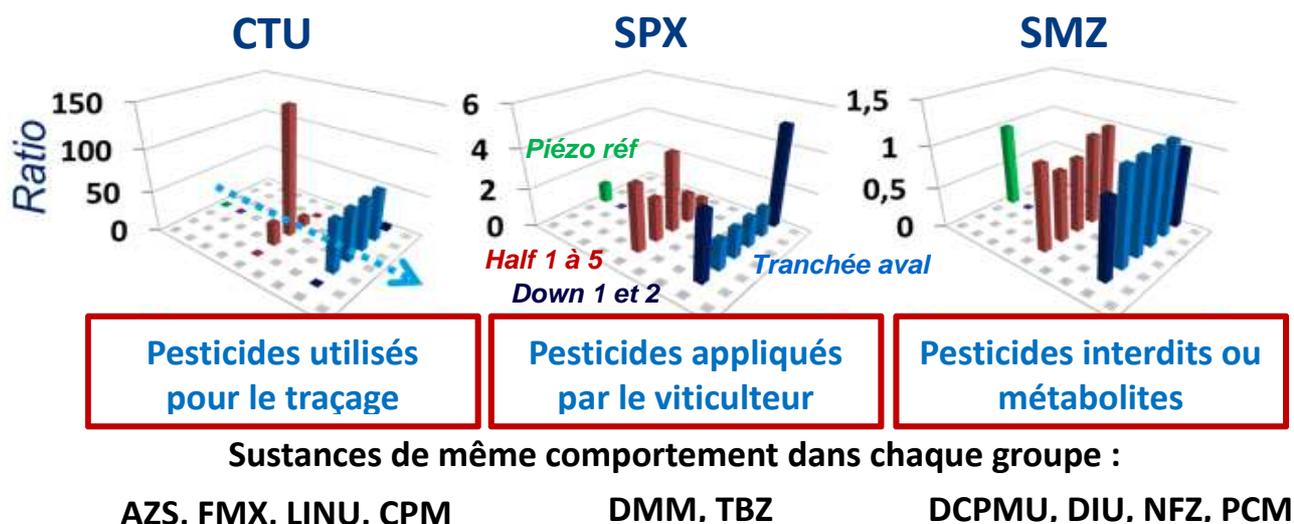


Figure 50. Représentation du ratio entre la masse de substance mesurée sur chaque TS au sein des piézomètres intermédiaires (Half 1 à 5 : bâtons rouges), le long de la tranchée d'interception (bâtons bleu roi) et des deux piézomètres aval (down 1 et 2 : bâtons bleu marine) relativement à la masse mesurée en amont de la zone de traçage, au sein d'un piézomètre de référence (bâtons verts). AZS : azoxystrobine, CTU : chlortoluron, FMX : flumioxazine, LINU : linuron, CPM : chlorpyriphos méthyl, DMM : diméthomorphe, SPX : spiroxamine, TBZ : tébuconazole, DCPMU : métabolite du diuron, DIU : diuron, NFZ : norflurazon, PCM : procymidone, SMZ : simazine. Site de Ruyère.

Conclusion :

Cette étude a permis de mettre en évidence l'existence d'écoulements latéraux susceptibles de transférer des substances phytosanitaires au sein d'un sol présentant une rupture de perméabilité à moins d'un mètre de profondeur dans le contexte du Nord Beaujolais. Les transferts sont moindres en termes de concentrations et de flux comparativement au ruissellement (facteur 10) mais ils sont plus continus dans le temps et donc susceptibles de soutenir une contamination chronique.

Le sol de la zone saturée où ont lieu les écoulements peut toutefois contribuer à une certaine atténuation des transferts de pesticides selon la distance parcourue : ainsi, si on se réfère au bromure, dont on fait l'hypothèse qu'il n'interagit pas avec le milieu (principe des traceurs de l'eau), on a pu quantifier un taux de réduction totale des masses de substances phytosanitaires transférées dans l'écoulement latéral variant de 4.7% à 18% de la masse initiale injectée par mètre de sol parcouru, selon les substances considérées. Il faut être vigilant sur le fait que ces valeurs ne prennent en compte que l'atténuation des flux au sein de l'écoulement saturé : en particulier, elles ne prennent pas en compte la rétention et dégradation possibles au sein de la zone non saturée du sol (non étudiée dans ce travail). Elles montrent cependant, qu'une fois que les substances ont atteint la zone saturée, les taux d'atténuation de flux comparativement au bromure sont très dépendants de la distance parcourue et des propriétés des substances. Ainsi, à titre d'exemple, pour la substance la plus mobile étudiée (chlortoluron) il faudrait en théorie plus de 20 m pour obtenir une atténuation de flux latéral proche de 100% alors que 6 m suffiraient pour la molécule la moins mobile étudiée (chlorpyriphos méthyl).

Dans le contexte du Beaujolais, où on rencontre un grand nombre d'aménagements (rases, fossés) susceptibles de collecter les écoulements latéraux de faible profondeur directement au sein des parcelles, une vigilance particulière devra donc être apportée pour limiter les apports latéraux. En particulier, l'enherbement inter-rang ou l'enherbement des rases pourraient contribuer à diminuer les masses de substances transférées en augmentant leur adsorption et leur dégradation du fait de taux de matières organiques du sol plus élevés. Il est cependant important de vérifier si cet enherbement ne peut pas aussi induire une augmentation de l'infiltration et donc de l'écoulement latéral subséquent, du fait d'un système racinaire plus développé. C'est ce que nous avons cherché à mesurer dans la partie suivante, sur le site de Bellevue.

Même si la calibration des échantillonneurs passifs n'a pas été réalisée (pas d'interprétation en termes de concentrations possible), les résultats semi-quantitatifs associés montrent que de tels outils sont suffisamment réactifs pour rendre compte de l'évolution amont-aval du transfert latéral observé au cours du traçage et permettent de renseigner sur la présence plus ou moins généralisées d'autres substances dans la zone saturée du sol étudié.

Ces résultats ont été présentés à des congrès (GFP, 2014, Ioanina, 2014, Piacenza, 2015) et ont été publiés dans Peyrard et al., 2015, Peyrard et al. 2016 (soumis).

3. Etude de l'effet d'un enherbement inter-rang sur le transfert de pesticides sur le site de Bellevue

a. Bilans hydriques

La Figure 51 montre les cumuls d'eau ruisselée et percolée mesurés sur le site de Bellevue au cours des suivis des saisons de septembre 2013 à août 2014 (830 mm de pluie cumulée) et de septembre 2014 à août 2015 (755 mm de pluie cumulée). On constate que les taux de restitution sont bien moindres sur la saison 2013/2014. Dans tous les cas, l'inter-rang désherbé engendre globalement bien plus de ruissellement que l'inter-rang enherbé à l'échelle annuelle. La percolation semble, quant à elle, assez comparable d'une modalité à l'autre sur la saison 2013/2014 alors que la percolation paraît un peu plus élevée sous l'inter-rang enherbé sur la saison 2014/2015. Cependant, sachant que la surface captée par les lysimètres représente moins de 1% de la surface totale de chaque inter-rang et compte tenu de l'hétérogénéité spatiale des sols, cette information reste à considérer avec prudence.

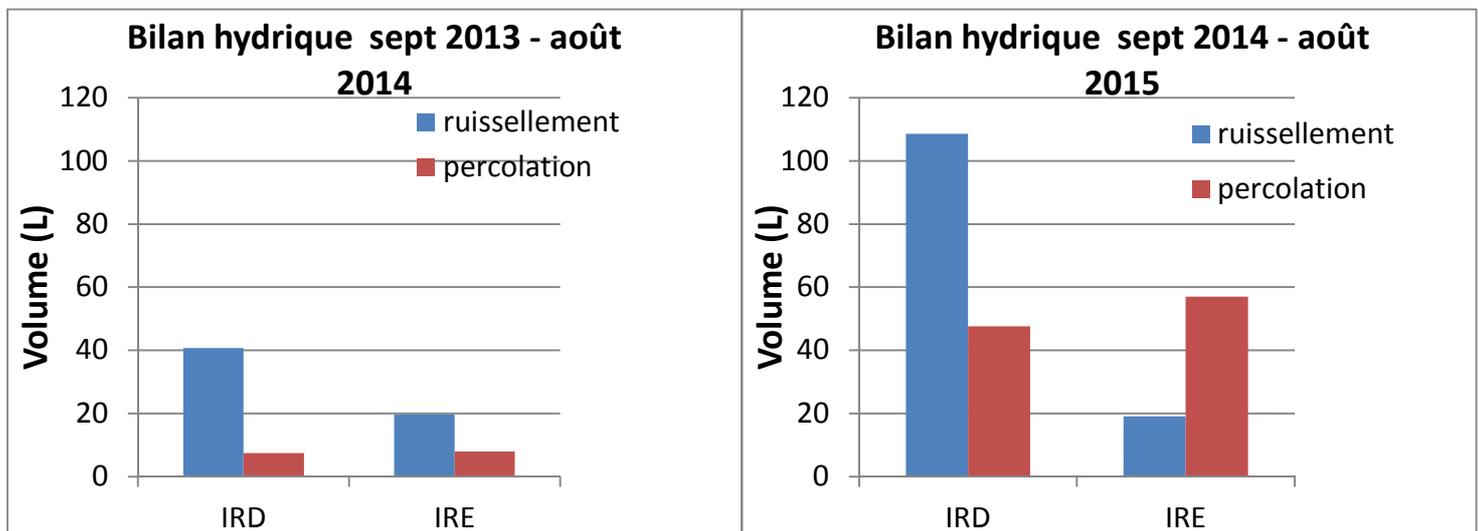


Figure 51. Cumuls d'eau de ruissellement et de percolation collectés sur le site de Bellevue en 2014 (à gauche) et en 2015 (à droite), selon les modalités Inter-rang désherbé (IRD) ou enherbé (IRE). Site de Bellevue.

Si on se concentre sur la période culturale de la vigne (mars à juillet), les volumes collectés sont nettement plus faibles et les tendances mises en évidence à l'échelle de l'année ne sont pas systématiques (Figure 52). On constate notamment que sur la saison culturale 2014 (cumul de pluie de 207 mm), le ruissellement a été un peu plus marqué sur l'IR enherbé, contrairement à la saison culturale 2015 (cumul de pluie de 131 mm). On peut faire l'hypothèse que les pluies orageuses printanières peuvent contribuer à gommer l'effet de l'enherbement sur le ruissellement, d'autant que les rangs ne sont pas enherbés.

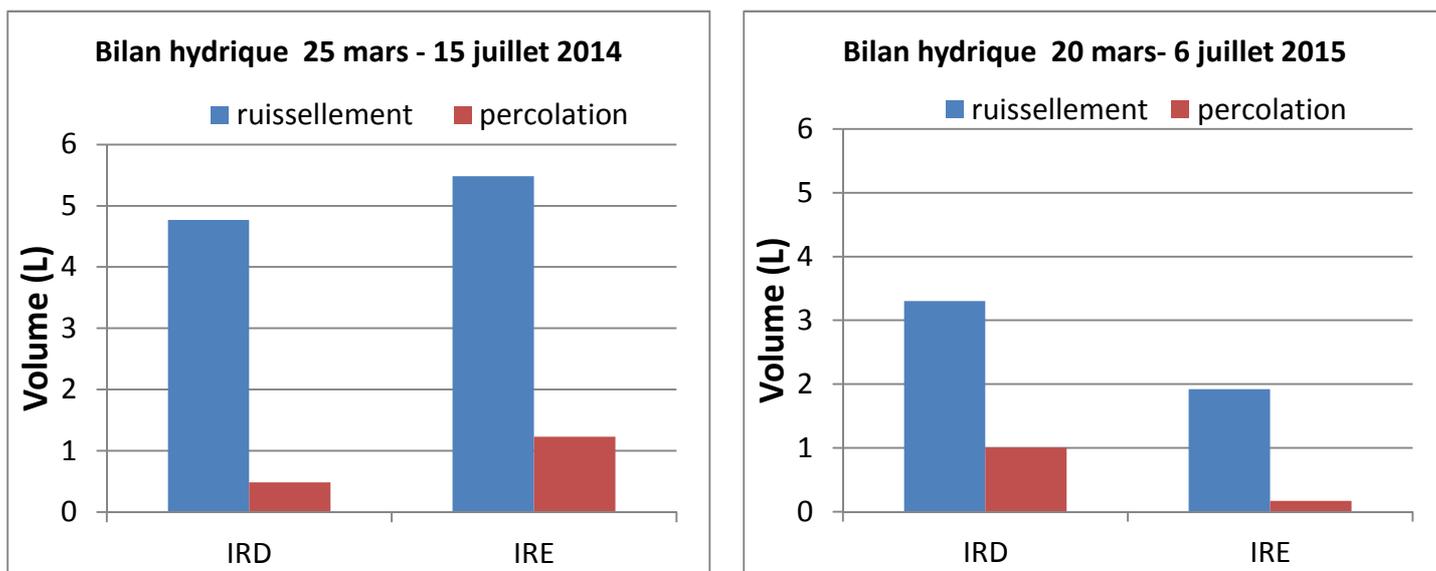


Figure 52. Cumuls d'eau de ruissellement et de percolation collectés sur le site de Bellevue de fin mars à mi-juillet 2014 (à gauche) et de fin mars à début juillet 2015 (à droite), selon les modalités Inter-rang dés herbé (IRD) ou enherbé (IRE). Site de Bellevue.

Pour ce qui est des volumes percolés, on observe des tendances différentes selon l'année avec une augmentation du volume percolé sous l'IRE sur la saison culturale 2014 alors que c'est l'inverse qui est observé sur la saison culturale 2015. On souligne que ces mesures sont très hétérogènes selon les conditions locales autour des lysimètres et leur représentativité, en termes de volume total récupéré, par rapport à l'ensemble du rang, à considérer avec prudence. Il n'est donc pas aisé de conclure quant à l'influence de l'enherbement sur une possible augmentation du volume de percolation. A titre d'information, on peut cependant préciser que des mesures de conductivité hydraulique à saturation effectuées dans des inter-rangs de vigne enherbés et dés herbés montrent des valeurs très peu différentes entre les deux modalités (Frésard, 2011) ; la pratique jouant le plus sur les valeurs de conductivité étant l'effet du passage du tracteur qui entraîne un tassement et une réduction des capacités d'infiltration du sol.

b. Transferts des produits phytosanitaires suivis sur la période culturale

Sur la campagne de suivi 2014, seulement un événement (sur 2 suffisamment conséquents sur la période d'intérêt de mai à juillet) a été échantillonné. Un épisode complémentaire a été collecté et analysé en octobre 2014, en fin de saison culturale. En 2015, les conditions climatiques étaient très peu pluvieuses sur la période d'intérêt, et un seul épisode a pu être échantillonné en mai 2015. Les résultats et conclusions présentés ci-après mériteraient donc d'être consolidés. La Figure 53 compare les épisodes échantillonnés selon les volumes d'eau collectés et la pluie cumulée sur la même période. On constate que les volumes ruisselés de mai 2015 sont bien moins importants que ceux de juillet 2014. En revanche, les volumes percolés sont plus élevés en mai 2015. L'intensité de la pluie et l'antécédent d'humidité du sol sont des facteurs importants pouvant contribuer à expliquer ces différences. L'épisode automnal d'octobre 2014 montre les volumes ruisselés et percolés les plus élevés.

Si on compare les deux modalités IRD et IRE, il apparaît sur ces trois épisodes que le volume ruisselé est plus faible et le volume percolé est plus élevé sous l'IRD. Les tendances sont donc très variables selon que l'on considère les échelles de l'année, de la saison ou de l'épisode.

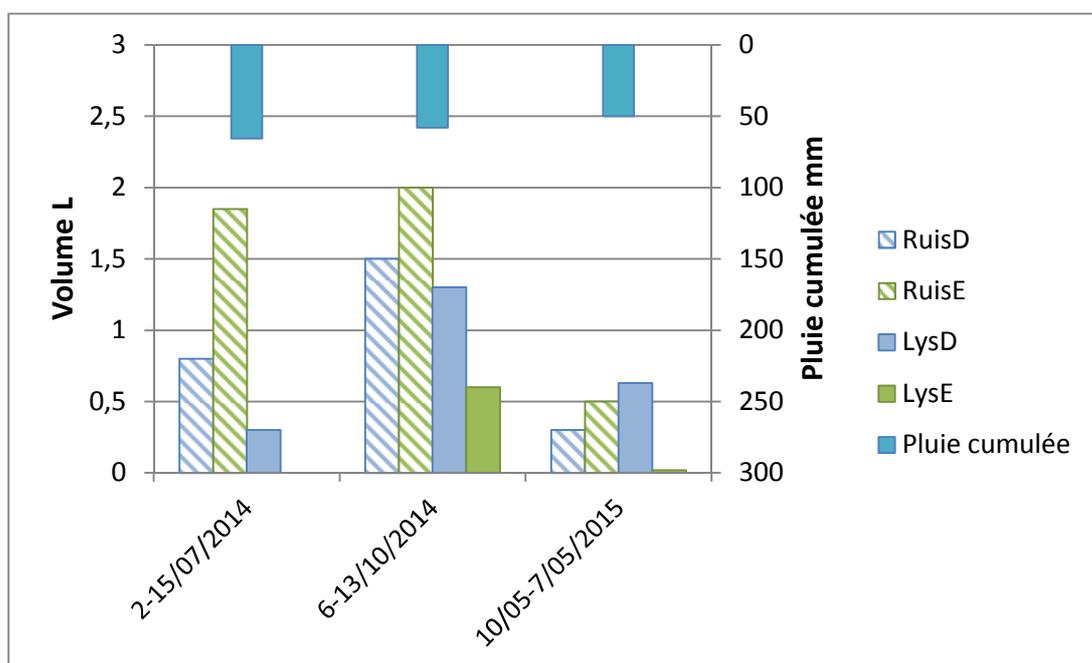


Figure 53. Cumuls d'eau ruisselée (Ruis) ou percolée (Lys) collectés dans les inter-rangs désherbés (D) ou enherbés (E) au cours des 3 épisodes échantillonnés pour analyses de produits phytosanitaires. Site de Bellevue.

On rappelle que lors de cette étude, on s'est concentré sur le suivi de quatre substances (3 fongicides : diméthomorphe, spiroxamine, tébuconazole et 1 insecticide : chlorpyriphos méthyl). Les calendriers de traitement en 2014 et 2015 sont donnés en annexe 18. Pour information, l'annexe 19 présente un suivi plus large (recherche de 23 substances) au cours de l'épisode échantillonné en 2015.

En termes de concentrations, on constate qu'au cours du suivi 2014, elles sont nettement plus élevées dans le ruissellement que dans l'eau de percolation quelle que soit la modalité IRE ou IRD (Figure 54). Pour l'IRD, on observe par exemple que les concentrations dans le ruissellement sont supérieures aux concentrations dans la percolation d'un facteur multiplicatif de l'ordre de 1,5 pour le diméthomorphe, de 14 pour la spiroxamine et de 120 pour le tébuconazole sur l'épisode de juillet 2014. Ces ratios de concentrations entre ruissellement et percolation sont cohérents avec les coefficients d'adsorption mesurés à partir des sols de surface (horizon 1) du site de Ruyère (Tableau 7). Le chlorpyriphos, qui présente le plus fort coefficient d'adsorption mesuré, est le moins mobilisé que ce soit dans le ruissellement ou la percolation. Sur le suivi 2015, où l'épisode de ruissellement échantillonné est bien moins important, les mêmes tendances entre les concentrations dans le ruissellement et la percolation sont encore observables. Pour l'épisode automnal (octobre 2014), où on observe les concentrations dans le ruissellement les plus faibles comparativement aux épisodes de mai 2015 et juillet 2014, les tendances sont similaires sauf pour le diméthomorphe dont les concentrations dans le ruissellement apparaissent plus faibles que dans la percolation.

Si on compare les inter-rangs désherbés et enherbés, on constate que, dans quasiment tous les cas, les concentrations mesurées selon la modalité IRD sont supérieures à celles de la modalité IRE, que ce soit dans le ruissellement ou la percolation.

En termes de masses totales transférées, on rappelle que les résultats sont à considérer avec prudence du fait de la faible représentativité spatiale de volumes récupérés par les plaques lysimétriques (la surface cumulée des lysimètres représente moins de 1% de la surface de chaque IR).

Dans ces conditions, il apparaît que les masses transférées dans le ruissellement sont proches selon les deux modalités IRD et IRE. En revanche, les masses transférées dans la percolation sont nettement plus faibles dans la modalité IRE que dans la modalité IRD (Figure 55).

Les mêmes ordres de grandeur des masses de substances transférées dans le ruissellement de surface de l'IRD et de l'IRE sur les trois épisodes observés, sont liés au fait, qu'en dépit de concentrations plus faibles dans le ruissellement de l'IRE, les volumes d'eau ruisselés sont plus importants selon cette modalité (Figure 53), ce qui au final induit donc des masses ruisselées équivalentes selon les deux modalités.

Une hypothèse pour expliquer ces volumes ruisselés plus importants dans la modalité de l'IRE est que cet inter-rang présente une pente légèrement plus marquée que l'IRD et que les épisodes collectés correspondent à des événements orageux dont l'intensité peut minimiser l'effet de l'enherbement.

Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, on s'est focalisé sur les transferts durant la saison culturale de la vigne où les concentrations transférées sont les plus importantes, mais en terme de masses de substances totales transférées, il serait également intéressant de réaliser un bilan à l'échelle d'une année culturale complète.

En conclusion :

A l'échelle de trois épisodes collectés en mai, juillet et octobre, on observe de façon générale que les concentrations en substances phytosanitaires suivies (chlorpyrifos méthyl, tébuconazole, spirométholam et diméthomorphe) sont plus élevées dans le ruissellement et la percolation de la modalité IRD, l'enherbement semblant donc induire une réduction de concentrations sans préjuger des processus en cause (dilution, rétention, dégradation). Par ailleurs, les flux d'eau et de substances percolés à l'échelle de l'événement apparaissent plus faibles dans la modalité IRE ce qui contribuerait à considérer que l'enherbement n'engendre pas une percolation plus importante que la modalité IRD pour les événements suivis et le sol considéré. Comme ces résultats sont déduits d'un faible nombre d'observations, ils gagneraient à être consolidés.

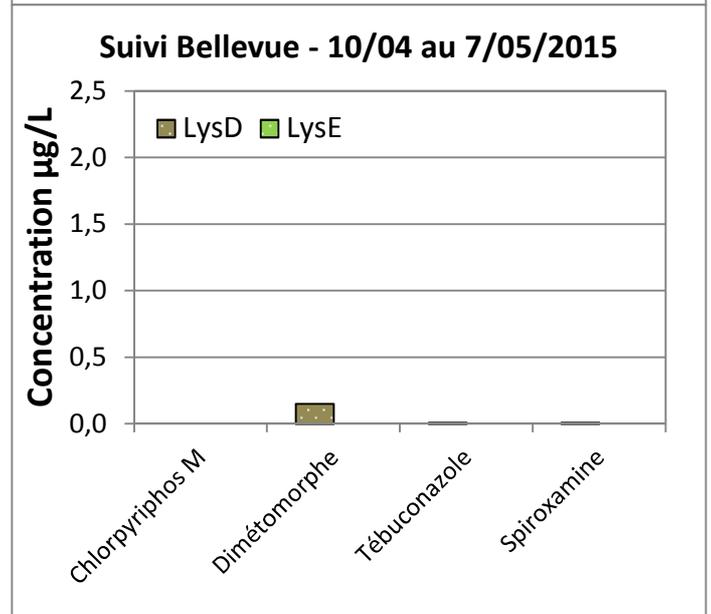
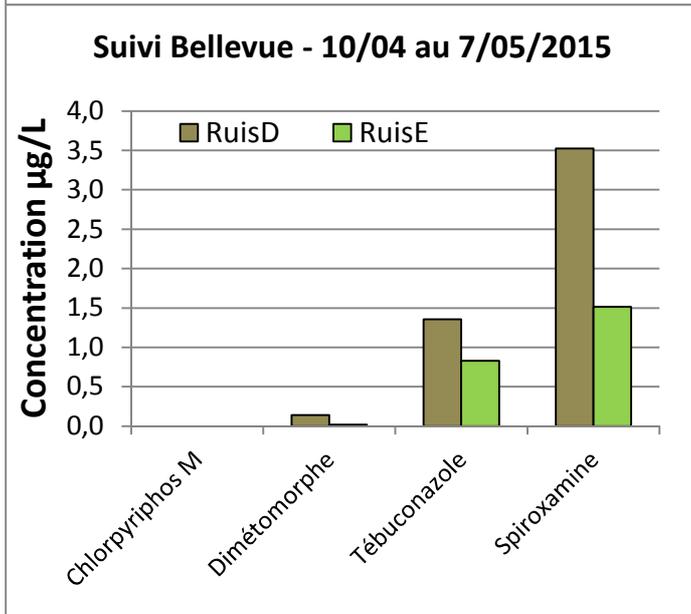
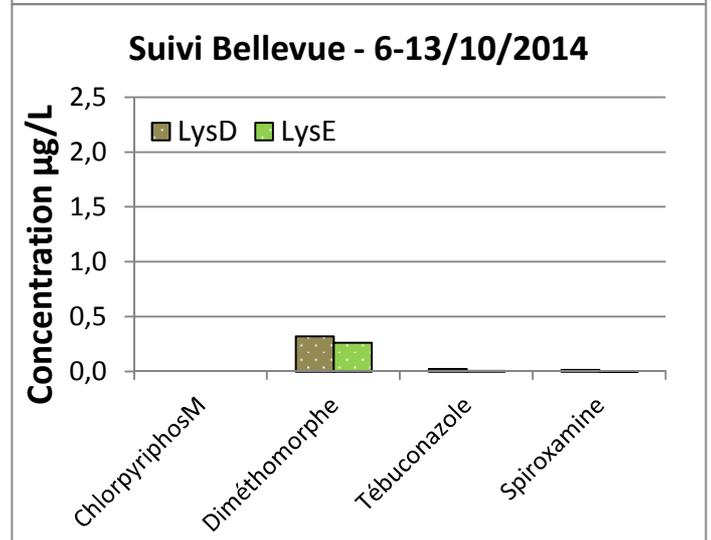
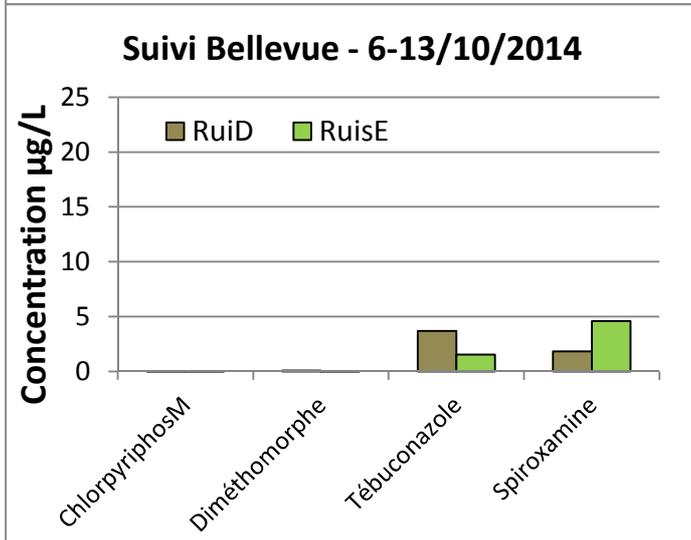
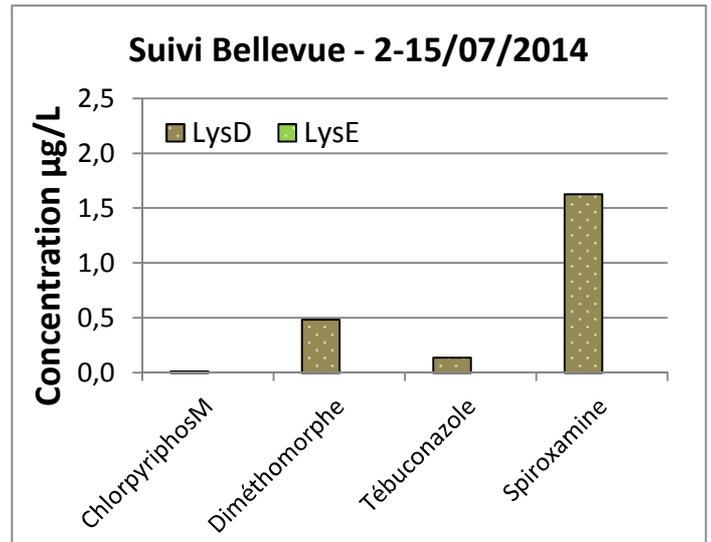
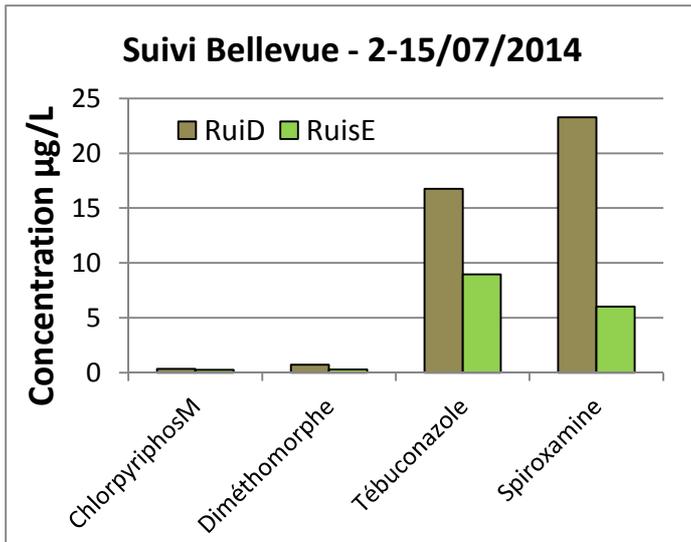


Figure 54. Concentrations moyennes mesurées dans les échantillons cumulés de ruissellement et de percolation sur les IR dés herbé (IRD) ou en herbé (IRE) sur les périodes du 2 au 15 juillet 2014 et du 6 au 13 octobre 2014. Site de Bellevue.

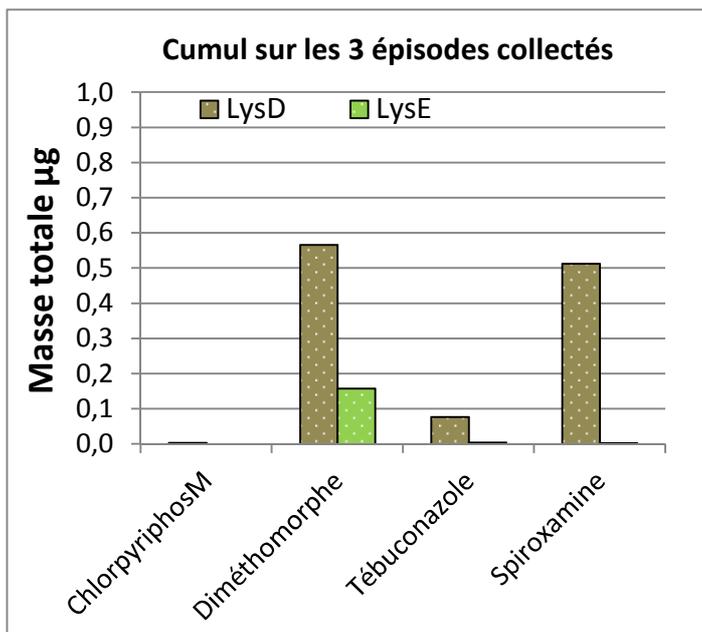
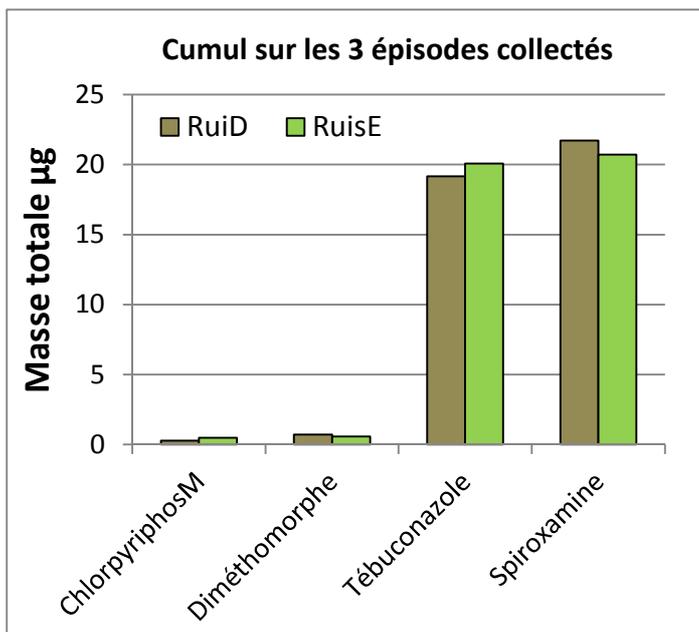


Figure 55. Masses mesurées dans les échantillons cumulés de ruissellement et de percolation sur les IR désherbé (IRD) ou enherbé (IRE) cumulées sur les 2 périodes de collecte : du 2 au 15 juillet 2014 et du 6 au 13 octobre 2014. Site de Bellevue.

Conclusions et perspectives

On tente ici de montrer en quoi les résultats obtenus dans cette étude permettent d'apporter des éléments de réponse aux questions initiales posées.

Question 1. Dans quelle mesure un sol de zone tampon enherbée située en bordure de cours d'eau et recevant une arrivée importante de ruissellement concentré est-il capable de réduire significativement le transfert des pesticides ruisselés sans engendrer dans le même temps une contamination de la nappe d'accompagnement du cours d'eau via la reprise des pesticides infiltrés par des écoulements latéraux ?

Cette étude a montré que dans le contexte spécifique des sols sableux du Nord Beaujolais, une bande enherbée interceptant un ruissellement concentré permet de réduire significativement le risque de transfert par ruissellement jusqu'au cours d'eau grâce à une infiltration rapide dans le sol. En dépit de la rapidité des écoulements en jeu, une atténuation croissante des concentrations dans l'eau infiltrée à 50 cm de profondeur est observée de l'amont vers l'aval de la bande enherbée. La contamination peut cependant atteindre la nappe sous-jacente mais à des concentrations moindres (atténuation de 83 à 96% de la concentration initiale dans le ruissellement selon les propriétés d'adsorption des substances). Ces observations mettent donc en avant l'intérêt de tels dispositifs. Toutefois, dans les situations à risque (nappe proche de la surface, position riveraine d'un cours d'eau), il pourra être nécessaire de les compléter par des dispositifs de limitation des transferts plus en amont dans le versant. Les résultats semi-quantitatifs obtenus par le recours à des échantillonneurs passifs de type Tiges Silicones ont montré leur intérêt pour estimer la variation spatiale et temporelle de la contamination dans la nappe.

Question 2. Dans quelle mesure une infiltration répartie plus en amont dans la parcelle peut-elle contribuer à l'atténuation des transferts de pesticides dans le sol de la parcelle ou, au contraire, être redirigée vers le cours d'eau via des écoulements latéraux ? On distingue ici deux cas selon que l'on a présence ou non d'une nappe pérenne.

Cas d'un versant présentant une nappe pérenne (site de Saint Joseph).

En l'absence d'une infiltration massive de ruissellement concentré au sein de la bande enherbée de St Joseph, on observe que la plupart des substances retrouvées dans la nappe en bas de versant viticole sont des substances interdites ou des produits de dégradation. Quelques substances utilisées ont cependant pu être quantifiées à faible concentration (spiroxamine, florasulam, boscalid notamment). Le lien avec les pratiques n'est pas aisé à réaliser du fait d'enquêtes d'usages non exhaustives et de dynamiques de transfert peu connues.

On note la difficulté de réaliser des bilans d'atténuation de concentration au sein de la prairie de bas de versant étudiée compte tenu de l'hétérogénéité spatiale et temporelle des niveaux de contamination mesurés. Il semble toutefois se dégager un gradient d'atténuation des concentrations de l'amont vers l'aval de la bande enherbée, sauf pour certaines substances (norflurazon désméthyl, procymidone, terbuméton déséthyl notamment) qui montrent soit des concentrations assez proches, voire une augmentation de concentration, de l'amont vers l'aval de la bande enherbée. Les suivis en conditions naturelles et le recours à des échantillonneurs passifs ont permis de mettre en évidence des concentrations en général plus élevées au fond de la nappe qu'en surface où on a pu observer des variations rapides de concentrations en lien avec les épisodes pluvieux et la montée du niveau piézométrique. Les amplitudes de concentrations mesurées sont cependant restés dans le même ordre de grandeur que les concentrations mesurées en fond de nappe.

On en conclut qu'à l'échelle de ce versant, l'apport à la nappe de substances encore utilisées semble limité puisque ce sont essentiellement des substances anciennes maintenant interdites ou leur produits de dégradation qui sont quantifiées. Nous n'avons, cependant, pas pu échantillonner finement d'événement majeur de recharge de la nappe. L'apport possible de substances plus récemment appliquées depuis la zone non saturée vers la nappe n'a donc pas pu être mis en évidence. Il semble que la bande enherbée permette une atténuation des concentrations dans la nappe de l'amont vers l'aval, hormis pour quelques substances et en particulier des produits de dégradation.

Cas d'un versant caractérisé par une rupture de perméabilité à faible profondeur (site de Ruyère).

L'étude sur le site de Ruyère a permis de mettre en évidence l'existence de transferts latéraux de substances phytosanitaires, en lien direct avec la présence de la rupture de perméabilité, la topographie et des pluies d'intensité et durée compatibles avec la production d'une infiltration suffisante. En particulier, si de tels événements ont surtout lieu en automne/hiver, ils ont également pu être mis en évidence au printemps et en été. Ces écoulements sont à la fois liés à un transfert préférentiel, responsable de pics de concentrations pouvant atteindre le $\mu\text{g/L}$ selon les substances, et à un transfert matriciel plus lent et atténué. Cette dynamique diffère de celle du ruissellement de surface qui se manifeste par des concentrations beaucoup plus importantes (10 à 100 fois supérieures) mais des durées moindres (quelques heures). L'expérimentation de traçage a permis de mettre en évidence une atténuation possible des concentrations et des flux dans le sol de l'amont vers l'aval du versant étudié. Cette atténuation varie, à court terme, en fonction des propriétés d'adsorption des substances. Sur le long terme (étude sur 6 mois), et hormis pour la substance la moins mobile étudiée (chlorpyrifos méthyl) qui montre un très faible taux de transfert, les autres substances montrent des taux de récupération du même ordre de grandeur variant de 14 à 19% de la masse injectée. Ces observations indiquent que sur la durée et pendant la saison hivernale suivie (faibles températures) les propriétés des substances sont moins discriminantes sur leur transfert. Les taux d'atténuation de flux comparativement au bromure sont dépendants de la distance parcourue et de la substance considérée avec une moyenne de 9% d'atténuation par mètre linéaire parcouru au sein de l'écoulement latéral.

Dans le contexte du Beaujolais où on rencontre un grand nombre d'aménagements (rases, fossés) susceptibles de collecter les écoulements latéraux de faible profondeur dès l'intérieur des parcelles, il pourra être utile d'évaluer dans quelle mesure ces rases et fossés pourraient être aménagés (végétalisation, paillage, ...) afin de limiter leur capacité de transfert des substances phytosanitaires.

Question 3. Dans quelle mesure un enherbement inter-rang peut-il atténuer le transfert des pesticides (fongicides notamment) dans le sol des parcelles ?

Le suivi sur le site de Bellevue est à considérer avec prudence car on ne dispose que d'un nombre limité de mesures. Les résultats obtenus mettent en avant une forte limitation des volumes de ruissellement générés au sein de l'inter-rang enherbé (IRE) comparativement à l'inter-rang désherbé (IRD) à l'échelle de l'année hydrologique. Les volumes percolés mesurés paraissent plus similaires.

En revanche à l'échelle de la saison culturale et de l'événement sur cette période, l'influence de l'enherbement en termes de transferts hydriques est moins marquée et on peut observer des volumes ruisselés similaires sur les deux modalités, voire supérieurs selon la modalité IRE. De même les volumes percolés peuvent apparaître plus importants selon la modalité IRD que selon la modalité IRE. Ces résultats mettent en avant la grande variabilité temporelle et spatiale des processus en jeu et la probable influence sur les résultats de l'intensité de pluie et de l'antécédent d'humidité du sol.

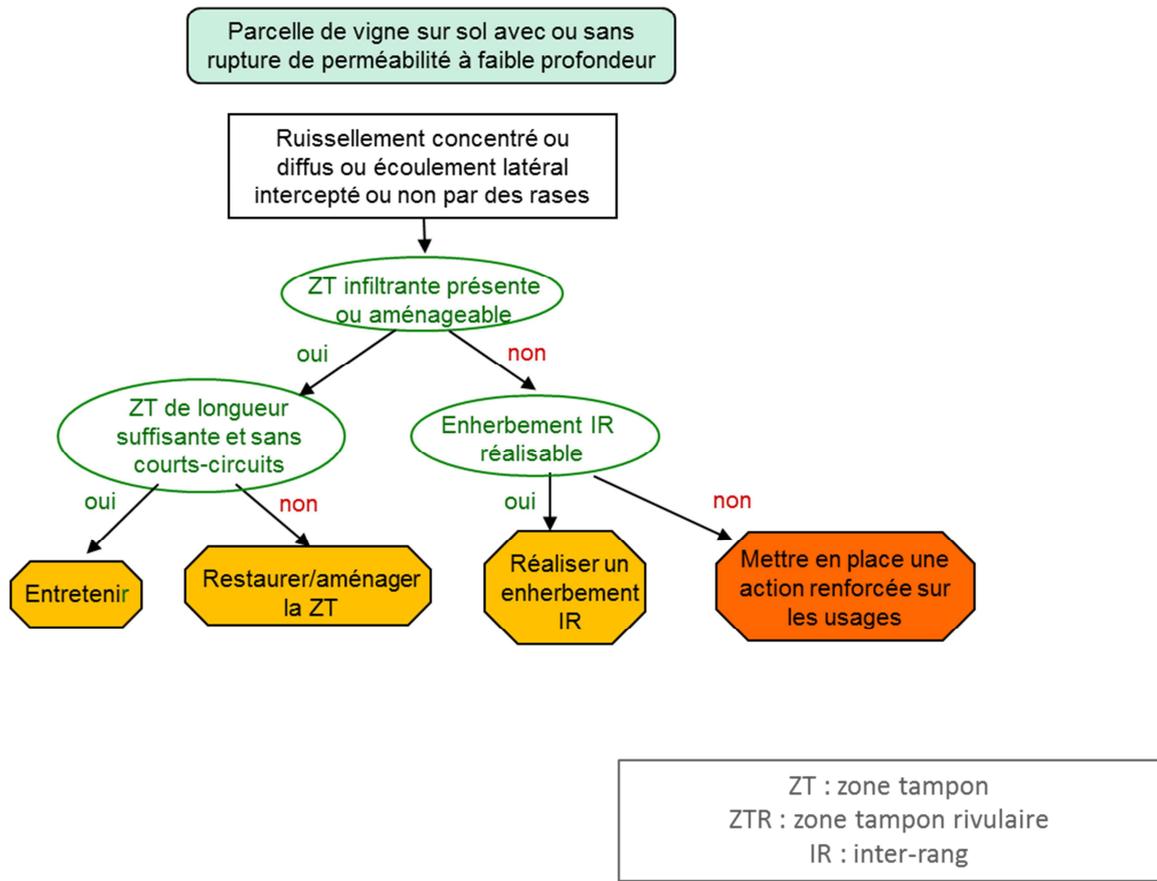
A l'échelle d'un événement marqué (juillet 2014), on note une nette influence de l'enherbement sur l'atténuation des concentrations en produits phytosanitaires dans le ruissellement qui peut être moindre sur des événements moins marqués. L'atténuation des flux dans le ruissellement est en revanche limitée sur les trois épisodes mesurés. En ce qui concerne les concentrations et flux percolés, ils sont systématiquement plus faibles dans l'IRE que dans l'IRD.

Il semblerait donc que l'enherbement joue un rôle positif dans l'atténuation des concentrations en produits phytosanitaires dans le ruissellement sans pour autant augmenter les transferts par percolation qui au contraire sont moindres comparativement à la modalité désherbée.

On rappelle que ces résultats sont issus d'un faible nombre d'observations (3 épisodes sur 2014 et 2015) et sont donc à considérer avec prudence.

Au final, compte tenu des résultats de cette étude, on a pu simplifier l'arbre de décision proposé initialement (annexe 1) selon le schéma proposé ci-après.

Arbre opérationnel proposé



En particulier, selon la présence ou non de zones tampons en position aval susceptibles d'atténuer le ruissellement concentré et les écoulements latéraux, on peut orienter les actions en priorité vers leur mise en place ou leur restauration ; en cas d'efficacité insuffisante suspectée (absence de zone tampon ou largeur insuffisante, position riveraine), on pourra préconiser la mise en place complémentaire d'un enherbement inter-rang. Si cette solution s'avère difficile (parcelle très pentue, inter-rangs insuffisamment espacés, risque de concurrence hydrique, ...), une action renforcée de réduction des usages sera à envisager.

En cas d'impossibilité d'enherbement inter-rang, notamment dans le cas de parcelles pentues difficilement enherbables, il pourrait être étudié la possibilité de mettre en place des bandes transversales végétalisées, comme cela se voit déjà sur certaines parcelles (photo 1 ci-après). Cependant, l'efficacité de ce genre de dispositif resterait à tester. On rappelle que les actions proposées visent à limiter le transfert des produits phytosanitaires par ruissellement et écoulement latéral dans le sol. Elles doivent être accompagnées d'une réflexion sur les usages afin d'ajuster la protection phytosanitaires aux caractéristiques de la culture et de la parcelle.

A titre exploratoire les échantillonneurs passifs de type tiges silicone ont été testés au cours de cette étude : ils ont montré leur capacité à rendre compte de la présence d'une gamme de substances et de leur l'évolution amont-aval ou selon un gradient surface-profondeur tant au sein de la nappe superficielle de versant du site de St Joseph qu'au sein des écoulements latéraux peu profonds et temporaires sur le site de Ruyère.



Photo 1 : exemple de mise en place de bandes transversales végétalisées (à gauche sur la photo). L'enherbement des zones de circulation principales (au centre de la photo) peut aussi être un complément intéressant pour limiter le ruissellement de surface.

Références bibliographiques

- Andrieux P., Louchart X., Negro S., Cambon B. et Voltz M., 2007. Influence des pratiques d'entretien du sol viticole sur les transferts de glyphosate et d'AMPA par ruissellement. Trois années d'expérimentation. Actes du colloque AFPP – vingtième Conférence du COLUMA, Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. Dijon, 11 et 12 décembre 2007.
- Boivin A., Margoum C., Guillemain C., Ball N., Gouy V., 2007. Évolution de la disponibilité des pesticides dans une zone tampon enherbée. XXXVII^e congrès du Groupe Français des Pesticides, Bordeaux, 21-23 mai 2007.
- Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I, Volay T., 2010. *Ecophyto R&D. Quelles voies pour réduire l'usage des pesticides ?* Synthèse du rapport d'étude, INRA Editeur (France), 90 p.(partie 3.2. La vigne : p30-35).
- Dabrowski J.M., Peall S.K.C., Reinecke A.J., Liess M. and Schulz R. 2002. Runoff-related pesticide input into the Lourens River, South Africa: basic data for exposure assessment and risk mitigation at the catchment scale. *Water, Air, and Soil Pollution* 135: 265–283.
- DREAL Rhône Alpes, 2010. Contamination par les pesticides des eaux superficielles et souterraines en Rhône Alpes, année 2008. 32 p.
- Druguet C., 2012. Acquisition de connaissances sur les transferts latéraux d'eau et de soluté le long d'un versant viticole. Master 2 Agrosociétés, Université d'Avignon et Pays de Vaucluse, 127 p.
- Dutremble C., 2014-a. Elaboration d'un protocole d'analyse d'échantillons de sol par granulométrie laser : Dans quelle mesure la granulométrie laser peut-elle servir à l'analyse granulométrique de sols ? Rapport du projet tuteuré. Licence professionnelle MAEP, Université Lyon 2. 38 p.
- Dutremble C., 2014-b. Expérimentation et suivi pour la caractérisation des écoulements et des flux de produits phytosanitaires dans une parcelle de vigne. Rapport principal. Licence professionnelle MAEP, Université Lyon 2. 56 p. + annexes.
- Eric Chantelot *et al.*, 2003. L'enherbement de la vigne. Plaquette TECHN'ITAB Viticulture, 4 p.
- Frésard, F. (2010). Cartographie des sols d'un petit bassin versant en Beaujolais viticole, en appui à l'évaluation du risque de contamination des eaux par les pesticides, Master 2 Qualité et Traitement des Eaux et des Sols, option : Procédés de Traitement et de Dépollution des eaux et des sols, Université de Franche Comté à Besançon, : 54 pp.
- Gimenez A., 2015. Caractérisation de la rétention des pesticides dans différents horizons d'un sol viticole du Beaujolais. Isothermes d'adsorption en batch par SPE et UHPLC MS/MS. Rapport de stage M1 Analyse et Contrôle, Université Claude Bernard, réalisé à Irstea Lyon-Villeurbanne, Lyon 1, 41 p.
- Gouy, V. et C. Nivon, 2007, Caractérisation et suivi de la qualité des eaux sur le bassin versant de la Morcille sur la période 2001-2006. Rapport d'étude final, Cemagref, Chambre d'agriculture du Rhône dans le cadre du projet « Qualité des Eaux en Beaujolais Viticole », validé par la Cellule Régionale d'Observation et de Prévention de la Pollution par les Pesticides et financé par l'Agence de l'eau RM et C, 59 p.
- Gouy V., Gril J.-J., Lacas J.-G., Boivin A. et Carluer N. Contamination des eaux de surface par les pesticides et rôle des zones tampons pour en limiter le transfert : état des connaissances et conséquences pour l'action. Ingénieries-EAT, 2008, numéro spécial Azote, phosphore et pesticides. Stratégies et perspectives de réduction des flux : 49-63.

- Irstea, 2013. Note technique sur la mise en place des dispositifs lysimétriques et des collecteurs de ruissellement sur le site de Bellevue. 9 p.
- Johnson, A.C., Haria, A.H., Bhardwaj, C.L., Williams, R.J., Walker, A., 1996. Preferential flow pathways and their capacity to transport isoproturon in a structured clay soil. *Pesticide Science* 48, 225-237.
- Kahl, G., Ingwersen, J., Nutniyom, P., Totrakool, S., Pansombat, K., Thavornnyutikarn, P., Streck, T., 2007. Micro-trench experiments on interflow and lateral pesticide transport in a sloped soil in northern Thailand. *Journal of environmental quality* 36, 1205-1216.
- Lacas J.G. 2005. Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Etude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Mémoire de thèse. Cemagref, Université de Montpellier II, 239 p. + annexes.
- Liger L., Martin A., Guillemain C., Margoum C., Lafrance P., Gouy V., 2015. Devenir des pesticides infiltrés au sein d'une bande enherbée : potentiel de contamination d'une nappe superficielle sous-jacente. Actes du 45^e congrès du Groupe Français des Pesticides. Versailles mai 2015.
- Martin A., Coquery M., Gouy V., Guillemain C., Le-Dreau M., Liger L., Peyrard X., Randon J., Margoum C., 2015. Intérêts de l'échantillonnage passif pour le suivi des transferts de pesticides dans les milieux aqueux. Actes du 45^e congrès du Groupe Français des Pesticides. Versailles, 27-29 mai 2015.
- Mugnier B., 2013. Efficacité des inter-rangs enherbés dans la limitation du transfert des produits phytosanitaires : étude bibliographique et note descriptive pour la mise en place d'un dispositif expérimental de suivi. Stage de césure 5^e année de l'ISARA.
- Peyrard X., en cours (prévue pour début 2016). Evaluation des transferts latéraux de pesticides à faible profondeur dans le sol au sein d'un versant viticole du Beaujolais de coteaux. Thèse de l'ED Chimie, Procédés, Environnement de Lyon 1.
- Peyrard X., Liger L., Guillemain C., Gouy V. 2015-a. A trench study to assess transfer of pesticides in subsurface lateral flow for a soil with contrasting texture on a sloping vineyard in Beaujolais. *Environmental Sciences and Pollution Research*. doi : 10.1007/s11356-015-4917-5
- Peyrard X., Liger L., Guillemain C., Brosse C., Gouy V. 2015-b. A tracing experiment to better understand lateral transfers of pesticides in a texture-contrasted soil. Submitted to *Science of the total environment*.
- Sarr O., 2013. Traçage par le bromure d'une nappe peu profonde à la connexion entre une parcelle viticole à forte pente et une bande enherbée. Master 2 Hydrogéologie Hydrologie et Sols (Paris Sud), 84 p.
- Schreck E. et Gontier L., 2009. Entretien du sol et transfert de pesticides : le point après 3 années de thèse. *Bulletin d'information de l'IFV Sud-Ouest*, n°75, mai 2009 : P 5-7.
- Toutan C., 2001. Diagnostic du risque de pollution des eaux superficielles par les produits phytosanitaires : typologie des bassins versants du Beaujolais viticole. Comité de Développement du Beaujolais / ENITA de Bordeaux, MFE, 70 p. + annexes.
- Van Den Bogaert, R., 2011. Typologie des sols du bassin versant de la Morcille, caractérisation de leurs propriétés hydrauliques et test de fonctions de pédotransfert, UPMC. *AgroParisTech*: 55 pp.
- Wallach R, Shabtai R., 1992. Modeling surface runoff contamination by soil chemicals under transient water infiltration. *J Hydrol* 132:263–281. doi:10.1016/0022-1694(92)90182-U.

Rapport d'étudiants financés dans le cadre du projet :

Ruyère :

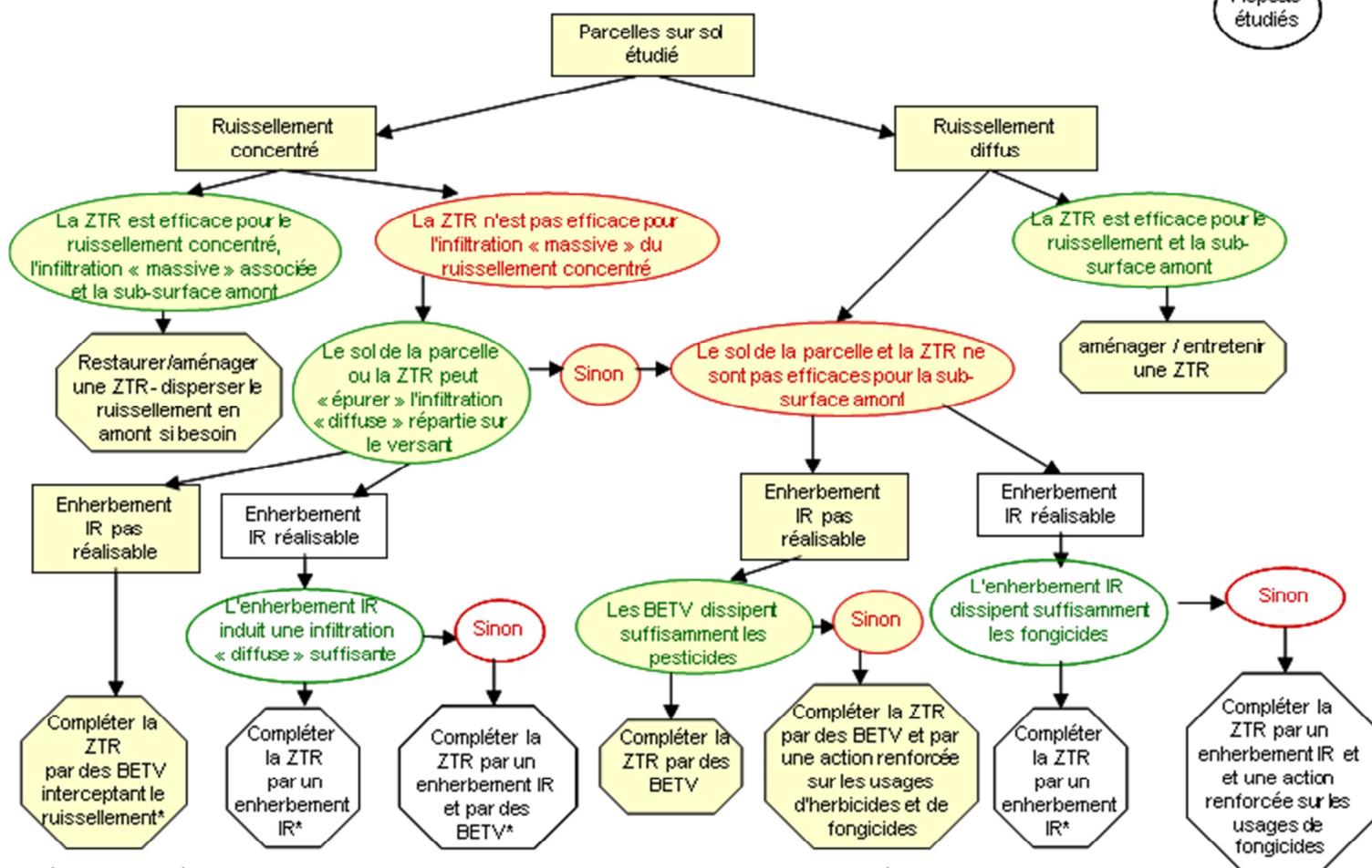
Thèse de Xavier Peyrard, (2012-2015) ; stage de licence professionnelle : Clément Dutremble, 2014 - a et b. Stage de M1 d'Alicia Gimenez, 2015.

Saint Joseph : stages de master 2 : Caroline Druguet, 2012 ; Ousmane Sarr, 2013.

Bellevue : stage de césure ISARA : Bastien Mugnier, 2013.

Annexe 1 : Type d'arbre opérationnel visé

Aspects étudiés



* à terme les aménagements concentrant le ruissellement dans la parcelle devraient devenir obsolètes

Annexe 2 : Indicateurs utilisés

Pour évaluer l'efficacité de la ZTR à épurer le ruissellement concentré et l'infiltration "massive" de ce dernier, on aura recours à des indicateurs parmi les suivants:

indicateur 1 : % d'abattement des flux ruisselé et infiltré au sein de la ZTR par rapport au flux entrant (par ruissellement)

indicateur 2 : % d'abattement des concentrations dans la nappe superficielle par rapport aux concentrations dans le ruissellement entrant sur la bande

indicateur 3 : % de masse de pesticide appliqué retrouvé dans la nappe avec ou sans influence de l'infiltration "massive"

Pour évaluer le taux de transfert des pesticides dans les écoulements latéraux sortant de la parcelle de vigne :

indicateur 1: % de restitution des pesticides dans l'écoulement latéral dans le sol en sortie de parcelle par rapport à la quantité appliquée et par rapport au ruissellement

Pour évaluer l'efficacité de la ZTR à limiter le transfert des pesticides arrivant par les écoulements latéraux :

indicateur 1 : % d'abattement des concentrations dans la nappe de l'amont vers l'aval de la ZTR

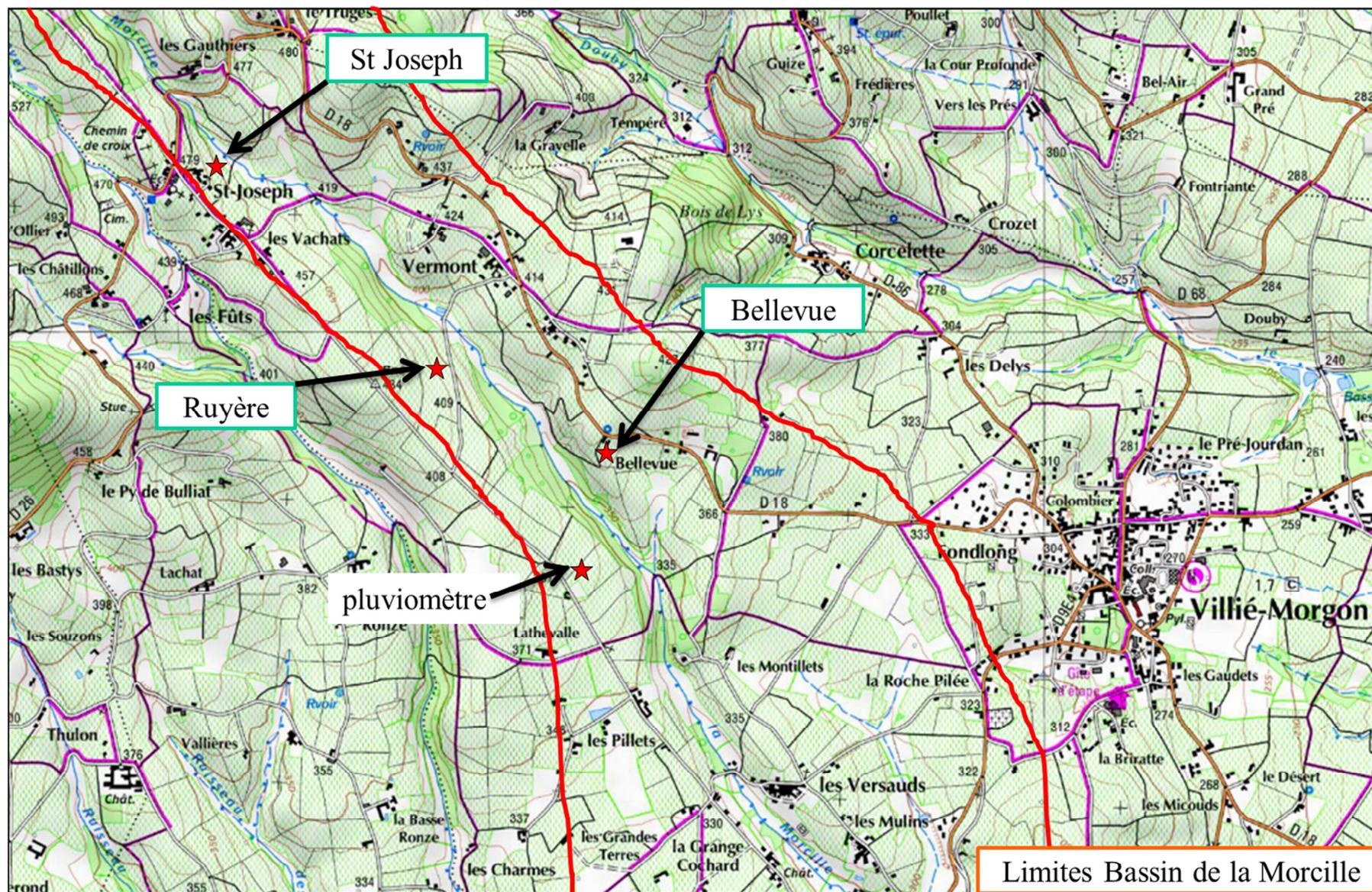
indicateur 2 : concentrations max et moyennes dans la nappe d'accompagnement de la Morcille sans influence de l'infiltration massive

Pour évaluer l'efficacité de l'enherbement à limiter le transfert de fongicides :

indicateur 1: % d'abattement des concentrations de pesticides dans l'écoulement latéral dans le sol par rapport à celles dans le ruissellement en sortie de parcelle

indicateur 2 : % d'abattement des flux de pesticides dans l'écoulement latéral dans le sol par rapport à celles dans le ruissellement en sortie de parcelle

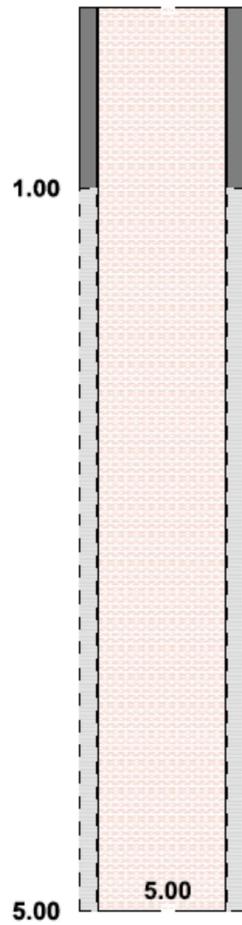
Annexe 3 : Localisation des trois sites d'étude et du pluviomètre



Annexe 4 : Profondeur des piézomètres et coupes de forage sur le site de St Joseph

Les profondeurs des différents ouvrages			
	Profondeur (m)	Hauteur crépinée (m)	Hauteur pleine (m)
BE 1	5,03	4	1,03
BE 1P	6,15	1	5,15
BE 2	3,19	2	1,19
BE 2P	3,62	1	2,62
BE 3	3,65	3	0,65
BE 4	5	4	1
BE 4P	9,2	4	5,2
BE 5	3,15	2	1,15
BE 5P	3,88	1	2,88
BE 6	3,59	3	0,59

BE₁



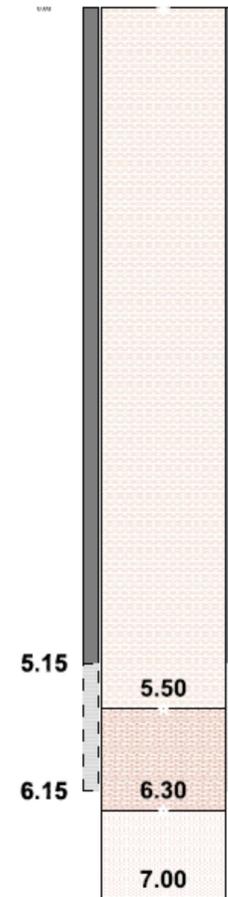
Couches géologiques

Alternances argile-sable

Position tube/crépine

bentonite
sable

BE_{1P}



Couches géologiques

Alternances argile-sable

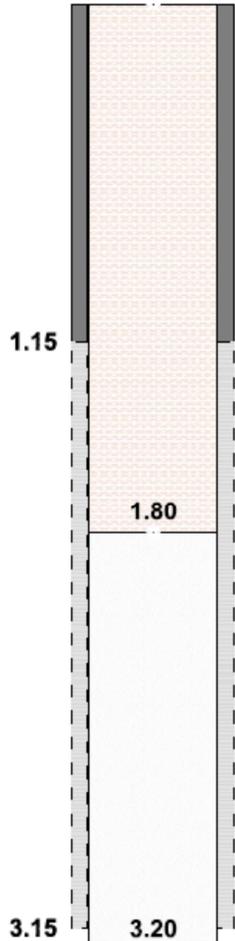
Altérites

Granite altéré

Position tube/crépine

bentonite
sable

BE 2



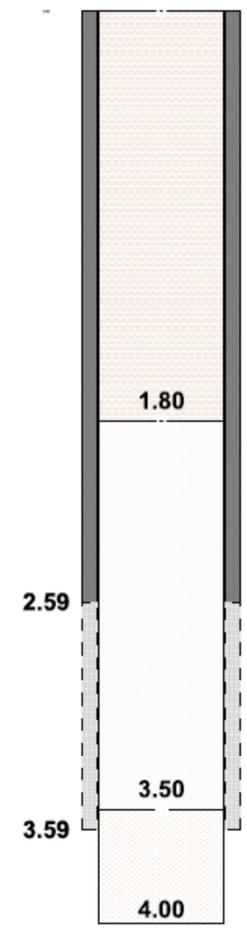
Couches géologiques

- Alternances argile-sable
- Sable bleu

Position tube/crépine

- bentonite
- sable

BE 2P



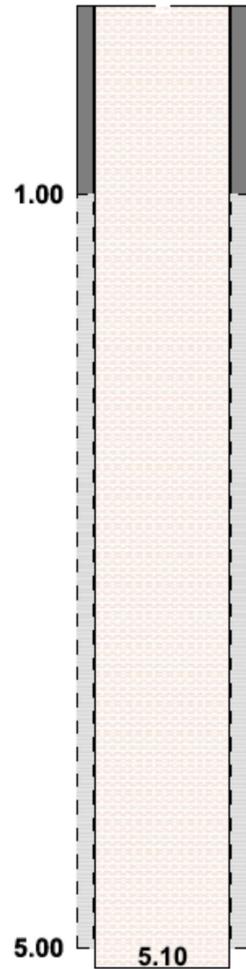
Couches géologiques

- Alternances argile-sable
- Sable bleu
- Granite

Position tube/crépine

- bentonite
- sable

BE 4



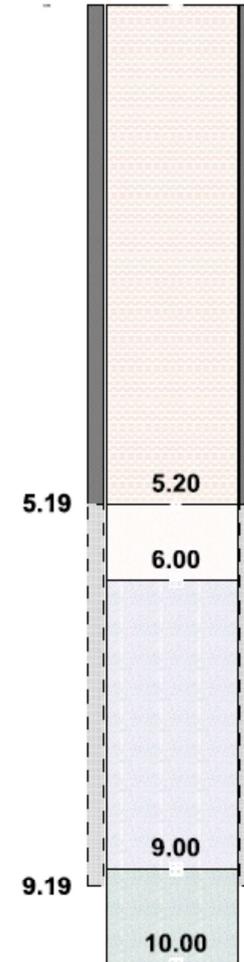
Couches géologiques

Alternances argile-sable

Position tube/crépine

bentonite
sable

BE 4P



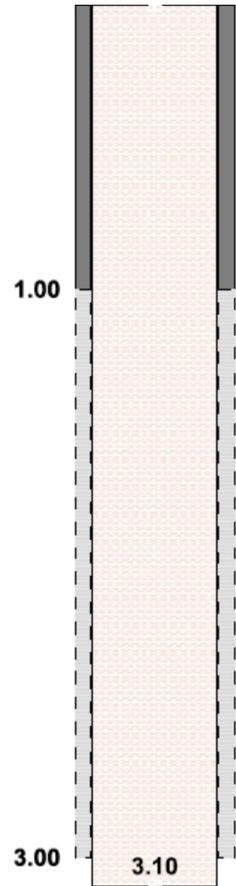
Couches géologiques

Alternances argile-sable
Sable
Argilo-sableux
Limon sableux

Position tube/crépine

bentonite
sable

BE₅



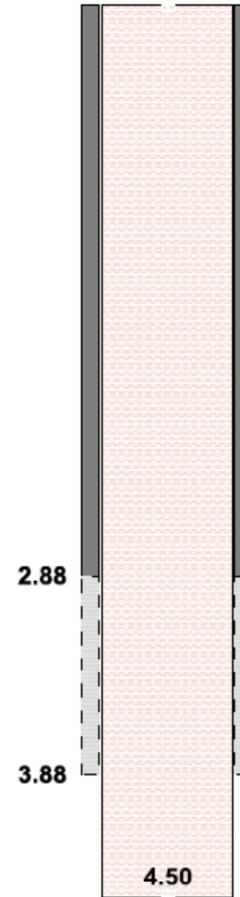
Couches géologiques

Alternances argile-sable

Position tube/crèpine

bentonite
sable

BE_{5P}



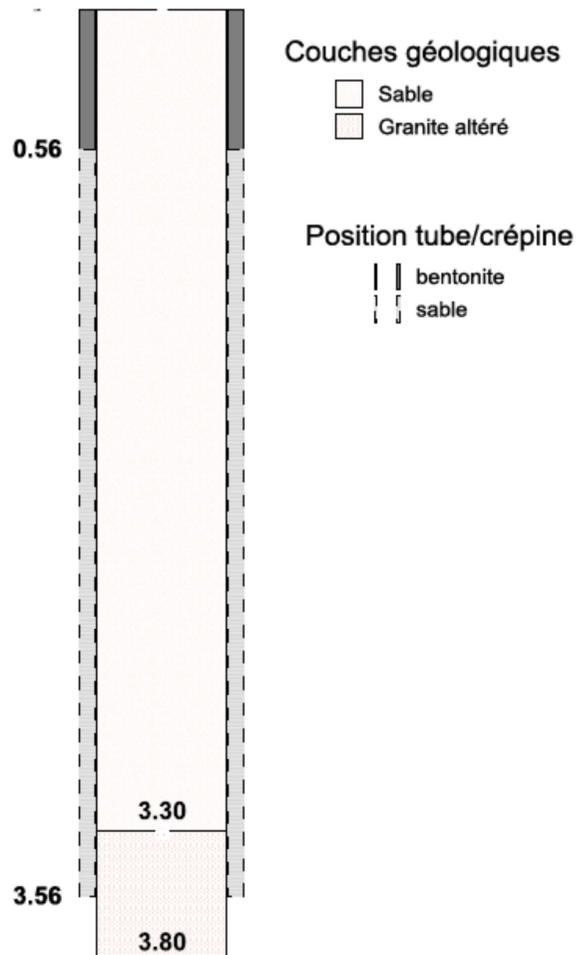
Couches géologiques

Alternances argile-sable

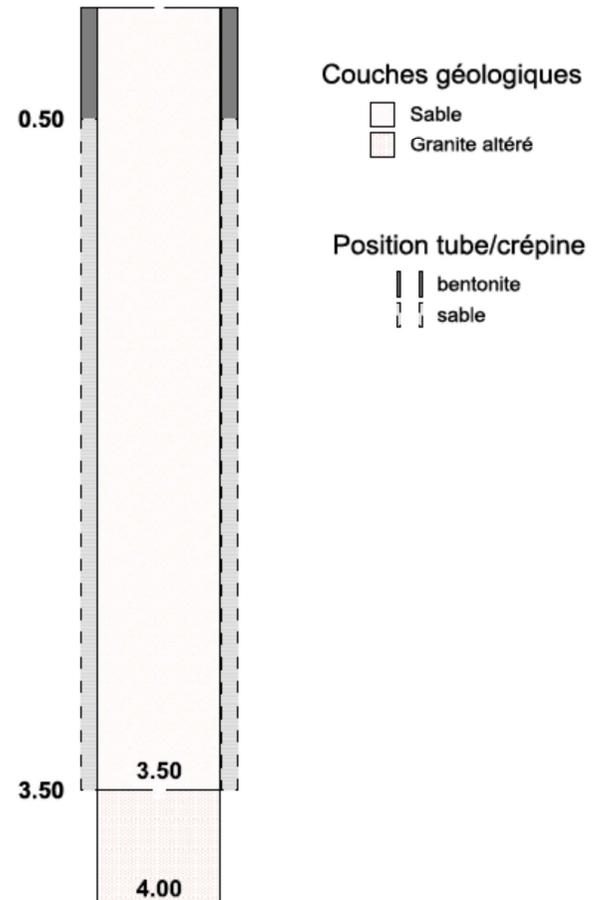
Position tube/crèpine

bentonite
sable

BE 3



BE 6



Annexe 5 : Recensement des substances actives (SA) utilisées par le viticulteur du versant suivi à Saint Joseph

1) Enquêtes 2001, 2003, 2005, 2010, 2012, 2014

SA utilisée au moins une fois sur la période 2001-2014		
	Nombre d'années où les enquêtes ont recensé l'usage de la SA :	
aminotriazole		4 à 5 années sur les 6 enquêtées
bétacyfluthrine		3 à 4 années sur les 6 enquêtées
Chlorpyriphos méthyl		1 à 2 années sur les 6 enquêtées
cymoxanil		
cyprodinyl		substance utilisée chaque année
difénoconazole		enquêtée avant son interdiction
dinocap		
diuron		
émamectine benzoate		
fenhexamid		
fénitrothion		
flazasulfuron	Applications 2012	Applications 2014
flufénoxuron	Aminotriazole	Aminotriazole
fluazinam	Chlorpyriphos-méthyl	Cymoxanil
fludioxonil	Cymoxanil	Difénoconazole
flumioxazine	Cyprodinyl	Fluazinam
folpel	Difénoconazole	fludioxonil
Fosétyl-Aluminium	Emamectine benzoate	Flumioxazine
glyphosate	Flazasulfuron	Folpel
Indoxacarbe	Fludioxonil	Fosétyl-Aluminium
Lambda cyhalothrine	Flumioxazine	Glyphosate
mancozèbe	Folpel	Indoxacarbe
mandipropamide	Fosétyl-Aluminium	Mancozèbe
manèbe	Glyphosate	Penoxsulame
métirame	Lambda cyhalothrine	Spiroxamine
metrafenone	Mancozèbe	Trifloxystrobine
oryzalin	Mandipropamide	
penoxsulame	Métirame	
procymidone	Metrafenone	
quinoxyfène	Penoxsulame	
spiroxamine	Spiroxamine	
terbuthylazine		
thiocyanate d'ammonium		
trifloxystrobine		

2) Enquête 2015

matière active	date de traitement
<i>aminotriazole</i>	04/05/2015
<i>penoxsulame</i>	04/05/2015
<i>cuivre</i>	27/07/2015
<i>cymoxanil</i>	10/06/2015
<i>folpel</i>	10/06/2015
<i>cymoxanil</i>	26/06/2015
<i>folpel</i>	26/06/2015
<i>glyphosate</i>	27/03/2015
<i>glyphosate</i>	02/07/2015
<i>soufre micronise</i>	06/05/2015
<i>soufre micronise</i>	18/05/2015
<i>soufre micronise</i>	29/05/2015
<i>mancozèbe</i>	06/05/2015
<i>fosétyl-Aluminium</i>	01/06/2015
<i>mancozèbe</i>	18/05/2015
<i>fosétyl-Aluminium</i>	18/05/2015
<i>mancozèbe</i>	29/05/2015
<i>fosétyl-Aluminium</i>	29/05/2015
<i>difénoconazole</i>	10/06/2015
<i>difénoconazole</i>	11/07/2015
<i>fluazinam</i>	15/07/2015
<i>indoxacarbe</i>	11/07/2015
<i>chlorpyrifos-méthyl</i>	29/05/2015
<i>cyprodinil</i>	10/06/2015
<i>fludioxonil</i>	10/06/2015
<i>cymoxanil</i>	11/07/2015
<i>oxychlorure de cuivre</i>	11/07/2015
<i>spiroxamine</i>	27/07/2015

**Annexe 6 : « Statut » des substances actives retrouvées dans la nappe de St Joseph
au niveau de la prairie de bas de versant**

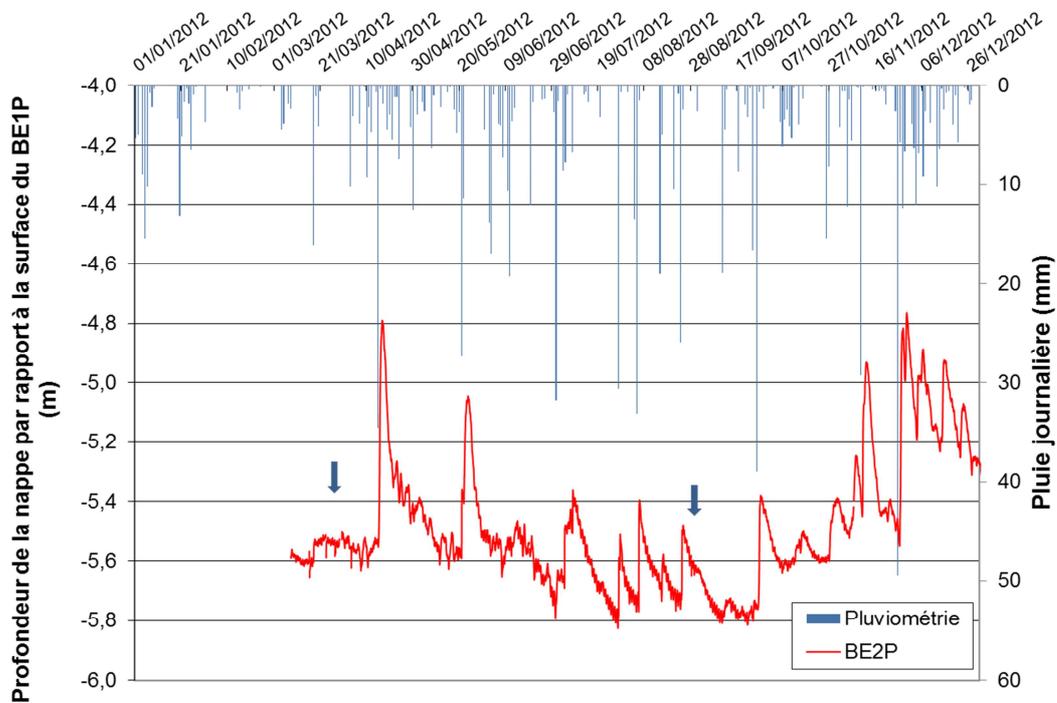
SA retrouvées dans la nappe au moins une fois sur 2012-2015

Nom	"Statut"
atrazine déisopropyl	produit de dégradation
boscalid	pas recensé lors des enquêtes d'utilisation du viticulteur
DCPMU	produit de dégradation
desethyl desisopropylatrzine	produit de dégradation
diuron	interdit d'usage fin 2008
florasulam	pas recensé lors des enquêtes d'utilisation du viticulteur
norflurazon	interdit d'usage fin 2003
norflurazon desméthyl	produit de dégradation
oxadixyl	interdit d'usage fin 2003
procymidone	interdit d'usage fin 2008
simazine	interdit d'usage fin 2003
spiroxamine	utilisée fréquemment
terbuméton	interdit d'usage en 1998
terbuméton-déséthyl	produit de dégradation
terbuthylazine	interdit d'usage fin 2003
terbuthylazine deséthyl	produit de dégradation
AMPA	produit de dégradation
aminotriazole	utilisée fréquemment
glyphosate	utilisée fréquemment

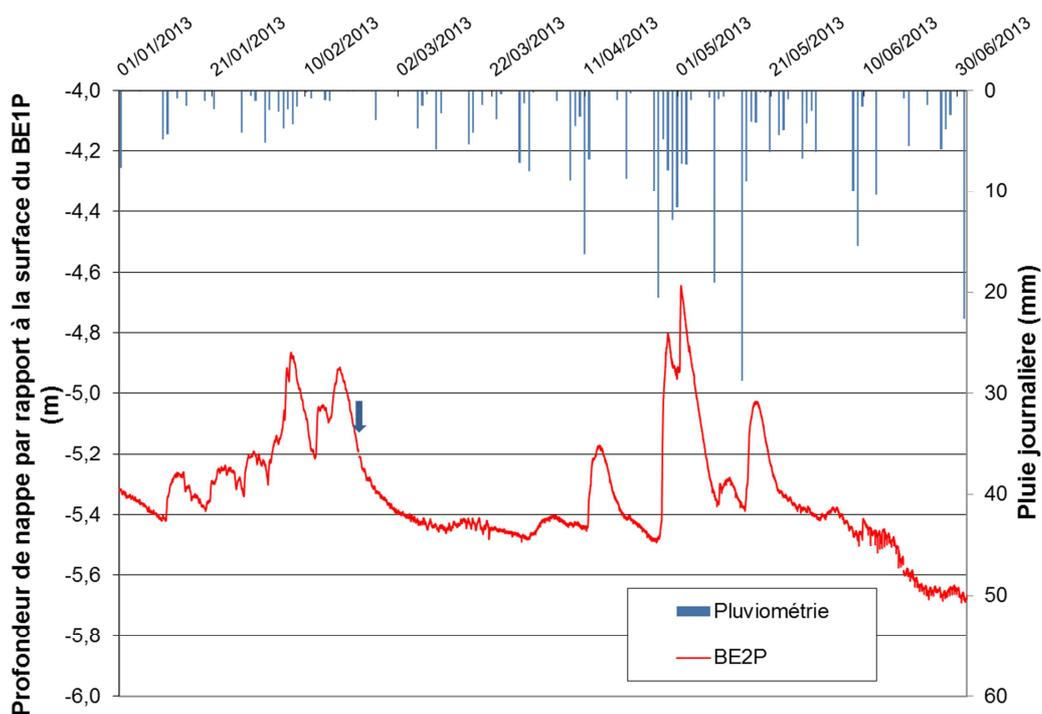
Annexe 7 : Conditions piézométriques des années de suivi sur le site de St Joseph

(flèche bleue = date de prélèvement ponctuel avec analyse complète – rectangle : période de suivi plus continu en 2014 et 2015)

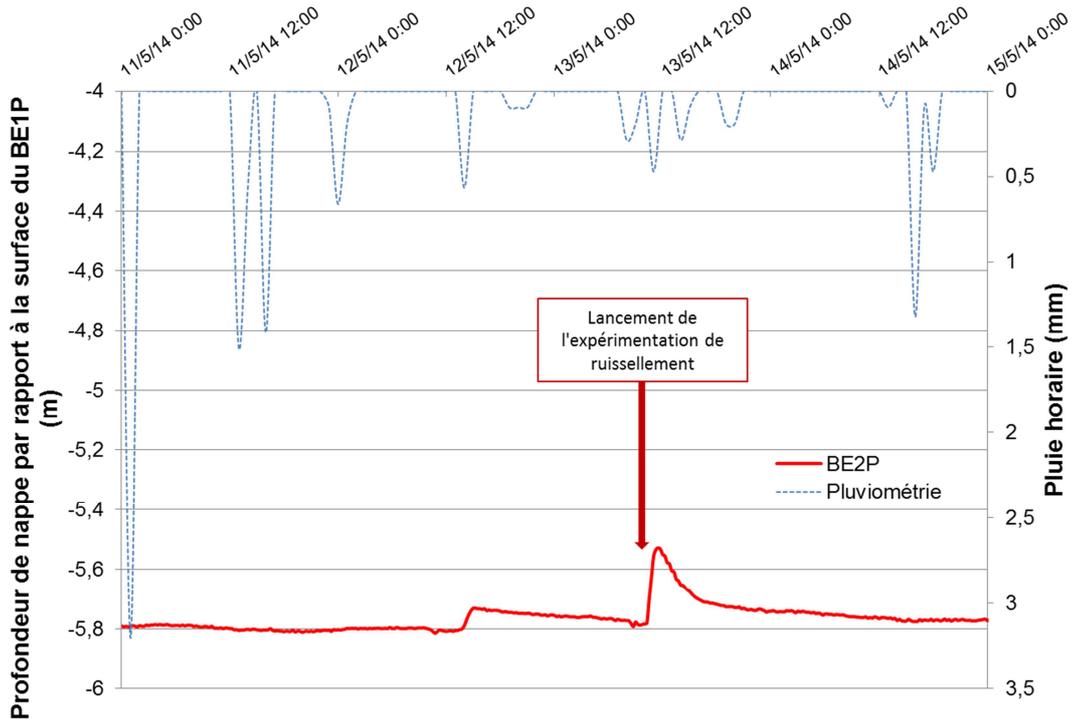
Niveaux piézométriques sur la bande enherbée au BE2P, 2012



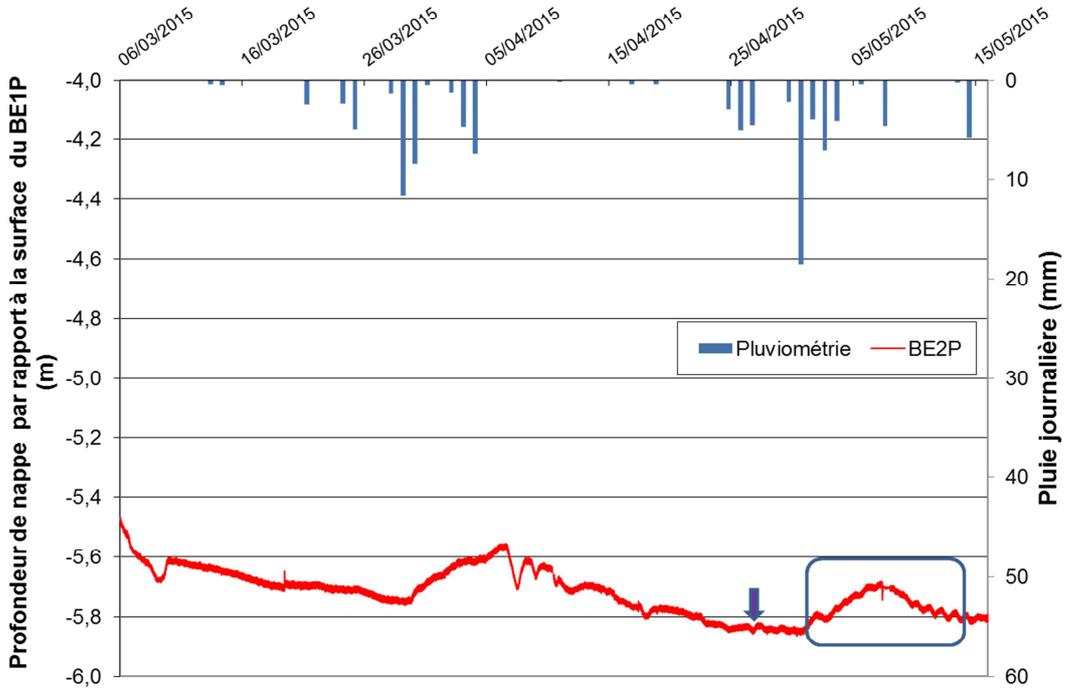
Niveaux piézométriques sur la bande enherbée au BE2P, 2013



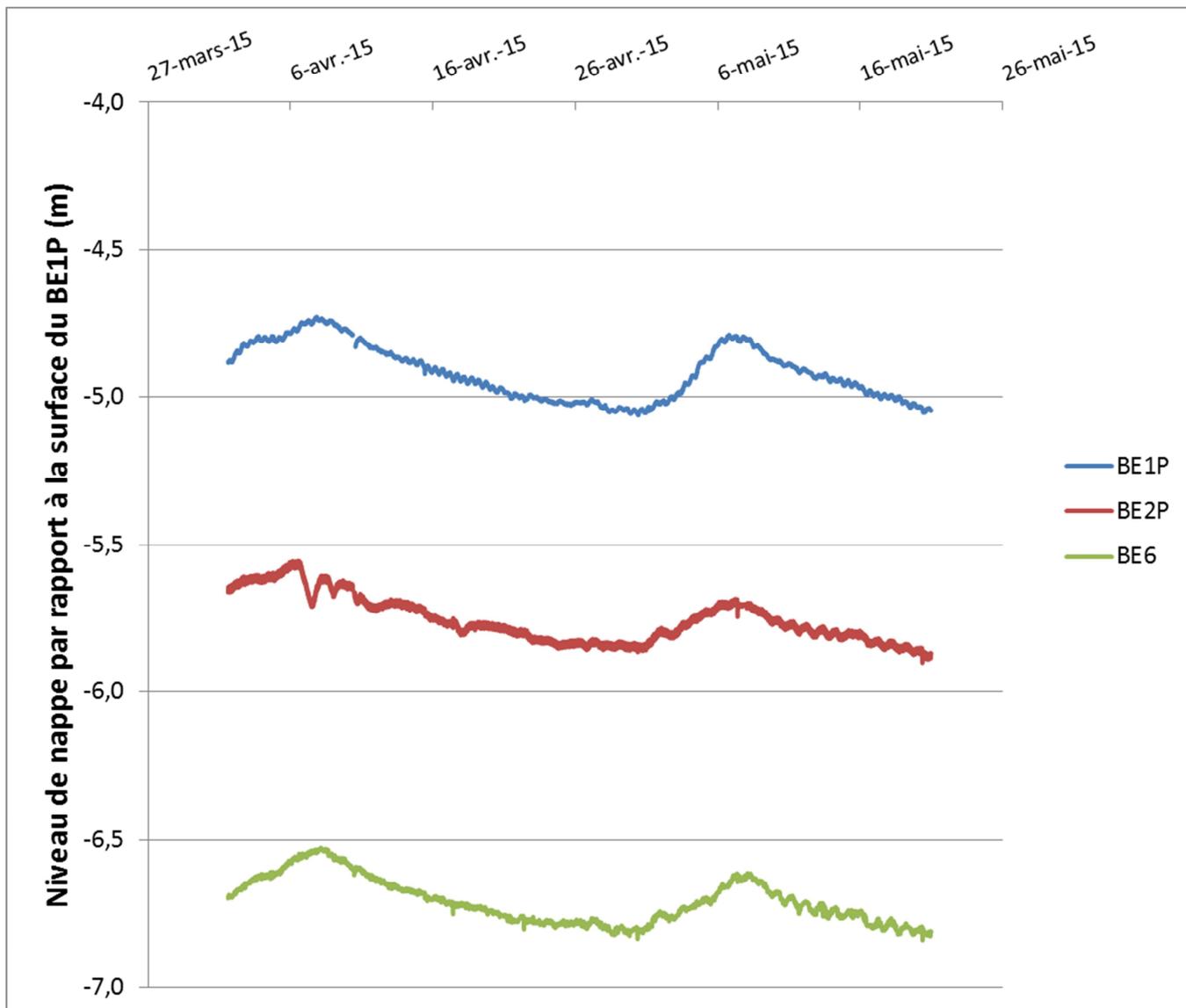
Niveaux piézométriques sur la bande enherbée au BE2P, 2014



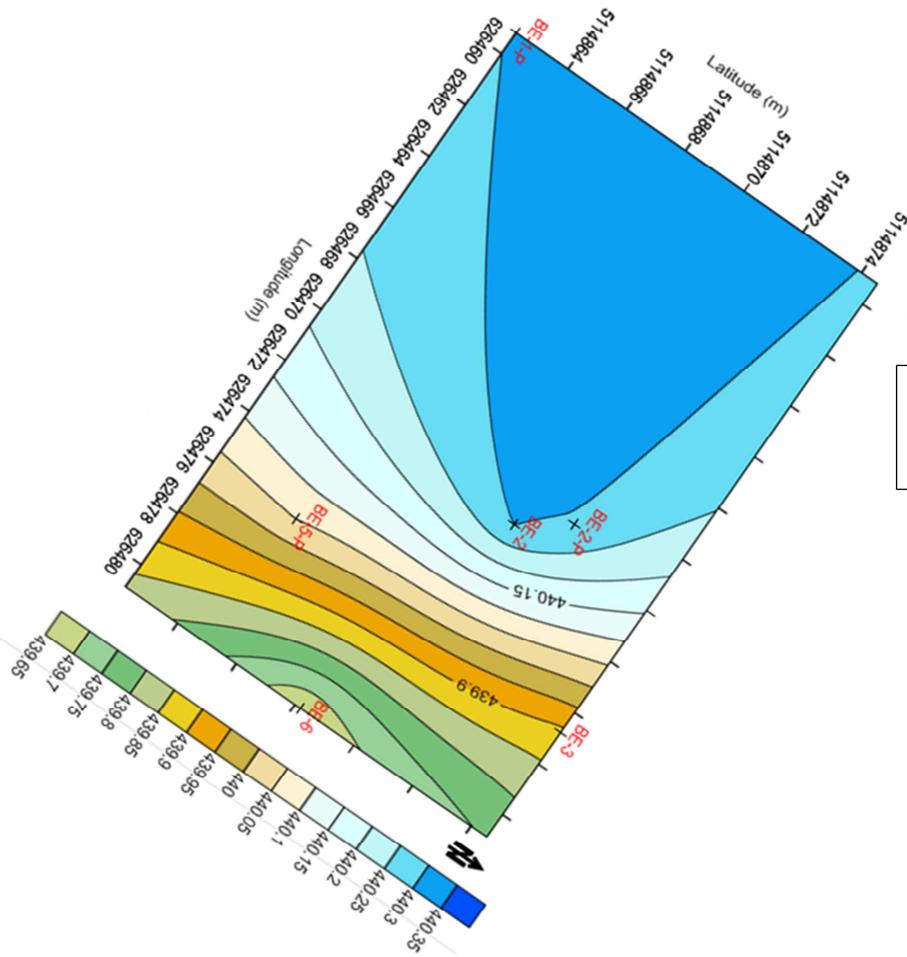
Niveaux piézométriques sur la bande enherbée au BE2P, 2015



Annexe 8 : Evolution des niveaux piézométriques de la nappe de St Joseph du 20 avril au 20 mai 2015 au sein des piézomètres BE1P, BE2P et BE6

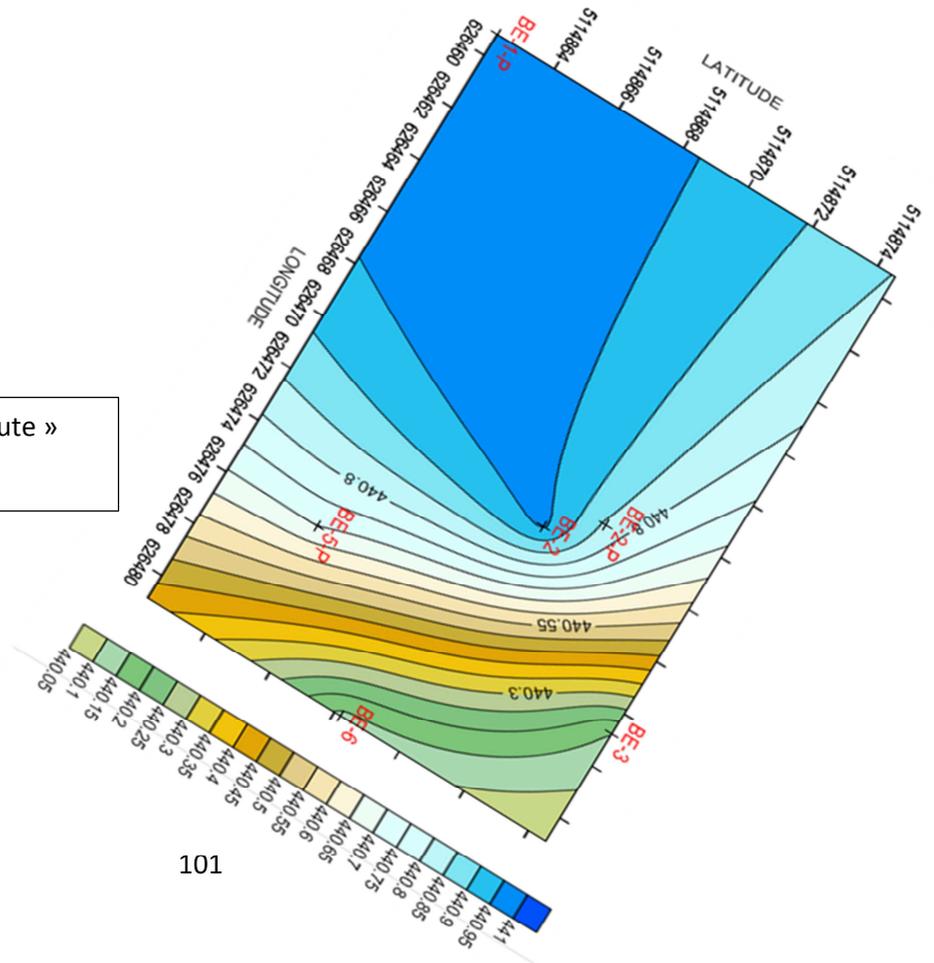


Annexe 9 : Cartes piézométriques issues de l'extrapolation des mesures en 2013 sur le versant de St Joseph

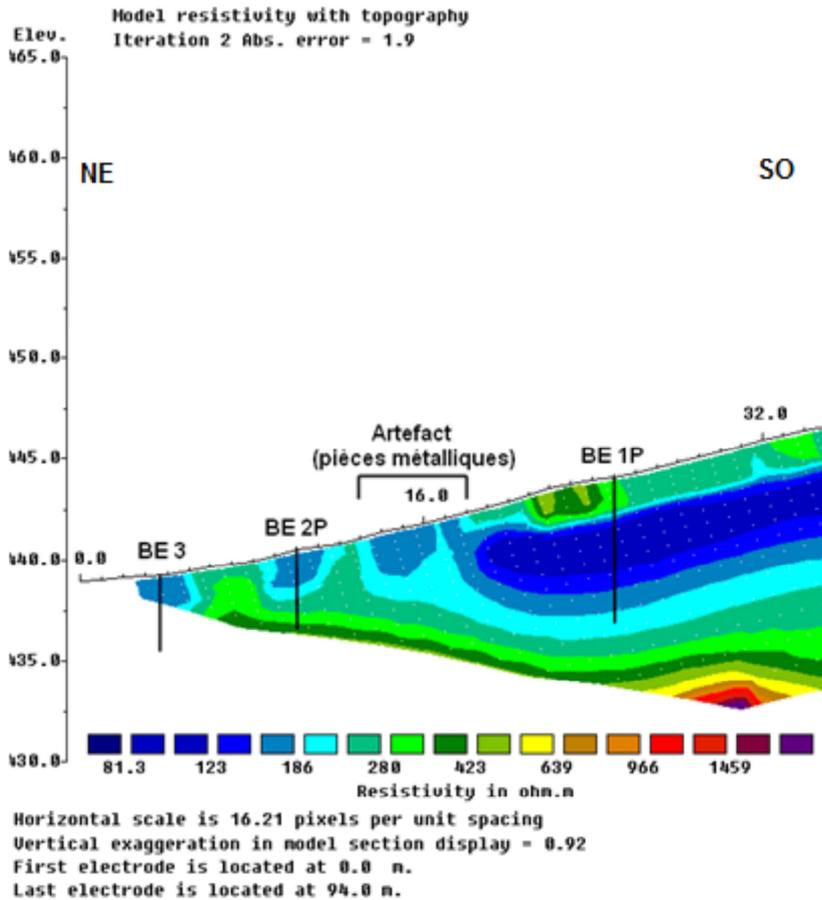


Carte piézométrique « nappe basse » printemps 2013

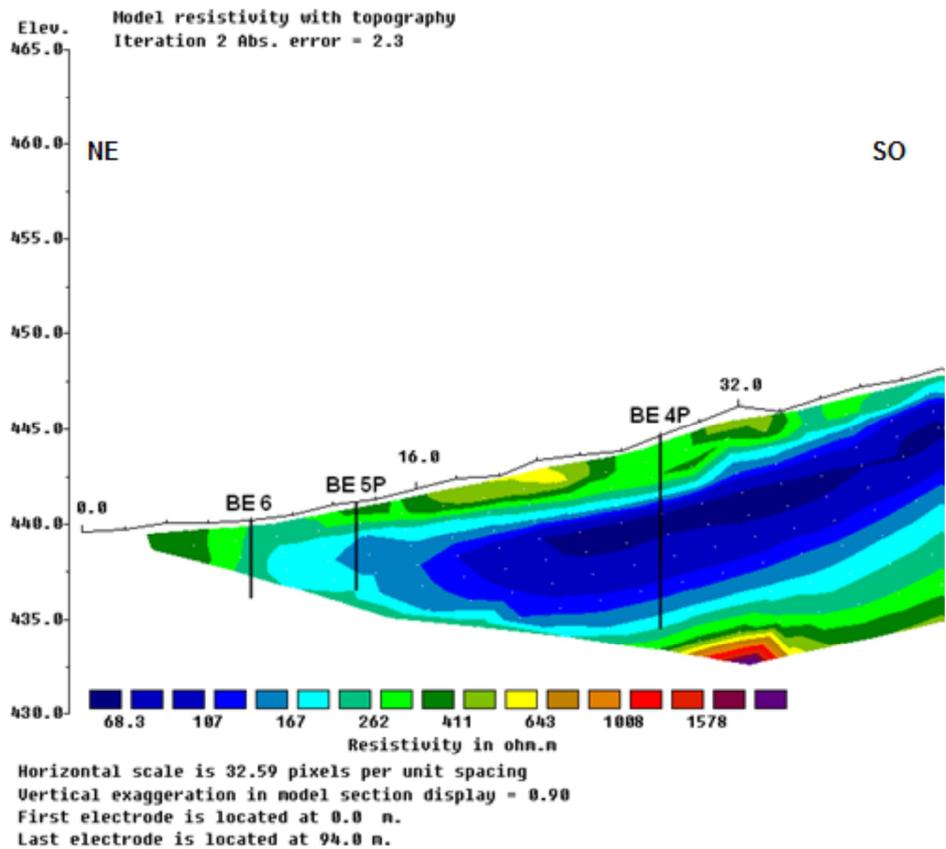
Carte piézométrique « nappe haute » printemps 2013



Annexe 10 : Profils de résistivité obtenus sur le versant de St Joseph



La remontée de la couche vert clair (résistivité d'environ 300 à 350 ohm.m) entre les piézomètres BE2P et BE3 pourrait être associée à la remontée d'une couche moins perméable (granite altéré) qui est absente en amont du piézomètre BE6.



Annexe 11 : Protocole mise en œuvre pour le suivi fin de la dynamique de la contamination de la nappe du site de St Joseph suite à des événements pluvieux en conditions naturelles (2015)

Introduction

Objet et domaine d'application

Protocole 2015 de suivi des niveaux piézométriques et d'échantillonnage actif et passif dans la nappe sous la parcelle enherbée et en partie dans la Morcille. Concerne le suivi ciblé sur des périodes de montée et descente de niveau piézométrique.

Eaux collectées analysées au LAMA. Echantillons ciblés envoyés au laboratoire de la Drôme.

Références

Fiche terrain *Saint Joseph*

Descriptif de la manipulation

On suit la pluviométrie pour identifier si le cumul de pluie requis pour provoquer une montée significative du niveau piézométrique est atteint, que ce soit en observant les prévisions météorologiques ou les quantités réelles mesurées dans le pluviomètre (Calvaire),

On suit les niveaux d'eau dans un transect piézométrique (BE1P, BE2P, BE6),

On réalise un échantillonnage automatique (BE2) pour l'événement d'intérêt (pour la montée et la redescende de nappe)

On a recours à des capteurs passifs (BE1, BE1P, BE2, BE2P, BE6 et dans la Morcille) pour rendre compte de l'évolution spatiale (amont-aval et surface-profondeur) et temporelle (au pas d'intégration de la semaine),

On a recours à des échantillonnages ponctuels manuels (BE2P, BE6 et BE1) pour valider les capteurs passifs.

Condition d'application (si nécessaire)

De mi-avril à fin mai et à partir du moment où les conditions pluviométriques suspectées entrainer une montée suffisante de la nappe sont atteintes.

Hygiène et sécurité

Gants pour le contact avec les échantillons contaminés.

Gants, bottes, combinaison et masque si traitement dans les 48h précédents (cf fiche sécurité parcelle).

Matériel

Matériel sur site

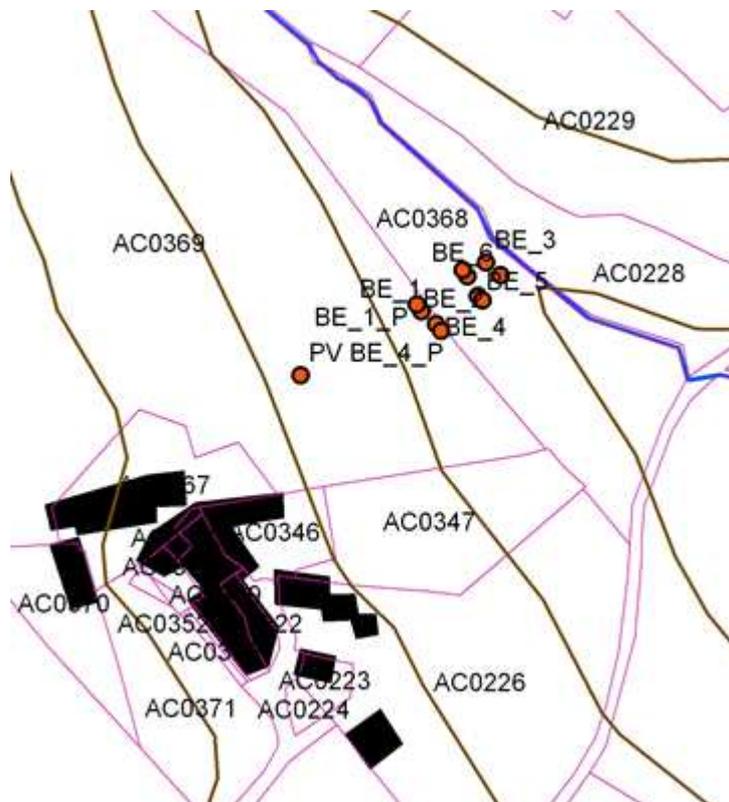
11 piézomètres (PV, BE1P, BE1, BE4P, BE4, BE2P, BE2, BE5P, BE5, BE3, BE6),

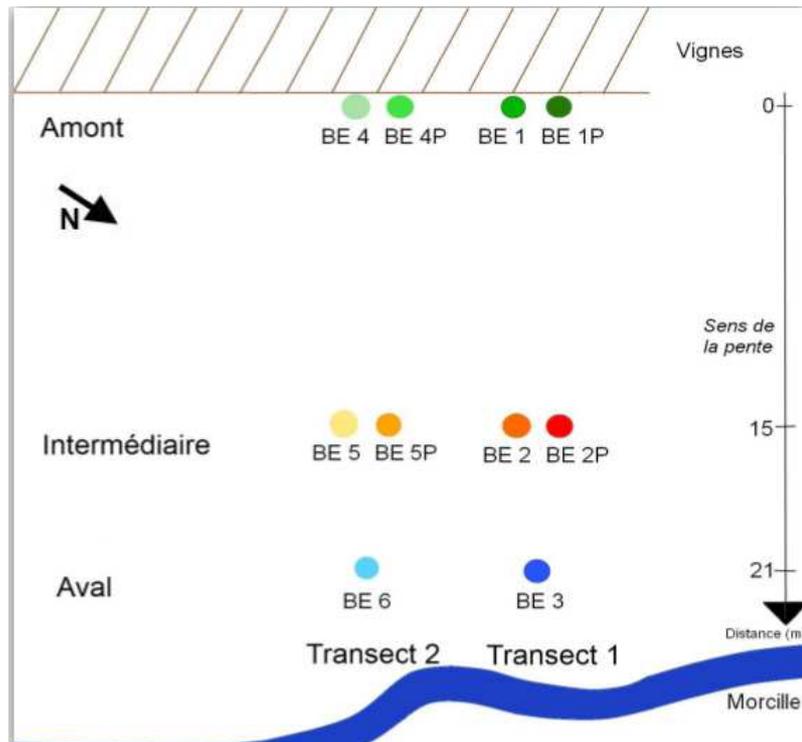
1 préleveur automatique sur la durée du suivi (ISCO gris- 24 flacons verre environ 0,3L),

2 divers (BE1P, BE6) et une sonde (BE2) reliée à une centrale Campbell,

Tubes capillaires téflon à profondeur fixe mais modulable en surface pour l'échantillonnage ponctuel manuel (BE1, BE1P, BE2, BE2P,),

(Pour mémoire : 4 lysimètres atmosphériques sous la bande enherbée).





Matériel autre

- Pompe à vide avec batterie de recharge chargée (petite carrée)
- Bouchon et tuyaux associés dont tube capillaire (avec embout de connexion au capillaire terrain – des piézomètres) spécifique pour le site
- 1 bouteille de 1L verre transparent graduée propre avec un bouchon
- Capteurs passifs dans leurs ressorts + petits flacons de transport
- Flacons de recharge préleveur au cas où casse ?
- Batterie de recharge préleveur chargée
- Ordinateur portable avec cordons
- Flacons PET ambrés 500mL étiquetés avec bouchons associés (24 flacons au minimum + 4 flacons pour prélèvements manuels)
- Sonde de mesure de niveau piézométrique
- Boite à outils (scotch blanc et marqueur)
- Pissette d'eau déminéralisée
- Bidon de réserve d'eau déminéralisée
- Gants nitriles
- Glacière avec pains de glace
- Protections requises en cas de traitement récent (masques, combinaisons)
- Fiche terrain avec stylo et porte-documents associés
- Fiches terrain de(s) la sortie(s) précédente(s) pour comparer les données piézométriques (niveau de la nappe)

Protocole

Mise en place du dispositif

- les divers (BE1P, BE6, BE2P) sont mis en place dès le 19 mars 2015.
- l'échantillonneur est mis en place et prêt à être lancé au plus tard le 10 avril 2015 (programmé pour prélèvement au pas de 6h) pour être lancé la semaine suivante (autour de mi-avril) en fonction de la date d'application de la flumioxazine.

Suivi hydrique

- suivi en continu avec les divers et mesures manuelles à la sonde à chaque passage dans les BE1P, BE1, BE2P et BE6.
- Consultation quotidienne de la météo pour anticiper la période où pourrait se produire l'événement <http://www.meteo60.fr/previsions-meteo-france-villie-morgon.html>
http://www.meteociel.fr/previsions/25768/villie_morgon.htm
<http://www.pleinchamp.com/previsions-departementales>
http://www.meteo60.fr/radars_index.php
<http://www.meteofrance.com/accueil>
- Si période pluvieuse prévue, vérifier si une voiture de service est disponible (véhicule réservé les lundi, mercredi et vendredi pour Ruyère),
- Consultation à distance du pluviomètre de Ruyère, et vérification du pluviomètre au Calvaire lors des passages sur le site pour estimer la pluie effectivement tombée.

Conditions de l'échantillonnage

Définitions :

Tl : date/heure de mise en place des capteurs passifs

Tm : date/heure de début de montée de la nappe

Echantillonnage automatique :

- L'échantillonnage automatique sera lancé seulement au moment où un épisode pluvieux est annoncé ou au moment où un événement important débute.
- Passages pour vider les échantillons du préleveur au plus tous les 5 j (lundi, vendredi) et a minima tous les 2 j si pluie
- si Δh est nul ou négatif, on jette l'eau des flacons et on les remplace par des propres,
- $10 > \Delta h > 2$ cm mais qu'il a plu moins de 15 mm cumulés sur 3 jours, on jette l'eau tous les flacons sauf les deux derniers,
- $10 > \Delta h > 2$ cm et qu'il a plu 15 mm cumulés sur 3 jours ou plus, on garde tous les échantillons
- si $\Delta h > 10$ cm, on garde tous les échantillons (même si la pluie est inférieure à 15 mm)

Echantillonnage passif :

→ Dès que le cumul de pluie est atteint (environ 15 mm de cumul de pluie sur 3 jours consécutifs) ou en anticipation si un gros événement est prévu: prévoir la mise en place des capteurs passifs,

→ Si au prochain passage le cumul de pluie n'a pas été atteint on les enlève et on les remplace. Si le cumul est suffisant, les capteurs sont récupérés et changés toutes les semaines.

Techniques d'échantillonnage

Préleveur automatique :

BE2 : lancement début avril :

- échantillonnage asservi au temps (minimum toutes les 6h) sans vidange préalable.

Capteurs passifs :

Mise en place à Tl (profondeurs données par rapport au niveau du sol) :

- BE1 Surface (filin à - 500 cm avec flotteur à 15 cm du capteur),
- BE1P (filin à - 595 cm),
- BE2 Surface (filin à - 220 cm avec flotteur à 15 cm du capteur),
- BE2P (filin à - 340 cm),
- BE6 Surface (filin à - 120 cm avec flotteur à 15 cm du capteur)
- Morcille.

Exposition durant $T_m + 7j$ ou $T_l + 7j$ si $T_l > T_m$, durant au maximum 3 semaines consécutives.

Prélèvements ponctuels :

- Des prélèvements ponctuels de faible volume (max 250 mL) sont réalisés à l'installation/retrait des capteurs dans le BE1, BE2P et le BE6, aux profondeurs d'installation des capteurs passifs grâce aux tubes capillaires installés au préalable (en tout, 4 dates x 3 points de prélèvement sur 3 semaines).
- Un prélèvement ponctuel de 1 L est réalisé dans le BE2 (Surface) et le BE2P en condition de nappe suffisamment haute ($\geq h_{\text{initiale}} + 40$ cm). (Flacons spécifiques du Laboratoire de la Drôme). Il est réalisé de manière à ne pas perturber le prélèvement automatique.
- Deux prélèvements ponctuels seront effectués dans BE2P, en surface (-15 cm sous le niveau) pendant la montée puis la descente de la nappe, afin de vérifier l'homogénéité de la colonne d'eau dans ce piézomètre.

Retour labo

LAMA : Les échantillons ramenés au laboratoire sont mis au congélateur sans filtration. Les flacons du préleveur sont nettoyés au labo.

Laboratoire de la Drôme : les échantillons sont acheminés en véhicule de service directement le jour du prélèvement dans la glacière du laboratoire.

Conditions de poursuite ou arrêt

- Si à T1 + 2 jours on n'a pas de montée de nappe, on retire les capteurs passifs et on repart à zéro. Nettoyage des flacons.

- Sinon, on poursuit jusqu'à redescente de la nappe et au maximum 3 semaines après Tm. Passages de récupération des échantillons tous les 2 jours (lundi, mercredi, vendredi) et ajuster si besoin.

Annexe

Niveaux des différents types de sondes par rapport à l'extrémité supérieure du tube :

Piézomètre	BE1 Surface	BE1P	BE2 Surface	BE2P	BE6 Surface	Morcille
Mesures	Sonde piézo	Sonde piézo + CTD diver (-563.5)	Sonde piézo	Sonde piézo + diver (-410)	Sonde piézo + diver (-327)	
Echantillons automatiques toutes les 6h Récup entre 2 et 5 jours.			- 20 cm sous niveau piézo			
Echantillons manuels (250mL) à chaque pose et retraits des TS	- 15 cm sous niveau			2Ps : -15 sous niveau (2x) 2Pf : -390 cm	- 15 cm sous niveau	
TS Posée toutes les semaines	- 15 cm sous niveau (-500)	- 595 cm	- 15 cm sous niveau (-270)	- 390 cm	- 15,00 cm sous niveau (-175)	Dans le courant
Echantillon LDA : niveau nappe > 40cm			-15 cm sous le niveau			

Niveau piézomètres (par rapport au haut du tube) au 10/04/2015 :

Date Heure (GMT)	BE1	BE1P	BE2	BE2P	BE6
10/04/2015	- 460	- 477	- 213	- 213	- 150

Niveau piézomètres (par rapport au haut du tube) au 17/04/2015 :

Date Heure (GMT)	BE1	BE1P	BE2	BE2P	BE6
17/04/2015	- 475	- 492	- 220	- 220	- 162

Infos piézos :

Piézomètre	BE1	BE1P	BE2	BE2P	BE6
prof /sol	-503	-615	-319	-362	-354
Htube en surface	0	0	51	49	55
Htube totale (ss sol + surf)	-503	-615	-370	-411	-409

Parcelle de vignes

Suivi dans la nappe

Dispositif de suivi

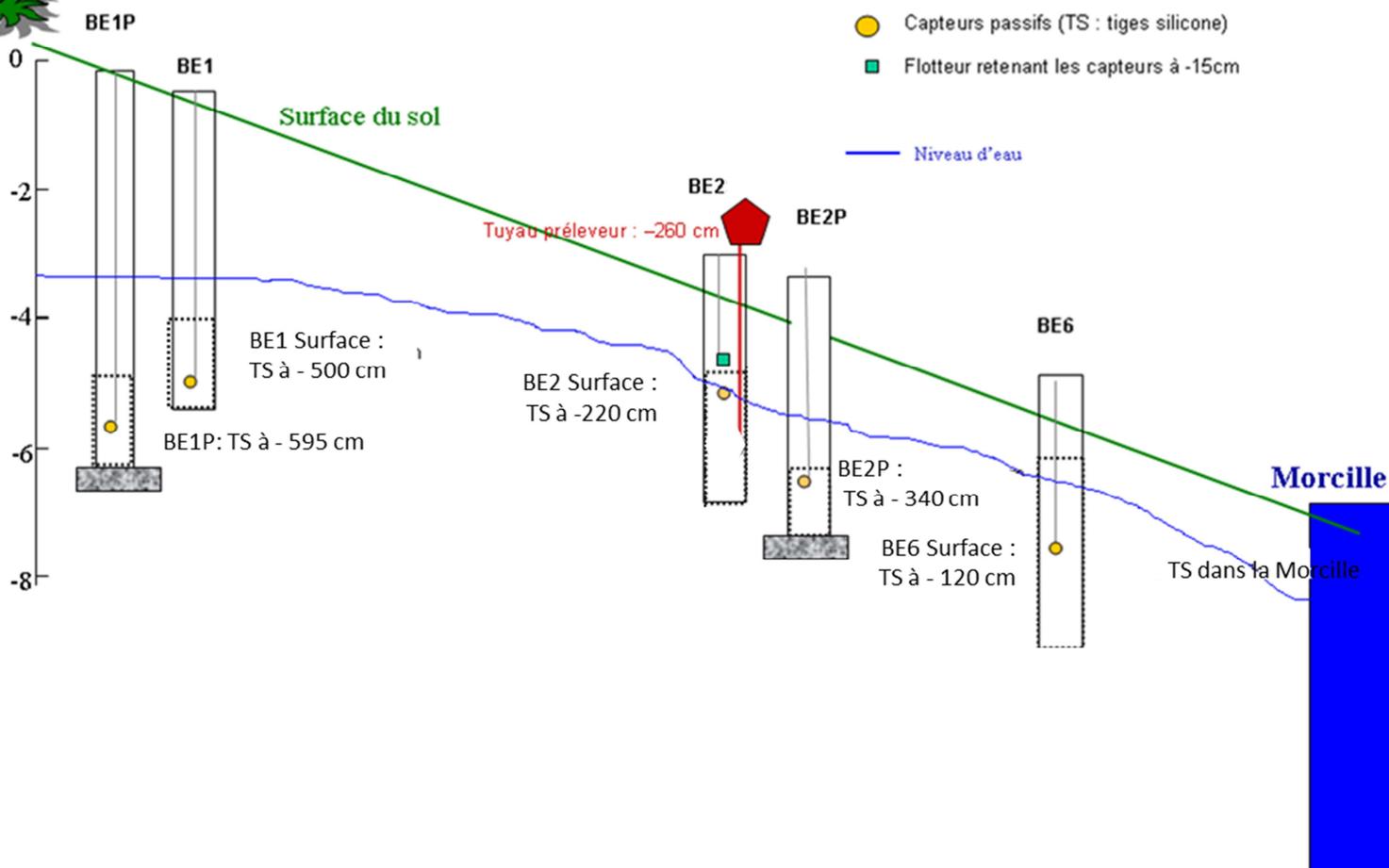
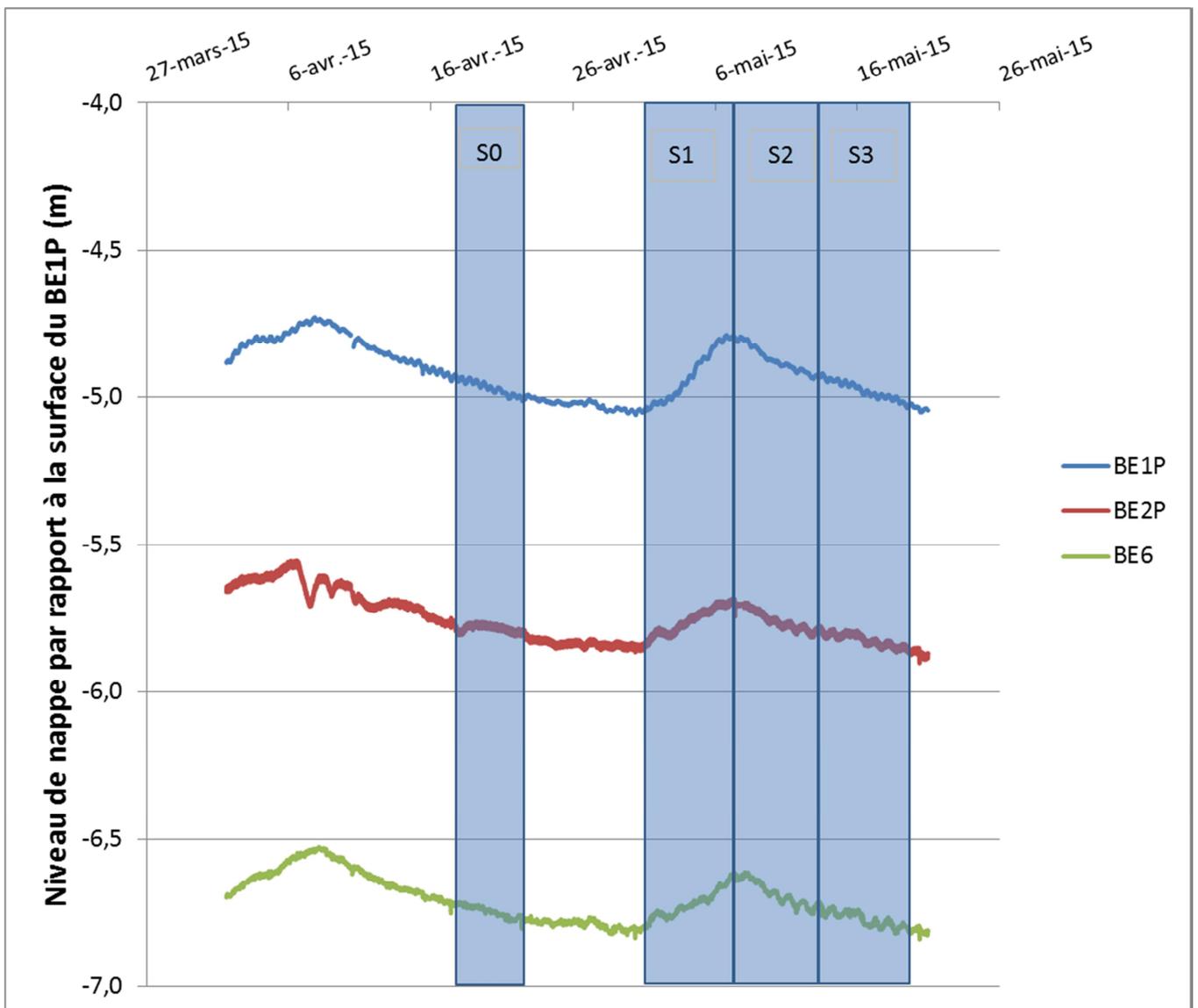


Schéma décrivant les appareils de mesure présents sur la bande enherbée et leurs principales caractéristiques

Annexe 12 : Périodes de pose des tiges silicone au cours du suivi en conditions naturelles en 2015 sur le site de St Joseph



Annexe 13 : Protocole de mise en œuvre d'un épisode de ruissellement artificiel sur la placette de St Joseph, le 13 mai 2014

Objectifs :

- évaluer en quelle mesure une infiltration importante (mais réaliste par rapport à une arrivée de ruissellement concentré de la parcelle en amont) au sein de la bande enherbée peut induire ou non, une contamination de la nappe sous-jacente,
- évaluer s'il existe une différenciation du transfert selon les substances (en lien avec leurs propriétés).

Méthodologie :

Dans la suite, on désignera l'**expérimentation** qui a consisté à générer un épisode de ruissellement artificiel **par le terme de simulation** (ie : simulation physique) **de ruissellement**.

- réalisation d'une simulation de ruissellement avec une solution contenant un traceur (KBr) et des substances actives choisies en concentrations connues (substances non utilisées par M. Ducroux pour éviter d'interférer avec les substances déjà présentes dans le milieu) selon un protocole proche de ce qui a été fait au cours du post doc d'Arnaud Boivin, 2007, mais adapté pour suivre également la nappe en quantitatif et qualitatif .

Dispositif :

La parcelle enherbée (Figure 58) (4 x 6 m²), est isolée hydrauliquement en surface (pas d'arrivée du ruissellement naturel de la parcelle de vigne). Elle est équipée d'une gouttière en amont qui permet de répartir par surverse l'eau apportée par la simulation de façon suffisamment homogène sur toute la largeur de la bande. Elle est également munie d'une gouttière en aval (placée à 15 cm sous la surface du sol), pour collecter les ruissellements de surface/proche sub-surface éventuels pendant la simulation. La placette est équipée de lysimètres gravitaires mis en place par Lacas (2005), à 50 cm sous la surface du sol. Des piézomètres permettent de suivre la variation du niveau de la nappe tout au long de l'expérimentation (Figure 58 et Figure 59). Les piézomètres BE2, BE2P et BE6 sont suivis (prélèvements manuels) régulièrement pour estimer le transfert des substances au cours du temps. Un échantillonneur automatique est installé au BE2 Surface afin de suivre de façon plus fine la dynamique de transfert de surface. Des échantillonneurs passifs sont installés à plusieurs profondeurs au sein de ces piézomètres et exposés 3 fois 1 semaine (Figure 60). La pluie est estimée par les pluviomètres de Calvaire et Ruyère.

Description de l'expérimentation :

Solution initiale : Le KBr et les substances actives sont dissous dans 4000 L d'eau de la Morcille. Les concentrations finales sont réunies dans le tableau :

SA étudiée	spécialité commerciale (SC)	formulation	concentration initiale
Tébuconazole (TBZ)	Corail (BAYER SA)	EMULSION AQUEUSE	147.4 µg/L
Diméthomorphe (DMM)	Panthéos (BASF AGRO SAS)	GRANULES DISPERSIBLES DS EAU	226.1 µg/L
Isoproturon (IPU)	Protugan (MAKHTESHIM AGAN France)	SUSPENSION CONCENTREE	204,6 µg/L
Bromure (Br)	Potassium Bromure Très Pur (SODIPRO)	Cristaux dispersibles dans l'eau	807 mg/L

La solution est homogénéisée dans un bassin de 5000 L plusieurs heures avant la simulation et une vérification préalable de l'homogénéité de la conductivité est réalisée.

La préparation des solutions et l'analyse de ces substances est réalisée au Laboratoire d'Analyse des Milieux Aquatiques (LAMA).

Principe de la simulation :

On injecte les 4000 L de solution de pesticides et de traceur homogénéisée dans la gouttière en amont de la bande, au temps t_0 , au moyen d'une pompe à un débit constant de 2.6 L/s, réaliste pour ce site (période de retour de 2 ans (Figure 56)). La durée d'injection est d'environ 30 minutes. On suit finement les transferts d'eau et de substances dans le ruissellement entrant, sortant, les lysimètres et la nappe (BE2, BE2P et BE6), pendant la simulation et quelques heures après la fin de l'injection. Puis on suit de manière plus espacée pendant les semaines suivant la simulation.

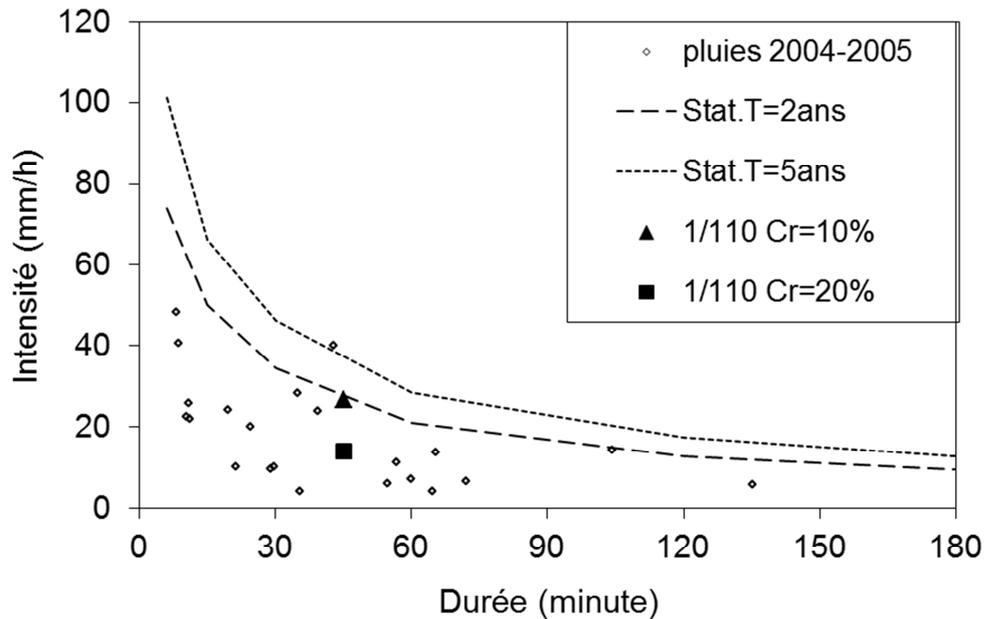


Figure 56. Période de retour de la pluie susceptible de générer le ruissellement simulé selon que l'on considère un coefficient de ruissellement de 10% (triangle plein) ou 20 % (carré plein) pour un ratio surfacique placette enherbée/parcelle de vigne de 1/110.

Paramètres suivis avant le lancement de la simulation :

- **screening Laboratoire de la Drôme** : prélèvements la veille de la simulation :
 - blancs pesticides dans l'eau de la Morcille.
 - blancs pesticides dans les piézomètres choisis (BE2P et BE6) : vidange des piézomètres et prélèvement d'eau renouvelée.
- **analyses TBZ, DMM et IPU et Br par le LAMA** : le jour de la simulation :
 - blancs dans les piézomètres BE1 (milieu de crépine), BE2 (340 cm), BE2P (340 cm) et BE6 (250 cm) : prélèvement manuel sans vidange à la profondeur de pose des échantillonneurs passifs profonds.
 - blancs dans les lysimètres..
- **analyses de blancs sur échantillonneur passif** : une semaine avant la simulation :
 - pose de tiges silicone dans le BE2 (340 cm), BE2P (340 cm) et le BE6 (250 cm) une semaine avant la simulation et récupération juste avant le lancement de la simulation (analyse DMM et TBZ, IPU).

- **prélèvements de sol pour mesure d'humidité initiale** (à la tarière) autour de la bande pour faire des mesures d'humidité initiale (profondeurs 0-10cm, 10-20cm, 20-30cm. 6 localisations autour de la bande - mélange par profondeur pour chaque côte topo (**Figure 57**).

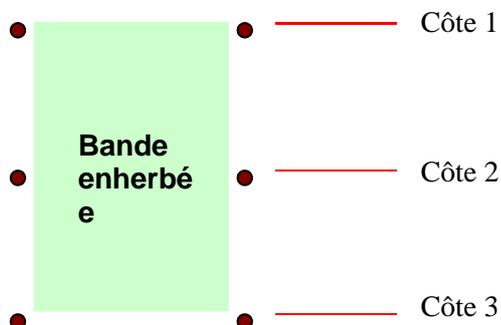


Figure 57. Position des points d'échantillonnage de sol (points rouges) pour mesure d'humidité initiale sur la placette enherbée.

Paramètres suivis uniquement le jour de la simulation :

On suit les transferts hydriques et les concentrations en pesticides et traceur :

- dans l'eau de ruissellement entrant sur la bande,
- dans l'eau de ruissellement en sortie.

Paramètres suivis le jour de la simulation et les jours suivants :

On suit les transferts hydriques et les concentrations en pesticides et traceur par prélèvements manuels ou automatiques :

- prélèvements manuels réguliers tant qu'il y a de l'eau dans les 3 lysimètres gravitaires (A, B et C notamment), sachant que chaque lysimètre possède deux bouteilles de 10L préalablement vidées.
- dans le piézomètre BE2 en Surface : prélèvements manuels puis via un échantillonneur automatique à environ 15 à 20 cm sous la surface de la nappe (**Tableau 14**).

Le recours à cet échantillonneur a pour objectif :

- de capter d'éventuels transferts rapides sur le toit de la nappe de la solution infiltrée dans la bande enherbée pendant la simulation et les heures suivantes,
- puis de capter un éventuel transfert plus lent.

Plages de prélèvement	Fréquence	Nombre d'éch.	Type de prélèvement
T0 à T0+2h	1 éch / 15 min	9 éch	Manuel
T0+2h à T0+4h	1 éch / 30 min	8 éch	Manuel
<i>T0+4h à T0+24h</i>	<i>1 éch / 60 min</i>	<i>18 éch</i>	<i>Automatique</i>
<i>T0+24h à T0+48h</i>	<i>1 éch/ 2h</i>	<i>9 éch</i>	<i>Automatique</i>
<i>Semaines 1 et 2 suivantes</i>	<i>1 éch/ 24h</i>	<i>14 éch</i>	<i>Automatique</i>
<i>Semaines 3 et 4 suivantes</i>	<i>1 éch/ 72h</i>	<i>5 éch</i>	<i>Automatique</i>

Bleu : jour de la simulation ; italique : jours suivants ; bleu et italique : intermédiaire

Tableau 14. Récapitulatif des types, fréquences de prélèvements et du nombre d'échantillons au sein du BE2 en Surface par période de prélèvement (to : heure de lancement de la simulation)

* Par échantillonneurs passifs :

- dans les piézomètres BE1P, BE2 (2 profondeurs), BE2P et BE6 un suivi semi-quantitatif est réalisé via des échantillonneurs passifs (**Tableau 15**). L'application de

TS sur le site BE1P sert à vérifier l'apport en contaminants en amont pendant la simulation.

L'intérêt d'avoir recours à ces outils réside dans leur capacité d'intégration des concentrations dans le temps.

Les échantillonneurs appliqués sont des tiges en silicone (TS) et des p-SBSE (passive Stir Bar Sorptive Extraction) dopées en PRC. Ils permettent d'obtenir dans un premier temps une donnée qualitative sur la présence des pesticides (TBZ, DMM et IPU ou autres). La détermination des taux d'échantillonnage en laboratoire permettra de remonter dans un second temps à une concentration sur site.

Piézo/Temps	4h	24h	Semaine 1, 2 et 3
BE1P			TS
BE2Surface flotteur	TS	TS	TS
BE2 Fond	TS p-SBSE	TS p-SBSE	TS p-SBSE
BE2P Fond	TS	TS	TS
BE6			TS

TS : tige silicone, p-SBSE : passive Stir Bar Sorptive Extration

Tableau 15. Piézomètres équipés d'échantillonneurs passifs et durée d'exposition après le début de la simulation.

- Position des échantillonneurs par rapport à la surface du sol : (Figure 60)
 - BE1P : en milieu de crépine : 560 cm,
 - BE2 Surface : échantillonneurs de surface retenus par un flotteur à 15, 20 et 25 cm sous la surface de la nappe (les échantillonneurs sont placés dans l'ordre suivant de haut en bas de la tige de fixation : 1) TS 4h , 2) TS 24h et 3) TS S1 (= semaine 1). Cela impose d'enlever l'ensemble des échantillonneurs pour prélever les premiers. La TS la plus profonde est à 265 cm environ,
 - BE2 Fond (profond) : 340 cm,
 - BE2P Fond : profond : 340 cm,
 - BE6 : 250 cm (milieu de crépine).

Détail des mesures « physiques » :

- mesure du volume total ruisselé en aval (bac totalisateur avec prélèvement et vidange à pas de temps régulier selon la vitesse de remplissage).
- mesure des volumes prélevés dans les lysimètres par pas de temps d'environ 10 min.
- mesure « en continu » (sondes automatiques) des niveaux piézométriques dans le BE2 et le BE6 ainsi que ponctuellement dans les autres piézomètres.
- mesure de la pluie via les pluviomètres de Calvaire et Ruyère.

La profondeur de prélèvement automatique (BE2 Surface) et les profondeurs de pose des SBSE sont définies en se basant sur les résultats du traçage 2013, sur la hauteur de nappe initiale ainsi qu'en considérant la remontée de nappe probable pendant la simulation : environ 30 cm observés en 2006 au piézomètre C et 70 cm au piézomètre B (Boivin et al., 2007).

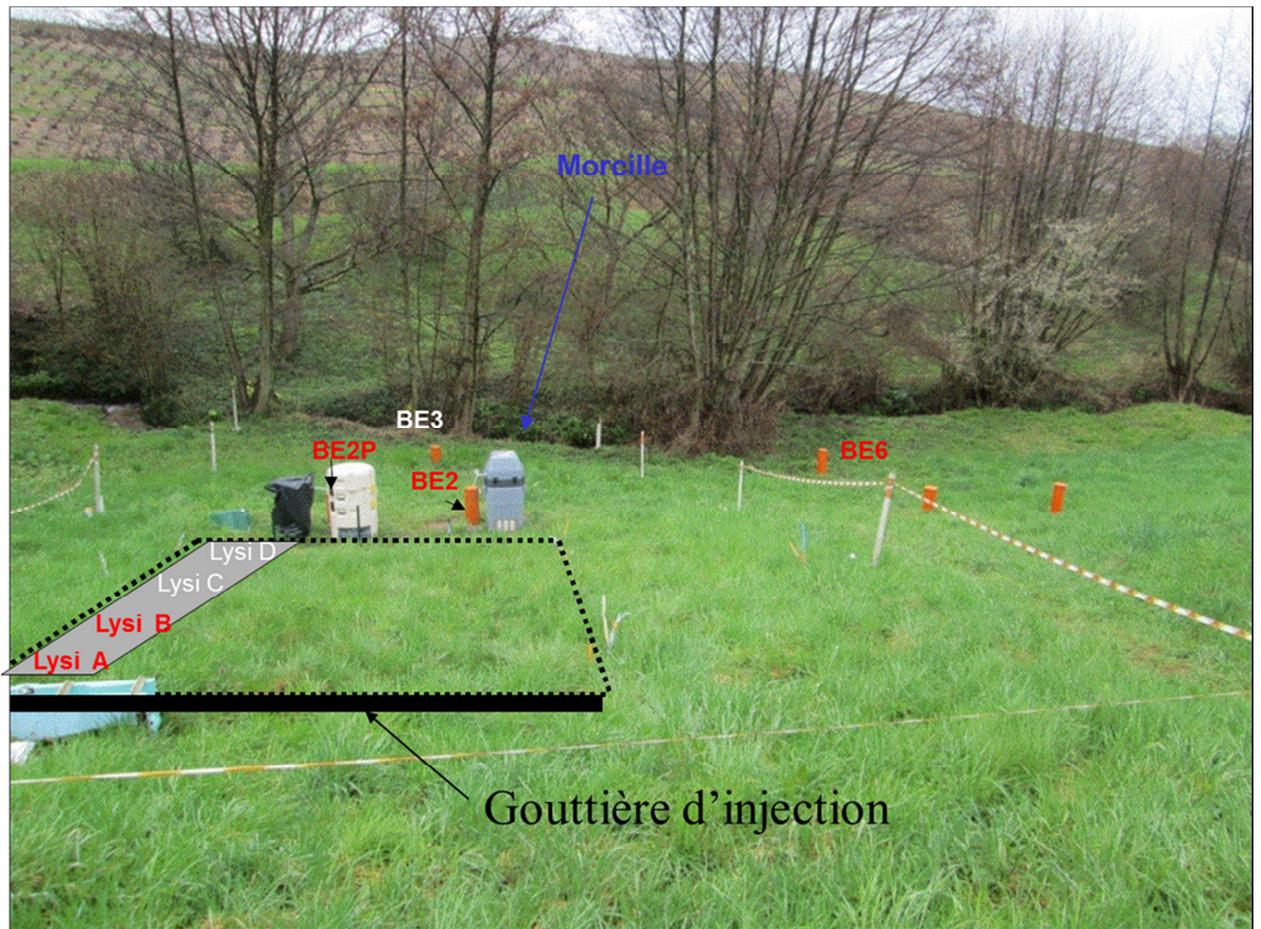
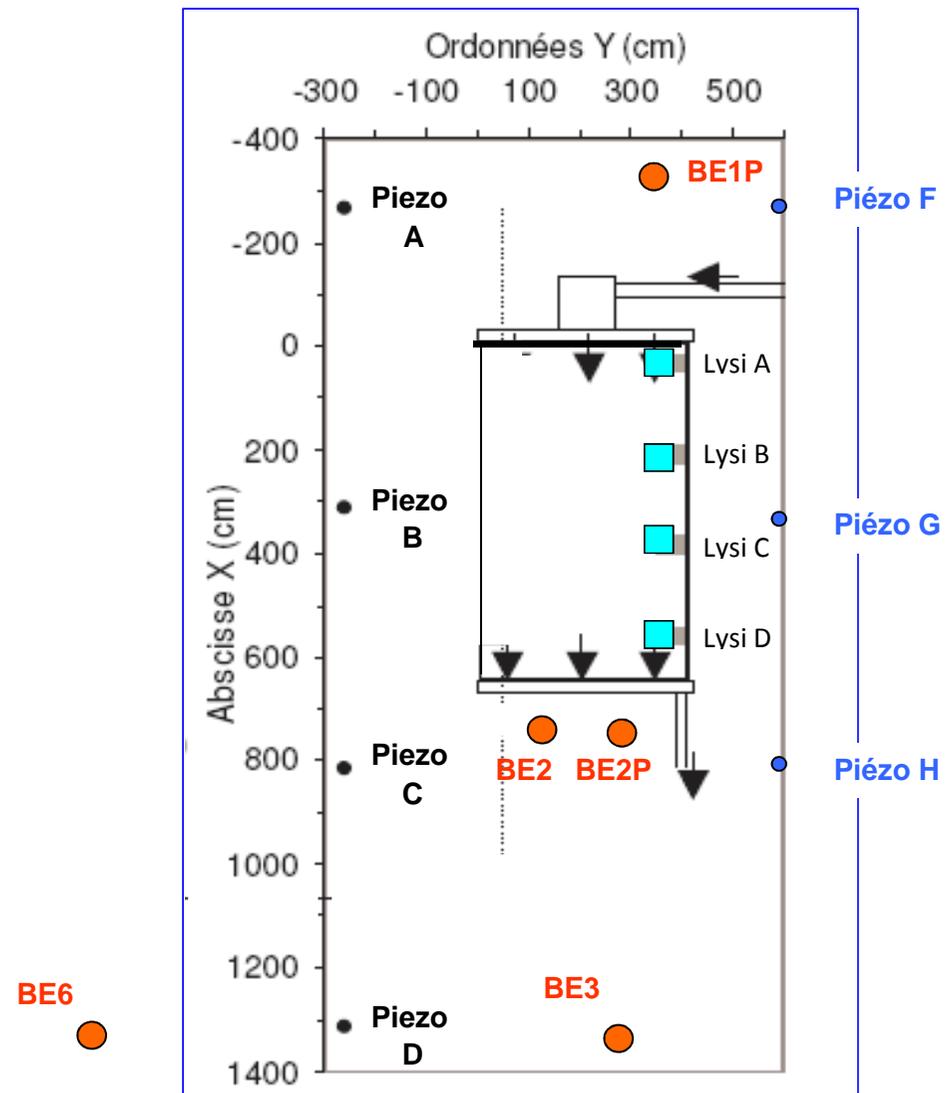


Figure 58. Photo du site expérimental (vue de l'amont vers l'aval du versant) : placette enherbée équipée de lysimètres (A à D), piézomètres suivis (BE2, BE2P, BE6) avec préleveur automatique utilisé au BE2 en Surface.



Morcille

Figure 59. Schéma de l'instrumentation de la placette enherbée étudiée : lysimètres (A à D), piézomètres anciens peu profonds (A à H) et nouveaux piézomètres (BE1P, BE2, BE2P, BE3 et BE6).

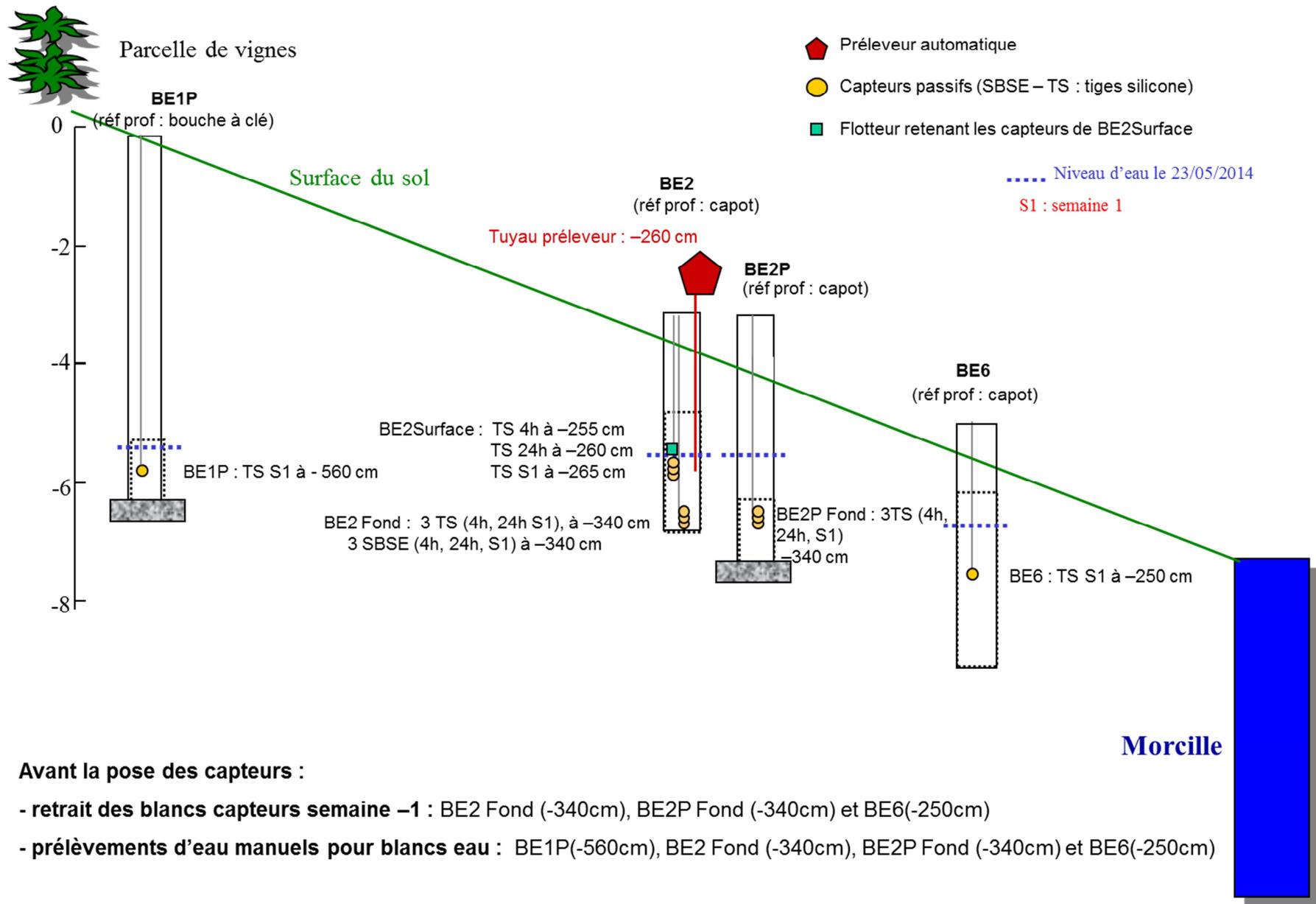


Figure 60. Coupe longitudinale du versant suivi : piézomètres suivis et position des dispositifs d'échantillonnage actif et passif.

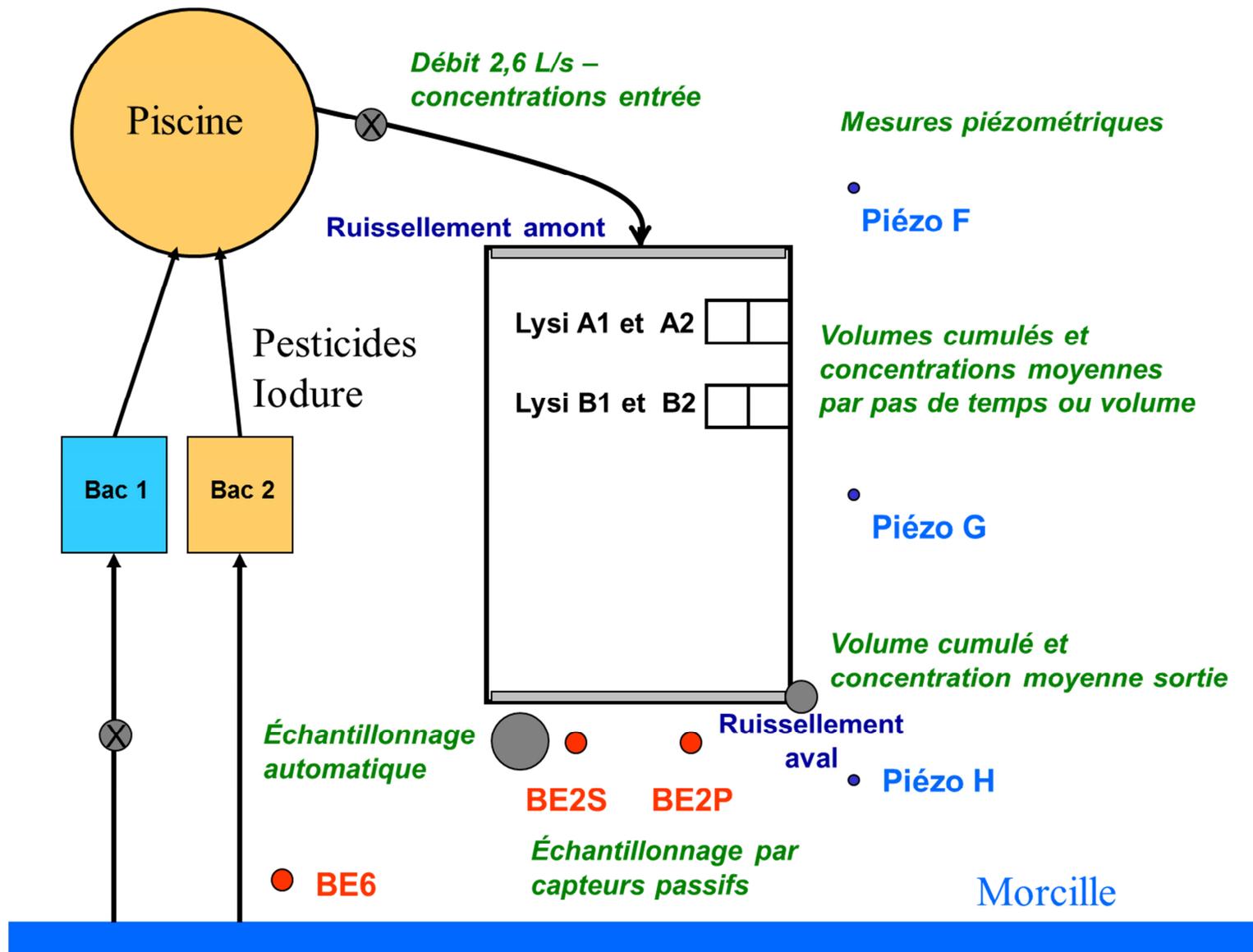


Figure 61. Schéma de mise en œuvre et de suivi au cours de la simulation de ruissellement du 13 mai 2014.

Annexe 14 : Evolution des masses de pesticides piégées sur les tiges silicone (TS) après une exposition de 6 h, 1 j et 7 j à partir du début de l'application de l'épisode de ruissellement artificiel (désignée sous le terme de simulation de ruissellement) sur le site de <St Joseph

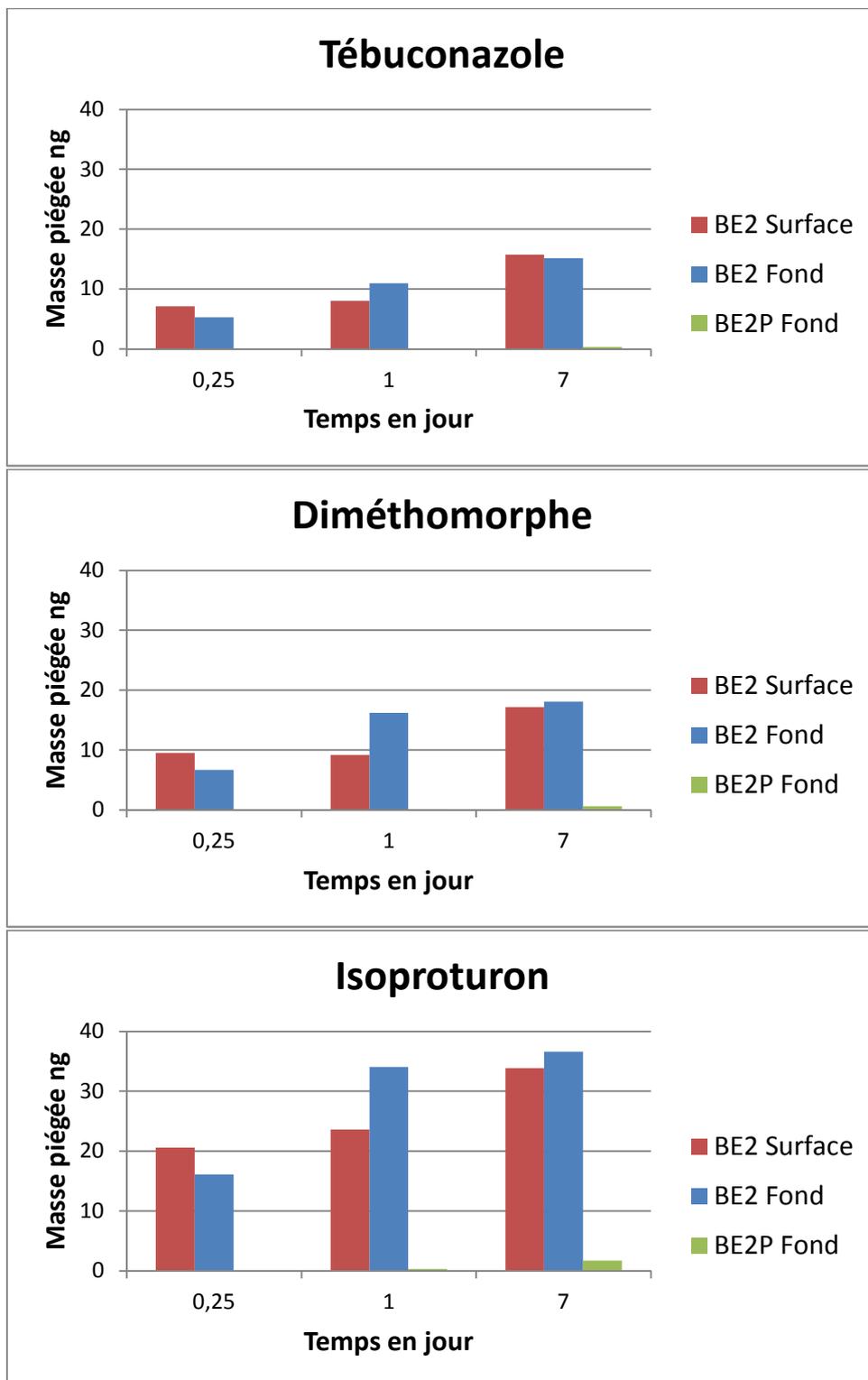


Figure 62. Masses de pesticides piégées sur les tiges silicones exposées 6 h, 1 j et 7 j à partir du début de la simulation de ruissellement au sein des piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond et BE2P Fond.

Annexe 15 : Comparaison « qualitative » du suivi ponctuel et du suivi intégratif durant la deuxième semaine suivant l'application de l'épisode de ruissellement artificiel (désignée sous le terme de simulation de ruissellement) sur le site de St Joseph

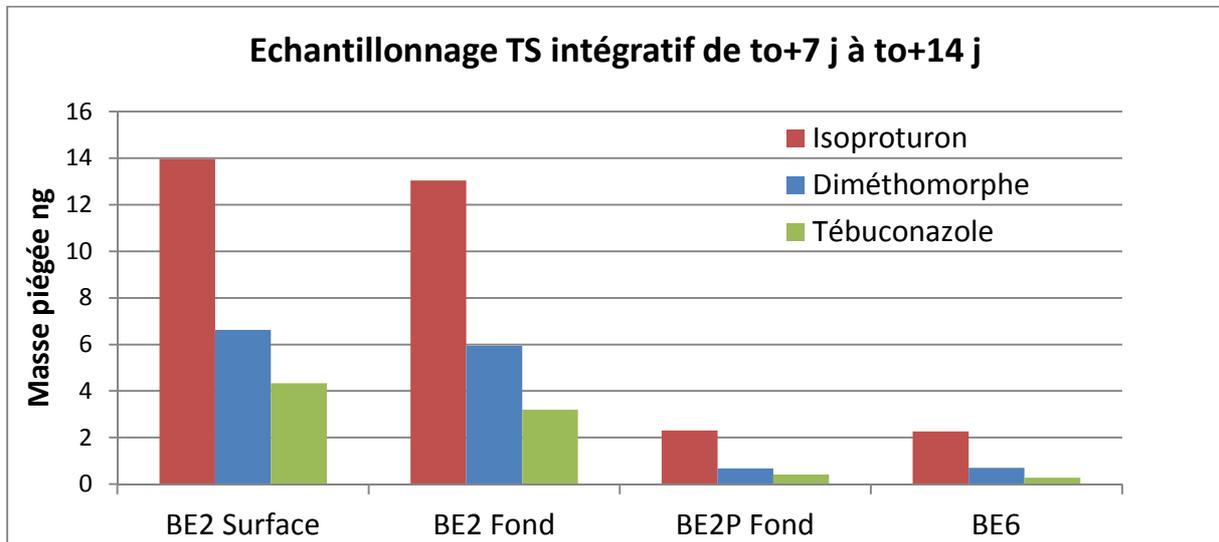


Figure 63. Masses en pesticides piégées au sein des Tiges Silicones (TS) exposées dans les piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond, BE2P-fond, BE6 du 7^e au 14^e jour suivant la simulation de ruissellement.

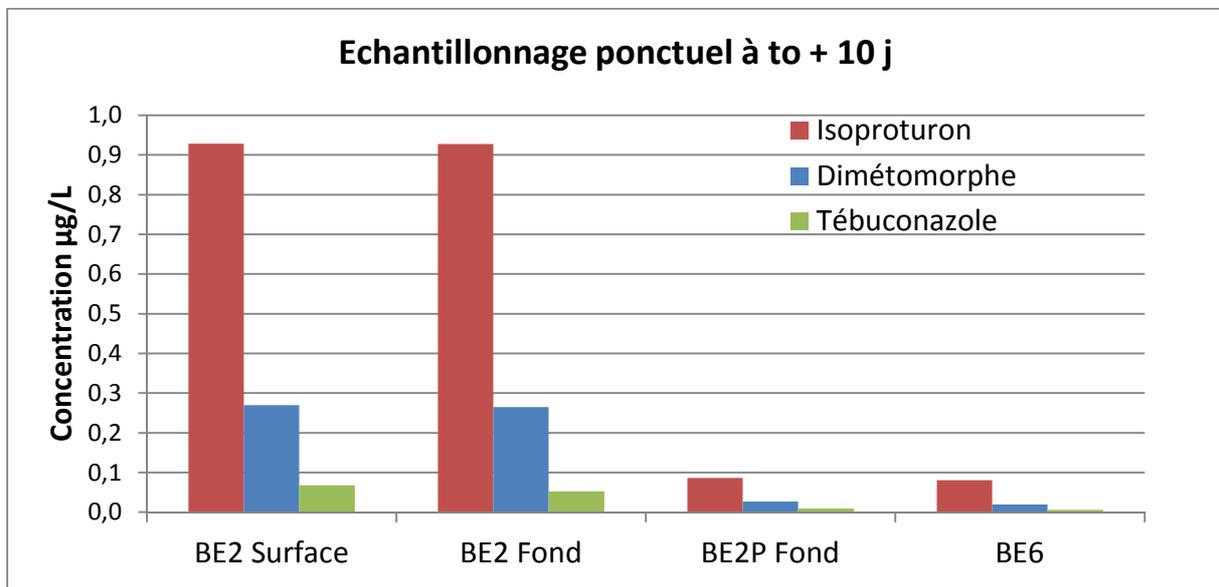
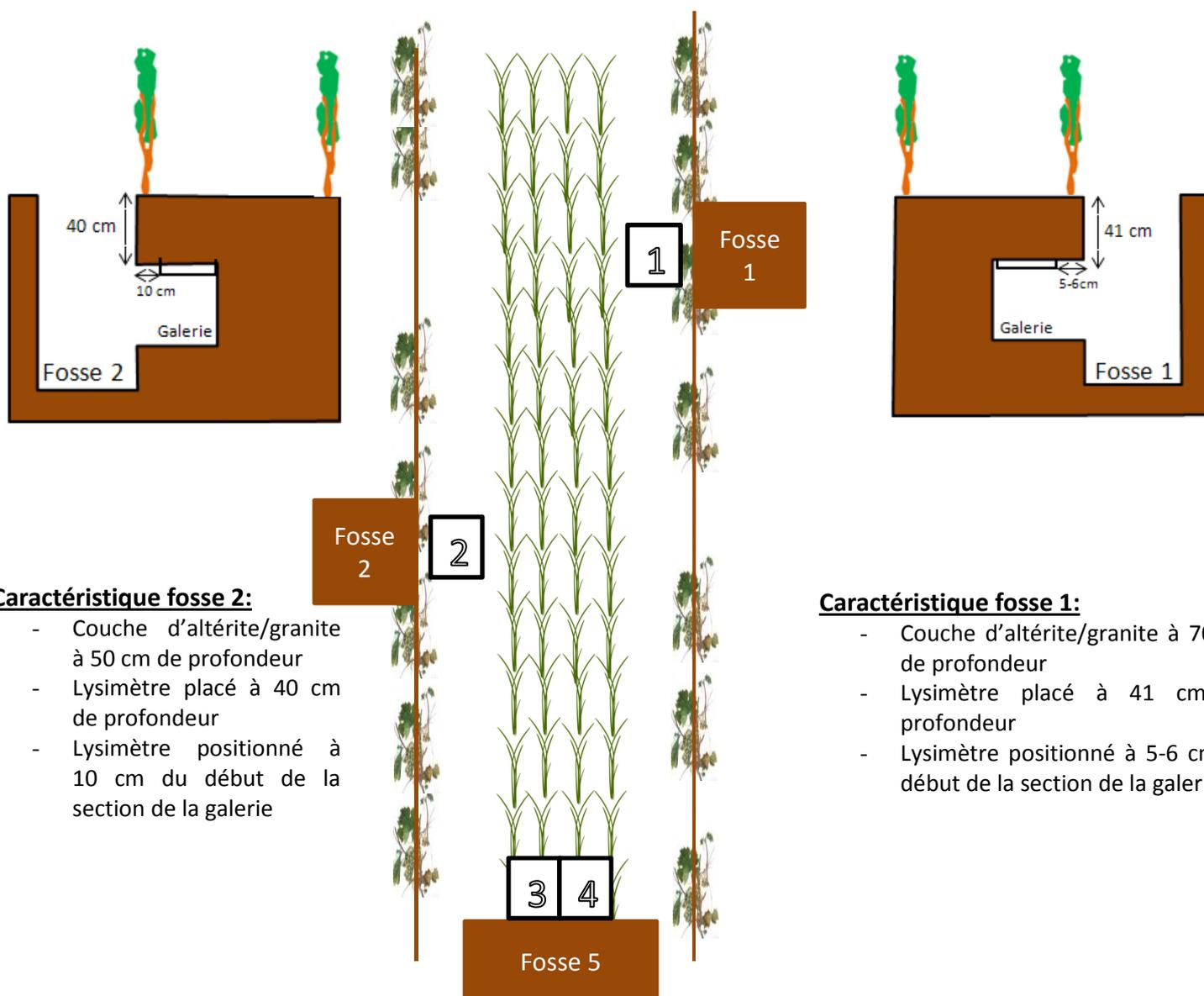


Figure 64. Concentrations en pesticides mesurées ponctuellement le 10^e jour suivant la simulation de ruissellement dans les piézomètres BE2 Surface, BE2 Fond, BE2P Fond, BE6.

Annexe 16 : Schémas de mise en place des lysimètres sur le site de Bellevue

IR 1 : enherbé



Caractéristique fosse 2:

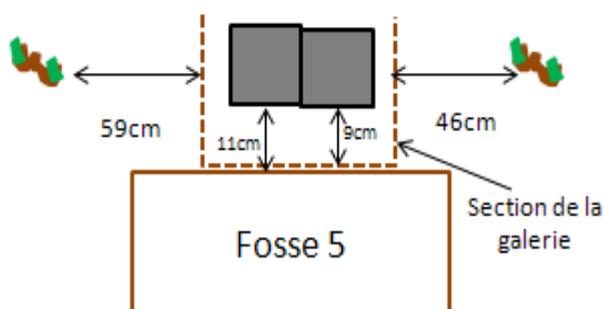
- Couche d'altérite/granite à 50 cm de profondeur
- Lysimètre placé à 40 cm de profondeur
- Lysimètre positionné à 10 cm du début de la section de la galerie

Caractéristique fosse 1:

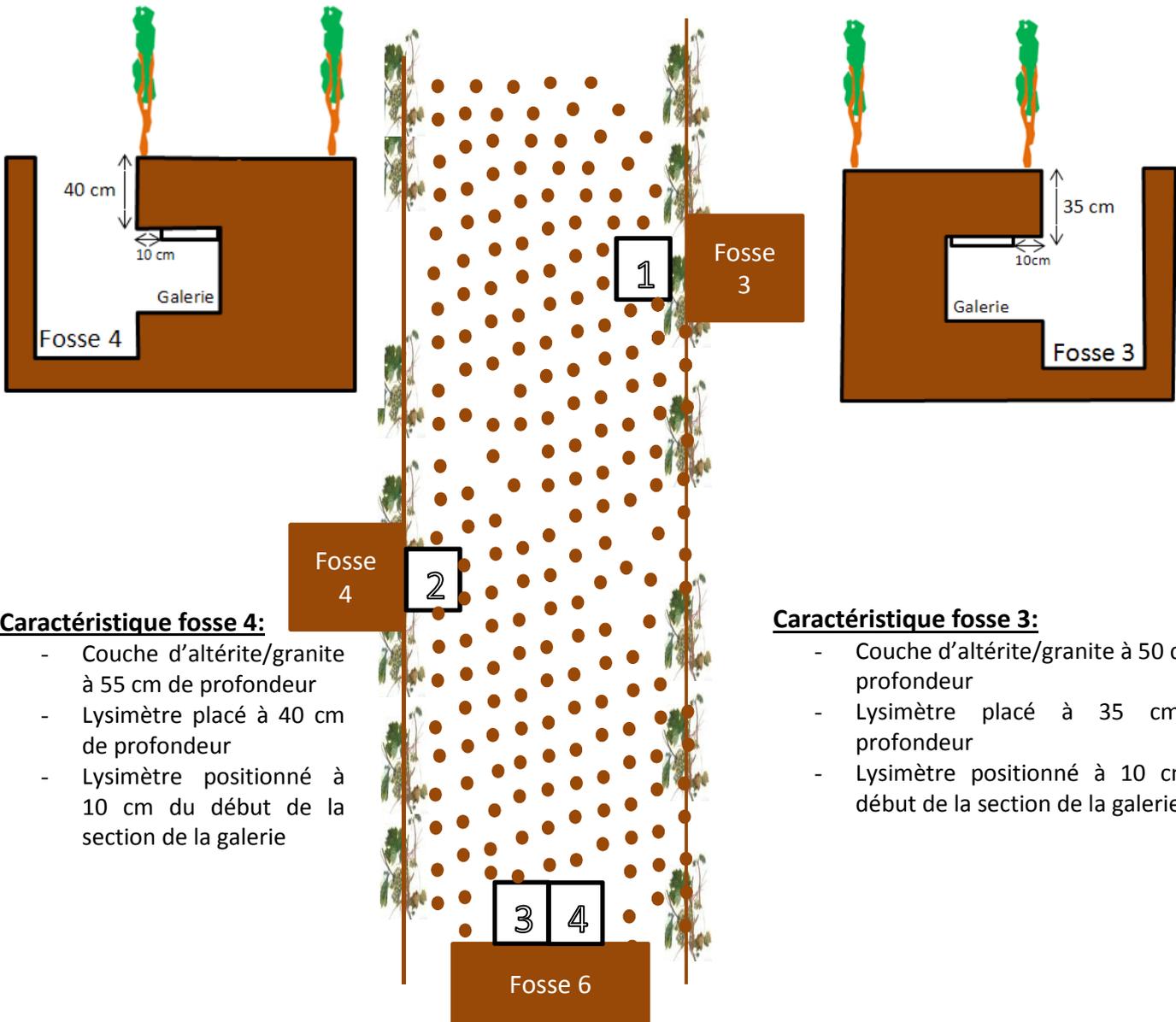
- Couche d'altérite/granite à 70 cm de profondeur
- Lysimètre placé à 41 cm de profondeur
- Lysimètre positionné à 5-6 cm du début de la section de la galerie

Caractéristique fosse 5:

- Couche d'altérite/granite à 70 cm de profondeur
- Lysimètre placé à 40 cm de profondeur
- Lysimètres positionnés à 9 et 11 cm du début de la section de la galerie



IR 2 : désherbé



Caractéristique fosse 4:

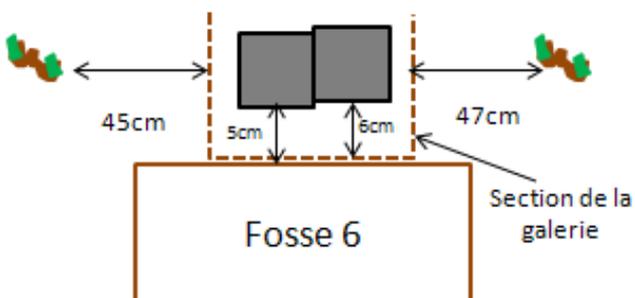
- Couche d'altérite/granite à 55 cm de profondeur
- Lysimètre placé à 40 cm de profondeur
- Lysimètre positionné à 10 cm du début de la section de la galerie

Caractéristique fosse 3:

- Couche d'altérite/granite à 50 cm de profondeur
- Lysimètre placé à 35 cm de profondeur
- Lysimètre positionné à 10 cm du début de la section de la galerie

Caractéristique fosse 6:

- Gros blocs de granite atteint à 50 cm
- Couche d'altérite dure à 70 cm
- Lysimètre placé à 41 cm de profondeur
- Lysimètres positionnés à 5 et 6 cm du début de la section de la galerie



Annexe 17 : Détail des plaques lysimétriques et du système de collecte du ruissellement sur le site de Bellevue

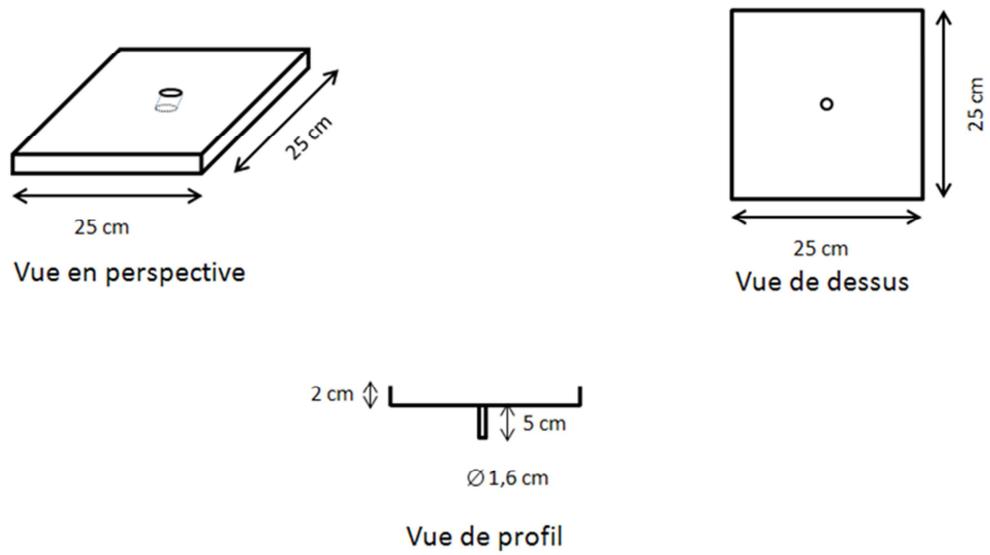


Figure 17.1 : vues et dimensions des plaques lysimétriques installées sur le site de Bellevue

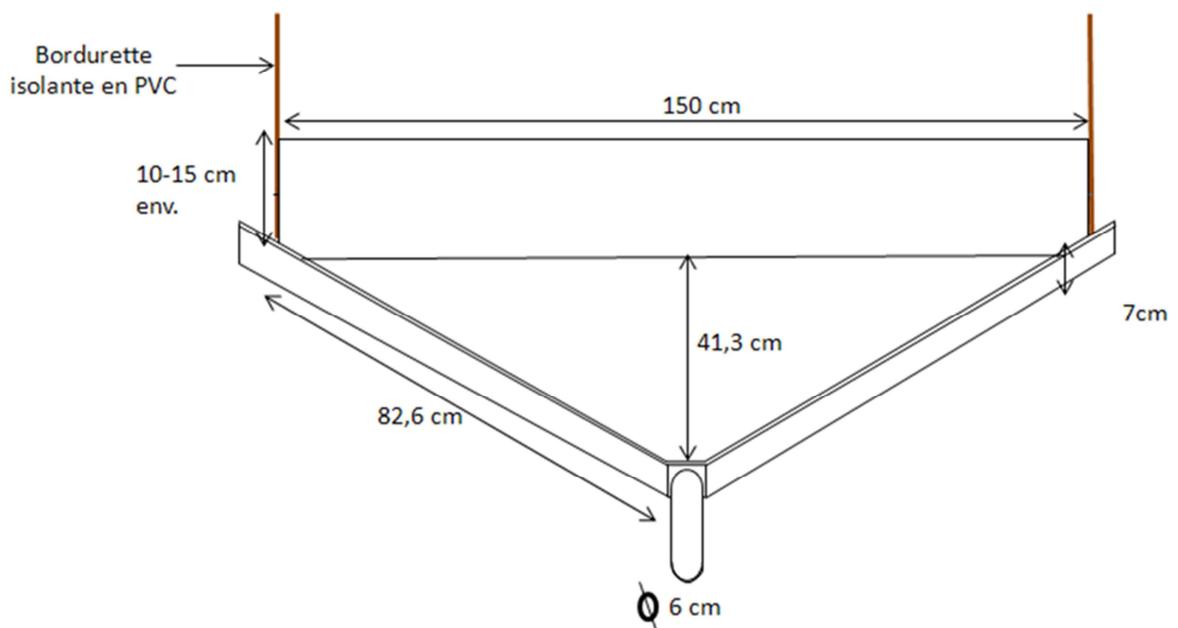


Figure 17.2 : vue et dimensions du système de collecte du ruissellement installé sur le site de Bellevue

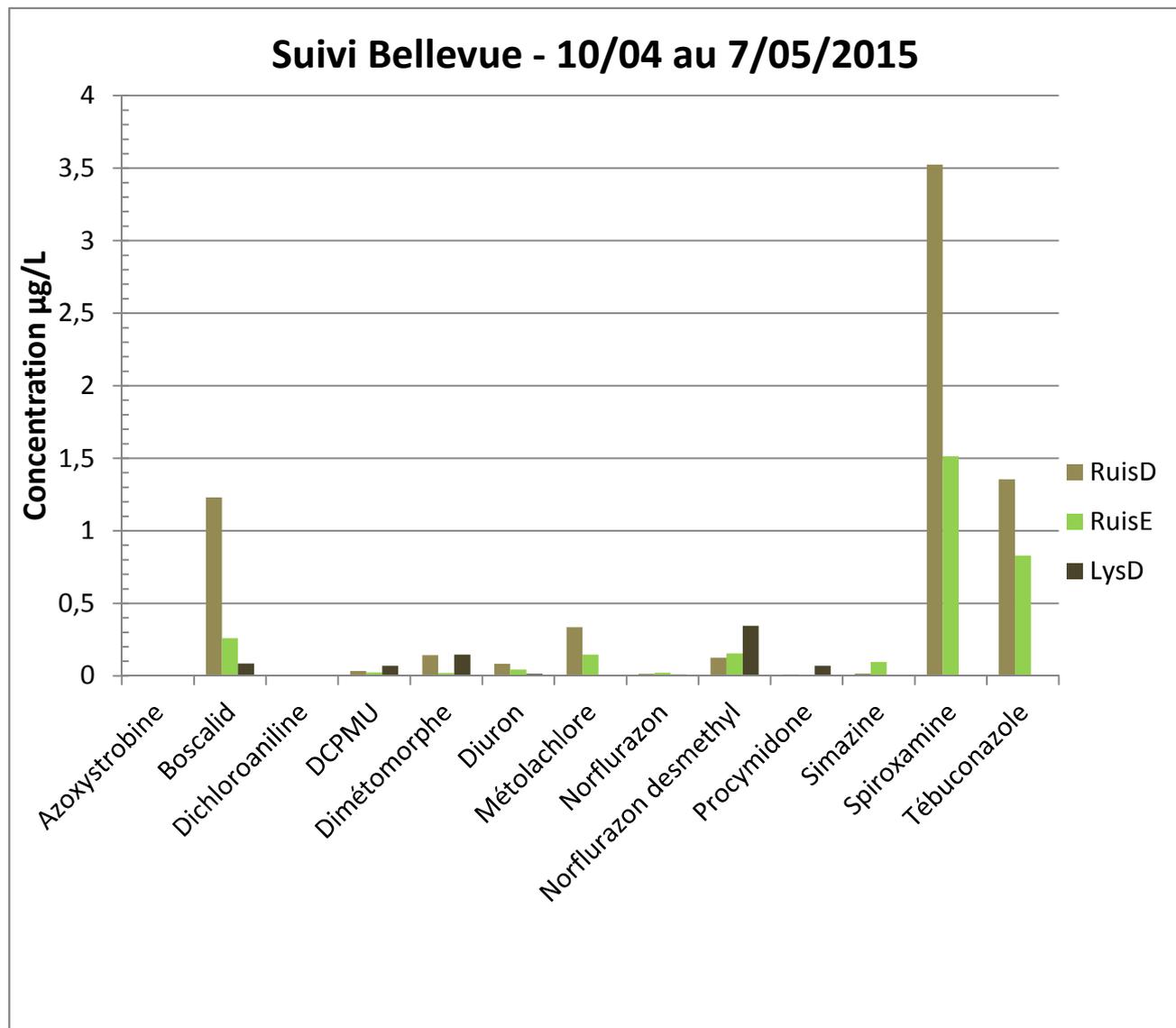
Annexe 18 : Dates d'applications 2014 et 2015 sur le site de Bellevue

Surlignés en orange : les substances suivies dans l'étude

matière active	date de traitement 2014
<i>aminotriazole</i>	fin mars 2014
<i>glyphosate</i>	à partir de fin juin 2014
<i>mancozèbe</i>	05/05/2014
<i>fosétyl-Aluminium</i>	05/05/2014
<i>soufre micronisé</i>	05/05/2014
<i>mancozèbe</i>	15/05/2014
<i>mefenoxam</i>	15/05/2014
<i>cyflufénamid</i>	15/05/2014
<i>fluopicolide</i>	30/05/2014
<i>fosétyl-Aluminium</i>	30/05/2014
<i>tébuconazole</i>	30/05/2014
<i>amétoctradine</i>	14/06/2014
<i>métirame</i>	14/06/2014
<i>pyraclostrobine</i>	14/06/2014
<i>métirame</i>	14/06/2014
<i>diméthomorphe</i>	26/06/2014
<i>métirame</i>	26/06/2014
<i>tébuconazole</i>	26/06/2014
<i>cuivre</i>	05/07/2014
<i>mancozèbe</i>	05/07/2014
<i>cymoxanil</i>	05/07/2014
<i>trifloxystrobine</i>	05/07/2014
<i>cymoxanil</i>	18/07/2014
<i>cuivre de l'oxychlorure de cuivre</i>	18/07/2014
<i>spiroxamine</i>	18/07/2014
<i>cuivre de l'hydroxyde de cuivre</i>	01/08/2014
<i>chlorpyriphos méthyl</i>	05/07/2014
<i>Indoxacarbe</i>	25/07/2014

matière active	date de traitement 2015
<i>soufre micronisé</i>	30/04/2015
<i>mancozèbe</i>	30/04/2015
<i>mefenoxam</i>	15/05/2014
<i>cyflufénamid</i>	08/07/2015
<i>fluopicolide</i>	27/05/2015
<i>fosétyl-Aluminium</i>	27/05/2015
<i>amétoctradine</i>	12/05/2015
<i>métirame</i>	12/05/2015
<i>pyraclostrobine</i>	12/05/2015
<i>métirame</i>	12/05/2015
<i>spiroxamine</i>	22/07/2015
<i>trifloxystrobine</i>	27/05/2015
<i>fluopyram</i>	27/05/2015
<i>lambda cyhalothrine</i>	27/05/2015
<i>disodium phosphonate</i>	17/06/2015
<i>cyazofamid</i>	17/06/2015
<i>trifloxystrobine</i>	17/06/2015
<i>tébuconazole</i>	17/06/2015
<i>cymoxanil</i>	08/07/2015
<i>cuivre de l'oxychlorure de cuivre</i>	08/07/2015
<i>myclobutanil</i>	08/07/2015
<i>cuivre</i>	08/07/2015

Annexe 19 : Suivi des concentrations en pesticides dans le ruissellement (IRD et IDE) et la percolation (IRD) du site de Bellevue



RuisD : ruissellement de l'inter-rang désherbé (IRD) – RuisE : ruissellement de l'inter-rang enherbé (IRE) et LysD : percolation de l'IRD (l'eau de percolation dans l'IRE n'a pas pu être analysée de manière aussi complète en raison d'un trop faible volume disponible).

Substances quantifiées au moins une fois au cours du suivi de cet épisode, sur la liste des 23 substances recherchées (Acétochlore, Atrazine, Azoxystrobine, Boscalid, Chlorfenvinphos, Chlortoluron, Chlorpyriphos E, Chlorpyriphos M, Dichloroaniline, DCPMU, Diflufénicanil, Diméthomorphe, Diuron, Fénitrothion, Flumioxazine, Isoproturon, Métolachlore, Norflurazon, Norflurazon desmethyl, Procymidone, Simazine, Spiroxamine, Tébuconazole).