

Sol-Phy-Ly

**Evaluation du devenir des produits phytopharmaceutiques en
plein champ en fonction des pratiques culturales pour le
développement d'une agriculture éco responsable**

Rapport d'activités intermédiaire

2021 - 2024

Ce rapport doit être cité comme suit :

Vandenbergh C., Blondel A., Lacroix C., Lefébure K., Colinet G., Dumont B., Pigeon O., 2022. *Evaluation du devenir des produits phytopharmaceutiques en plein champ en fonction des pratiques culturales pour le développement d'une agriculture éco responsable (Sol-Phy-Ly). Rapport d'activités intermédiaire.* Gembloux Agro-Bio Tech (Uliège) & Centre wallon de Recherches Agronomiques. 164 pages.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	11
1.1. CONTEXTE « PHYTO-EAU » EN WALLONIE	11
1.2. DESCRIPTION DES LYSIMÈTRES.....	18
1.3. OBJET DE LA CONVENTION DE RECHERCHE	19
2. ECHANTILLONNAGE	21
2.1. INTRODUCTION.....	21
2.2. ECHANTILLONNAGE ET PREPARATION DES ECHANTILLONS DE SOL	21
2.3. ECHANTILLONNAGE DE L'EAU DE PERCOLATION	21
3. DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE MULTI-RÉSIDUS	22
3.1. LES NOUVELLES MOLECULES SUIVIES	22
3.2. PRINCIPE DE LA VALIDATION	23
3.3. VALIDATION DE LA METHODE MULTI RESIDUS SUR LE SOL	23
3.3.1. Réactifs et solvants utilisés	23
3.3.2. Préparation des échantillons avant analyse	23
3.3.3. Droite de calibration en matrice :	24
3.3.4. Méthode d'analyse par LC-MS/MS.....	25
3.4. RÉSULTATS DE LA VALIDATION DE LA METHODE D'ANALYSE MULTI RESIDUS SOL	26
4. SUIVI DES PPP DANS LE SOL ET DANS L'EAU.....	28
4.1. INTRODUCTION.....	28
4.2. BENZOVINDIFLUPYR	29
4.3. BIXAFEN.....	33
4.4. BOSCALID.....	38
4.5. CHORIDAZON	42
4.6. CLOMAZONE.....	47
4.7. CLOTHIANIDINE	52
4.8. DESMEDIPHAME	57
4.9. DIFENOCONAZOLE	60
4.10. DIMETHANAMIDE-P	65
4.11. EPOXICONAZOLE	69
4.12. ETHOFUMESATE	74
4.13. FLUFENACET	79
4.14. FLUOPYRAM.....	84
4.15. FLUXAPYROXAD	86
4.16. IMIDACLOPRIDE.....	88
4.17. MESOTRIONE.....	89
4.18. METAMITRON.....	92
4.19. METAZACHLORE	97
4.20. METCONAZOLE	100
4.21. METOLACHLORE	100
4.22. METSULFURON METHYL	106
4.23. NICOSULFURON	106
4.24. PENFLUFEN.....	109

4.25.	PHENMEDIPHAME	110
4.26.	PROPICONAZOLE	115
4.27.	TERBUTHYLAZINE	118
4.28.	CONCLUSIONS	121
5.	DÉSHERBAGE DES CÉRÉALES.....	122
5.1.	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	122
5.1.1.	2020-2021	122
5.1.2.	2021-2022	123
5.2.	OBSERVATIONS	124
5.3.	RÉSULTATS DE L'ANNÉE CULTURALE 2020-2021	125
5.3.1.	<i>Evaluation des populations d'adventices</i>	125
	La gestion des graminées	126
	La gestion des dicotylées	126
5.3.2.	<i>Efficacité du désherbage mécanique seul</i>	128
5.3.3.	<i>Effet du désherbage mécanique couplé au chimique</i>	131
5.3.4.	<i>Effet compétiteur du froment</i>	132
5.3.5.	<i>Effet Global</i>	132
5.3.6.	<i>Effet sur la biomasse</i>	134
5.3.7.	<i>Effet sur le rendement</i>	136
5.4.	RÉSULTATS DE L'ANNÉE CULTURALE 2021-2022	137
5.4.1.	<i>Evaluation des populations d'adventices</i>	137
	Efficacité du désherbage en prélevée.....	140
	Efficacité du désherbage mécanique seul	141
	Effet du désherbage mécanique couplé au chimique	144
	Effet sur la biomasse	145
5.4.2.	<i>Effet sur le rendement</i>	146
5.5.	DISCUSSION.....	148
5.6.	CONCLUSION.....	150
6.	SUIVI DE LA FLORE D'ADVENTICES DE SOL-RÉSIDUS	152
6.1.	DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	152
6.2.	OBSERVATIONS	152
6.3.	RÉSULTATS.....	153
6.3.1.	<i>Flore potentielle</i>	153
6.3.2.	<i>Flore exprimée</i>	154
6.4.	DISCUSSION.....	158
7.	DIFFUSION DES ENSEIGNEMENTS DE CETTE CONVENTION DE RECHERCHE ..	159
7.1.	CONGRÈS DU GROUPE FRANÇAIS DE RECHERCHE SUR LES PESTICIDES	159
7.2.	CONGRÈS D'ATHÈNES	160
7.3.	PROTECT'EAU.....	161
8.	CONCLUSIONS	162
9.	PROGRAMME D'ACTIVITÉS 2022-2023.....	163
9.1.	WORKPACKAGE 2 : « PARCELLES EN HESBAYE ».....	163
9.2.	WORKPACKAGE 3 T1 « SOL-RESIDUS ».....	163
9.3.	WORKPACKAGE 3 T2 « DESHERBAGE MECANIQUE »	163
9.4.	WORKPACKAGE 4 : DEVELOPPEMENT DE METHODES D'ANALYSE ET ANALYSE DES ECHANTILLONS.....	163
9.5.	WORKPACKAGE 5 : COMMUNICATION	164
10.	BIBLIOGRAPHIE.....	165

Liste des figures

Figure 1. Teneurs en pesticides dans les eaux souterraines (réseau DCE et additionnel) (source : http://environnement.wallonie.be/frameset.cfm?page=http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/ SPW (2019). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, Belgique. Dépôt légal D/2019/11802/08).....	11
Figure 2. Distribution des maxima observés par prise d'eau lors de trois périodes consécutives (source : SPW (2019). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, Belgique. Dépôt légal D/2019/11802/08).....	12
Figure 3. Impact des pesticides sur la qualité des eaux souterraines (Source : SPW-EEW).	12
Figure 4. Evolution des quantités totales de substances actives vendues en Belgique pour les utilisateurs professionnels par grand groupe de substances actives, de 1995 à 2015 (source : CORDER asbl, le Comité Régional Phyto et Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL))......	14
Figure 5. Evolution de la quantité de substances actives (en kg) appliquées sur les différentes cultures pour la période 2004-2015 (réseau de comptabilité de la DAEA)......	15
Figure 6. Répartition des quantités par type de substance active appliquées dans les cultures de pomme de terre (réseau de comptabilité de la DAEA 2015).	15
Figure 7. Répartition des quantités par type de substance active appliquée dans les cultures de froment (réseau de comptabilité DAEA 2015)......	16
Figure 8. Schéma d'un lysimètre.	18
Figure 9. Schéma d'extraction des PPP dans un sol.	23
Figure 10. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle Haute Bova.	30
Figure 11. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR4.	30
Figure 12. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR8.	31
Figure 13. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR12.	31
Figure 14. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR16.	32
Figure 15. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Haute Bova.....	34
Figure 16. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Chemin de fer.....	34
Figure 17. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Bovenistier.	35
Figure 18. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle SR4.....	35
Figure 19. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.	36
Figure 20. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	36
Figure 21. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.	37
Figure 22. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle Chemin de fer.....	39
Figure 23. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle Bovenistier.	39
Figure 24. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR4.....	40
Figure 25. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR8.....	40
Figure 26. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR12.....	41
Figure 27. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR16.....	41
Figure 28. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.....	43
Figure 29. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.....	43
Figure 30. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.	44
Figure 31. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.....	44
Figure 32. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR4.....	45
Figure 33. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.....	45
Figure 34. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.....	46

Figure 35. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.....	46
Figure 36. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Chemin de fer....	48
Figure 37. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Bovenistier.	48
Figure 38. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Sole 4.	49
Figure 39. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR4.....	49
Figure 40. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR8.....	50
Figure 41. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR12.....	50
Figure 42. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR16.....	51
Figure 43. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Haute Bova.	52
Figure 44. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Chemin de fer.53	53
Figure 45. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Bovenistier. ...	53
Figure 46. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Sole 4.....	54
Figure 47. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR4.	55
Figure 48. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR8.	55
Figure 49. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR12.	56
Figure 50. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR16.	56
Figure 51. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle Chemin de fer.	57
Figure 52. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle SR4.	58
Figure 53. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle SR8.	58
Figure 54. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle SR12.	59
Figure 55. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle SR16.	59
Figure 56. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Haute Bova.61	61
Figure 57. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Chemin de fer.	61
Figure 58. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Bovenistier.62	62
Figure 59. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.	62
Figure 60. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR4.	63
Figure 61. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR8.	63
Figure 62. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR12.	64
Figure 63. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR16.	64
Figure 64. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle Haute Bova.66	66
Figure 65. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle Bovenistier.66	66
Figure 66. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR4.	67
Figure 67. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.	67
Figure 68. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	68
Figure 69. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle SR16.	68
Figure 70. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.	70
Figure 71. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.	70
Figure 72. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle Bovenistier. .71	71
Figure 73. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.....	71
Figure 74. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR4.....	72
Figure 75. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR8.....	72
Figure 76. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR12.....	73
Figure 77. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.	73
Figure 78. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Haute Bova....	75
Figure 79. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Chemin de fer.	75

Figure 80. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Bovenistier. ...	76
Figure 81. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Sole 4.	76
Figure 82. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle SR4.....	77
Figure 83. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR8...	77
Figure 84. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	78
Figure 85. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.	78
Figure 86. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol de la parcelle Sole 4.	80
Figure 87. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.....	80
Figure 88. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.....	81
Figure 89. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR4.....	81
Figure 90. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR8.....	82
Figure 91. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	82
Figure 92. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR16.....	83
Figure 93. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Chemin de fer. ...	84
Figure 94. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Bovenistier.....	85
Figure 95. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Sole 4.	85
Figure 96. Applications et suivi de la teneur en fluxapyroxad dans le sol de la parcelle Haute Bova....	86
Figure 97. Applications et suivi de la teneur en fluxapyroxad dans le sol de la parcelle Sole 4.	87
Figure 98. Applications et suivi de la teneur en imidaclopride dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.	88
Figure 99. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR4.	89
Figure 100. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR8.	90
Figure 101. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR12.	90
Figure 102. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR16.	91
Figure 103. Applications et suivi de la teneur en metamitron et de son métabolite (metamitron desamino libellé 'Métabolite 1') dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.	93
Figure 104. Applications et suivi de la teneur en metamitron et de son métabolite (metamitron desamino libellé 'Métabolite 1') dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.....	93
Figure 105. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.	94
Figure 106. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.94	94
Figure 107. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol de la parcelle SR4.	95
Figure 108. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR8....	95
Figure 109. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR12..	96
Figure 110. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR16..	96
Figure 111. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.	97
Figure 112. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.	98
Figure 113. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.	98
Figure 114. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.	99
Figure 115. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	99
Figure 116. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.....	102
Figure 117. Applications et suivi de la teneur en metolachlore , en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.	102
Figure 118. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.	103
Figure 119. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.	103

Figure 120. Applications et suivi de la teneur en metolachlore et en metolachlore ESA (métabolite 1) dans le sol de la parcelle SR4.....	104
Figure 121. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.....	104
Figure 122. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.....	105
Figure 123. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.....	105
Figure 124. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol de la parcelle SR4.....	106
Figure 125. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol de la parcelle SR8.....	107
Figure 126. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	107
Figure 127. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.	108
Figure 128. Applications et suivi de la teneur en penflufen dans le sol de la parcelle Bovenistier.	109
Figure 129. Applications et suivi de la teneur en penflufen dans le sol de la parcelle Sole 4.	109
Figure 130. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle Haute Bova.	111
Figure 131. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle Chemin de fer.	111
Figure 132. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle Bovenistier.	112
Figure 133. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle Sole 4.	112
Figure 134. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle SR4.	113
Figure 135. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle SR8.	113
Figure 136. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle SR12.	114
Figure 137. Applications et suivi de la teneur en phemediphame dans le sol de la parcelle SR16.	114
Figure 138. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.	115
Figure 139. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR4.	116
Figure 140. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR8.	116
Figure 141. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR12.	117
Figure 142. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR16.	117
Figure 143. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR4.	119
Figure 144. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR8.	119
Figure 145. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.	120
Figure 146. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR16.	120
Figure 147. Essai désherbage SOL-Phy-Ly. Protocole expérimental 2020-2021.....	122
Figure 148. Essai désherbage Sol-Phy-Ly. Protocole expérimental 2021-2022.....	124
Figure 149. Composition initiale de la flore d'adventices 2020-2021.	126
Figure 150. Distribution spatiale du nombre d'adventices au premier comptage (2020-2021).	126
Figure 151. Tendance de l'évolution du nombre d'adventices en fonction du temps selon la dose d'anti-dicotylée et le nombre de passages mécanique.	127
Figure 152. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T1 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	128
Figure 153. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T1 et T2 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	129
Figure 154. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	130

Figure 155. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passages mécaniques. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	131
Figure 156. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T2 et T3 sous anti-graminée en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	132
Figure 157. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T3 en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passages mécanique. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	133
Figure 158. Biomasse d'adventices à floraison du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	134
Figure 159. Photo aérienne de la parcelle d'essai à la floraison des matricaires camomilles (A). Schéma reprenant les modalités de désherbage chimique correspondant à chaque micro-parcelle (B).....	135
Figure 160. Rendement en grain à 15% d'humidité selon la biomasse en MS d'adventice à floraison du froment.....	136
Figure 161. Rendement du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	137
Figure 162. Composition initiale de la flore d'adventices 2021-2022.	138
Figure 163. Distribution spatiale du nombre d'adventices au premier comptage (2021-2022).	139
Figure 164. Tendence de l'évolution du nombre d'adventices en fonction du temps selon la dose d'anti-dicotylée et le nombre de passages mécaniques.	139
Figure 165. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T1 en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	141
Figure 166. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T1 et T2 en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	142
Figure 167. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des modalités de passage mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	143
Figure 168. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey. Le test est réalisé par dose et non pas sur l'ensemble des doses.	144
Figure 169. Biomasse d'adventices à floraison du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.	145
Figure 170. Rendement en grain à 15% d'humidité selon la biomasse en MS d'adventice à floraison du froment.....	146
Figure 171. Rendement du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes.....	147
Figure 172. Photo représentant le passage préférentiel provoqué par l'action des dents de herse étrille sur un sol glacé à la sortie de l'hiver (2020-2021).	148

Figure 173. Photos représentant un sol écroulé après un passage de houe rotative avant (A) et après passage de la herse étrille (B). (2020-2021).	149
Figure 174. Schéma de bac de germination. (1) bac non perforé, (2) échantillon de terre tamisé, (3) couche de terreau, (4) couche de billes d'argex, (5) tube en PVC.....	152
Figure 175. Proportions d'adventices par stratégie de culture pour l'horizon de surface (gauche) et l'horizon en profondeur.	153
Figure 176. Proportions en adventices en fonction des stratégies de culture (1 ^{er} comptage).....	154
Figure 177. Influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices en sortie d'hiver.....	154
Figure 178. Représentation cartographique de la densité totale d'adventices recensées lors du deuxième comptage du projet Sol-Résidus.	155
Figure 179. Biomasse du froment et des adventices en fonction du type de travail du sol (floraison du froment).	156
Figure 180. Influence du type de travail du sol (gauche) et de la gestion des résidus (droite) sur la richesse en espèces (1 ^{er} comptage).	156
Figure 181. Influence du type de travail du sol sur la richesse en espèces (floraison du froment).....	157

Liste des tableaux

Tableau 1. Concentration moyenne (ng.l ⁻¹) de métabolites et de substances actives dans les eaux souterraines (2017).....	13
Tableau 2. Extrapolation de la quantité de substances actives appliquées (kg.ha ⁻¹) par type de culture à l'échelle de la Wallonie (2015).....	16
Tableau 3. Vente nationale de quelques substances actives (tonnes.an ⁻¹).....	17
Tableau 4. Descriptif de gestion du travail du sol et des résidus de culture sur les parcelles de Gembloux	18
Tableau 5. Nombre d'analyses réalisées par le CRA-W.....	21
Tableau 6. Molécules SDHI suivies et limites de quantification (LOQ).	22
Tableau 7. Liste des nouvelles molécules suivies dans le cadre du projet Sol-Phy-Ly.	22
Tableau 8. Standards analytiques utilisés.	24
Tableau 9. Dilutions réalisées à partir de la solution STOCK.	25
Tableau 10. Gradient d'élution utilisé pour l'analyse multi-résidus en LC-QToF/MS.	25
Tableau 11. Résultats de la validation.	27
Tableau 12. Activités de désherbages et de prises de données réalisées en 2021-2022.	125
Tableau 13. Activités de désherbages et de prises de données réalisées en 2020-2021.	125

1. Introduction

1.1. Contexte « phyto-eau » en Wallonie

Depuis 1998, l'eau destinée à la distribution publique fait l'objet d'un suivi régulier afin de vérifier sa potabilité (Directive 2020/2184). Des concentrations maximales sont fixées par substance (100 ng/l) et pour le total des substances (500 ng/l) ; seuils de non-potabilité qui sont 10 à 100 fois inférieurs aux limites fixées par l'OMS¹.

En 2006, la Directive 2006/118/CE a étendu ces seuils à toutes les eaux souterraines.

Afin de pouvoir suivre la qualité des eaux souterraines conformément aux prescriptions de la Directive-cadre sur l'eau (Directive 2000/60/CE), le SPW dispose d'un réseau de surveillance constitué de :

- 200 points d'observation dans des captages (suivis par les producteurs d'eau) et
- 200 points d'observation dits 'patrimoniaux' (piézomètres, puits privés, sources) situés dans des régions peu aquifères ; ces derniers étant suivis par l'ISSeP².

La figure 1 illustre par substance, la fréquence et l'ampleur des éventuels dépassements de limite de potabilité observés depuis 2006 dans ce réseau de surveillance. L'atrazine (et ses deux métabolites), le diuron, l'isoproturon, le 2,6-dichlorobenzamide (BAM) et la bentazone représentent l'essentiel des problèmes qualitatifs.

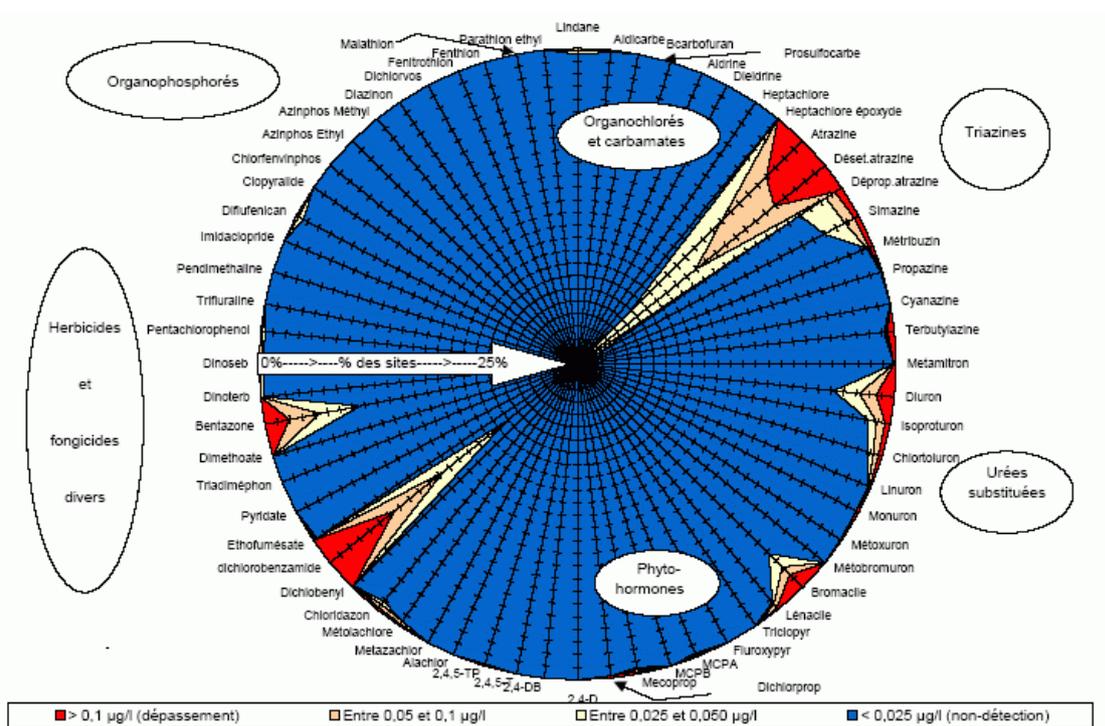


Figure 1. Teneurs en pesticides dans les eaux souterraines (réseau DCE et additionnel) (source : <http://environnement.wallonie.be/frameset.cfm?page=http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/> SPW (2019). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, Belgique. Dépôt légal D/2019/11802/08)

¹ Organisation Mondiale de la Santé

² Institut Scientifique de Service Public

A l'exception de la bentazone, la concentration de ces matières actives a tendance à régresser depuis 1995 (figure 2).

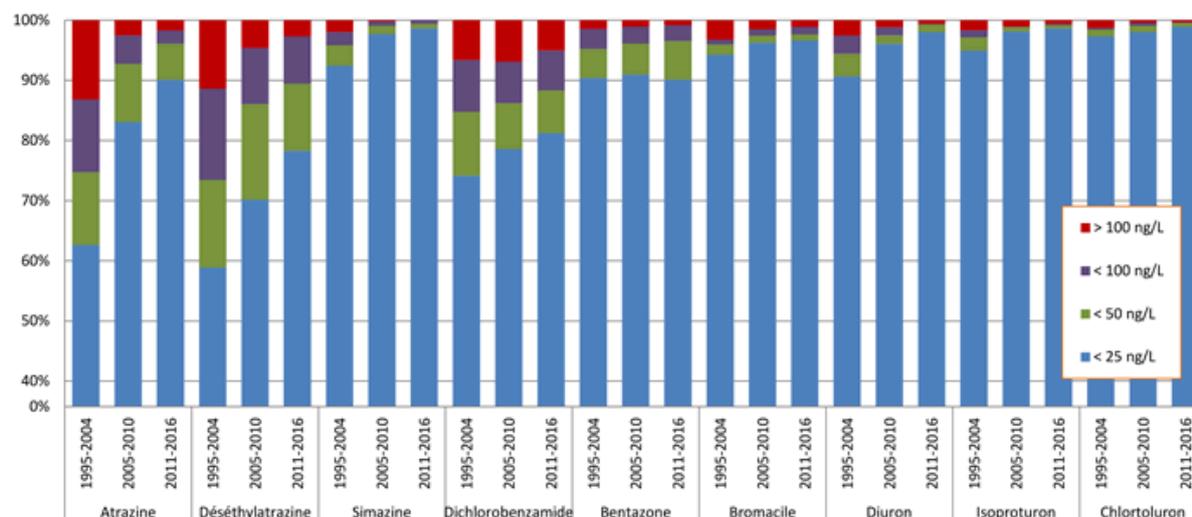


Figure 2. Distribution des maxima observés par prise d'eau lors de trois périodes consécutives (source : SPW (2019)). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, Belgique. Dépôt légal D/2019/11802/08)

Les aquifères les plus touchés sont les Sables bruxelliens des bassins Haine et Sambre, les Sables du Bruxellien et le Crétacé de Hesbaye (figure 3).

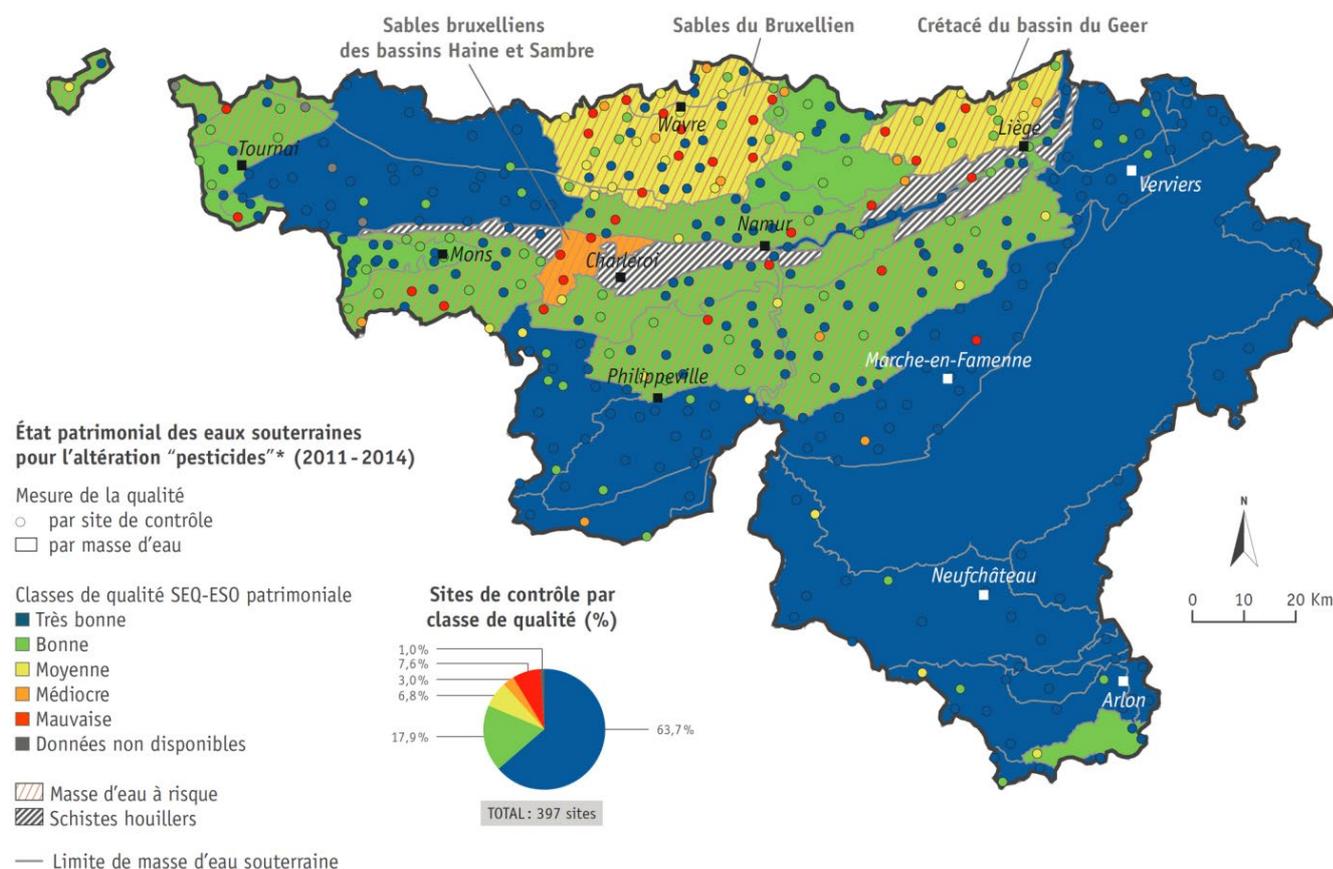


Figure 3. Impact des pesticides sur la qualité des eaux souterraines (Source : SPW-EEW).

Ces dernières années, l'attention s'est également portée sur les métabolites³ de plusieurs substances actives (chloridazon, chlorotalonil, S métolachlore, métazachlore et glyphosate). Il a ainsi été constaté que certains métabolites pouvaient être présents en plus grandes quantités dans les eaux souterraines que leur substance active 'mère', à l'exemple du chloridazon (tableau 1).

Tableau 1. Concentration moyenne (ng.l⁻¹) de métabolites et de substances actives dans les eaux souterraines (2017).

Molécule	Moyenne points patrimoniaux (33)	Moyenne captages d'eau (77)
Chloridazon	3	0
<i>Desphenylchloridazon</i>	2393	1934
Methyl-desphenylchloridazon	285	162
<i>Chlorothalonil SA (VIS01)</i>	112	85
<i>Metolachlore ESA</i>	55	66
Metolachlore OA	2	0
<i>Metazachlore ESA</i>	22	13
Metazachlore OA	18	4
Glyphosate	3	0
AMPA	10	3

Source : SPW (communication F. Delloye)

En italique, les métabolites dont la surveillance est imposée par le Code de l'Eau

Pour pouvoir mieux interpréter ces chiffres (pourquoi telle ou telle substance est rencontrée dans les eaux souterraines, pourquoi en diminution ou en augmentation, pourquoi d'autres sont absentes), il y a lieu de s'intéresser à deux facteurs qui conditionnent les flux en profondeur :

1. les caractéristiques physico-chimiques : plus une substance est stable (c-à-d résistante à la photolyse, l'hydrolyse et aux dégradations par les micro-organismes du sol) et mobile (peu retenue par le sol), plus elle peut migrer vers les eaux souterraines ;
2. l'usage : plus une substance est utilisée, plus elle peut engendrer une concentration importante dans l'eau (simple principe de dilution dans une lame d'eau qui percole dans le sol).

Les caractéristiques physico-chimiques sont illustrées par la durée de demi-vie (DT50) et la solubilité (Koc, Kw). A partir de ces caractéristiques, Gustafson (1989) a construit un indice empirique de lixiviation « GUS » (Groundwater Ubiquity Score) comme suit :

$$GUS = \log DT50 [4 - \log (Koc)]$$

En fonction de la valeur obtenue, les pesticides présentent un risque de contamination des eaux souterraines élevé (GUS > 2.8) ou faible (GUS < 1.8).

³ Desphenylchloridazon et methyl-desphenylchloridazon sont des métabolites du chloridazon

Chlorotalonil SA est un métabolite du chlorotalonil

Metolachlore ESA et OA sont des métabolites du metolachlore et S-metolachlore

Metazachlore ESA et OA sont de métabolites du metazachlore

AMPA est un métabolite du glyphosate

En ce qui concerne les usages, la discussion qui suit s'appuie sur les résultats d'une étude⁴ menée en 2017 par CORDER asbl, le Comité Régional Phyto et Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL).

En Belgique, un peu plus de 6.000 tonnes de substances actives sont annuellement utilisées par des professionnels (figure 4). Leurs usages ont fortement diminué entre 1995 et 2010. En 2011, ils ont brusquement augmenté pour se stabiliser depuis lors. Le pic observé en 2014 s'explique essentiellement par les conditions humides du printemps qui ont causé un recours plus important aux fongicides.

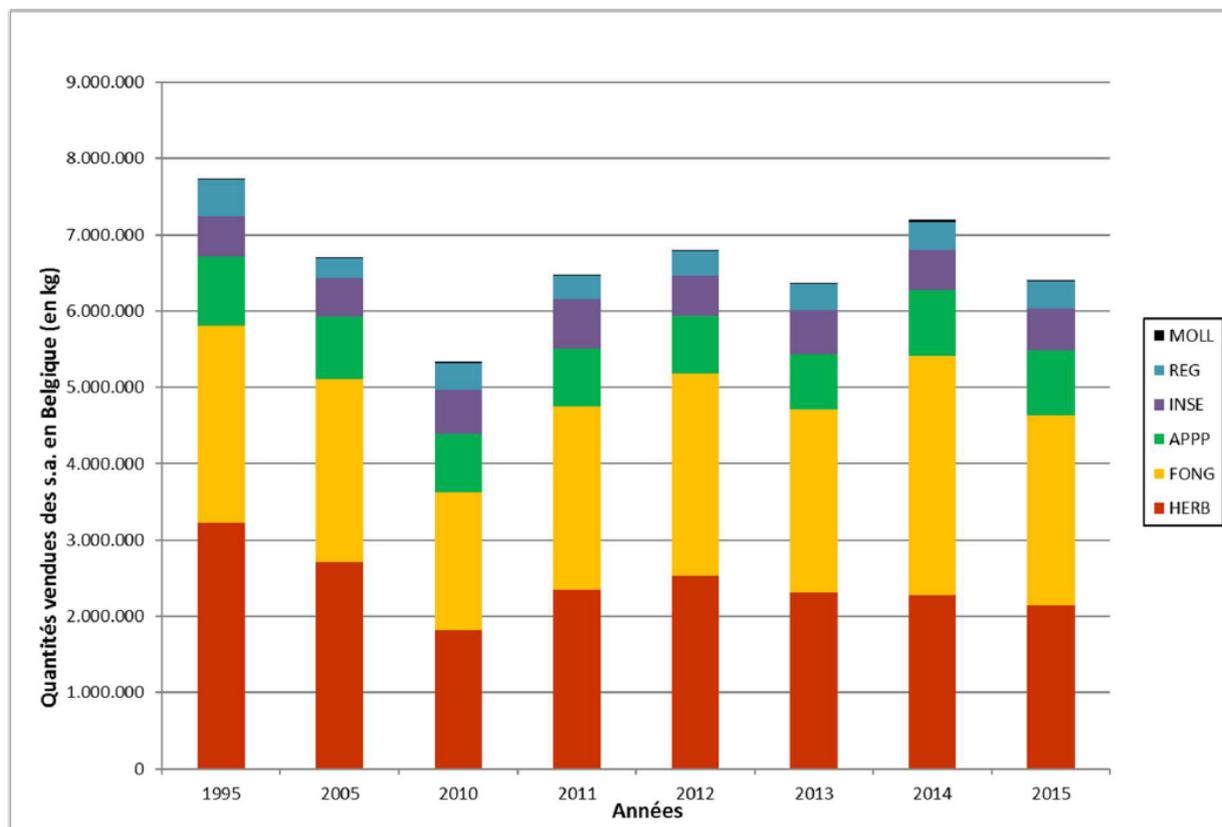


Figure 4. Evolution des quantités totales de substances actives vendues en Belgique pour les utilisateurs professionnels par grand groupe de substances actives, de 1995 à 2015 (source : CORDER asbl, le Comité Régional Phyto et Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL)).

MOLL = molluscicide, REG = régulateur, INSE = insecticide, APPP = autres produits phytopharmaceutiques, FONG = fongicide, HERB = herbicide

A l'échelle de la région wallonne, les auteurs se sont appuyés sur les données de la DAEA⁵ collectées annuellement dans un peu plus de 400 exploitations agricoles ou horticoles. L'examen des factures d'achat révèle que les quantités les plus importantes sont destinées au froment, à la pomme de terre, à la betterave et aux vergers de basses tiges (figure 5).

⁴ Estimation quantitative des utilisations de produits phytopharmaceutiques par les différents secteurs d'activité. Projet financé par le SPW – DGO3.

⁵ Direction de l'Analyse Economique Agricole - SPW

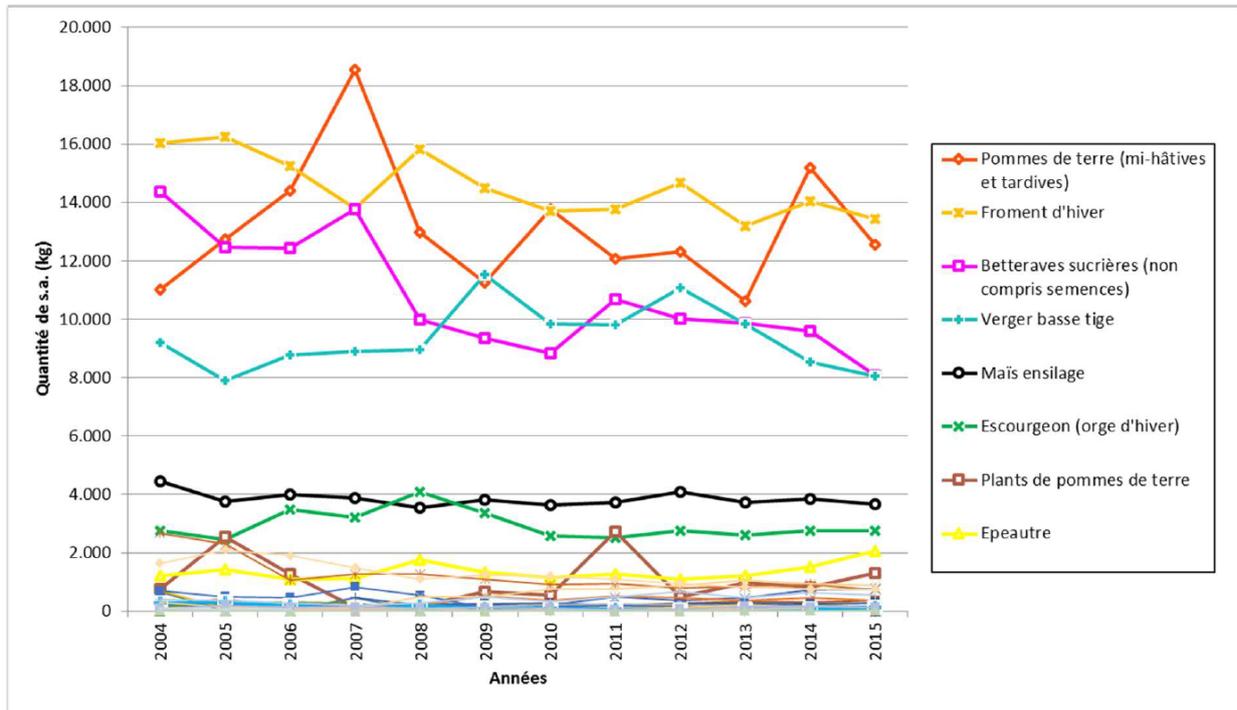


Figure 5. Evolution de la quantité de substances actives (en kg) appliquées sur les différentes cultures pour la période 2004-2015 (réseau de comptabilité de la DAEA).

Pour la pomme de terre, le mancozèbe (fongicide) représente environ la moitié des quantités achetées (figure 6).

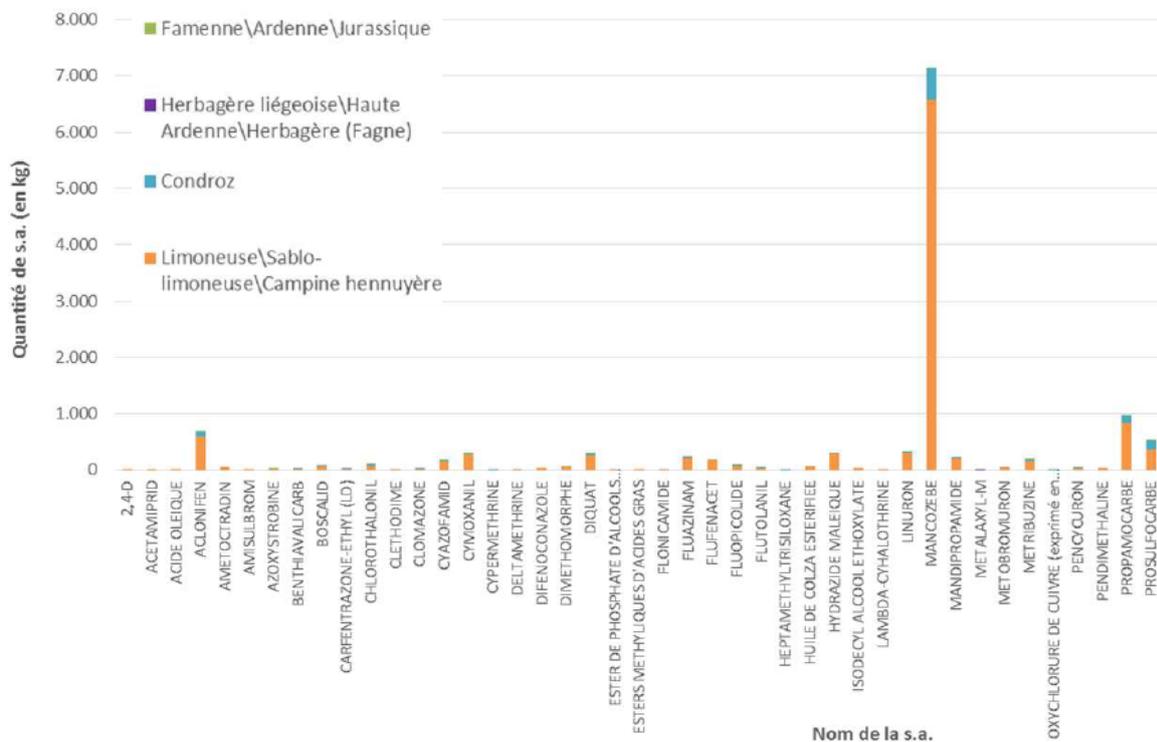


Figure 6. Répartition des quantités par type de substance active appliquées dans les cultures de pomme de terre (réseau de comptabilité de la DAEA 2015).

Pour le froment, les quantités achetées (figure 7) mettent en lumière des usages importants de chlorure de chlormequat (régulateur de croissance), de chlorotalonil et de prothioconazole (fongicides) et d'isoproturon (herbicide).

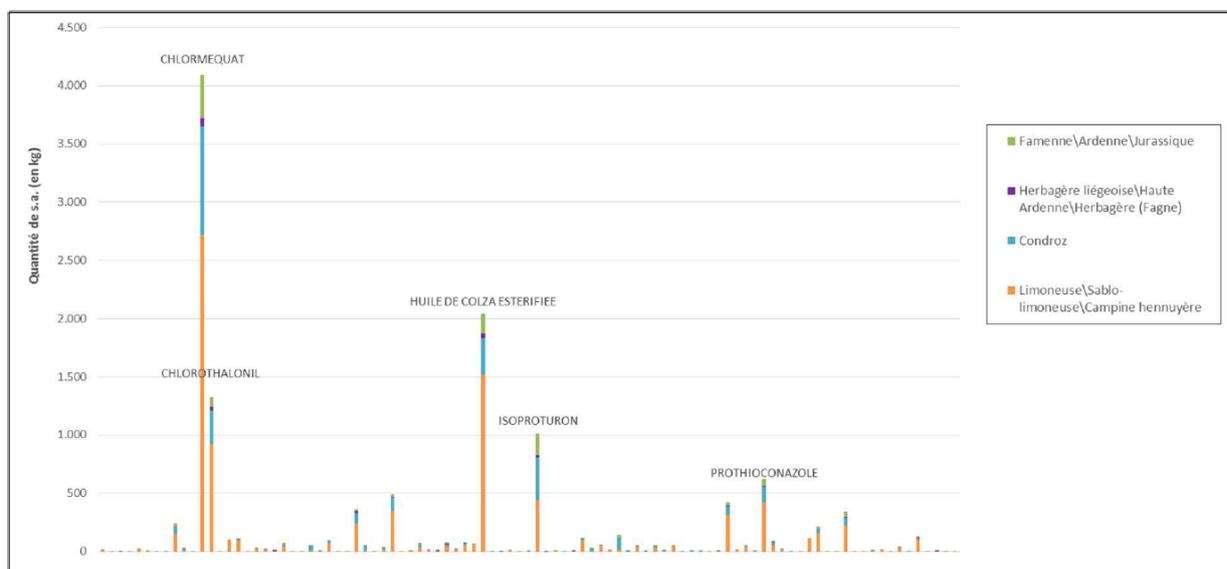


Figure 7. Répartition des quantités par type de substance active appliquée dans les cultures de froment (réseau de comptabilité DAEA 2015).

En exprimant ces quantités par unité de surface (hectare), à l'échelle de la région wallonne, il apparaît que la pomme de terre est la culture la plus consommatrice de pesticides (essentiellement fongicides). Par la fréquence des désherbages, la betterave occupe la deuxième place de ce classement (tableau 2).

Bien que ne représentant qu'un peu plus d'un dixième de la superficie agricole, ces deux cultures reçoivent plus de la moitié des quelques 1.400 tonnes de pesticides épandus en Wallonie en 2015.

Tableau 2. Extrapolation de la quantité de substances actives appliquées ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) par type de culture à l'échelle de la Wallonie (2015).

Nom de la culture	Quantité totale extrapolée de s.a (kg) en Wallonie	Surface (ha) en Wallonie ¹³³	Quantité de s.a. par hectare (kg/ha) en Wallonie
Betteraves fourragères	5.182,66	945,15	5,48
Betteraves sucrières (non compris semences)	220.802,86	34.669,92	6,37
Epeautre	42.381,96	18.501,36	2,29
Escourgeon (orge d'hiver)	69.879,93	30.292,70	2,31
Froment d'hiver	367.338,64	130.426,97	2,82
Mais ensilage	68.572,16	53.274,17	1,29
Orge de printemps	2.165,05	2.728,49	0,79
Prairies permanentes	15.910,31	306.628,39	0,05 ¹³⁴
Prairies temporaires (y compris ray-grass)	2.577,60	30.639,56	0,08 ¹³⁵
Pommes de terre (mi-hâtives et tardives)	598.639,56	33.972,98	17,62

Les concentrations en pesticides observées aujourd’hui dans les eaux souterraines sont, vu le temps de transfert dans la zone vadose, la conséquence de traitements réalisés quelques années à quelques dizaines d’années auparavant.

Il est dès lors pertinent de faire le point sur les usages des substances actives problématiques (figure 1) fin des années ’90 jusqu’en 2015 (tableau 3).

Tableau 3. Vente nationale de quelques substances actives (tonnes.an⁻¹).

Substance active	Indice GUS ⁶	1995	2005	2010	2015
Atrazine	2.57	184	0	0	0
Bentazone	1.95	86	62	19	22
Bromacile	3.44	4	0	0	0
Chloridazon	2.62	225	105	53	60
Dichlobénil	1.19	13	40	0	0
Diuron (non agricole)	2.65	202	25	0	0
Flufenacet	2.49	0	21	62	58
Glyphosate	-0.29	322	826	382	471
Isoproturon	2.61	280	113	86	66
Mancozèbe	-1.45	660	1.205	672	788

En gras, les substances actives les plus rencontrées dans les eaux souterraines

La lecture de ce tableau indique que :

- fin des années ’90, le mancozèbe, substance active la plus utilisée en pomme de terre (figure 6) et le glyphosate (dans l’actualité ces dernières années) sont deux fois plus utilisés que les substances actives problématiques pour les eaux souterraines sans être observés dans les eaux souterraines. L’explication réside dans les caractéristiques physico-chimiques de ces molécules : ces deux substances actives présentent un indice GUS négatif alors que les substances actives problématiques présentent un indice GUS supérieur à 2,2.
- même utilisées en ‘petite’ quantité (quelques tonnes par an) jusqu’à leur interdiction d’usage à la fin des années ’90 - début des années 2000, le bromacile et le dichlobénil sont aujourd’hui encore bien présents (substance active ou métabolites) dans les eaux souterraines.
- à l’exemple du flufenacet, de nouvelles substances actives sont mises sur le marché et sont, en 2015, utilisées dans des quantités équivalentes à des molécules problématiques telles que le chloridazon.

Ce dernier commentaire met en évidence l’intérêt du lysimètre pour pouvoir anticiper une éventuelle contamination similaire à l’atrazine.

⁶ PPDB Database consulté le 25/05/2019 <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/>

1.2. Description des lysimètres

Deux sites lysimétriques sont exploités par Gembloux Agro-Bio Tech :

1. en Hesbaye, quatre parcelles cultivées par des agriculteurs sont équipées depuis 2003, d'un lysimètre. Ce site est un observatoire des pratiques agricoles ;
2. à Gembloux, une parcelle de la ferme expérimentale a été équipée en 2011 de quatre lysimètres afin de suivre l'impact du travail de sol (labour ou travail simplifié) et de la gestion des résidus de culture (enfouissement ou exportation) sur le rendement des récoltes, le sol et la lixiviation des intrants (azote et produits phytopharmaceutiques).

Le tableau 4 explicite la spécificité de chaque parcelle équipée d'un lysimètre à Gembloux.

Tableau 4. Descriptif de gestion du travail du sol et des résidus de culture sur les parcelles de Gembloux

	Non labour	Labour
Enfouissement des résidus de culture (paille)	SR12	SR16
Exportation des résidus de culture (paille)	SR4	SR8

Ces deux sites sont valorisés dans le cadre de la présente convention de recherche.

Les lysimètres installés en Hesbaye et sur une parcelle de la ferme expérimentale de Gembloux Agro-Bio Tech sont des tonneaux d'un mètre carré de section et de 1,5 m de hauteur, remplis de terre et drainés à leur base. Chaque tonneau est placé à deux mètres de profondeur, en pleine parcelle et relié à une chambre de récolte dans laquelle se trouve un réservoir qui collecte l'eau de drainage (figure 8).

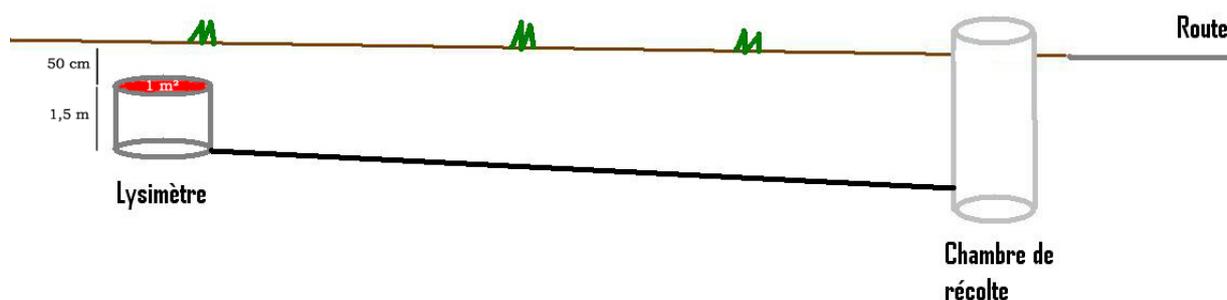


Figure 8. Schéma d'un lysimètre.

Par rapport aux observations dans les eaux souterraines, les lysimètres offrent deux avantages :

- la collecte des eaux de percolation à deux mètres de profondeur permet d'anticiper l'impact de l'usage d'une substance active sur la qualité des eaux et ainsi de prendre les éventuelles mesures correctives ;
- le fait d'observer à l'échelle parcellaire permet de réaliser un bilan de masse (quantité apportée – quantité lixiviée) et de mettre en évidence les facteurs qui conditionnent les flux (période de l'apport, pratiques agricoles, conditions climatiques...).

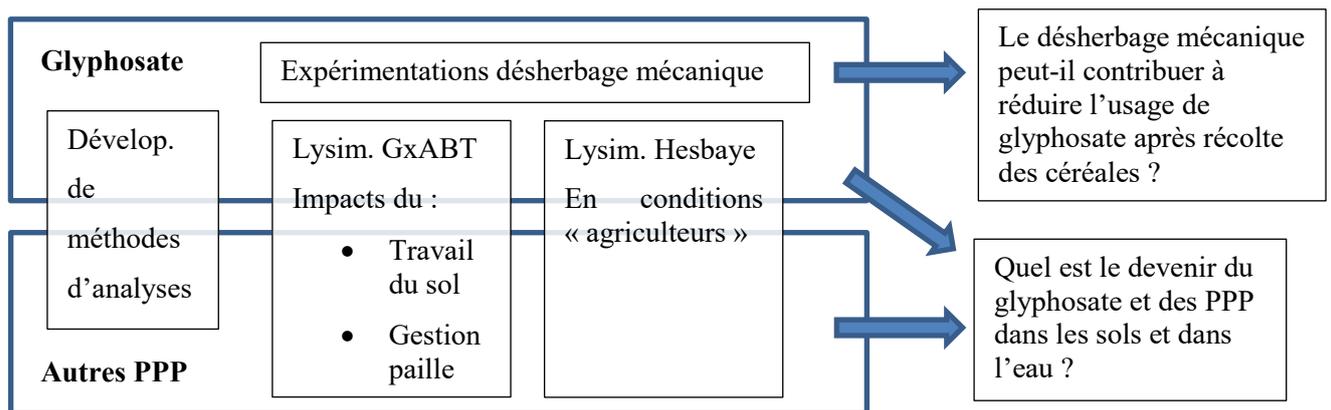
1.3. Objet de la convention de recherche

Extraits de texte de la convention

Ce projet de recherche ambitionne de contribuer à :

- l'évaluation des flux de produits phytopharmaceutiques (PPP) par lixiviation en plein champ dans les deux sites équipés de lysimètres ;
- la mise au point de méthodes en laboratoire pour le dosage de matières actives (y compris métabolites) ;
- l'évaluation de l'impact des pratiques culturales (gestion des résidus de récolte) sur la dégradation des substances actives par le sol et leur flux vers les eaux souterraines ;
- la proposition de recommandations en ce compris l'évaluation environnementale du glyphosate et
- la proposition d'alternatives.

Le schéma suivant illustre les moyens mis en œuvre pour répondre à ces questions.



Dans le cadre de ce programme de recherches, trois partenaires sont impliqués :

- GxABT - pédologie (partenaire 1) qui dispose d'une expertise en cartographie, analyse des sols et gestion de lysimètres;
- CRA-W U10 Produits de protection, de contrôle et résidus - analyse des PPP (partenaire 2) qui dispose d'une expertise en développement de méthodes et analyses de PPP;
- GxABT - phytotechnie (partenaire 3) qui dispose d'une expertise dans l'usage des PPP et la gestion de sites expérimentaux.

La complémentarité et le nombre limité des partenaires impliqués dans ce programme constituent un atout pour une réelle transversalité et co-construction des travaux de recherche et des recommandations.



Gembloux Agro-Bio Tech et le Centre wallon de Recherches Agronomiques sont membres de la Structure PROTECT'eau en charge de communiquer et d'encadrer les agriculteurs vers une agriculture plus durable (thématiques nitrate et PPP).

La diffusion des résultats de cette recherche via cette Structure est prévue :

- par le biais de lettres d'information publiées régulièrement dans la presse agricole spécialisée ;
- via des visites en ferme (la vingtaine de conseillers dispose d'un carnet d'adresses d'environ 4000 agriculteurs).

Par ailleurs, ces mêmes partenaires organisent régulièrement des réunions d'information à l'attention d'agriculteurs (par exemple, le Livre Blanc). Les résultats de cette recherche seront donc également valorisés via ce canal.

2. Echantillonnage

2.1. Introduction

Des échantillonnages de sol et d'eau ont été réalisés sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech (*Sol Résidus*) et dans des parcelles d'agriculteurs situées en Hesbaye.

Le tableau 5 illustre le nombre d'analyses effectuées par le CRA-W au cours de cette étude.

Tableau 5. Nombre d'analyses réalisées par le CRA-W.

Sol	Glyphosate	Multi	Bentazone	Fluroxypyr/ Propaquizafop	
05/2018-05/2019	178	27	0	0	
05/2019-05/2020	96	135	267	0	
05/2020-05/2021	0	264	0	95	
05/2021-05/2022	0	188	0	0	Total
Total	274	614	267	95	1302

Eau	Glyphosate	Multi	Bentazone	
05/2018-05/2019	10	10	0	
05/2019-05/2020	11	58	55	
05/2020-05/2021	0	52	52	
05/2021-05/2022	0	71	71	Total
Total	21	120	107	390

2.2. Echantillonnage et préparation des échantillons de sol

L'échantillonnage est réalisé à l'aide d'une gouge semi-circulaire. Douze carottes de sol sont prélevées par couche de sol pour composer un échantillon composite.

Chaque échantillon de sol est ensuite tamisé à 2 mm. Une aliquote est prélevée et stockée dans un tube en plastique 'Falcon' de 50 ml. Les échantillons sont conservés au congélateur, à -18°C dans le noir avant analyse.

2.3. Echantillonnage de l'eau de percolation

L'eau de percolation s'écoule gravitairement dans un tuyau en PEHD (Polyéthylène Haute Densité) du lysimètre à une chambre de visite où elle est stockée dans des bidons en PEHD totalisant une capacité minimum de 40 litres.

Une fois par mois ou, si nécessaire (lors de périodes très pluvieuses) lorsque ce bidon est quasiment rempli, un échantillon est prélevé et le volume d'eau est mesuré avant de vider le bidon.

Les échantillons d'eau sont stockés dans des bouteilles en verre ambré pour l'analyse multi résidus et dans des tubes en plastique pour l'analyse du glyphosate. Ils sont conservés au frigo à 4°C avant analyse.

3. Développement d'une nouvelle méthode multi-résidus

3.1. Les nouvelles molécules suivies

Suite aux conclusions du Comité d'accompagnement lors de la dernière réunion de la première triennale Sol-Phy-Ly, il a été décidé de travailler sur de nouvelles molécules.

Dans un premier temps, au cours de l'été 2021, une méthode d'analyse de sol regroupant toutes les molécules SDHI a été développée. La validation de cette méthode a permis d'analyser les échantillons de sols prélevés à partir de juin 2020 ainsi que les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres pendant l'hivers 2021-2022.

Les molécules suivies ainsi que leur limite de quantification sont données ci-dessous (tableau 6).

Tableau 6. Molécules SDHI suivies et limites de quantification (LOQ).

	LOQ ($\mu\text{g.kg}^{-1}$)
Benzovindylflupyr	0.59
Bixafen	0.32
Boscalid	0.54
Fluopyram	0.10
Flutolanil	0.26
Fluxapyroxad	0.68
Inpyrfluxam	0.12
Isofetamid	0.72
Isopyrazam	0.27
Penflufen	0.28
Penthiopyrad	0.31
Pydiflumetofen	0.26
Sedaxane SYN508210	0.58

Au printemps 2022, une nouvelle méthode a été développée incluant les SDHI ainsi que les autres molécules suggérées par le comité d'accompagnement et des molécules suivies depuis 2018 fréquemment retrouvées dans les sols et/ou les eaux. Cette liste est présentée ci-dessous (tableau 7).

Tableau 7. Liste des nouvelles molécules suivies dans le cadre du projet Sol-Phy-Ly.

2,6 dichlorobenzamide	Clothianidin	Fluxapyroxad	Phenmedipham NH4
Aclonifen	Cyantraniliprole	Inpyrfluxam	Prosulfocarb
Benzovindylflupyr	Difenoconazole	Isofetamid	Pydiflumetofen
Bixafen	Epoxiconazole	Isopyrazam 244	Pyraclostrobine
Boscalid	Ethofumesate (NH4)	Mefentrifluconazole	Sedaxane SYN508210
Chlorantraniliprole	Flufenacet	Metolachlor	Sulfoxaflor
Chloridazon	Fluopyram	Penflufen	Terbutylazine
Clomazone	Flutolanil	Penthiopyrad	XDE-208 Urea

Cases vertes : molécules suivies également lors de la première triennale Sol-Phy-Ly

3.2. Principe de la validation

La validation de la méthode d'analyse par LC-MS/MS a été réalisée à partir d'un sol prélevé dans une parcelle maraîchère exploitée en agriculture biologique depuis plusieurs années, située près de Ciney. Ce sol sera nommé sol de référence par la suite.

Avant la validation des méthodes, de nombreuses expérimentations préliminaires ont été réalisées afin d'optimiser tous les paramètres analytiques en fonction des données de la littérature scientifique et de l'expérience du laboratoire. L'optimisation a porté sur les paramètres de préparation des échantillons au laboratoire, de séparation chromatographique et de détection/quantification par spectrométrie de masse.

La méthode a été validées selon les normes européennes en matière de validation de méthodes d'analyse de résidus de pesticides (EU SANTE/11312/2021). Pour chaque substance active, les paramètres suivants ont été mesurés et évalués : la spécificité, la linéarité de la réponse, la précision, la justesse, les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) et la stabilité des pesticides en solution.

Des explications concernant les différents paramètres de validation de la méthode sont disponibles dans les rapports précédents.

3.3. Validation de la méthode multi résidus sur le sol

3.3.1. Réactifs et solvants utilisés

L'acétonitrile et le méthanol grade ULC-MS ont été achetés chez Biosolve (Dieuze, France). L'eau l'ultrapure (résistivité 18.2 M Ω .cm) a été obtenue par un système MilliQ (EMD Millipore, USA). Les standards des substances actives étudiées ont été achetés chez Sigma Aldrich (Darmstadt, Germany) et chez HPC Standards GmbH (Cunnersdorf, Hollande). Ils ont tous une pureté ≥ 97 %. Les sachets de sels QuEChERS (Sachet individuel contenant 4 g MgSO₄, 1 g NaCl, 0,5 g sodium citrate dibasic sesquihydrate, 1 g sodium citrate tribasic dihydrate) ont été achetés chez Biosolve (France). Les solutions stocks sont préparées dans de l'acétone et conservées à -18°C. Les solutions intermédiaires sont préparées dans de l'acétonitrile et conservées à 4°C

3.3.2. Préparation des échantillons avant analyse

Le sol tamisé à 2 mm est stocké au congélateur à -18°C avant analyse. La procédure d'extraction est décrite (figure 9) ci-dessous.

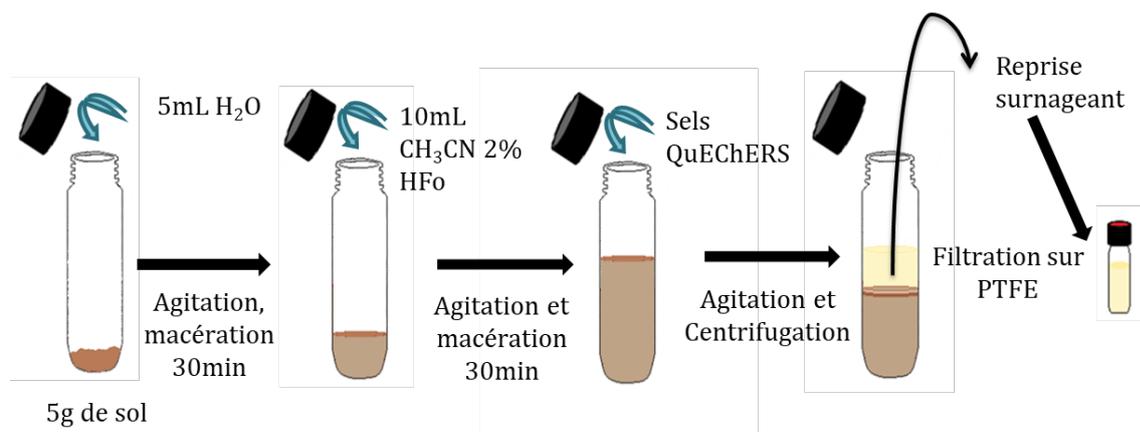


Figure 9. Schéma d'extraction des PPP dans un sol.

3.3.3. Droite de calibration en matrice :

Les solutions stocks sont préparées en solubilisant 10 ou 20mg de substance active dans 20mL d'acétone. La solution A (MIX) est préparée en ajoutant 100 ou 200µL de chaque solution stock dans 100mL d'acétonitrile pour obtenir une concentration de +/- 1mg/L pour chaque molécule

La droite de calibration en matrice est réalisée à partir des solutions standards (tableau 8) de B à I diluées 10X (tableau 9) avec comme solvant de dilution, le surnageant récupéré après extraction du sol de référence selon la procédure décrite à la figure 9.

Tableau 8. Standards analytiques utilisés.

	Formule Brute	MW		CAS	Pureté (%)	Pesée (mg)	RT (min)
2,6 dichlorobenzamide	C ₇ H ₅ Cl ₂ NO	190.02	Métabolite	2008-58-4	99.99	21.8	6.55
Aclonifen	C ₁₂ H ₉ ClN ₂ O ₃	264.66	Herbicide	74070-46-5	99.00	20.5	11.5
Benzovindylflupyr	C ₁₈ H ₁₅ Cl ₂ F ₂ N ₃ O	398.23	Fongicide	1072957-71-1	99.50	10.1	11.15/11.5
Bixafen	C ₁₈ H ₁₂ Cl ₂ F ₃ N ₃ O	414.21	Fongicide	581809-46-3	99.73	20.4	11.38
Boscalid	C ₁₈ H ₁₂ Cl ₂ N ₂ O	343.21	Fongicide	188425-85-6	99.80	19.9	10.93
Chlorantraniliprole	C ₁₉ H ₁₄ BrClN ₆ O ₂	483.15	Insecticide	500008-45-7	97.63	21.0	10.67
Chloridazon	C ₁₀ H ₈ ClN ₃ O	221.6	Herbicide	1698-60-8	98.70	19.8	8.26
Clomazone	C ₁₂ H ₁₄ ClNO ₂	239.7	Herbicide	81777-89-1	99.40	17.5	10.75
Clothianidin	C ₆ H ₈ ClN ₅ O ₂ S	249.7	Insecticide	210880-92-5	99.00	19.7	7.7
Cyantraniliprole	C ₁₉ H ₁₄ BrClN ₆ O ₂	473.72	Insecticide	736994-63-1	95.13	20.5	10.06
Difenoconazole	C ₁₉ H ₁₇ Cl ₂ N ₃ O ₃	406.26	Fongicide	13684-56-5	99.80	20.1	11.74
Epoxiconazole	C ₁₇ H ₁₃ ClFN ₃ O	329.76	Fongicide	106325-08-0	99.99	19.8	11.32
Ethofumesate	C ₁₃ H ₁₈ O ₅ S	286.34	Herbicide	26225-79-6	98.50	20.2	10.83
Flufenacet	C ₁₄ H ₁₃ F ₄ N ₃ O ₂ S	363.33	Herbicide	142459-58-3	99.08	19.8	11.26
Fluopyram	C ₁₆ H ₁₁ ClF ₆ N ₂ O	396.76	Fongicide	658066-35-4	99.90	20.2	11.15
Flutolanil	C ₁₇ H ₁₆ F ₃ NO ₂	323.31	Fongicide	66332-96-5	99.80	19.9	10.97
Fluxapyroxad	C ₁₈ H ₁₂ F ₅ N ₃ O	381.31	Fongicide	907204-31-3	99.90	20.1	10.97
Inpyrfluxam	C ₁₈ H ₂₁ F ₂ N ₃ O	333.4	Fongicide	1352994-67-2	99.90	20.1	11.3
Isofetamid	C ₂₀ H ₂₅ NO ₃ S	359.48	Fongicide	875915-78-9	99.90	10.0	11.23
Isopyrazam	C ₂₀ H ₂₃ F ₂ N ₃ O	359.4	Fongicide	881685-58-1	99.90	19.9	1.76
Mefentrifluconazole	C ₁₈ H ₁₅ ClF ₃ N ₃ O ₂	397.78	Fongicide	1417782-03-6	99.01	20.3	11.54
Metolachlor	C ₁₅ H ₂₂ ClNO ₂	283.8	Herbicide	51218-45-2	98.90	22.2	11.44
Penflufen	C ₁₈ H ₂₄ FN ₃ O	317.41	Fongicide	494793-67-8	99.80	21.2	11.48
Penthiopyrad	C ₁₆ H ₂₀ F ₃ N ₃ OS	359.4	Fongicide	183675-82-3	99.90	19.5	11.44
Phenmedipham	C ₁₆ H ₁₆ N ₂ O ₄	300.31	Herbicide	13684-63-4	99.00	20.1	10.61
Prosulfocarb	C ₁₄ H ₂₁ NOS	251.39	Herbicide	52888-80-9	99.70	20.8	11.97
Pydiflumetofen	C ₁₆ H ₁₆ Cl ₃ F ₂ N ₃ O ₂	426.67	Fongicide	1228284-64-7	99.90	9.2	11.76
Pyraclostrobin	C ₁₉ H ₁₈ ClN ₃ O ₄	387.82	Fongicide	175013-18-0	99.90	19.6	11.63
Sedaxane	C ₁₈ H ₁₉ F ₂ N ₃ O	331.4	Fongicide	874967-67-6	88.90	22.2	11.09
Sulfoxaflor	C ₁₀ H ₁₀ F ₃ N ₃ OS	277.27	Insecticide	946578-00-3	99.40	9.5	8.34/8.47
Terbutylazine	C ₉ H ₁₆ ClN ₅	229.71	Herbicide	5915-41-3	98.69	20.1	11.01
XDE-208 Sulfone	C ₉ H ₁₀ F ₃ NO ₂ S	253.24	Métabolite		97.26	9.7	7.5

Tableau 9. Dilutions réalisées à partir de la solution STOCK.

Solution finale	Volume de prélèvement (mL)	Solution prélevée	Volume final (mL)	Concentration finale ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Concentration en matrice ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
STOCK	-	-	20		
A	0.1 ou 0.2	STOCK	100		
B	5	A	50	100	10
C	2.5	A	50	50	5
D	1	A	50	20	2
E	5	B	50	10	1
F	5	C	50	5	0.5
G	5	D	50	2	0.2
H	5	E	50	1	0.1
I	5	F	50	0.5	0.05
J	5	G	50	0.2	0.02
K	5	H	50	0.1	0.01

Pour l'évaluation des taux de récupération (ajouts dosés), 500 μL d'une solution mixte sont ajoutés à 5 g de sol. 3 concentrations sont utilisées, 2, 10 et 100 $\mu\text{g.L}^{-1}$ pour le dopage du sol, ce qui correspond à une concentration finale dans le sol de 0,2, 1 et 10 $\mu\text{g.kg}^{-1}$. 5 réplicas ont été faits par concentration.

3.3.4. Méthode d'analyse par LC-MS/MS

- Paramètres chromatographiques
 - LC : Nexera X2™ Shimadzu
 - Autosampler : SIL-30AC Shimadzu
 - Pump : LC-30AD Shimadzu
 - Column oven : CTO-30AC Shimadzu
 - Detector : X500R Time-Of-Flight Mass Spectrometer (Q-TOF) ABSciex
 - Software of integration : Sciex OS 1.3.1
 - Column : Waters ACQUITY UPLC™ HSS T3, 100 mm x 2.1 mm i.d., 1.8 μm particle size
 - Phase mobile:
 - A: eau MilliQ 90 %, methanol 10% with 0.1% formic acid and 2mM ammonium formate
 - B : methanol with 0.1% formic acid, U-LC reagent grade
 - Tray temperature : 4°C
 - Débit : 0,3 mL.min^{-1} .
 - Gradient : voir tableau 10

Tableau 10. Gradient d'éluion utilisé pour l'analyse multi-résidus en LC-QToF/MS.

Temps	Phase mobile	
	% A	% B
0 min	95	5
0,50 min	95	5
8 min	0	100
11 min	0	100
11,50 min	95	5
18 min	95	5

- Température de la colonne : 40 °C.
- Volume d'injection : 5 µL.
- Paramètres spectrométriques
 - Source:
 - Ionisation : positive electrospray (ESI +)
 - Ion spray voltage : 5500 V
 - Curtain gas (cone gas) : 30 psi (air)
 - Nebulisation gas flow (probe) : 60 psi (air)
 - Desolvatation gas flow (ceramic) : 60 psi (air)
 - Temperature : 550°C
 -
 - TOF MS:
 - Declustering potential : 70 V
 - Collision energy (CE) : 5 V
 - Collision energy spread : 0 V
 - TOF start mass (Da) : 70
 - TOF stop mass (Da) : 620
 - Accumulation time (sec) : 0.3
 - TOF MSMS (Isopyrazam):
 - Precursor ion (Da): 360.19
 - Fragment ion (Da): 244.0879
 - Accumulation time (s): 0.1
 - Declustering potential (V): 70
 - Collision energy (V): 35

3.4. Résultats de la validation de la méthode d'analyse multi résidus sol

- Spécificité

L'analyse de blancs (sol de référence) a montré l'absence de composés pouvant interférer avec l'identification des substances actives analysées excepté pour clothianidine, clomazone.

- Linéarité de la réponse du détecteur, justesse, précision, LOD et LOQ

La linéarité a été évaluée en mesurant la réponse du détecteur (aire du pic) en fonction de la concentration en substance active pour une série de références de concentrations connues, de 0,02 à 10 µg.L⁻¹ de substances actives (n=4).

Les droites de régression en matrice ont un coefficient de détermination (R²) supérieur ou égal à 0,999 pour chaque molécule.

Le tableau 11 ci-après résume les résultats de la validation, à savoir le nom de la substance active, le taux de récupération obtenu pour les 5 ajouts dosés par niveau de concentration, la moyenne de ces 5 ajouts dosés, leur écart-type relatif, le coefficient de détermination R² de la régression qui a servi au dosage des échantillons enrichis ainsi que la gamme de cette droite et la limite de quantification (LOQ).

Les LOQ sont comprises entre 0,3 et 2.5 µg.kg⁻¹. Sur les 32 molécules pour lesquelles la méthode a été validée, 5 ont une LOQ supérieure à 1 µg.kg⁻¹ et une seule a une LOQ de 1.5 µg.kg⁻¹.

Tableau 11. Résultats de la validation.

	CP ($\mu\text{g.kg}^{-1}$)						LOQ ($\mu\text{g.kg}^{-1}$)	Droite de calibration ($\mu\text{g.L}^{-1}$)		
	0.2		1		10			R ²	Ref bas	Ref haut
	Recup (%)	RSD (%)	Recup (%)	RSD (%)	Recup (%)	RSD (%)				
2,6 dichlorobenzamide	/	/	96	2.2	97	2.1	1.0	0.9999	0.2	10
Aclonifen	/	/	87	1.7	97	8.8	2.0	0.9993	0.5	10
Benzovindylflupyr	/	/	98	1.6	98	2.8	1.2	1	0.1	10
Bixafen	83	17.2	102	3.7	98	2.1	0.6	0.9999	0.1	10
Boscalid	/	/	111	8.3	97	1.6	1.1	0.9993	0.2	10
Chlorantraniliprole	103	9.3	99	4.5	98	1.4	0.5	0.9999	0.1	10
Chloridazon	94	5.3	96	0.6	95	0.7	0.5	1	0.05	10
Clomazone	101	4.0	98	3.4	96	0.5	0.5	1	0.1	10
Clothianidin	/	/	96	5.2	97	1.7	1.0	0.9999	0.5	10
Cyantraniliprole	92	18.5	96	2.8	96	2.2	0.7	0.9999	0.05	10
Difenoconazole	91	12.5	92	6.2	97	2.2	0.3	0.9999	0.05	10
Epoxiconazole	106	19.4	96	3.9	97	1.5	0.5	0.9999	0.05	10
Ethofumesate (NH4)	78	13.8	94	3.4	97	1.6	0.5	0.9999	0.1	10
Flufenacet	88	7.7	93	2.7	98	1.8	0.3	0.9999	0.02	10
Fluopyram	98	9	101	2.5	96	1.3	0.5	0.9999	0.1	10
Flutolanil	87	6.9	94	0.8	99	2.7	0.5	0.9997	0.02	10
Fluxapyroxad	102	7.1	96	4.5	98	2.2	1.0	0.9996	0.02	10
Inpyrfluxam	103	2.9	94	2.4	97	1.2	0.5	1	0.2	10
Isofetamid	88	12.2	87	1.7	99	4.4	1.4	0.9998	0.05	10
Isopyrazam 244	101	10	99	2.8	95	2.4	0.5	0.9999	0.1	10
Mefentrifluconazole	/	/	90	5.2	97	2.2	1.0	0.9998	0.5	10
Metolachlor	90	6.8	94	0.6	97	1.1	0.5	0.9999	0.02	10
Penflufen	102	4.1	101	4.3	97	1.5	0.6	1	0.1	10
Penthiopyrad	88	9.3	99	3.4	97	1.6	0.6	0.9999	0.1	10
Phenmedipham NH4	91	8.4	94	2.1	97	1.0	0.5	1	0.05	10
Prosulfocarb	/	/	98	2.7	99	5.3	0.5	0.9999	0.05	10
Pydiflumetofen	99	7.5	91	8.6	96	2.0	0.5	0.9998	0.05	10
Pyraclostrobine	95	7.6	95	3.2	96	1.1	0.5	1	0.1	10
Sedaxane SYN508210	85	17.0	102	2.4	96	0.9	1.2	0.9999	0.2	10
Sulfoxaflor	/	/	90	13.7	96	3.2	2.5	0.9998	0.5	10
Terbutylazine	96	8.9	93	3.8	97	1.7	0.5	0.9999	0.05	10
XDE-208 Urea	/	/	96	3.2	96	0.8	1.0	0.9999	0.1	10

4. Suivi des PPP dans le sol et dans l'eau

4.1. Introduction

Au cours de cette seconde phase (2021 – 2024) de la convention, le regard posé sur les résultats ne sera plus vertical (c-à-d par lysimètre, toutes matières actives confondues) comme lors de la première phase (2018 – 2021) mais bien horizontal (c-à-d par matière active, tous lysimètres confondus). Cette évolution (entamée lors de la présentation du rapport final de la première phase) dans l'approche s'appuie sur un constat et un objectif.

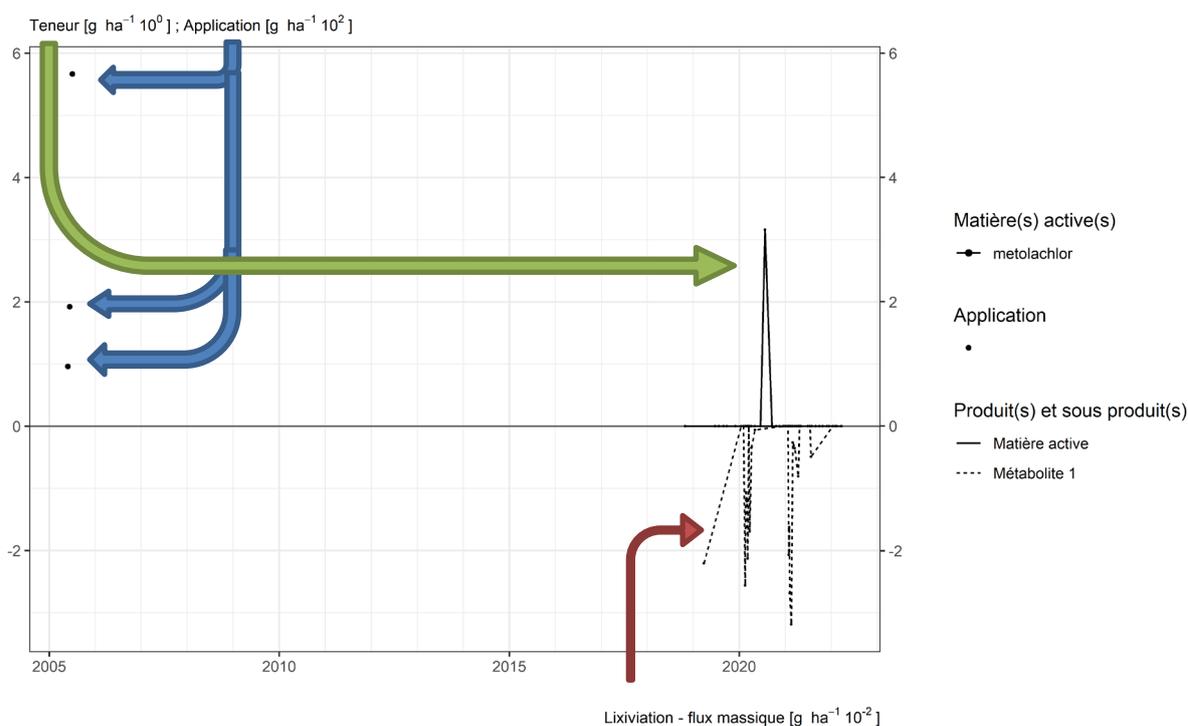
Le constat : nous disposons d'une chronique d'application de PPP de plus de dix ans sur les huit lysimètres suivis. Par ailleurs, nous disposons de résultats d'analyses d'échantillons de sol prélevés depuis 2017 sur les parcelles équipées d'un lysimètre en Hesbaye et 2018 sur les parcelles équipées de lysimètres sur le site de Gembloux Agro-Bio Tech. De ce fait, par matière active, nous disposons de plus en plus de répétitions d'observations 'apports PPP – analyses PPP dans le sol'.

L'objectif : évaluer le potentiel du dosage des résidus de PPP dans les sols tant comme indicateur d'usage que comme indicateur environnemental.

La suite de ce document va donc s'atteler à établir

- un lien entre l'usage d'un PPP, l'évolution de sa concentration dans le sol (teneur) au cours des semaines, des mois, voire des années qui suivent son application et
- un bilan entre la/les quantité(s) appliquée(s) lors du traitement et la quantité collectée à la base des lysimètres.

Les résultats sont présentés par matière active (et ses éventuels métabolites) et par parcelle comme illustré à la figure ci-dessous. Le lecteur doit être très attentif au coefficient multiplicateur ($10^{\pm x}$) des unités. Dans l'exemple présenté, l'ordre de grandeur de la teneur est 100 fois moindre que la dose appliquée et la lixiviation est 100 fois moindre que la teneur.



Les calculs de teneur en g/ha ont été fait sur la somme des couches de sol échantillonnés. En effet, sur les parcelles Sol-Résidus, des prélèvements sont réalisés par profondeur : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. En hesbaye, les horizons prélevés sont 0-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm. Les résultats présentés ci-dessous sont donc représentatif d'une grande épaisseur de sol même si les concentrations mesurées peuvent beaucoup varier d'un horizon à l'autre et d'une molécule à l'autre. En effet, pour certaines molécules la teneur est plus ou moins homogène sur l'épaisseur du sol alors que pour d'autres, seul la couche 0-30 cm en contient.

4.2. Benzovindiflupyr

Le benzovindiflupyr est un fongicide SDHI utilisé sur culture de froment dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 10 à 14) sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport de 75 g/ha réalisé en juin 2021 conduit en aout à une concentration dans le sol d'environ 11 g/ha, soit un peu plus de 6 g/ha de plus qu'avant le traitement ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport de 75 g/ha réalisé en juin 2020 conduit à une concentration dans le sol de l'ordre d'une vingtaine de grammes par hectare au cours de l'été qui suit.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, l'apport de 75 g/ha réalisé en juin 2021 laisse une concentration dans le sol assez constante au cours de l'hiver qui suit, de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement de 75 g/ha réalisé en juin 2020 laisse une concentration de l'ordre de quinzaine de grammes par hectare au cours de l'hiver qui suit.

A plus long terme (deux ans) après l'apport (Haute Bova, 2019), la concentration dans le sol est inférieure à la dizaine de gramme par hectare.

EAU

Cette matière active n'a pas été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

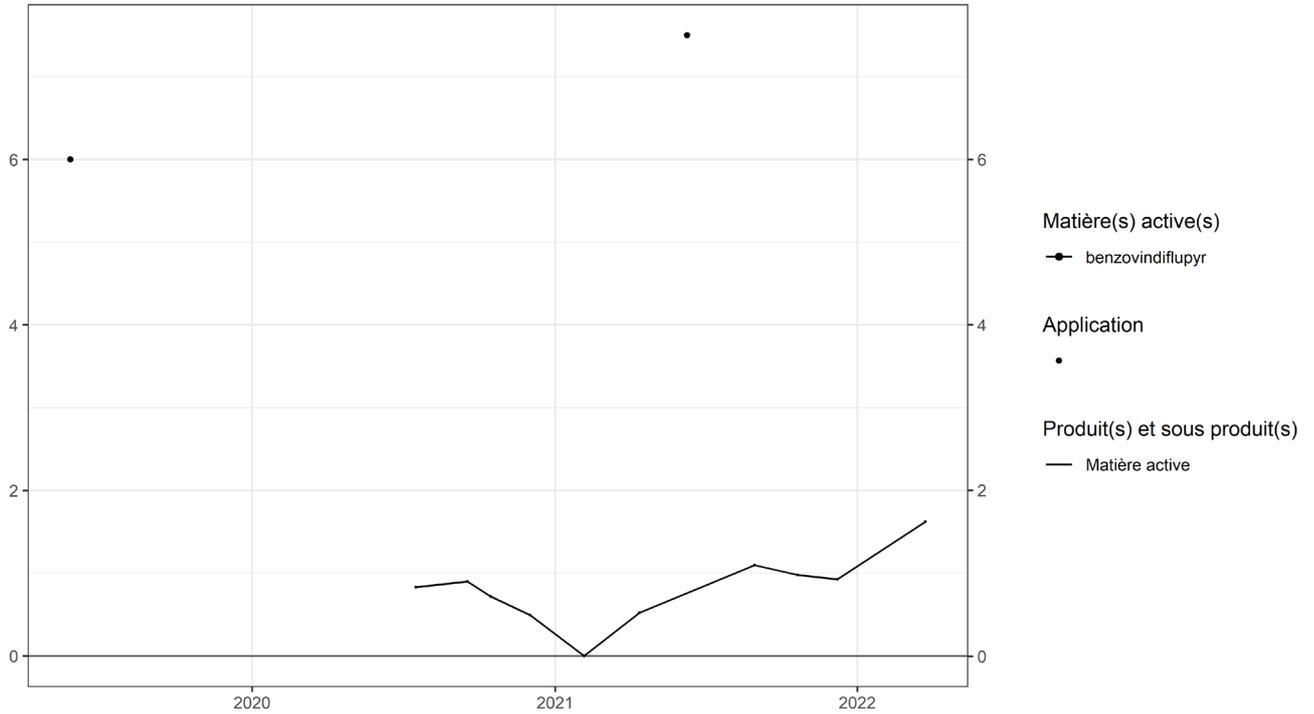


Figure 10. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle Haute Bova.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

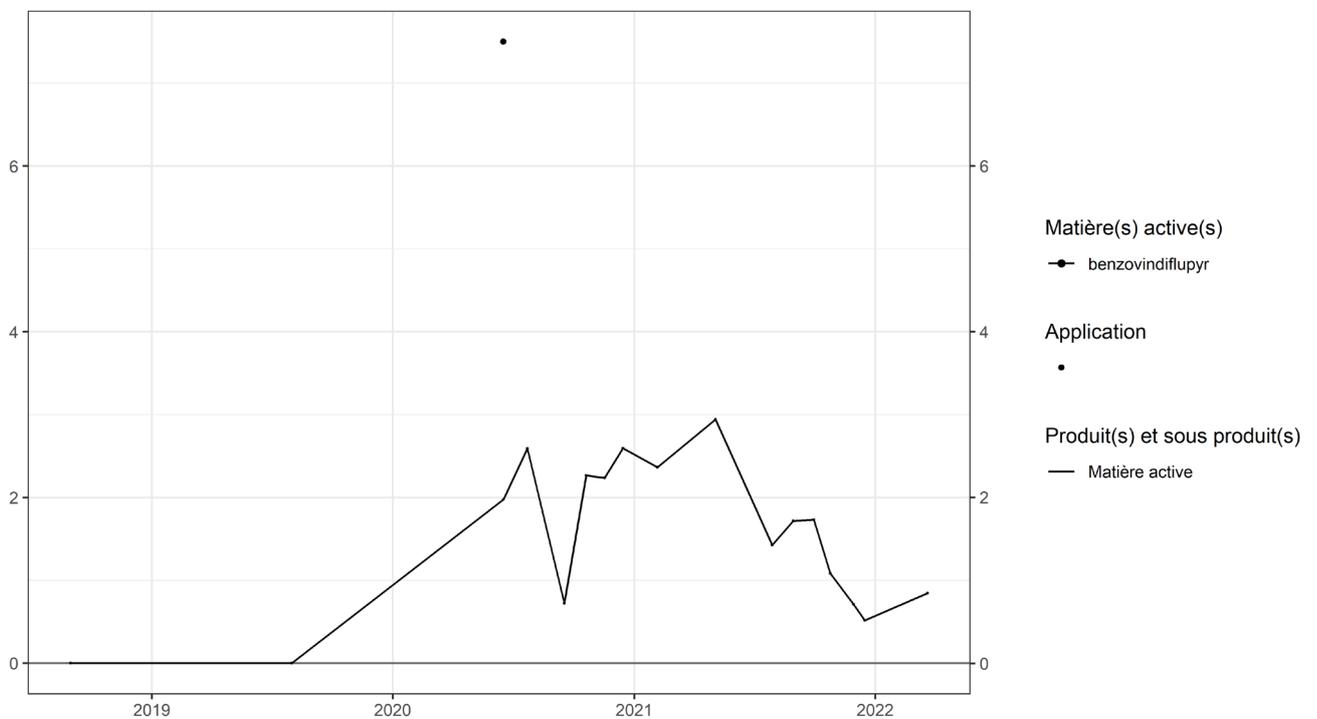


Figure 11. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR4.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

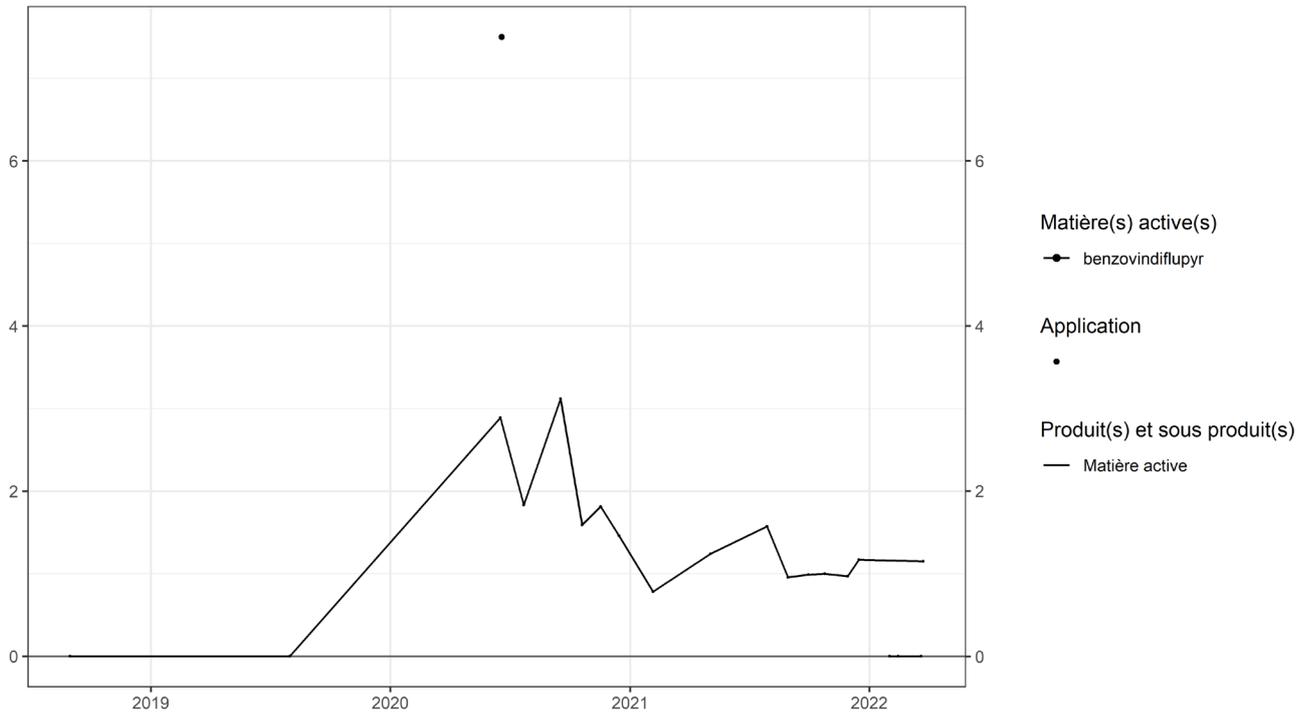


Figure 12. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR8.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

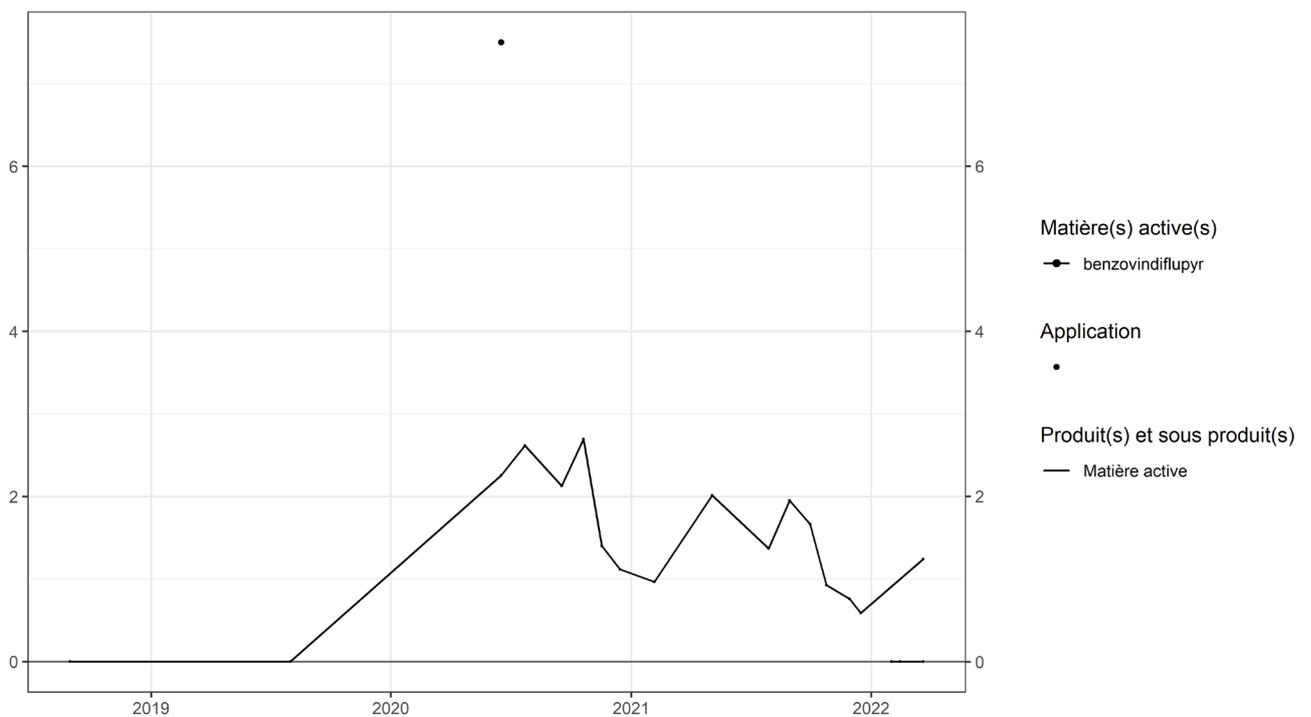


Figure 13. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR12.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

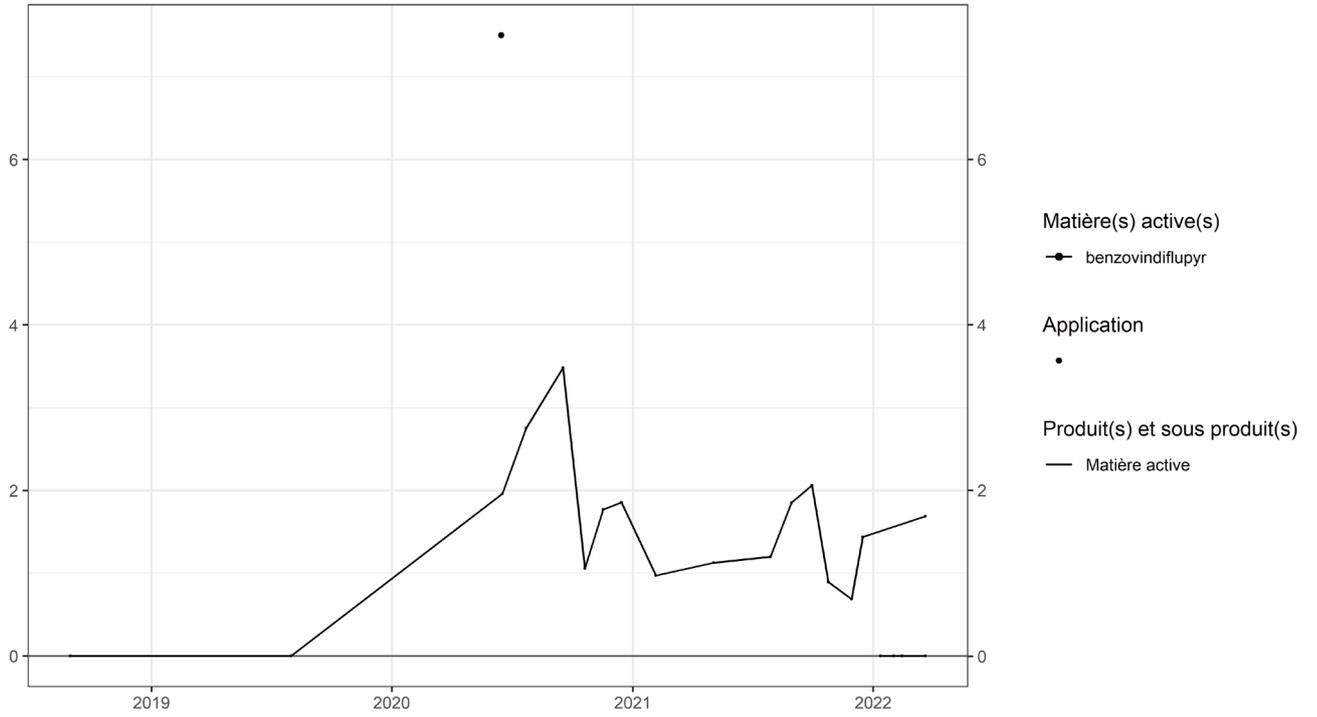


Figure 14. Applications et suivi de la teneur en benzovindiflupyr dans le sol de la parcelle SR16.

4.3. Bixafen

Le bixafen est un fongicide SDHI utilisé sur culture de froment dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 15 à 21) sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'environ 75 g/ha réalisé fin mai 2020 conduit en juillet à une concentration dans le sol d'environ 80 g/ha (laissant déjà présager un résidu du traitement réalisé en 2016) ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'un peu moins de 100 g/ha réalisé fin mai 2018 conduit à une concentration dans le sol de l'ordre d'une centaine de grammes par hectare en aout.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, l'apport d'environ 75 g/ha réalisé fin mai 2020 laisse une concentration dans le sol en automne-hiver 2020-2021 de l'ordre de la cinquantaine de grammes par hectare ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement (un peu moins de 100 g/ha) réalisé fin mai 2018 a laissé une concentration de l'ordre de d'une centaine grammes par hectare à l'automne de la même année.

A plus long terme (plus de trois ans) après l'apport, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, deux traitements réalisés en 2015 et 2017 (pour un total d'environ 160 g/ha) sont décelés à hauteur d'une trentaine de grammes en 2020-2021 ;
- sur la parcelle Bovenistier, un traitement (un peu plus de 75 g/ha) réalisé en 2015 est décelé en 2020 et 2021 à hauteur d'une vingtaine de grammes par hectare ;

EAU

Cette matière active a été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres de trois des quatre parcelles Sol-Résidus (qui reçoivent un traitement de cette matière active tous les deux ans). Le flux observé est de l'ordre de 0,03 g/ha.

L'analyse de cette matière active dans les eaux n'a commencé qu'en 2022, les observations sont à poursuivre.

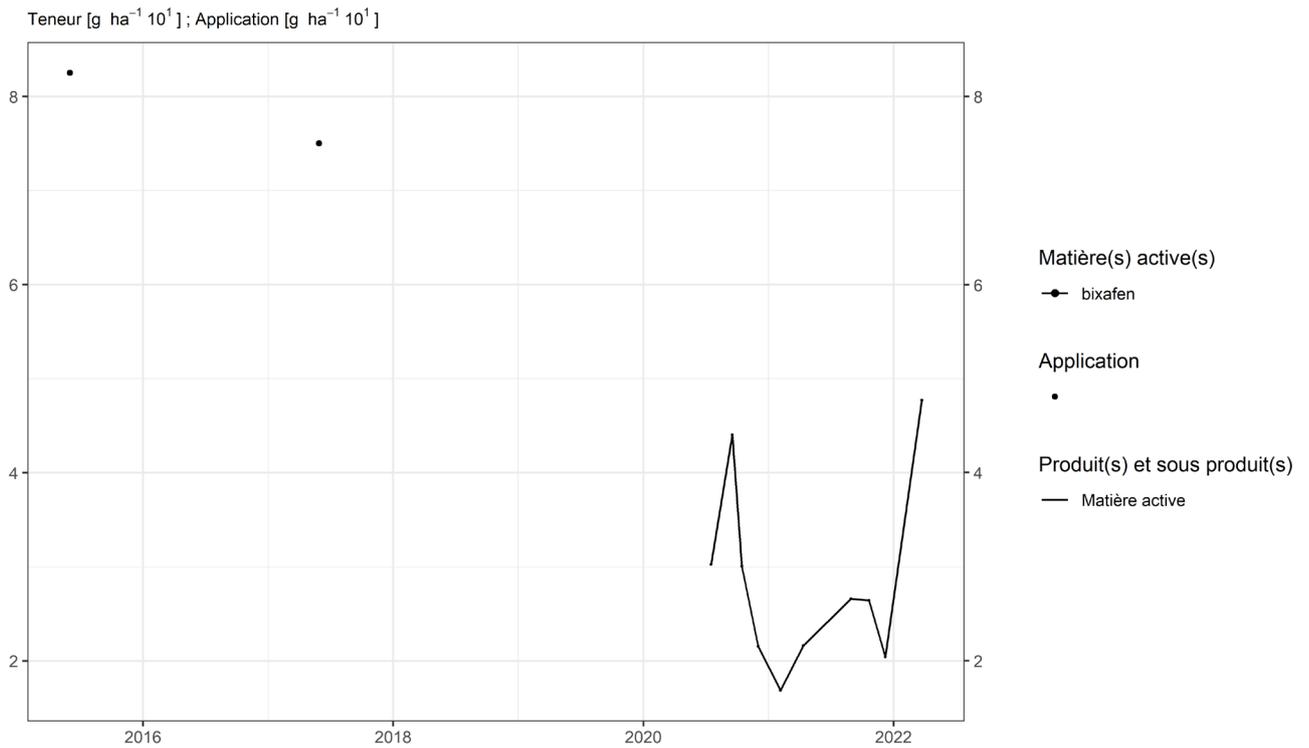


Figure 15. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Haute Bova.

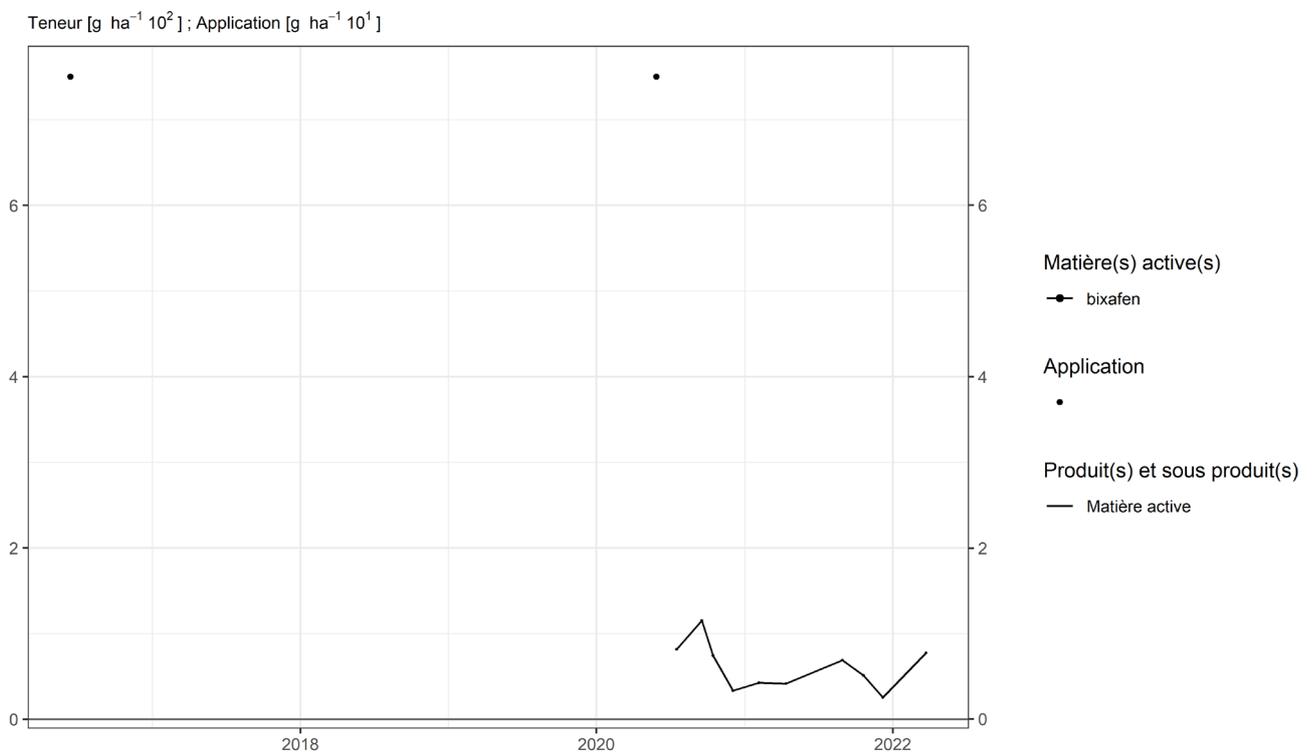


Figure 16. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]

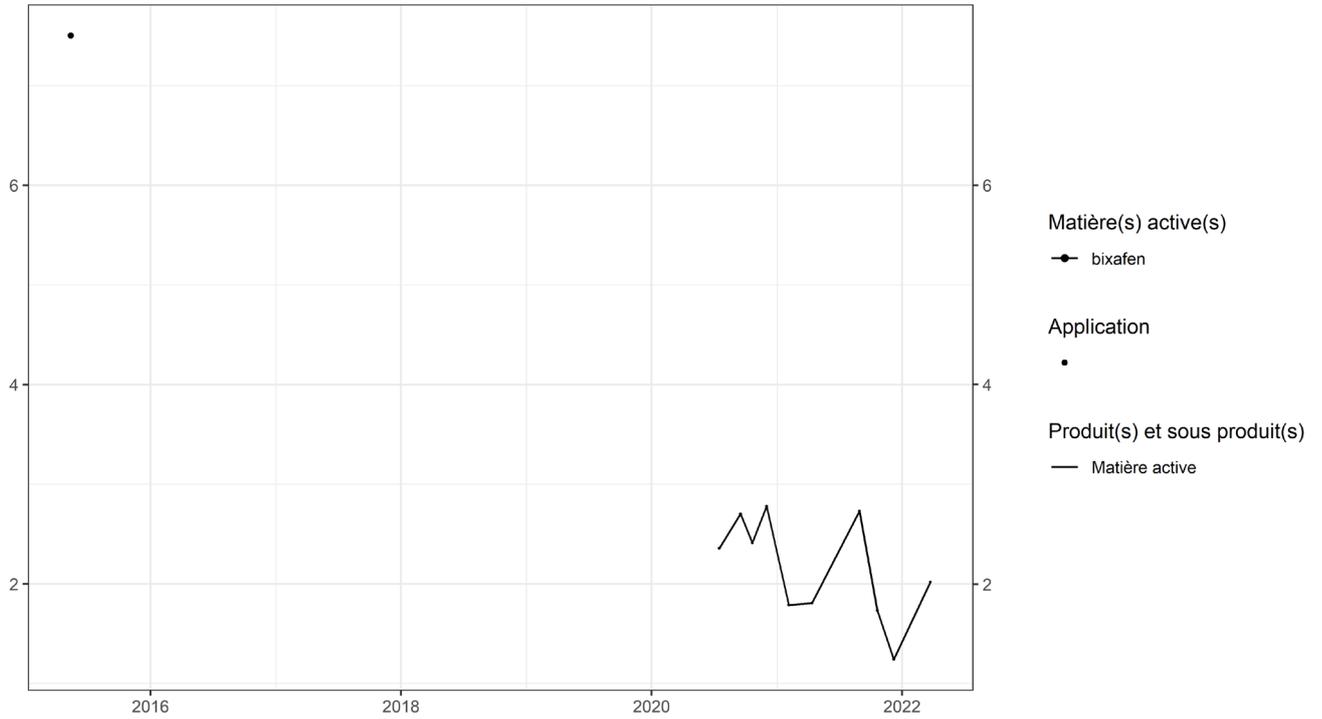


Figure 17. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle Bovenistier.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]

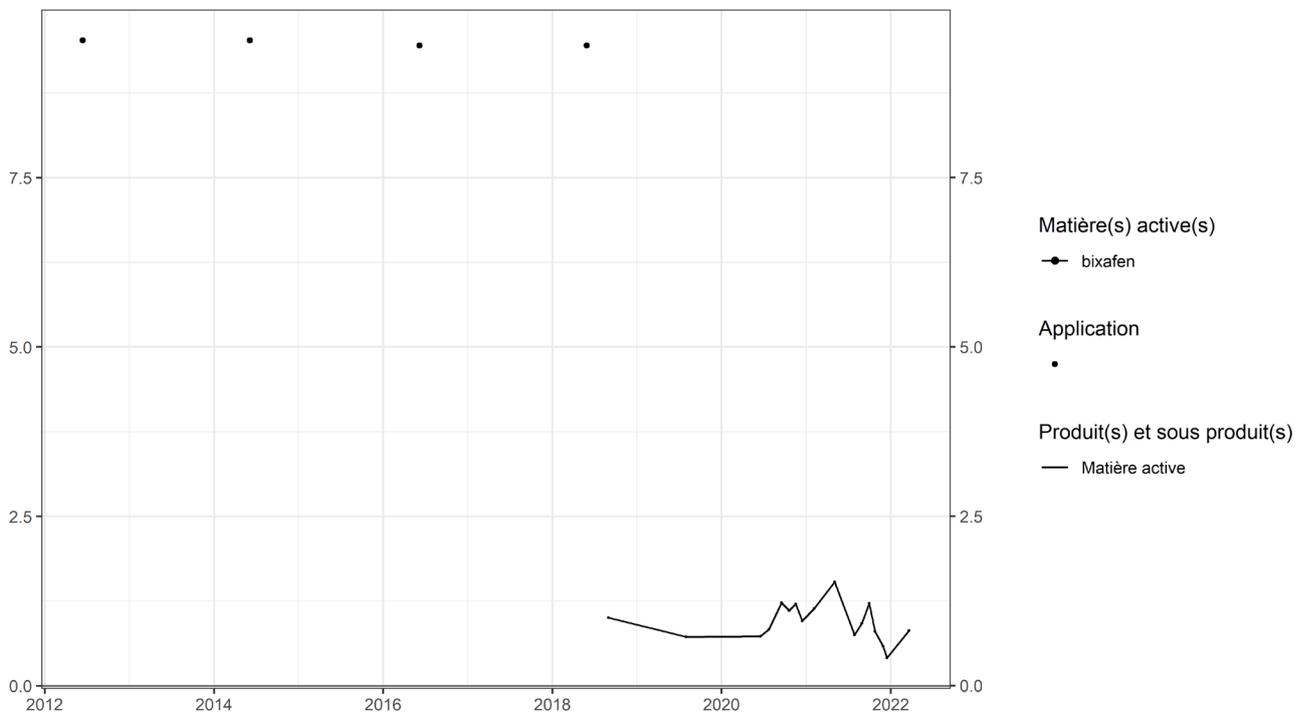


Figure 18. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol de la parcelle SR4.

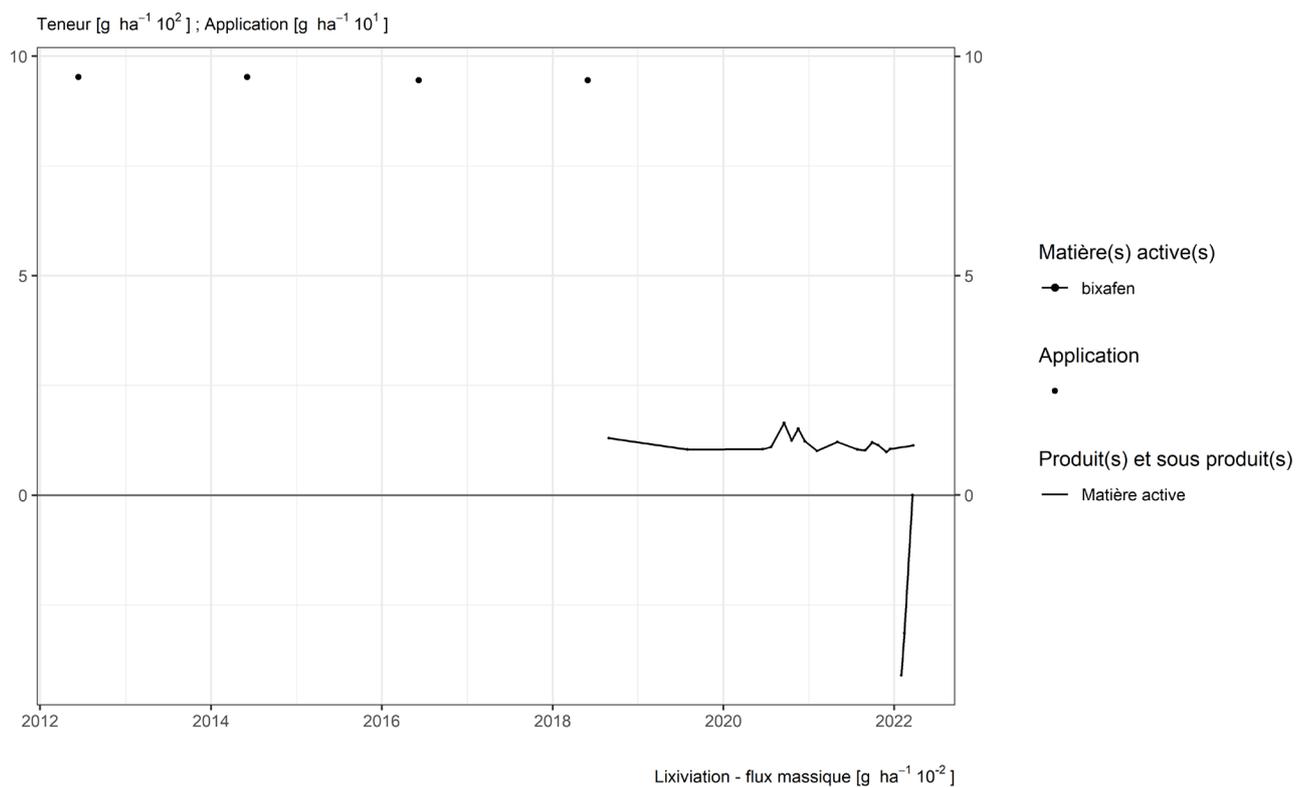


Figure 19. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

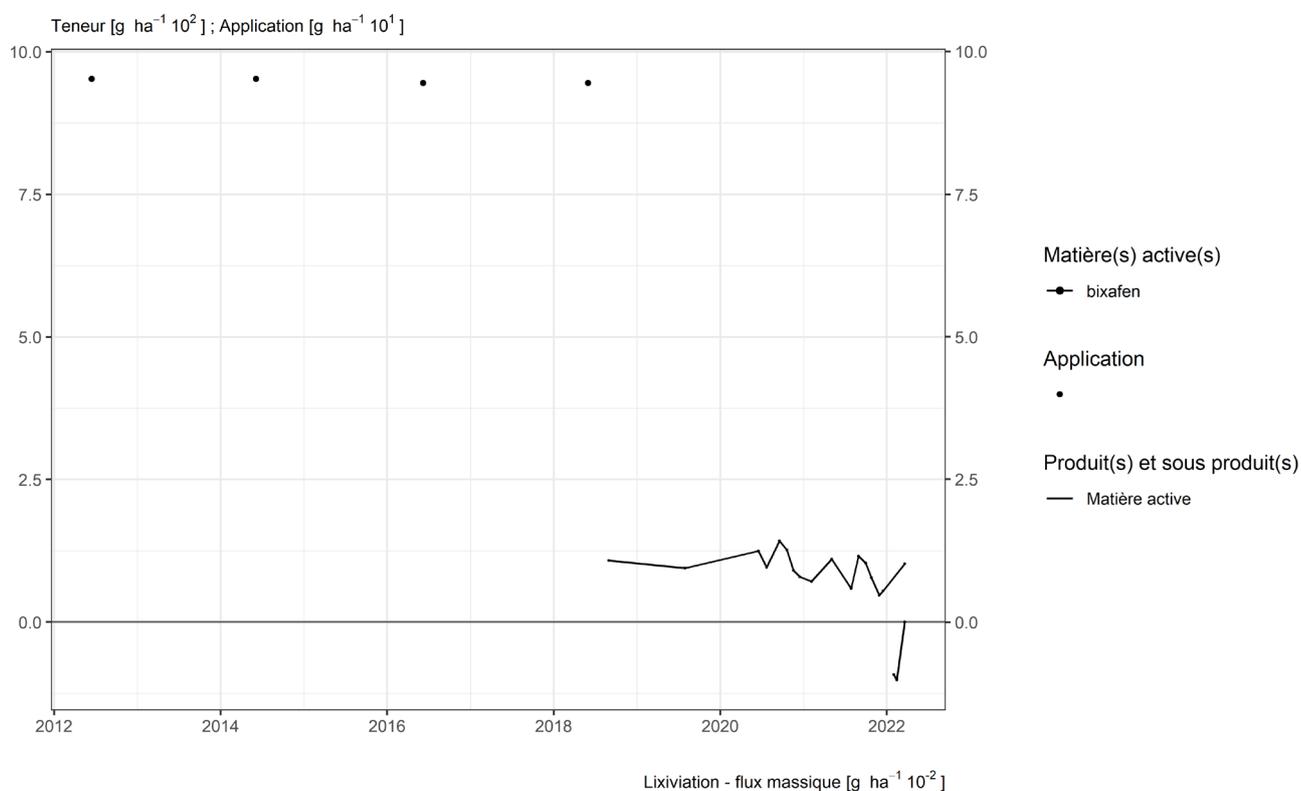


Figure 20. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

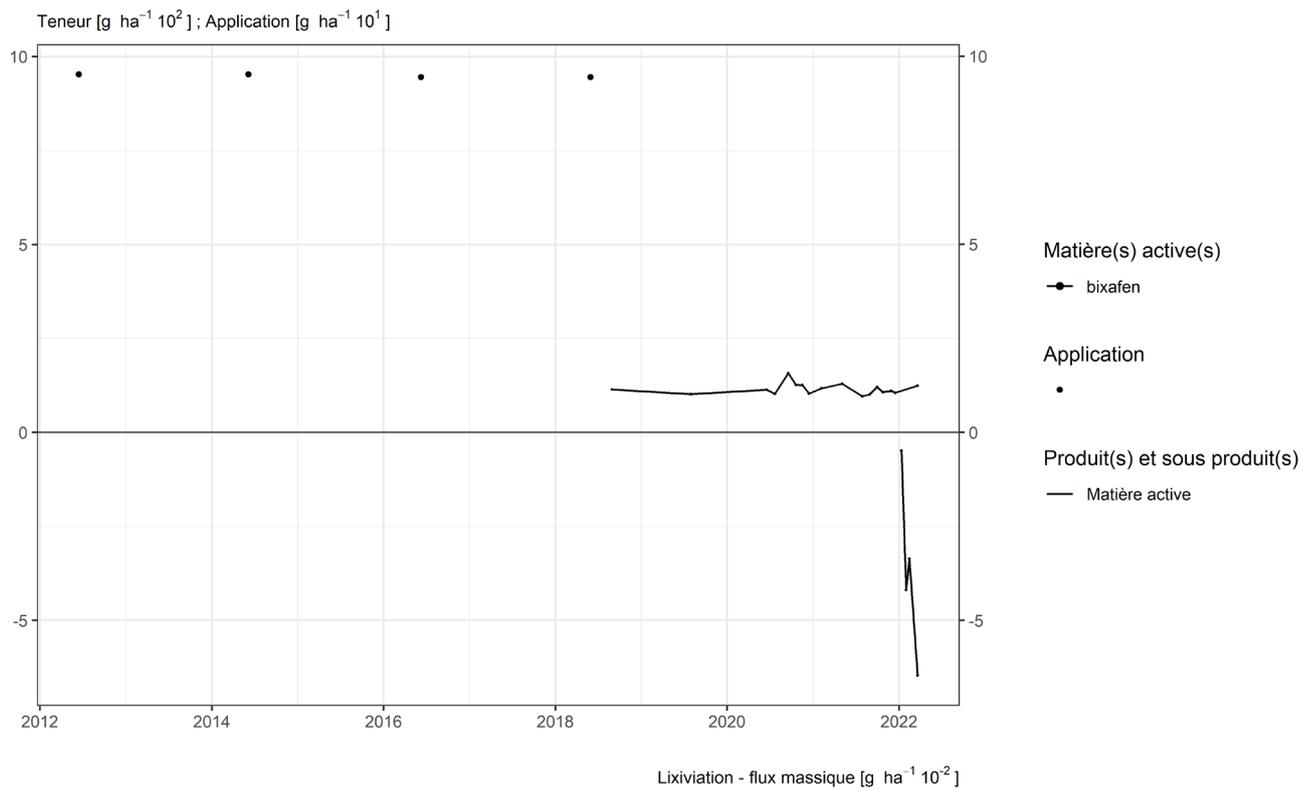


Figure 21. Applications et suivi de la teneur en bixafen dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.4. Boscalid

Le Boscalid est un fongicide utilisé sur culture de pomme de terre, colza, pois, poireau et haricot dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations sur la parcelle Bovenistier (figure 23) indiquent que deux apports totalisant de 90 g/ha conduisent à une augmentation équivalente de concentration dans le sol.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer (figure 22), l'apport réalisé en été 2021 est toujours visible au printemps 2022 ;
- sur la parcelle Bovenistier (figure 23), les apports réalisés en été 2019 sont également toujours visibles au printemps 2020.

Dans les années qui suivent un apport de cette matière active, les observations (figures 23 à 27) sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, deux apports réalisés en 2010 et 2013, totalisant 750 g/ha, sont encore 'à moitié' visibles en 2021 ;
- sur la parcelle Bovenistier, deux apports réalisés en 2011, totalisant 900 g/ha, sont encore 'à tiers' visibles en 2021 ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport de 250 g/ha réalisé en 2009 est encore visible à une teneur d'environ 20 g/ha en 2021.

EAU

A l'exception de deux échantillons (Sol-Résidus), cette matière active n'a jamais été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

Teneur [g ha⁻¹ 10²]; Application [g ha⁻¹ 10²]

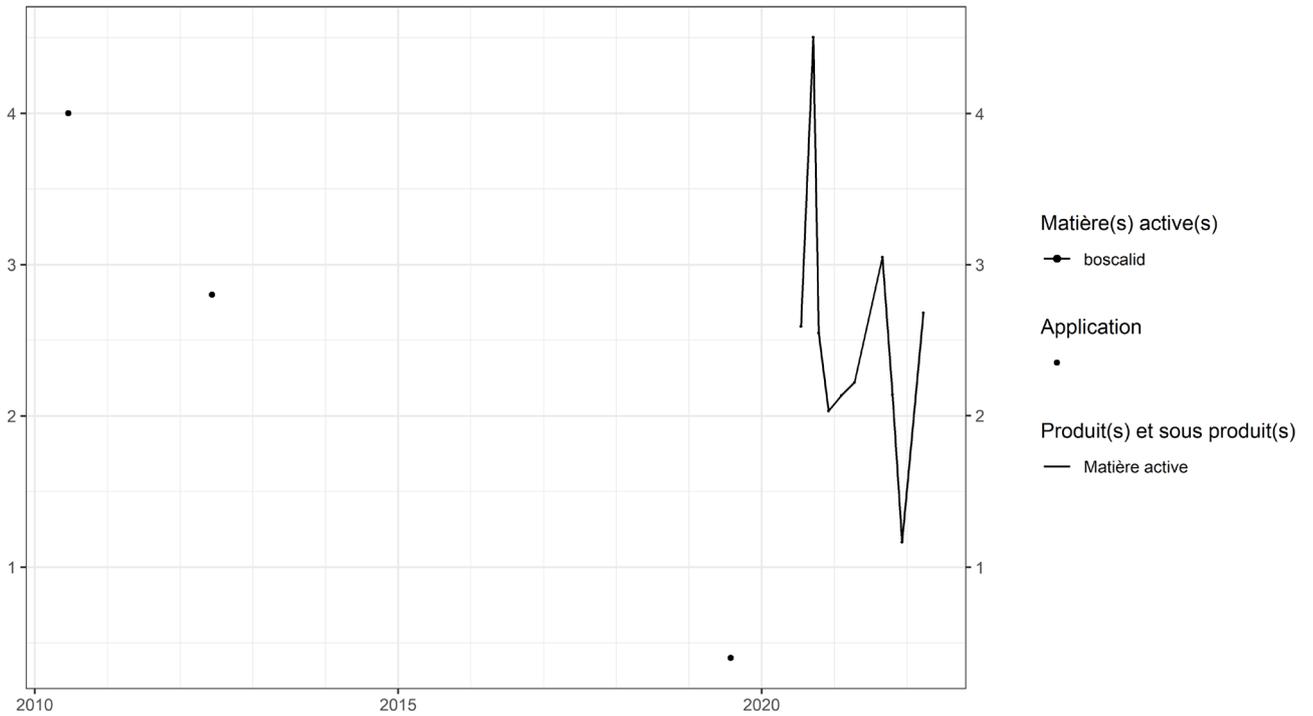


Figure 22. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

Teneur [g ha⁻¹ 10²]; Application [g ha⁻¹ 10²]

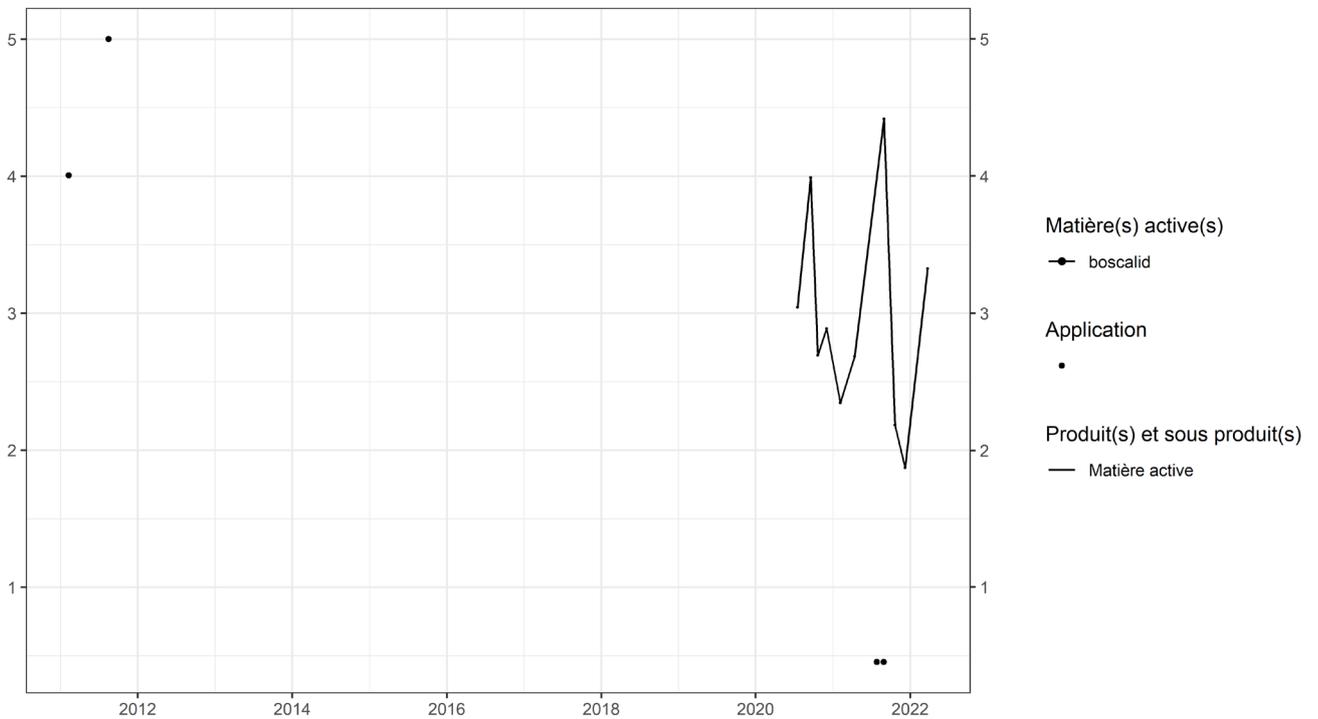


Figure 23. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle Bovenistier.

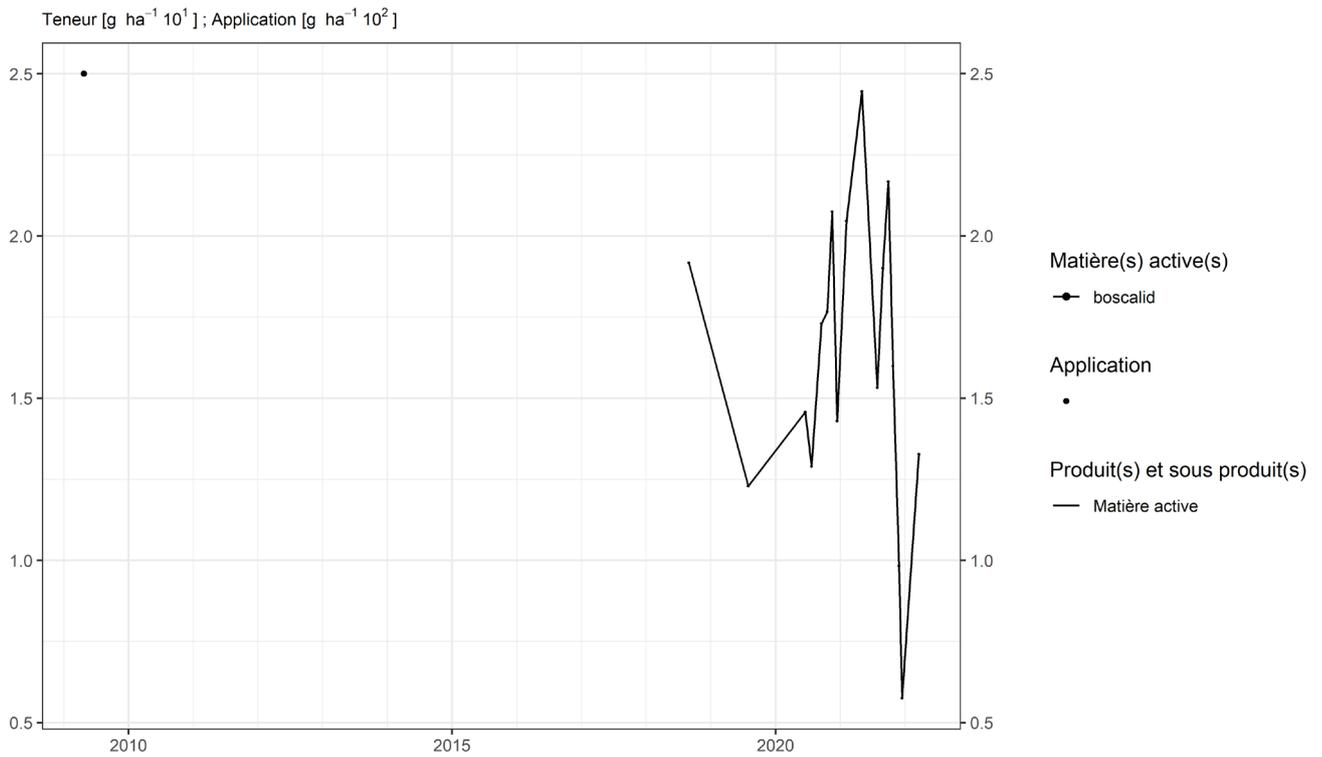


Figure 24. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR4.

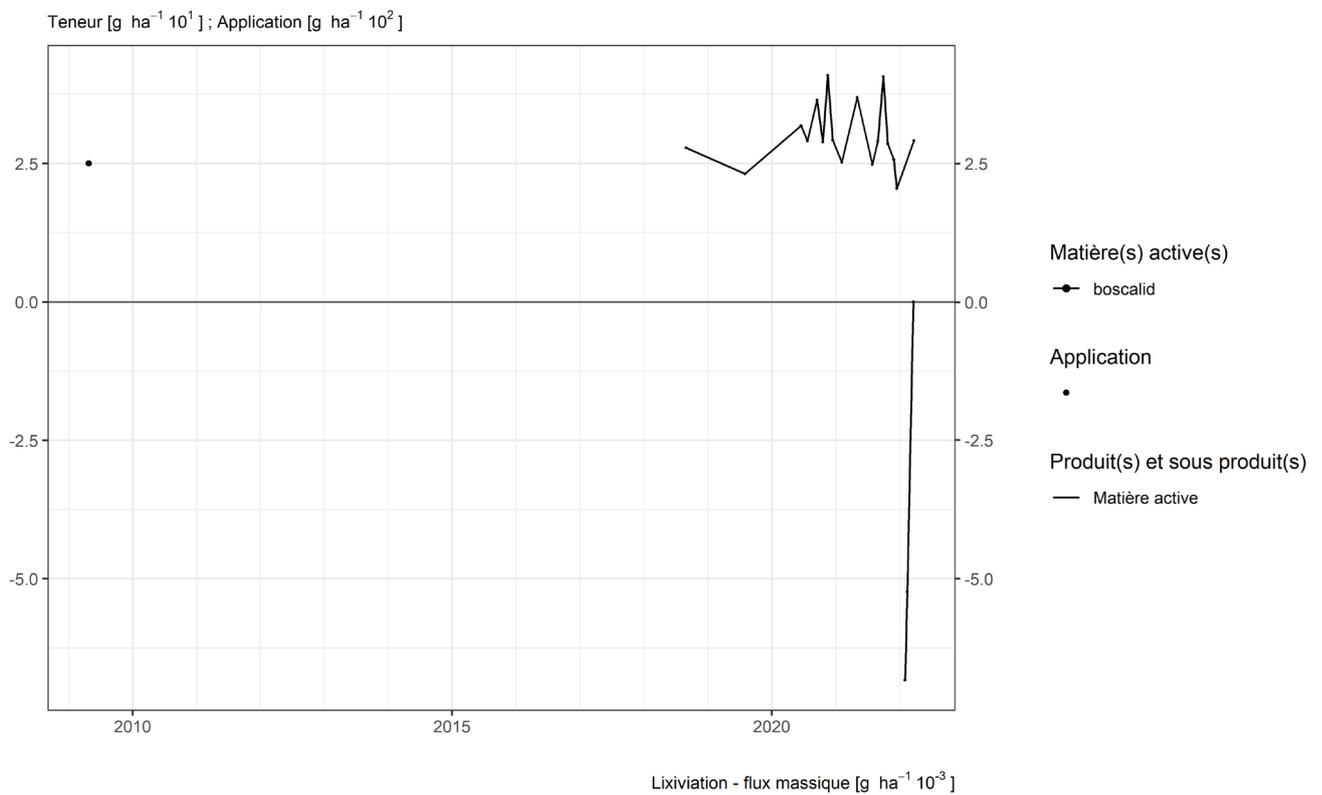


Figure 25. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR8.

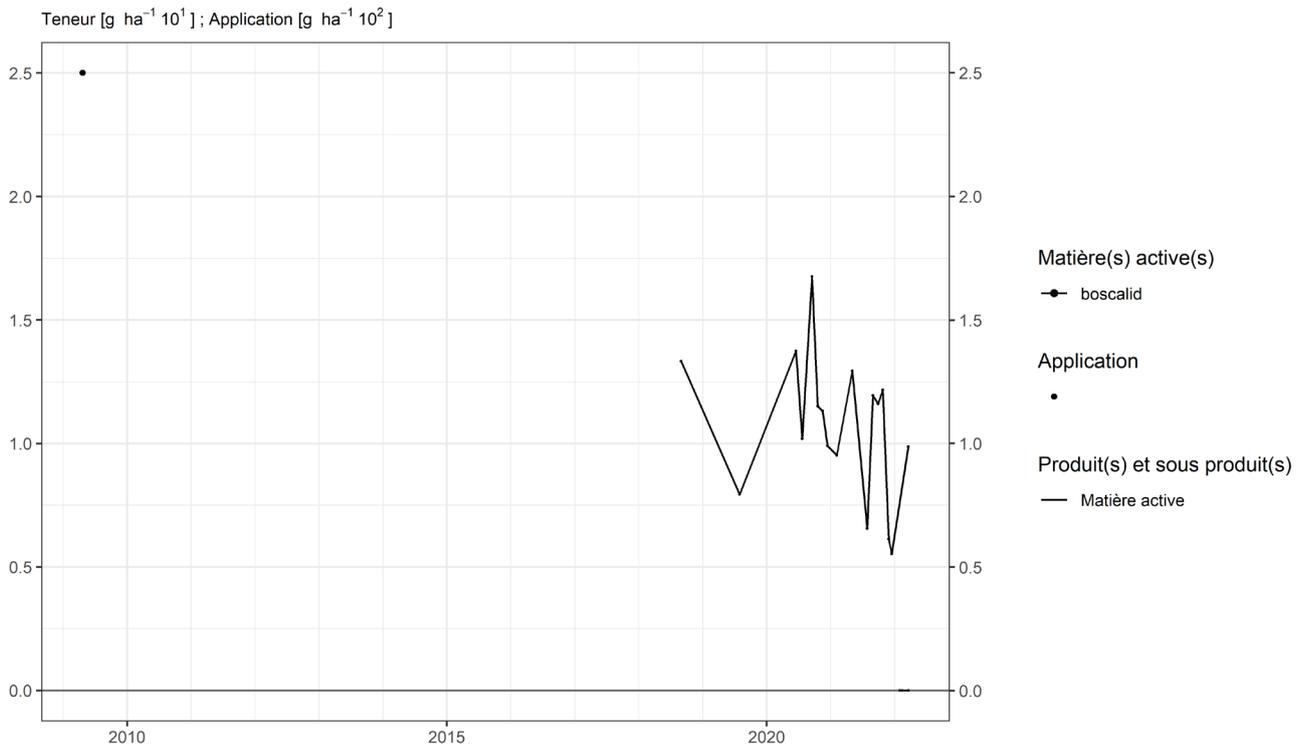


Figure 26. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR12.

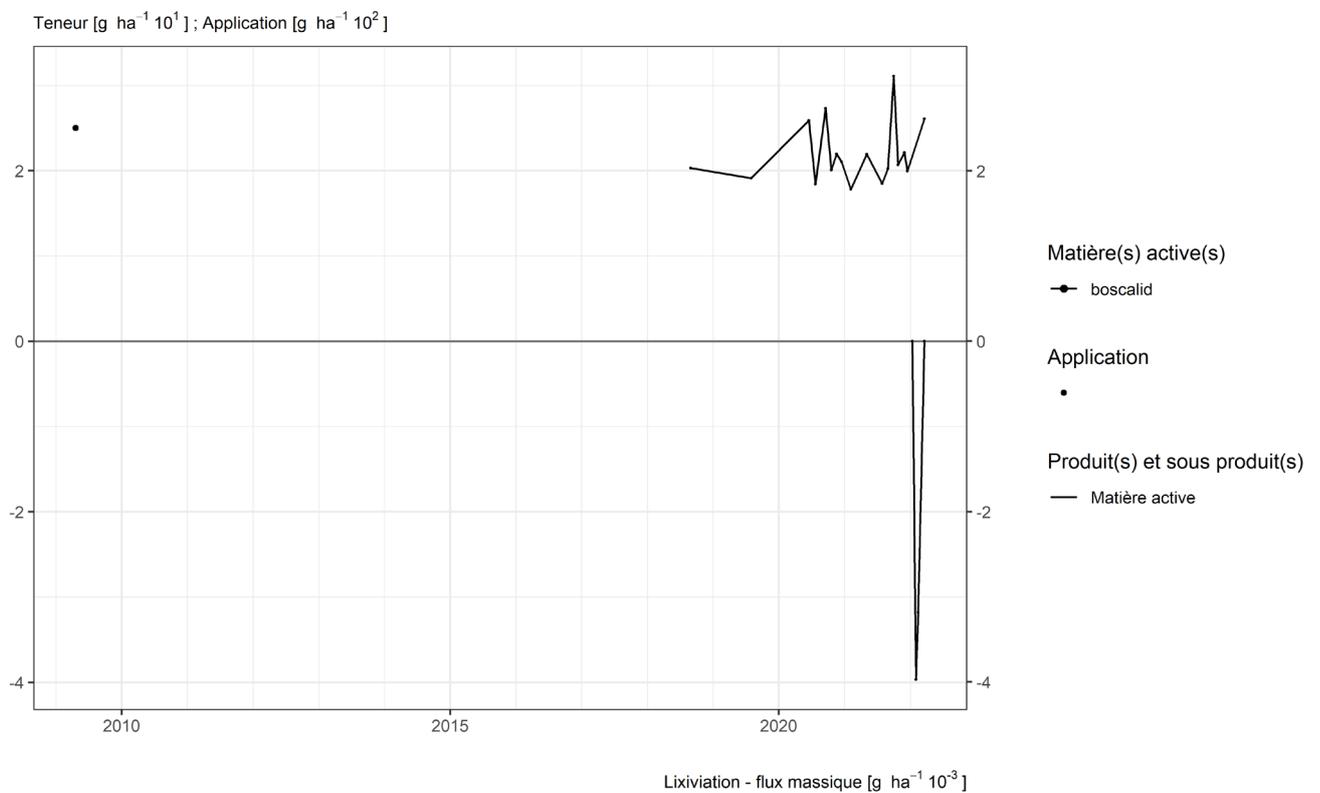


Figure 27. Applications et suivi de la teneur en boscalid dans le sol de la parcelle SR16.

4.5. Chloridazon

Le chloridazon est un herbicide qui a été utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, l'observation réalisée par l'ISSEP sur la parcelle Haute Bova (figure 28) indique que l'apport est détecté à cinq fois la quantité apportée. Cette valeur est vraisemblablement aberrante.

Plus de deux ans après l'apport (Haute Bova, 2014 et 2018), le chloridazon n'est plus détecté dans le sol. La concentration dans le sol est inférieure à la dizaine de grammes par hectare.

A plus long terme (plus de huit ans) après l'apport, l'ISSEP a décelé les métabolites du chloridazon dans le sol (figures 29 à 31) à des concentrations comprises entre 15 et 60 g/ha, soit environ un vingtième d'un apport.

- sur la parcelle Haute Bova, l'apport de 75 g/ha réalisé en juin 2021 laisse une concentration dans le sol assez constante au cours de l'hiver qui suit, de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement de 75 g/ha réalisé en juin 2020 laisse une concentration de l'ordre de quinzaine de grammes par hectare au cours de l'hiver qui suit.

EAU

Les métabolites de cette matière active sont observés (par l'ISSEP entre 2014 et 2018 et par le CRAW depuis juin 2018) dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres :

- sur la parcelle Haute Bova sur laquelle deux apports de cette matière active ont été 'récemment' réalisés (2014 et 2018), succédant très vraisemblablement à des apports de même fréquence, les flux de desphenyl-chloridazon au cours de sept périodes de lixiviation (2014 à 2022) sont de l'ordre de la cinquantaine de grammes par hectare. Les flux de méthyl-desphenyl chloridazon observés au cours de trois périodes de lixiviation (2014 à 2017) sont de l'ordre de la vingtaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Chemin de fer sur laquelle aucun apport de cette matière active n'a été réalisé depuis 2010, les flux de desphenyl-chloridazon au cours de sept périodes de lixiviation (2014 à 2022) sont de l'ordre de la dizaine de grammes par hectare. Les flux de méthyl-desphenyl chloridazon observés au cours de quatre périodes de lixiviation (2014 à 2018) sont de l'ordre de la dizaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Bovenistier sur laquelle aucun apport de cette matière active n'a été réalisé depuis 2010, les flux de desphenyl-chloridazon au cours de sept périodes de lixiviation (2014 à 2022) sont de l'ordre de la trentaine de grammes par hectare. Les flux de méthyl-desphenyl chloridazon observés au cours de quatre périodes de lixiviation (2014 à 2018) sont de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Sole 4 sur laquelle aucun apport de cette matière active n'a été réalisé depuis 2010, les flux de desphenyl-chloridazon au cours de sept périodes de lixiviation (2014 à 2022) sont de l'ordre de 80 g/ha. Les flux de méthyl-desphenyl chloridazon observés au cours de quatre périodes de lixiviation (2014 à 2018) sont de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, les flux de desphenyl-chloridazon au cours de trois périodes de lixiviation (2020-2022) sont de la trentaine de grammes par hectare

Grosso modo, les flux de desphenyl-chloridazon sont donc de l'ordre de la dizaine de grammes par hectare et par an et les flux de methyl-desphenyl-chloridazon sont de l'ordre de quelques grammes par hectare et par an.

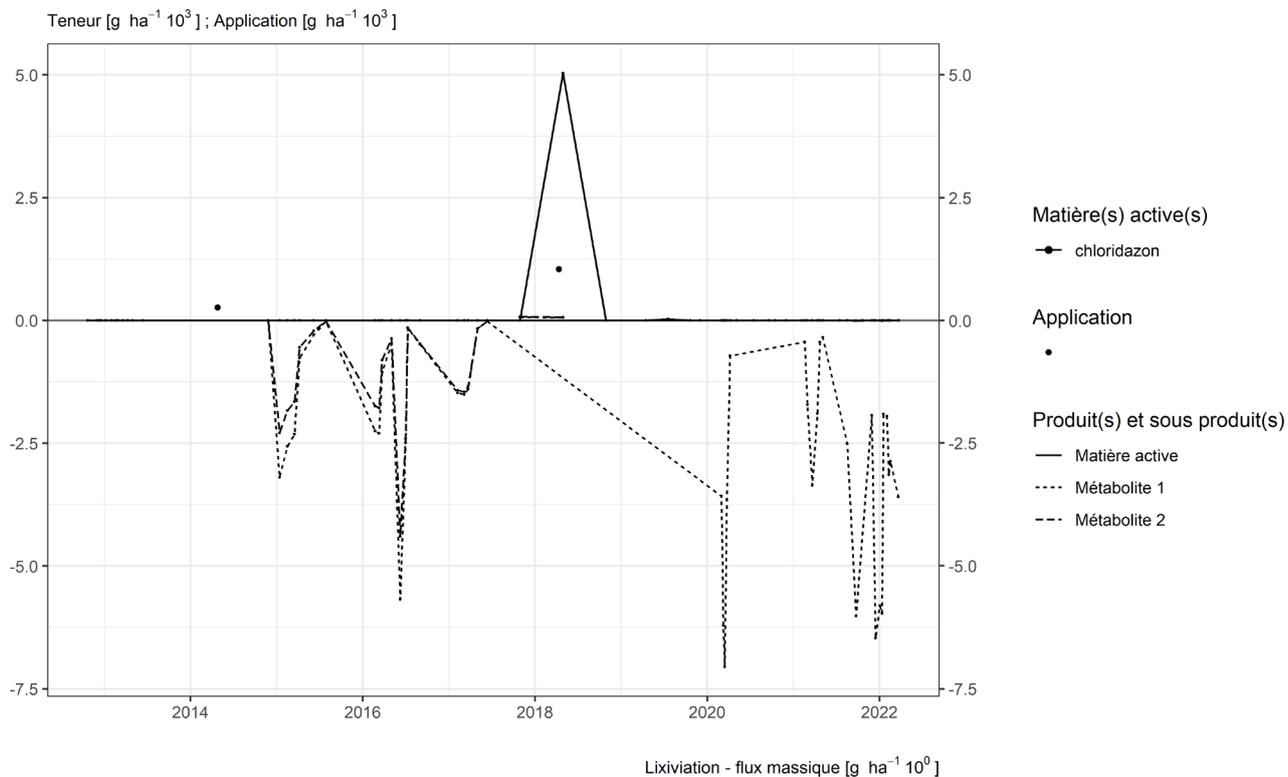


Figure 28. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.

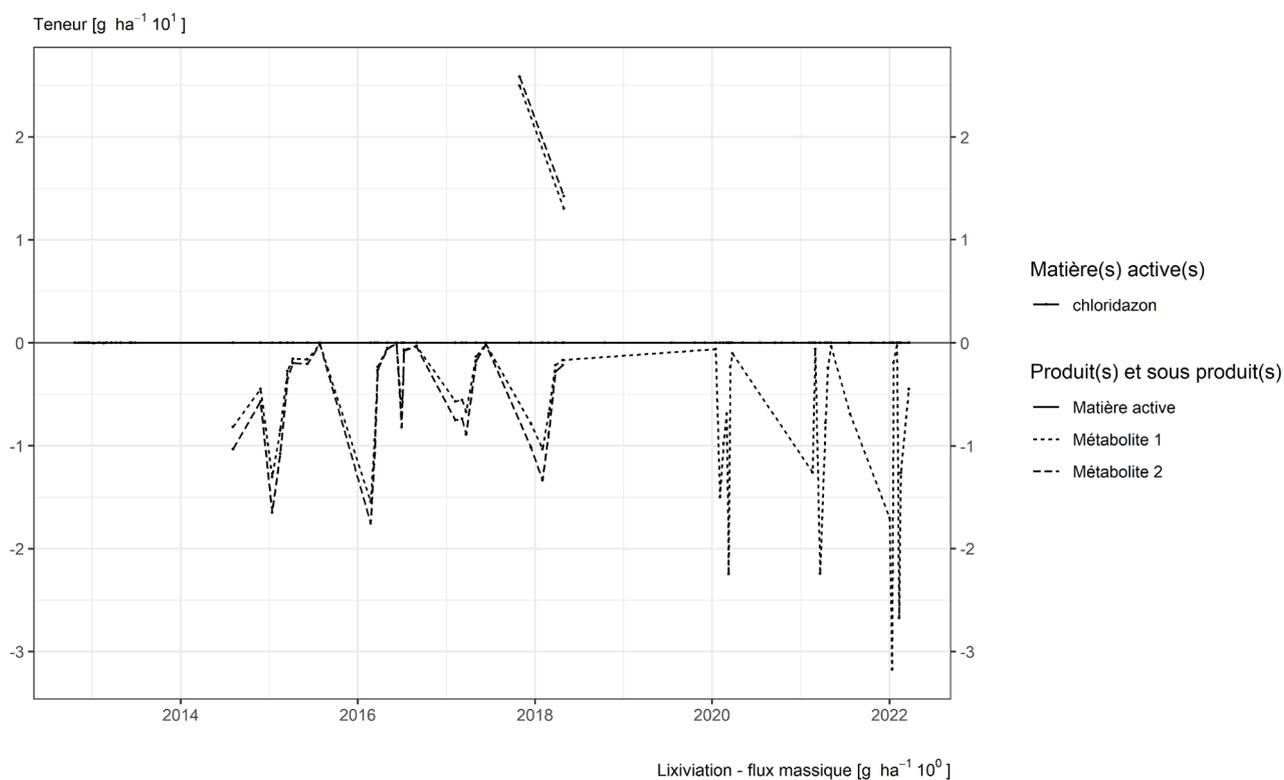


Figure 29. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.

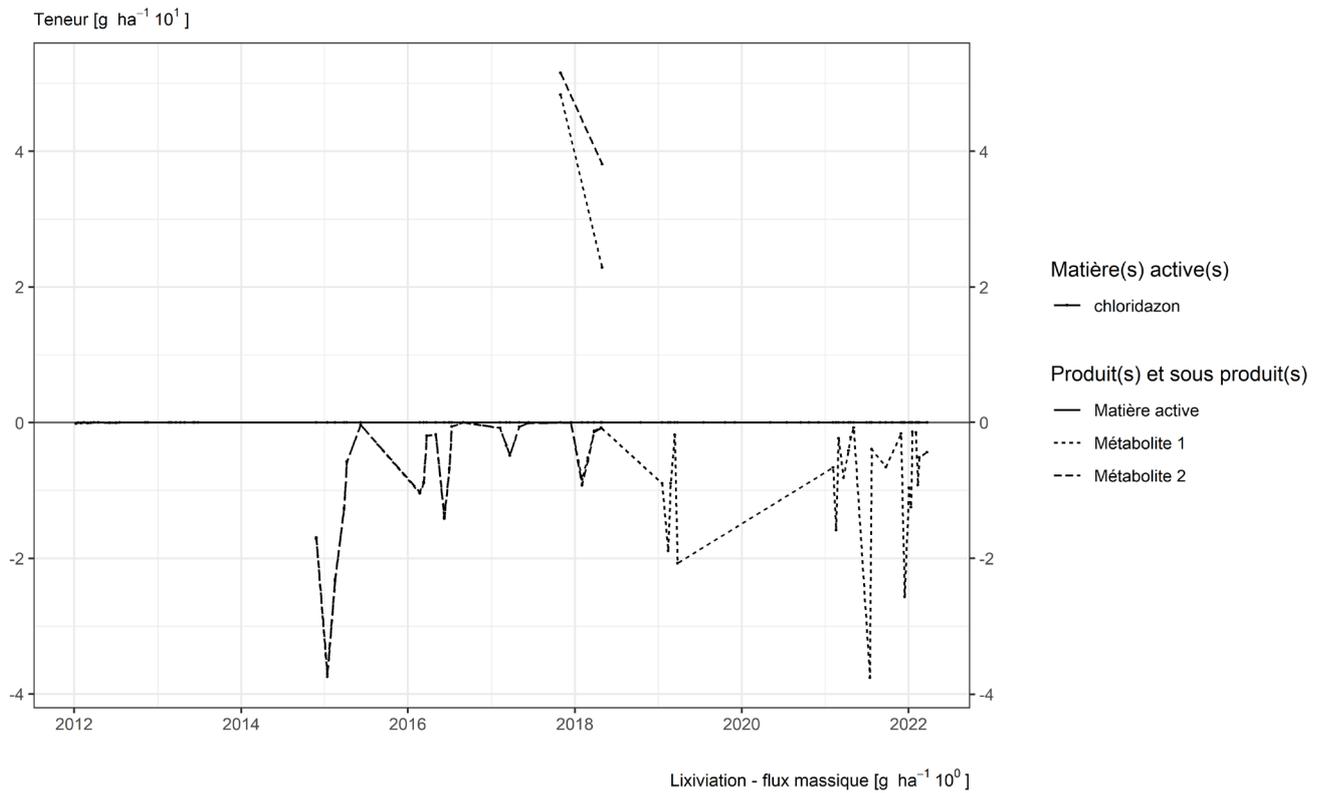


Figure 30. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.

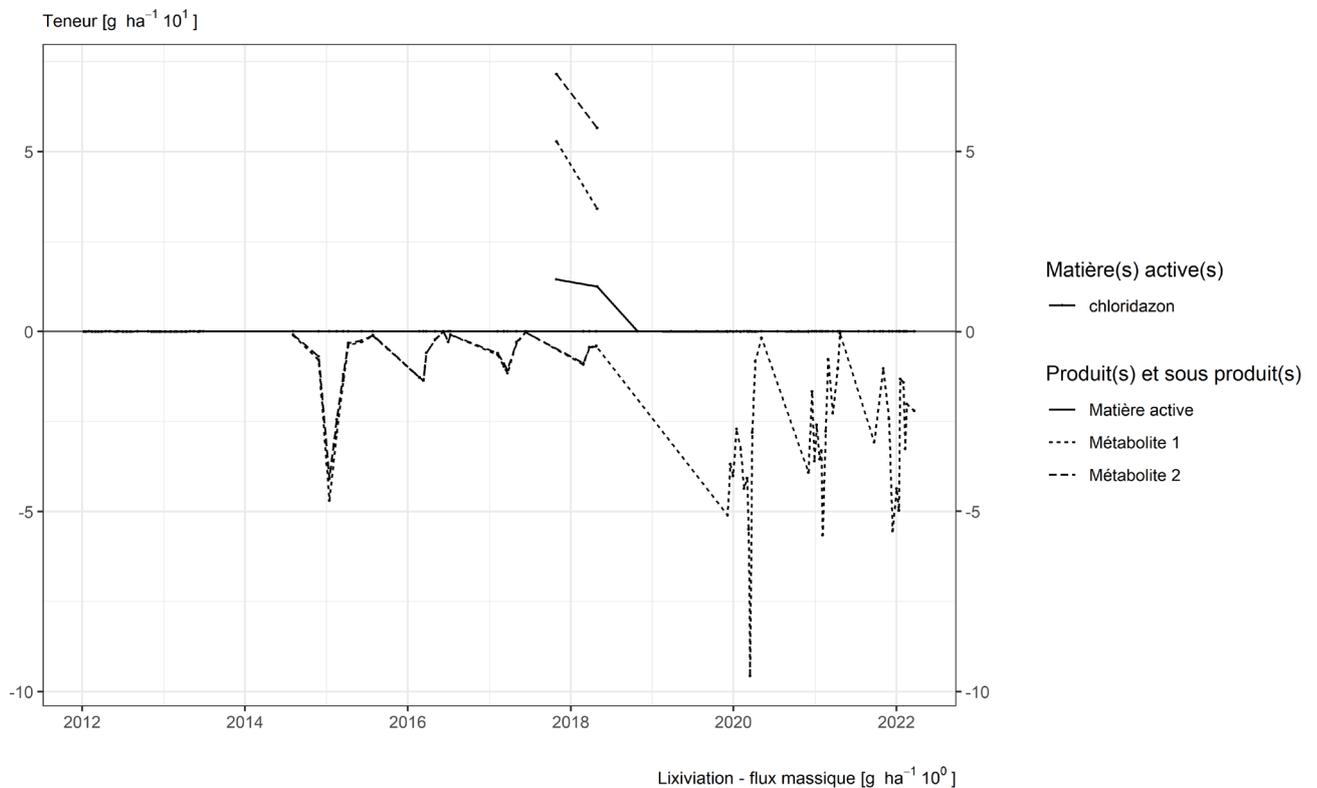


Figure 31. Applications et suivi de la teneur en chloridazon, en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) et en methyl-desphenyl-chloridazon (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.

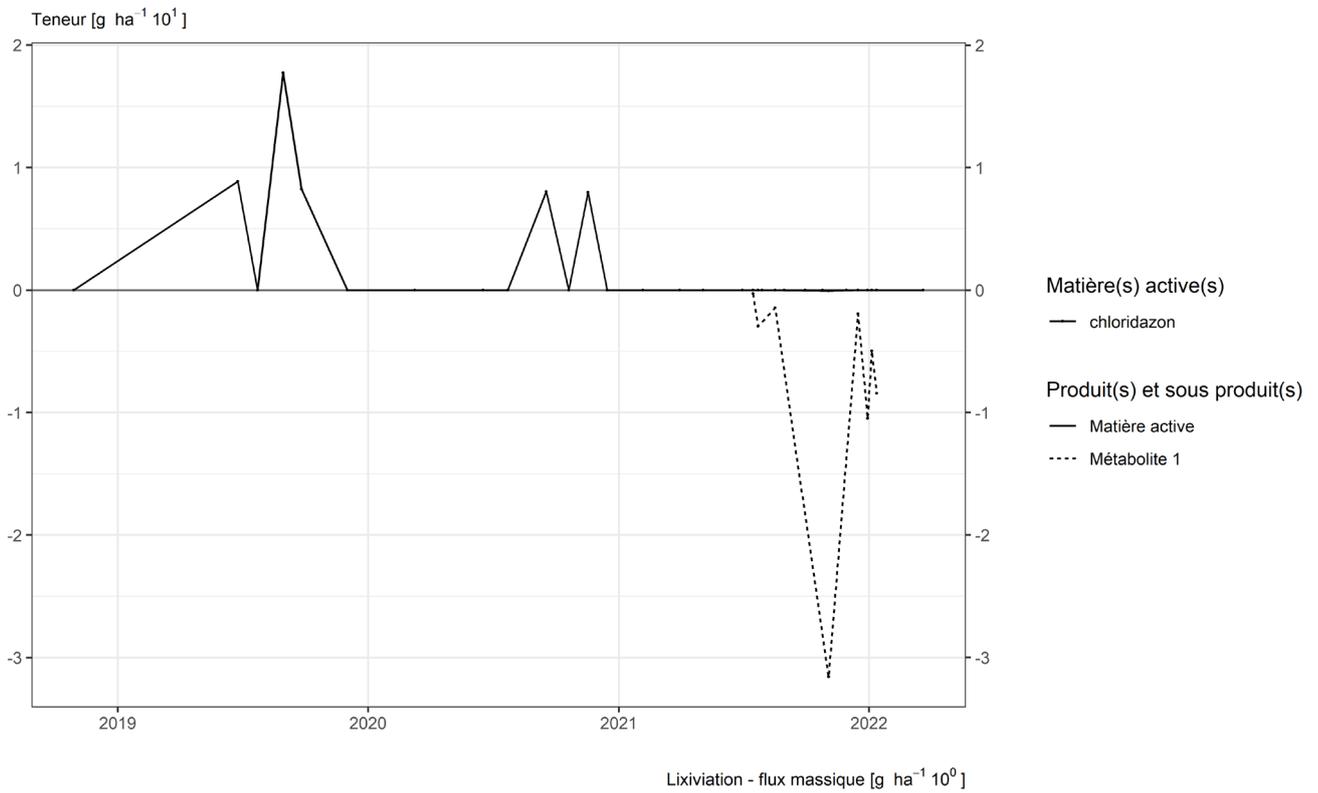


Figure 32. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR4.

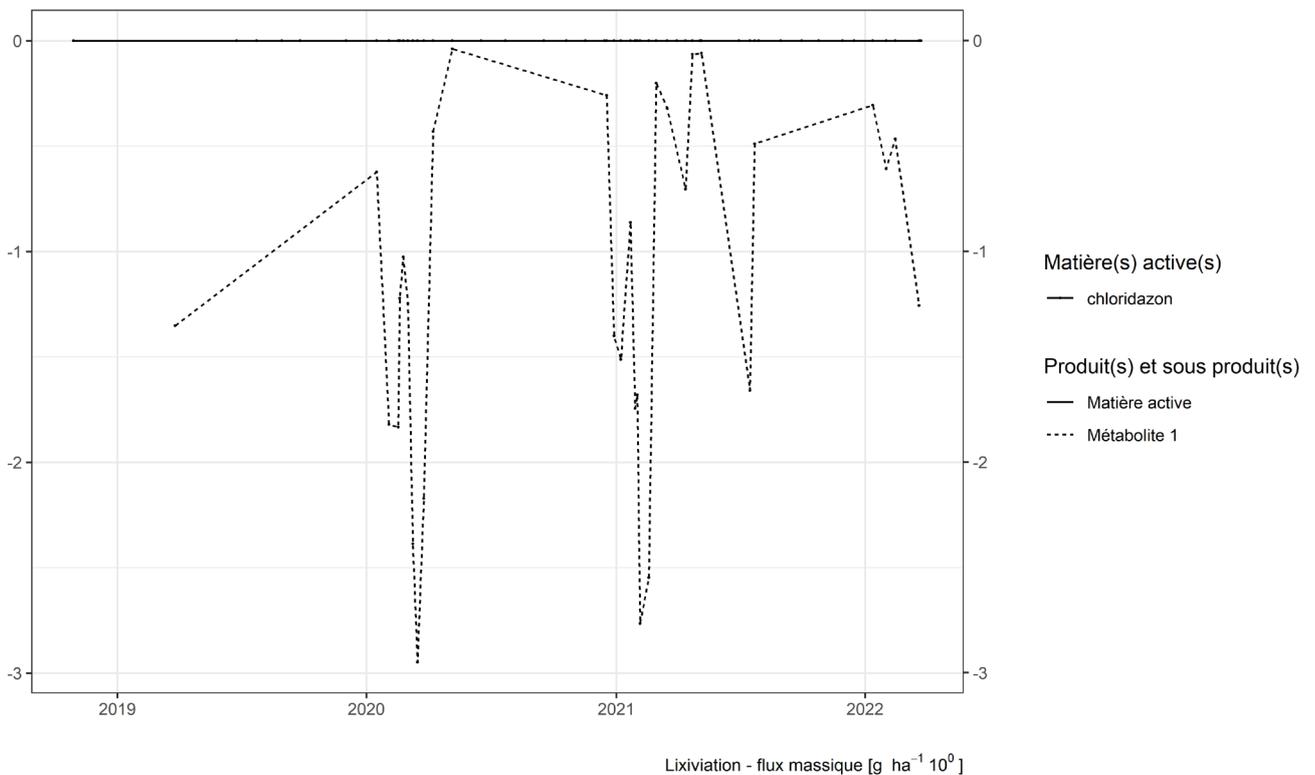


Figure 33. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

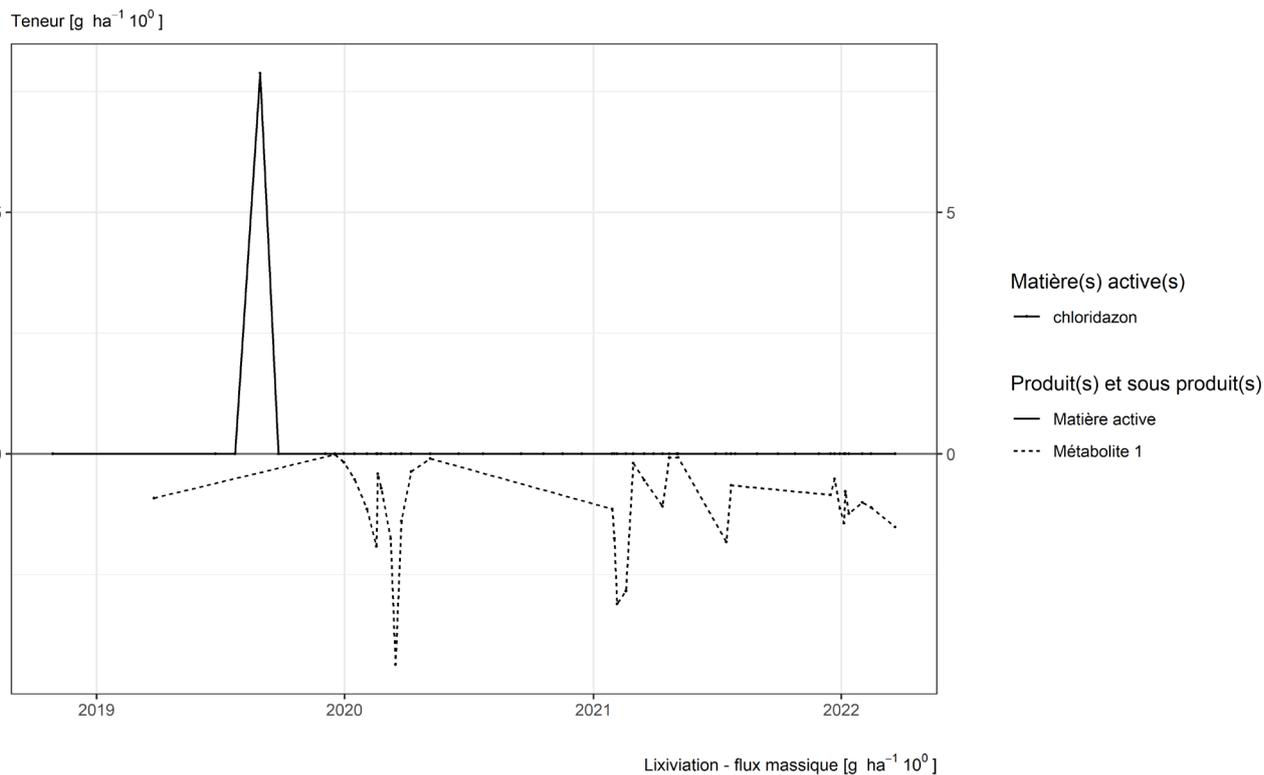


Figure 34. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

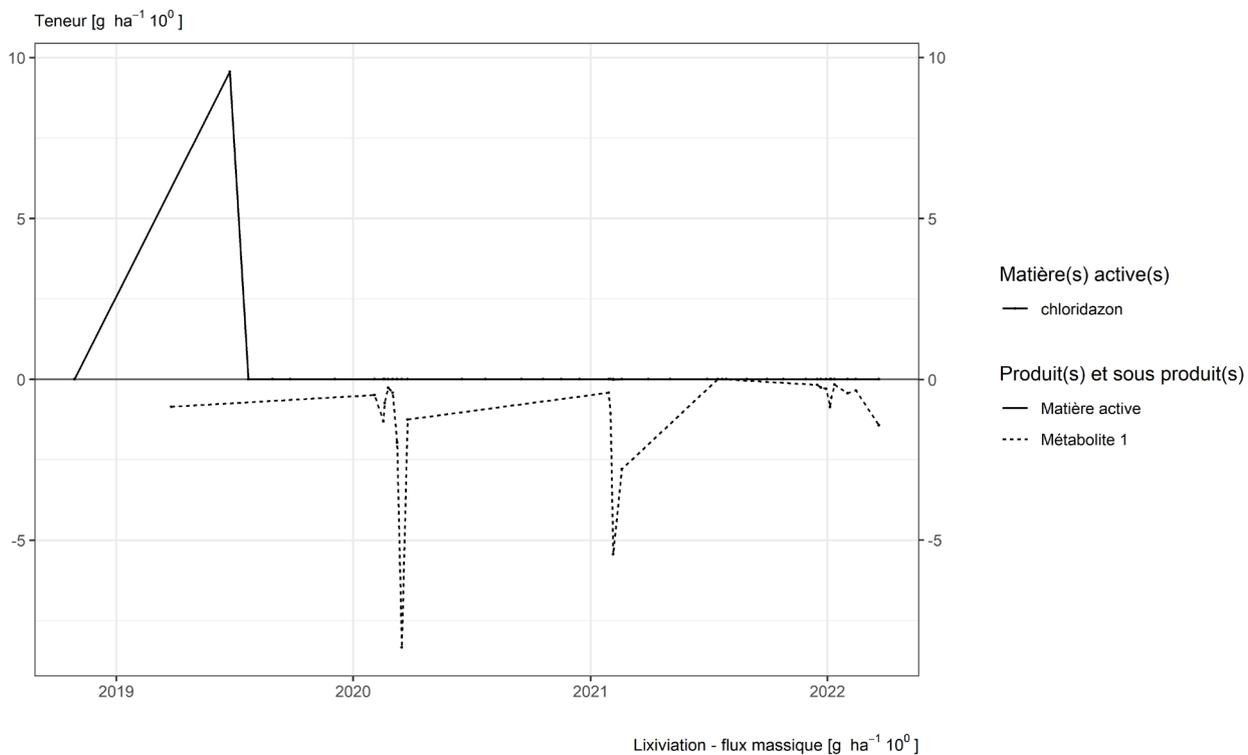


Figure 35. Applications et suivi de la teneur en chloridazon et en desphenyl-chloridazon (métabolite 1) dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.6. Clomazone

La clomazone est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de betterave, légumineuse, carotte dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 36 à 42) sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'un peu plus de 50 g/ha réalisé en mai 2019 conduit en juillet à une concentration dans le sol de près de 38 g/ha, soit une augmentation de 18 g/ha en comparaison au résultat analytique qui précède l'apport. Un apport d'un peu plus de 70 g/ha fin avril 2021 conduit en juillet à une concentration de 21 g/ha, soit une augmentation de 14 g/ha en comparaison au résultat analytique qui précède l'apport ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport d'un peu plus de 70 g/ha réalisé en mai 2020 conduit en juillet à une concentration dans le sol de l'ordre de 500 g/ha ; cette valeur n'est pas expliquée. En mai 2021, un apport d'une cinquantaine de grammes par hectare conduit en juillet à une concentration dans le sol d'une vingtaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Sole 4, un apport d'un peu plus de 60 g/ha réalisé en mai 2020 laisse en juillet dans le sol une concentration de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'environ 25 g/ha réalisé en mai conduit à une concentration dans le sol de l'ordre de quelques grammes par hectare au cours de l'été qui suit.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, l'apport d'un peu plus de 50 g/ha réalisé en mai 2019 laisse, en automne, une concentration dans le sol de l'ordre d'une dizaine de grammes par hectare. Le même ordre de grandeur est observé pour l'apport réalisé au printemps 2021 ;
- sur la parcelle Bovenistier, les apports réalisés en mai 2020 et mai 2021 laissent en automne de la même année une concentration dans le sol de l'ordre la dizaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Sole 4, l'apport d'un peu plus de 60 g/ha réalisé mai 2020 conduit à une concentration de quelques grammes par hectare à l'automne de la même année. Les deux apports totalisant un peu plus de 80 g/ha réalisés au printemps 2019 ne sont plus décelés à l'automne de la même année ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement (environ 25 g/ha) réalisé au printemps 2021 n'est plus décelé dans le sol à partir de l'automne qui suit le traitement.

Dans les deux années qui suivent un apport de cette matière active, l'apport n'est plus décelé dans le sol (parcelles Sol-Résidus).

EAU

Cette matière active n'a jamais été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

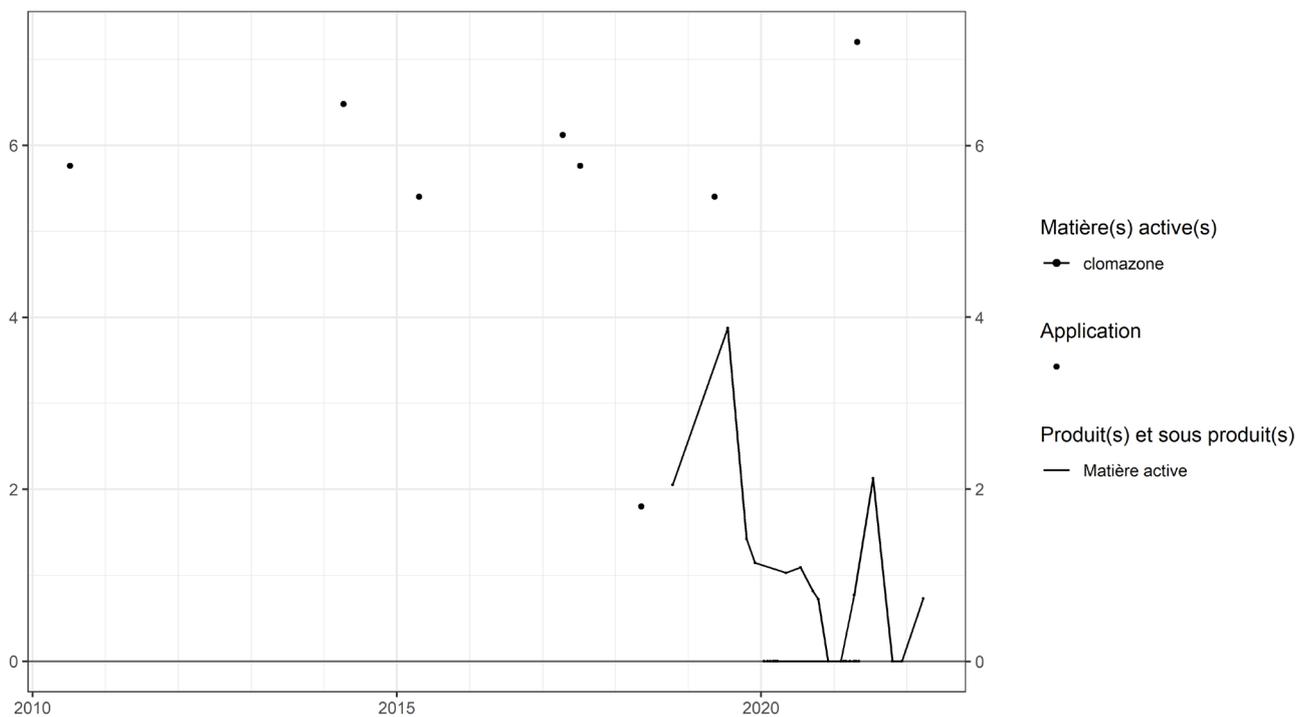


Figure 36. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

Teneur [g ha⁻¹ 10²]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

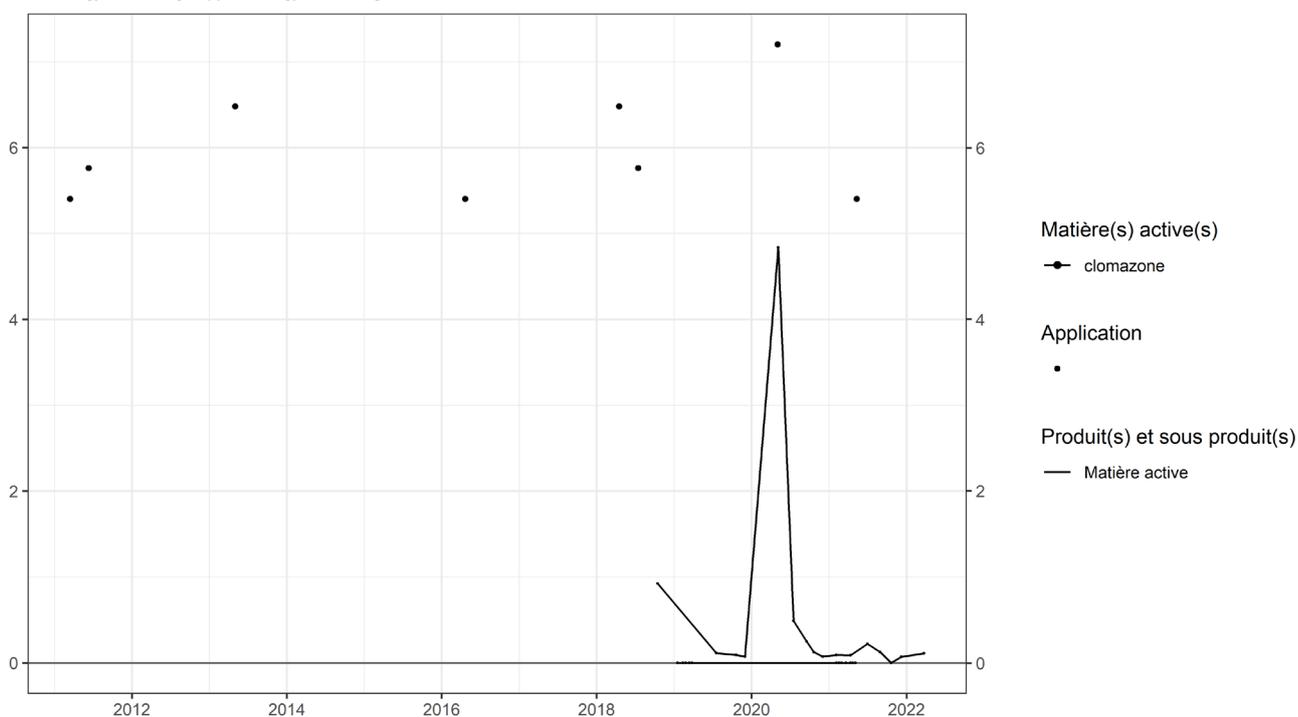


Figure 37. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Bovenistier.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

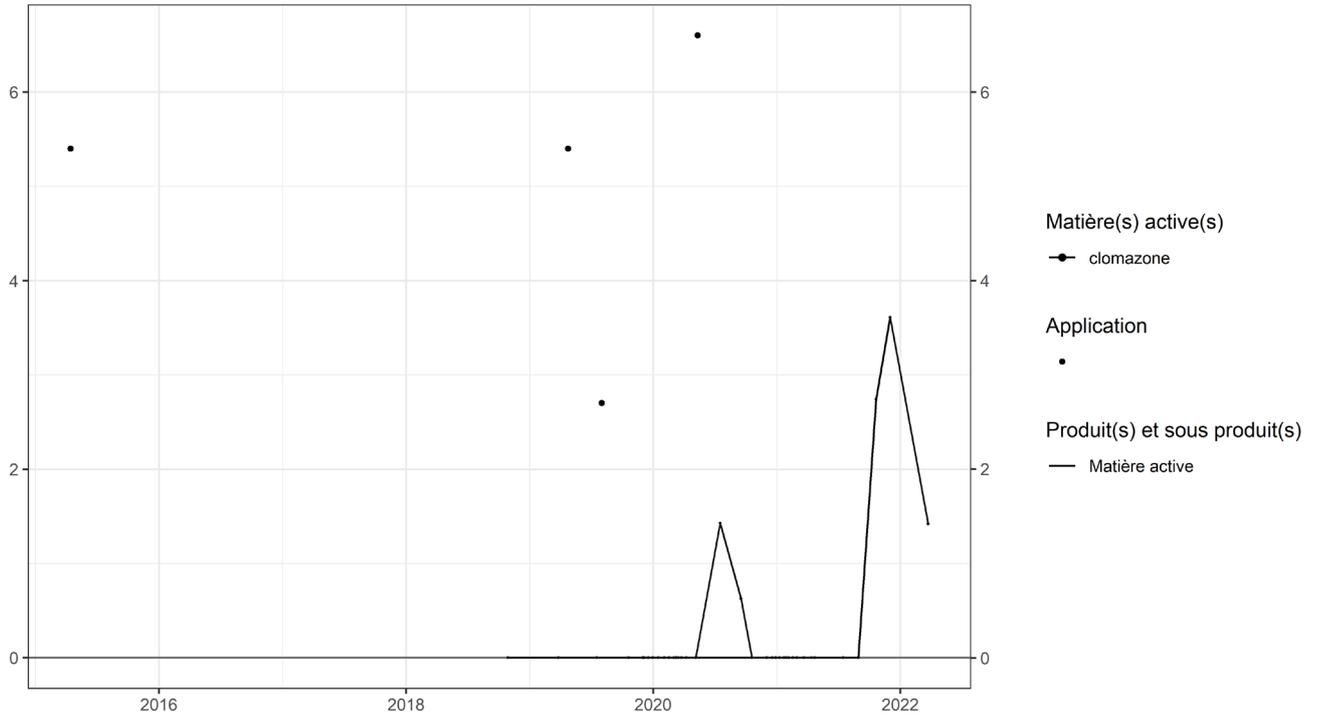


Figure 38. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle Sole 4.

Teneur [g ha⁻¹ 10⁰]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

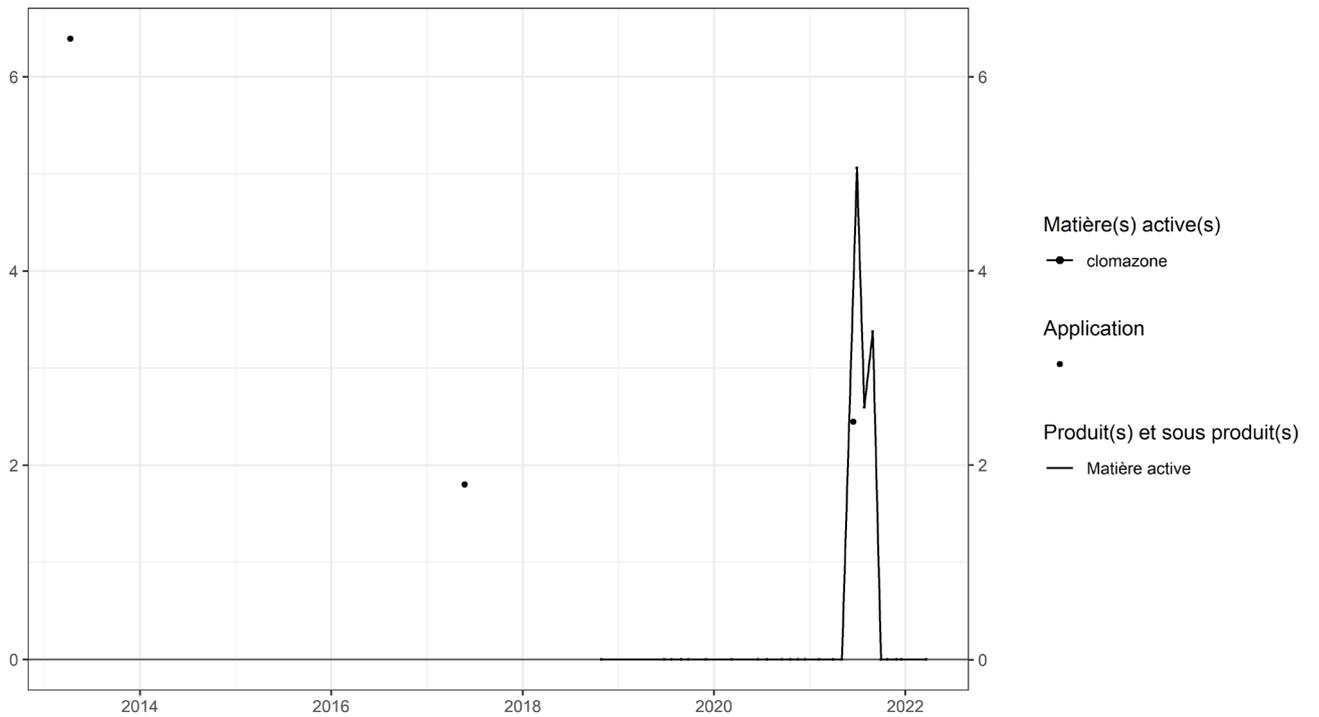


Figure 39. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR4.

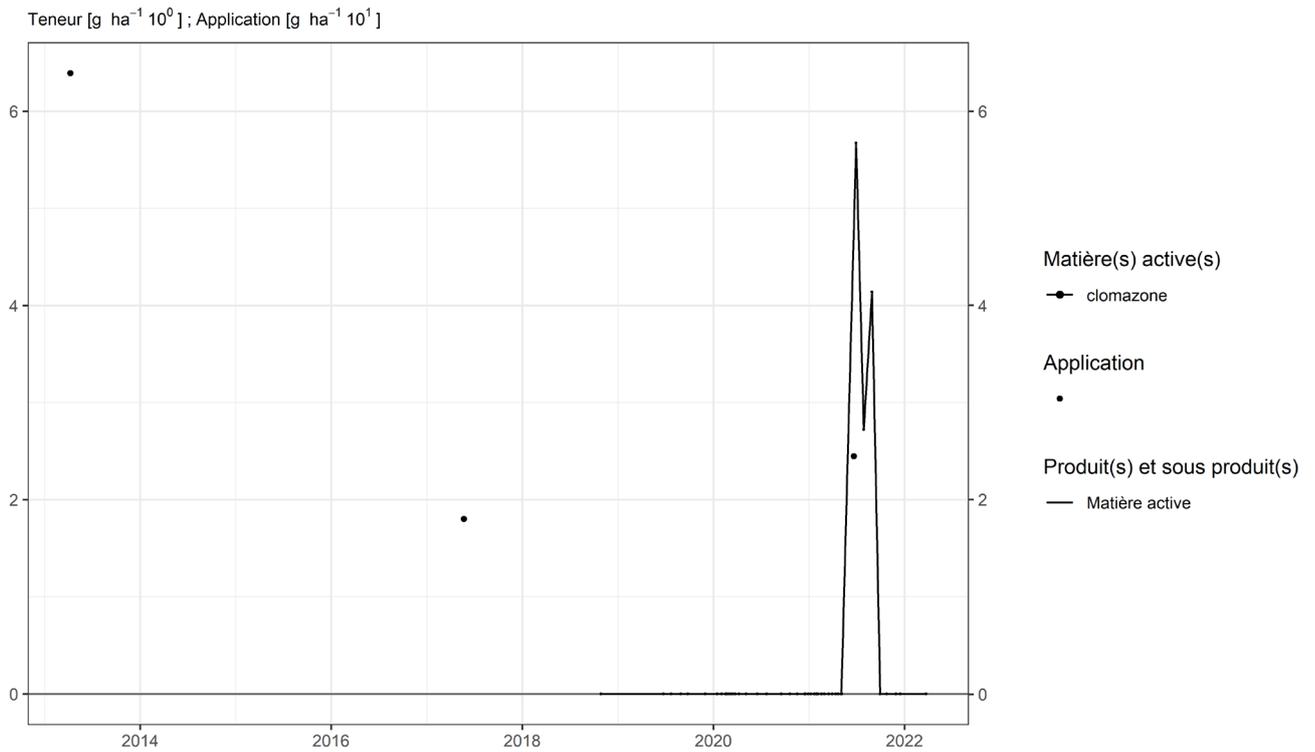


Figure 40. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR8.

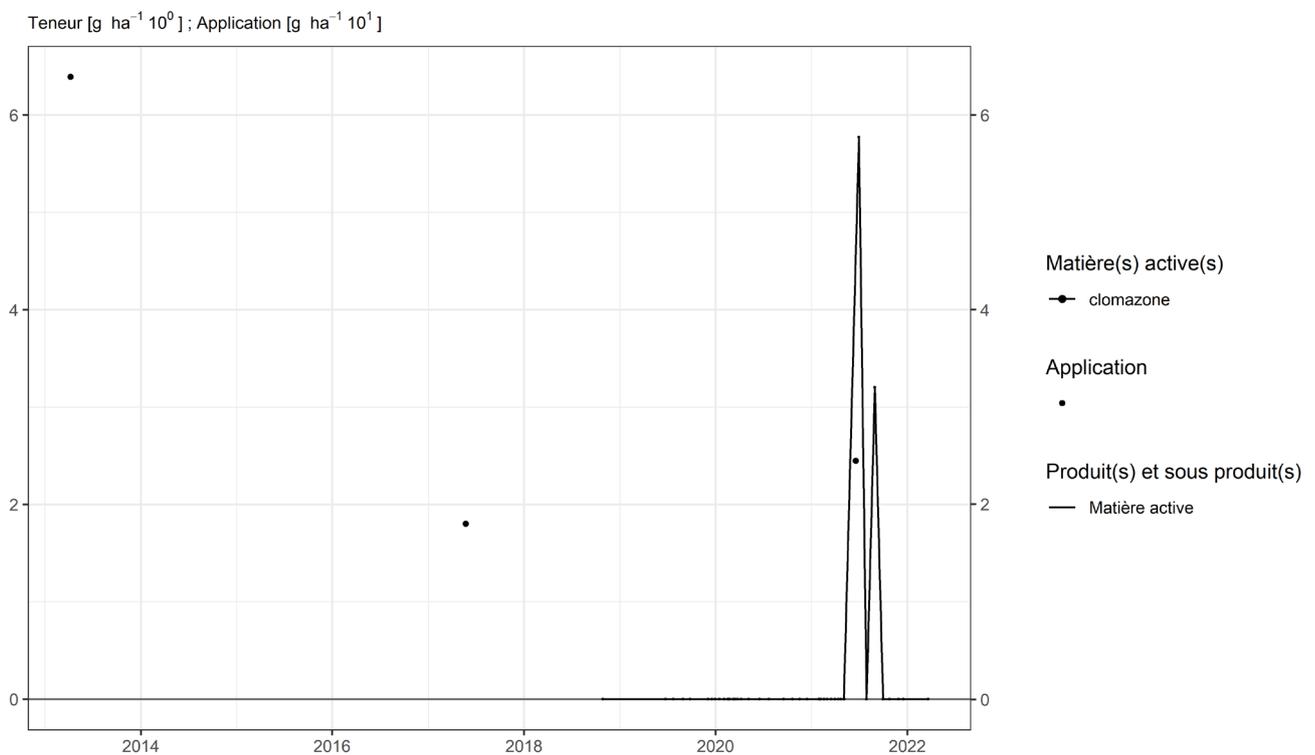


Figure 41. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR12.

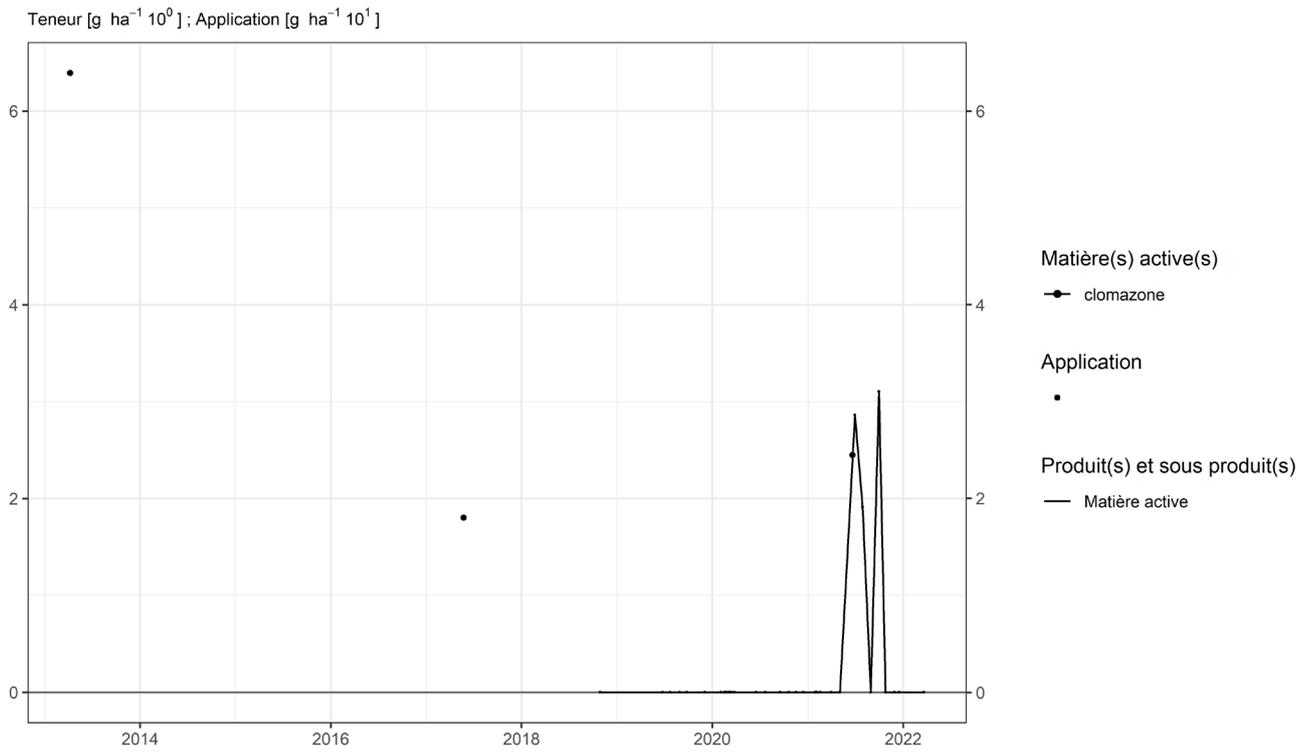


Figure 42. Applications et suivi de la teneur en clomazone dans le sol de la parcelle SR16.

4.7. Clothianidine

La clothianidine est un insecticide d'enrobage de semences de betterave.

SOL

Sur la parcelle Haute Bova, cette matière active est présente dans le sol à une concentration décroissante de l'ordre d'une dizaine de grammes par hectare (figure 43). Des betteraves ont été cultivées sur cette parcelle en 2006, 2010, 2014 et 2018.

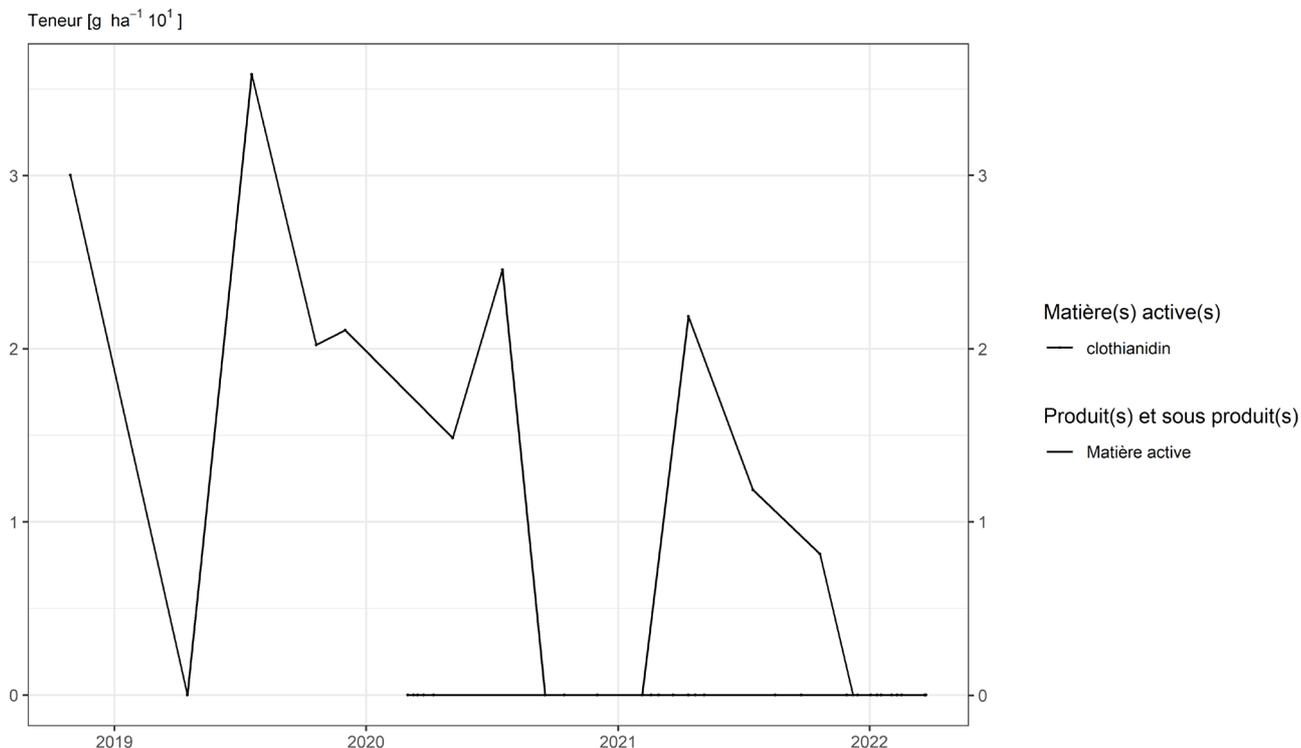


Figure 43. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Haute Bova.

Sur la parcelle Chemin de fer, cette matière active est présente dans le sol à une concentration décroissante de l'ordre d'une dizaine grammes par hectare (figure 44). Des betteraves ont été cultivées sur cette parcelle en 2002 et 2018.

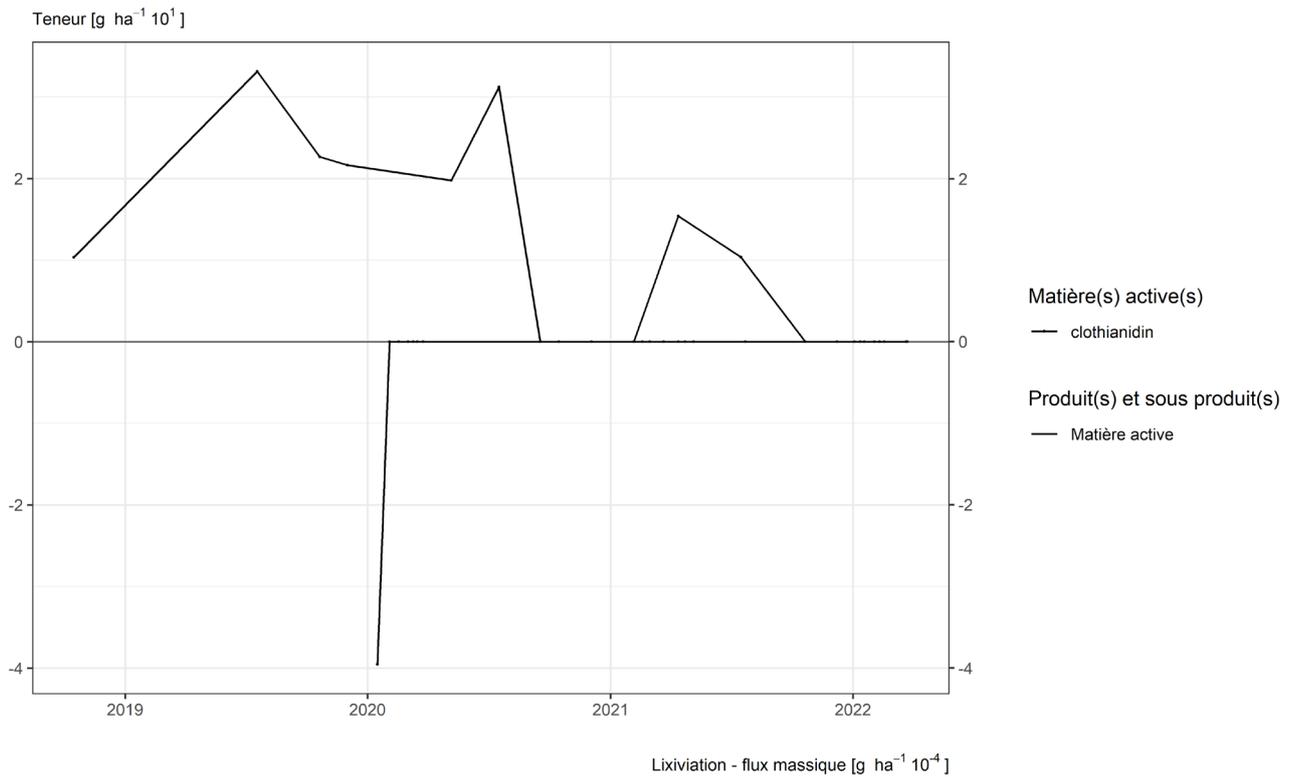


Figure 44. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

Sur la parcelle Bovenistier, cette matière active est présente dans le sol à une concentration décroissante de l'ordre du gramme par hectare (figure 45). Des betteraves ont été cultivées sur cette parcelle en 2007, 2012 et 2019 (sans clothianidine).

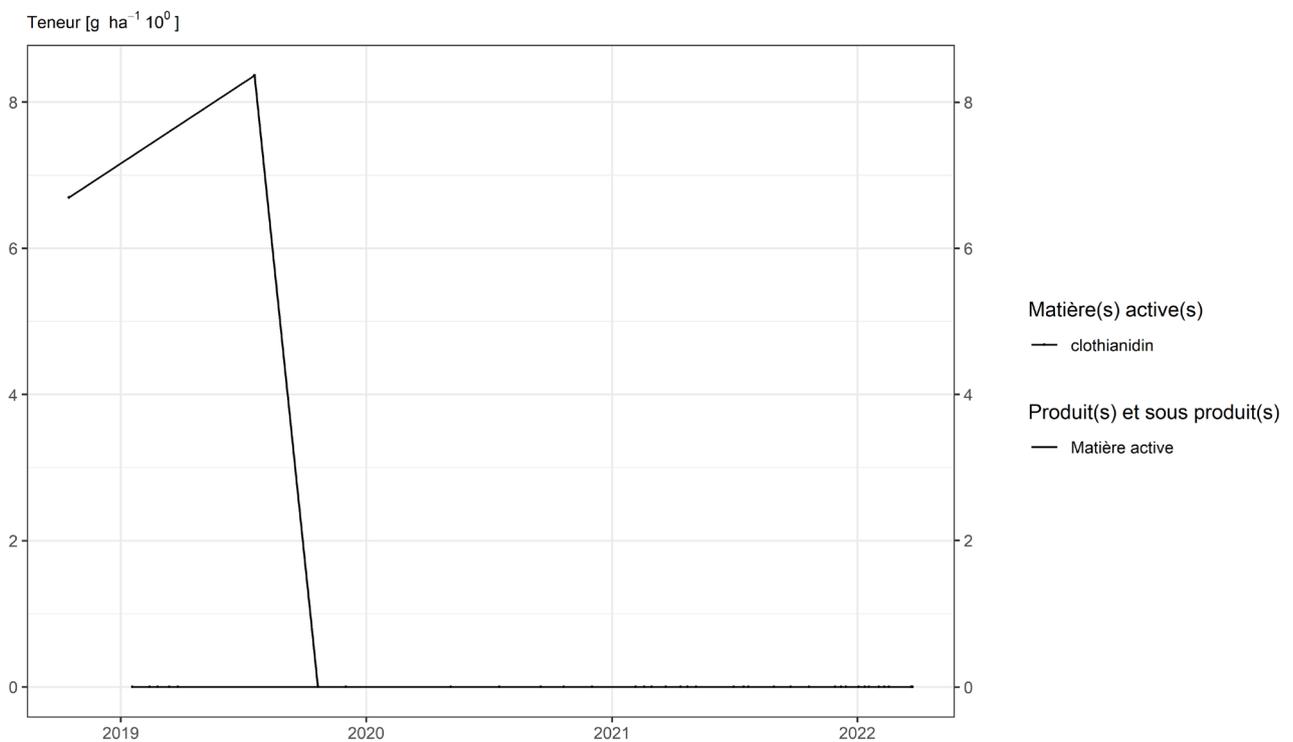


Figure 45. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Bovenistier.

Sur la parcelle Sole 4, cette matière active est présente dans le sol à une concentration décroissante de l'ordre du gramme par hectare (figure 46). Des betteraves ont été cultivées sur cette parcelle en 2002 et 2017.

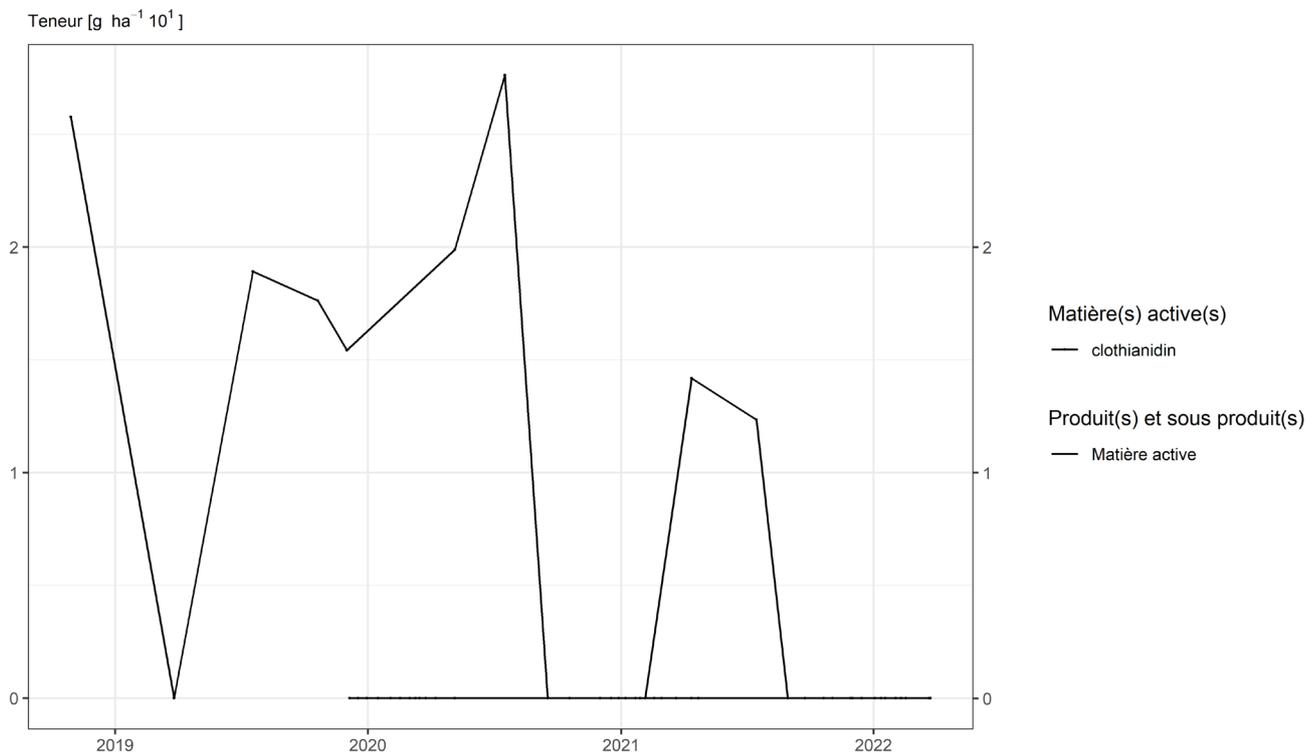


Figure 46. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle Sole 4.

Sur les parcelles Sol-Résidus, cette matière active est présente dans le sol à une concentration décroissante de l'ordre de la quinzaine de grammes par hectare (figure 46). Des betteraves ont été cultivées sur cette parcelle en 2007, 2017 et 2021.

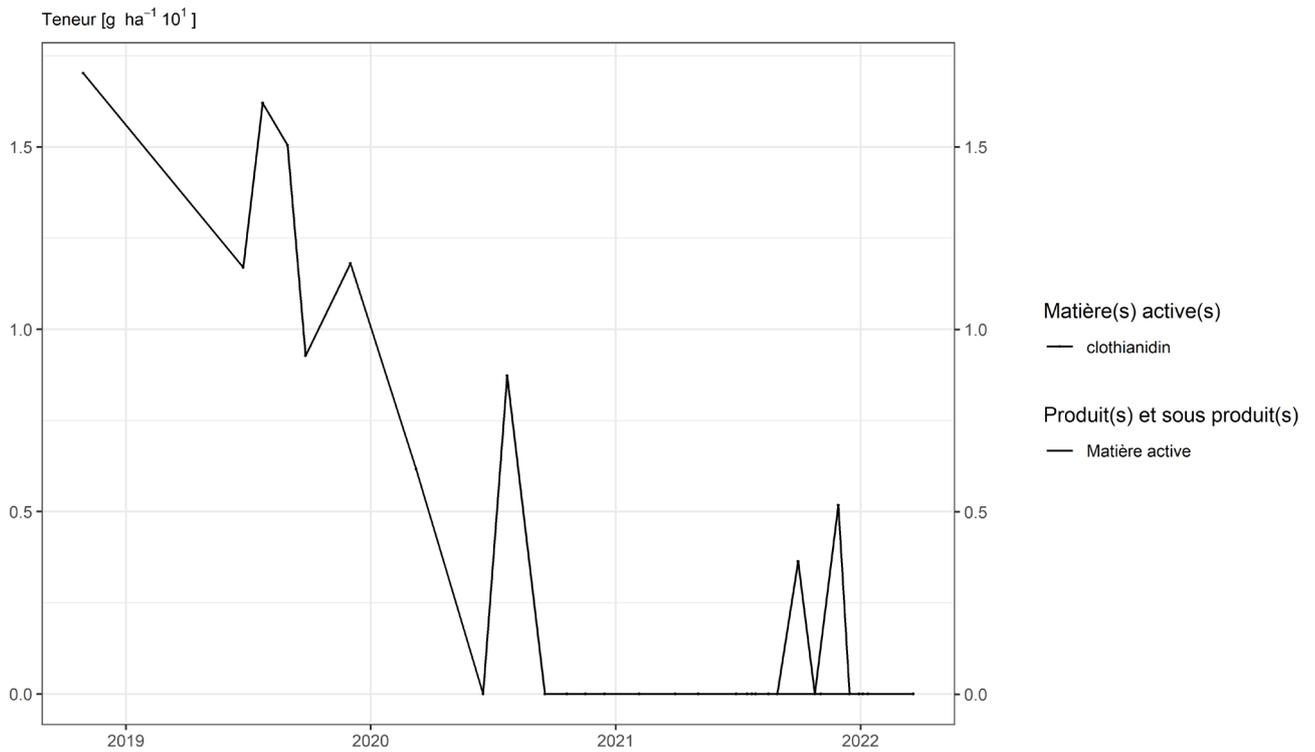


Figure 47. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR4.

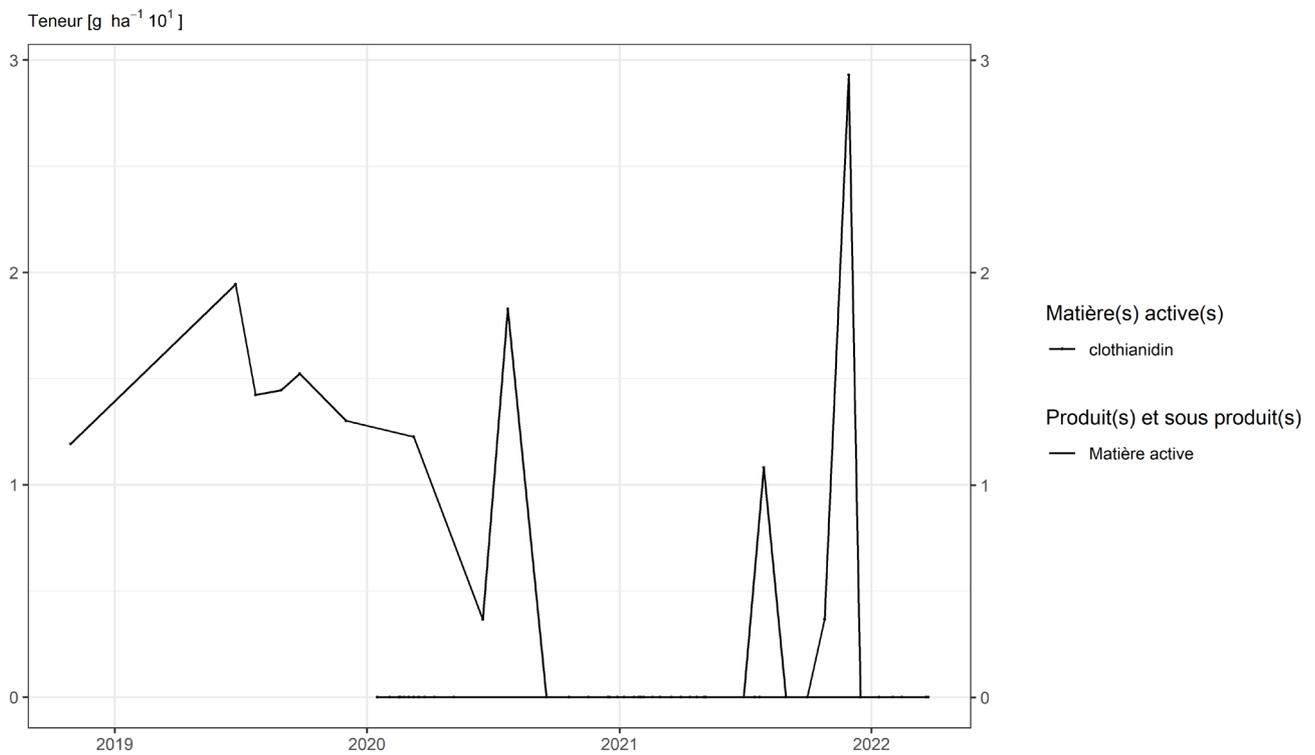


Figure 48. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR8.

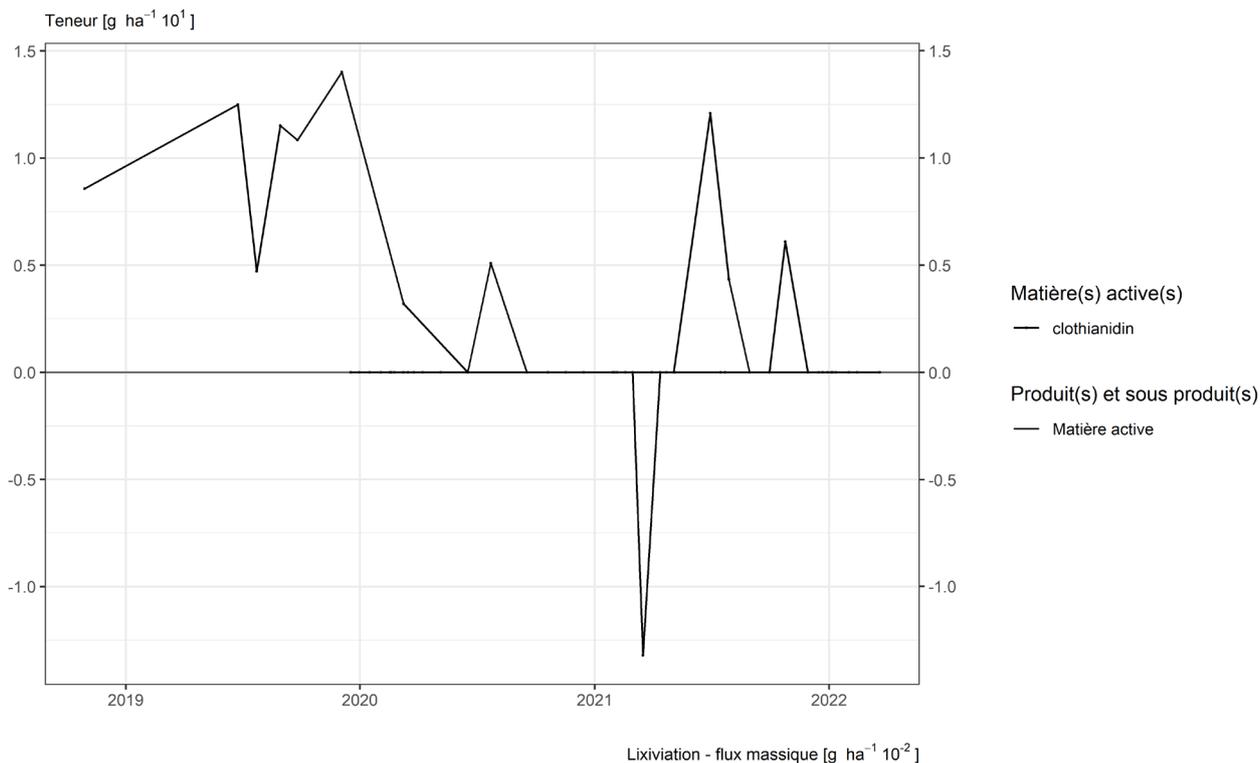


Figure 49. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR12.

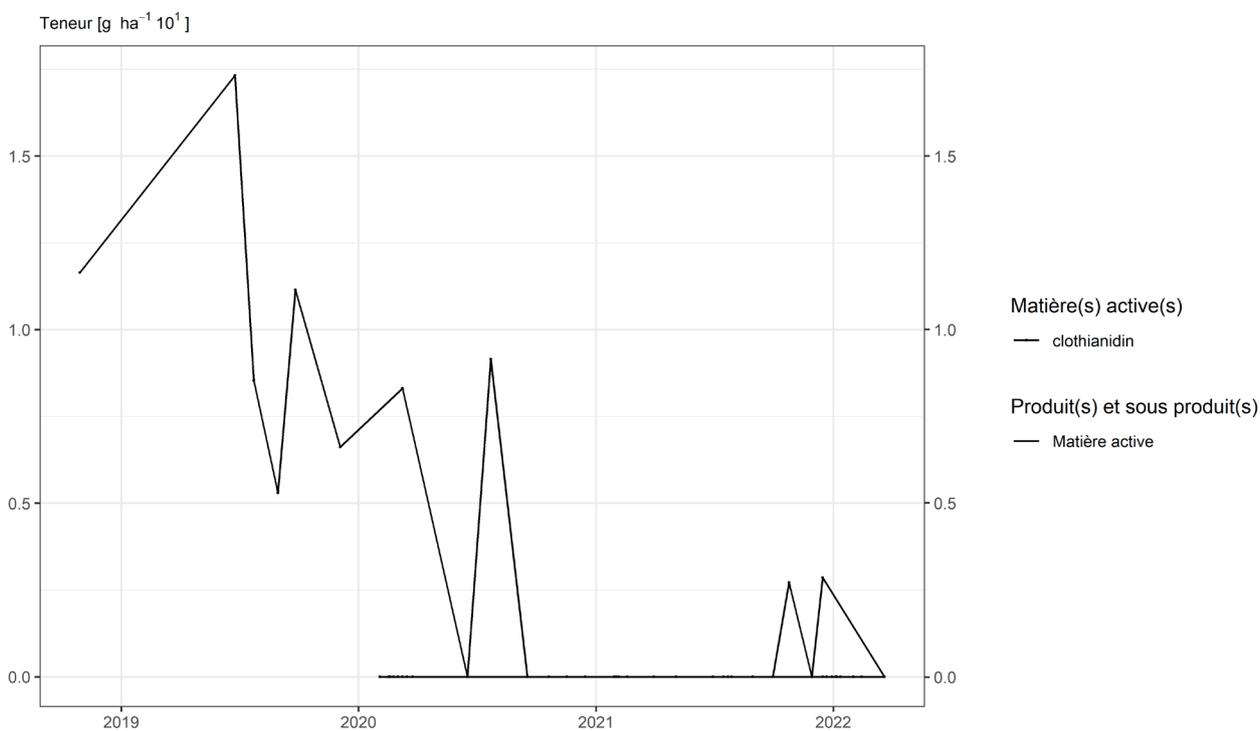


Figure 50. Applications et suivi de la teneur en clothianidine dans le sol de la parcelle SR16.

EAU

A deux exceptions près, cette matière active n'a pas été détectée dans les échantillons d'eau collectés à l'exutoire des lysimètres.

4.8. Desmediphame

Le desmediphame est un herbicide utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'un peu plus de 300 g/ha a été réalisé au printemps 2019. Deux jours après l'application, la concentration dans le sol est de l'ordre de 200 g/ha. Quelques semaines plus tard, elle est en moyenne de l'ordre d'une centaine de gramme par hectare.

Quelques mois après un traitement, l'observations (figure 51) est la suivante : sur la parcelle Chemin de fer, quatre apports totalisant un peu plus de 400 g/ha sont réalisés au printemps 2018. En automne de la même année, la concentration dans le sol est d'un peu moins de 20 g/ha.

Quelques années après le traitement (figures 52 à 55), les observations menées sur les parcelles Sol-Résidus indiquent qu'après un apport d'un peu plus de 150 g/ha au printemps 2017, la substance est présente à une concentration d'environ 1 g/ha en 2019 et n'est plus décelée en 2020.

La même conclusion peut être faite sur la parcelle Chemin de fer.

EAU

Cette matière active a été appliquée sur la parcelle Haute Bova en 2014. Elle n'a jamais été observée dans l'eau collectée à l'exutoire de ce lysimètre et, à l'époque, il n'y avait pas encore de suivi dans le sol.

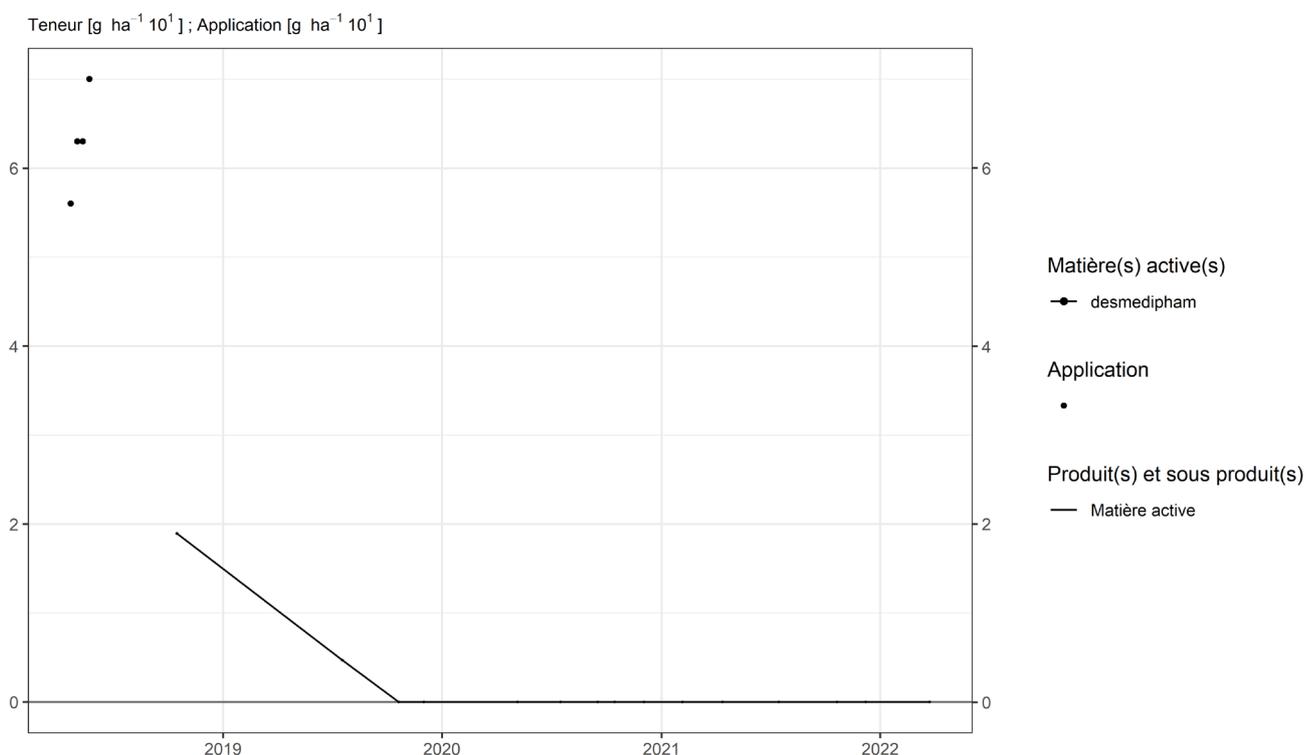


Figure 51. Applications et suivi de la teneur en desmediphame dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

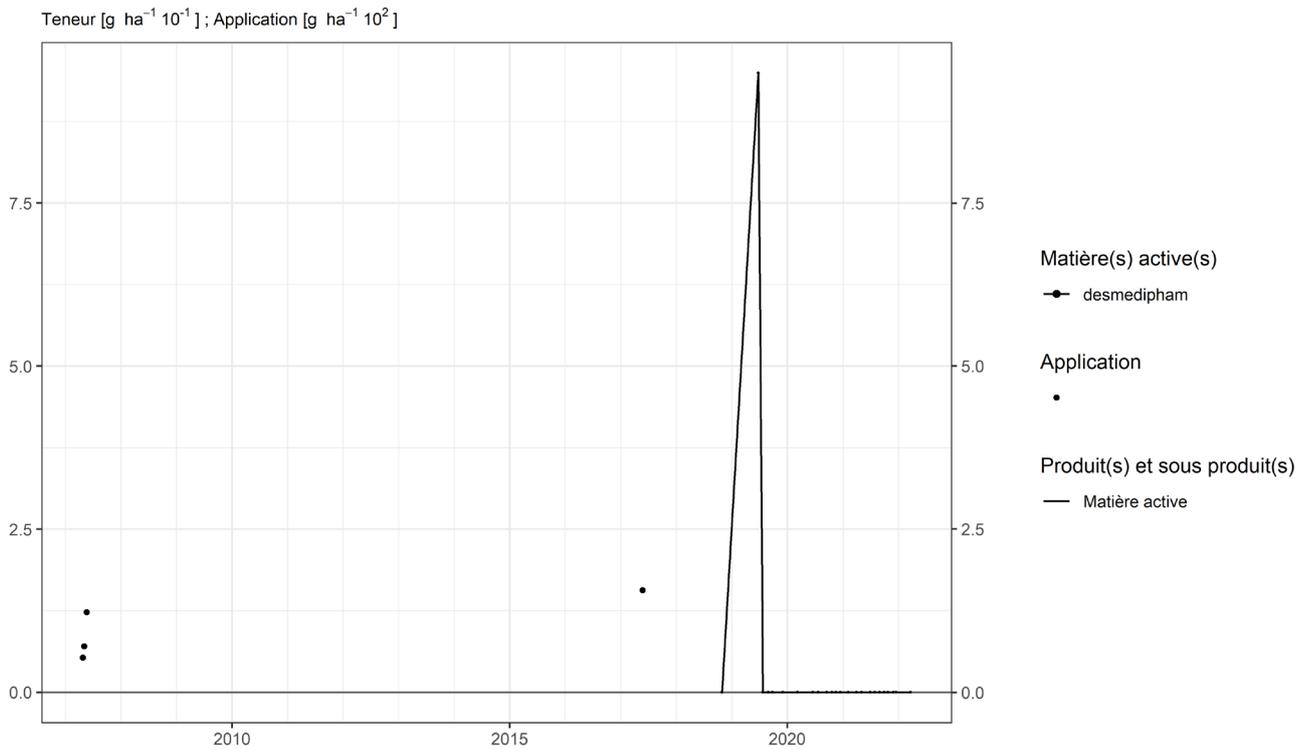


Figure 52. Applications et suivi de la teneur en desmedipham dans le sol de la parcelle SR4.

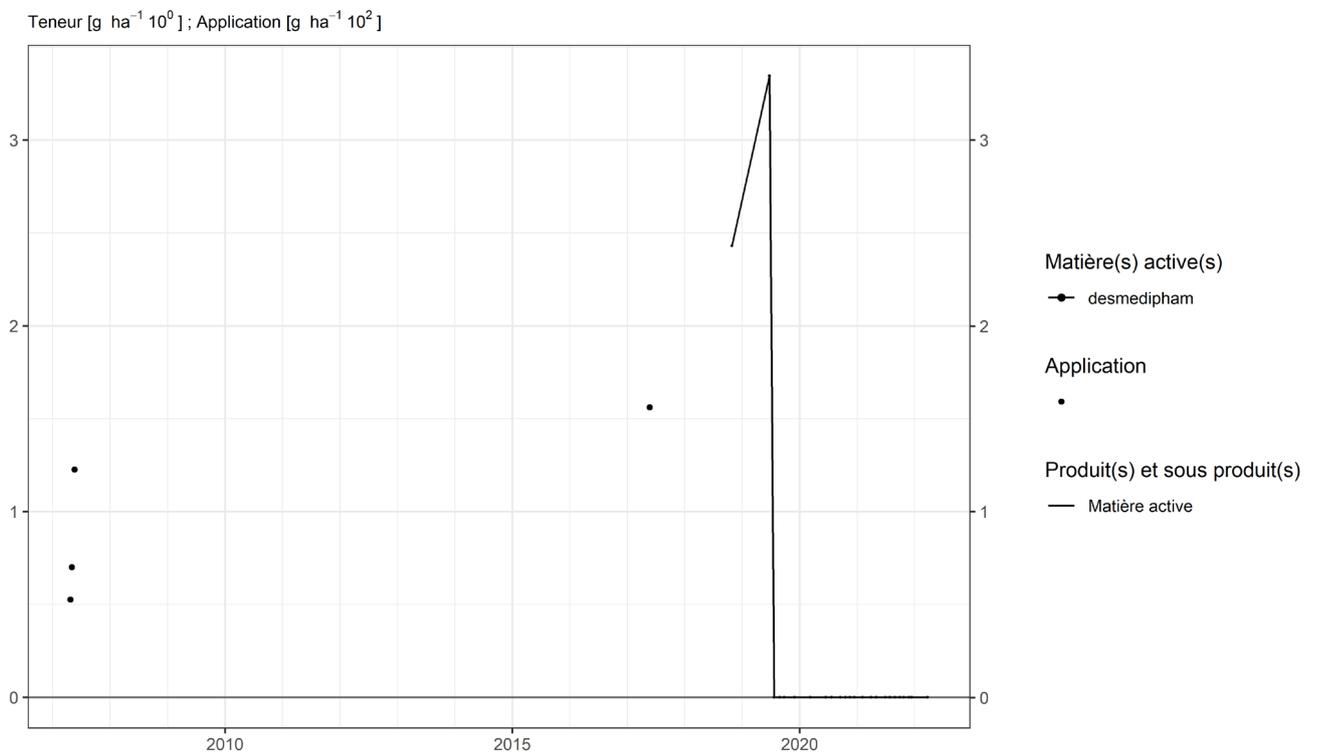


Figure 53. Applications et suivi de la teneur en desmedipham dans le sol de la parcelle SR8.

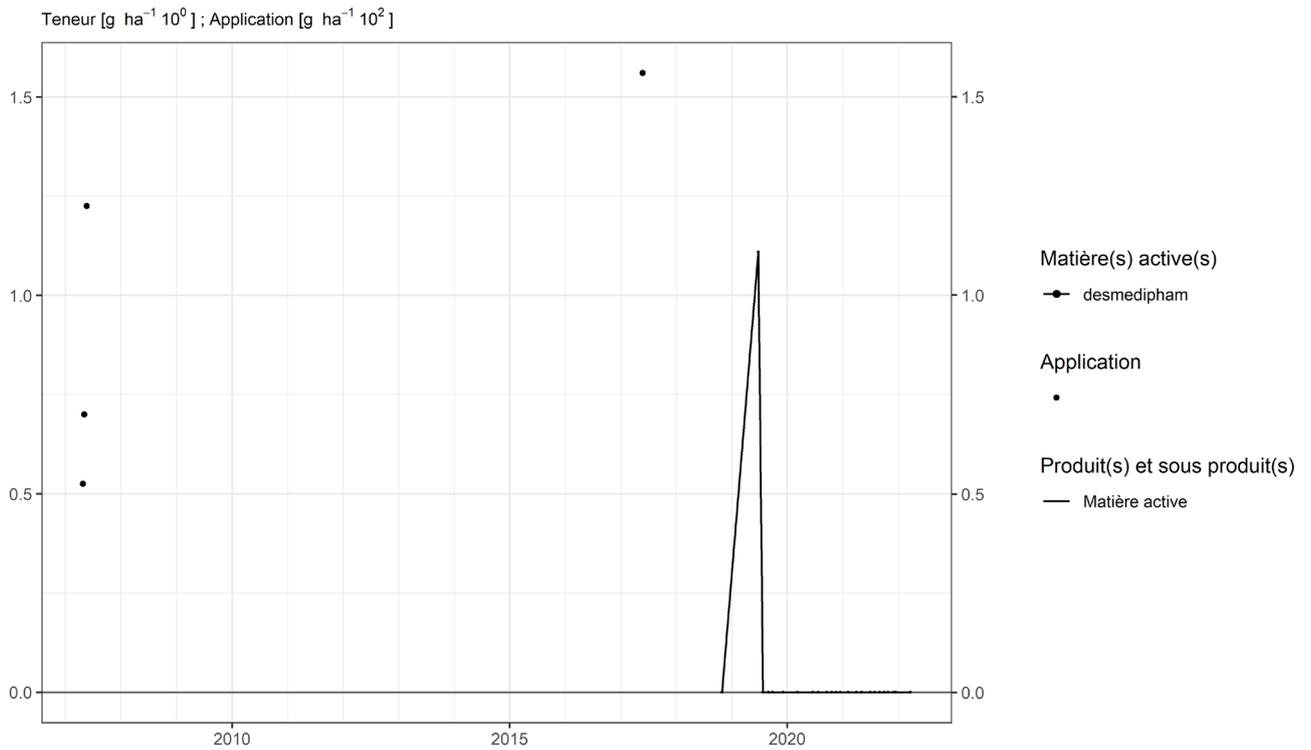


Figure 54. Applications et suivi de la teneur en desmedipham dans le sol de la parcelle SR12.

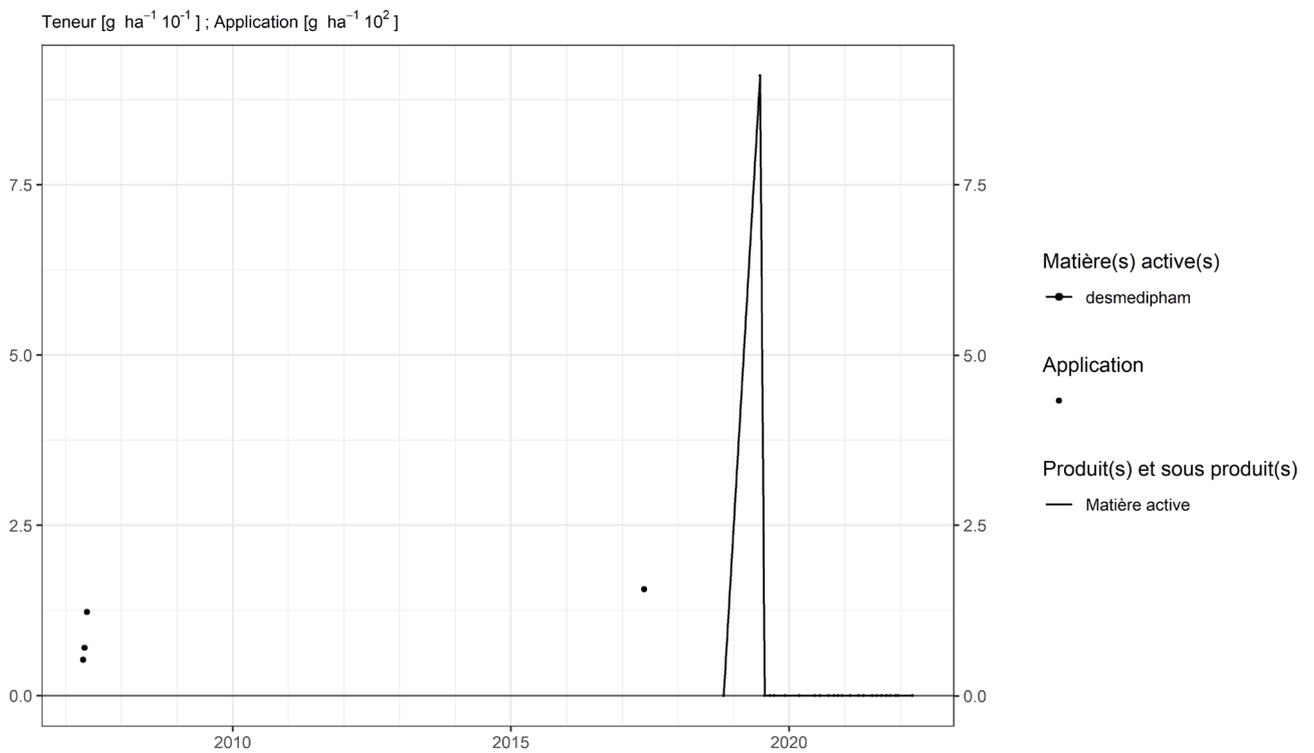


Figure 55. Applications et suivi de la teneur en desmedipham dans le sol de la parcelle SR16.

4.9. Difenoconazole

Le difenoconazole est un fongicide essentiellement utilisé sur culture de betterave ou pomme de terre dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 56 à 63) sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport d'un peu plus de 100 g/ha en été 2020 conduit à une augmentation de la concentration dans le sol d'un peu plus de 30 g/ha ;
- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'un peu moins de 150 g/ha en été 2019 conduit à une augmentation de la concentration dans le sol d'un peu plus de 100 g/ha ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport de 100 g/ha en été 2019 a conduit à une augmentation d'une dizaine de g/ha observée trois mois après le traitement. En 2020, un apport de 125 g/ha conduit à une concentration équivalente un mois et demi après l'application ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, une application de 125g/ha en été 2021 conduit à une augmentation de la concentration dans le sol d'une vingtaine de g/ha pour trois des quatre microparcelles et d'une centaine de g/ha pour la quatrième (SR12).

A court terme (quelques semaines), un apport d'une centaine de grammes de matière active par hectare engendre un résidu équivalent à quelques dizaines de gramme par hectare dans le sol, voire, dans deux des huit cas, à une (augmentation de) concentration dans le sol presque équivalente à l'apport.

Une ou plusieurs années après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport d'un peu plus de 50 g/ha en été 2018 conduit à une concentration dans le sol de moins de 20 g/ha deux ans après le traitement ;
- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'un peu moins de 125 g/ha en été 2014 conduit à une concentration dans le sol d'un peu plus de 50 g/ha quatre ans après le traitement ;
- sur la parcelle Bovenistier, deux apports d'environ 120 g/ha réalisés en été 2012 et 2013 conduisent à une concentration de moins de 10 g/ha six ans après l'apport ;
- sur la parcelle Sole 4, un apport de 95 g/ha en été 2017 conduit à une concentration d'une dizaine de grammes par hectare quatre ans après le traitement ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, une application d'un peu plus de 100 g/ha ont été apportée au printemps 2017. Quatre ans plus tard, la concentration dans le sol est de l'ordre de 10 g/ha.

A plus long terme (environ quatre ans après l'apport), la concentration dans le sol est décroissante et de l'ordre de 10 g/ha, à l'exception de la parcelle Chemin de fer où la concentration (une seule observation) est de l'ordre de 50 g/ha avec néanmoins un apport initial plus important.

EAU

Cette matière active n'a jamais été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des huit lysimètres.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

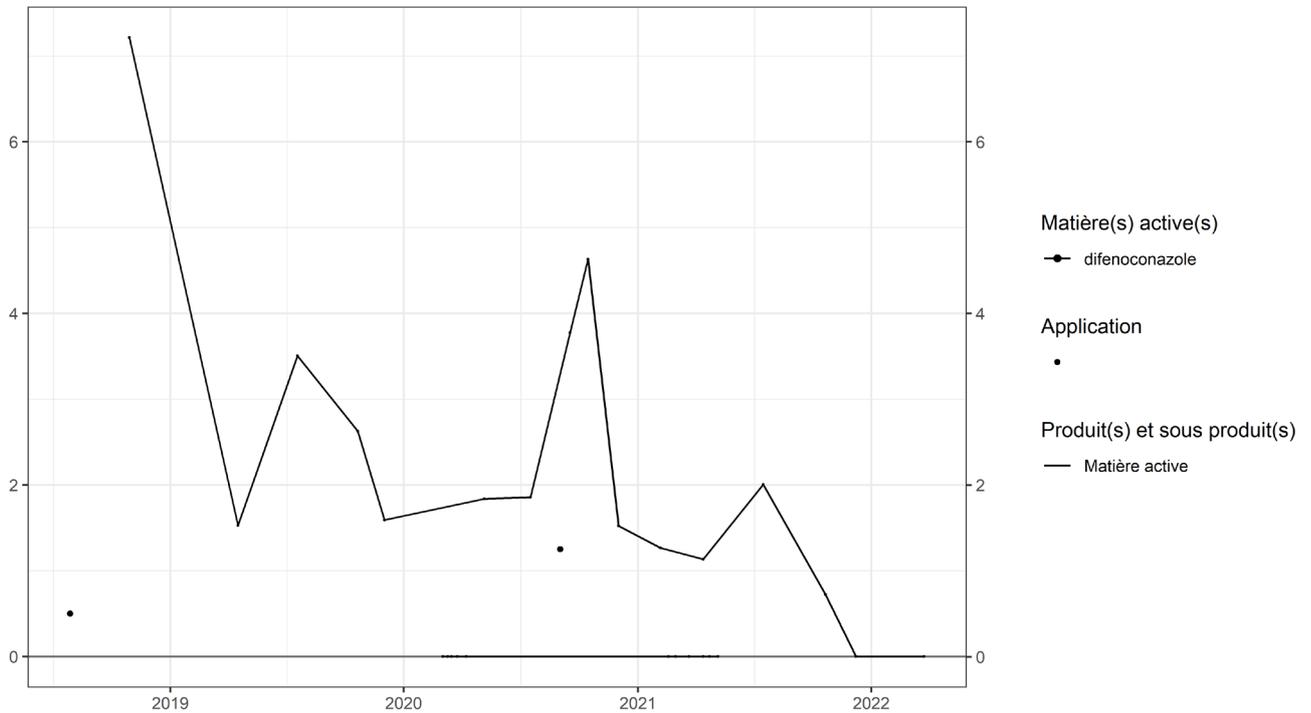


Figure 56. Applications et suivi de la teneur en difénoconazole dans le sol de la parcelle Haute Bova.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

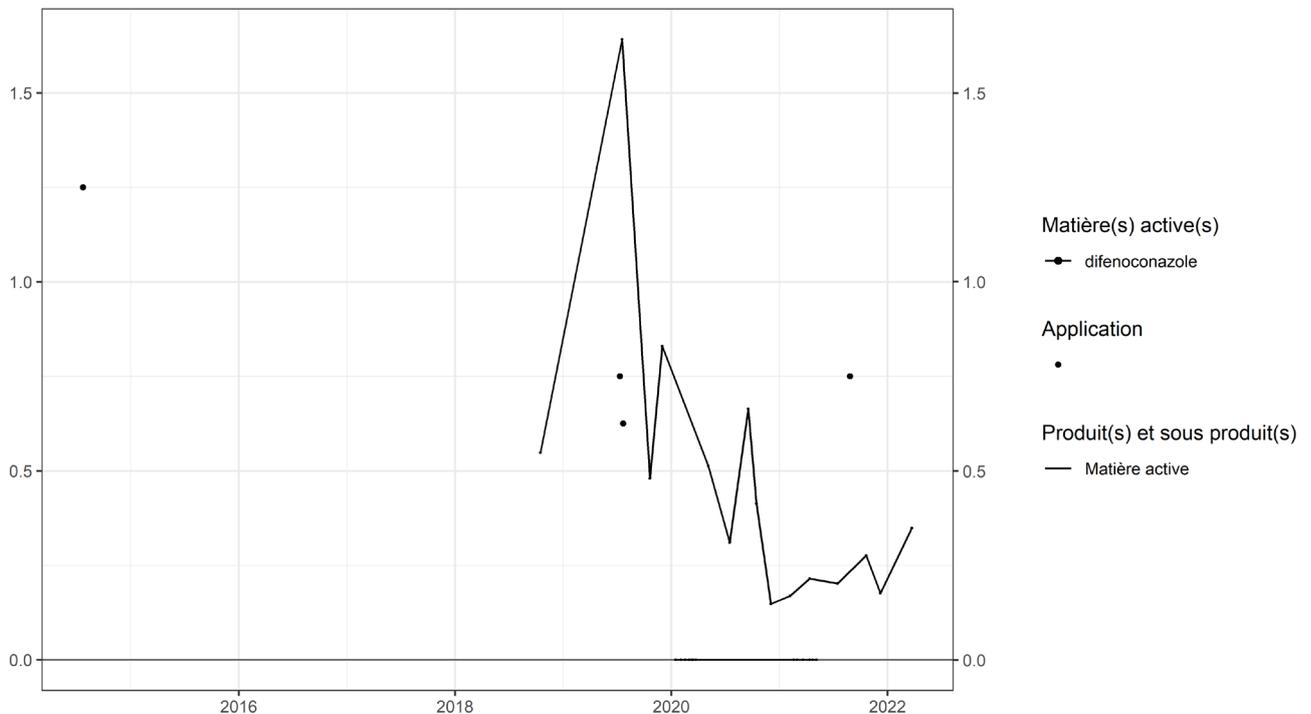


Figure 57. Applications et suivi de la teneur en difénoconazole dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

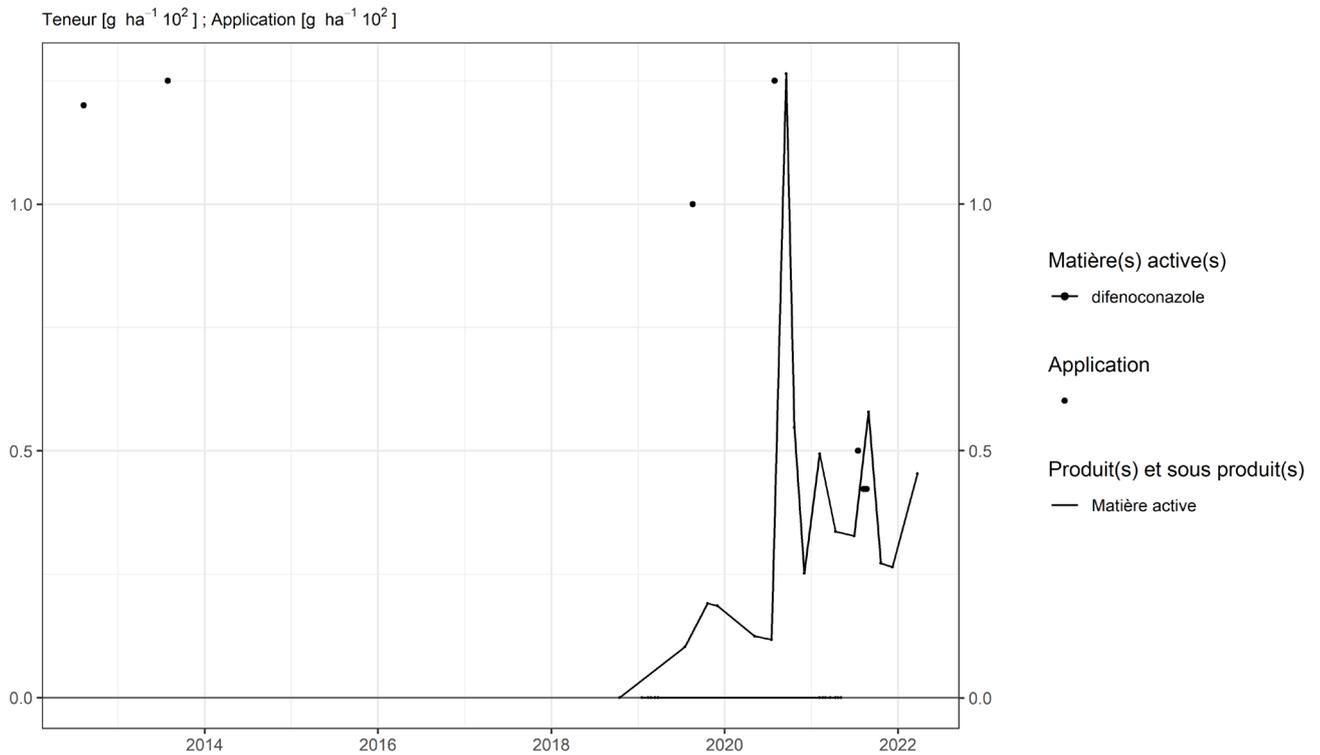


Figure 58. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Bovenistier.

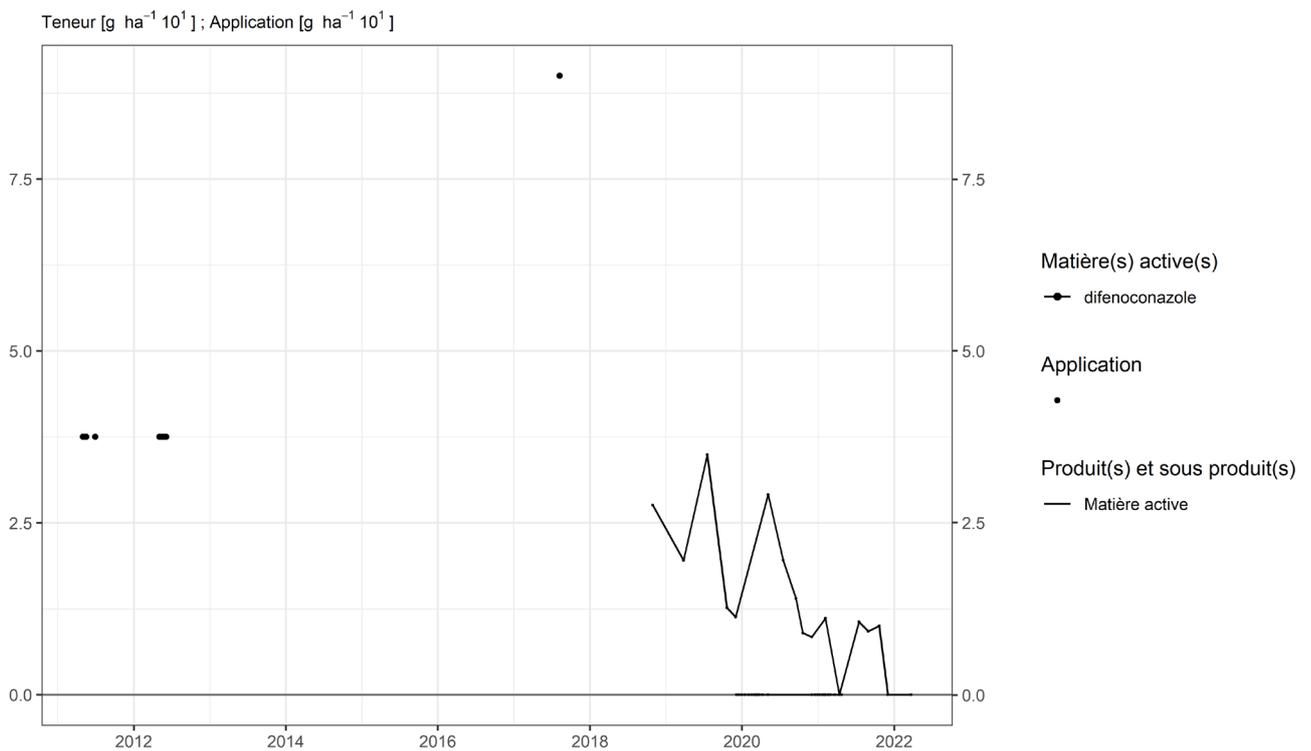


Figure 59. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.

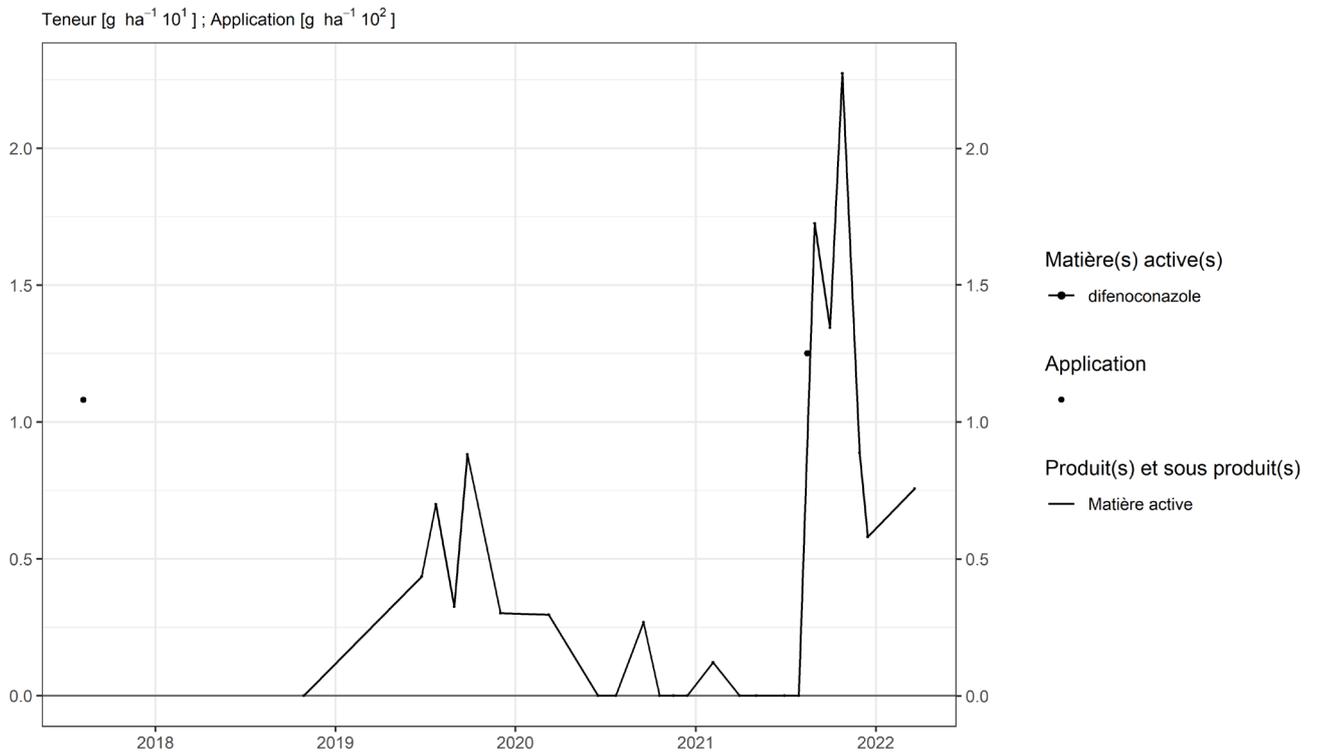


Figure 60. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR4.

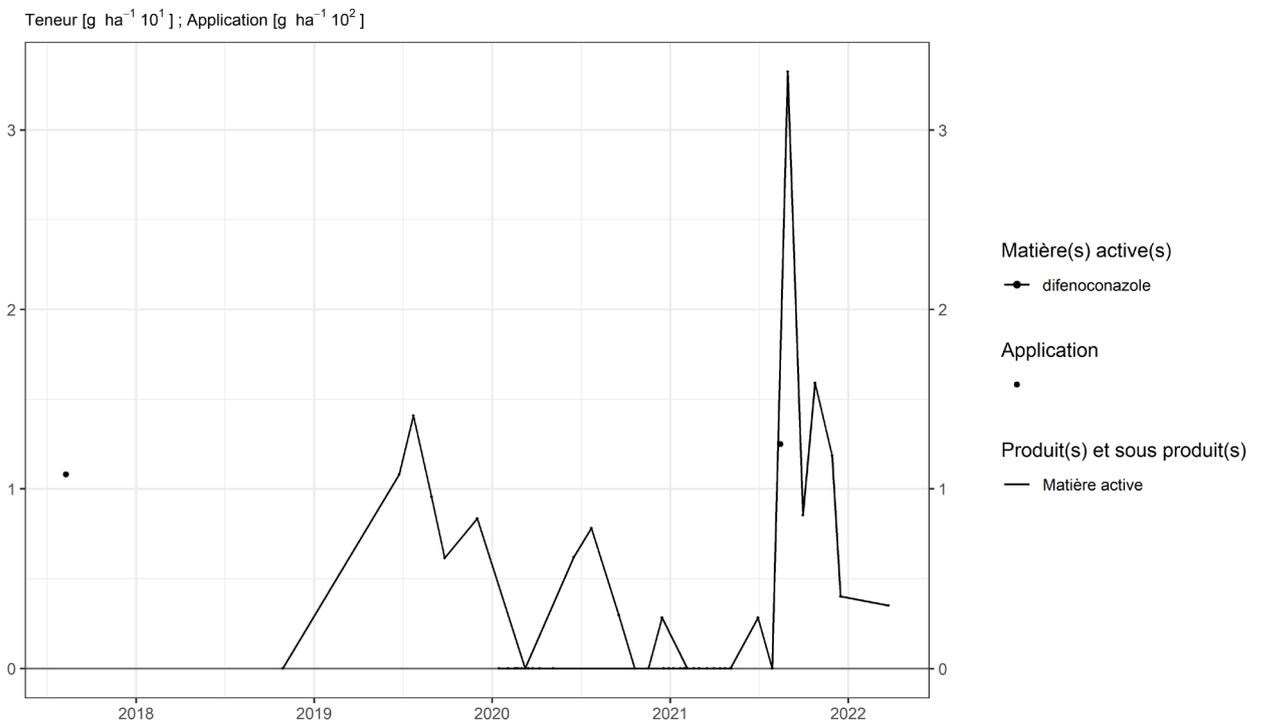


Figure 61. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR8.

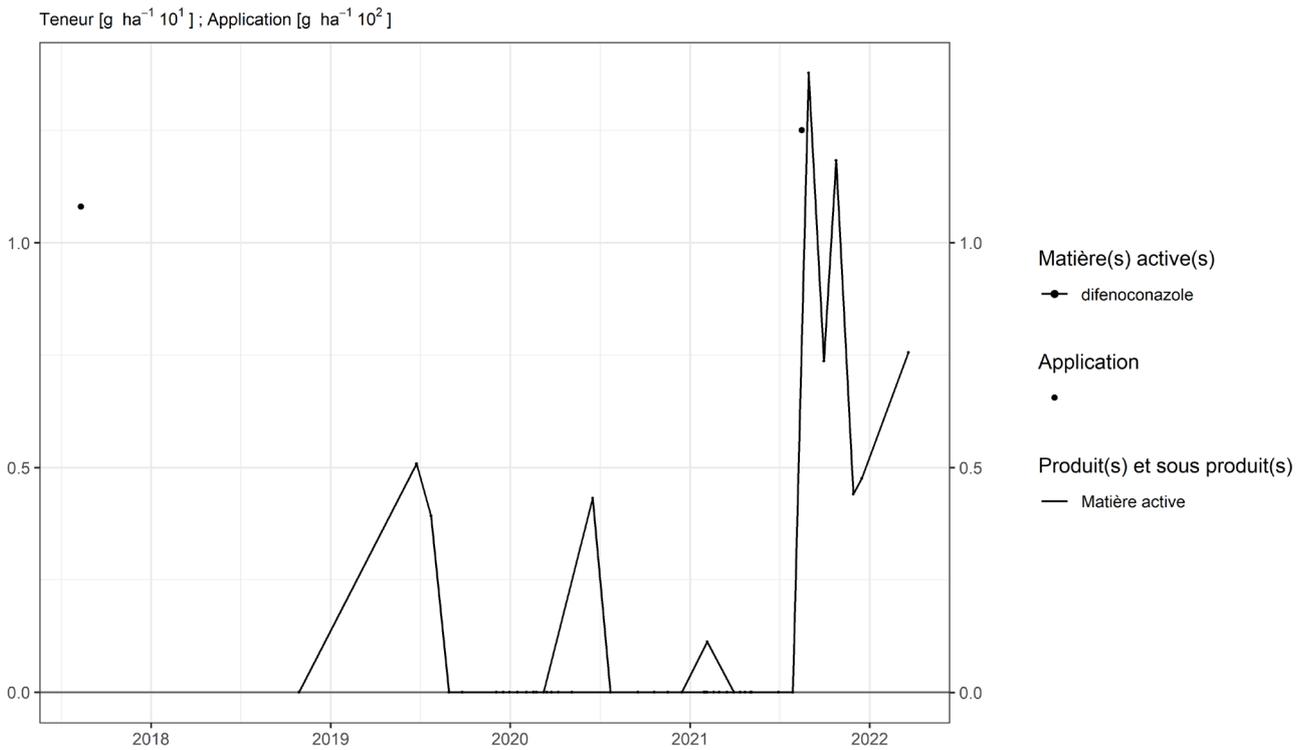


Figure 62. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR12.

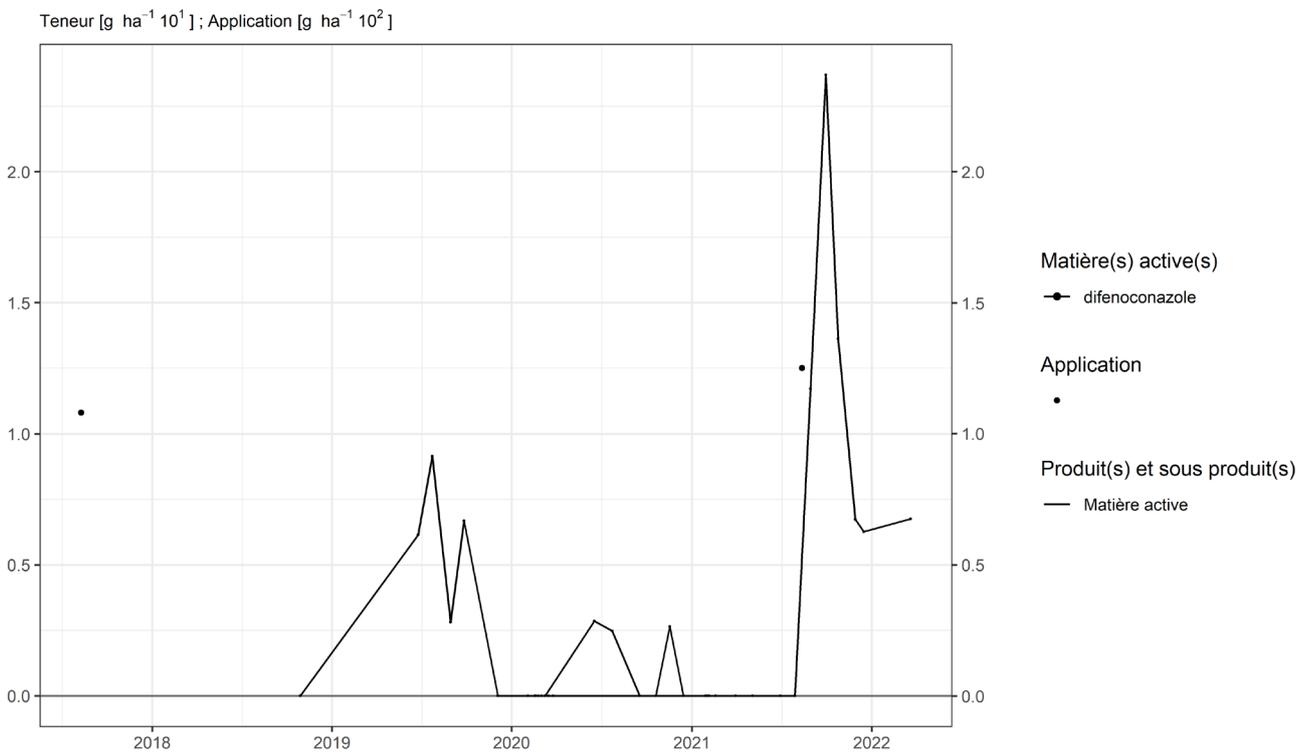


Figure 63. Applications et suivi de la teneur en difenoconazole dans le sol de la parcelle SR16.

4.10. Dimethanamide-P

Le dimethanamide-P est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 64 à 69) sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, deux apports pour un total de 250 g/ha au printemps 2020 conduisent à une concentration dans le sol de 34 g/ha ;
- sur la parcelle Bovenistier, deux apports pour un total d'un peu plus de 500 g/ha au printemps 2019 conduisent à une concentration de 45 g/ha ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'un peu plus de 500 g/ha au printemps 2021 conduit à une concentration dans le sol d'environ 30 g/ha.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, les apports réalisés aux printemps 2018 et 2020 ne sont plus décelés dans les analyses de sol ;
- sur la parcelle Bovenistier, les apports réalisés au printemps 2019 ne sont plus décelés dans les analyses de sol ;
- sur la parcelle Sole 4, les deux apports réalisés au printemps 2017 ne sont pas décelés dans les analyses de sol réalisées à partir de l'automne 2018;
- sur les parcelles Sol-Résidus, l'apport réalisé au printemps 2017 n'est pas décelé dans les analyses de sol réalisées à partir de l'automne 2018.

Cette matière active est donc rapidement dégradée dans le sol.

EAU

Cette matière active a sporadiquement été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires de trois lysimètres de la parcelle Sol-Résidus : les flux étaient compris entre 0,004 g/ha et 0,09 g/ha ; soit au maximum 0,02% de la quantité apportée.

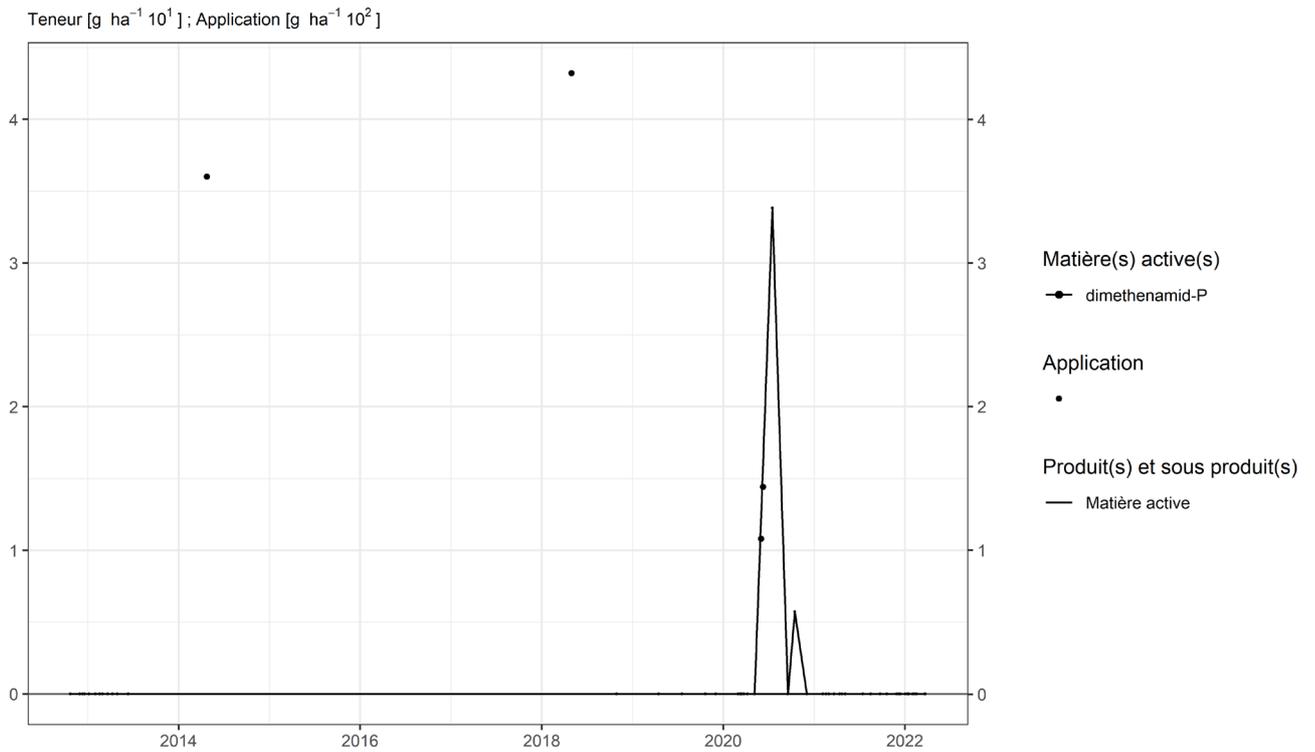


Figure 64. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle Haute Bova.

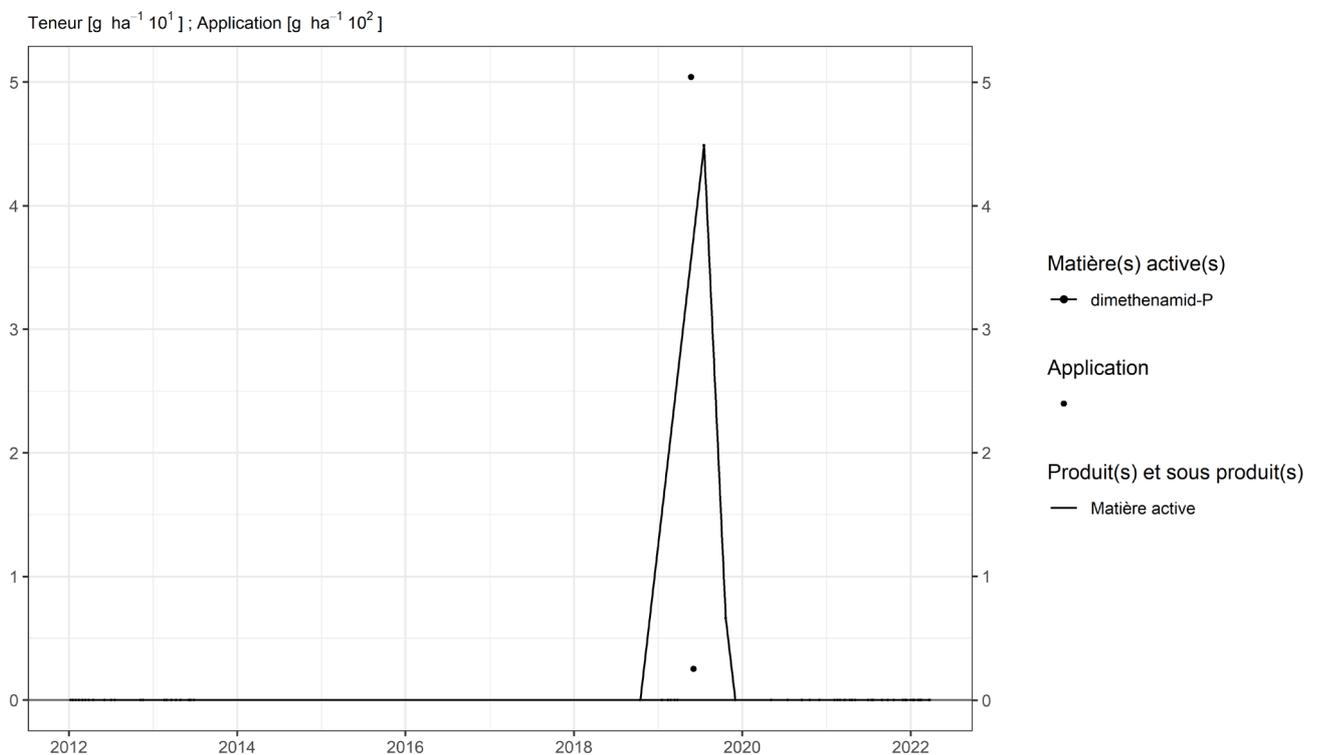


Figure 65. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle Bovenistier.

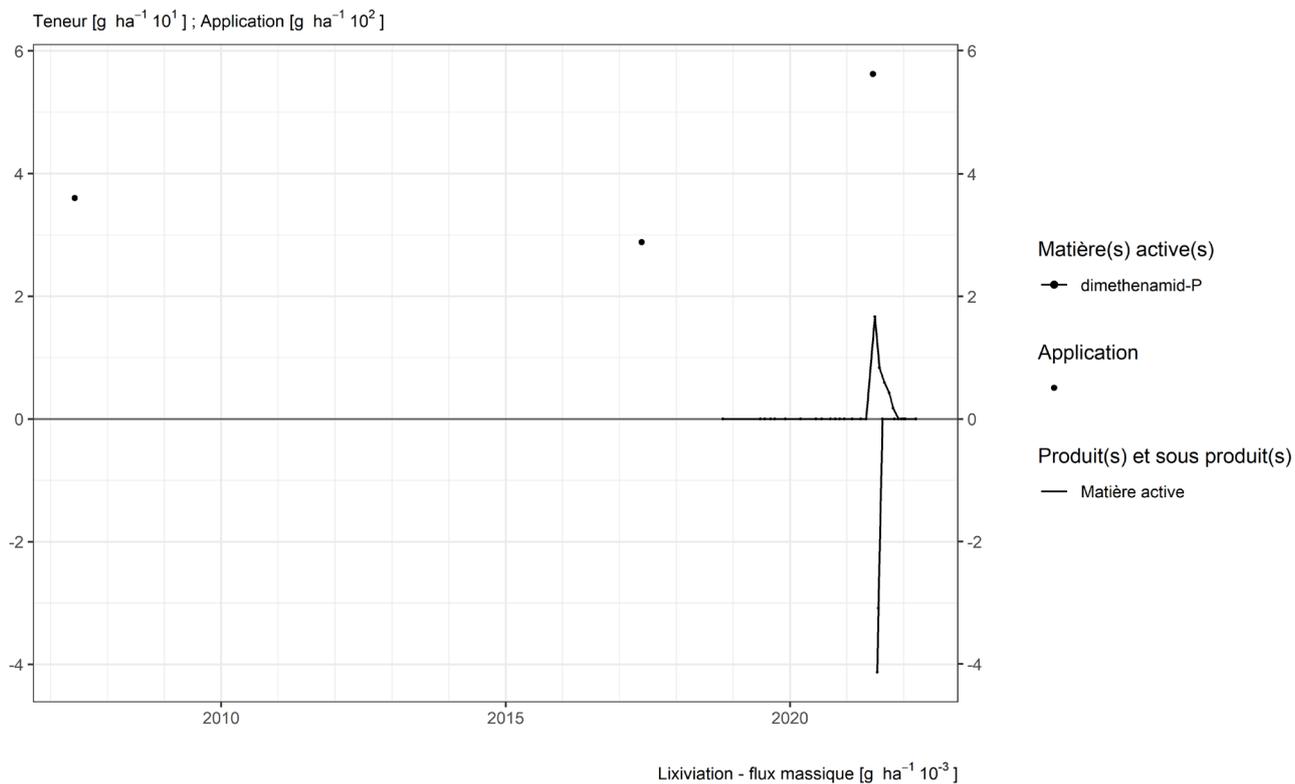


Figure 66. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR4.

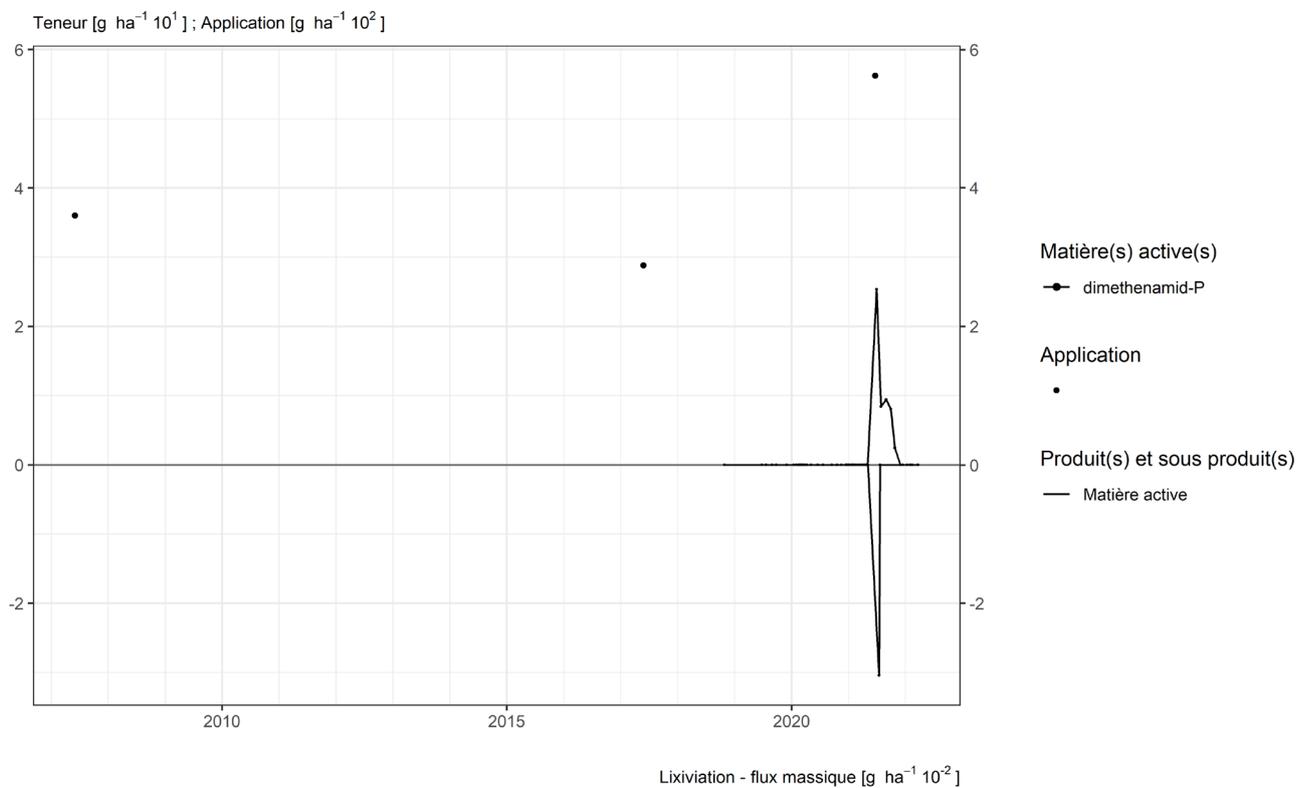


Figure 67. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

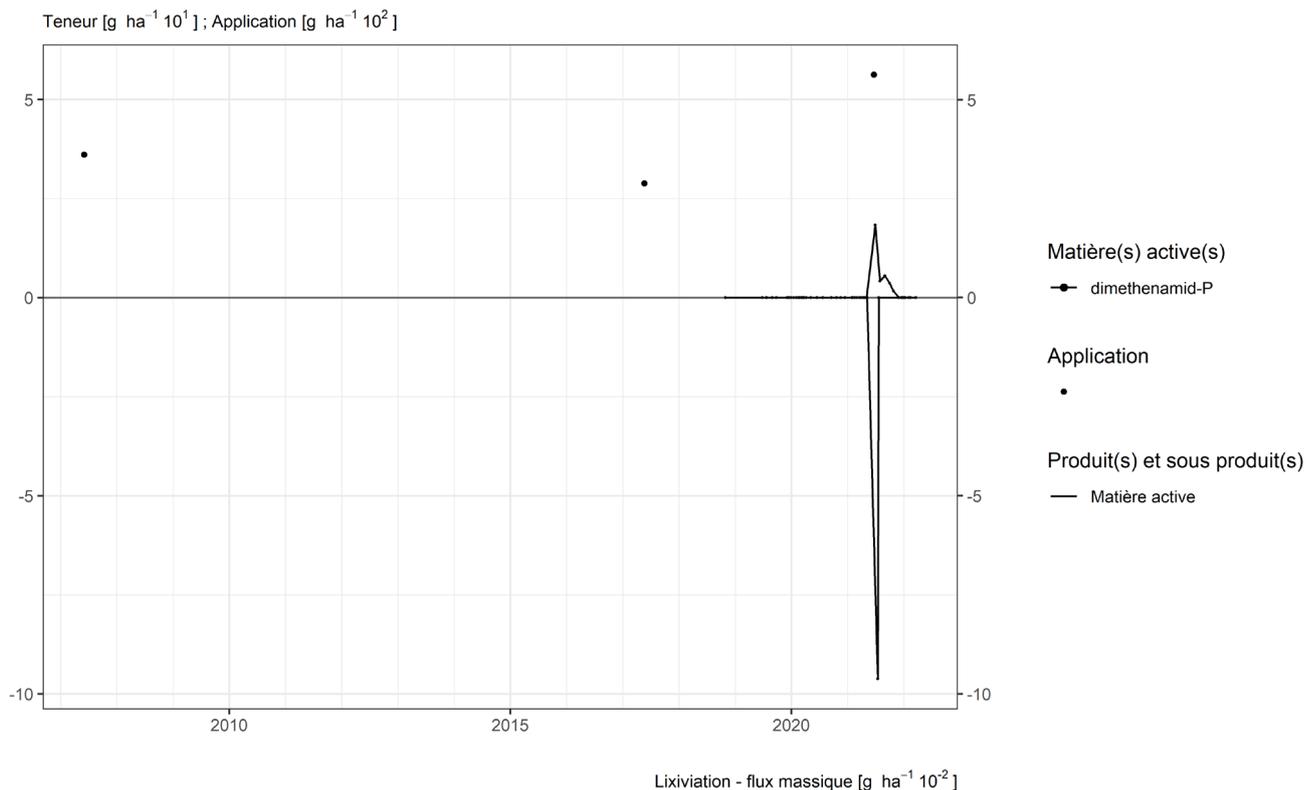


Figure 68. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

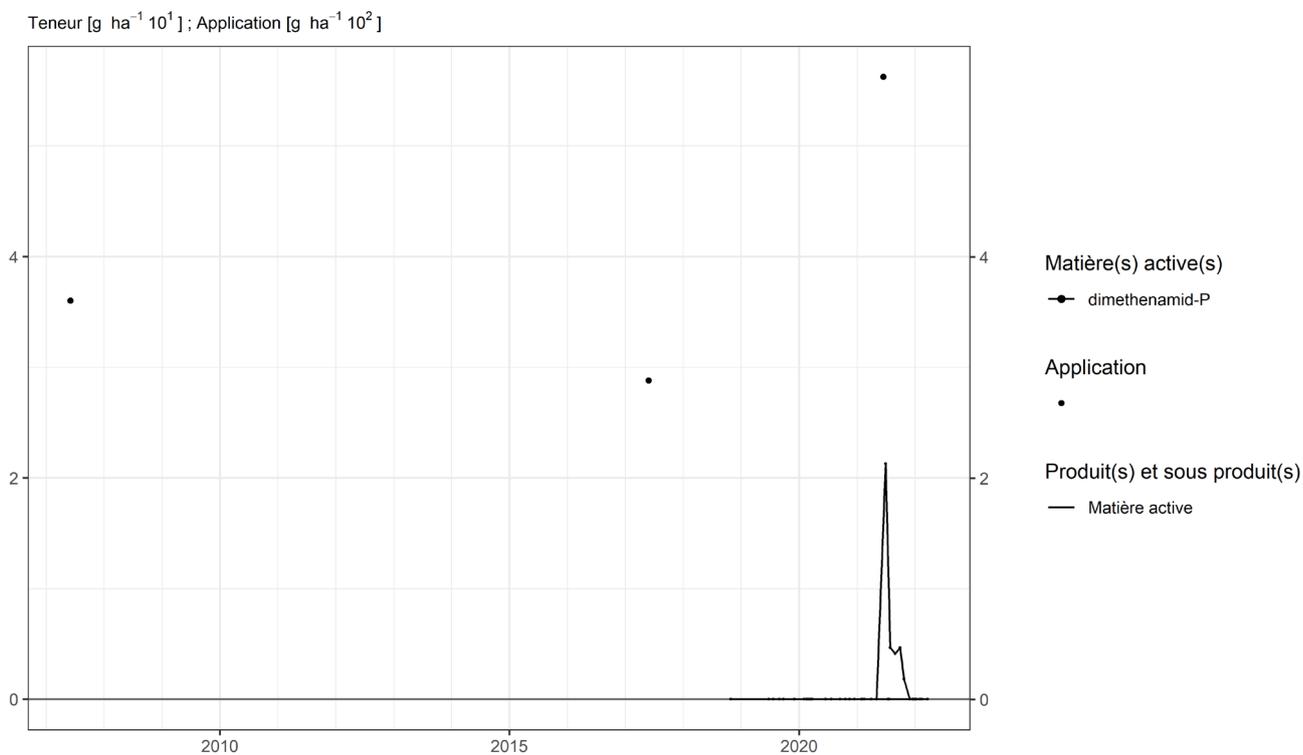


Figure 69. Applications et suivi de la teneur en dimethanamide dans le sol de la parcelle SR16.

4.11. Epoxiconazole

L'epoxiconazole est un fongicide essentiellement utilisé sur culture de froment dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 70 à 77) sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'un peu moins de 90 g/ha au printemps 2020 conduit à une augmentation équivalente de la concentration dans le sol ;

Une ou plusieurs années après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, deux apports d'environ 100 g/ha réalisés au printemps 2012 conduisent à une concentration dans le sol de l'ordre de 100 g/ha cinq ans après les traitements ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport d'environ 85 g/ha réalisé en 2015 conduit à une concentration de moins de 10 g/ha cinq ans après l'apport ;
- sur la parcelle Sole 4, deux apports réalisés en 2017 et 2018 pour un total de 140 g/ha conduisent à une concentration d'une trentaine de grammes par hectare quatre-cinq ans après les traitements ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, cinq applications d'environ 100 g/ha ont été réalisées tous les deux ans entre 2006 et 2016. Cinq ans après le dernier traitement, la concentration dans le sol est de l'ordre de 100 g/ha.

A plus long terme (environ quatre ans après l'apport), la concentration résiduelle dans le sol dépend fortement de la fréquence d'apport : si celle-ci est faible (un seul apport en quelques années), la concentration dans le sol est environ dix fois moindre que l'apport (Bovenistier). A l'inverse, si les apports sont fréquents (Sol-Résidus), la concentration dans le sol est équivalente au « dernier » apport. Des situations intermédiaires se rapprochent tantôt du premier cas de figure (Sole 4), tantôt du second (Chemin de fer)

EAU

Cette matière active a sporadiquement été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des huit lysimètres :

- sur la parcelle Haute Bova, des flux de quelques centièmes de grammes par hectare ont été observés entre 2015 et 2017. Les concentrations associées à ces flux étaient de l'ordre de la trentaine de nanogrammes par litre. En 2021, cette substance a été détectée dans trois des dix échantillons d'eau collectés, correspondant à un flux total de 0,02 g/ha (à mettre en relation avec les 80 g/ha appliqués entre 2017 et 2018, voire une partie des applications antérieures) ;
- sur la parcelle Chemin de fer, contrairement à la parcelle Haute Bova, aucun flux n'a été observé au cours de la période 2015-2017. En 2022, un flux d'un peu plus de 0,02 g/ha a été observé à l'exutoire ;
- sur les parcelles Bovenistier et Sole 4, les échantillons d'eau analysés depuis 2014 n'ont jamais révélé la présence de cette substance ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, cette substance a été observée dans la parcelle SR16 en 2021, correspondant respectivement à un flux de $2 \cdot 10^{-3}$ g/ha.

En termes de bilan de masse, la part de la substance lixiviée au-delà de la zone racinaire est nulle dans cinq des parcelles et n'excède pas 0,025 % dans les trois autres parcelles.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]

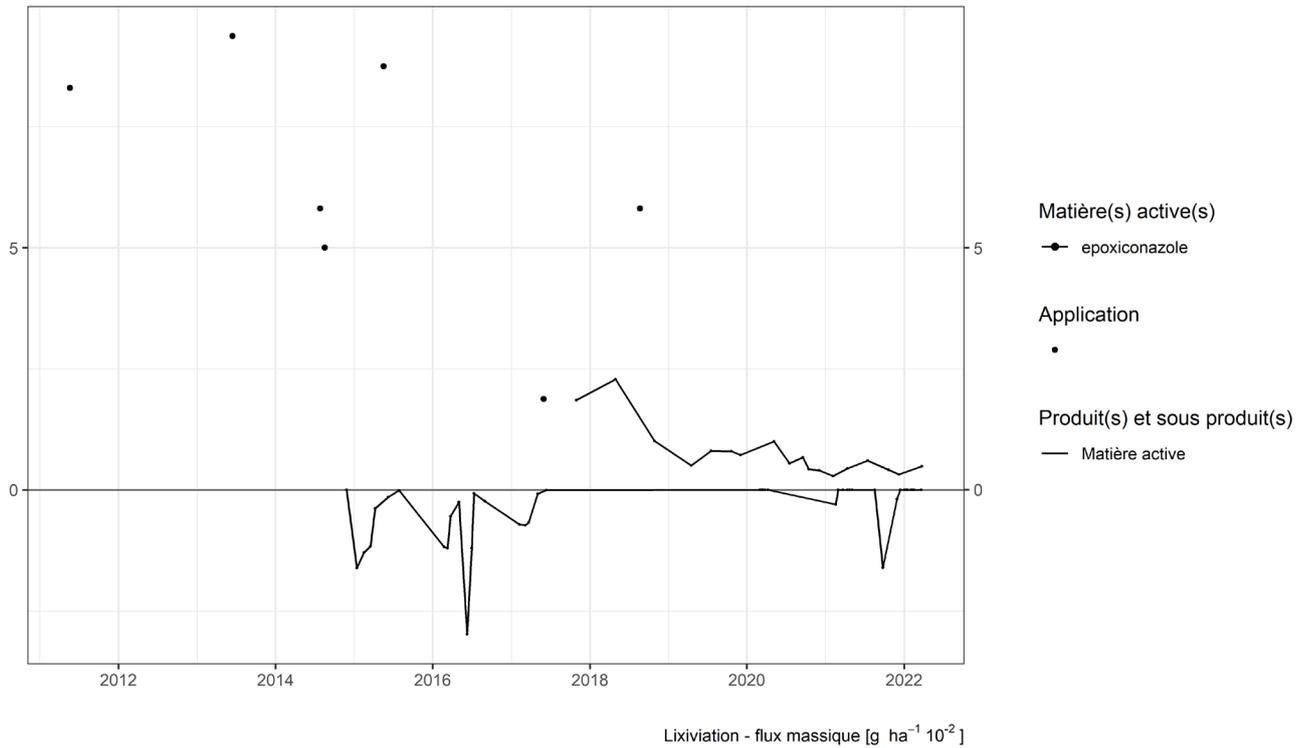


Figure 70. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

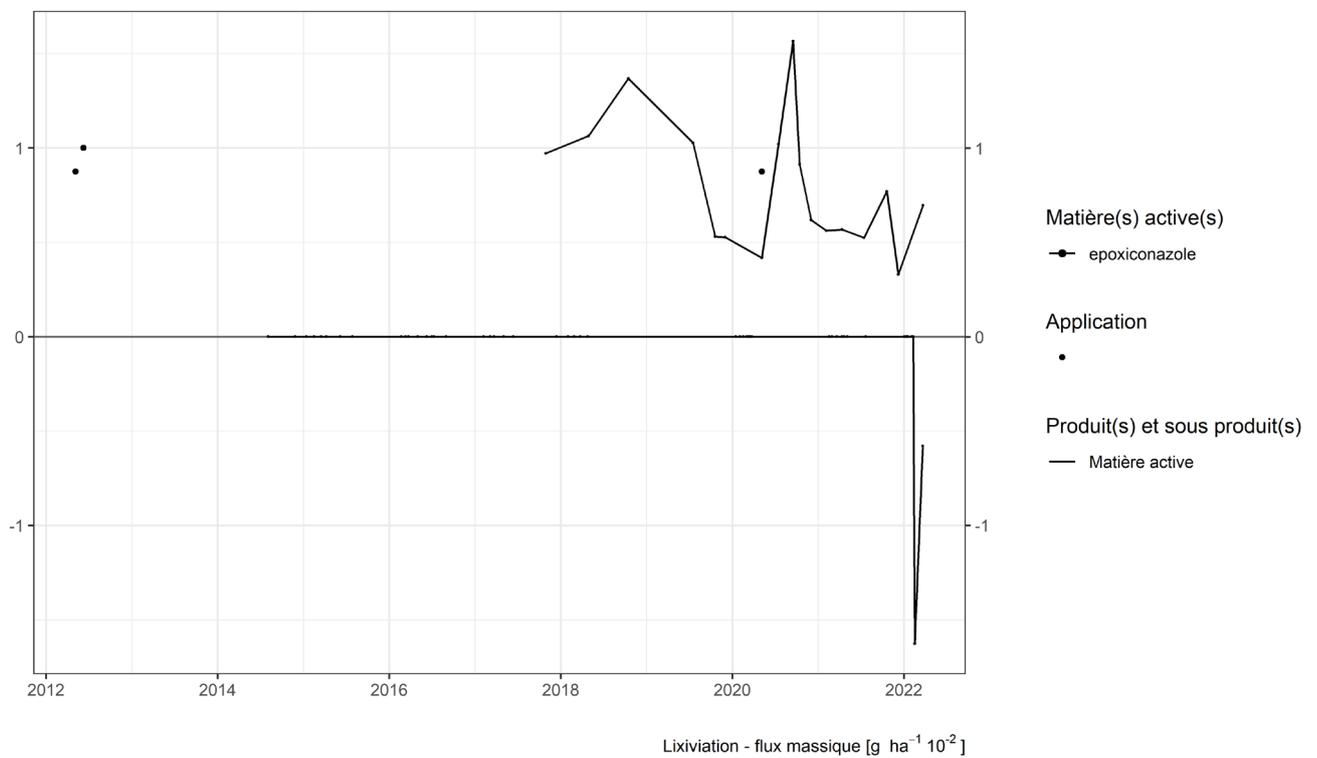


Figure 71. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.

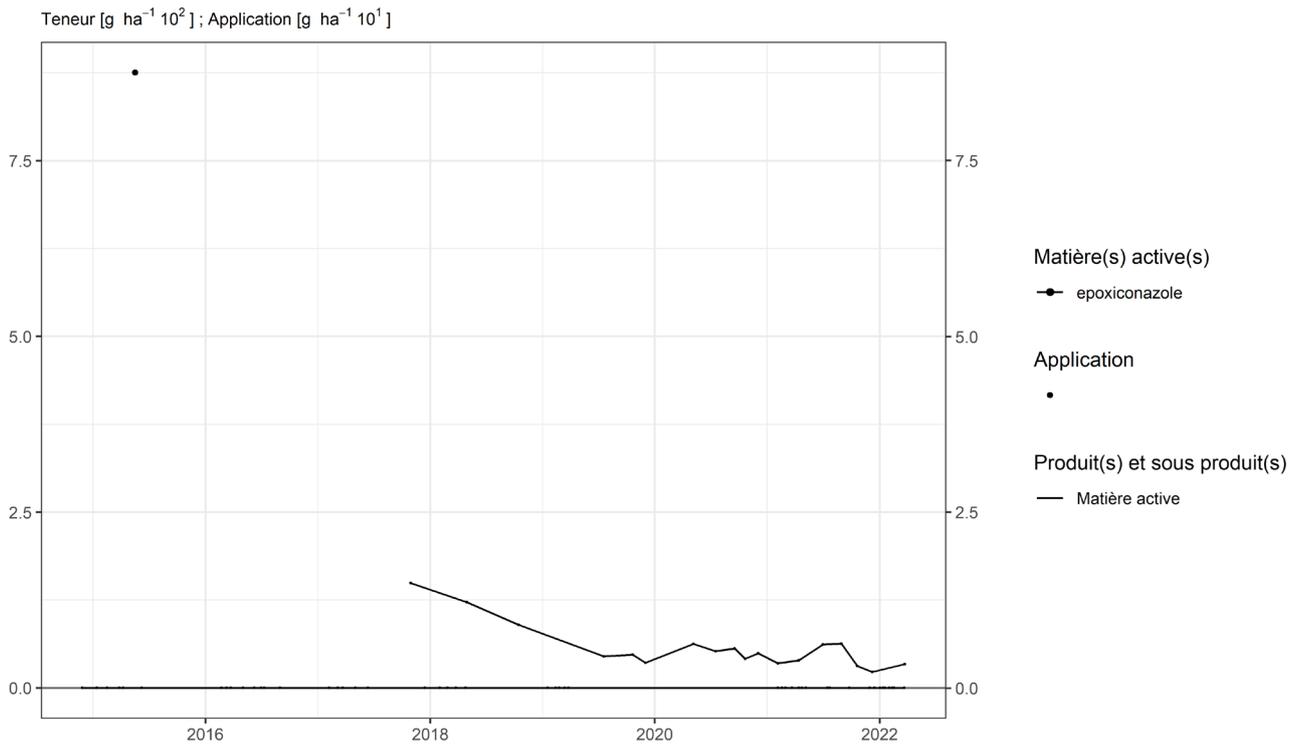


Figure 72. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle Bovenistier.

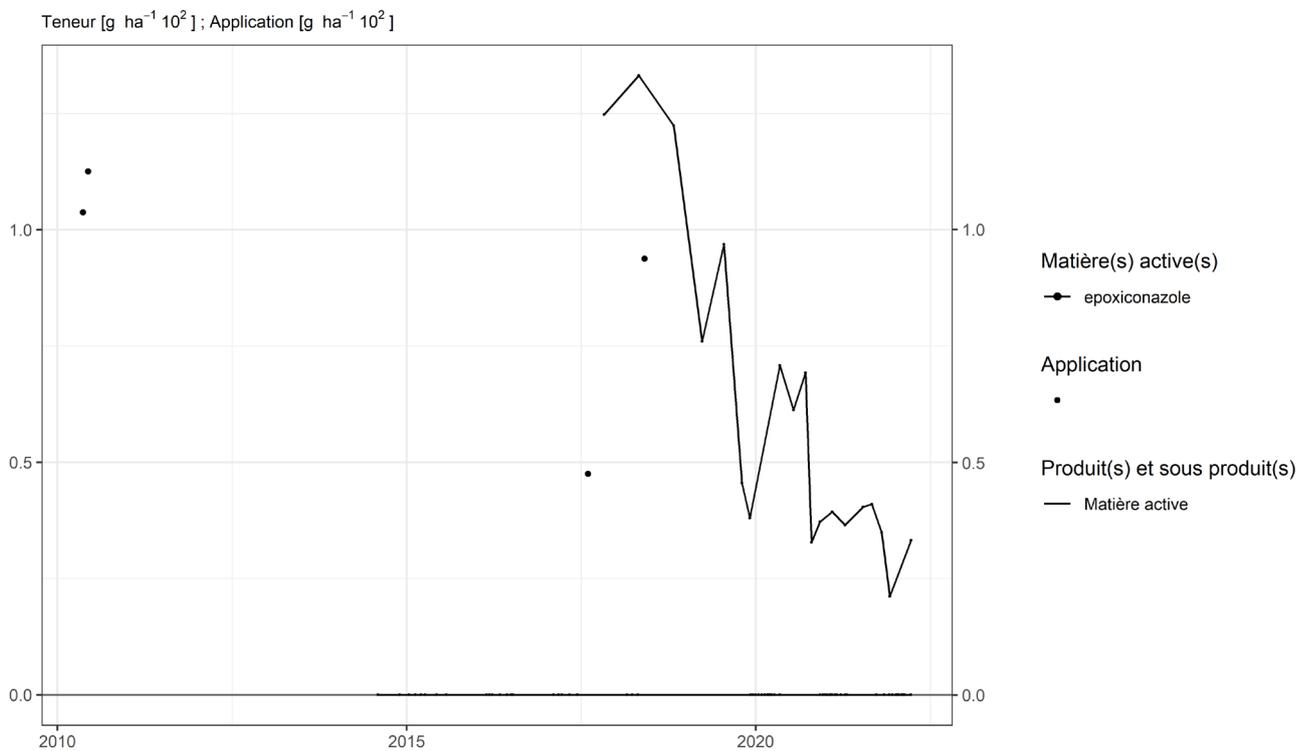


Figure 73. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.

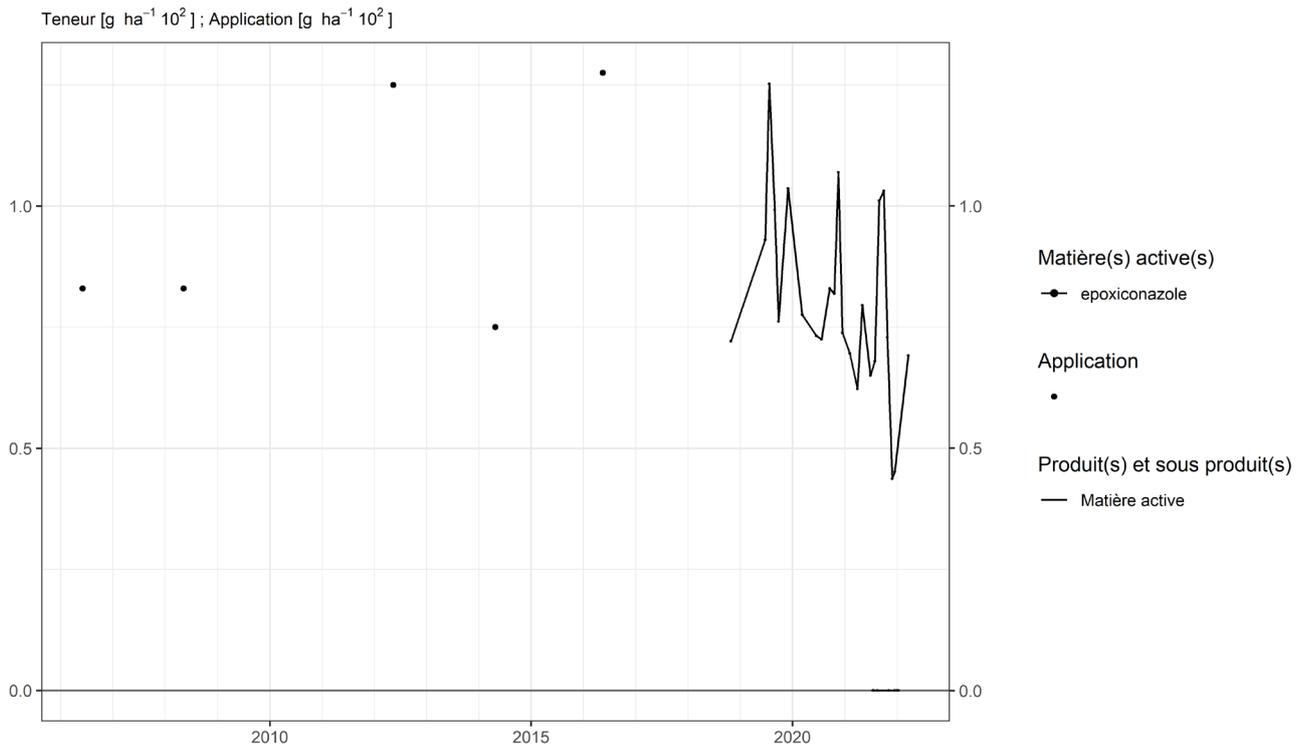


Figure 74. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR4.

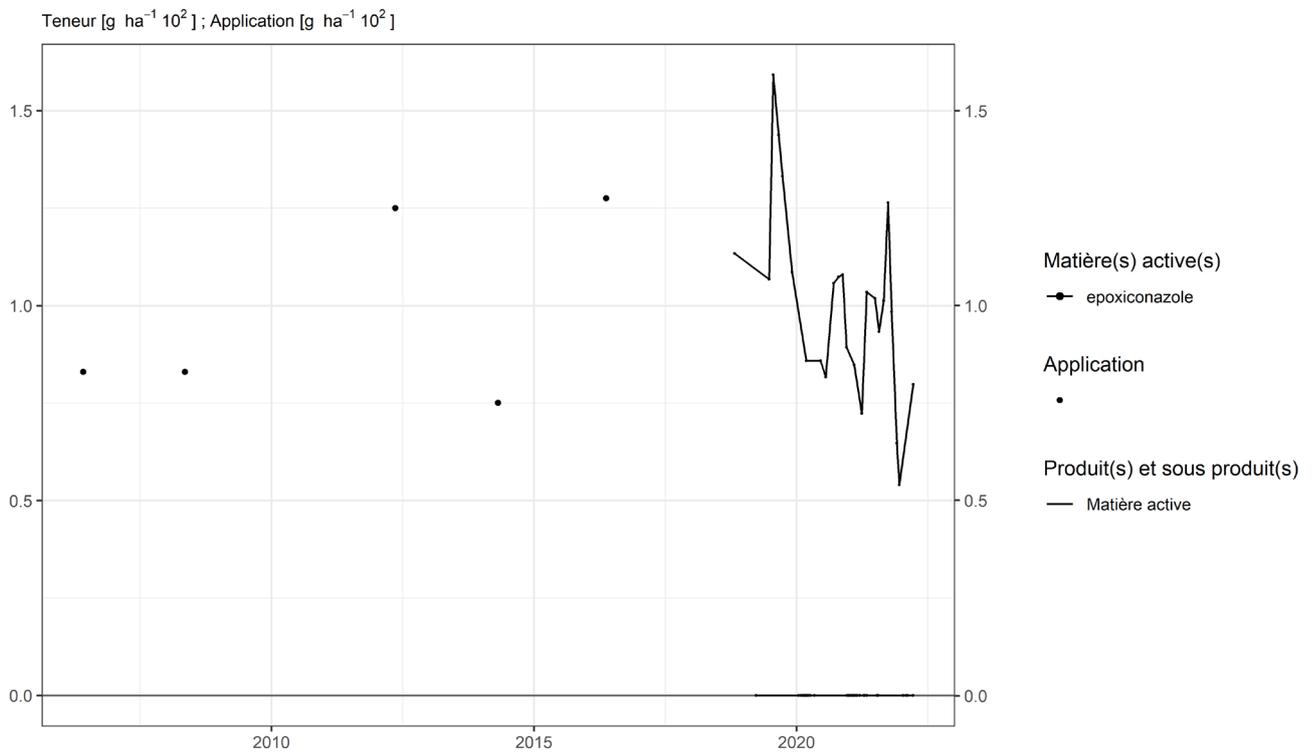


Figure 75. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR8.

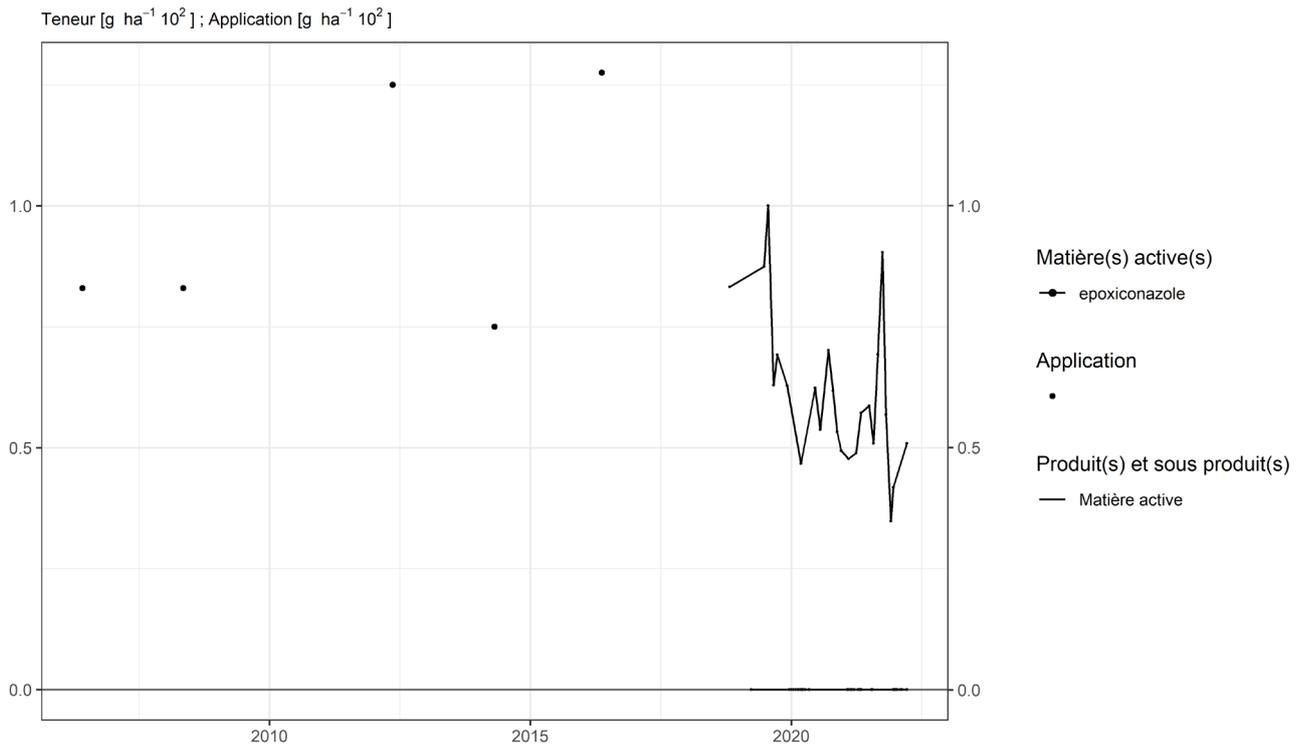


Figure 76. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol de la parcelle SR12.

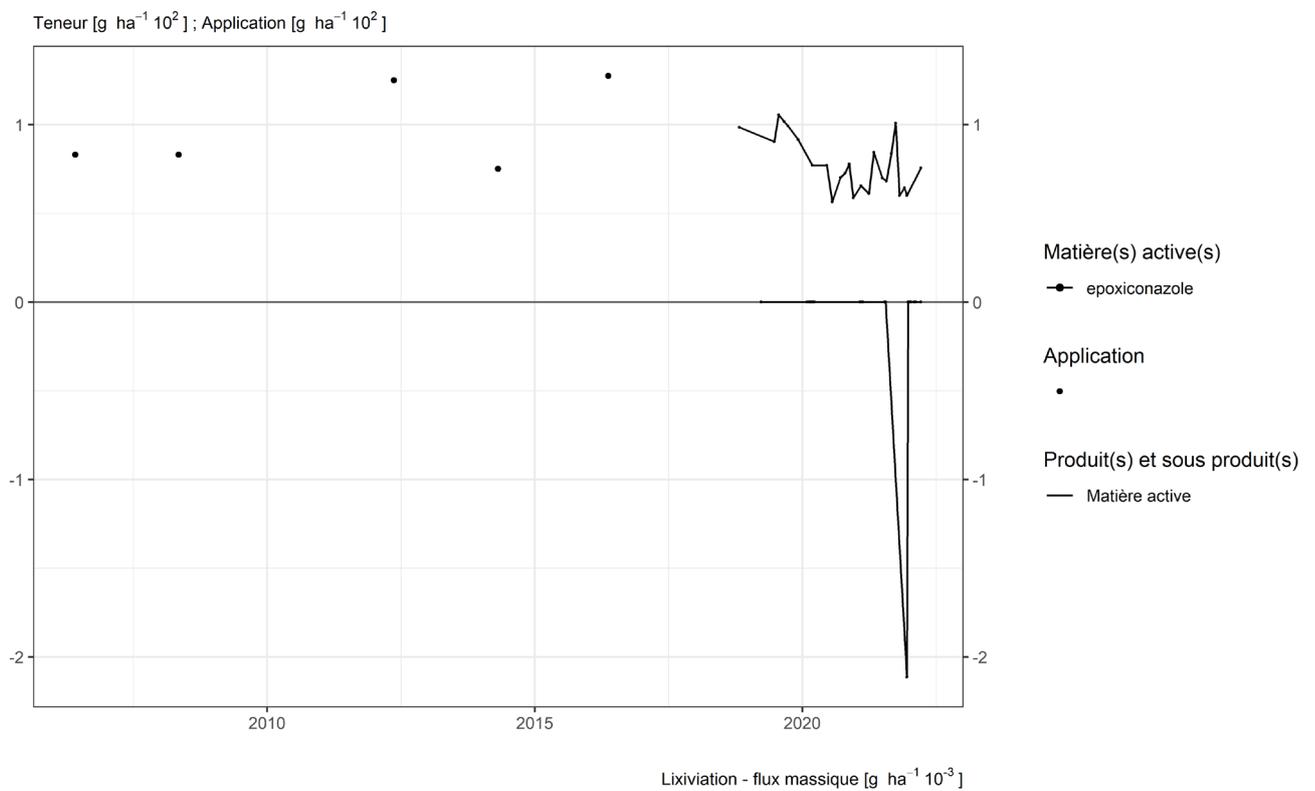


Figure 77. Applications et suivi de la teneur en epoxiconazole dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.12. Ethofumesate

L'ethofumesate est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 78 à 85) sont les suivantes :

- sur la parcelle Bovenistier, quatre apports totalisant un peu moins de 500 g/ha au printemps 2019 conduisent, fin d'été 2019 à une concentration dans le sol d'un peu plus de 60 g/ha (en sachant que la concentration mesurée en automne 2018 était de 100 g/ha);
- sur la parcelle Sole 4, un apport de 400 g/ha réalisé début août 2019 n'engendre pas d'augmentation de concentration quelques semaines après cet apport : la concentration mesurée en juillet est équivalente à celle mesurée en septembre (environ 25 g/ha) ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, trois apports totalisant un peu plus de 450 g/ha ont été réalisés au printemps 2021. La concentration dans le sol a atteint une quinzaine de grammes par hectare.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport de 400 g/ha au printemps 2018 laisse une dizaine de grammes par hectare de résidu à l'automne ;
- sur la parcelle Chemin de fer, quatre apports totalisant environ 900 g/ha réalisés au printemps 2018 conduisent à une concentration dans le sol de l'ordre de 55 g/ha en automne de la même année ;
- sur la parcelle Bovenistier, les apports (un peu moins de 500 g/ha) réalisés au printemps 2019 conduisent à une concentration de l'ordre de 10 g/ha fin d'automne de la même année ;
- sur la parcelle Sole 4, l'apport réalisé en été 2019 (40 g/ha) conduit à une concentration d'une dizaine de grammes par hectare fin d'automne de la même année. Par ailleurs, la faible augmentation de concentration observée dans le sol en 2020 (froment) n'est pas expliquée ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, les traitements réalisés au printemps 2021 ont laissé une concentration de moins de 10 g/ha à l'automne de la même année.

A plus long terme (environ quatre ans après l'apport), la concentration résiduelle dans le sol n'excède pas la dizaine de grammes par hectare (Haute Bova, Chemin de fer, Bovenistier, Sole 4).

EAU

Cette matière active a été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires de trois des quatre lysimètres de Sol-Résidus fin du printemps 2021 (reprise d'écoulement suite à une forte pluviométrie) après des apports réalisés quelques semaines auparavant. Les flux observés (de 0,01 à 0,1 g/ha) représentent au maximum 0,2 % de la quantité apportée.

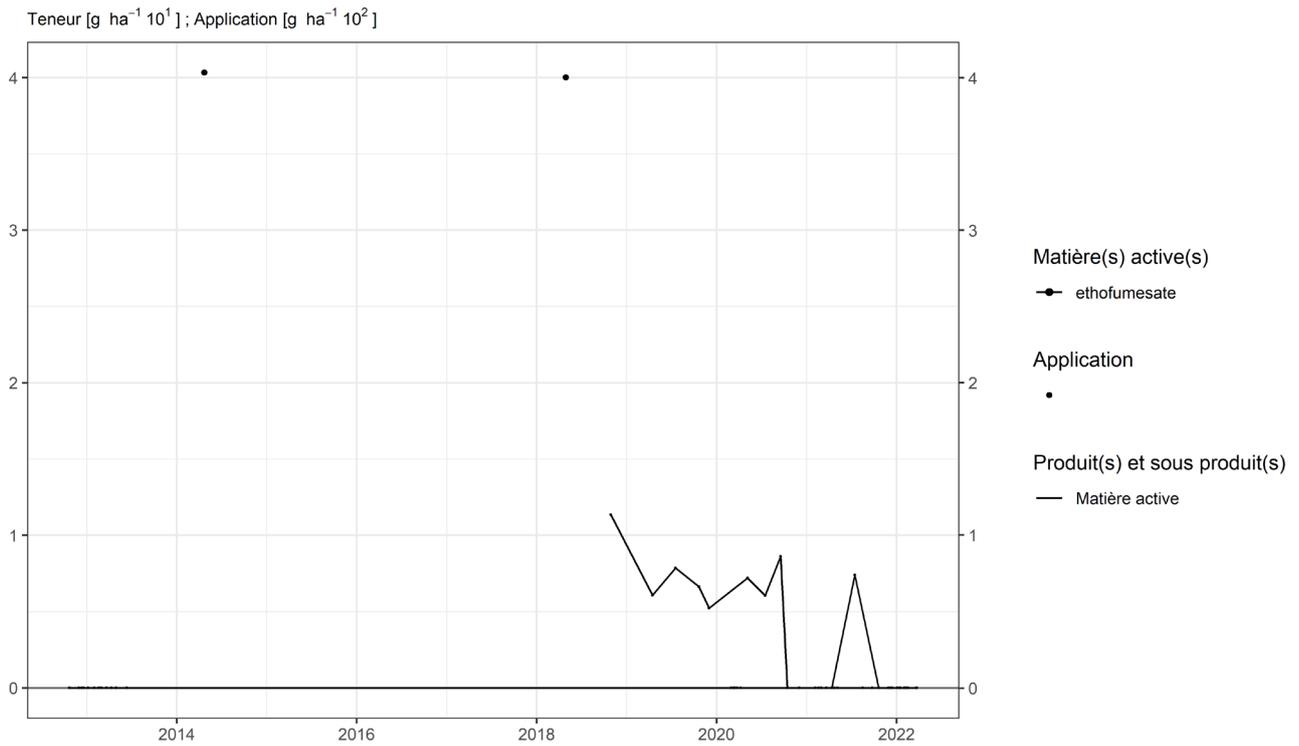


Figure 78. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Haute Bova.

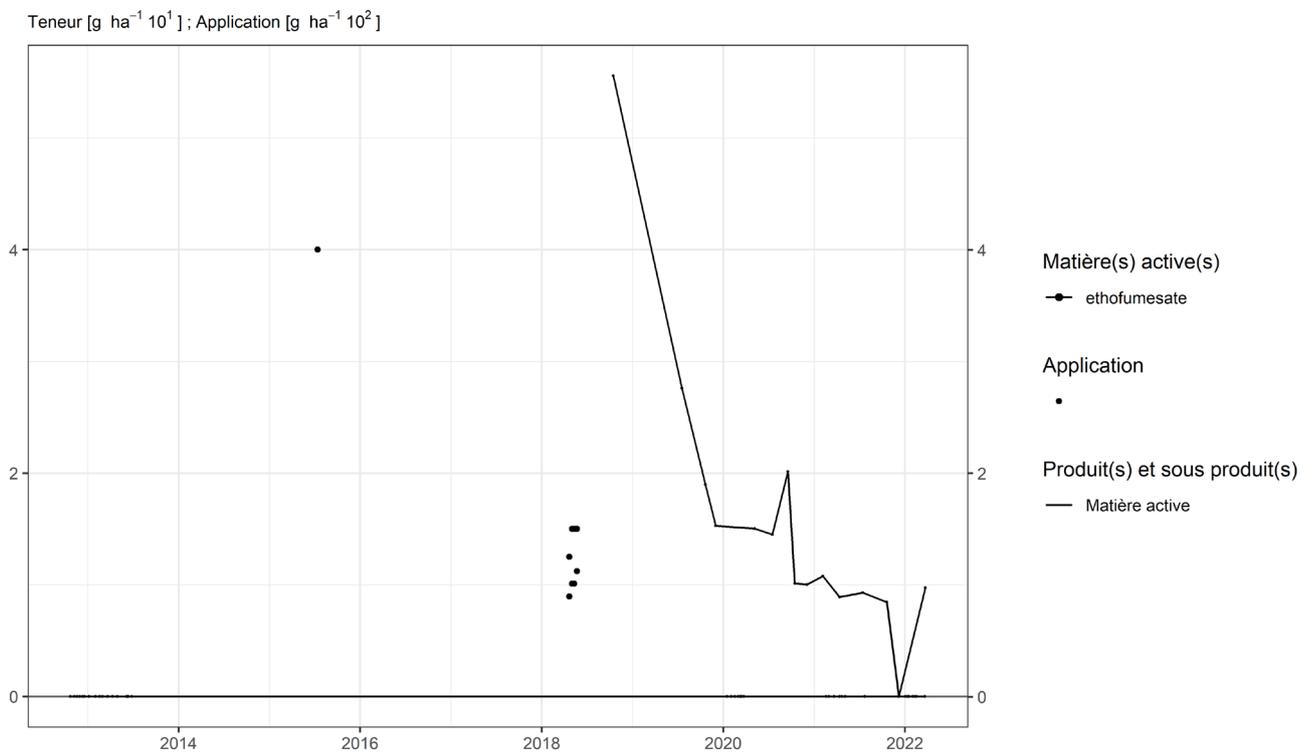


Figure 79. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

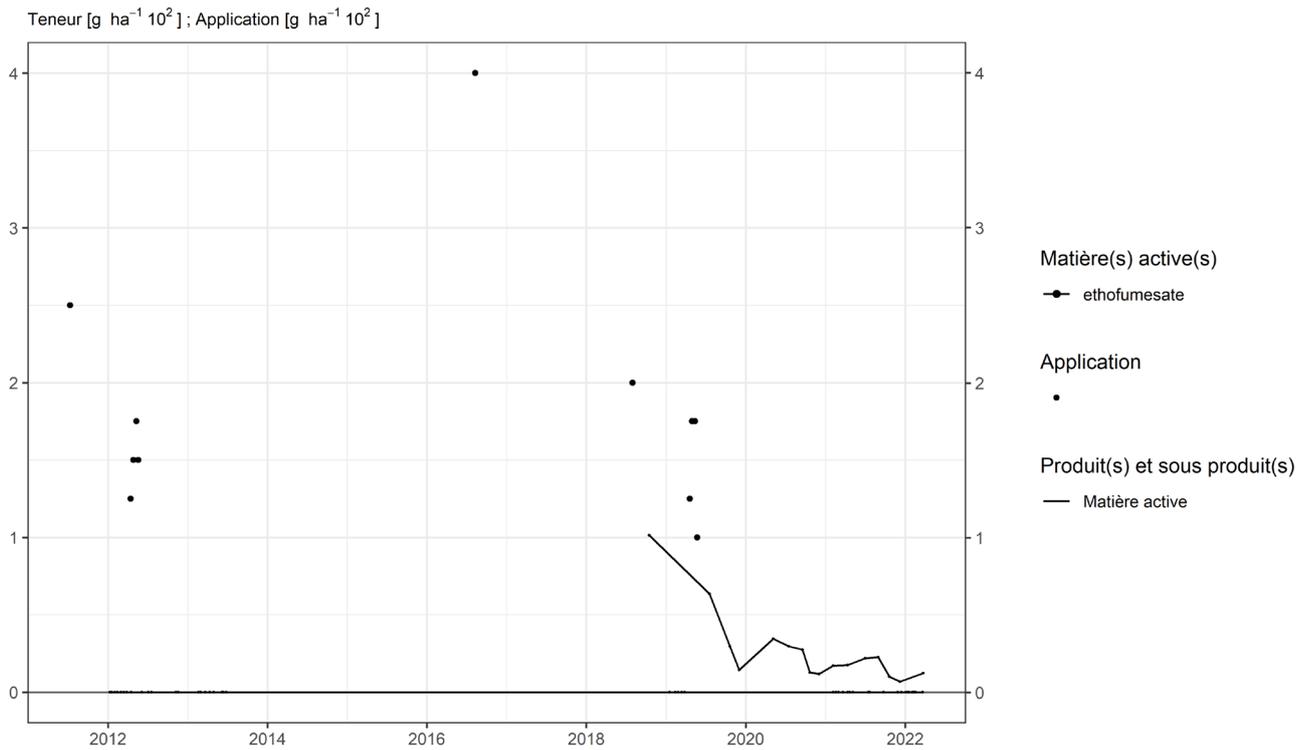


Figure 80. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Bovenistier.

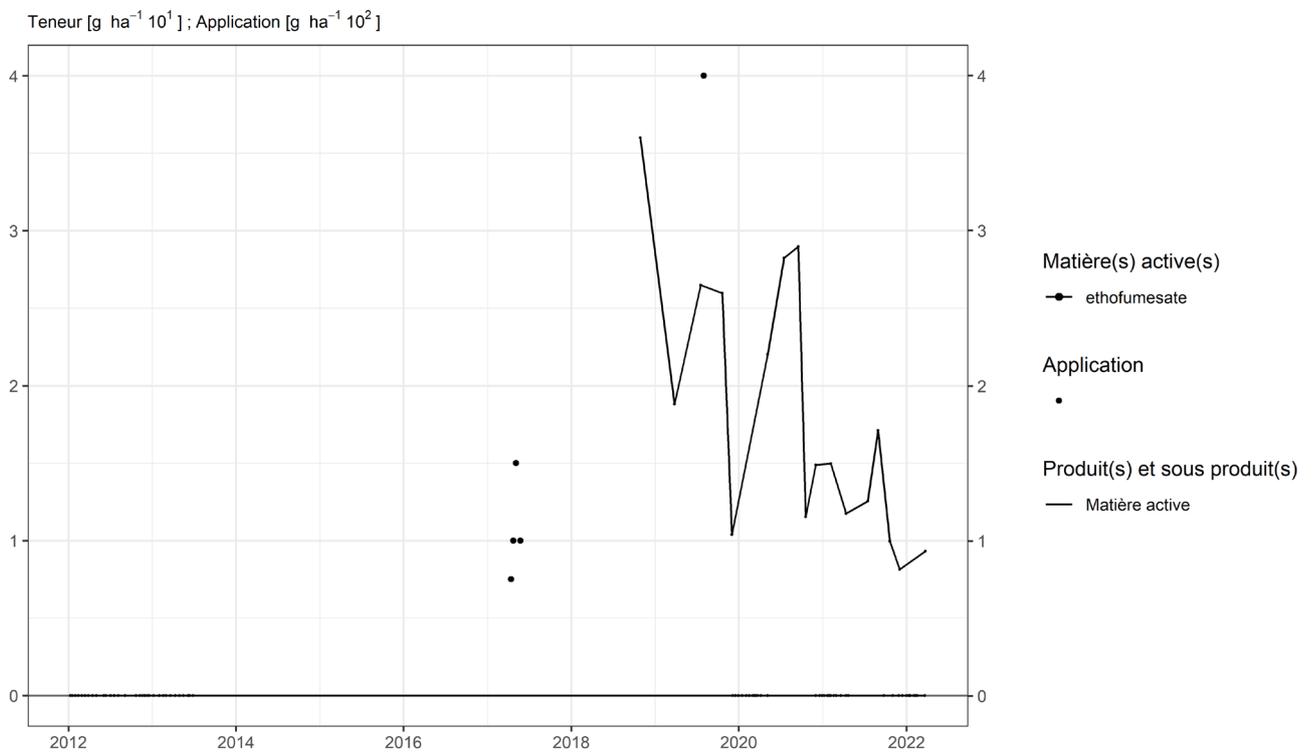


Figure 81. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle Sole 4.

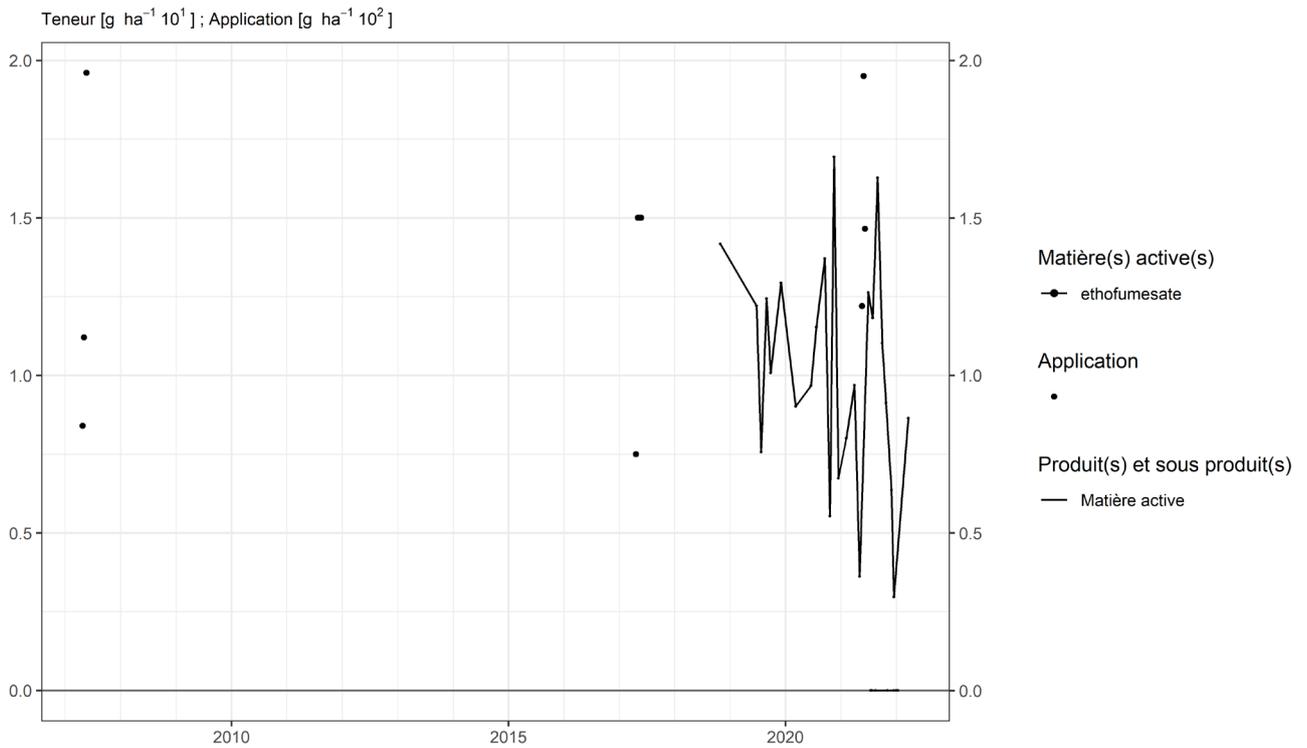


Figure 82. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol de la parcelle SR4.

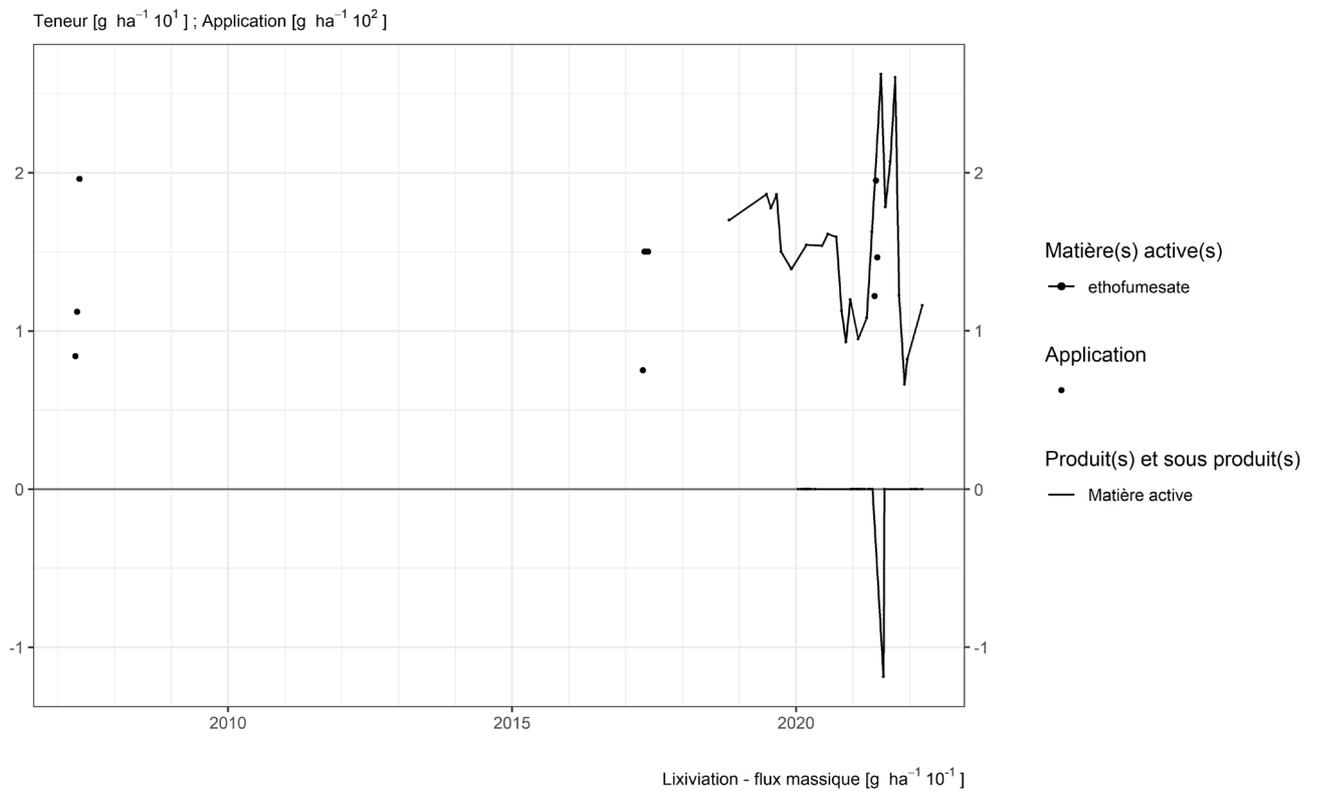


Figure 83. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

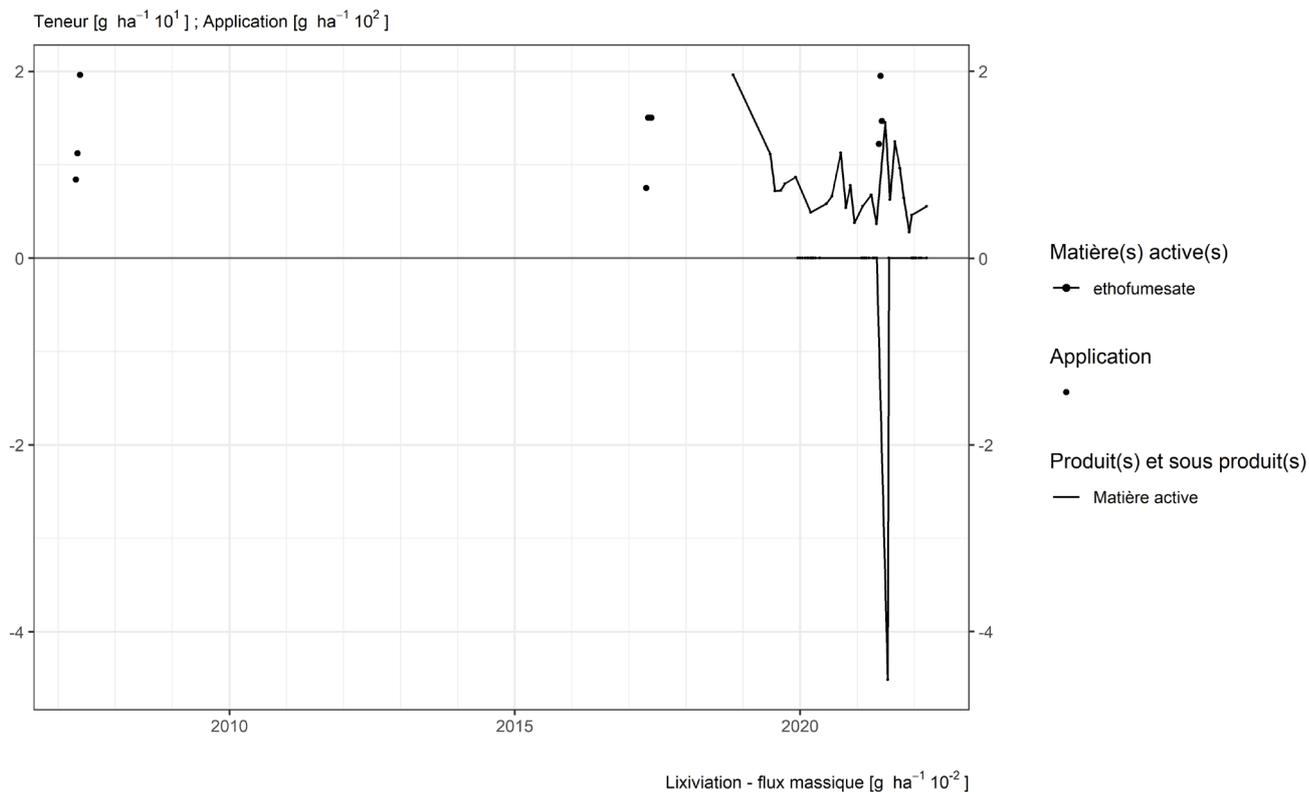


Figure 84. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

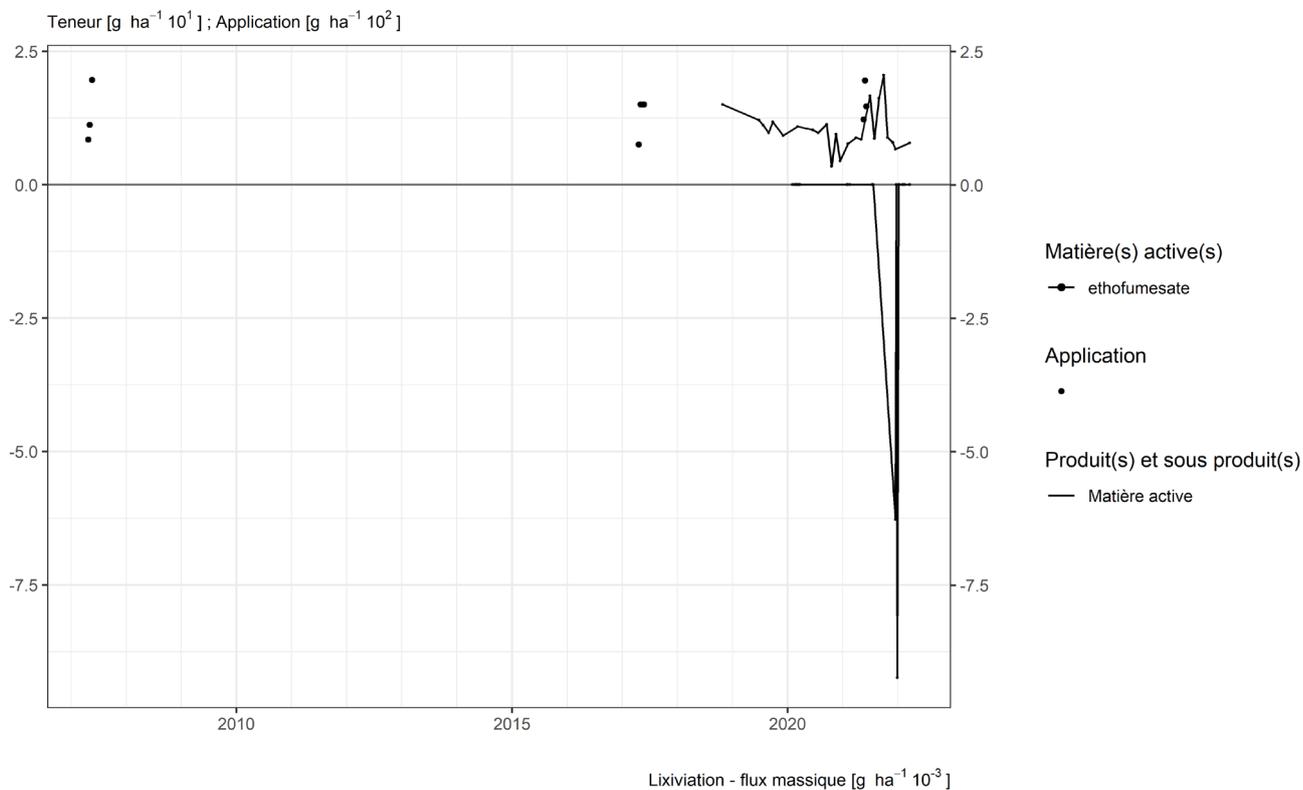


Figure 85. Applications et suivi de la teneur en ethofumesate dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.13. Flufenacet

Le flufenacet est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de pomme de terre dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 86 à 92) sont les suivantes :

- sur la parcelle Sole 4, deux apports totalisant 240 g/ha à l'automne 2020 conduisent, début décembre de la même année, à une concentration dans le sol d'un peu plus de 35 g/ha ;
- sur la parcelle Chemin de fer, un apport d'un peu plus de 400 g/ha réalisé au printemps 2019 a conduit à une concentration d'un peu plus de 100 g/ha ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport d'un peu plus de 400 g/ha réalisé au printemps 2021 conduit à une concentration dans le sol de près de 90 g/ha ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'un peu plus de 300 g/ha a été réalisé au printemps 2019. Deux jours après l'application, la concentration dans le sol est de l'ordre de 200 g/ha. Quelques semaines plus tard, elle est en moyenne de l'ordre d'une centaine de gramme par hectare.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Sole 4, en fin d'hiver qui suit un apport d'automne, la matière n'est plus détectée ;
- sur la parcelle Chemin de fer, l'apport de printemps (un peu plus de 400 g/ha) est visible dans le sol à hauteur d'une dizaine de gramme par hectare ;
- sur la parcelle Bovenistier, l'apport d'un peu plus de 400 g/ha réalisé au printemps 2021 conduit à une concentration de l'ordre de 10 g/ha fin d'automne de la même année ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement (un peu plus de 300 g/ha) réalisé au printemps 2019 a laissé une concentration de moins de 10 g/ha à l'automne de la même année.

A plus long terme (environ trois ans après l'apport), la matière active n'est plus décelée dans le sol (Chemin de fer 2011 et 2019, Bovenistier 2015, Sol-Résidus 2015 et 2019).

EAU

Cette matière active a été sporadiquement observée en très petite quantité dans des échantillons d'eau collectés aux exutoires de lysimètres :

- sur la parcelle Chemin de fer, au cours de l'hiver 2019-2020, un flux de 0,0004 g/ha a été observé suite à l'apport d'un peu plus de 400 g/ha au printemps 2019 ;
- sur la parcelle Bovenistier, un flux d'environ 2 g/ha du métabolite ESA (dosé par l'ISSEP) a été observé au cours de l'hiver 2014-2015 suite à un apport de près de 450 g/ha au printemps 2014 ;
- sur la parcelle Sol-Résidus SR12, un flux de 0,07 g/ha est observé fin d'hiver 2020-2021 suite à un apport d'un peu plus de 300 g/ha en 2019.

Ces observations illustrent la faiblesse des flux de cette matière active. Une attention particulière devrait cependant être portée sur le métabolite ESA.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

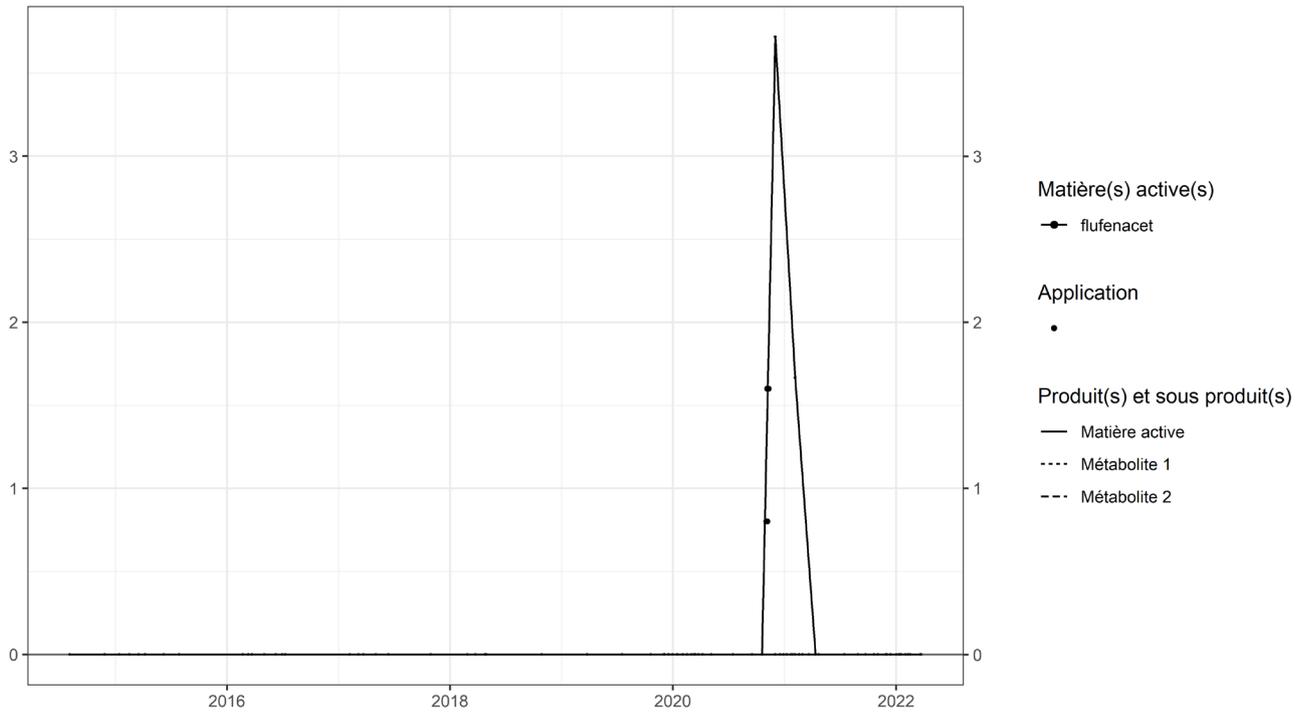


Figure 86. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol de la parcelle Sole 4.

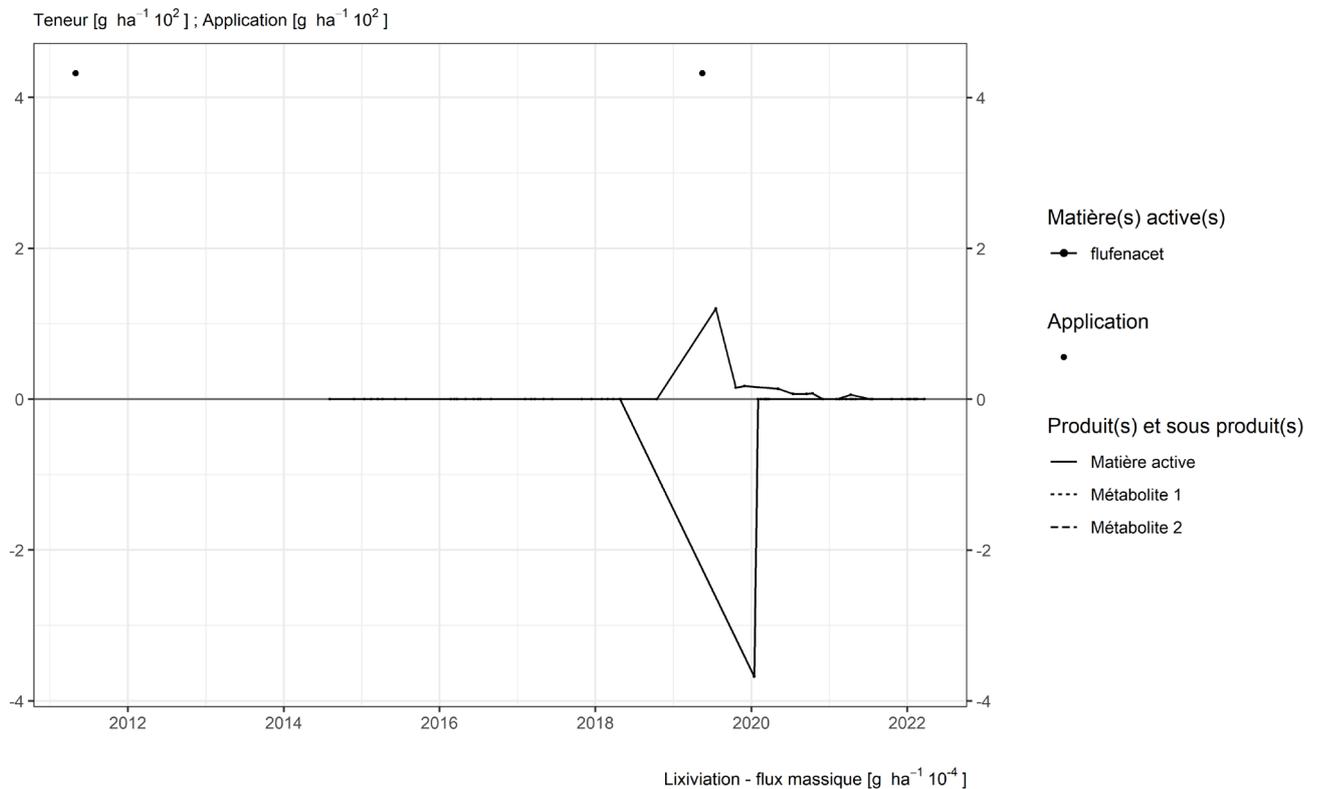


Figure 87. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.

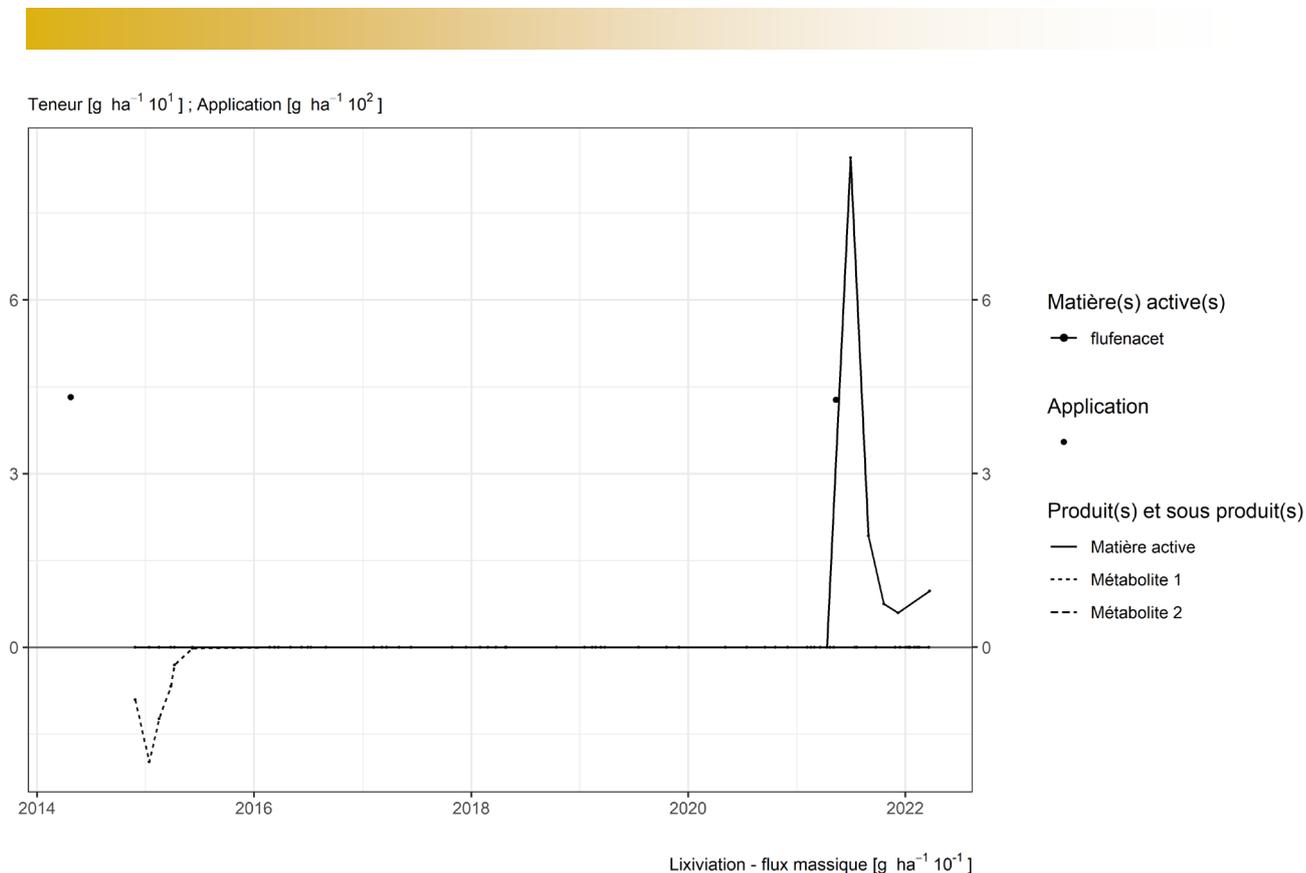


Figure 88. Applications et suivi de la teneur en flufenacet, en flufenacet ESA (métabolite 1) et en flufenacet OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.

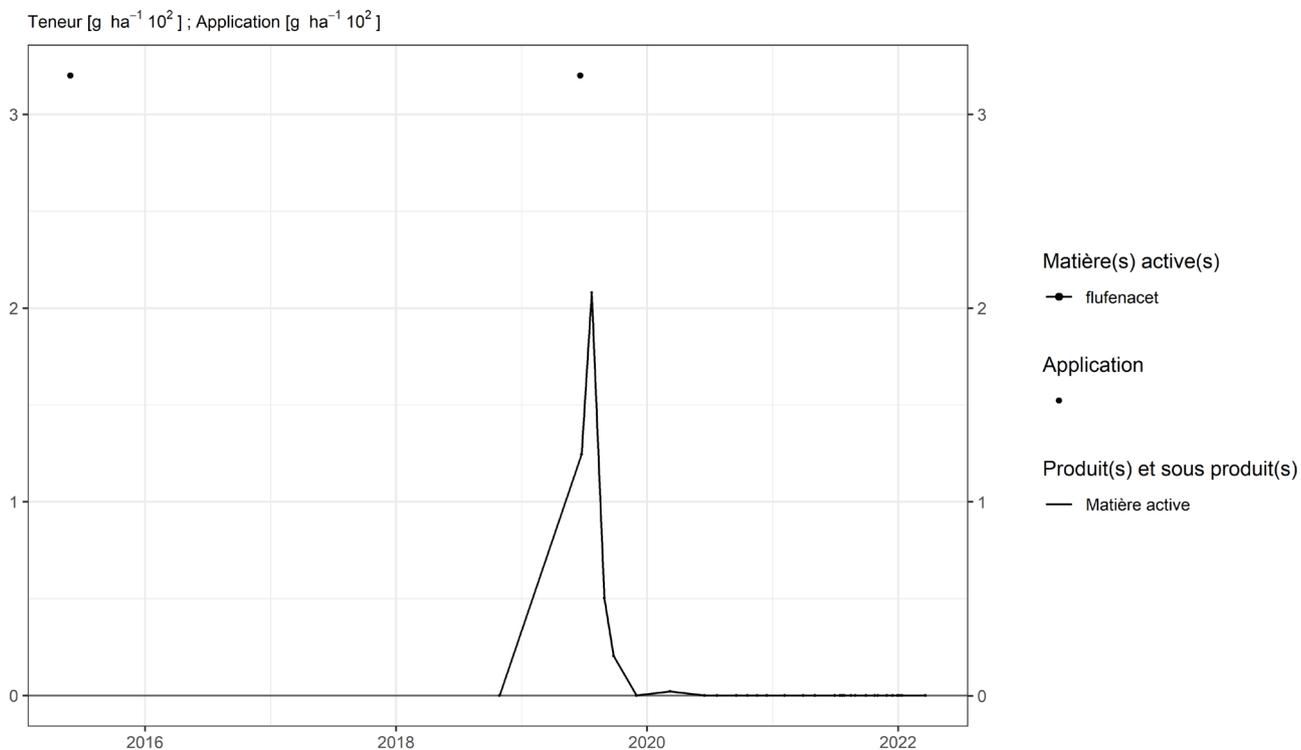


Figure 89. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR4.

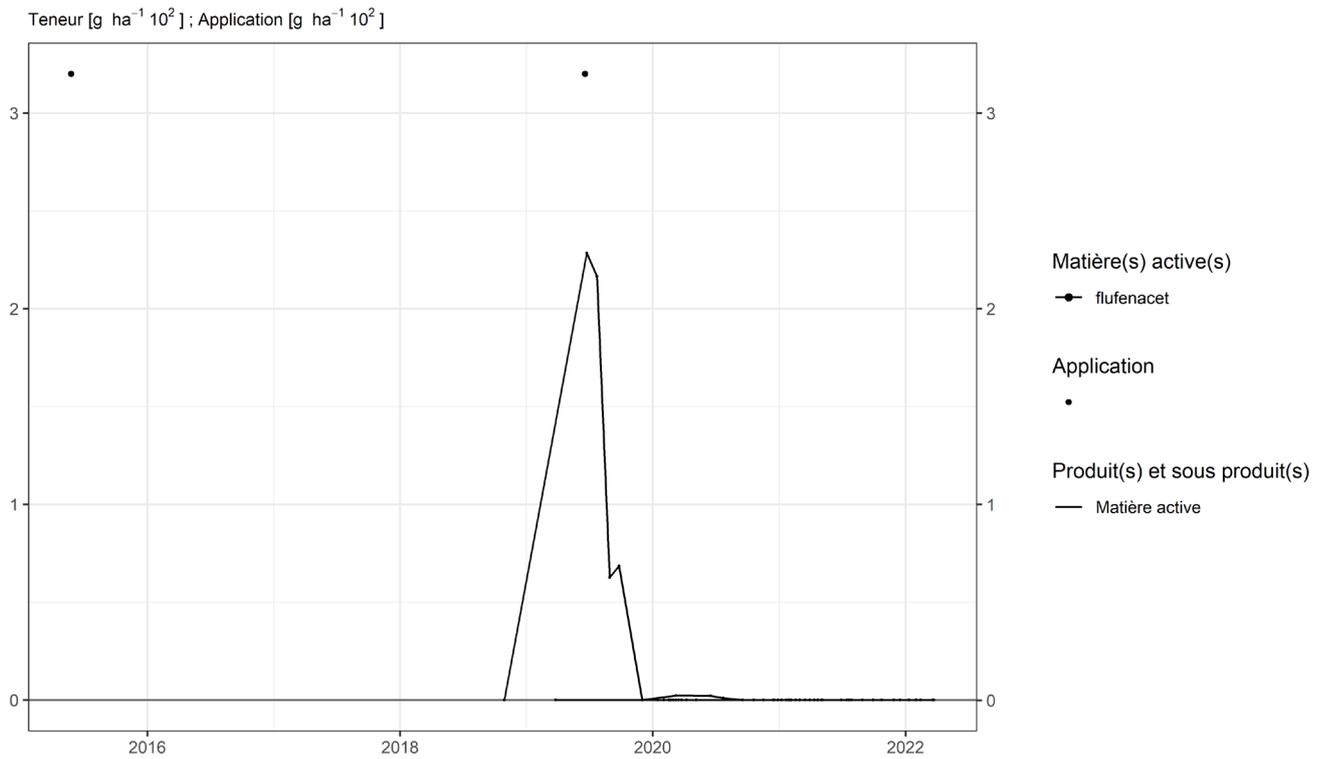


Figure 90. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR8.

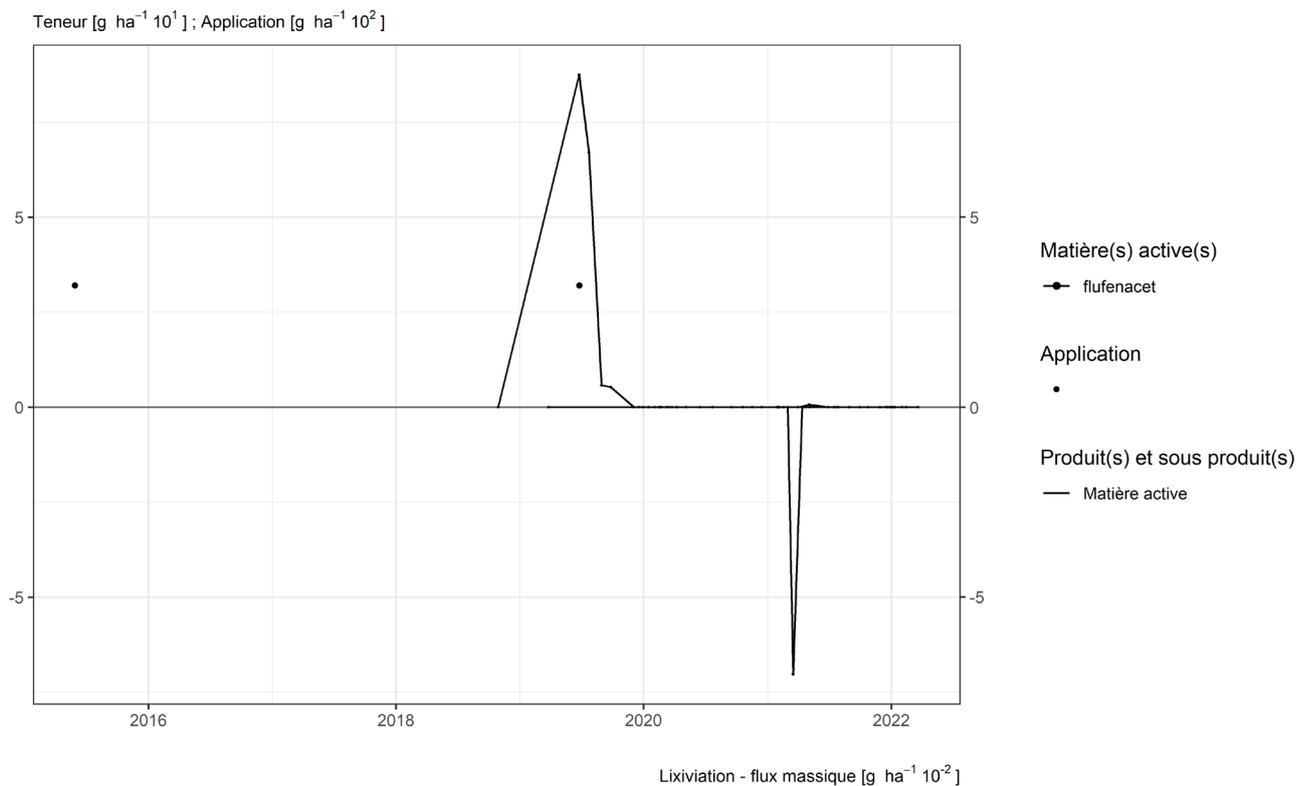


Figure 91. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

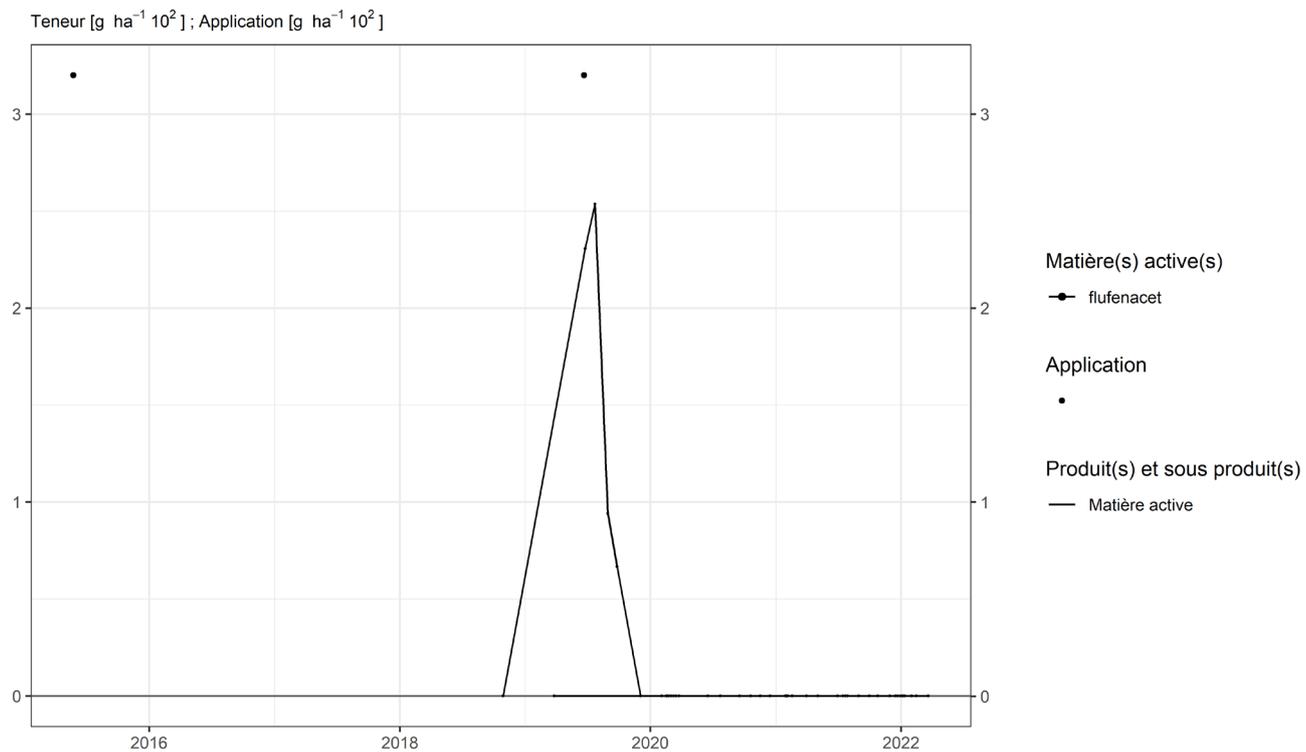


Figure 92. Applications et suivi de la teneur en flufenacet dans le sol de la parcelle SR16.

4.14. Fluopyram

Le fluopyram est un fongicide SDHI utilisé sur culture de haricot dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques années (3-4 ans) après un traitement, les observations (figures 93 et 94) sont les suivantes :

- sur la parcelle Chemin de fer, un apport de 200 g/ha réalisé en 2017 conduit en 2020 à une concentration dans le sol dans l'ordre d'une centaine de grammes par hectare et en 2021 à une concentration dans le sol de l'ordre de 75 g/ha ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport de 200 g/ha réalisé en 2018 conduit à une concentration dans le sol de l'ordre de 75 g/ha trois ans après l'application.

Les résultats d'analyses de sol réalisées sur la parcelle Sole 4 ne sont pas expliqués (une autre SDHI est utilisée par l'agriculteur pour protéger sa culture de froment).

EAU

Cette matière active n'a pas été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

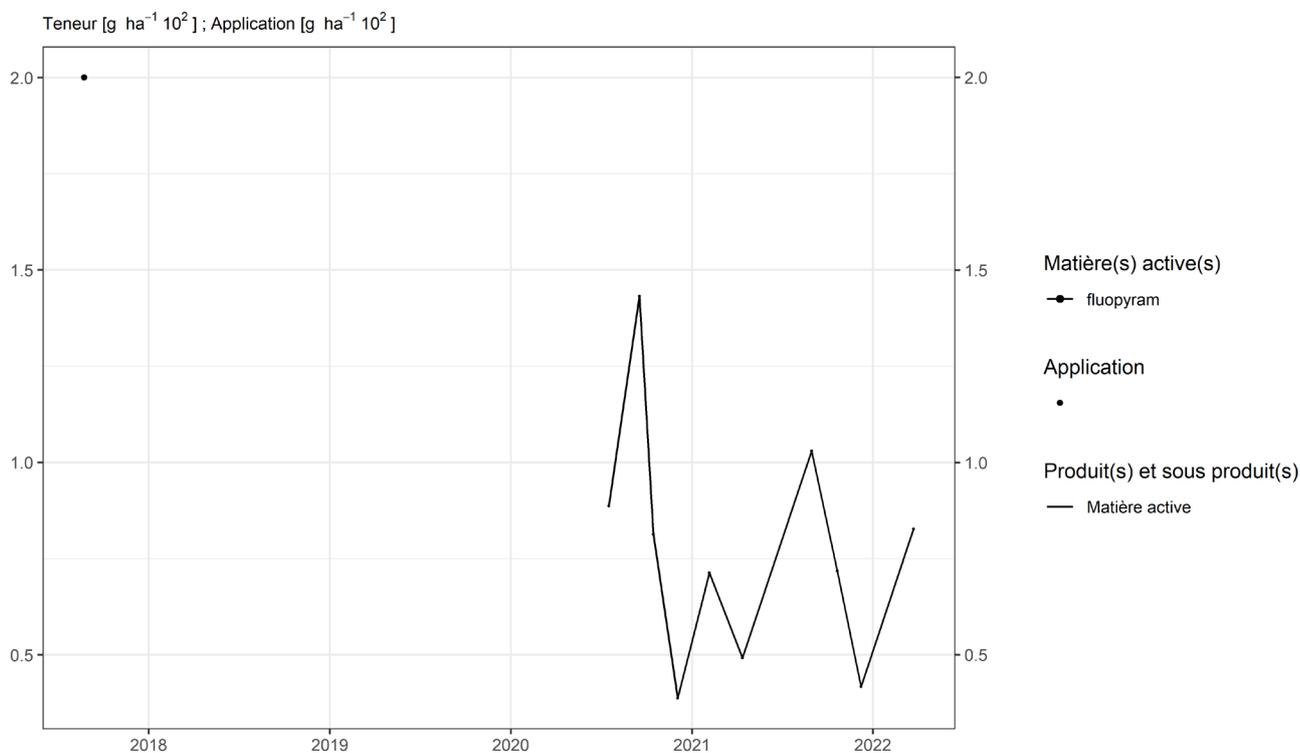


Figure 93. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

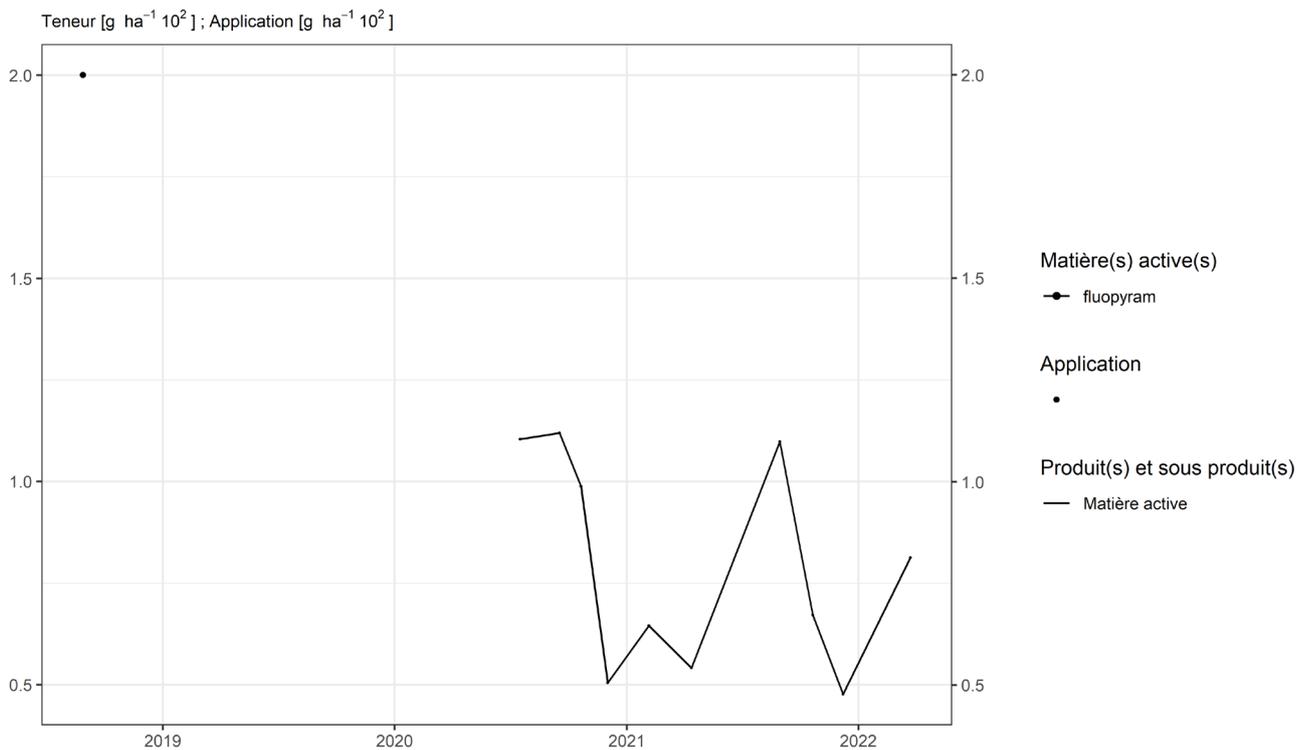


Figure 94. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Bovenistier.

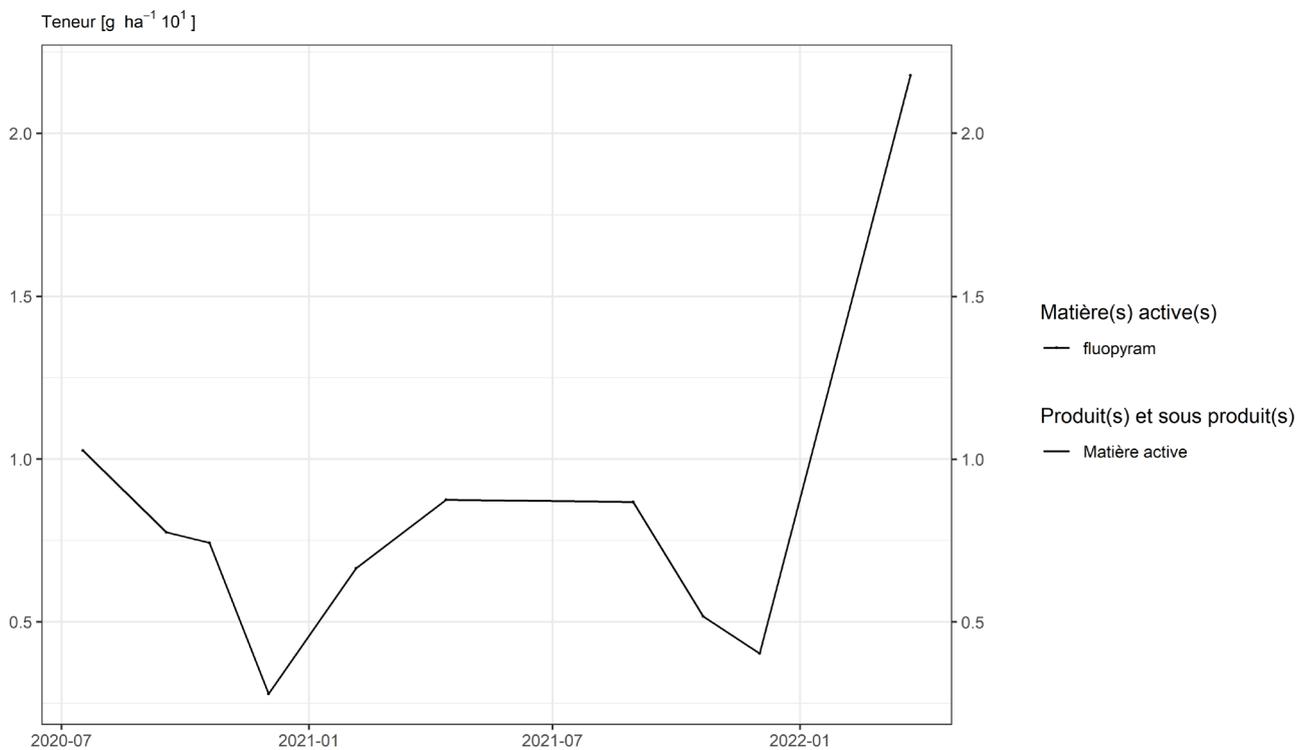


Figure 95. Applications et suivi de la teneur en fluopyram dans le sol de la parcelle Sole 4.

4.15. Fluxapyroxad

Le fluxapyroxad est un fongicide utilisé sur culture de froment dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques années après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova (figure 96), l'apport d'environ 90 g/ha réalisé en 2013 laisse, en 2021, une concentration dans le sol de l'ordre d'une vingtaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Sole 4 (figure 97), deux apports (réalisés en 2017 et 2019) totalisant près de 200 g/ha conduisent en 2021 à une concentration d'environ 60 g/ha.

EAU

Cette matière active n'a jamais été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

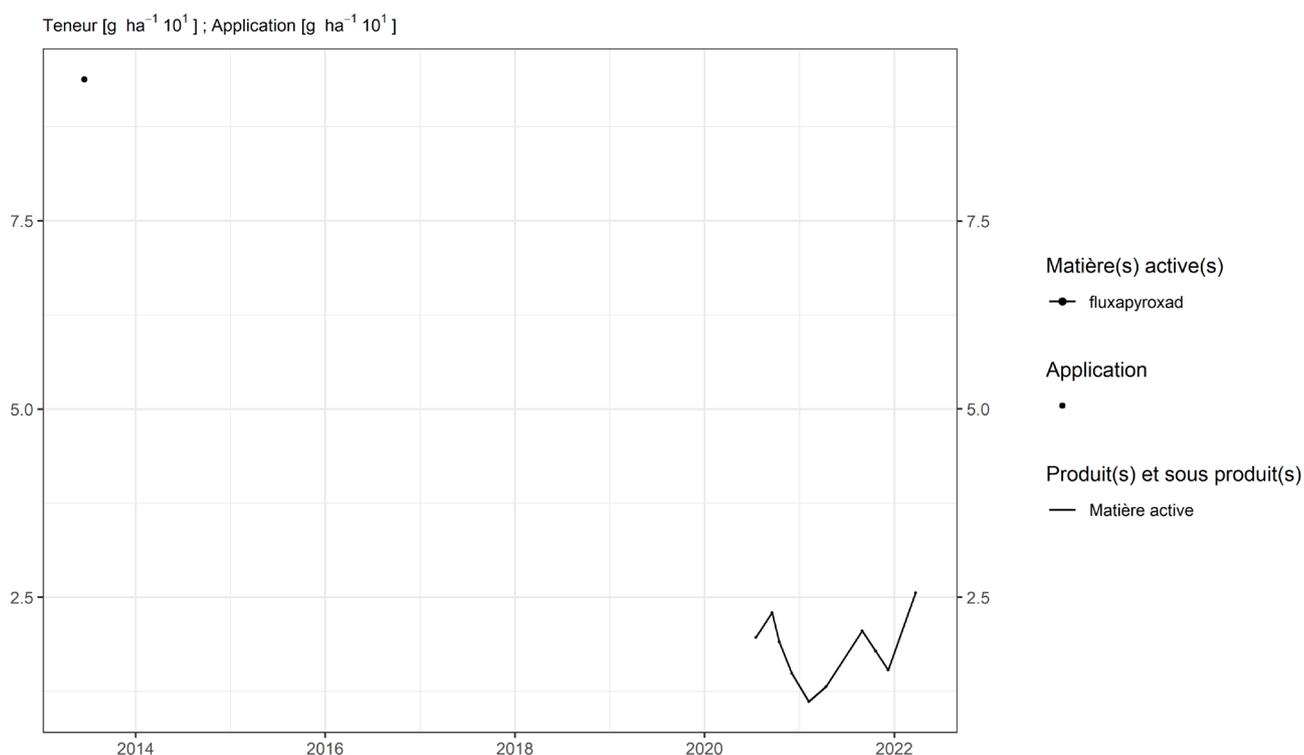


Figure 96. Applications et suivi de la teneur en fluxapyroxad dans le sol de la parcelle Haute Bova.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10¹]

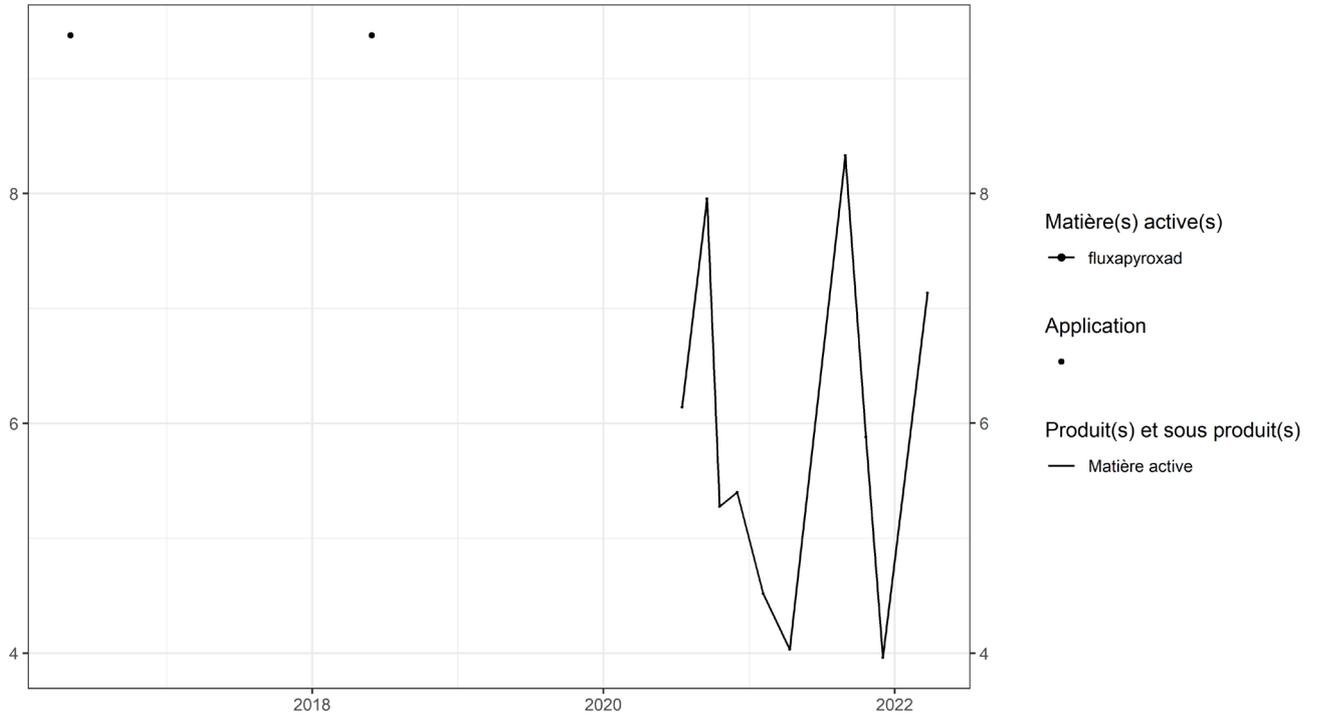


Figure 97. Applications et suivi de la teneur en fluxapyroxad dans le sol de la parcelle Sole 4.

4.16. Imidaclopride

L'imidaclopride est un insecticide utilisé sur pépinière d'arbres fruitiers dans une parcelles équipée d'un lysimètre.

SOL

Deux apports de 66 g/ha ont été réalisés en 2011 et 2012 sur la parcelle Sole 4 (figure 98). Le flux de cette matière active (analyses réalisées par la SWDE) au cours des périodes de lixiviation 2011-2012 et 2012-2013 est de l'ordre de 0,005 g/ha.

EAU

Les analyses d'eau réalisées depuis 2018 n'ont pas décelé cette matière active.

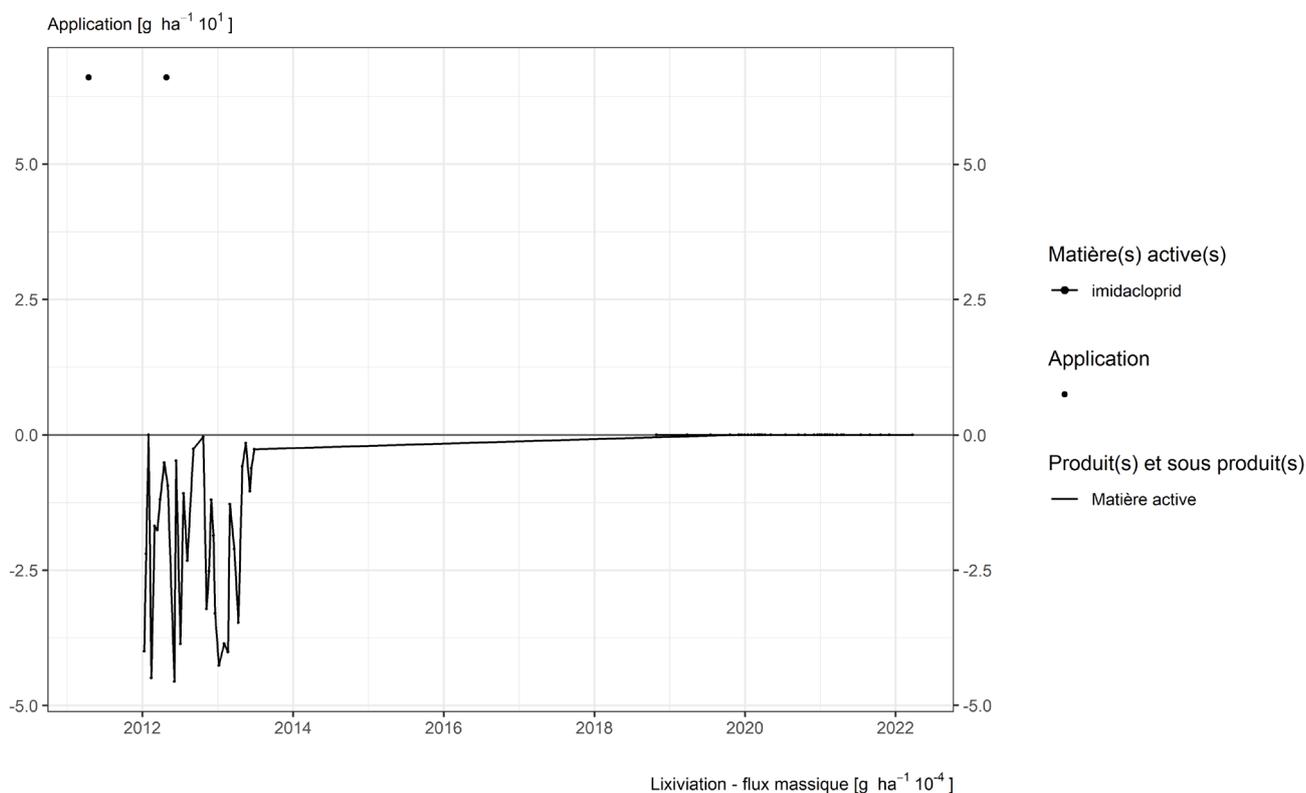


Figure 98. Applications et suivi de la teneur en imidaclopride dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.

Les autres parcelles équipées d'un lysimètres n'ont pas reçu de traitement de cette matière active depuis 2010 (Hesbaye) et 2005 (Sol-Résidus).

4.17. Mesotrione

La mesotrione est un herbicide utilisé sur culture de maïs dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques jours après une application de cette matière active sur les parcelles Sol-Résidus (figures 99 à 102), elle est décelée dans le sol à une concentration équivalente à l'apport (quelques dizaines de grammes par hectare).

Un mois après l'apport, cette matière n'est plus décelée dans le sol.

EAU

Mis à part deux observations, cette matière active n'est pas présente aux exutoires des lysimètres.

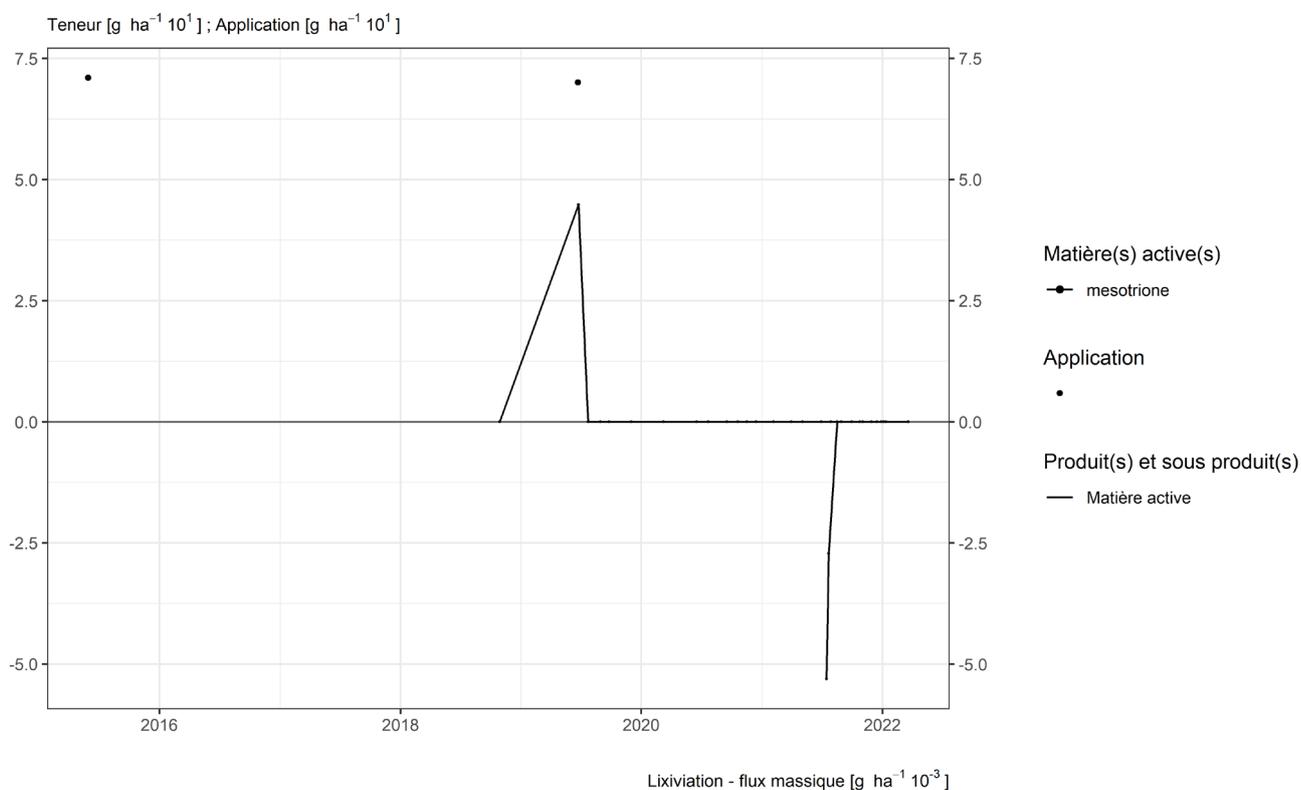


Figure 99. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR4.

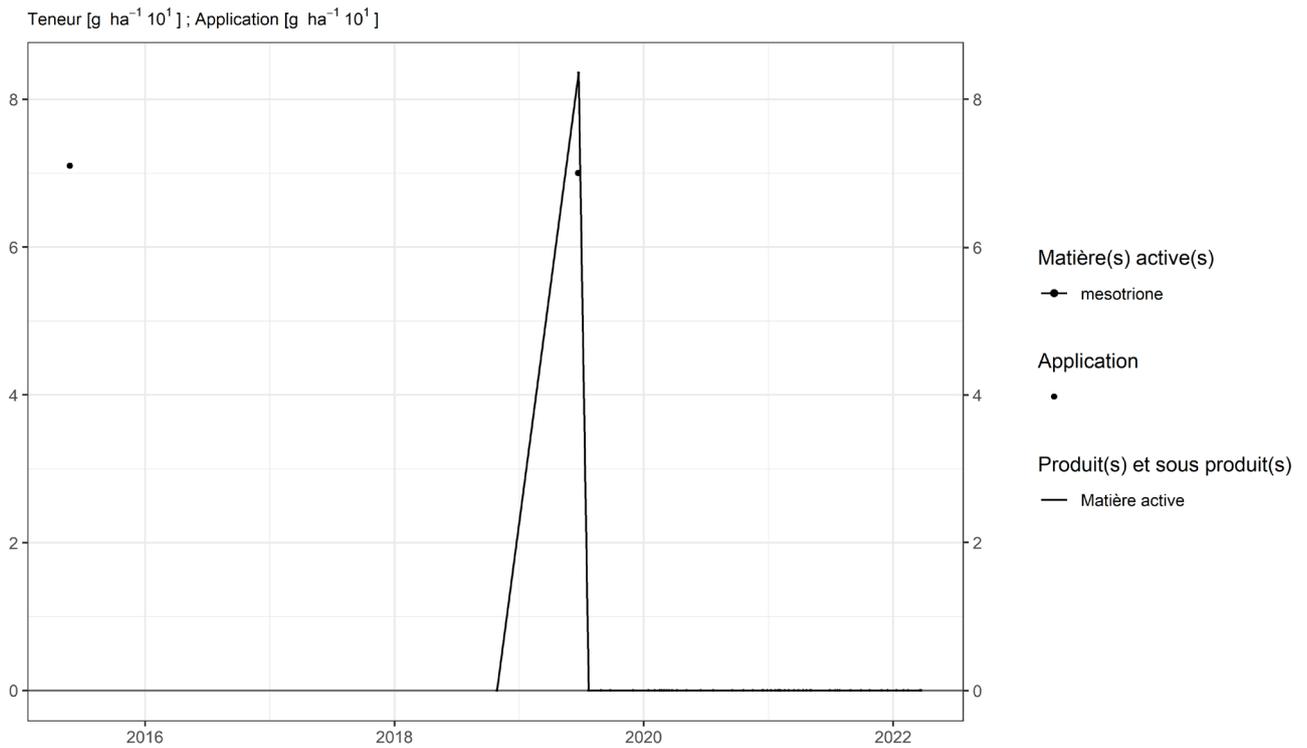


Figure 100. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR8.

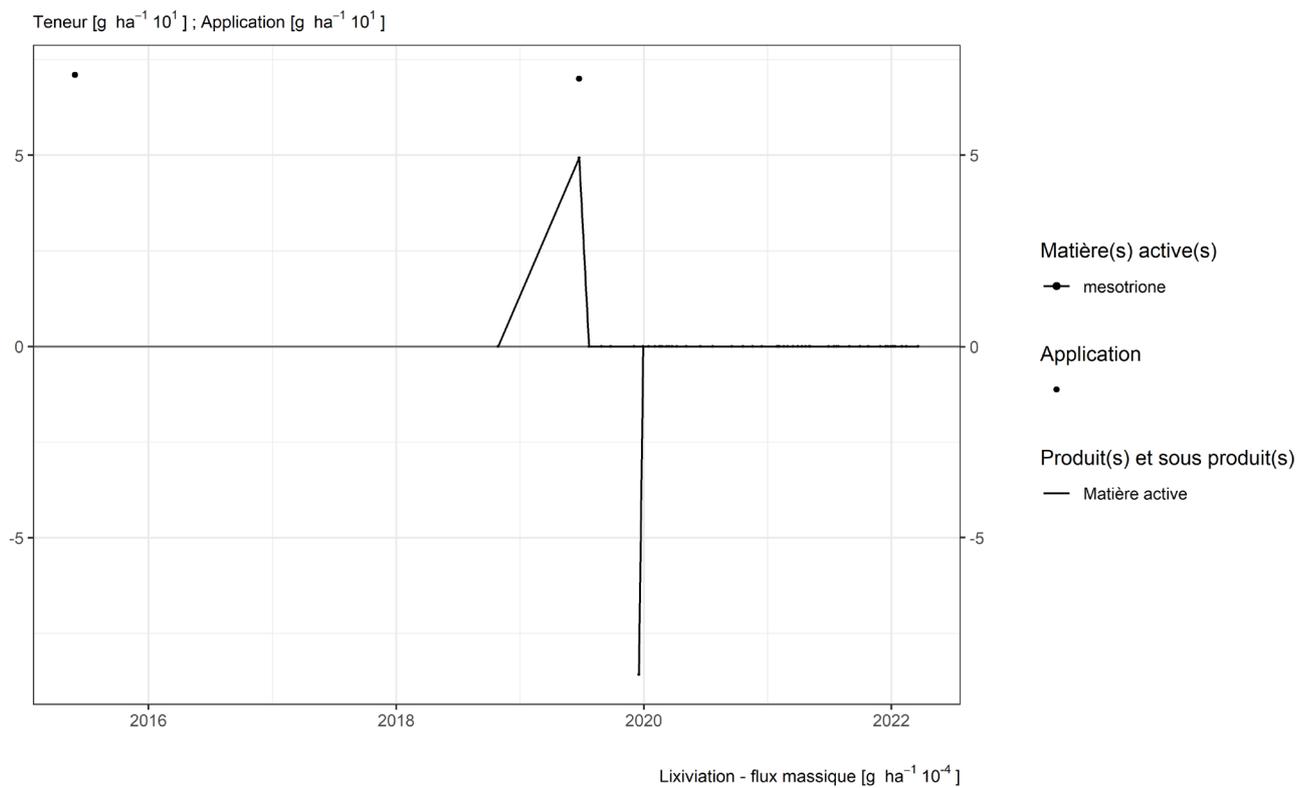


Figure 101. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR12.

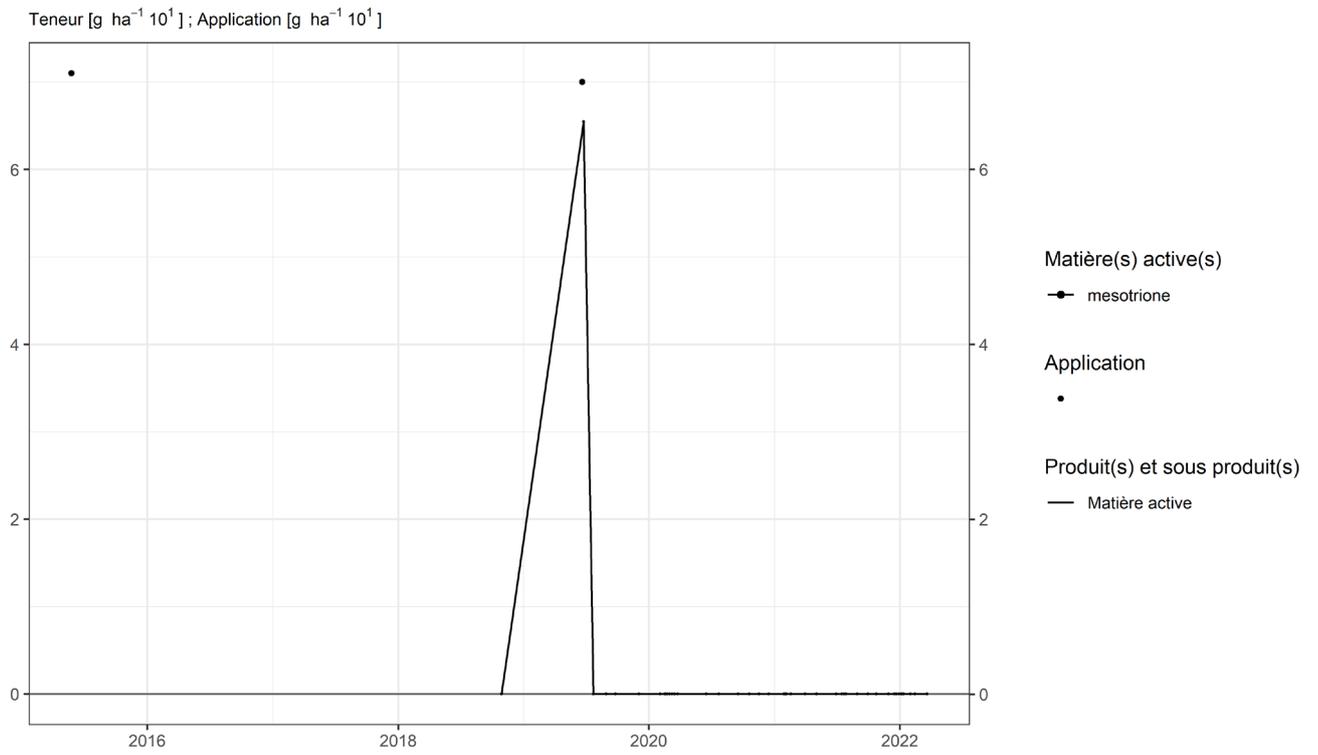


Figure 102. Applications et suivi de la teneur en mesotrione dans le sol de la parcelle SR16.

4.18. Metamitron

Le metamitron est un herbicide utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Les observations (figures 103 à 110) réalisées dans les huit parcelles équipées de lysimètres offrent divers enseignements.

Quelques jours après l'apport, seul le metamitron desamino est visible (Haute Bova et Chemin de fer en 2018) : un apport d'un peu plus de 500 g/ha engendre une concentration de ce métabolite d'une centaine de grammes par ha. Il n'est plus mesuré dans les échantillons prélevés ultérieurement car ce premier échantillon avait été analysé par l'ISSEP, les suivants par le CRAW (qui ne quantifie pas ce métabolite).

Quelques semaines après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport d'un peu plus de 500 g/ha réalisé au printemps 2018 engendre, fin d'été de la même année, une concentration dans le sol de l'ordre d'une dizaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Chemin de fer, un même traitement en 2018 engendre, fin d'été de la même année, une concentration dans le sol d'environ 80 g/ha ;
- sur la parcelle Bovenistier, trois apports totalisant un peu plus de 1400 g/ha au printemps 2019 conduisent, en été 2019 à une concentration dans le sol de 50 g/ha ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, trois apports totalisant un peu plus de 1500 g/ha ont été réalisés au printemps 2021. La concentration dans le sol a atteint en été environ 20 g/ha.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes indiquent des concentrations dans le sol qui n'excèdent pas la dizaine de grammes par hectare.

A plus long terme (environ quatre ans après l'apport), la substance n'est plus décelée dans le sol (Haute Bova, Chemin de fer, Bovenistier, Sole 4).

EAU

Cette matière active a été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires de trois des quatre lysimètres de Sol-Résidus fin du printemps 2021 (reprise d'écoulement suite à une forte pluviométrie) après des apports réalisés quelques semaines auparavant. Les flux observés (de 0,02 à 0,2 g/ha) représentent au maximum 0,01 % de la quantité apportée.

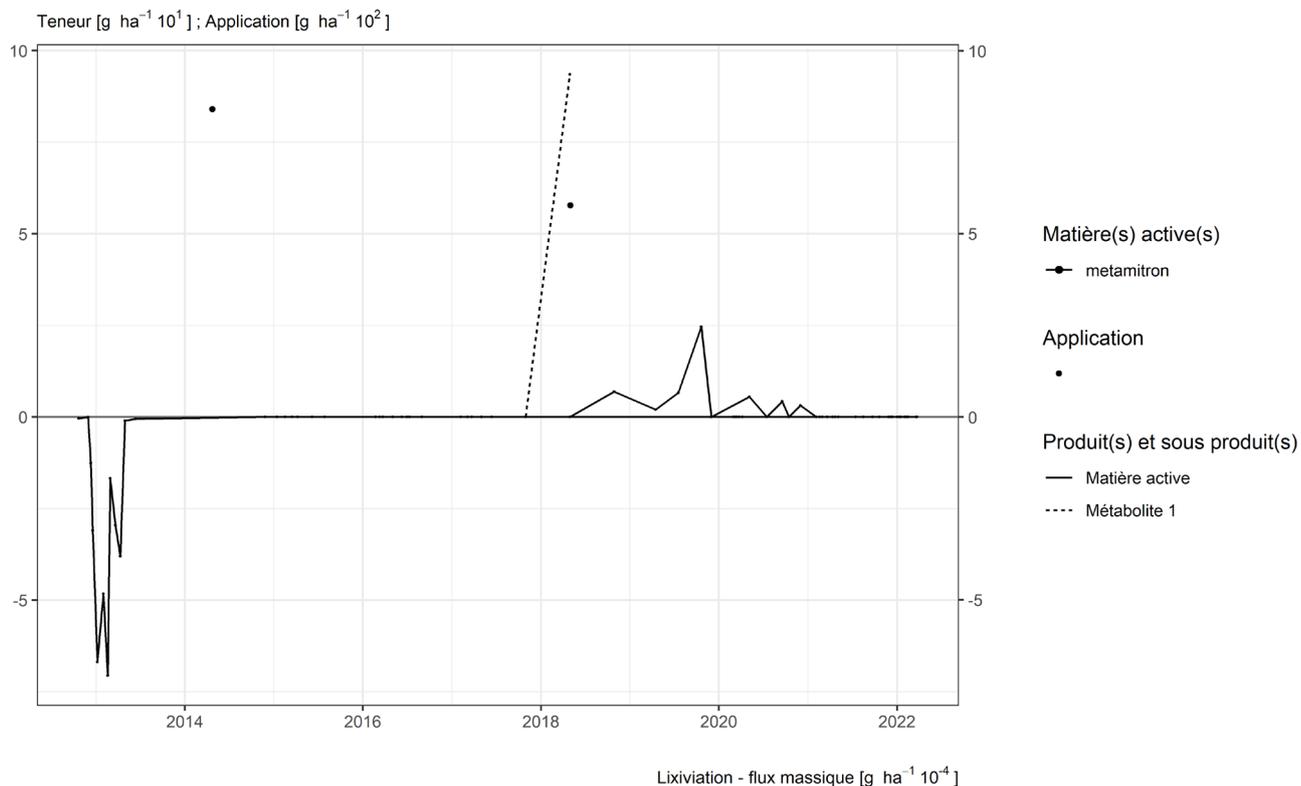


Figure 103. Applications et suivi de la teneur en metamitron et de son métabolite (metamitron desamino libellé ‘Métabolite 1’) dans le sol et l’eau de la parcelle Haute Bova.

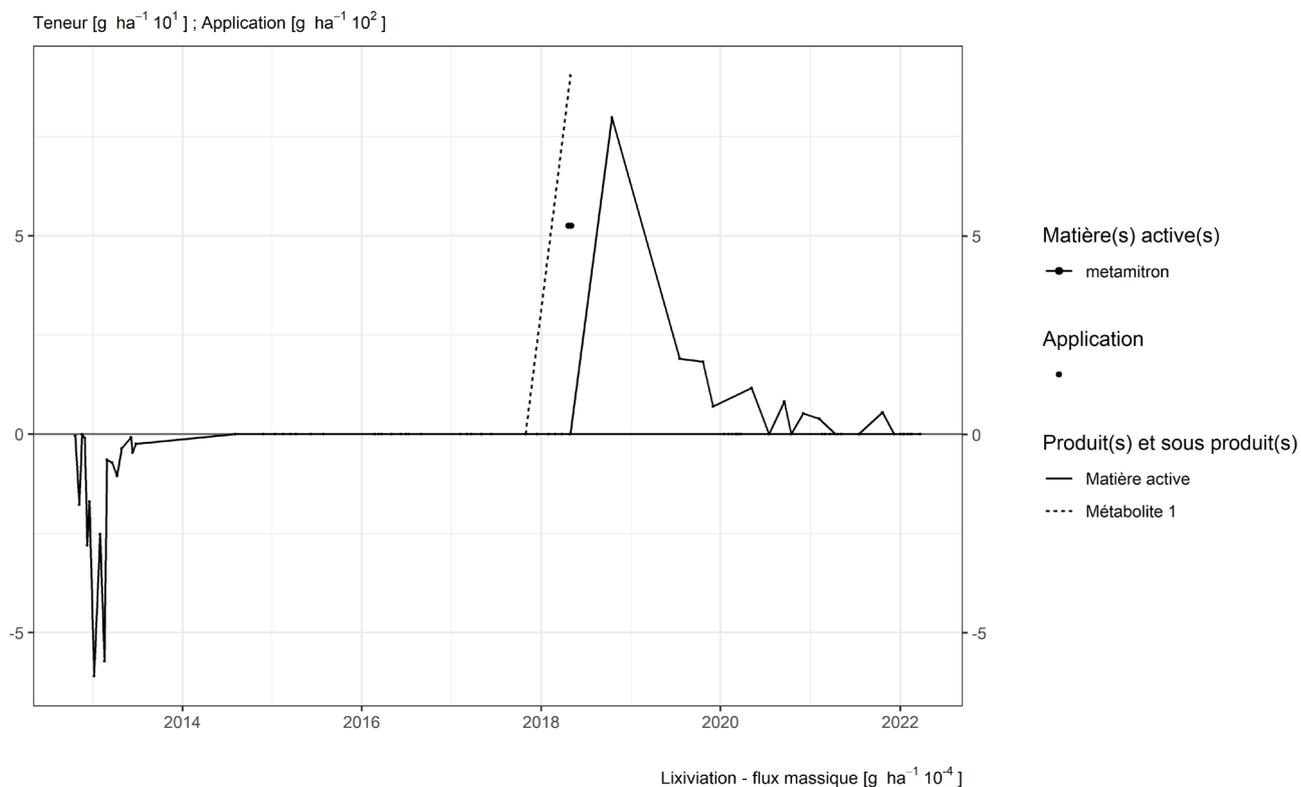


Figure 104. Applications et suivi de la teneur en metamitron et de son métabolite (metamitron desamino libellé ‘Métabolite 1’) dans le sol et l’eau de la parcelle Chemin de fer.

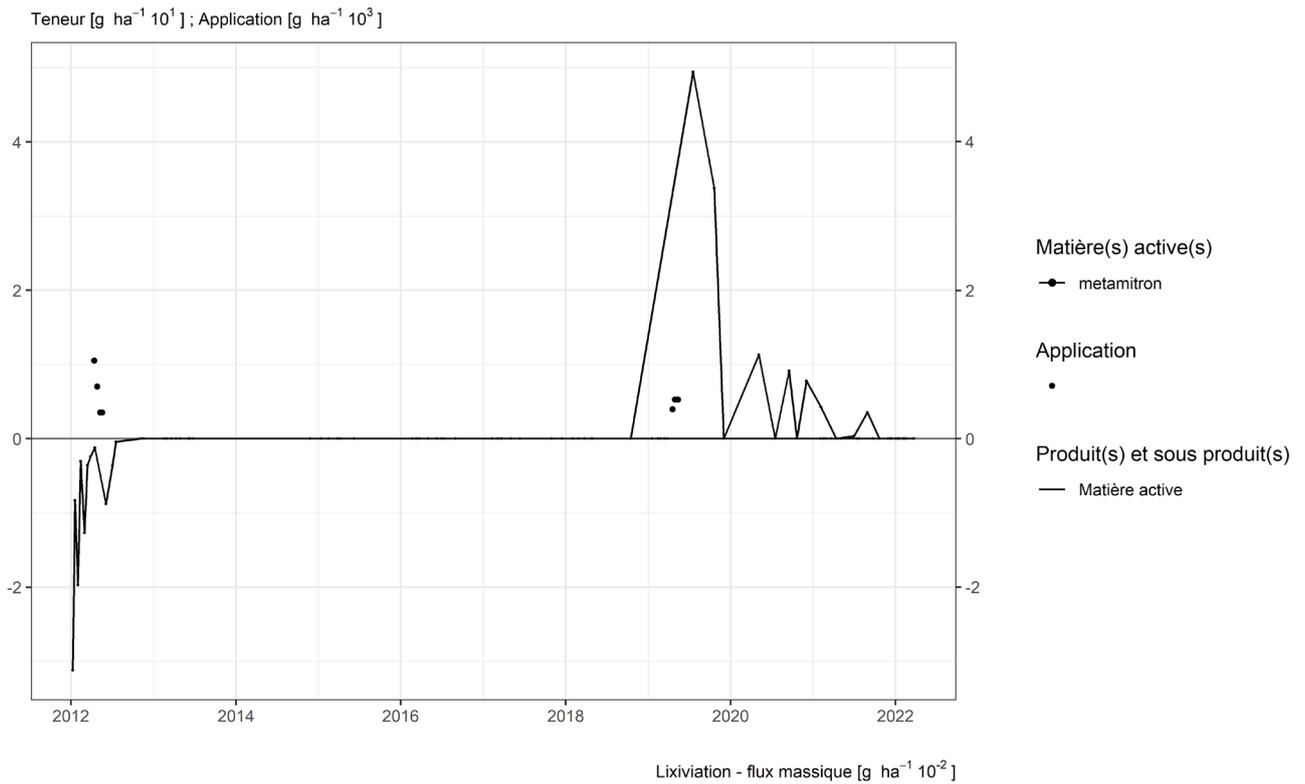


Figure 105. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.

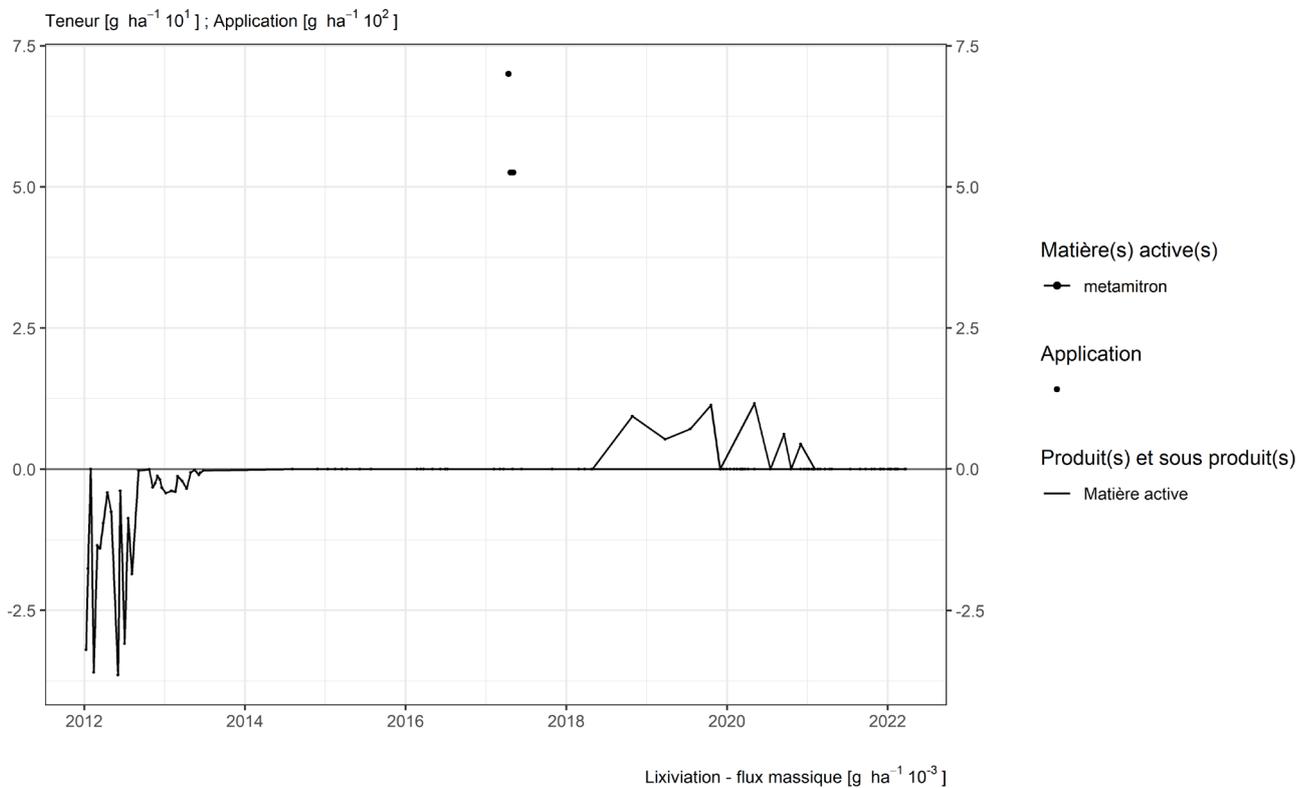


Figure 106. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10²]

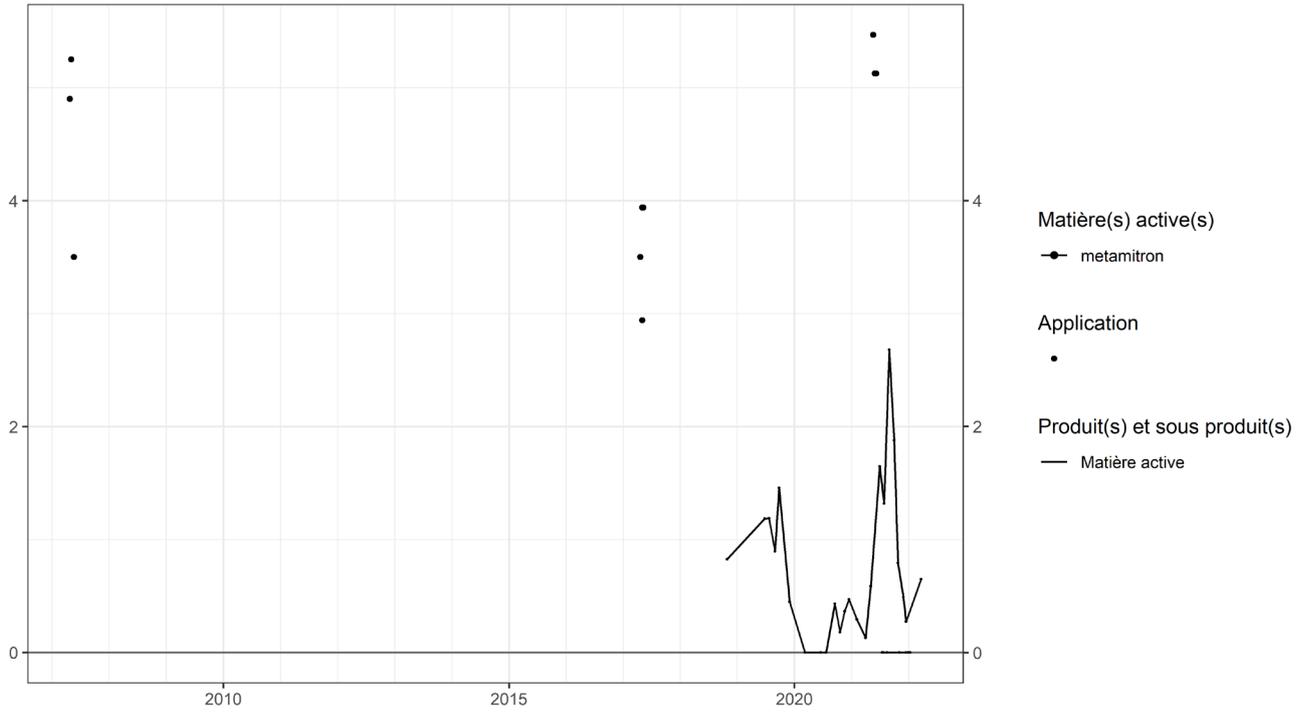


Figure 107. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol de la parcelle SR4.

Teneur [g ha⁻¹ 10¹]; Application [g ha⁻¹ 10²]

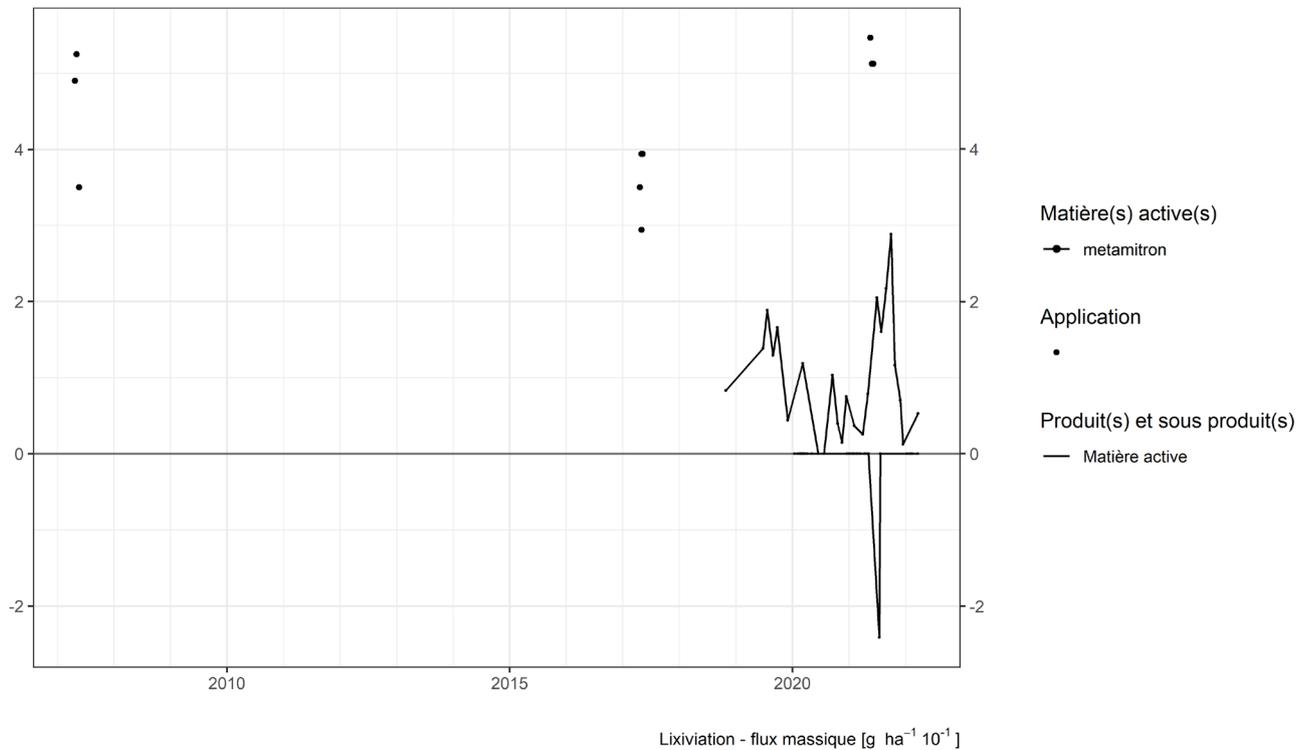


Figure 108. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

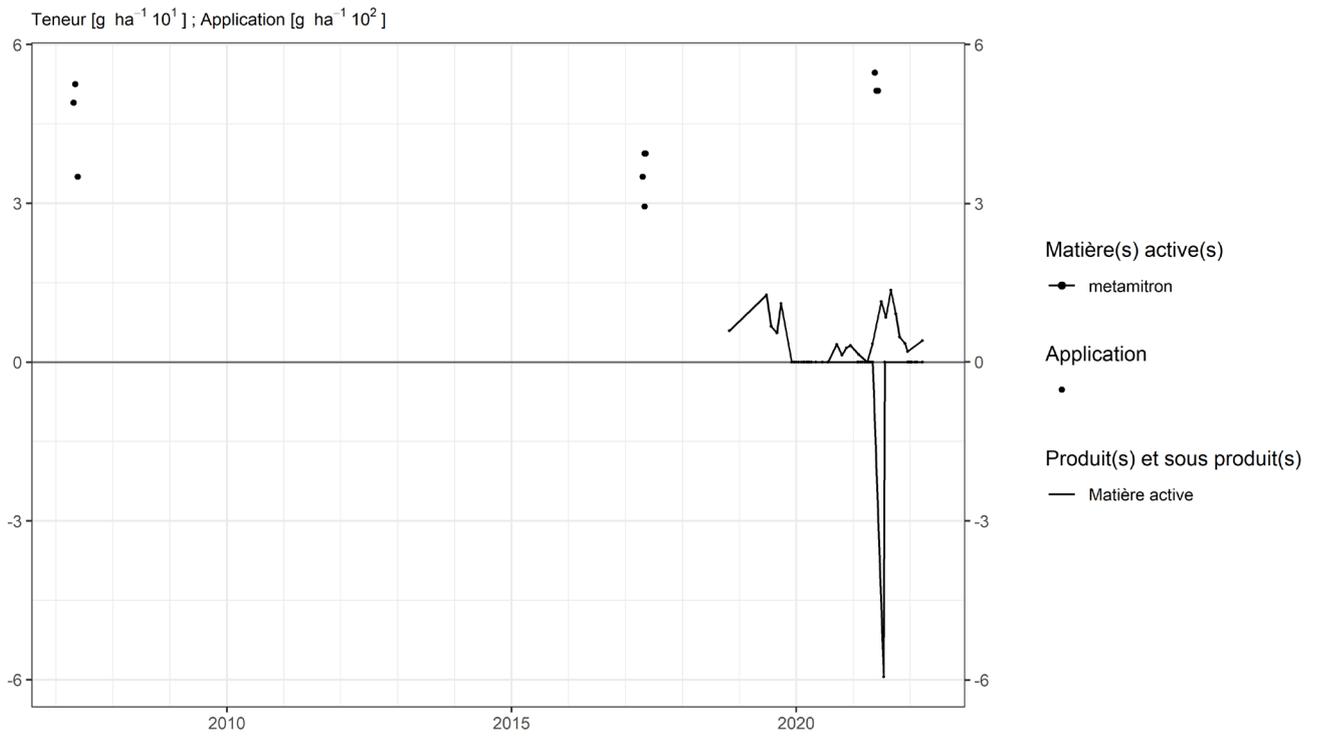


Figure 109. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

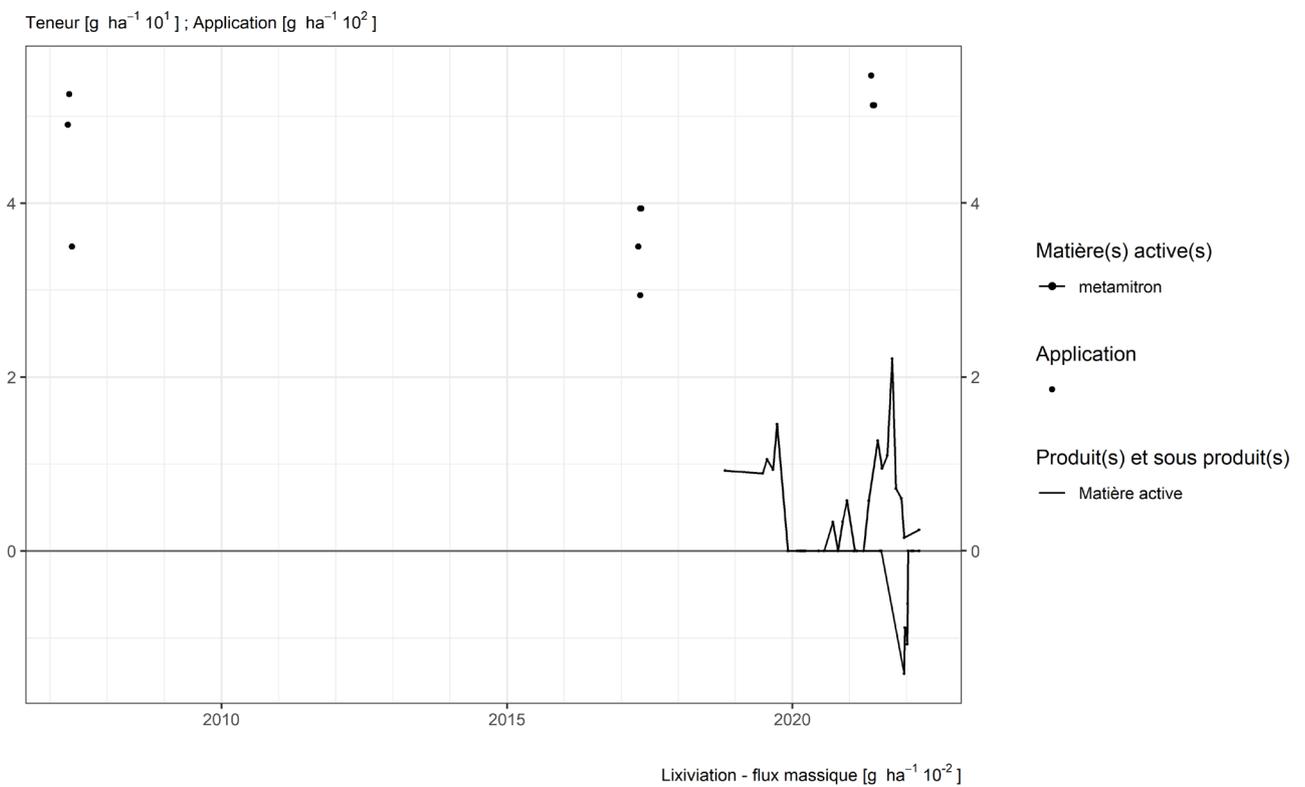


Figure 110. Applications et suivi de la teneur en metamitron dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.19. Metazachlore

Le metazachlore est un herbicide utilisé sur culture de colza et de poireaux dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Cette matière active n'a pas été 'récemment' utilisée sur les parcelles équipées d'un lysimètre.

Plusieurs années après un traitement, les observations suivantes peuvent être faites :

- sur la parcelle Bovenistier (figure 111), une application de 750 g/ha en 2010 n'a pas été décelée dans les analyses de sol réalisées à partir de 2016 ;
- sur les parcelles Sol-Résidus (figures 114 et 115), une application de 800 g/ha en 2008 n'a pas été décelée dans les analyses de sols réalisées à partir de 2018.

EAU

Les métabolites du metazachlore sont observés à l'exutoire des lysimètres jusqu'à cinq ans après le traitement (Bovenistier) et plus de douze ans après le traitement (Sol-Résidus).

Pour les parcelles Sole 4 (figure 112) et Chemin de fer (figure 113), aucun traitement de metazachlore n'est renseigné depuis 2010. Compte tenu des autorisations d'usages actuelles, sur ces deux parcelles, aucune culture susceptible d'être traitée avec cette matière active n'a été emblavée depuis 2002. Les flux de métabolites observés jusqu'en 2021 et 2017 à l'exutoire de ces deux lysimètres devraient donc être la conséquence d'un (ou plusieurs) traitement antérieur à 2002.

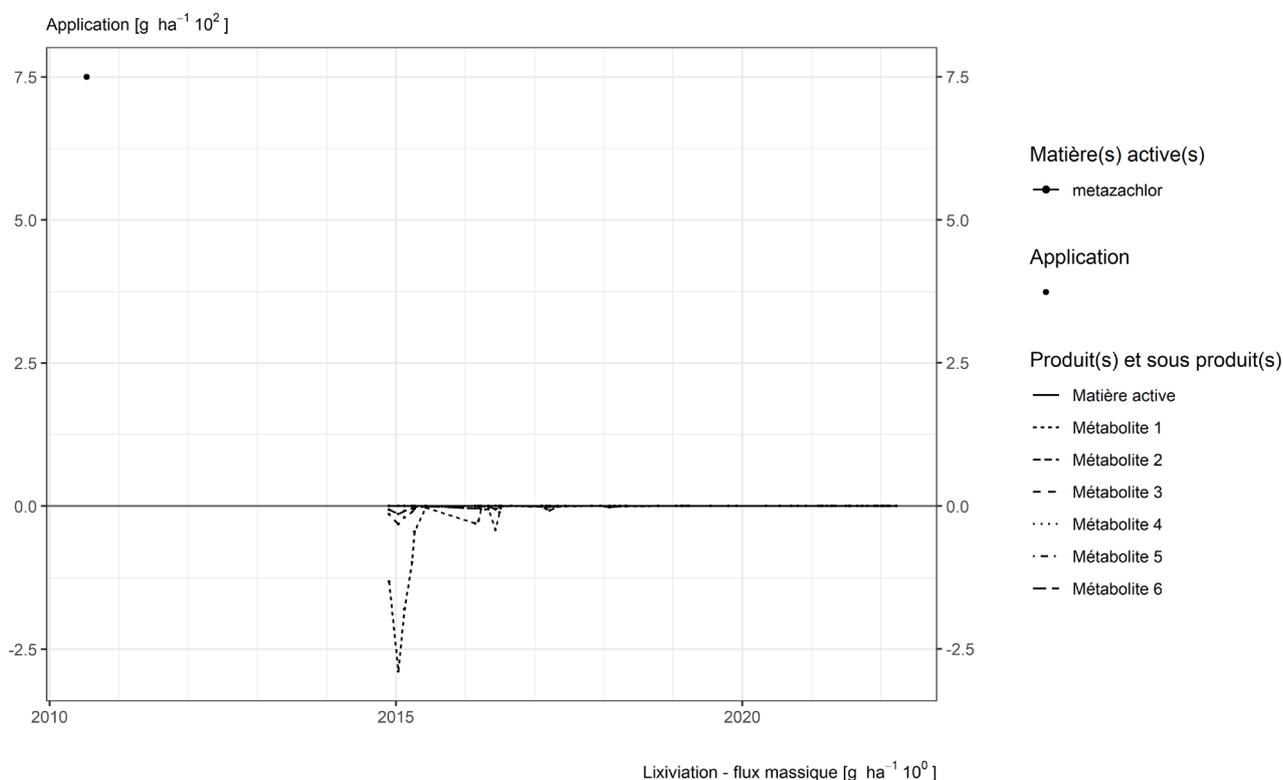


Figure 111. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.

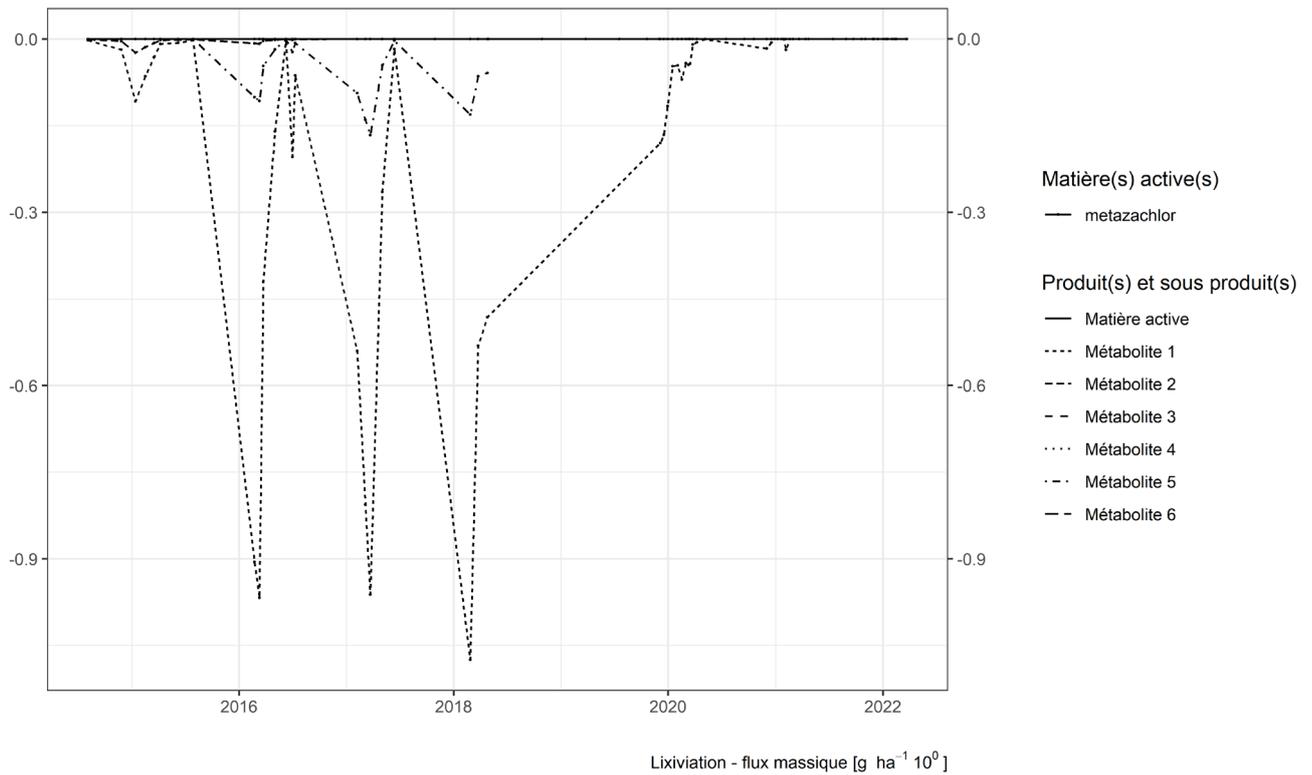


Figure 112. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.

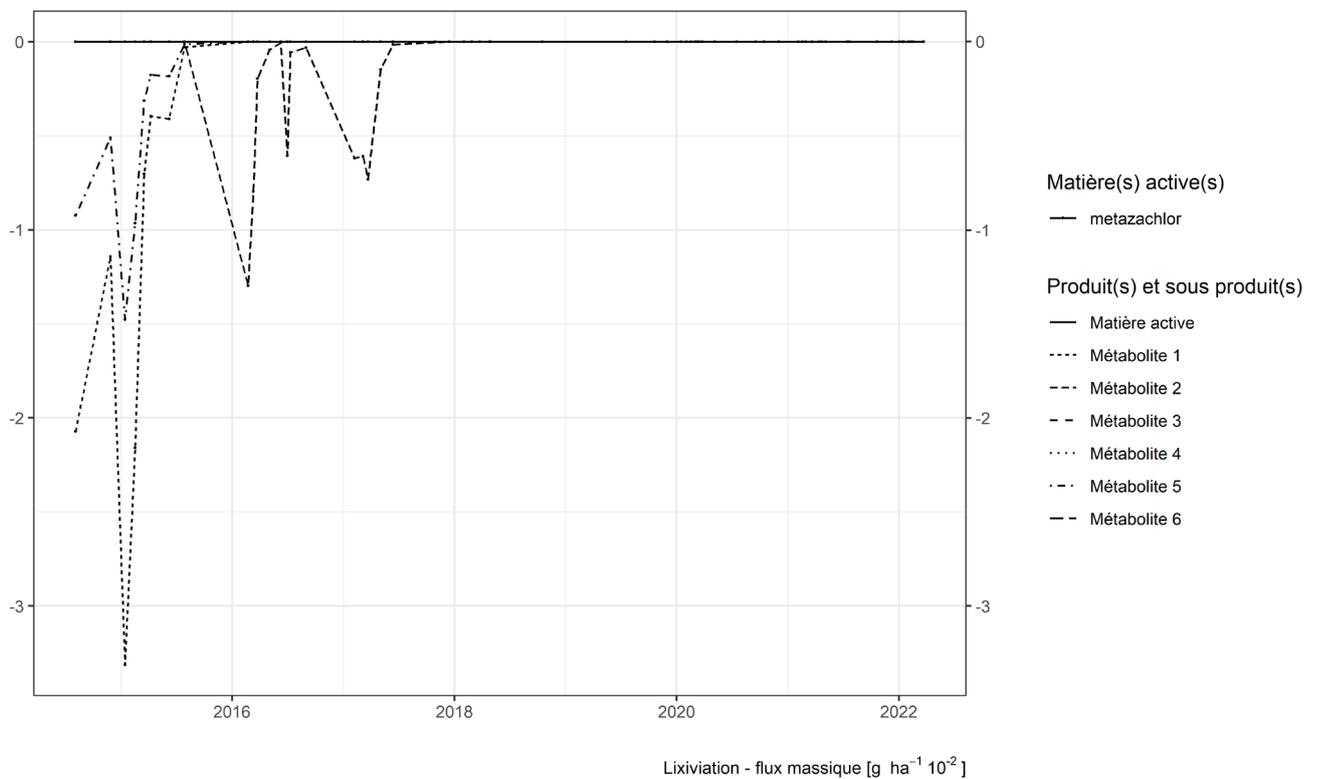


Figure 113. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.

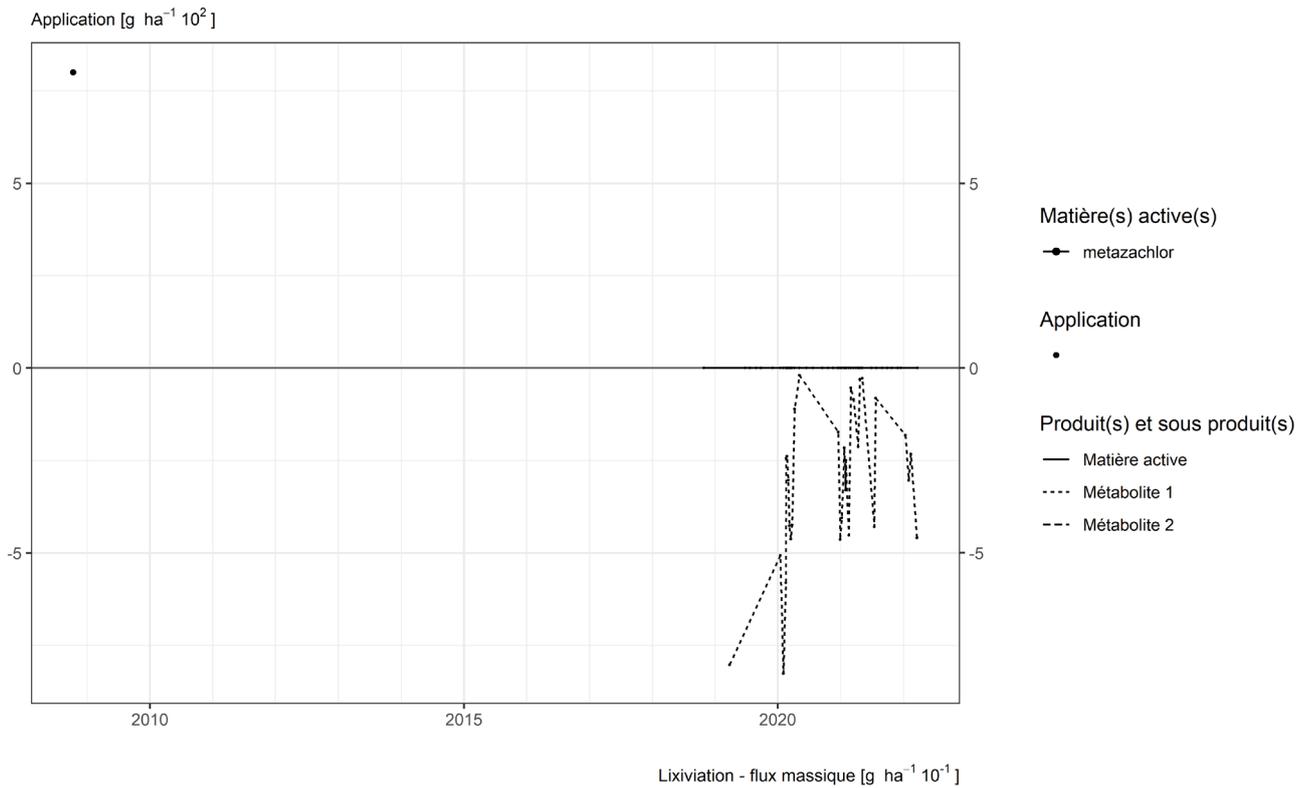


Figure 114. Applications et suivi de la teneur en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

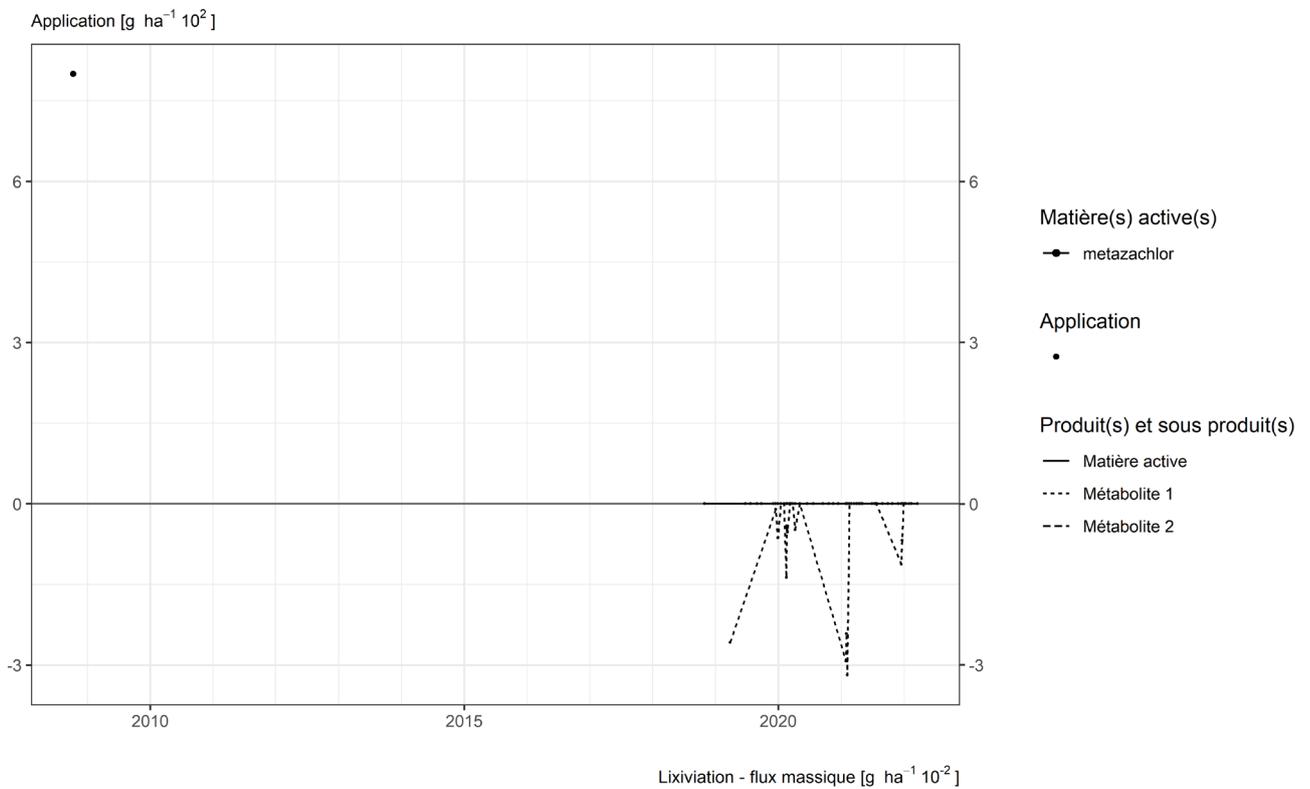


Figure 115. Applications et suivi de la teneur en en metazachlore dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

4.20. Metconazole

Le metconazole est un fongicide appliqué sur culture de colza ou de froment dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

Cette matière active a été appliquée en 2014 sur les parcelles Sol-Résidus et en 2017 sur la parcelle Haute Bova. Les analyses de sol réalisées depuis l'automne 2018 n'ont pas mis en évidence cette substance.

4.21. Metolachlore

Le metolachlore est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de betterave, chicorée, haricot ou fève des marais dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après le traitement, les observations (figures 116 à 123) sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport de près de 150 g/ha au printemps 2020 est décelé dans le même ordre de grandeur dans le sol.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, l'apport de près de 150 g/ha en juin 2020 laisse une quarantaine de grammes par hectare de résidu en septembre ;
- sur la parcelle Bovenistier, un apport d'environ 650 g/ha réalisé en juillet 2018 conduit à une concentration de l'ordre de 350 g/ha en octobre de la même année et un apport de 370 g/ha en juin 2019 conduit à une concentration d'une soixantaine de grammes par hectare en octobre de la même année ;
- sur la parcelle Sole 4, un apport réalisé fin avril 2019 (un peu plus de 750 g/ha) conduit à une concentration d'une quarantaine de grammes par hectare en juillet de la même année.

A plus long terme (environ trois ans après l'apport), la concentration résiduelle dans le sol n'excède pas la dizaine de gramme par hectare (Chemin de fer, Bovenistier, Sole 4).

Dans les parcelles Sol-Résidus, un traitement réalisé en 2006 n'est pas observé (à une exception près) dans les échantillons analysés depuis 2018.

EAU

Le métabolite ESA de cette matière active est régulièrement observé dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport de près de 800 g/ha réalisé au printemps 2014 va générer un flux de 3 g/ha au cours des trois années qui suivent ;
- sur la parcelle Chemin de fer, les trois apports réalisés en 2017 et 2018 (pour un total de près de 2000 g/ha) vont générer un flux d'environ 25 g/ha entre 2017 et 2022 ;
- sur la parcelle Sole 4, un apport d'un peu plus de 750 g/ha en 2019 va générer un flux d'environ 2 g/ha entre 2019 et 2022.



L'ordre de grandeur des flux du métabolite (de 0.1 à 1% de la quantité de matière active apportée) est nettement plus important que les ordres de grandeur de flux de matière active (de 0.0001% à 0.001% de la quantité de matière active apportée).

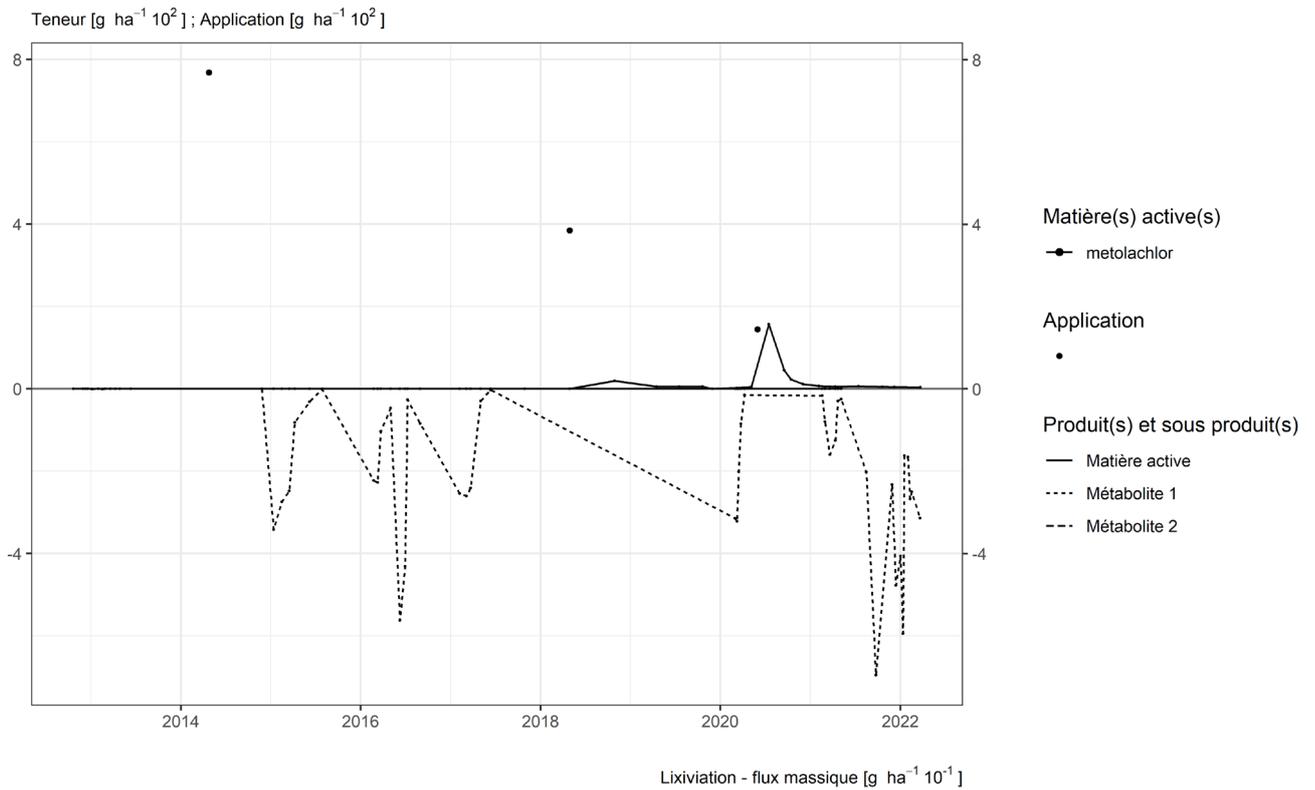


Figure 116. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Haute Bova.

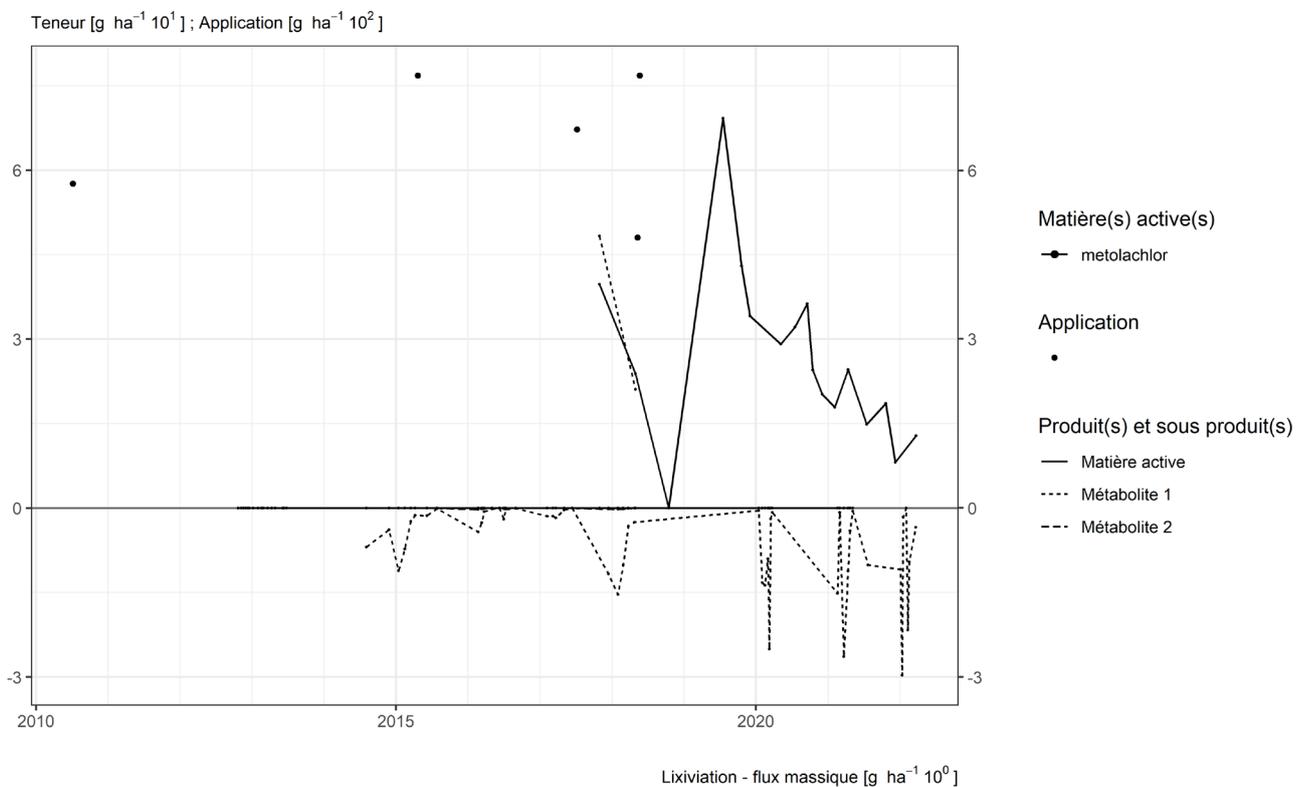


Figure 117. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Chemin de fer.

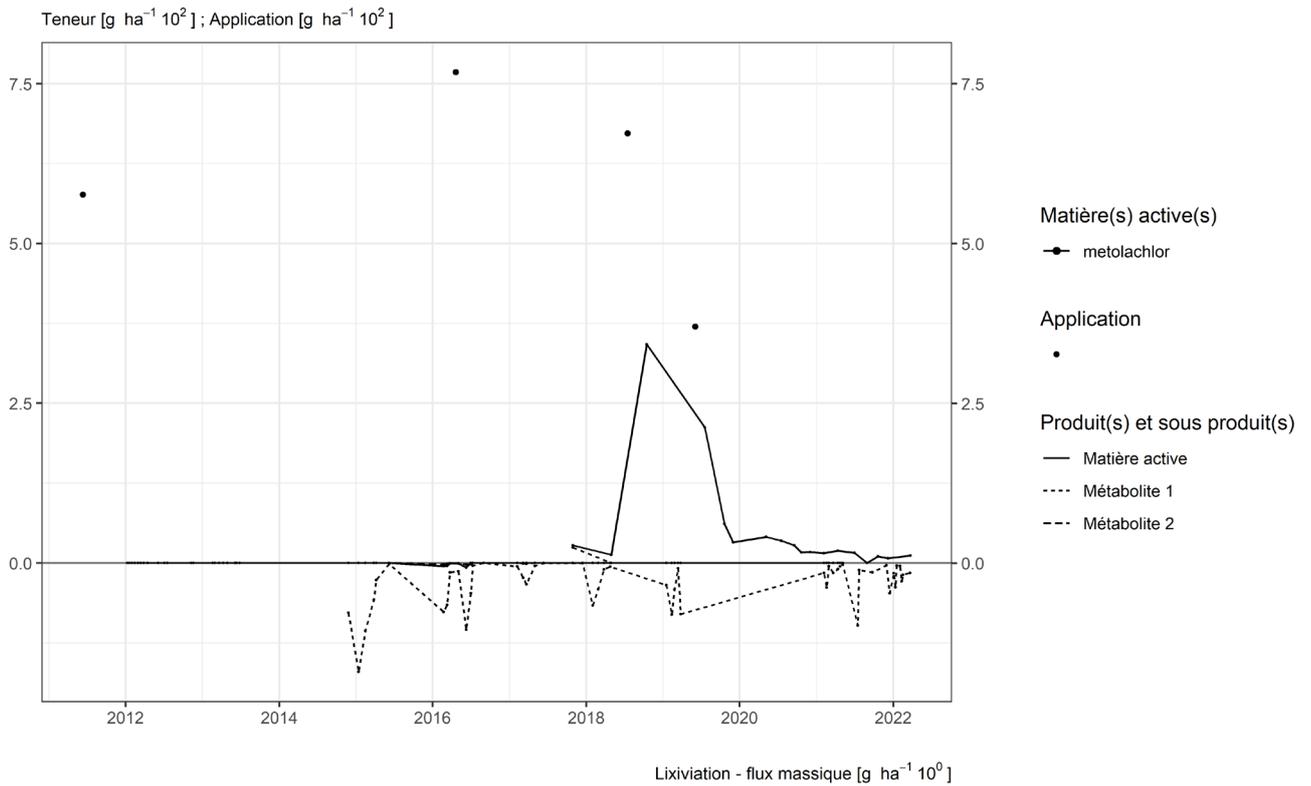


Figure 118. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Bovenistier.

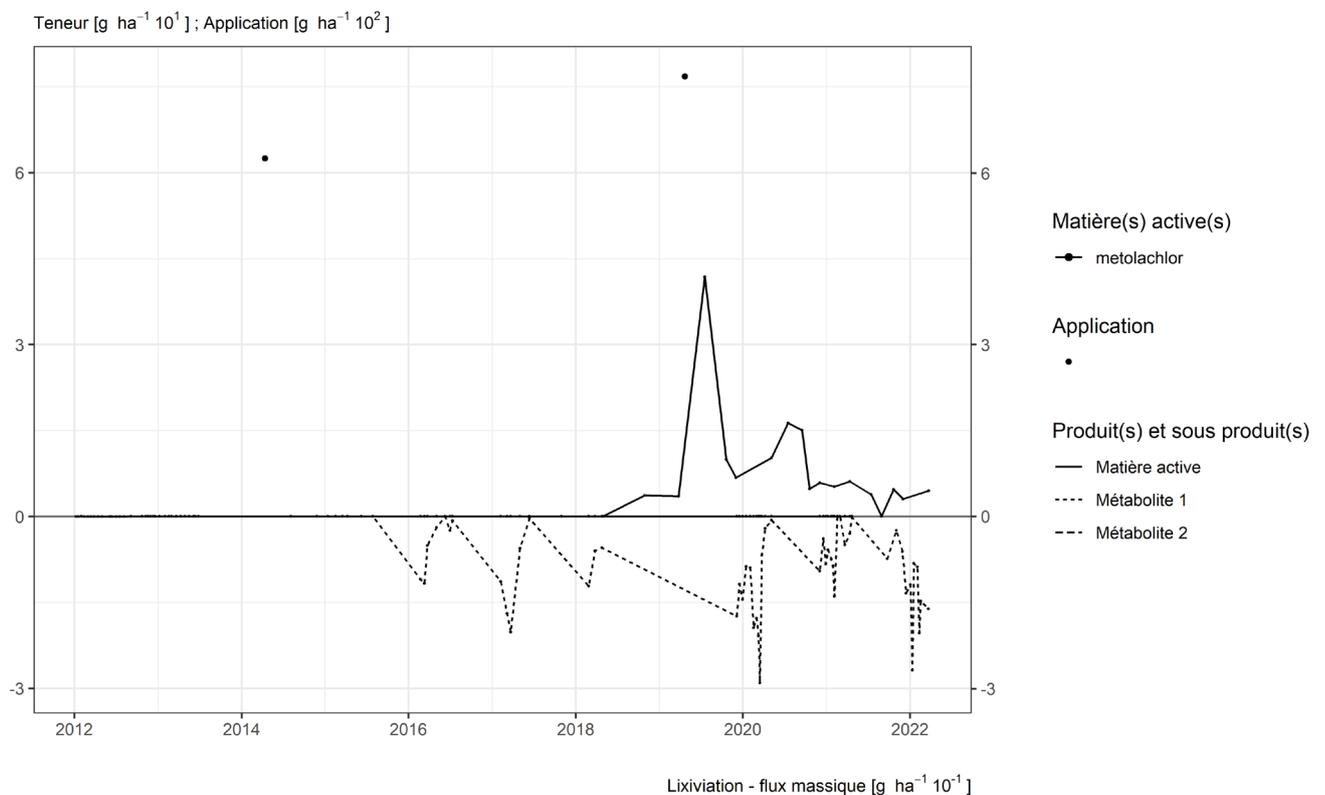


Figure 119. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle Sole 4.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^0$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

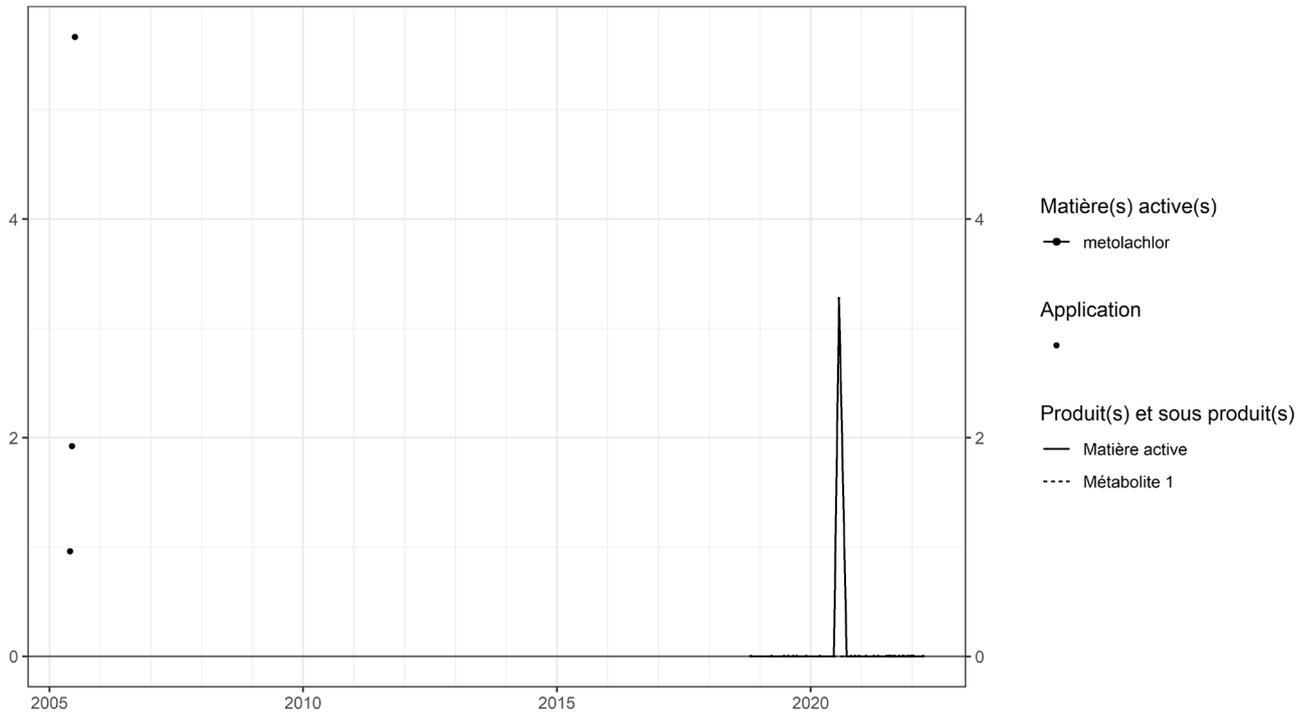


Figure 120. Applications et suivi de la teneur en metolachlore et en metolachlore ESA (métabolite 1) dans le sol de la parcelle SR4.

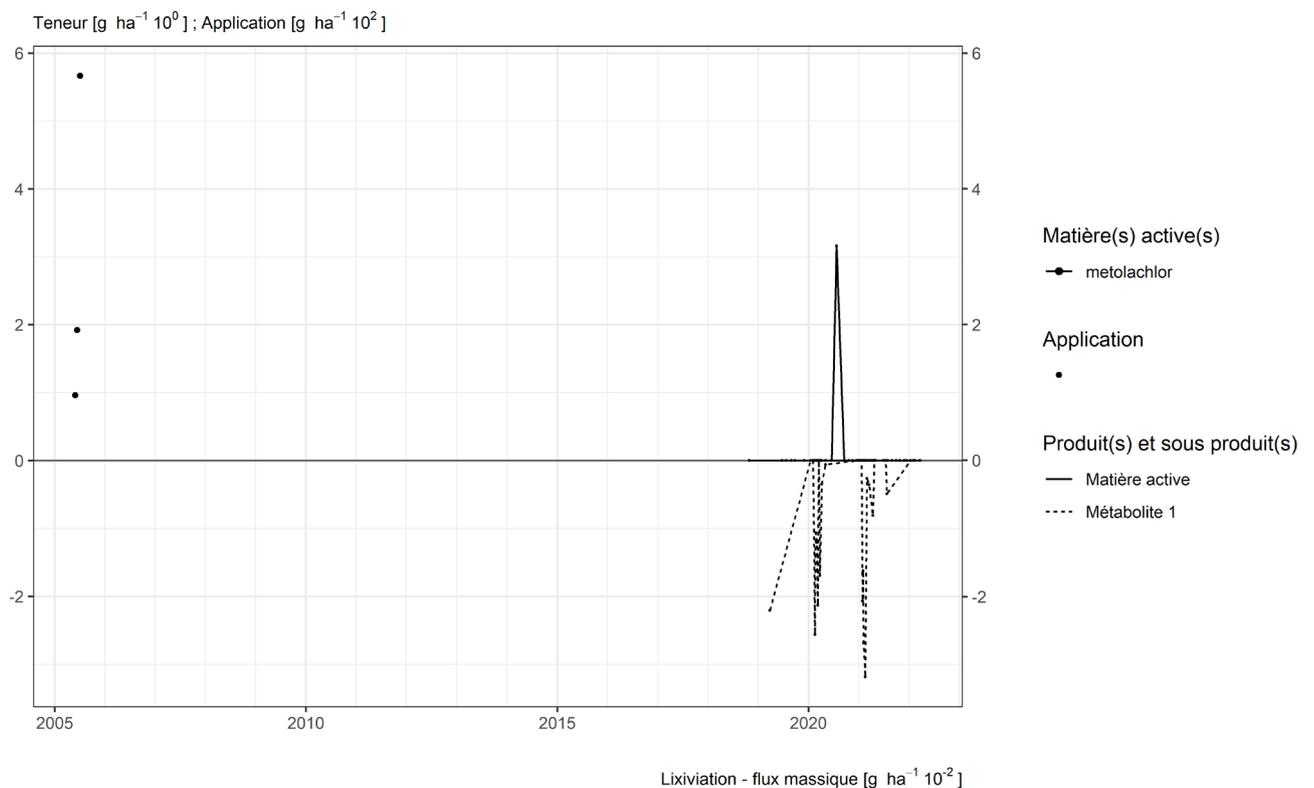


Figure 121. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR8.

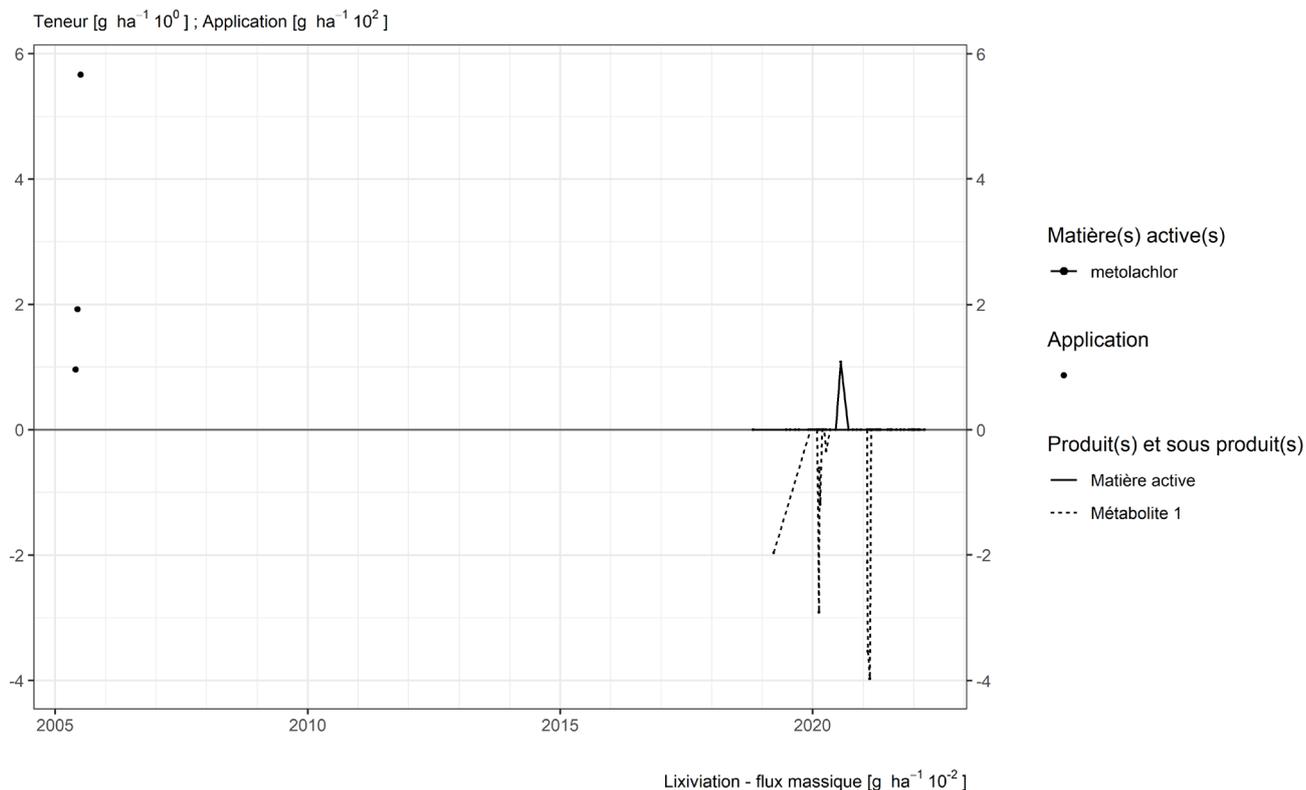


Figure 122. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

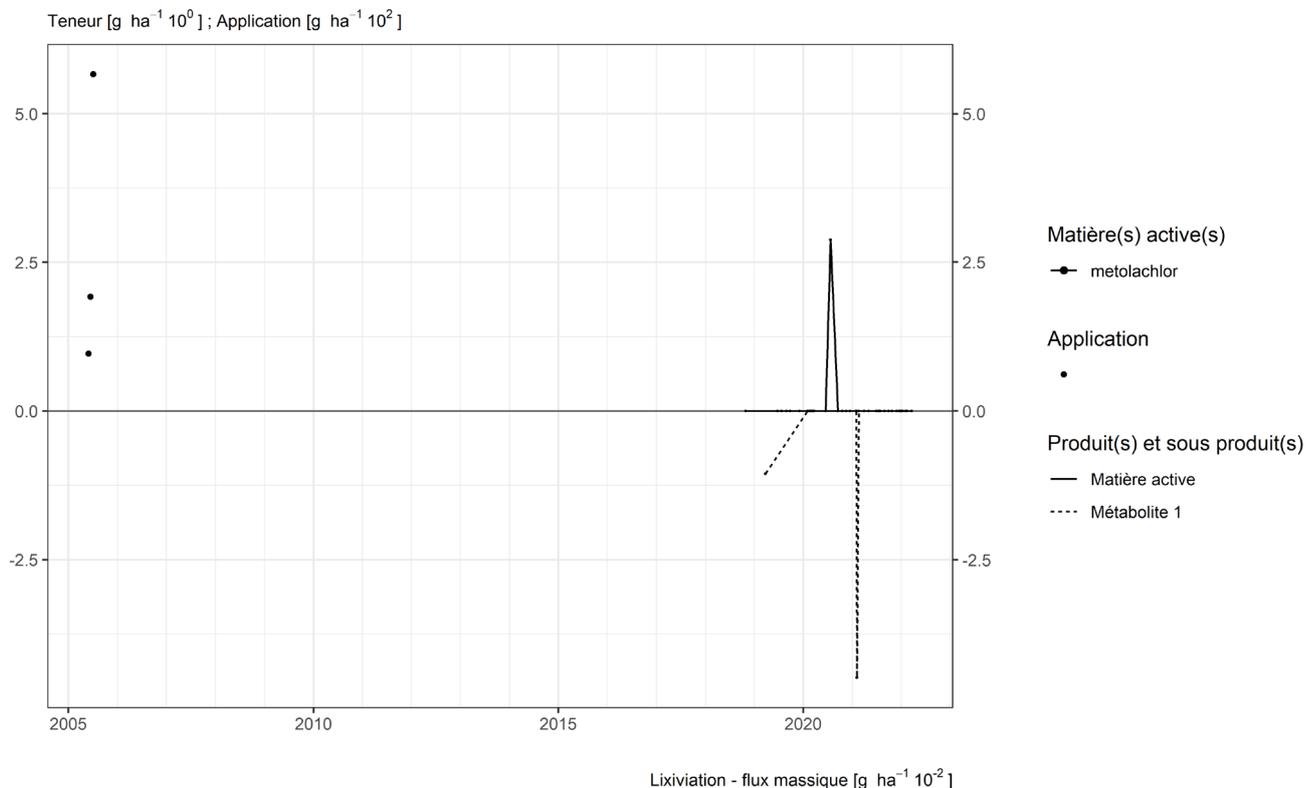


Figure 123. Applications et suivi de la teneur en metolachlore, en metolachlore ESA (métabolite 1) et en metolachlore OA (métabolite 2) dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.22. Metsulfuron methyl

Le metsulfuron methyl est un herbicide appliqué sur culture de froment ou de lin dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

Cette matière active a été appliquée sur les parcelles Chemin de fer (en 2013), Bovenistier (en 2017), Sole 4 (en 2018) et Sol-Résidus (en 2017). Elle n'a jamais été décelée dans les analyses de sol réalisées depuis l'automne 2018.

4.23. Nicosulfuron

Le nicosulfuron est un herbicide appliqué sur culture de maïs dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Cette matière active a été appliquée à deux reprises sur les parcelles Sol-Résidus. Les autres parcelles n'ont jamais fait l'objet de ce traitement.

Les figures 124 à 127 illustrent que :

- quelques jours après l'application, cette matière active est retrouvée dans le sol en quantité équivalente à l'apport ;
- quelques semaines après l'application, elle n'est plus présente qu'à la moitié de la teneur initiale ;
- quelques mois après l'application, elle n'est quasiment plus décelée dans le sol ;
- à long terme (près de deux ans après l'application), elle n'est plus décelée dans le sol.

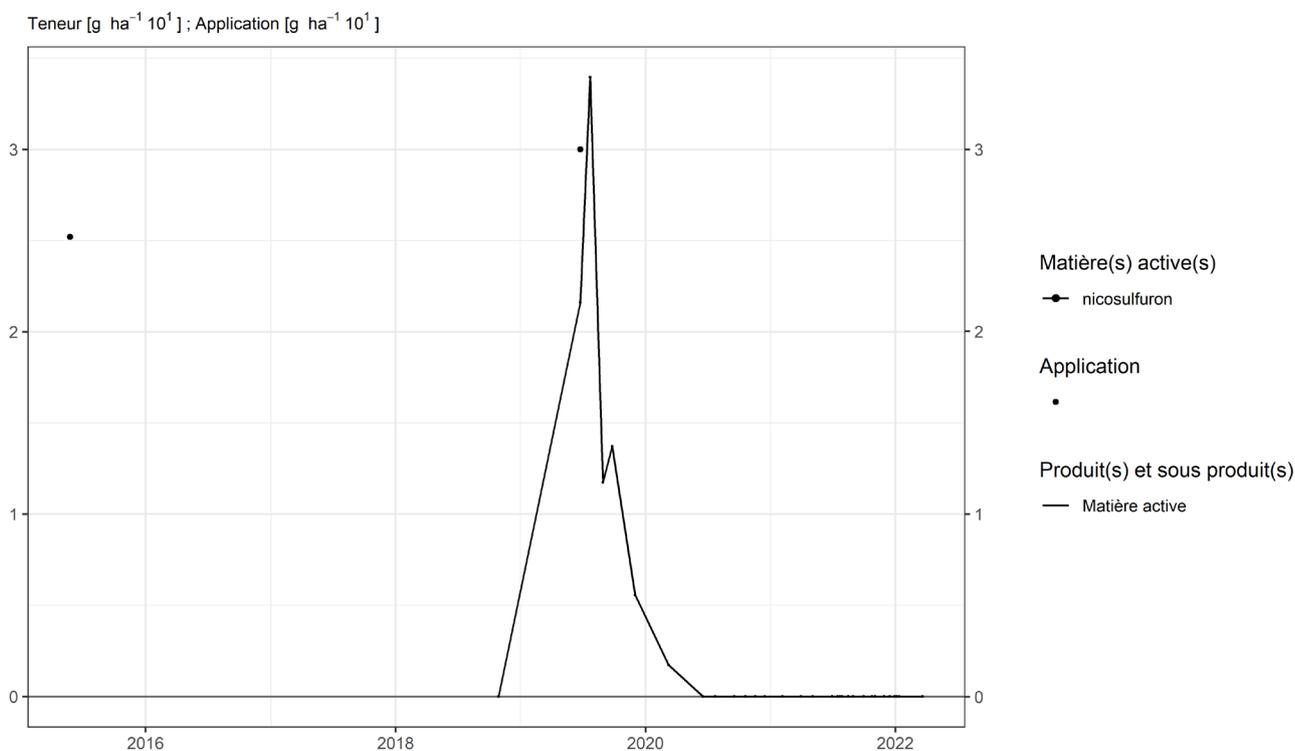


Figure 124. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol de la parcelle SR4.

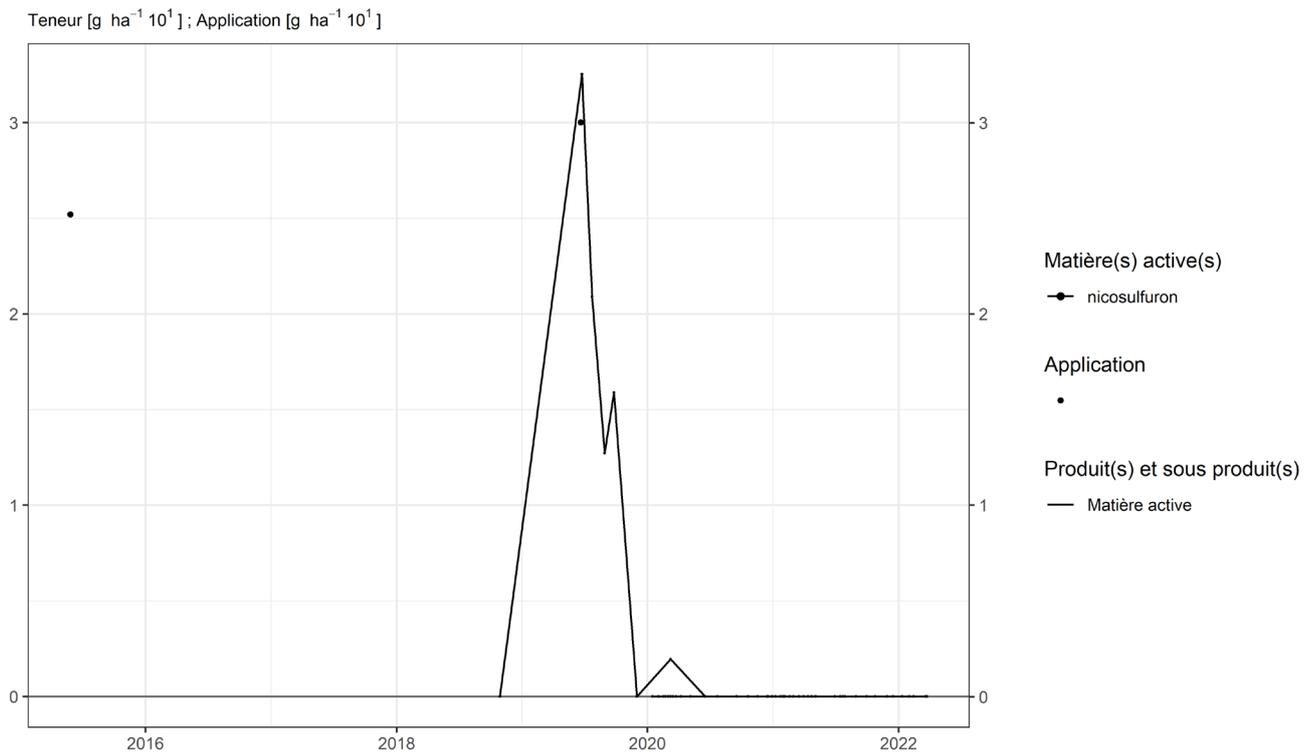


Figure 125. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol de la parcelle SR8.

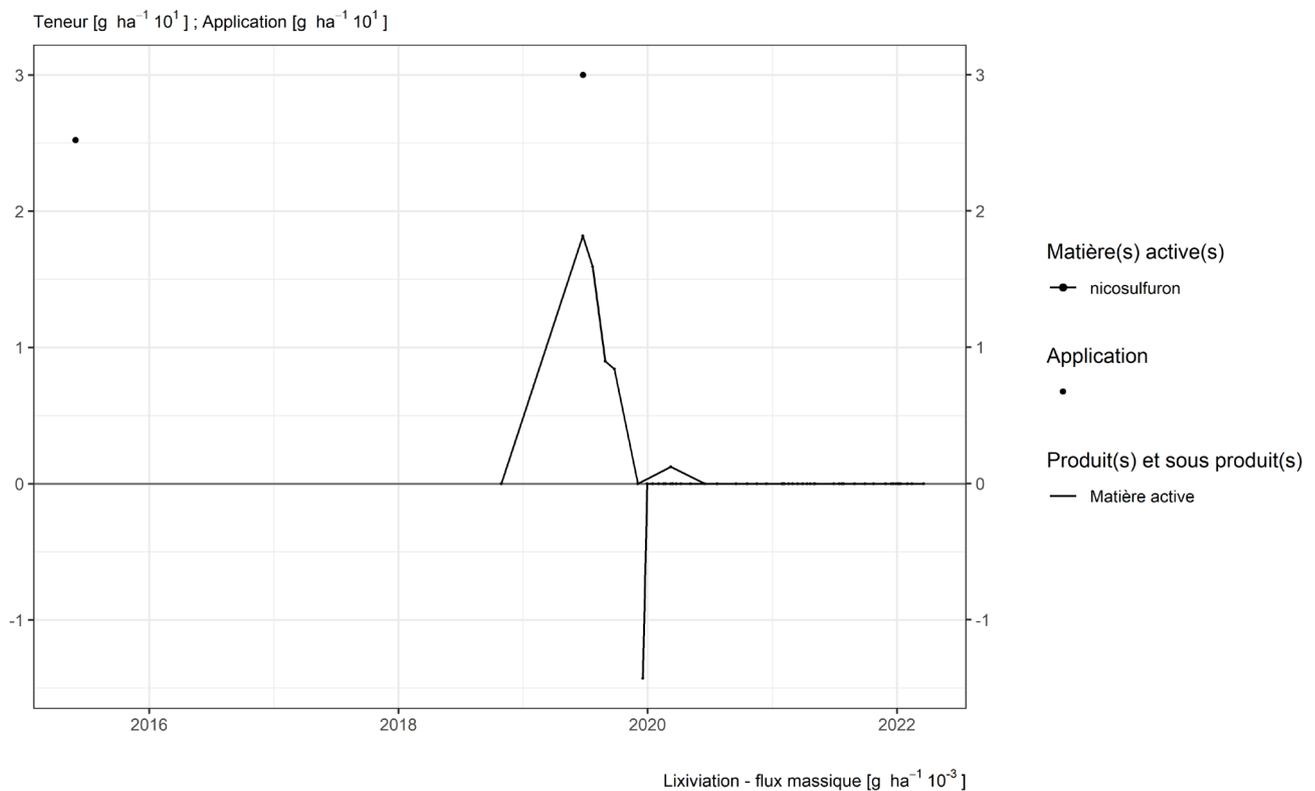


Figure 126. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

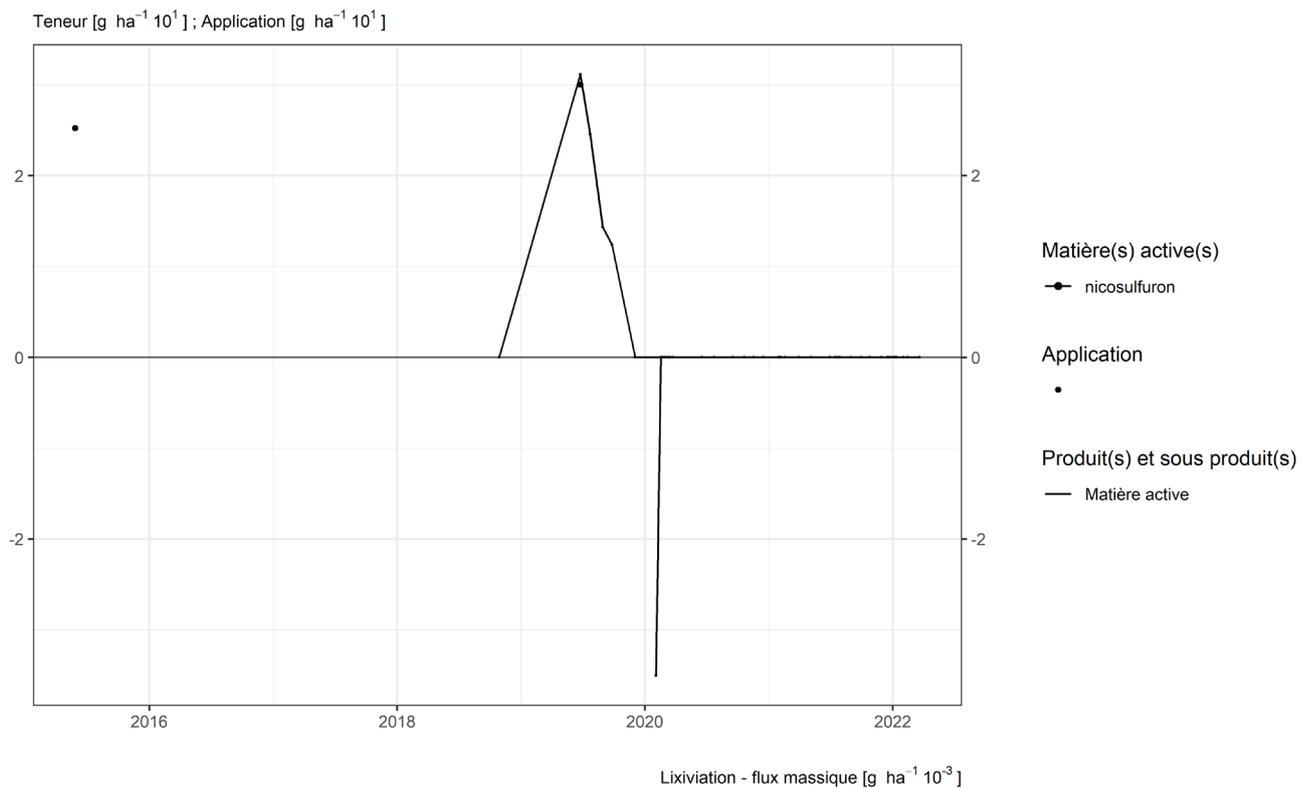


Figure 127. Applications et suivi de la teneur en nicosulfuron dans le sol et l'eau de la parcelle SR16.

4.24. Penflufen

Le penflufen est un fongicide utilisé sur culture de pomme de terre dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

Les observations réalisées sur la parcelle Bovenistier (figure 128) illustrent qu'un apport de 20 g/ha est décelé dans les mois qui suivent l'application à hauteur de quelques grammes par hectare.

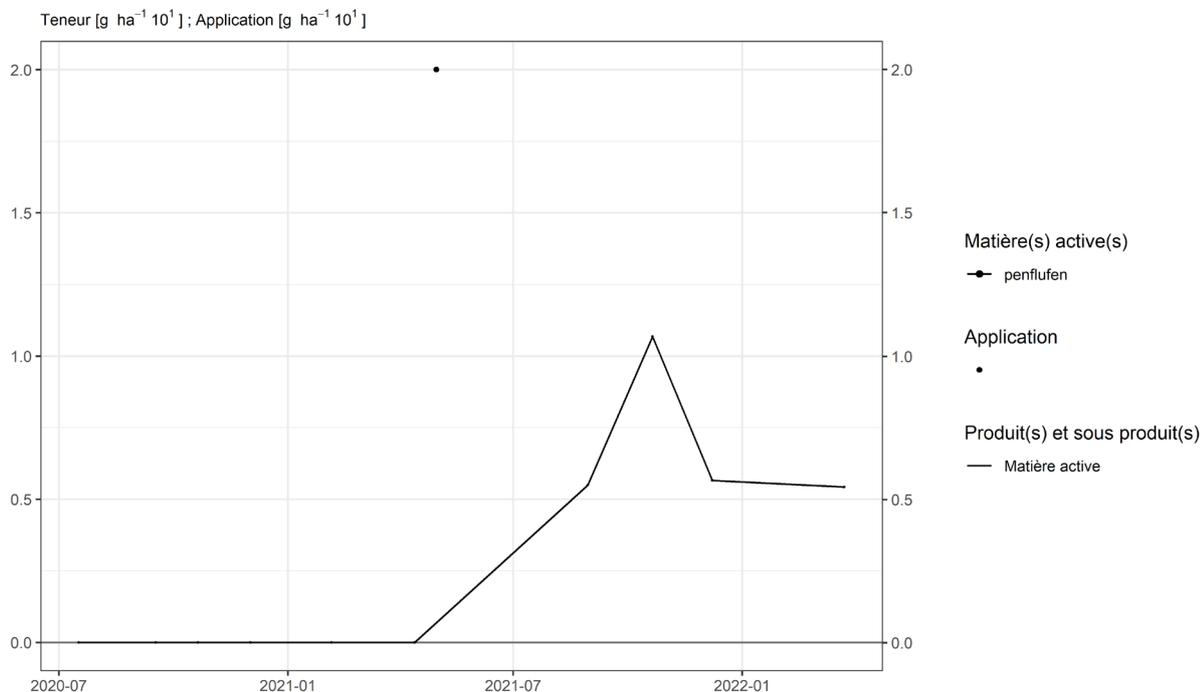


Figure 128. Applications et suivi de la teneur en penflufen dans le sol de la parcelle Bovenistier.

Les observations réalisées sur la parcelle Sole 4 (figure 129) ne sont pas expliquées.

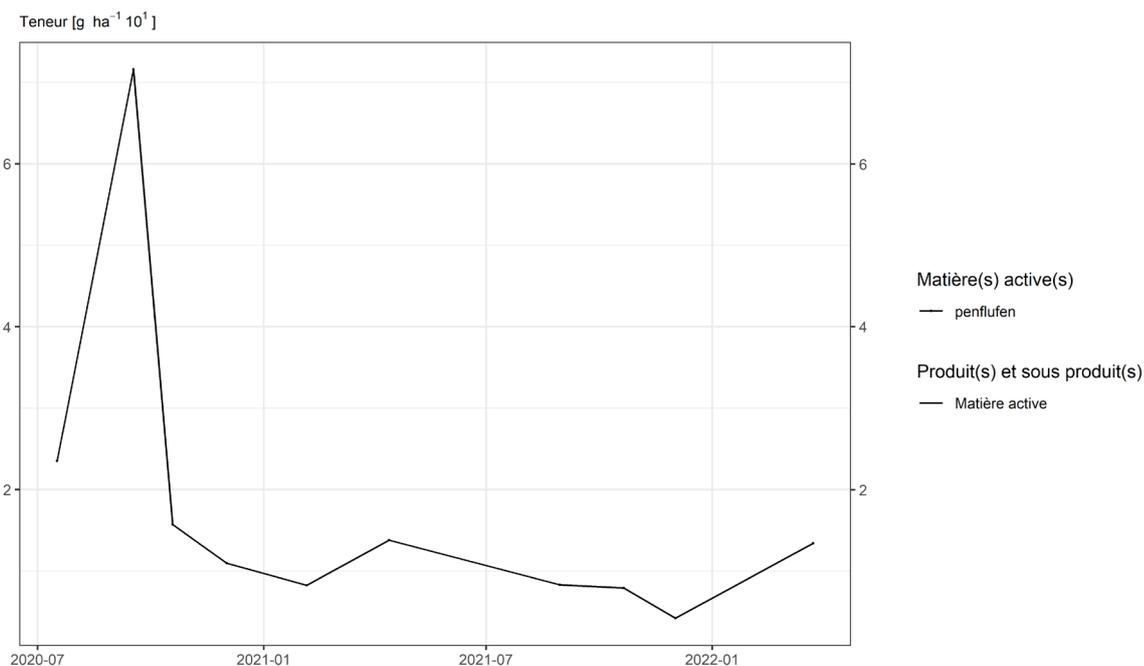


Figure 129. Applications et suivi de la teneur en penflufen dans le sol de la parcelle Sole 4.

4.25. Phenmediphame

Le phenmediphame est un herbicide essentiellement utilisé sur culture de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, les observations (figures 130 à 137) sont les suivantes :

- sur la parcelle Bovenistier, un apport d'environ 600 g/ha réalisé fin mai 2021 conduit en juillet à une concentration dans le sol de près de 65 g/ha ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'environ 550 g/ha réalisé fin mai conduit à une concentration dans le sol est de l'ordre d'une quinzaine de grammes par hectare.

Quelques mois après un traitement, les observations sont les suivantes :

- sur la parcelle Haute Bova, un apport d'environ 550 g/ha réalisé au printemps 2018 laisse une concentration dans le sol en automne 2019 de l'ordre de quelques grammes par hectare ;
- sur la parcelle Chemin de fer, quatre apports totalisant environ 300 g/ha réalisés au printemps 2018 laissent, en automne, une concentration dans le sol de l'ordre d'une dizaine de grammes par hectare ;
- sur la parcelle Bovenistier, l'apport de printemps (environ 600 g/ha) est visible dans le sol à hauteur d'une dizaine de gramme par hectare à la fin de l'automne ;
- sur la parcelle Sole 4, l'apport de près de 250 g/ha réalisé en été 2019 conduit à une concentration d'une dizaine de grammes par hectare fin d'automne de la même année ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, le traitement (environ 550 g/ha) réalisé au printemps 2021 a laissé une concentration de l'ordre de quelques grammes par hectare à l'automne de la même année.

Dans les deux années qui suivent un apport de cette matière active, la concentration dans le sol est décroissante avec une certaine variabilité (les « pics » observés, compte tenu de l'ordre de grandeur de la mesure (quelques grammes par hectare) sont imputables à l'imprécision liée à l'échantillonnage).

A plus long terme (plus de trois ans après l'apport), la matière active n'est (quasiment) plus décelée dans le sol (Haute Bova 2018, Chemin de fer 2018, Bovenistier 2016, Sol-Résidus 2017).

EAU

Cette matière active n'a jamais été observée dans les échantillons d'eau collectés aux exutoires des lysimètres.

Teneur [$\text{g ha}^{-1} 10^1$]; Application [$\text{g ha}^{-1} 10^2$]

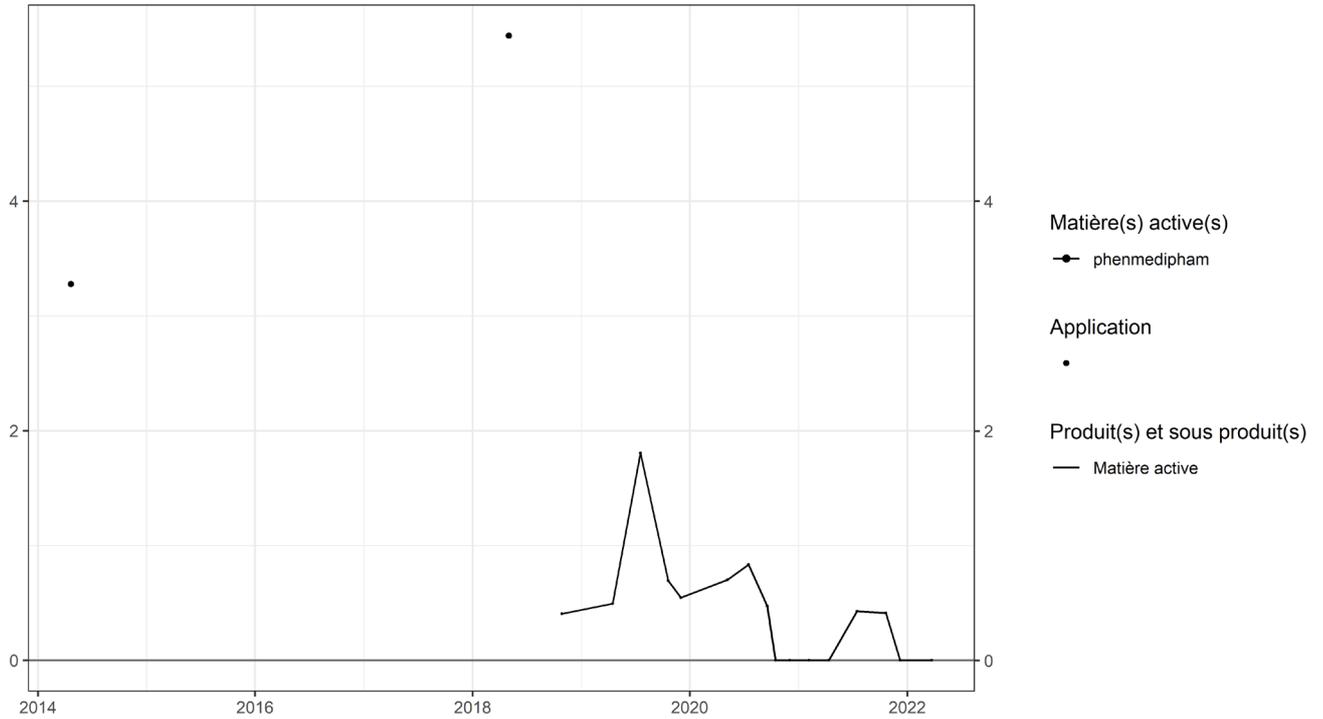


Figure 130. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle Haute Bova.

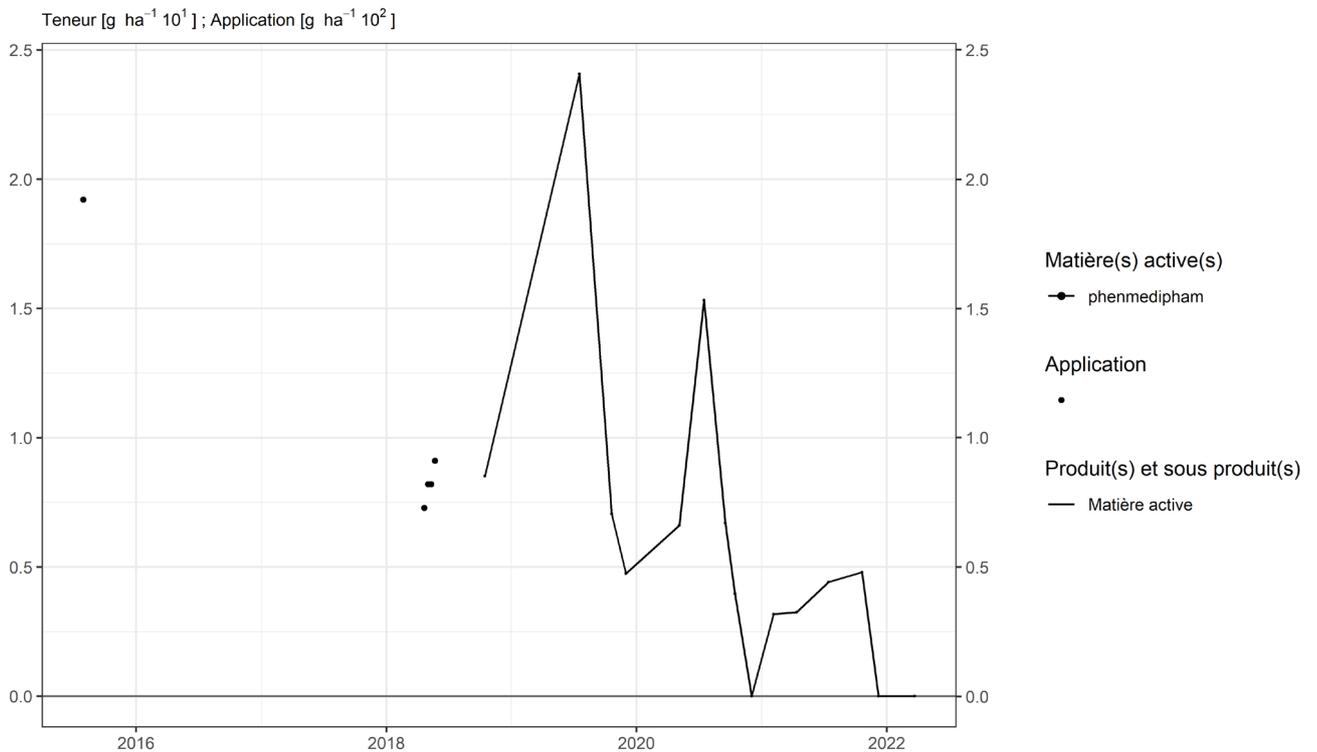


Figure 131. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle Chemin de fer.

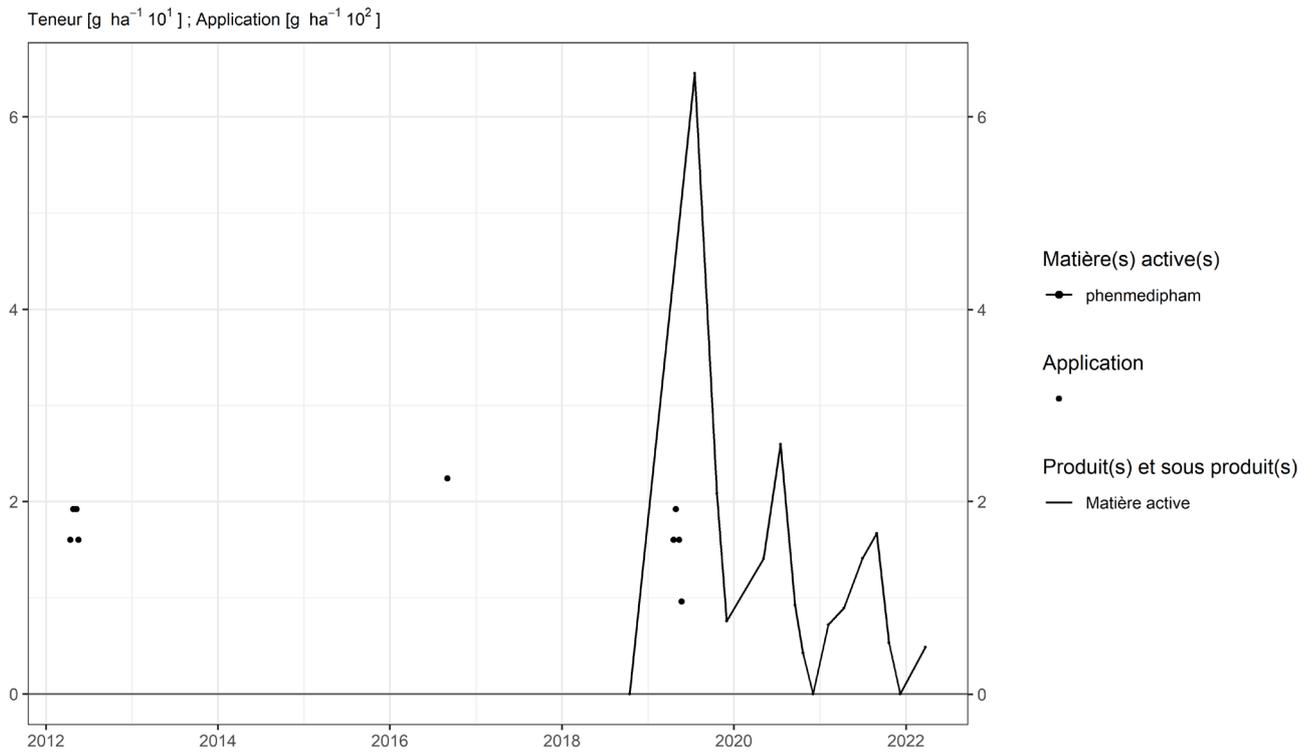


Figure 132. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle Bovenistier.

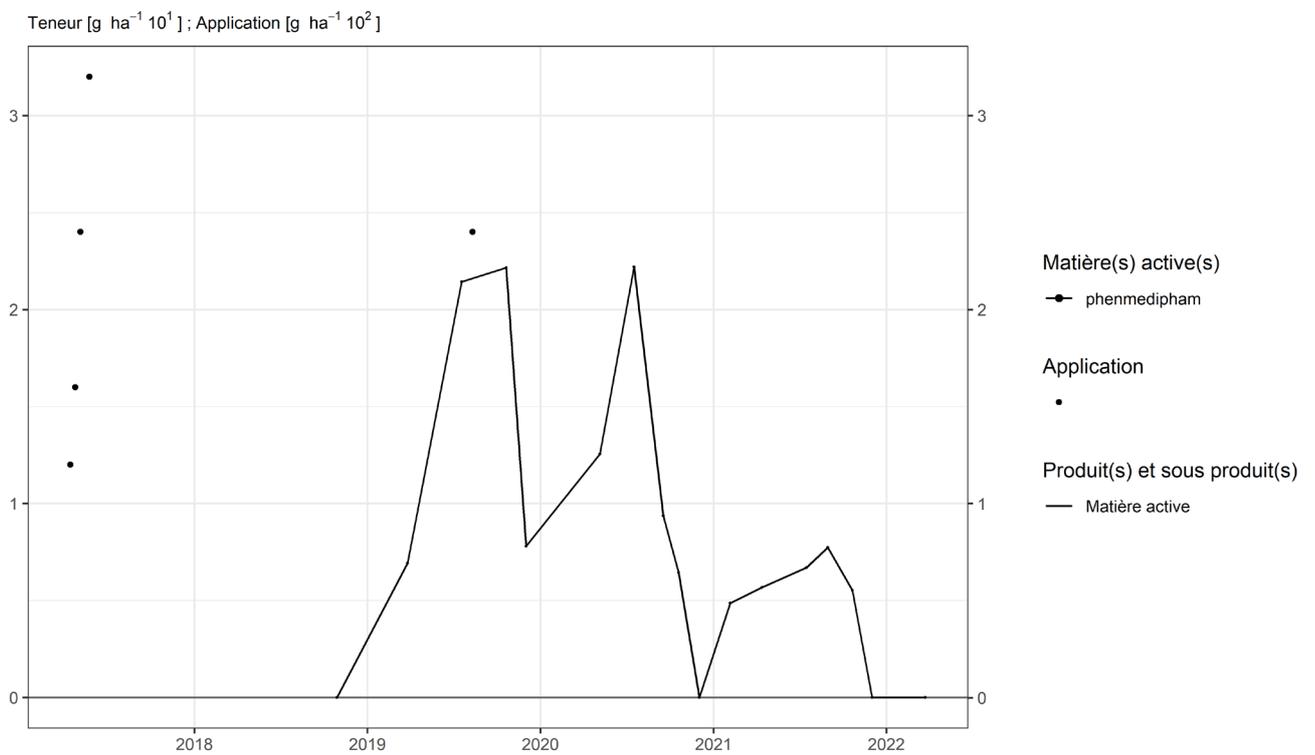


Figure 133. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle Sole 4.

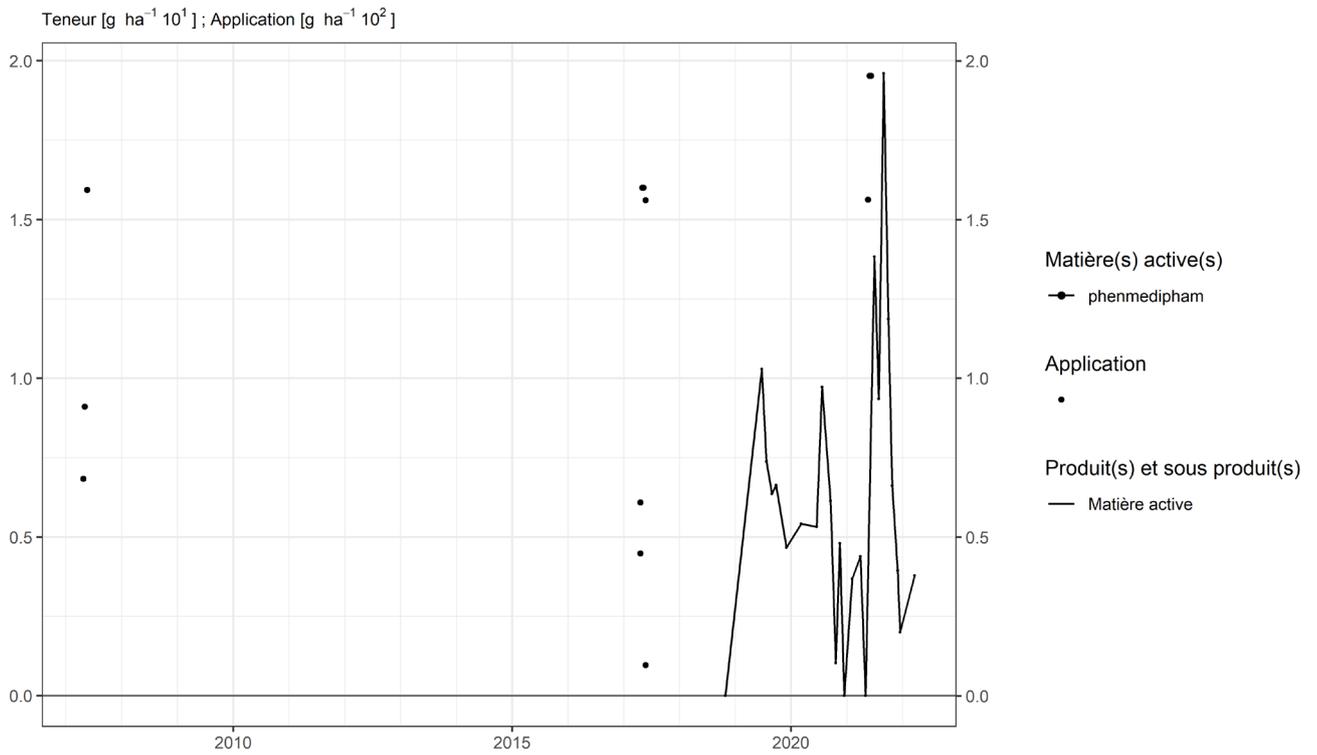


Figure 134. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle SR4.

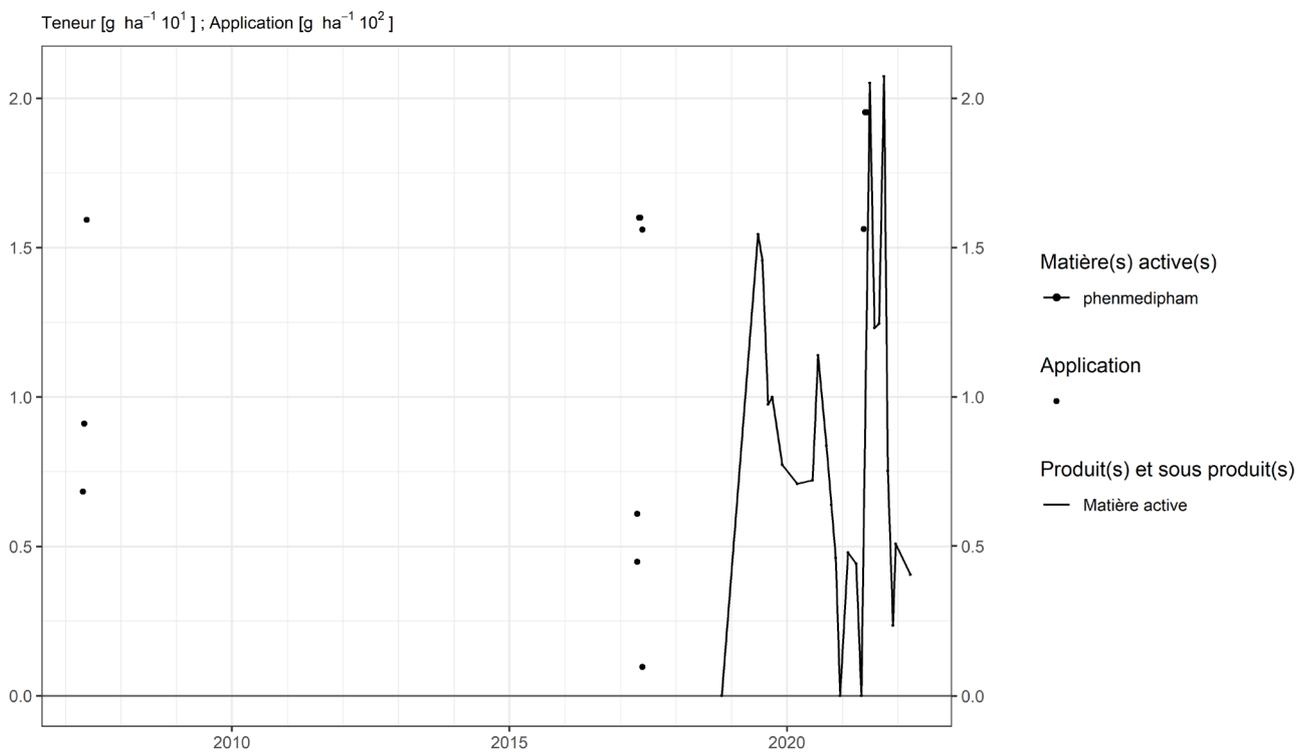


Figure 135. Applications et suivi de la teneur en phemedipham dans le sol de la parcelle SR8.

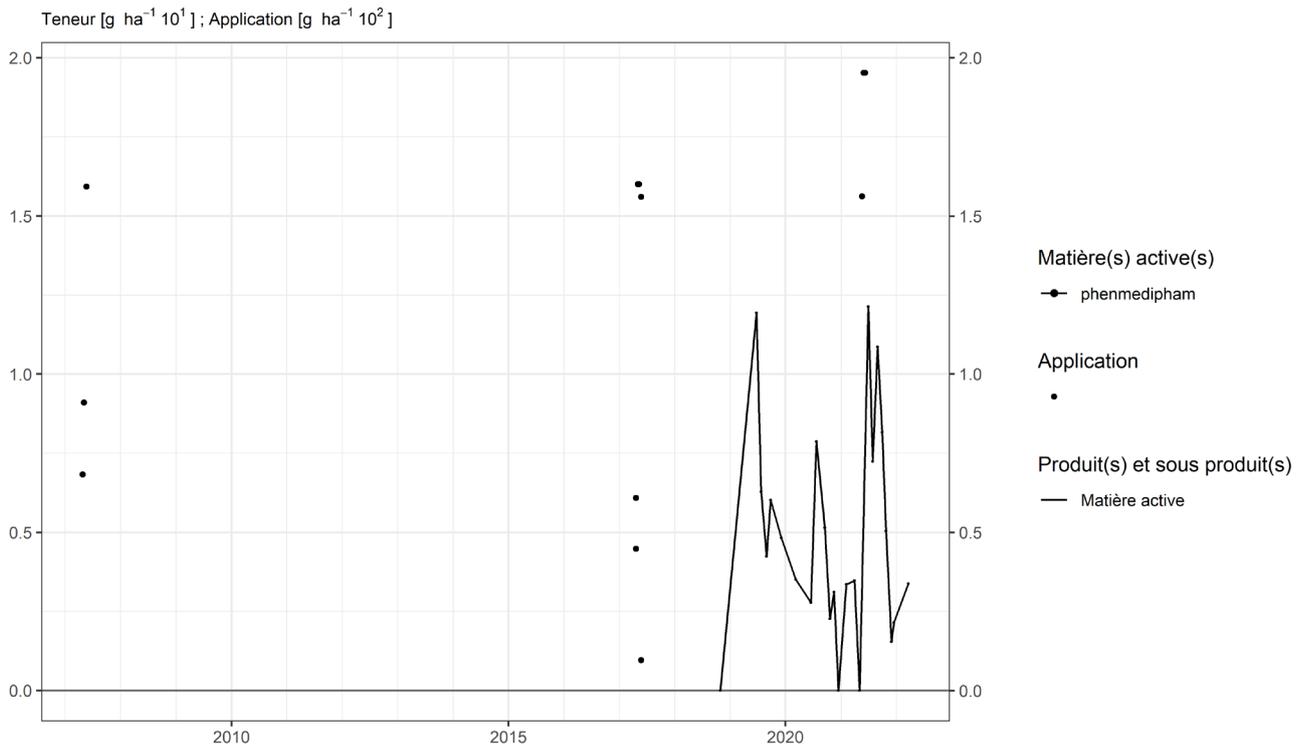


Figure 136. Applications et suivi de la teneur en phenmedipham dans le sol de la parcelle SR12.

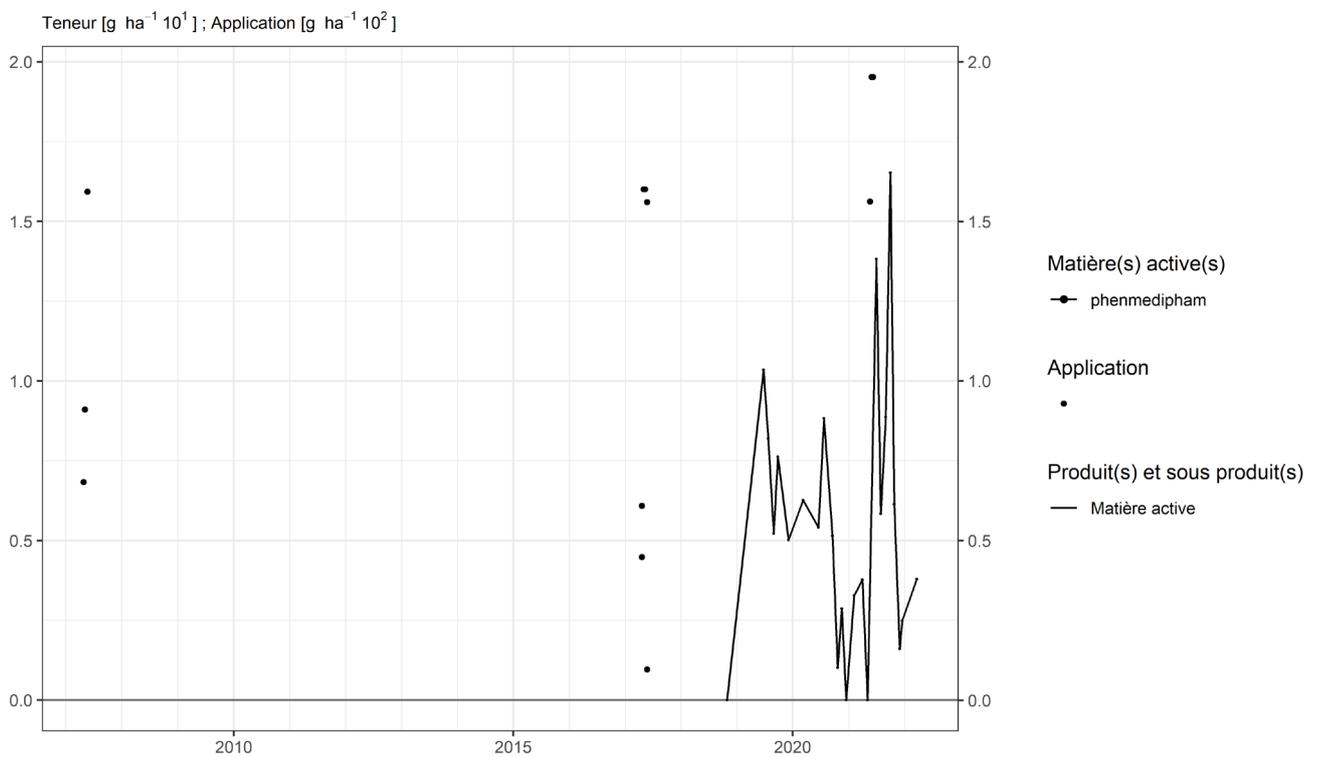


Figure 137. Applications et suivi de la teneur en phenmedipham dans le sol de la parcelle SR16.

4.26. Propiconazole

Le propiconazole est un fongicide utilisé sur culture de froment ou de betterave dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques semaines après un traitement, aucune interprétation n'a pu être réalisée.

Plusieurs années après un traitement, les observations (figures 138 à 142) sont les suivantes :

- sur la parcelle Sole 4, trois apports, d'environ 100 g/ha chacun, réalisés entre 2016 et 2018 conduisent à une concentration dans le sol de l'ordre de 10 g/ha trois ans après le traitement ;
- sur les parcelles Sol-Résidus, un apport d'environ 100 g/ha réalisé en 2017 n'est plus observé dans le sol quatre ans après le traitement ;
- sur Bovenistier, un apport réalisé en 2012 ne révèle aucun résidu dans le sol à partir de 2018 (début des analyses).

EAU

Cette matière active n'a été observée que dans un seul échantillon d'eau collecté à l'exutoire d'un des lysimètres de Sol-Résidus (SR4). S'agissant de la première analyse d'eau sur ce lysimètre et vu le faible volume d'eau collecté, le résultat (très faible) n'est guère interprétable.

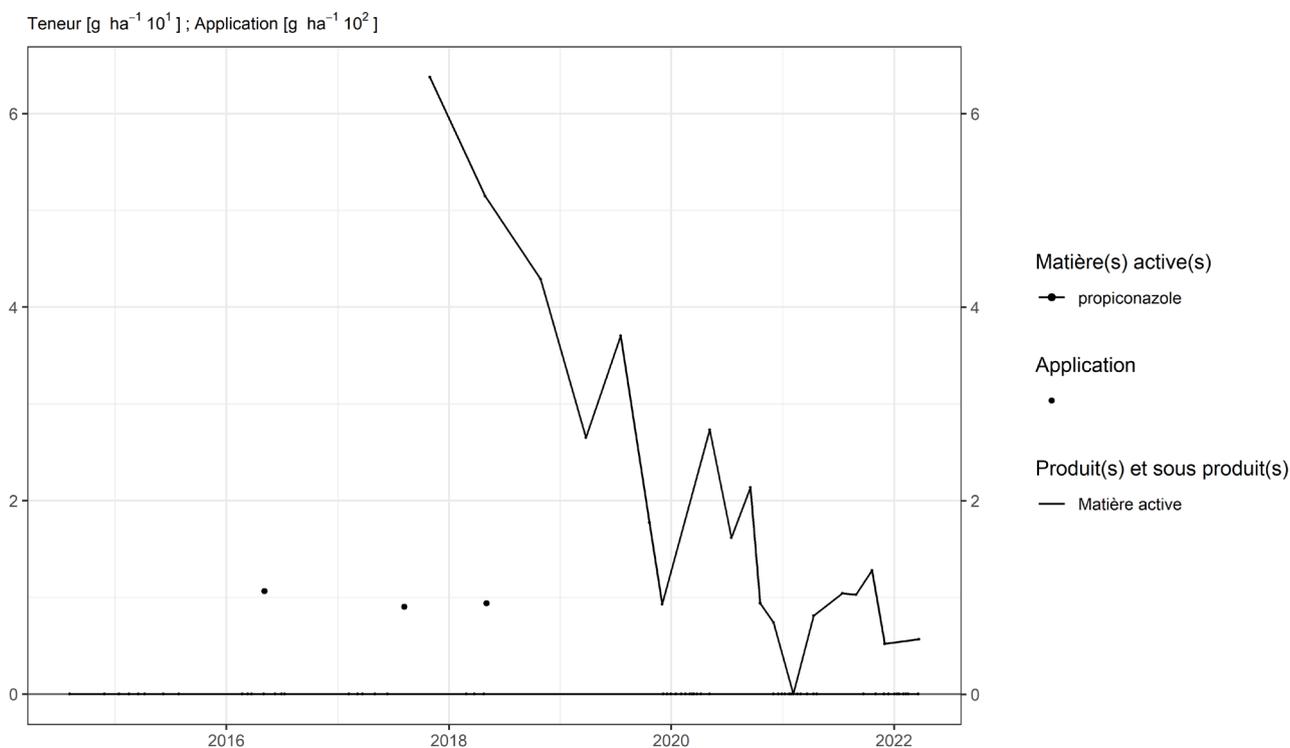


Figure 138. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle Sole 4.

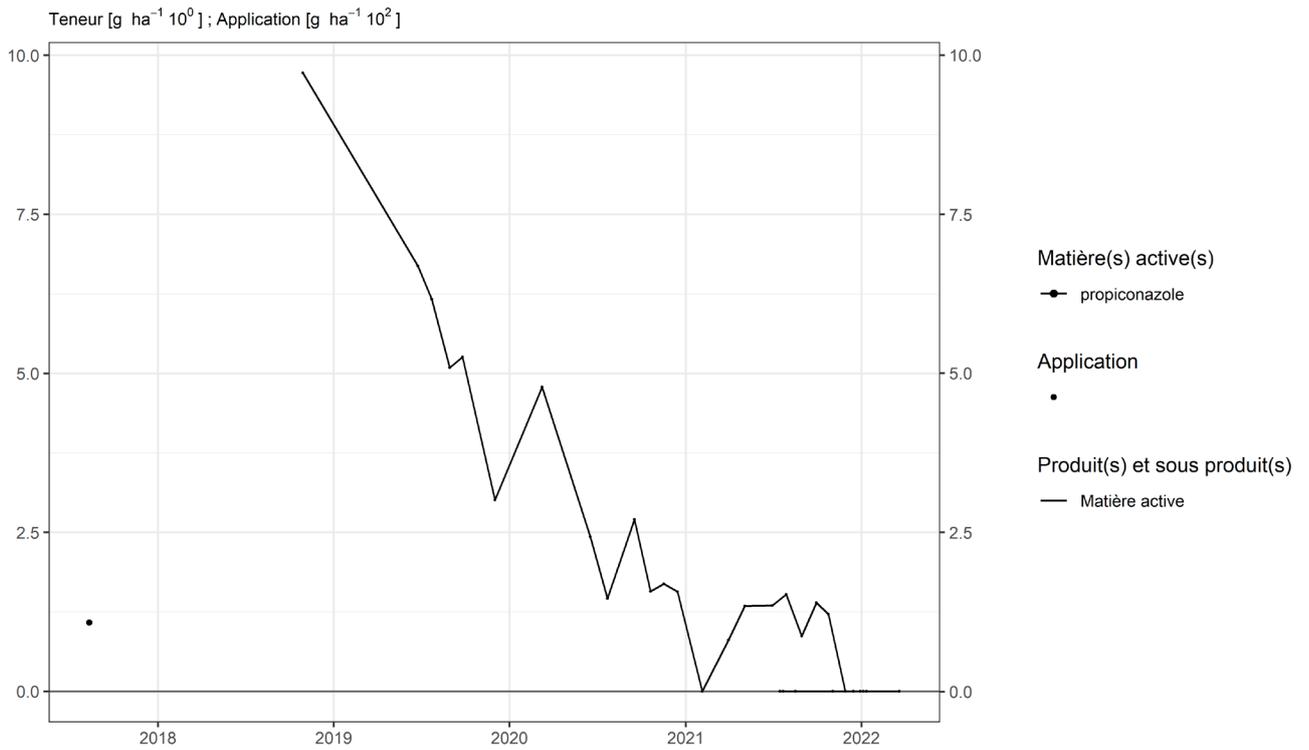


Figure 139. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR4.

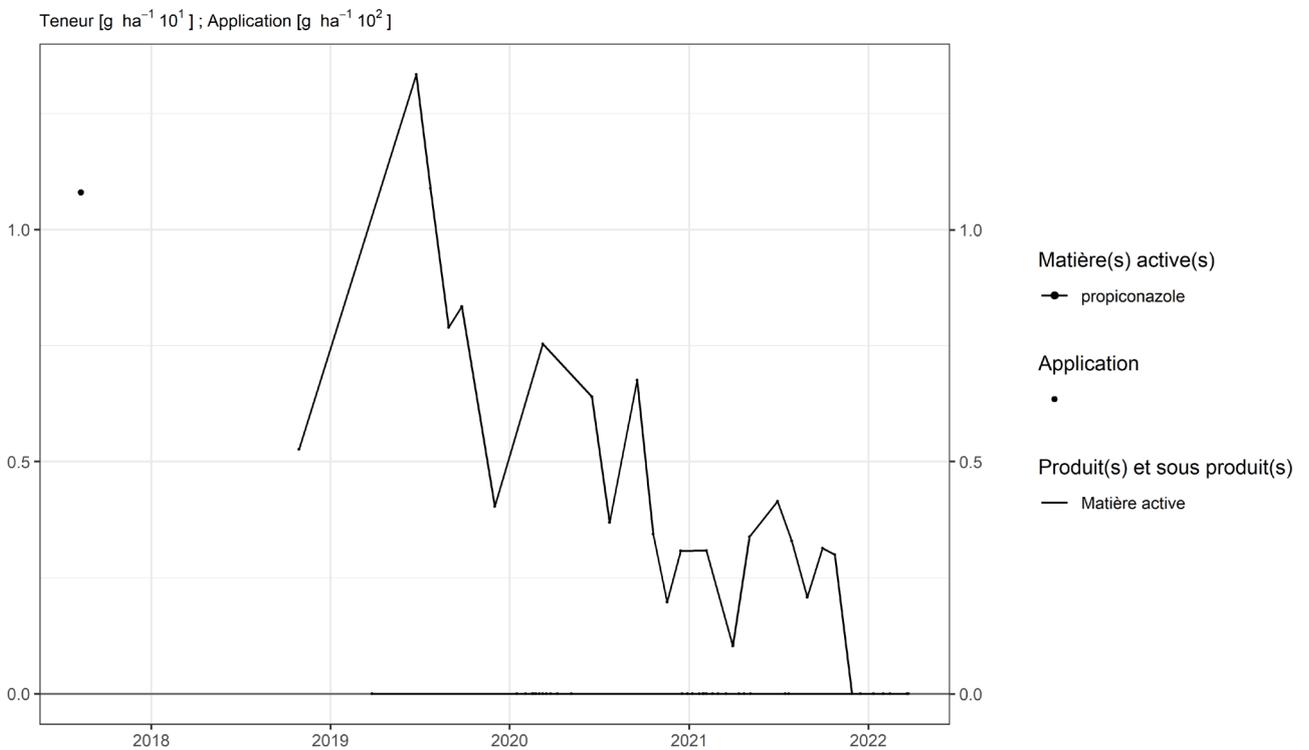


Figure 140. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR8.

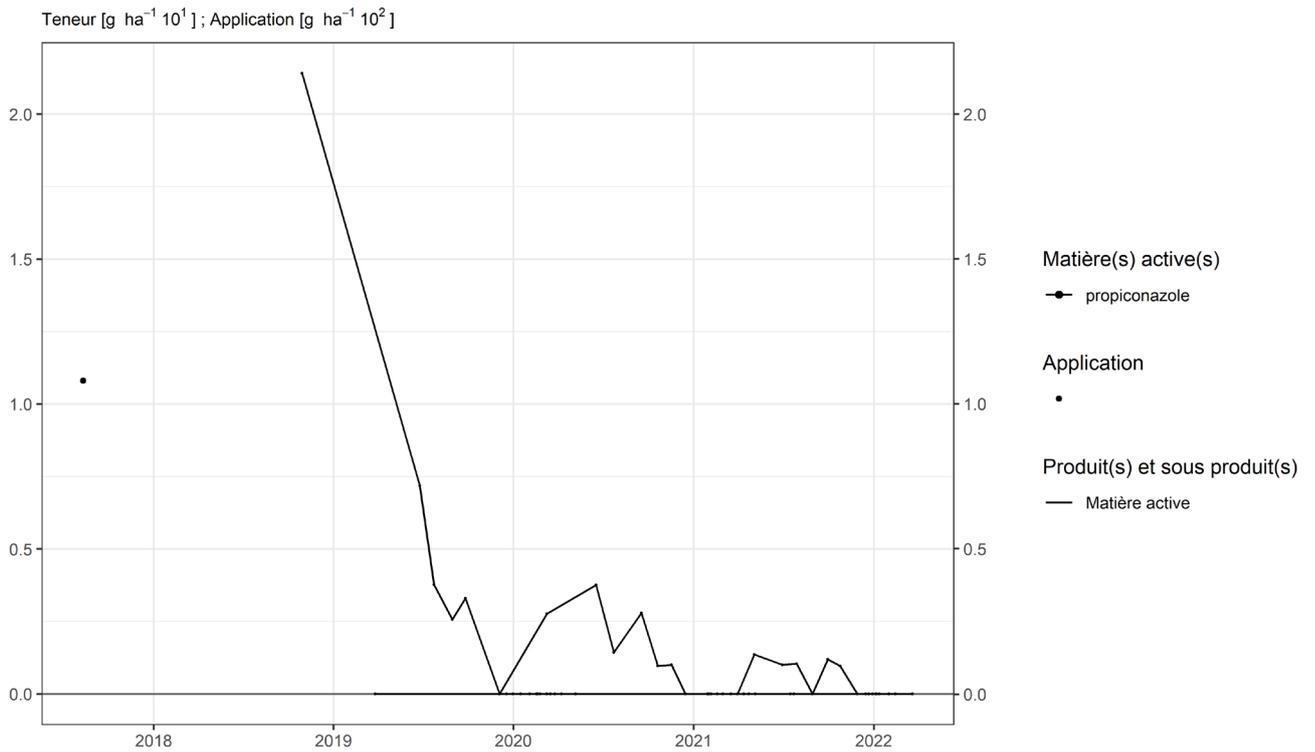


Figure 141. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR12.

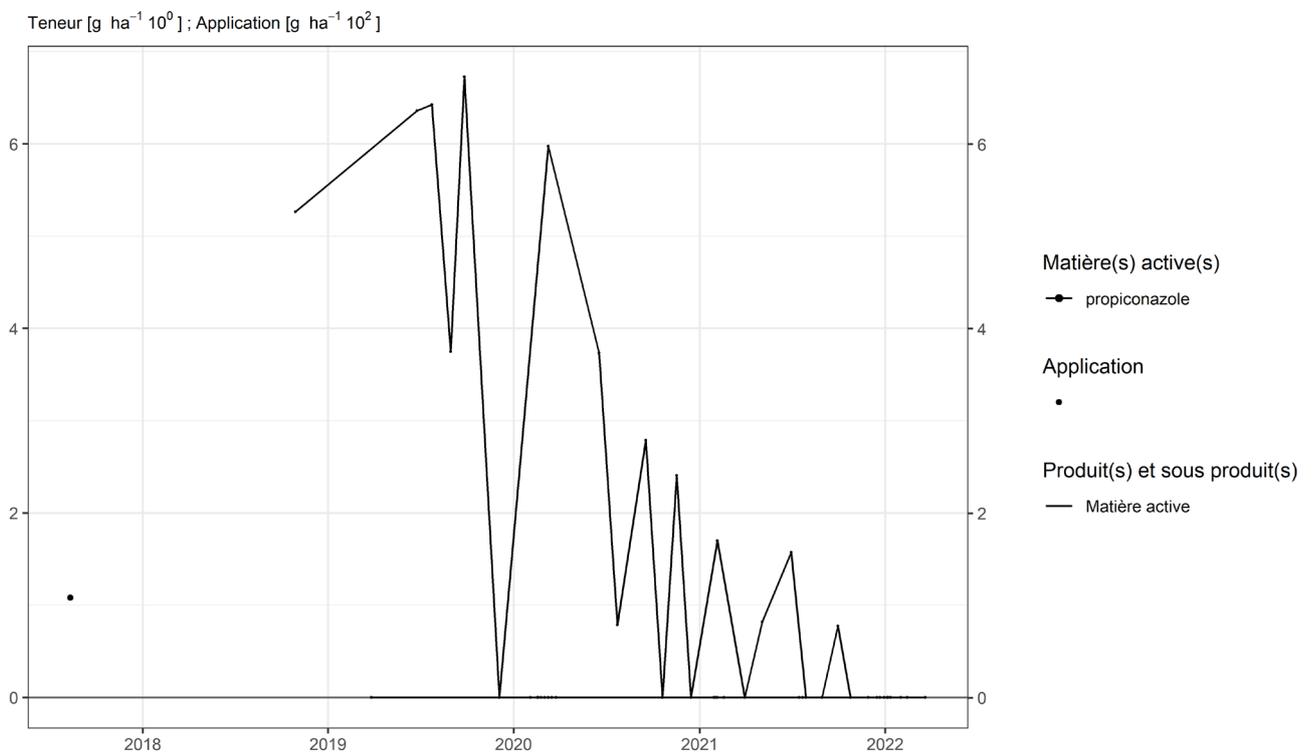


Figure 142. Applications et suivi de la teneur en propiconazole dans le sol de la parcelle SR16.

4.27. Terbuthylazine

Le terbuthylazine est un herbicide utilisé sur culture de maïs dans les parcelles équipées d'un lysimètre.

SOL

Quelques observations ont été faites sur les parcelles de Hesbaye. Elles ne sont cependant guère exploitables :

- très petits flux (correspondant à une concentration de quelques nanogrammes par litre) en 2012 sans information sur les usages antérieurs à 2010 ;
- quelques grammes par hectare dans le sol de la parcelle Sole 4 en 2018 alors qu'aucun usage n'est renseigné. A noter que la parcelle a été louée en 2015 à un tiers pour y cultiver de la pomme de terre sans que cette matière active soit annoncée dans le traitement herbicide réalisé. Cependant, compte tenu de ce qui suit, un usage en 2015 ne serait pas incohérent vis-à-vis de la concentration mesurée dans le sol en 2018.

Les figures 143 à 146 illustrent les observations réalisées sur les parcelles Sol-Résidus.

Quelques jours après un apport d'un peu plus de 500 g/ha, des concentrations quasi similaires (de 200 à 500 g/ha) sont constatées dans le sol.

Quelques mois après l'apport, la concentration dans le sol varie de 50 à 200 g/ha.

A plus long terme (trois ans après les traitements réalisés en 2015 et 2019 sur les parcelles Sol-Résidus et observations sur la parcelle Sole 4), la concentration dans le sol n'est plus, au maximum, que de quelques grammes par hectare.

EAU

En termes de flux, cette matière n'a été détectée qu'à une seule reprise sur un seul des lysimètres de Sol-Résidus. La quantité lixiviée (près de 0,002 g/ha) représente 0,0004 % de l'apport.

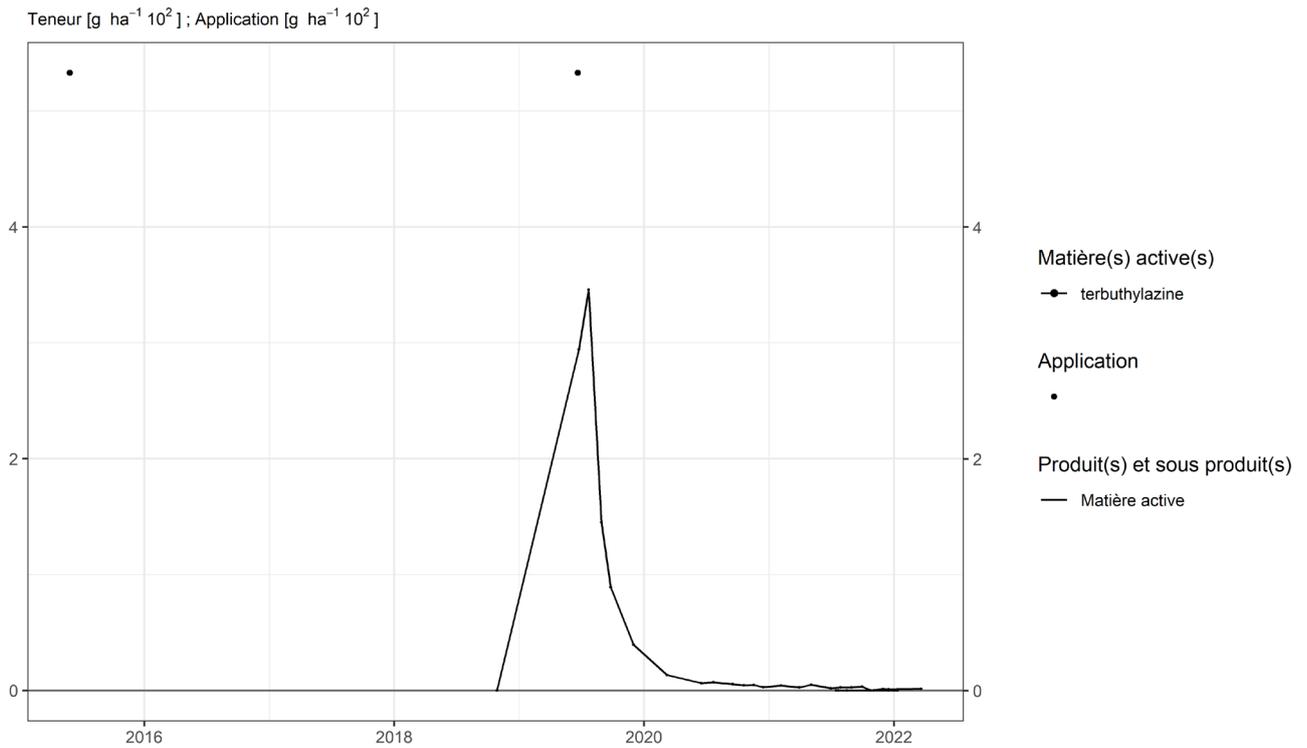


Figure 143. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR4.

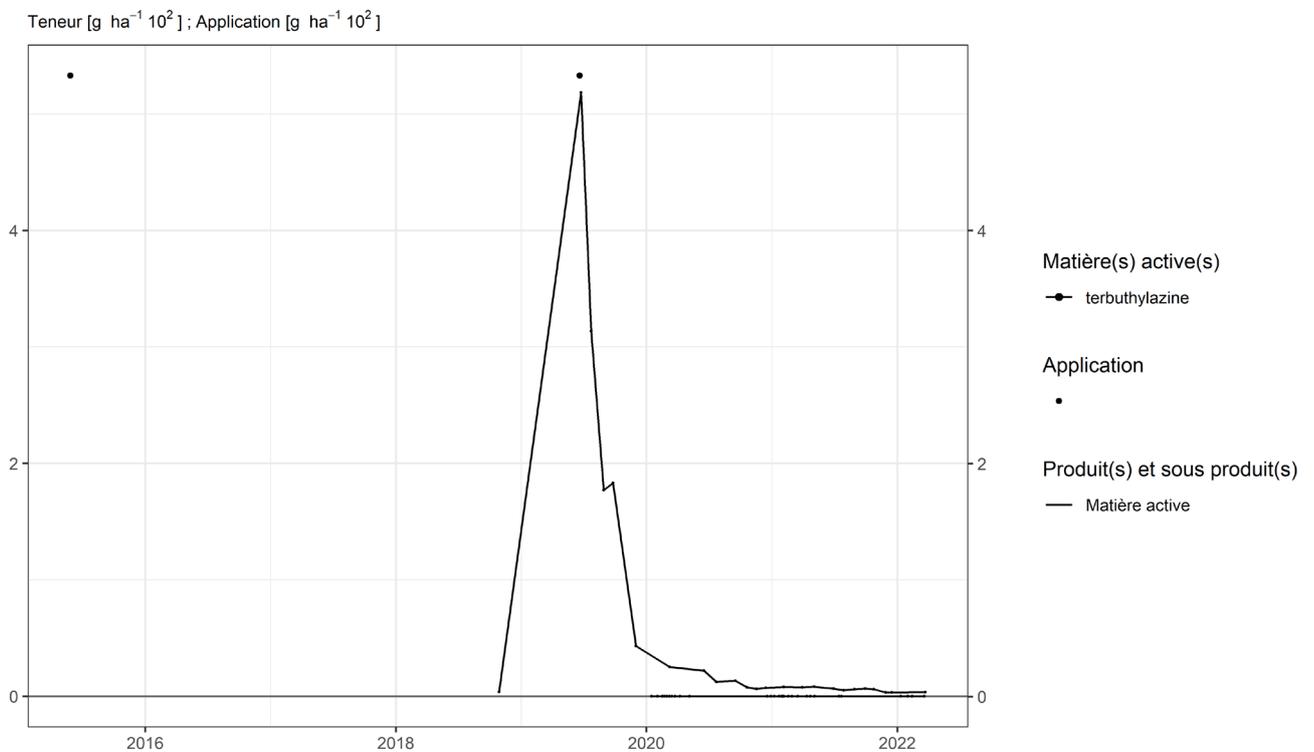


Figure 144. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR8.

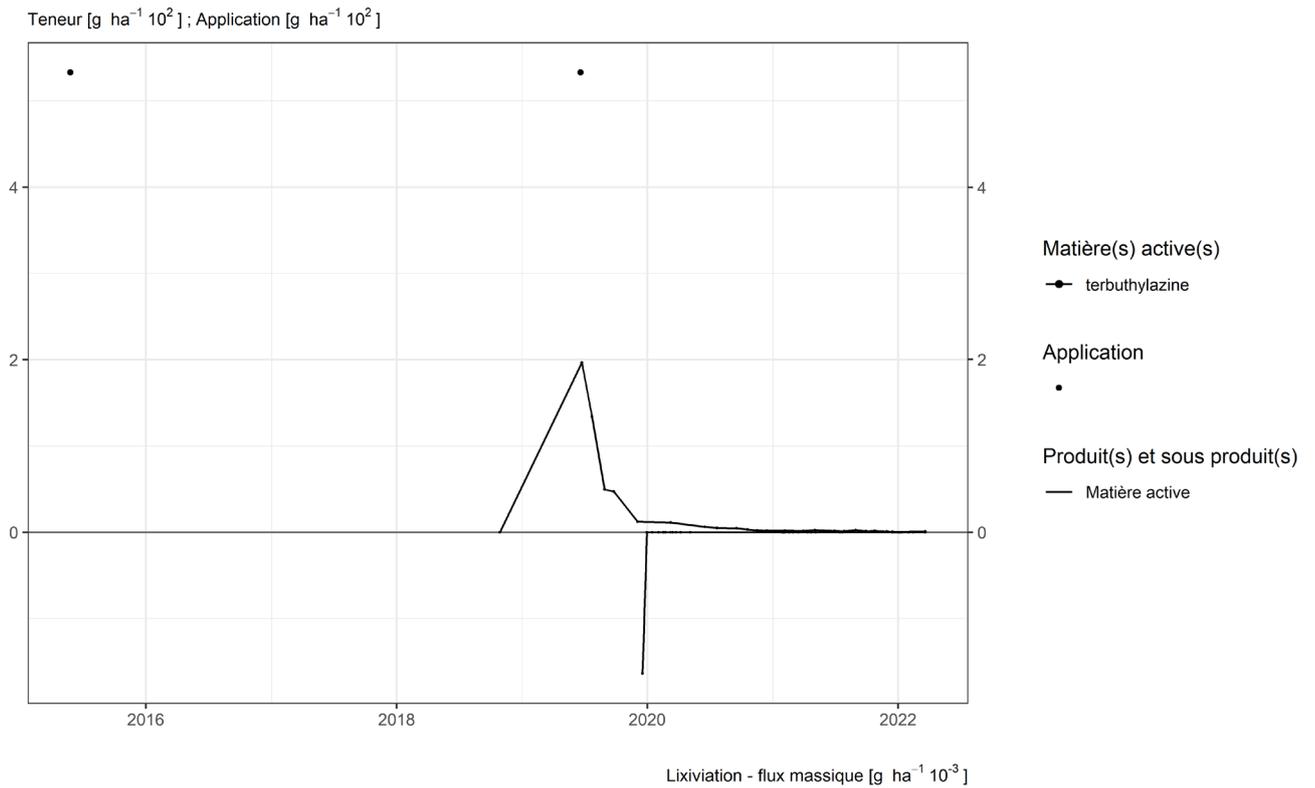


Figure 145. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol et l'eau de la parcelle SR12.

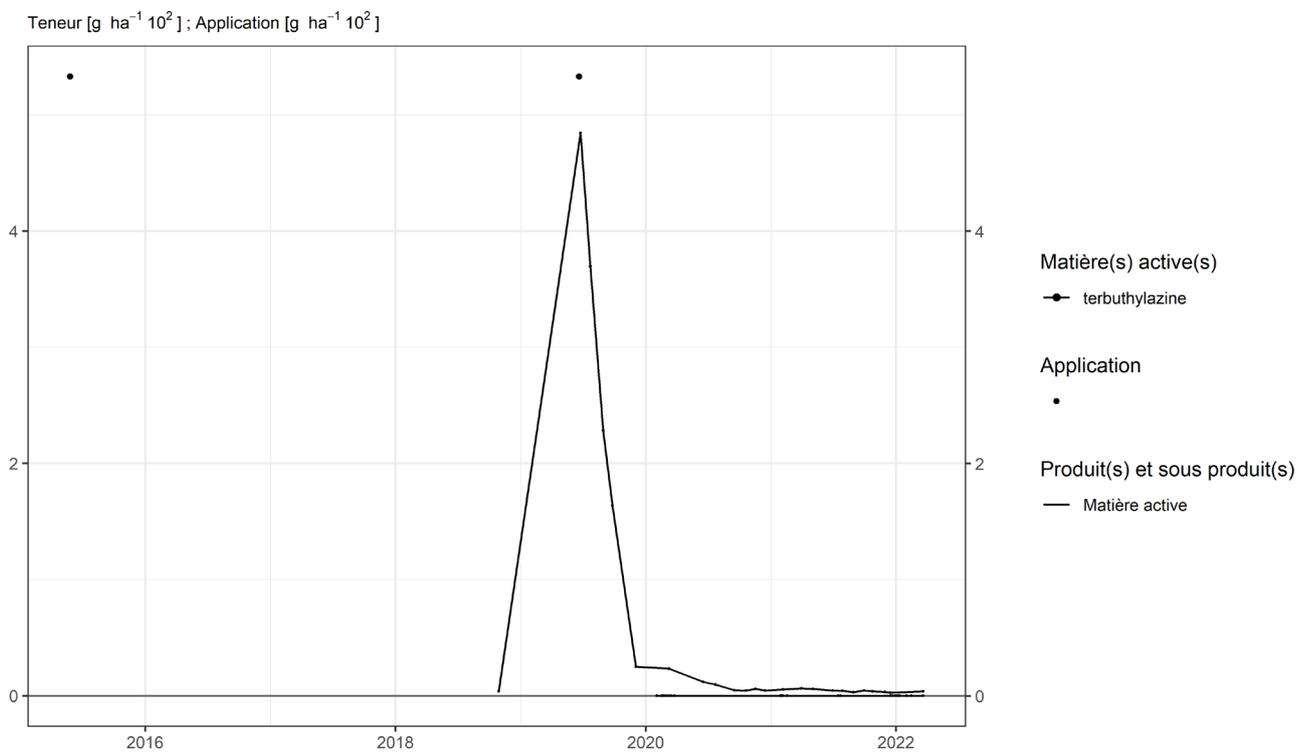


Figure 146. Applications et suivi de la teneur en terbuthylazine dans le sol de la parcelle SR16.

4.28. Conclusions

Vingt six matières actives différentes ainsi qu'une dizaine de métabolites ont fait l'objet d'un suivi en termes d'applications (recensées jusqu'au moins 2010), de teneur dans le sol (depuis au moins 2018⁷) et de lixiviation (depuis 2012⁸ sur les parcelles de Hesbaye et 2018 sur les parcelles Sol-Résidus).

Les résultats présentés dans ce paragraphe illustrent :

- la diversité des comportements tant de persistance dans le sol que de lixiviation ;
- la qualité de l'analyse de sol en tant qu'indicateur d'usage d'une matière active et
- la performance du dispositif dans l'évaluation des flux de matières actives vers les eaux souterraines.

⁷ Dosage ISSEP avant 2018.

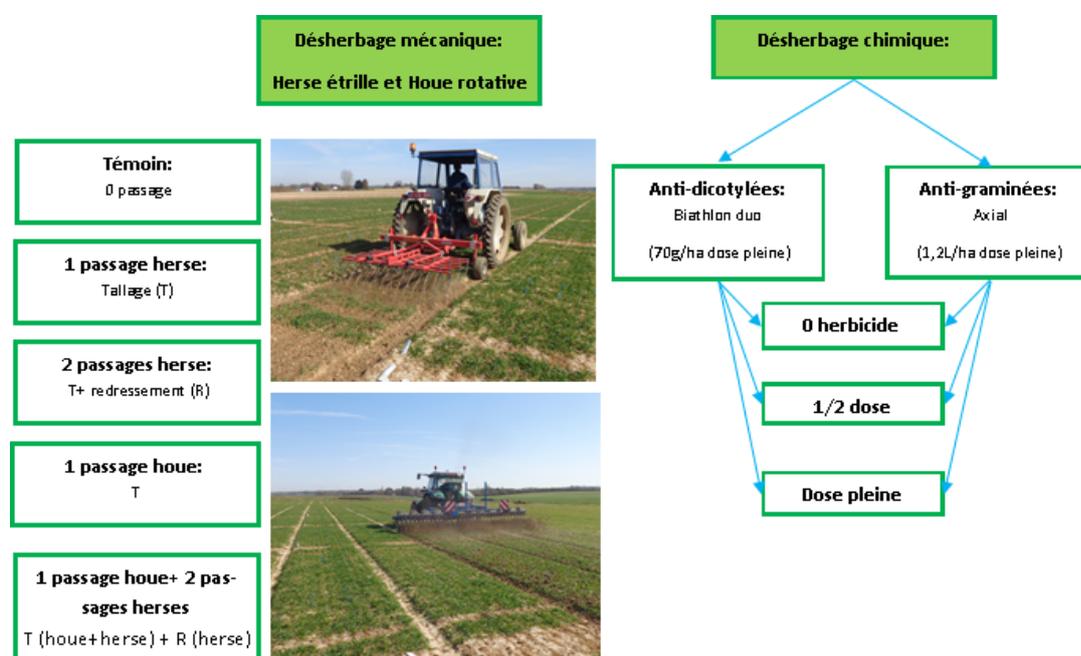
⁸ Dosage SWDE et ISSEP jusqu'en 2018.

5. Désherbage des céréales

5.1. Dispositif expérimental

5.1.1. 2020-2021

Afin de poursuivre les différentes pistes de réduction de produits phytopharmaceutiques entamées dans la première triennale du projet Sol-Phy-Ly, l'essai de désherbage mécanique couplé à du désherbage chimique en céréales a été réinstallé. Cet essai comporte des modalités de désherbage mécanique (herse étrille, houe rotative) à plusieurs gradients d'intensité (0, 1, 2 passages de herse, 1 passage de houe et 1 passage de houe + 2 passages de herses) croisés à l'utilisation d'herbicides sélectifs à différentes doses d'application (0, 1/2 dose et pleine dose). Cet essai, mené en micro-parcelles (2 x 8m) sur les terres de la ferme expérimentale de Gembloux Agro Bio-Tech, comporte 30 modalités et quatre répétitions (figure 147).



30 Modalités

	Herbicide antigraminée			Herbicide antidicotylée		
	0	1/2	1	0	1/2	1
0 Passage	1	2	3	16	17	18
1 herse	4	5	6	19	20	21
2 herses	7	8	9	22	23	24
1 houe	10	11	12	25	26	27
1 houe 1 herse + 1 herse	13	14	15	28	29	30

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
600	18	21	24	27	30	10	8	3	6	15	29	27	23	18	20	5	2	7	14	11
500	17	20	23	26	29	12	7	1	4	13	28	25	22	16	19	4	1	8	15	12
400	16	19	22	25	28	11	9	2	5	14	30	26	24	17	21	6	3	9	13	10
300	3	6	9	12	15	26	23	17	19	29	14	11	7	1	5	21	16	22	28	26
200	2	5	8	11	14	25	24	18	20	30	13	10	9	2	6	20	17	23	30	27
100	1	4	7	10	13	27	22	16	21	28	15	12	8	3	4	19	18	24	29	25
Herse	0	1x	2x	0	2x	0	2x	0	1x	2x	2x	0	2x	0	1x	1x	0	2x	1x	0
Houe	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	0	0	0	1x	1x

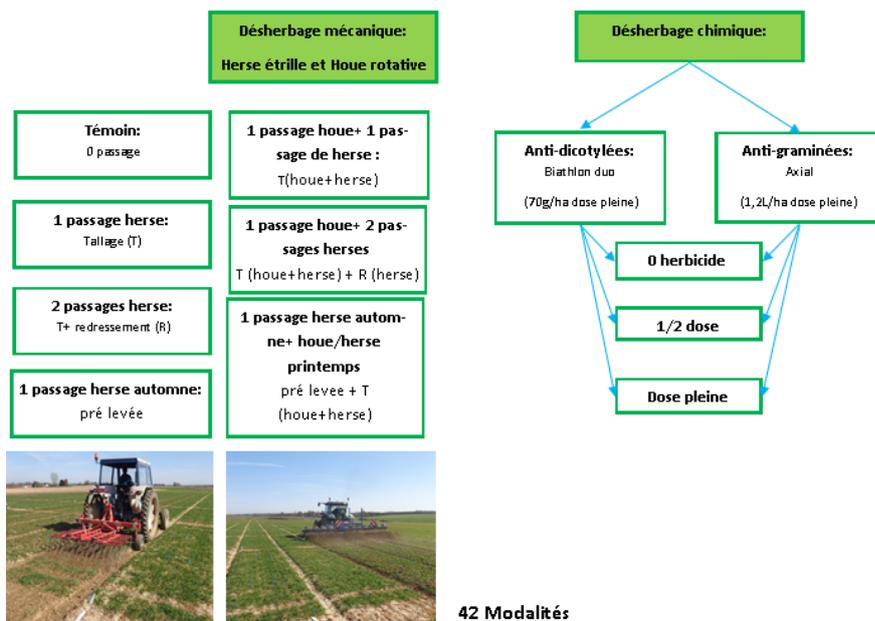
Figure 147. Essai désherbage SOL-Phy-Ly. Protocole expérimental 2020-2021

Tout comme lors de la première triennale du projet, des herbicides sélectifs anti-dicotylées et anti-graminées ont été utilisés afin de déterminer l'efficacité du désherbage sur les deux familles d'adventices (monocotylées, dicotylées). Les produits commerciaux sont l'Axial pour l'anti-graminées (50g/l pinoxaden et 12.5 g/l cloquintocet-mexyl) et le Biathlon duo pour l'anti-dicotylées (71.4% tritosulfuron et 5.4% florasulam).

5.1.2. 2021-2022

En ce qui concerne l'essai de 2021-2022, le dispositif expérimental est proche de celui de l'année 2020-2021 et est repris dans la figure 148. Toutefois, afin d'essayer d'améliorer l'efficacité du désherbage mécanique, de nouvelles modalités ont été testées. Il est conseillé de passer la herse à des jeunes stades des adventices. C'est pourquoi un passage dit « à l'aveugle » en prélevée du froment a été rajouté (passage de herse à l'automne) ainsi qu'une modalité herse à l'automne combiné à un passage de houe plus un passage de herse au printemps. Enfin, une modalité houe plus herse au tallage (sans le deuxième passage de herse au redressement) a été rajouté afin de déterminer l'utilité du second passage de herse. Par contre la modalité d'un passage unique de houe rotative a été retiré du protocole suite à son faible impact sur les adventices.

Les produits et doses d'herbicides quant à eux restent identiques aux autres années. Le nombre total de modalités sur l'expérimentation passe donc de 30 modalités pour l'année 2020-2021 à 42 modalités pour l'année 2021-2022.



	Herbicide antigraminée			Herbicide antidicotylée		
	0	1/2	1	0	1/2	1
0 Passage	1	2	3	22	23	24
1 herse	4	5	6	25	26	27
2 herses	7	8	9	28	29	30
1 houe/herse	10	11	12	31	32	33
1 houe/herse +herse	13	14	15	34	35	36
1herse automne +houe/herse printemps	16	17	18	37	38	39
1herse automne	19	20	21	40	41	42

Herse	0	1x	2x	1	2x	1A+1P	1A	2x	0	1x	2x	1A	1A+1P	1x	2x	1A	0	1x	2x	1A	1A+1P	1x	2x	1A	0	1x	2x	1A
600	24	27	30	33	36	39	42	8	6	16	11	15	19	3	22	29	27	41	37	34	32	10	17	15	19	8	3	6
500	23	26	29	32	35	38	41	7	4	18	10	14	21	1	24	28	25	40	39	36	31	11	18	13	20	7	2	5
400	22	25	28	31	34	37	40	9	5	17	12	13	20	2	23	30	26	42	38	35	33	12	16	14	21	9	1	4
300	3	6	9	12	15	18	21	28	27	38	31	35	41	23	1	7	5	21	18	13	11	31	38	38	42	30	23	25
200	2	5	8	11	14	17	20	30	25	37	33	36	42	24	2	9	4	19	16	14	10	32	39	38	41	29	22	26
100	1	4	7	10	13	16	19	29	26	39	32	34	40	22	3	8	6	20	17	15	12	33	37	34	40	28	24	27

Figure 148. Essai désherbage Sol-Phy-Ly. Protocole expérimental 2021-2022.

5.2. Observations

Les observations réalisées sur les deux dernières années culturales (2020-2021 et 2021-2022) ont pour objectif de caractériser le développement des adventices et de la céréale pendant la phase végétative, ainsi que de déterminer le rendement du froment au terme de la culture. Le relevé des adventices pour chaque modalité est réalisé au sein de quadrats de 0,25m². Il est réalisé par espèce d'adventices. Elles sont dénombrées ainsi que caractérisées. Pour ce faire :

- les relevés ont lieu, pour l'ensemble des modalités, après chaque opération de désherbage sur l'expérimentation ;
- une biomasse des adventices est réalisée à la floraison du froment (observation absente les autres années) ;
- un suivi des stades de développement du froment (échelle BBCH) et de son état sanitaire est effectué ;
- la mesure du rendement en grains est réalisée.

Le nombre de quadrats par parcelle est de deux pour l'année 2020-2021 mais uniquement d'un pour l'année 2021-2022. En effet, aucune différence d'analyse en utilisant un ou deux quadrats pour l'année 2020-2021 n'a été observé. Il a donc été décidé de reprendre le nombre de quadrat établi les autres années ; soit un quadrat.

Les différentes dates d'opérations de désherbage ainsi que de comptages sont repris dans le tableau 12 et le tableau 13

Tableau 12. Activités de désherbages et de prises de données réalisées en 2021-2022.

Date	Activités		Stade
29-10-22	Passage de herse automne		pré-levée
03-03-22	Premier comptage	T0	plein tallage
10-03-22	Passage herse étrille et houe rotative (Tallage)	P1	plein tallage
11-03-22	Passage herse étrille sur modalités avec houe+herse (Tallage)	P1	plein tallage
22-03-22	Désherbage chimique		plein tallage
06-04-22	Deuxième comptage	T1	fin tallage
20-04-22	Passage herse étrille redressement	P2	Redressement
28-04-22	Troisième comptage	T2	1er nœud
02-06-22	Biomasse adventice	T3	Floraison
03-06-22	Quatrième comptage		Floraison
25-07-22	Récolte		Maturité

Tableau 13. Activités de désherbages et de prises de données réalisées en 2020-2021.

Date	Activités		Stade
15-03-21	Premier comptage	T0	
30-03-21	Passage herse étrille et houe rotative (Tallage)	P1	plein tallage
31-03-21	Désherbage chimique		plein tallage
01-04-21	Passage herse étrille sur modalité houe+herse (Tallage)	P1	plein tallage
14-04-21	Deuxième comptage	T1	Redressement
16-04-21	Passage herse étrille tallage redressement	P2	Redressement
03-05-21	Troisième comptage	T2	1er nœud
14-06 au 21-06-21	Quatrième comptage	T3	Floraison
14-06 au 21-06-21	Biomasse adventice		Floraison
15-08-21	Récolte		Maturité

5.3. Résultats de l'année culturale 2020-2021

Malgré les conditions météorologiques du printemps 2021 assez humides, des fenêtres météorologiques plus sèches ont permis le passage de la herse étrille aux stades prévus par le protocole (tallage, redressement). Il a été possible de passer l'outil dans des conditions idéales (sol bien réessuyé avant le passage de l'outil suivi d'un temps sec pendant 48 heures).

En ce qui concerne la réalisation du désherbage chimique, celui-ci a pu être réalisé au stade plein tallage (fin mars). L'application est plus précoce que les autres années, permettant de ce fait d'améliorer l'efficacité de l'herbicide.

5.3.1. Evaluation des populations d'adventices

Les résultats sont issus de comptages systématiques (avant-après chaque opération de désherbage). Un comptage systématique permet de mieux cerner la dynamique des adventices au cours du temps et ainsi de se rendre compte de l'impact de chaque passage de désherbage.

La gestion des graminées

Lors du comptage des populations d'adventices, aucune graminée n'a été compté dans les quadrats. Cette absence de graminées empêche toute analyse. Malheureusement il ne sera pas possible de savoir l'impact du désherbage mécanique couplé ou non à un désherbage chimique sur une flore contenant des graminées.

La gestion des dicotylées

La population d'adventices est dominée par de la matricaire camomille. Celle-ci représente à elle seule plus de 90% de la flore d'adventices. Dans une moindre mesure, on peut y retrouver des gaillets gratterons ainsi que des renouées (figure 149)

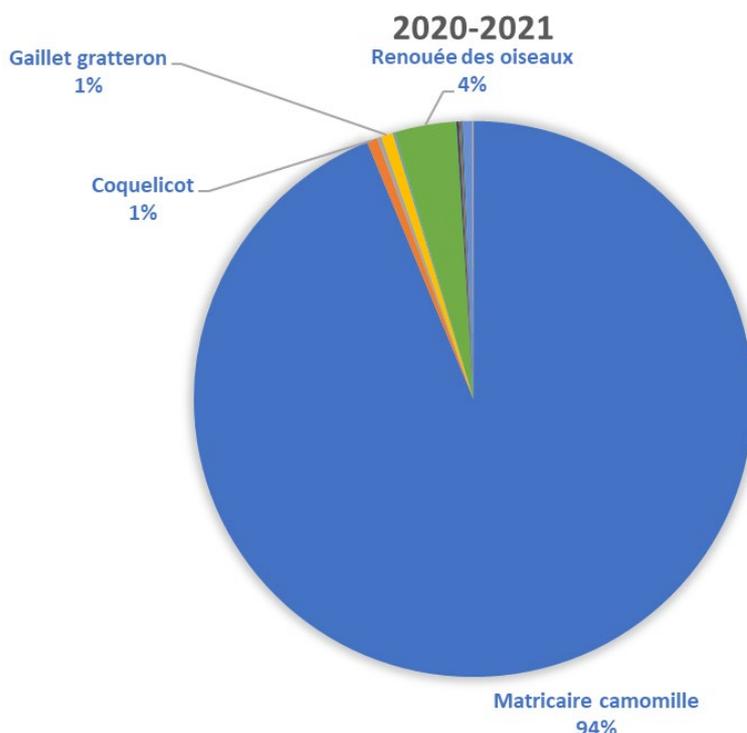


Figure 149. Composition initiale de la flore d'adventices 2020-2021.

La variabilité spatiale de la flore d'adventices au premier comptage était très importante avec une variation allant de 20 à 620 adventices par m². De plus, sur toute une moitié de l'essai, la pression en adventices était excessivement élevée (figure 150)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
600	68	56	28	36	64	64	44	20	36	48	76	60	48	36	32	20	52	32	28	24
	44	108	84	56	88	36	40	16	48	32	144	60	64	72	52	44	68	28	36	
500	64	60	64	48	56	76	72	40	60	40	76	68	104	56	68	48	68	88	96	48
	88	36	24	76	52	44	64	32	68	92	36	60	100	96	76	84	120	84	76	52
400	104	92	56	52	60	92	72	36	108	100	116	68	100	136	128	100	120	76	128	88
	108	180	80	108	112	124	140	64	160	208	128	128	132	124	120	148	152	160	72	72
300	204	128	140	176	164	120	204	160	136	216	180	104	192	200	236	148	220	156	144	116
	144	172	148	136	134	192	248	176	232	184	144	148	140	168	168	192	192	212	128	96
200	244	320	220	240	52	188	236	220	300	184	156	156	116	216	188	224	264	172	120	112
	292	488	296	260	140	240	244	316	336	276	256	108	188	260	264	324	444	136	132	108
100	324	388	440	268	200	260	284	464	468	516	264	108	156	352	468	552	404	176	136	108
	288	276	292	252	252	324	212	404	612	356	224	168	184	256	620	456	348	208	88	156

Figure 150. Distribution spatiale du nombre d'adventices au premier comptage (2020-2021).

L'évolution du nombre d'adventices en fonction des différents traitements peut être observée sur la figure 151. De manière globale, une fois l'antidicotylée appliqué, le nombre d'adventices par m² a été fortement

réduit. Tandis que sans herbicide, il semble que la houe rotative combinée à la herse ait la capacité de réduction du nombre d'adventices la plus forte.

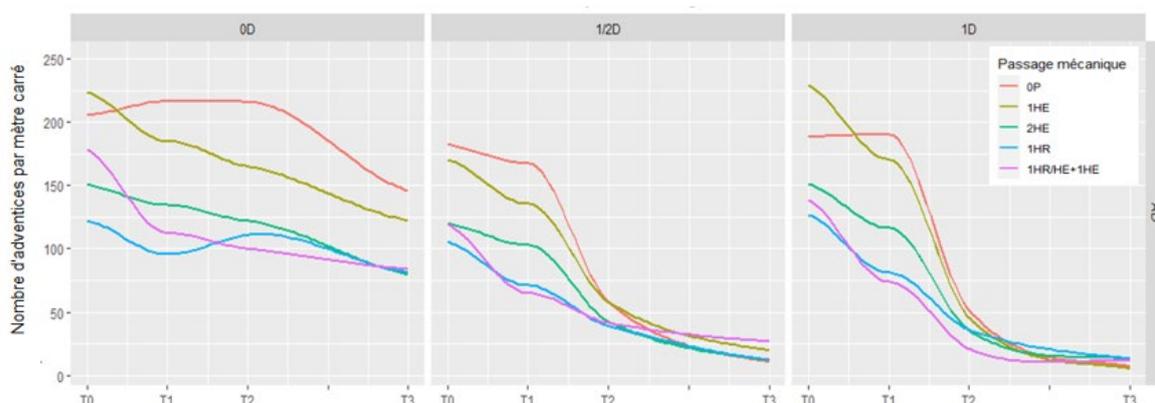


Figure 151. Tendence de l'évolution du nombre d'adventices en fonction du temps selon la dose d'anti-dicotylée et le nombre de passages mécaniques.

Pour permettre une analyse moins sensible à l'hétérogénéité du nombre d'adventices initial (figure 150), le pourcentage de réduction du nombre d'adventices a été utilisé, et se calcule comme suit :

$$\text{Réduction du nombre d'adventice}(\%) = \frac{\text{Adventices en } T0 - \text{Adventices en } Tn}{\text{Adventices en } T0} \times 100$$

Où *Adventices en T0* correspond au nombre d'adventice initial et *Adventices en Tn* correspond au nombre d'adventices après au minimum une opération de désherbage.

Ainsi, ce n'est plus le nombre d'adventices en absolu qui est étudié mais la quantité d'adventices qui a été supprimée par le désherbage.

Afin de mettre en évidence l'efficacité du désherbage mécanique, le pas de temps T0-T1 est étudié sur l'ensemble du jeu de données suivi du pas de temps T1-T2 et T0-T2 sur les modalités sans herbicides anti-dicotylée.

L'efficacité du désherbage chimique couplé au désherbage mécanique est analysé entre les pas de temps T0 et T2.

N'ayant aucune intervention de désherbage entre le T2 et le T3, celui-ci sera utilisé pour analyser l'effet compétiteur du froment sur les adventices.

Enfin, une évaluation globale de l'efficacité du désherbage sera réalisée entre le pas de temps T0-T3.

Une ANOVA sur un modèle mixte est réalisée sur chacun des pas de temps cités ci-dessus suivi d'une analyse post-hoc en réalisant un test de Tukey sur les moyennes marginales estimées. L'ensemble des analyses sont réalisées sur Rstudio avec le package *ggplot2*, *car*, *emmeans* et *lme4*.

5.3.2. Efficacité du désherbage mécanique seul

Une différence très hautement significative a été observée dès le premier passage d'outil mécanique. Avec un pourcentage de réduction identique pour la herse et la houe utilisée seule tandis que la houe rotative avec un passage de herse étrille a permis la meilleure réduction d'adventices en réduisant de 42 ± 17 % les adventices présentes. Dans ce même temps, l'absence de désherbage a engendré une levée d'adventice de +17% d'adventices (figure 152).

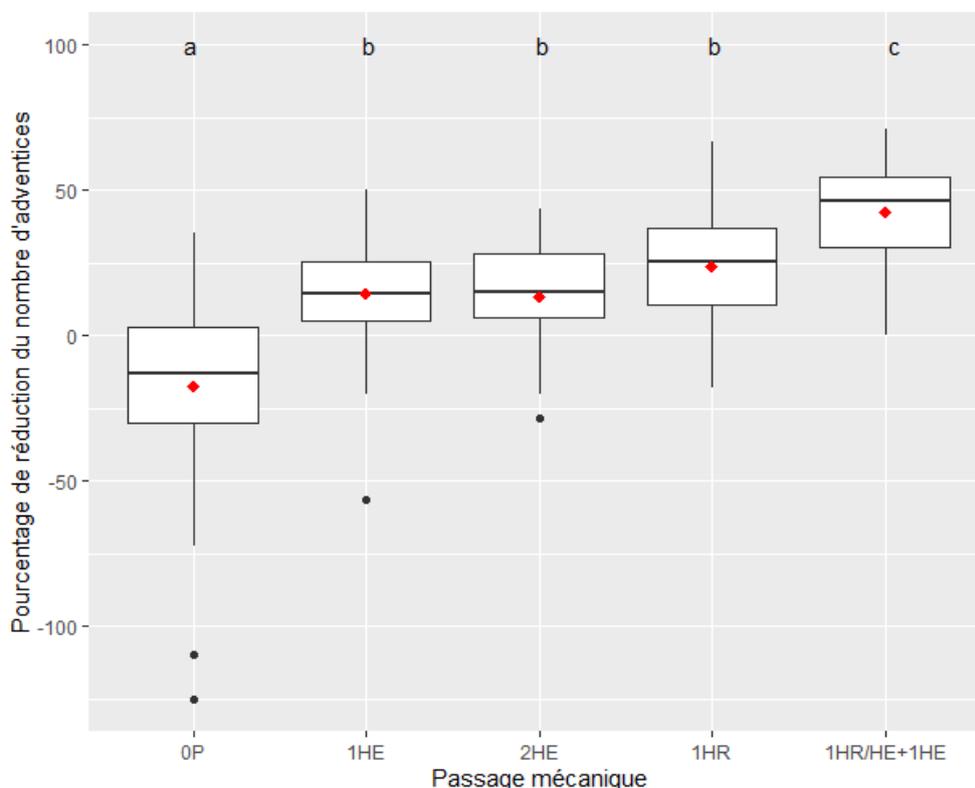


Figure 152. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T1 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Entre le premier et le second passage de désherbage mécanique, une différence hautement significative est aussi observée. Comme illustré sur la figure 153, la modalité avec deux passages de herse a permis de réduire de 8.8% le nombre d'adventices tandis que la houe rotative a engendré une forte levée (13,68%) de nouvelles adventices et/ou une reprise d'adventices qui étaient devenues non visibles. Le second passage de herse pour la modalité houe rotative/herse plus herse ne semble pas avoir permis une réduction supplémentaire du nombre d'adventices. Cela peut être dû à sa plus forte agressivité et efficacité au premier passage (figure 152)

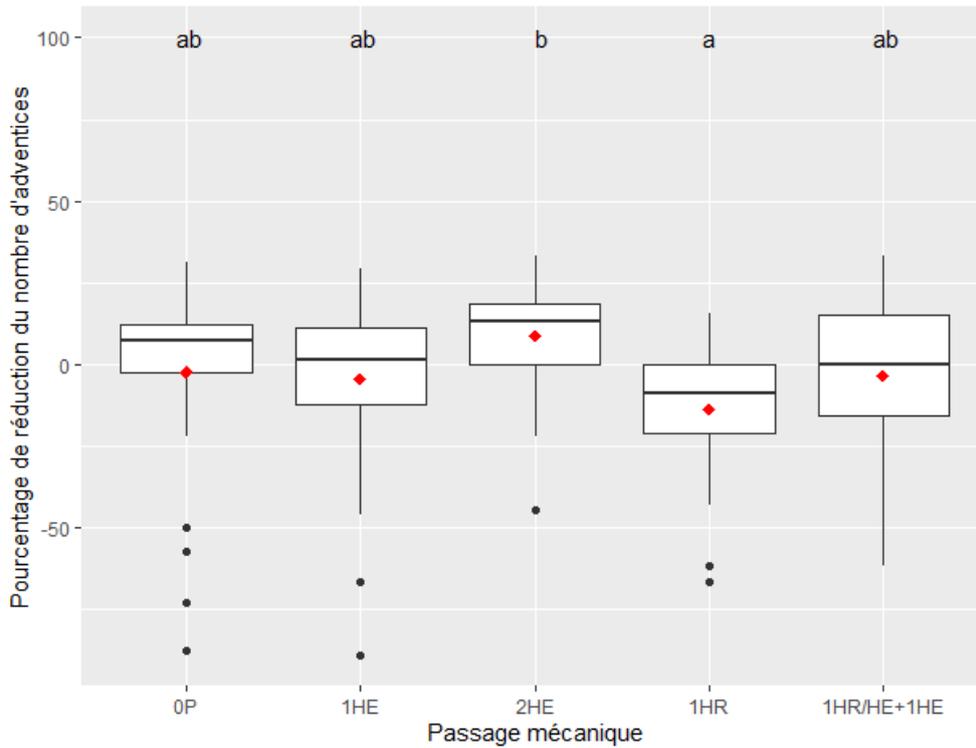


Figure 153. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T1 et T2 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Enfin, si l'on regarde globalement sur l'ensemble du pas de temps T0-T2, on peut observer que la houe rotative associée à la herse étrille présente l'efficacité la plus forte tandis qu'aucun contrôle mécanique engendre une levée de nouvelles adventices.

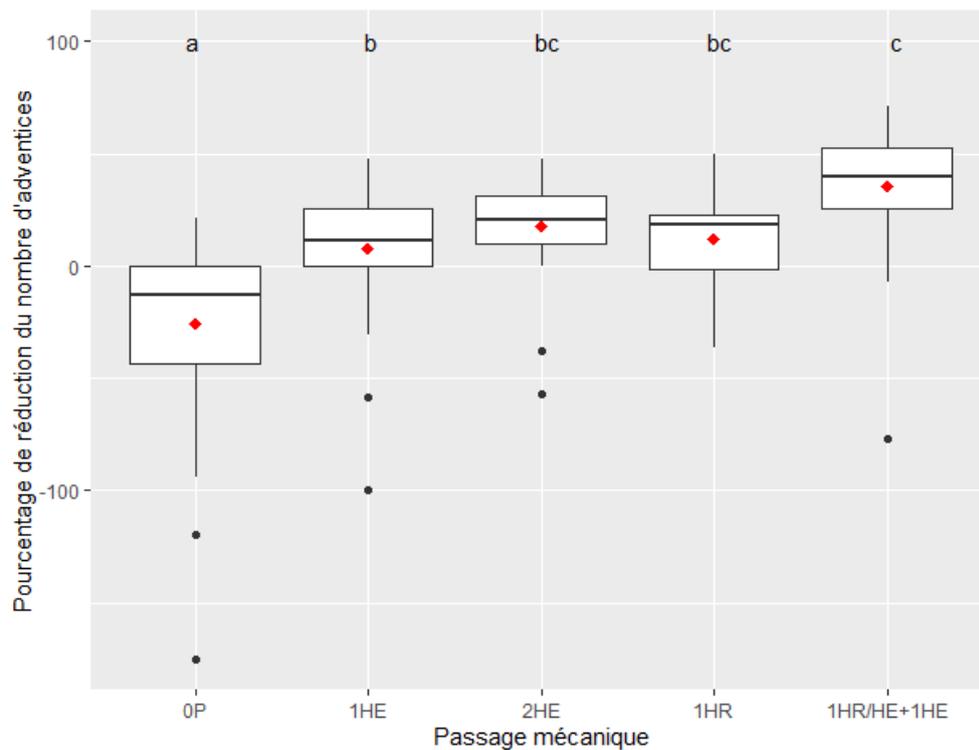


Figure 154. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des modalités de passages mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.3.3. Effet du désherbage mécanique couplé au chimique

Comme représenté sur la figure 155, l'effet du désherbage chimique à base d'anti-dicotylées montre une très bonne efficacité dès une demi-dose. Par contre, il n'est pas possible d'observer une tendance claire d'amélioration du désherbage chimique quand celui-ci est couplé à du désherbage mécanique. Toutefois en absolu, la modalité avec la réduction du nombre d'adventices la plus forte est celle avec un contrôle maximal (1 dose d'anti-dicotylée et la modalité de désherbage mécanique la plus forte.)

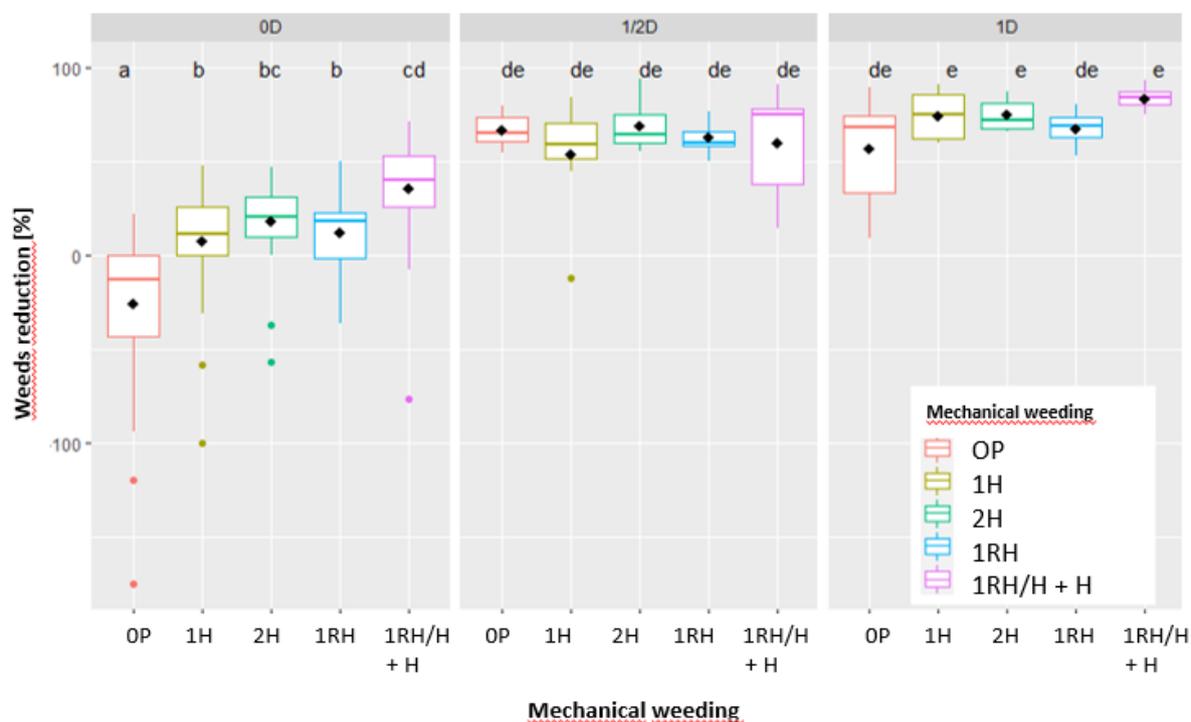


Figure 155. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passages mécaniques. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.3.4. Effet compétiteur du froment

Grâce à la compétition pour les ressources (eau, azote, lumière, ...), le froment peut aussi engendrer une diminution du nombre d'adventices. Cela est visible entre le pas de temps T2 et T3. Dans la modalité sans aucun contrôle, on peut observer une diminution du nombre d'adventices (figure 156). L'effet compétiteur s'observe d'autant plus qu'aucune opération de désherbage a été réalisée. Cette mortalité d'adventices est trop tardive pour n'avoir pas eu d'effet sur le développement du froment mais permet par contre de diminuer le nombre d'adventices capables de grainer et de salir la parcelle pour les années futures.

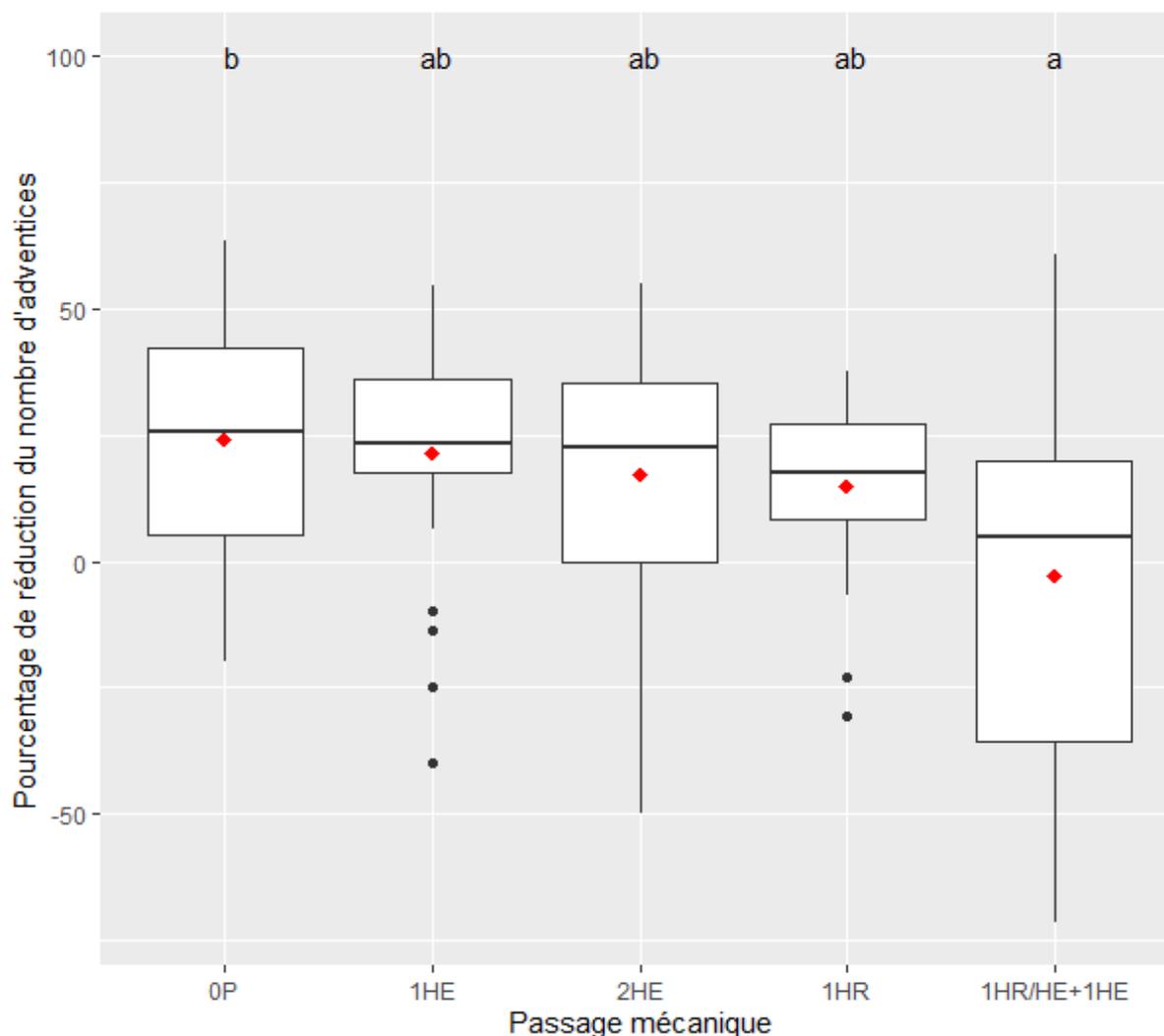


Figure 156. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T2 et T3 sous anti-graminée en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.3.5. Effet Global

Si l'on observe l'effet global sur le pas de temps T0-T3 (figure 157), celui-ci est proche de l'efficacité T0-T2 avec une tendance à l'homogénéisation. L'efficacité du désherbage chimique a grimpé à presque 100% grâce à l'effet compétiteur du froment sur les adventices. Le désherbage mécanique présente une variabilité plus grande. En effet, le travail mécanique à un travail moins homogènes et peut de par son effet sur le sol, engendrer de nouvelle levée.

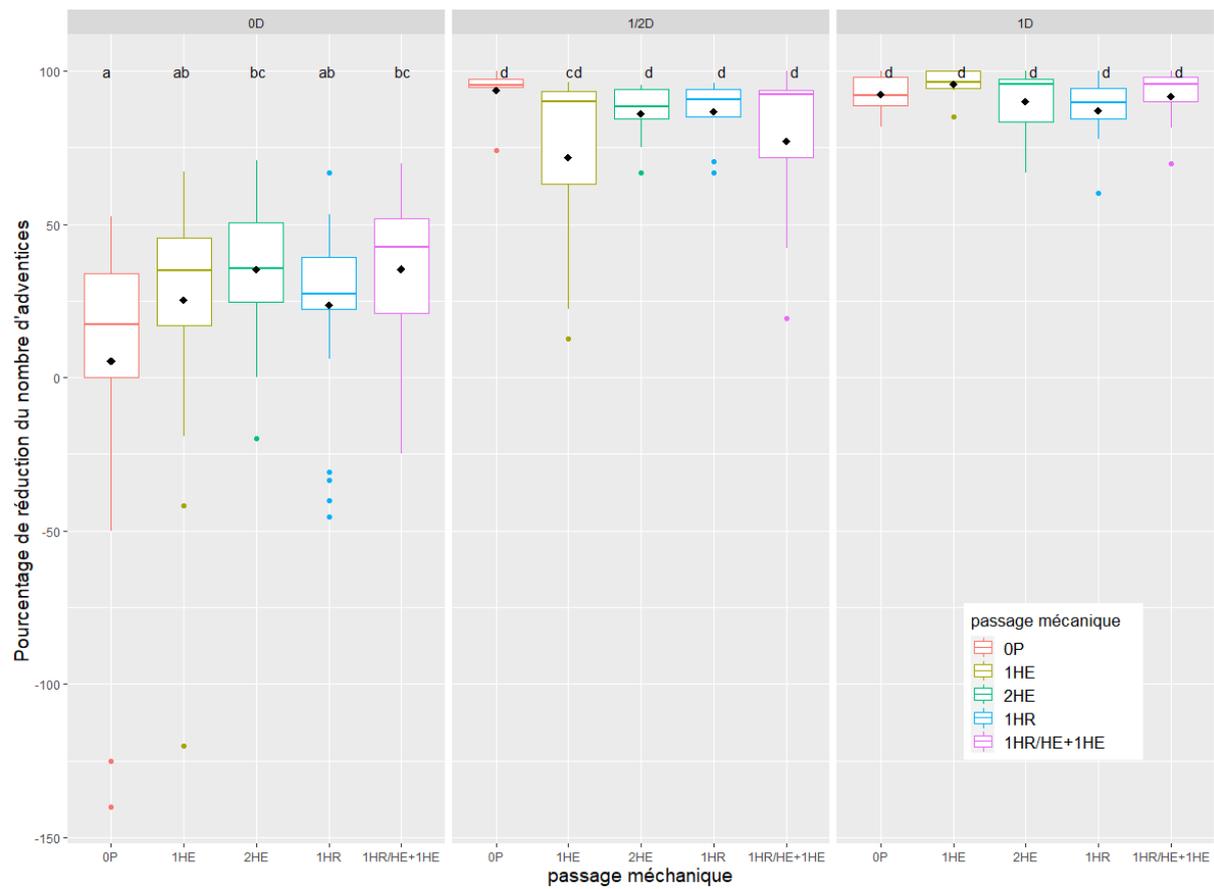


Figure 157. Pourcentage de réduction du nombre d'adventives entre T0 et T3 en fonction des doses d'anti-dicotyliées et des modalités de passages mécanique. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.3.6. Effet sur la biomasse

Si l'on observe l'effet du désherbage sur la biomasse d'adventices à floraison du froment, les différences entre modalités sont encore plus marquées. En effet, comme on peut observer sur la figure 158, le désherbage chimique a permis d'avoir une biomasse d'adventices proche de zéro tandis qu'en désherbage mécanique seul, la biomasse d'adventices reste conséquente. D'ailleurs, uniquement la modalité houe rotative plus herse est significativement différente du témoin. Les autres modalités de désherbage sont intermédiaires. On peut observer une grande variabilité de biomasse d'adventices au sein des modalités de désherbage mécanique. Celle-ci s'explique par la grande variabilité du nombre d'adventices au départ (figure 150) et du manque d'efficacité du désherbage mécanique.

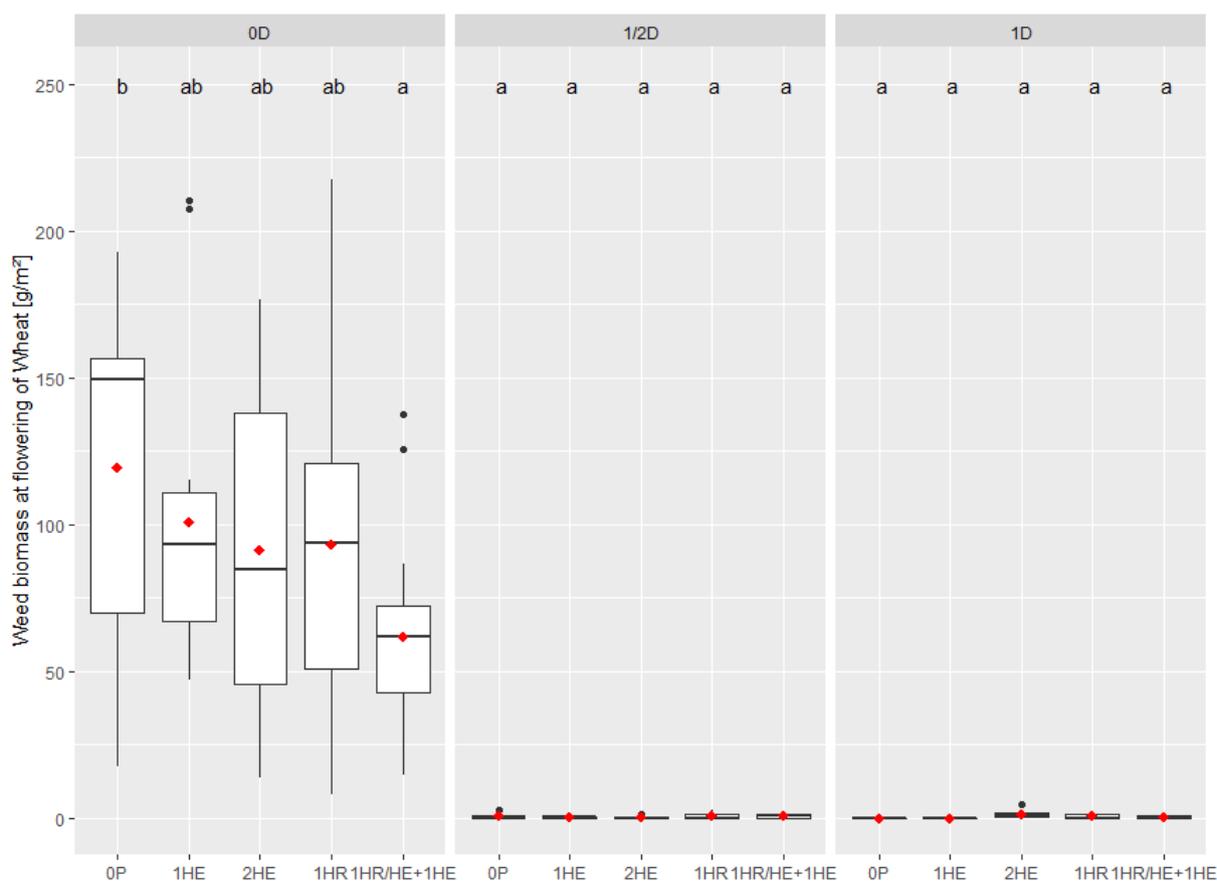
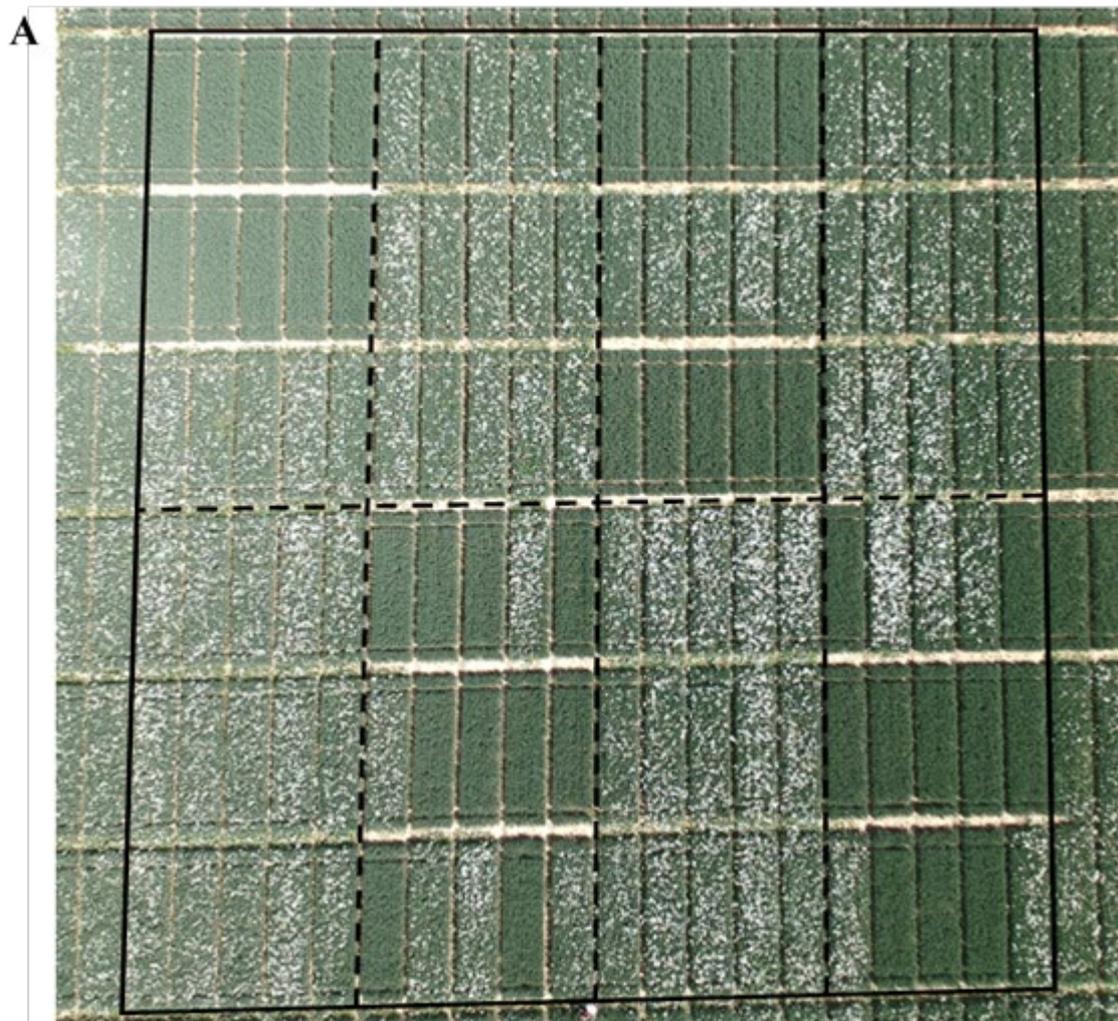


Figure 158. Biomasse d'adventices à floraison du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Pour un même nombre d'adventices, la biomasse avec un herbicide est plus faible qu'avec un désherbage mécanique, en effet le PPP (dans le cas présent est de type hormonal) a pour effet de bloquer la croissance de l'adventice si celle-ci n'est pas tuée dû à l'effet phytotoxique de la molécule. Tandis que le désherbage mécanique, si la plante n'est pas touchée, celle-ci continue à croître normalement. Ceci est confirmé par la photo de drone de l'essai (figure 159) où grâce aux ligules des fleurs de matricaire camomille, il est facile d'observer l'efficacité des différentes modalités. À noter qu'une absence de ligules ne signifie pas une absence d'adventices, comme souligné plus haut, il peut rester quelques matricaires camomilles sous développées dans les parcelles avec des PPP suite au blocage du développement de l'adventice.



Herse	0	1x	2x	0	2x	0	2x	0	1x	2x	2x	0	2x	0	1x	1x	0	2x	2x	0
Houe	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	0	0	0	1x	1x

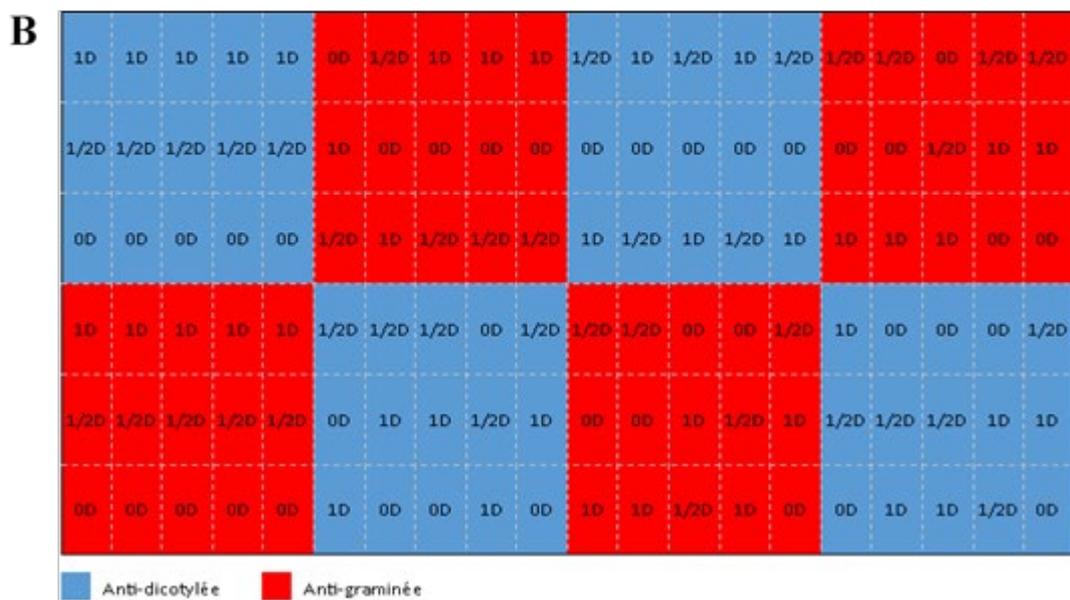


Figure 159. Photo aérienne de la parcelle d'essai à la floraison des matricaires camomilles (A). Schéma reprenant les modalités de désherbage chimique correspondant à chaque micro-parcelle (B).

5.3.7. Effet sur le rendement

Comme illustré sur la figure 160, on peut observer une corrélation négative entre le rendement et la biomasse d'adventices. Cela met bien en avant l'importance de limiter le développement d'adventices si l'on désire un rendement élevé. Les modalités ayant reçu une dose ou une demi dose d'anti-dicotylée se trouvent sur l'extrême gauche et en haut du rendement signifiant que ce sont dans ces modalités que les rendements sont les plus élevés.

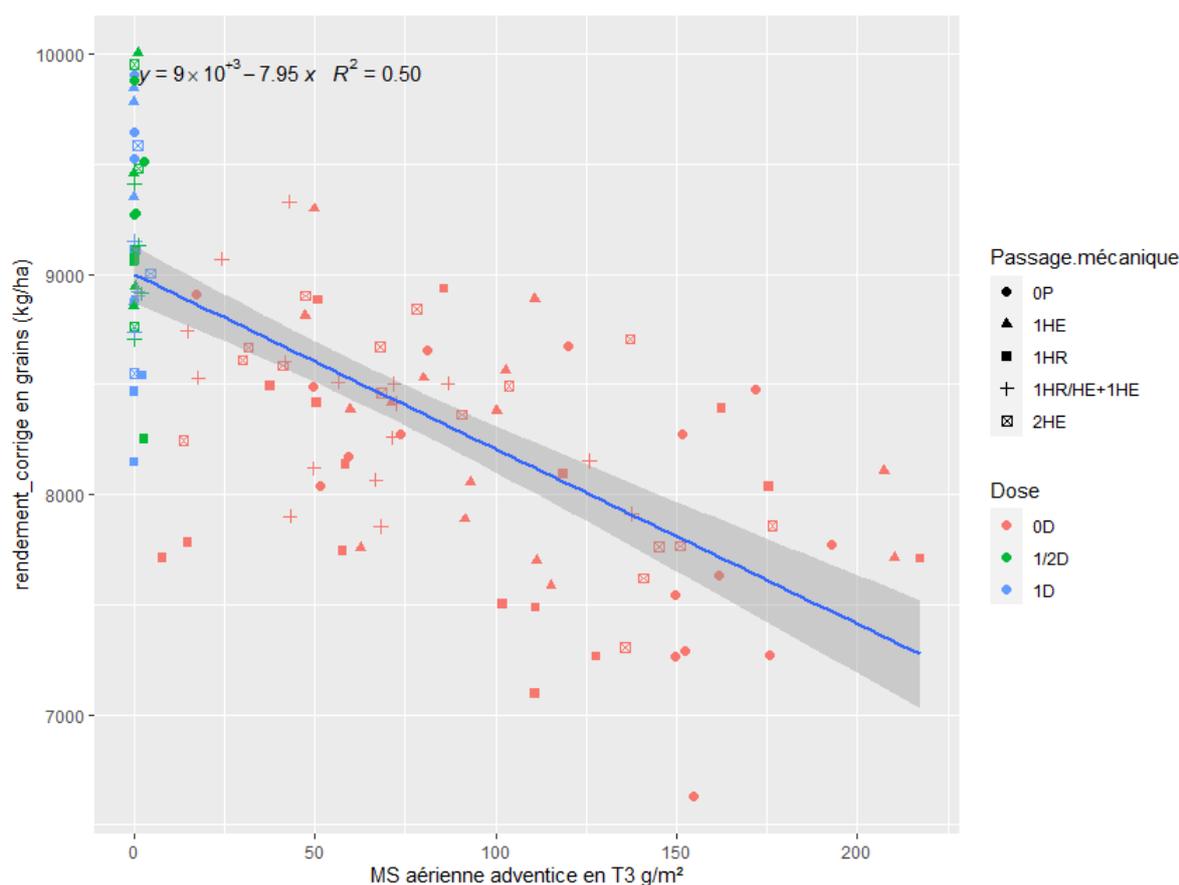


Figure 160. Rendement en grain à 15% d'humidité selon la biomasse en MS d'adventice à floraison du froment.

Si l'on regarde un peu plus en détails les résultats de la récolte 2021 (figure 161), on peut s'apercevoir que le rendement a tendance à augmenter avec l'agressivité du désherbage mécanique quand aucun contrôle d'herbicide a été appliqué. Tandis qu'il a tendance à diminuer le rendement dans les modalités avec herbicide. Cela s'explique par la sélectivité du désherbage mécanique. En effet, celui-ci n'a pas une sélectivité de 100% envers la culture, une partie des plants de froment peuvent être déchaussés, ou des talles abimées. Sans utilisation d'herbicide, ce dommage à la culture est moins nuisible que la plus-value de la réduction de la pression d'adventices. Par contre, avec utilisation d'herbicide, le désherbage mécanique entraîne juste une réduction du potentiel de rendement sans diminuer la pression en adventices puisque celle-ci est déjà proche de zéro.

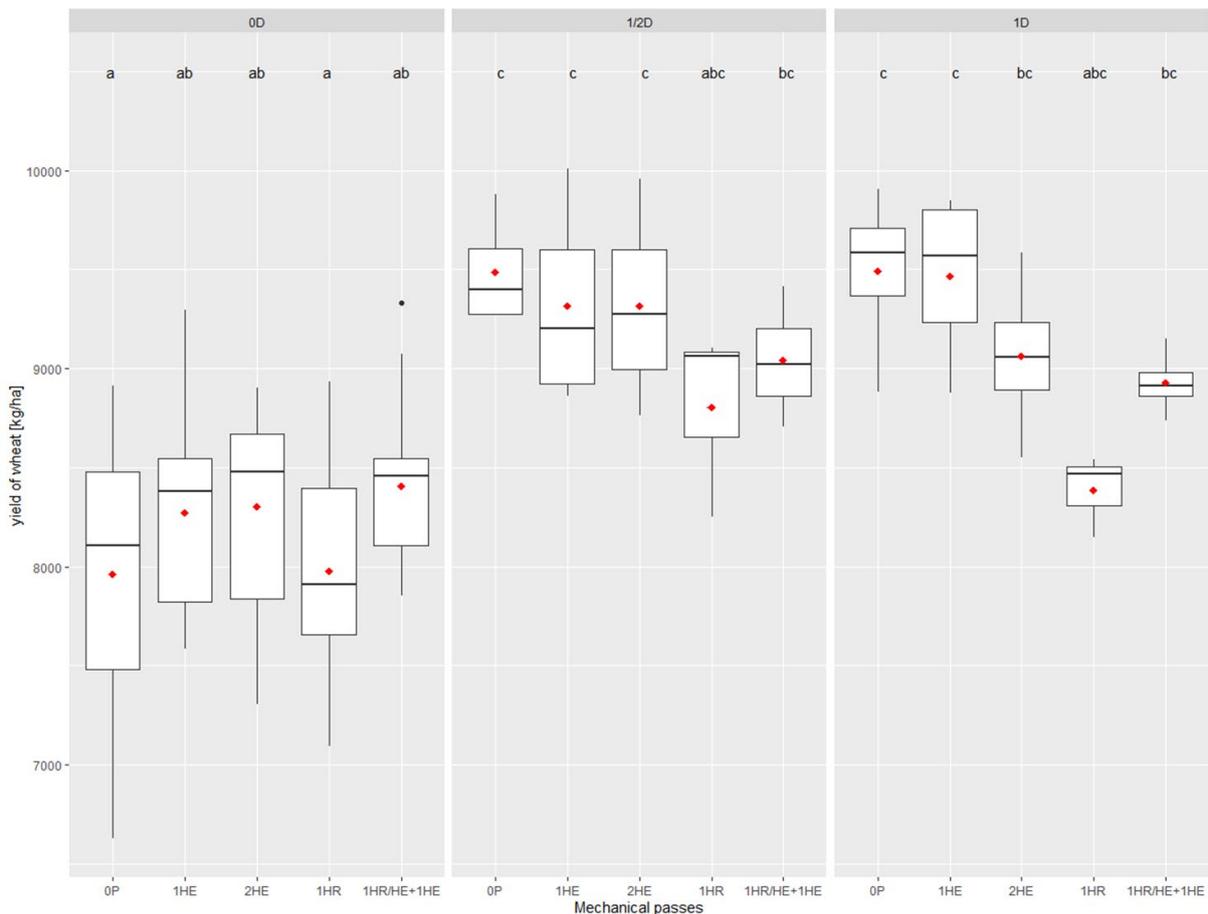


Figure 161. Rendement du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.4. Résultats de l'année culturale 2021-2022

Des fenêtres météorologiques sèches une semaine après le semis ont permis le passage de la herse étrille en pré-levée en automne. De plus, la météo a permis déjà tôt en saison (terre réessuyée en début mars) le passage de la herse étrille et de la houe rotative aux stades prévus par le protocole (tallage, redressement). Il a été possible de passer l'outil dans des conditions idéales (sol bien réessuyé avant le passage de l'outil suivi d'un temps sec pendant 48 heures).

En ce qui concerne la réalisation du désherbage chimique, celui-ci a pu être réalisé au stade plein tallage (22 mars). L'application est un peu plus précoce que l'année dernière. Par contre le temps froid et sec de ce printemps (avec vent desséchant) n'était pas des conditions idéales pour un désherbage chimique.

5.4.1. Evaluation des populations d'adventices

Les résultats sont issus de comptages systématiques (avant-après chaque opération de désherbage) (comme l'année 2020-2021). Toutefois, vu la nouvelle modalité avec un désherbage mécanique en pré-levée, il n'est pas possible de réaliser le premier comptage avant cette opération. Le premier comptage réalisé en sortie d'hiver servira donc de comparaison entre les parcelles pour déterminer l'efficacité du désherbage mécanique en pré-levée.

Lors du comptage des populations d'adventices, seulement trois graminées ont été comptées dans les quadrats. Cette absence de graminée empêche toute analyse. Par conséquent, il ne sera pas possible de déterminer l'impact du désherbage mécanique couplé ou non à un désherbage chimique sur une flore contenant des graminées.

Un effort quant à la recherche d'un site ayant une flore d'adventices avec des monocotylées sera réalisé cette année pour espérer pouvoir répondre à ce volet du projet.

La population de dicotylées est plus diversifiée que l'année 2020-2021. Celle-ci est composée lors du premier comptage de 5 espèces principales à savoir 34% de coquelicot, 34% de gaillet gratteron, 10% de véronique à feuille de lierre, 8% de véronique des champs et enfin 8% de matricaire camomille (figure 162).

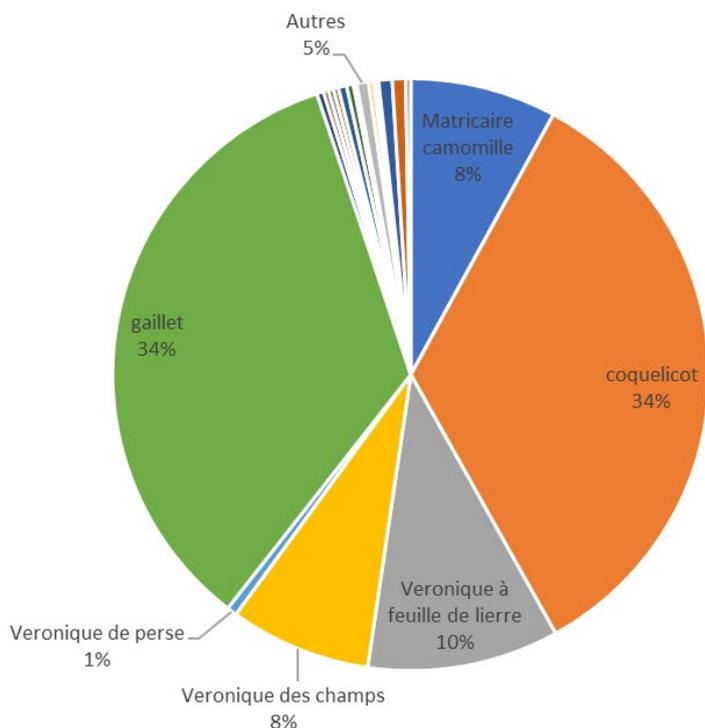


Figure 162. Composition initiale de la flore d'adventices 2021-2022.

La variabilité spatiale de la flore d'adventices au premier comptage est plus modérée que l'année 2020-2021 avec une variation allant de zéro à 176 adventices par m² (figure 163). Néanmoins, on peut observer la présence d'une tache d'adventices plus importante dans la partie haute et centrale de l'essai. Excepté peut être pour la ligne 25, à première vue, on n'observe pas une diminution du nombre d'adventices par le passage de la herse étrille à l'automne en pré-levée. De plus la pression en adventices à la sortie d'hiver est beaucoup plus raisonnable que l'année 2020-2021. Toutefois la présence même à faible densité de gaillets gratterons peut provoquer une concurrence forte sur la culture. En effet, le gaillet a la capacité de produire une biomasse importante.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
600	120	32	28	20	40	28	84	48	28	68	32	20	56	60	88	48	88	176	44	68	60	56	24	24	20	12	16	28
500	4	12	28	32	56	56	60	52	28	80	48	20	104	72	72	56	60	52	24	48	96	20	32	8	4	16	4	16
400	4	12	8	16	20	40	20	12	24	44	32	24	24	48	32	36	44	32	36	28	20	12	16	20	8	28	8	0
300	12	12	8	32	20	24	16	4	16	8	12	8	4	20	16	8	20	32	16	4	8	20	32	20	4	20	8	60
200	4	12	24	24	8	12	16	32	4	0	12	12	20	4	8	16	12	28	8	12	16	16	8	12	4	16	16	12
100	20	16	32	20	0	8	4	4	16	4	8	0	20	12	12	20	8	4	28	8	8	12	8	4	0	40	8	8
	0	1x	2x	1	2x	1A+1P	1A	2x	1x	1A+1P	1x	2x	1A	0	0	2x	1x	1A	1A+1P	2x	1x	1x	1A+1P	2x	1A	2x	0x	1x
	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	1x	1x	1x	0	0	0	0	0	0	1x	1x	1x	1x	1x	1x	0	0	0	0

Figure 163. Distribution spatiale du nombre d'adventices au premier comptage (2021-2022).

L'évolution du nombre d'adventices en fonction des différents traitements peut être observée sur la figure 164. On peut observer dans un premier temps une réduction importante du nombre d'adventices par m² avec l'utilisation de l'anti-dicotylée. La houe rotative combiné à la herse, la houe rotative combiné à la herse plus un second passage de herse et les 2 passages de herse semblent présenter la capacité de réduction du nombre d'adventices la plus importante.

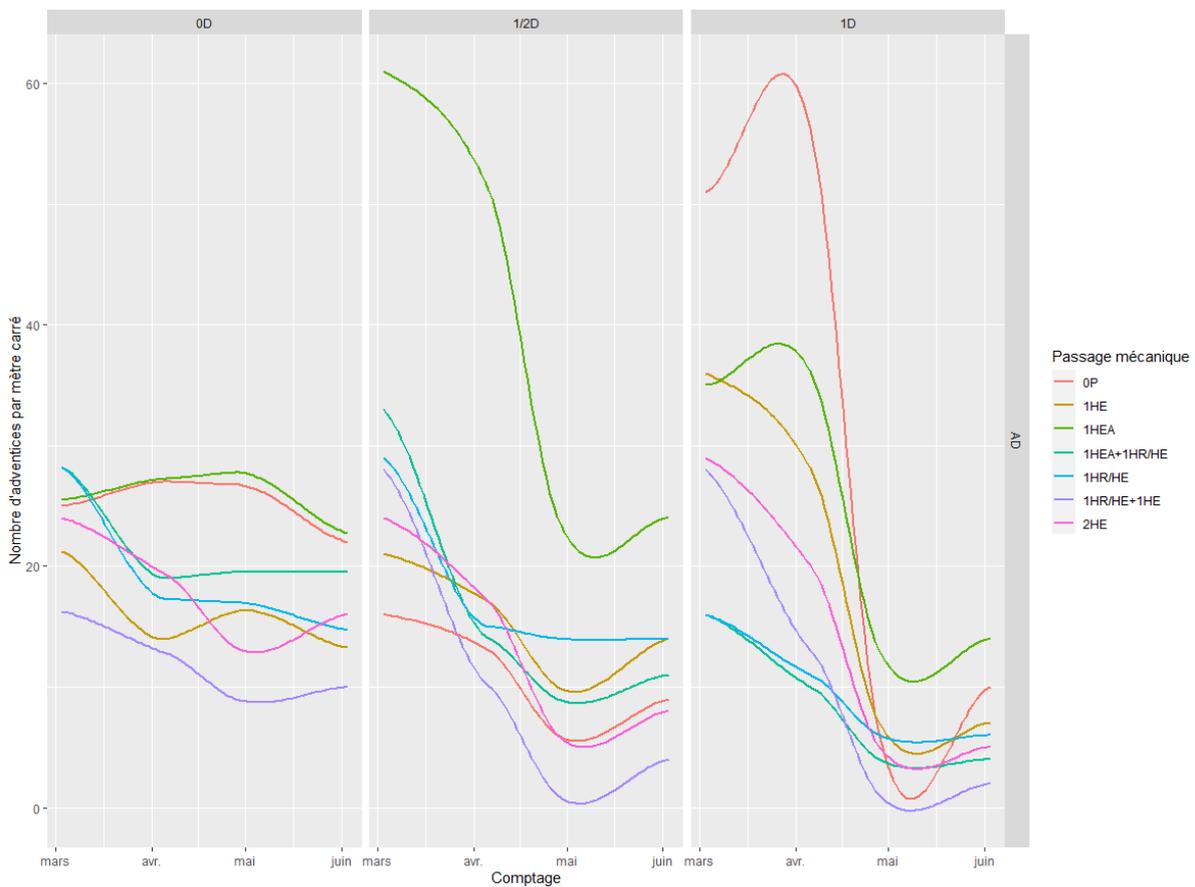


Figure 164. Tendence de l'évolution du nombre d'adventices en fonction du temps selon la dose d'anti-dicotylée et le nombre de passages mécaniques.

La détermination de l'efficacité du désherbage de la herse en prélevée a été analysée sur le nombre d'adventices absolu. Les autres modalités de désherbage ont été évaluées de la même manière que l'année 2020-2021 sur base du pourcentage de réduction du nombre d'adventices calculé comme suit :

$$\text{Réduction du nombre d'adventice(\%)} = \frac{\text{Adventices en } T0 - \text{Adventices en } Tn}{\text{Adventices en } T0} \times 100$$

Où *Adventices en T0* correspond au nombre d'adventices initial et *Adventices en Tn* correspond au nombre d'adventices après au minimum une opération de désherbage.

Cette équation est utilisée pour les raisons évoquées pour l'année 2020-2021.

Afin de mettre en évidence l'efficacité du désherbage mécanique, les pas de temps T0-T1, T1-T2 et T0-T2 ont été utilisés sur les modalités sans herbicides anti-dicotylée. De plus, afin d'évaluer l'efficacité du désherbage en pré-levée, le comptage en T0 est utilisé.

L'efficacité du désherbage chimique couplé au désherbage mécanique est analysé entre le pas de temps T0-T2

Les levées d'adventices observables entre mai et juin n'ont pas d'impact sur le rendement vu leurs levées tardives. De plus, elles n'auront pas la possibilité de grainer. Il n'y aura donc pas de calcul entre le pas de temps T2-T3 ou même T0-T3 pour ne pas « fausser » l'efficacité du désherbage.

Une ANOVA sur un modèle mixte est réalisée sur chacun des pas de temps cités ci-dessus suivie d'une analyse post-hoc en réalisant un test de Tukey sur les moyennes marginales estimées. L'ensemble des analyses sont réalisées sur Rstudio avec le package *ggplot2*, *car*, *emmeans* et *lme4*.

Efficacité du désherbage en prélevée.

Lors du premier comptage réalisé en mars, aucune différence statistique du nombre d'adventices entre les différentes modalités n'a été observée. Il n'y a donc pas eu d'effet visible quant au nombre d'adventices par le passage du désherbage mécanique en pré-levée.

Efficacité du désherbage mécanique seul

Une différence très hautement significative a été observée dès le premier passage d'outil mécanique au printemps ; avec un pourcentage de réduction statistiquement identique pour l'ensemble des modalités de désherbage ayant un passage mécanique. Contrairement à l'année 2020-2021, aucune différence entre la herse étrille et la houe rotative plus herse n'a été observée. Tandis que le désherbage a permis une réduction du nombre d'adventices entre 16.7 et 41.5%, dans ce même temps l'absence de désherbage a engendré une levée d'environ +17% d'adventices (figure 165).

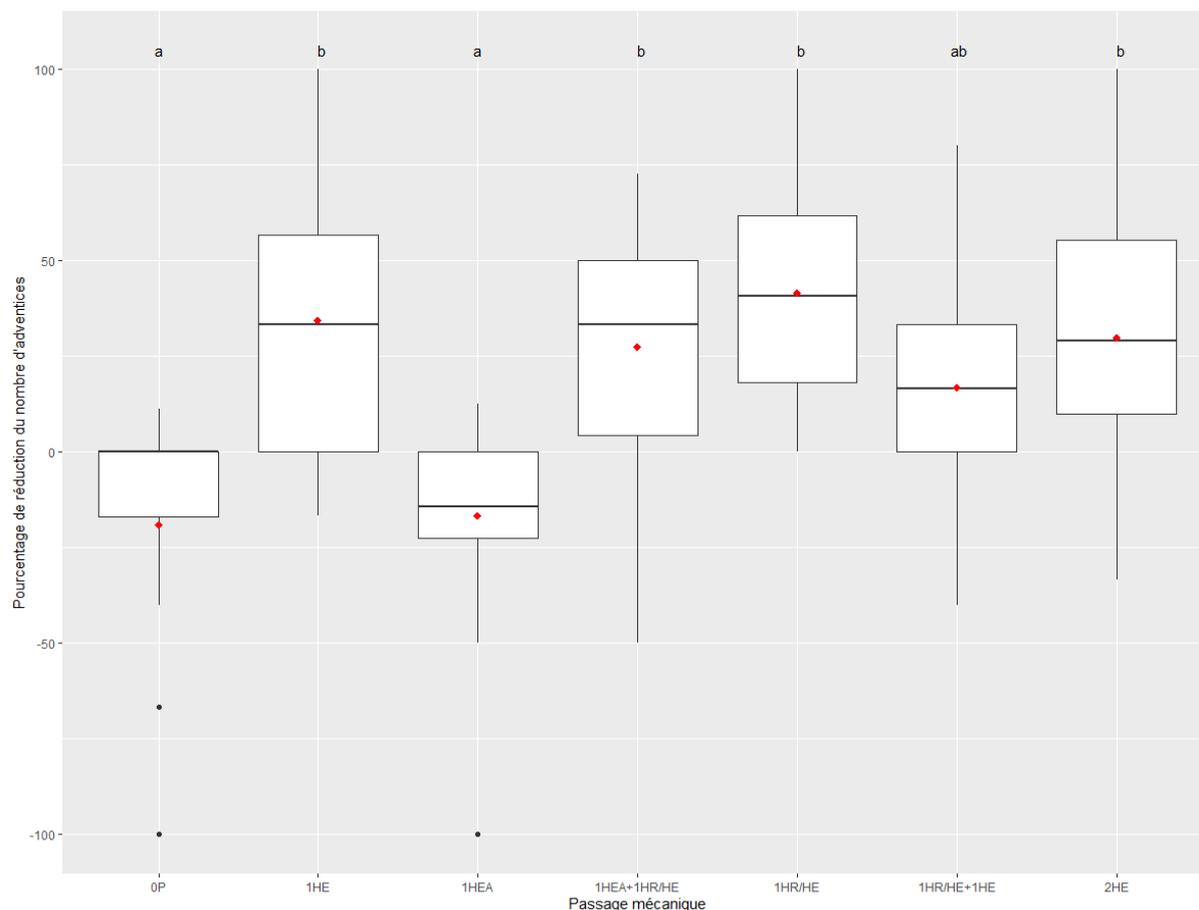


Figure 165. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T1 en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Entre le premier et le second passage de désherbage mécanique, une différence significative est observée. Contrairement à l'année 2021-2022, le second passage de herse a eu le même effet pour la modalité avec houe rotative que sans (figure 166) et a permis de diminuer d'environ 32% le nombre d'adventices. Les autres modalités sont dans l'ensemble proches de zéro.

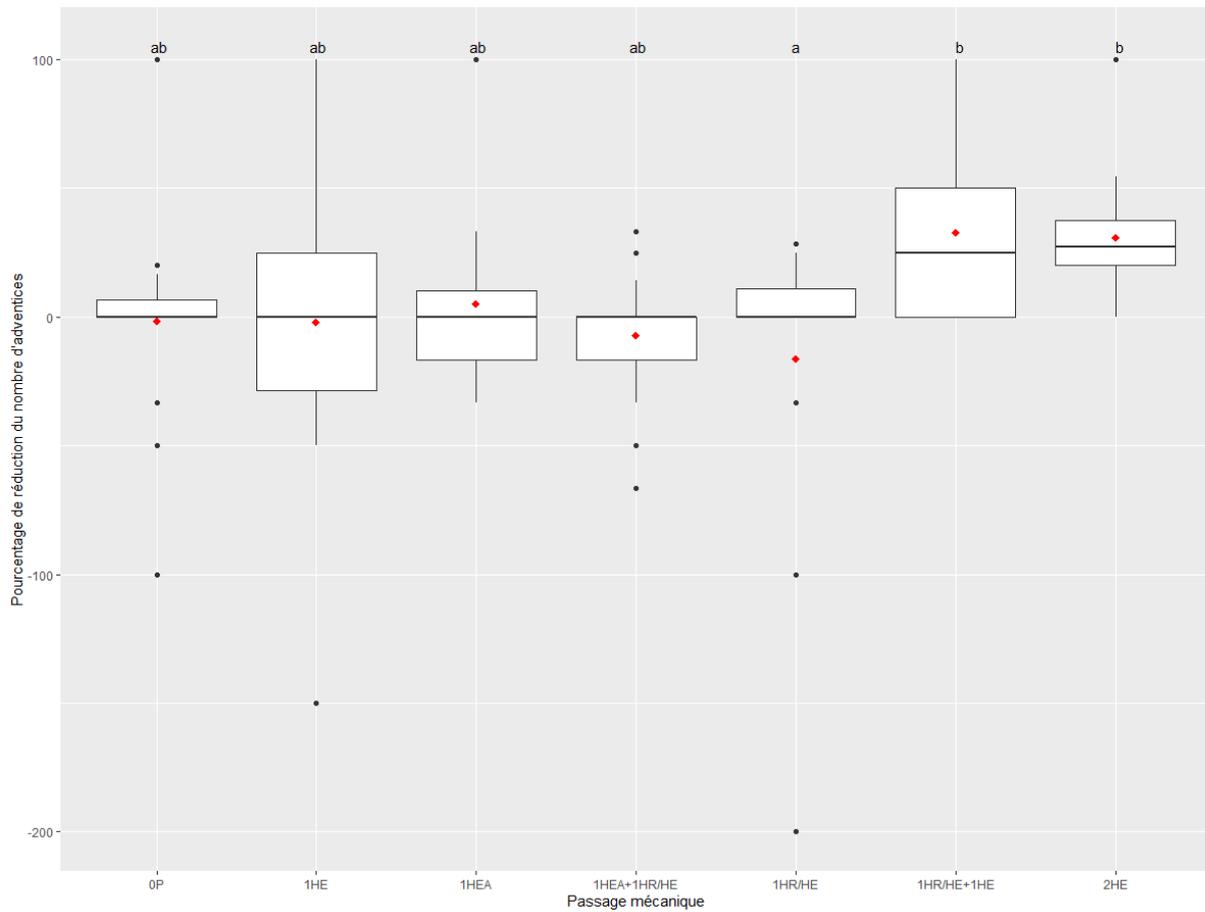


Figure 166. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T1 et T2 en fonction des modalités de passages mécaniques. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Si l'on regarde entre T0 et T2 (figure 167), on peut s'apercevoir que la modalité de la herse étrille à l'automne a tout à fait le même comportement que la parcelle témoin (levées d'environ 15% d'adventices).

Par contre, contrairement à l'année 2020-2021, il n'y a pas de différence statistique entre les modalités avec un unique passage de désherbage et deux passages de désherbage. Ces modalités se trouvent toutes entre 35 et 45% d'efficacité. Ceci peut s'expliquer par les conditions météo ainsi que par le peu d'adventices au départ.

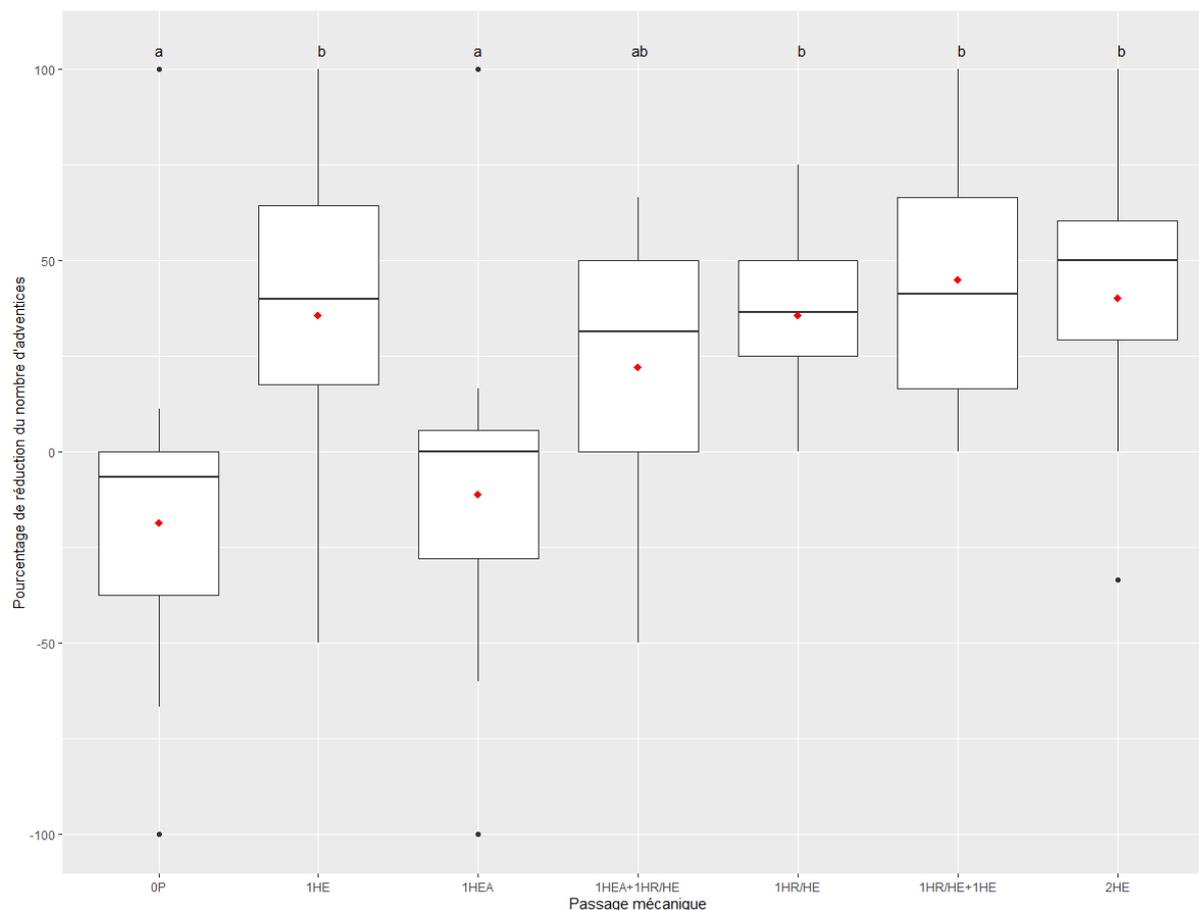


Figure 167. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des modalités de passage mécanique. Les losanges rouges représentent les moyennes. Les modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

Effet du désherbage mécanique couplé au chimique

Il n'y a pas d'effet croisé du désherbage mécanique couplé au chimique cette année 2021-2022. L'analyse post hoc a été réalisée par dose.

Comme représenté sur la figure 168, tout comme les autres années, l'effet du désherbage chimique à base d'anti-dicotylée montre une bonne efficacité dès une demi-dose, même si celui-ci est proche de 50% pour certaine modalité. Ceci peut s'expliquer par la présence du ga illet qui a vu sa croissance fortement stoppée par le désherbage chimique mais qui n'a pas engendré automatiquement la mort de la plante.

De plus, des levées d'adventices après le désherbage chimique restent toujours possibles plombant le pourcentage de réduction du nombre d'adventices, d'autant plus quand la pression est faible à l'origine.

Par contre, il n'est pas possible d'observer une tendance claire d'amélioration du désherbage chimique quand celui-ci est couplé à du désherbage mécanique. Cette année, les meilleures modalités de désherbage mécanique ont des efficacités identiques à certaines modalités de désherbage chimique.

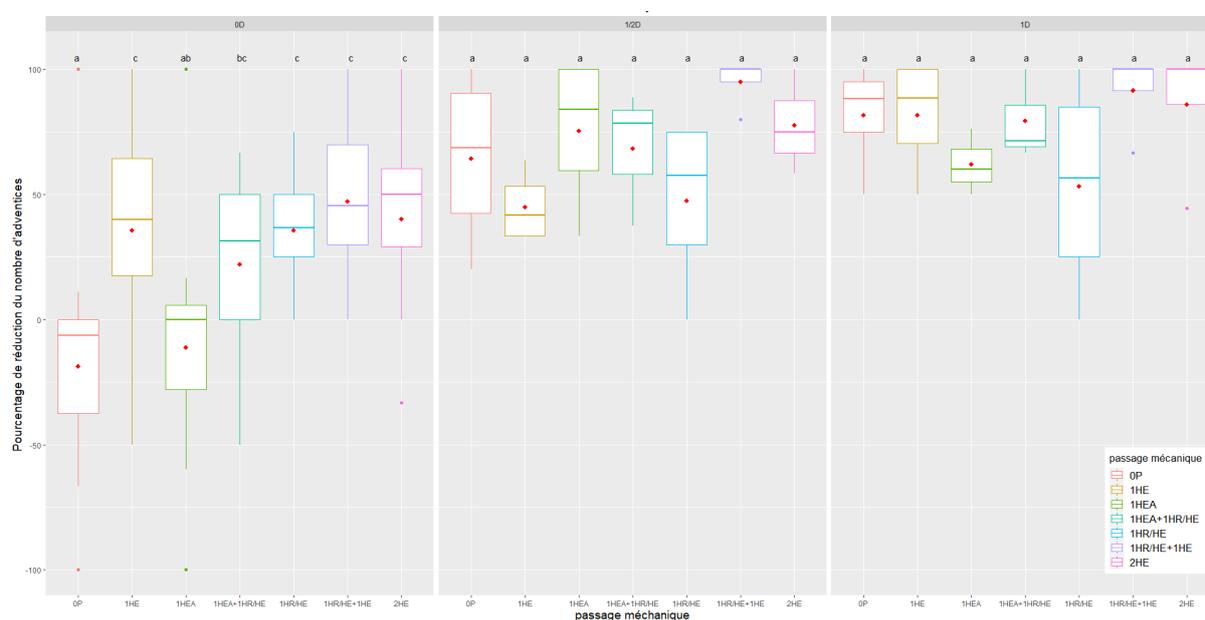


Figure 168. Pourcentage de réduction du nombre d'adventices entre T0 et T2 en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges noirs représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey. Le test est réalisé par dose et non pas sur l'ensemble des doses.

Effet sur la biomasse

Si l'on observe l'effet du désherbage sur la biomasse d'adventices à la floraison du froment, les différences entre modalités vont dans le même sens que les comptages. En effet, le désherbage chimique a permis d'avoir une biomasse d'adventices proche de zéro tandis qu'en désherbage mécanique seule la biomasse d'adventices est légèrement plus élevée (figure 169).

En mécanique, les modalités avec deux passages de herse ont les biomasses d'adventices les plus faibles suivies en intermédiaire des modalités avec un unique passage au printemps. La biomasse d'adventices est plus faible que l'année 2020-2021 principalement dû à une infestation initiale plus faible.

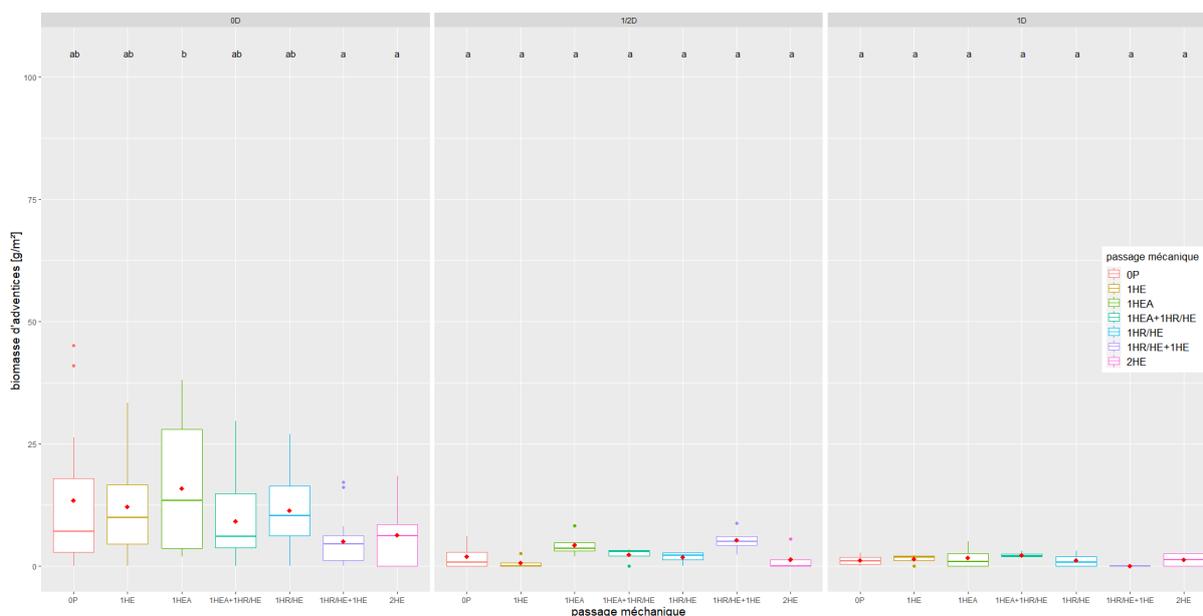


Figure 169. Biomasse d'adventices à floraison du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes. Les combinaisons de modalités ayant des lettres identiques ont des moyennes statistiquement équivalentes au seuil de probabilité de 5% selon le test de Tukey.

5.4.2. Effet sur le rendement

Comme illustré sur la figure 170, on peut observer une corrélation négative entre le rendement et la biomasse d'adventices. Celle-ci est moins flagrante que l'année 2020-2021. En effet cette année, les parcelles sans désherbage avaient naturellement une biomasse d'adventices plus faible. Toutefois, elle met bien en avant qu'il est important de limiter le développement d'adventices si l'on désire un rendement élevé.

Les rendements absolus les plus élevés ont été observés dans des parcelles avec anti-dicotylée et les rendements les plus faibles sont les parcelles témoins ou celles uniquement avec un désherbage en prélevée à l'automne.

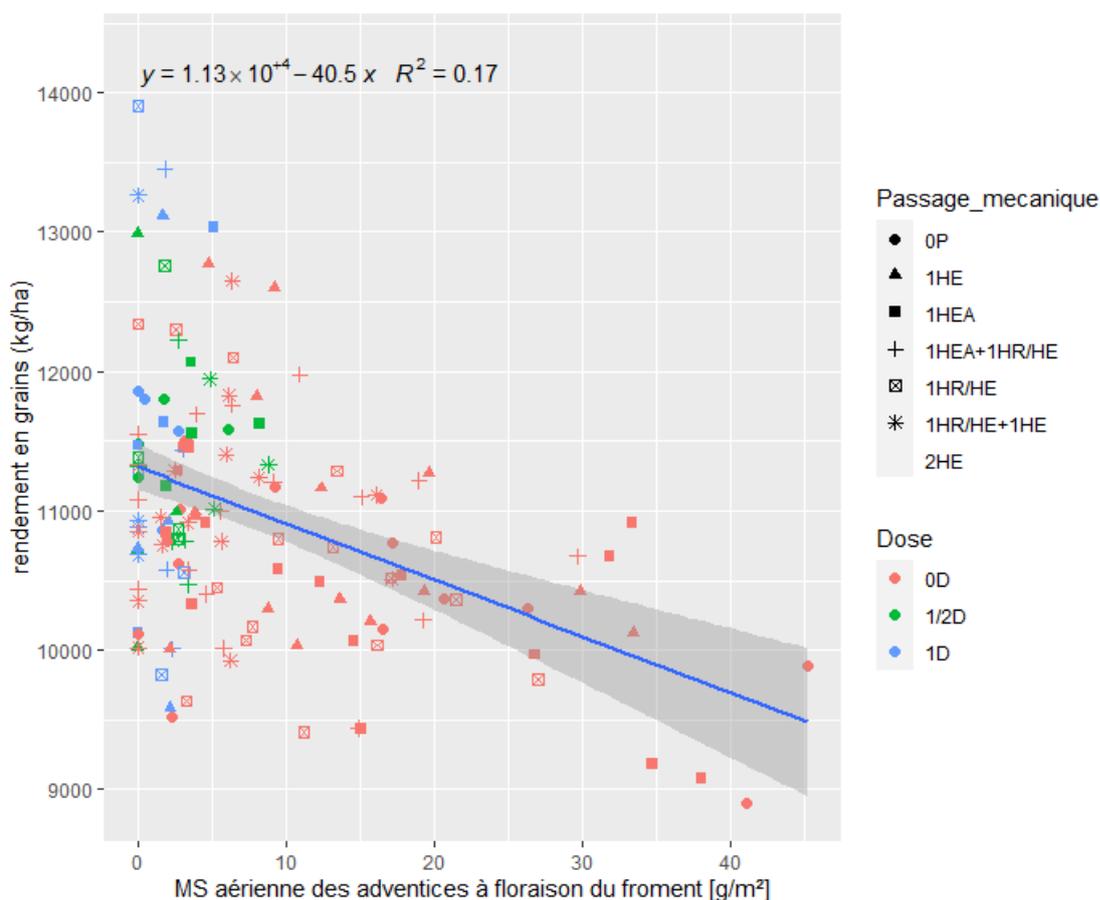


Figure 170. Rendement en grain à 15% d'humidité selon la biomasse en MS d'adventice à floraison du froment.

Seul le facteur « dose de l'anti-dicotylée » est significatif avec un rendement supérieur pour la demi et la pleine dose d'anti-dicotylée par rapport à aucune dose. Toutefois si l'on regarde un peu plus en détails les résultats de la récolte 2022 (figure 171), malgré aucune différence statistique, on peut s'apercevoir que le rendement a tendance à augmenter avec l'agressivité du désherbage mécanique. Contrairement à l'année 2020-2021, cette tendance semble identique que ce soit à zéro, demi ou pleine dose d'anti-dicotylée. Cette différence pourrait s'expliquer par une meilleure sélectivité du désherbage mécanique cette année 2021-2022 comparé à l'année 2020-2021.

De plus vu l'année sèche, il n'est pas impossible que le désherbage mécanique, de par son action physique sur le sol, ait permis d'augmenter le rendement comme cela avait été décrit dans le précédent rapport pour l'année 2019-2020.

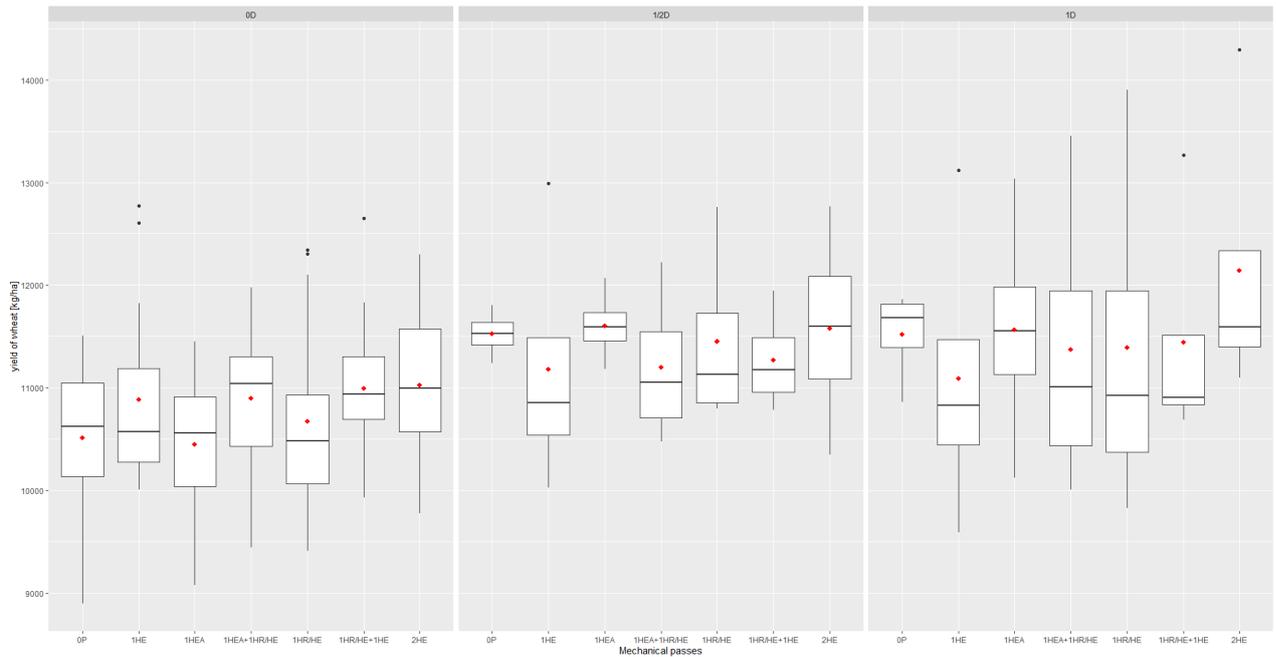


Figure 171. Rendement du froment en fonction des doses d'anti-dicotylées et des modalités de passage mécanique. Les losanges orange représentent les moyennes.

5.5. Discussion

Les années 2020-2021 et 2021-2022 peuvent nous apporter une multitude d'informations. Ces deux années se distinguent par une météo qui fut très différente (humide/sèche) et par une infestation très importante pour l'année 2020-2021 et une infestation plus raisonnable pour l'année 2021-2022. De plus, la flore était très monospécifique (matricaire) la première tandis qu'elle était plus variée pour la seconde. Malheureusement, comme déjà évoqué précédemment, il n'y avait pas de graminées dans les essais, ce qui empêche toute information quant à l'effet du désherbage mixte (chimique et mécanique) sur les graminées. La discussion se concentrera donc sur l'effet du désherbage sur la flore adventice de type dicotylée.

Tout d'abord, pour l'ensemble des deux années, on observe une efficacité plus grande du désherbage chimique (dès une demi-dose) comparé au désherbage mécanique. Ceci est d'autant plus vrai que l'infestation de départ est élevée. De plus, au vu des résultats accumulés au cours ce projet, il n'y a généralement pas d'effet cumulatif du désherbage chimique anti-dicotylée couplé à un désherbage mécanique. Par contre, dans le cadre de ces expérimentations, il n'a pas été possible de tirer des enseignements sur l'efficacité d'un désherbage chimique anti-graminée à demi dose couplé à un désherbage mécanique, vu la faible pression des adventices de type graminée.

Dans un but de réduction des produits phytopharmaceutiques, il serait intéressant d'arriver à contrôler la flore adventice de type dicotylée par le désherbage mécanique. Toutefois, on peut s'apercevoir que celui-ci n'arrive pas à avoir la même efficacité que le désherbage chimique et d'autant plus que la pression initiale en adventices est forte. Une discussion plus approfondie des différentes modalités de désherbage utilisées et des pistes de solutions quant à l'amélioration absolue sera donc proposée.

Afin d'optimiser l'efficacité du désherbage mécanique, celui-ci doit être réalisé dans des conditions de sol réessuyé avec au moins 48h sans pluie après le passage. Toutefois, les passages ont été réalisés dans des conditions météorologique optimales, ne pouvant donc expliquer une efficacité parfois plus faible de l'option mécanique par rapport à l'option chimique.

Concernant le désherbage utilisant uniquement la herse étrille en sortie d'hiver, celui-ci peut faire face à un sol battant. Dans de telles conditions, les dents de la herse étrille de derrière peuvent tomber dans la trace formée par celles de devant engendrant un travail du sol non homogène (figure 172) et ainsi réduisant l'efficacité de désherbage de la herse.



Figure 172. Photo représentant le passage préférentiel provoqué par l'action des dents de herse étrille sur un sol glacé à la sortie de l'hiver (2020-2021).



Figure 173. Photos représentant un sol écrouté après un passage de houe rotative avant (A) et après passage de la herse étrille (B). (2020-2021).

Dans de telles circonstances, le passage de la houe rotative permet de briser la croûte de battance (figure 173) et ainsi permettre par la suite un travail beaucoup plus homogène de la herse étrille, améliorant de ce fait l'efficacité du désherbage. C'est ainsi que l'année 2020-2021 (où la croûte de battance était très importante), les modalités avec houe rotative et herse combinées ont permis d'avoir le meilleur rapport entre qualité de désherbage (même si celui-ci était encore loin d'être parfait) et rendement.

Toutefois associé au chimique, cette combinaison perd de son intérêt du fait du manque de sélectivité de la méthode (recouvrement du froment très important, arrachage de talle...). Par contre, une année comme celle de 2021-2022 où en sortie d'hiver le glaçage était beaucoup moins important, le passage de la houe rotative entraîne une plus-value inexistante par rapport à deux passages de herse.

L'efficacité dans les essais reste plus faible que ce qui pourrait dans l'absolu être réalisé en plein champ. En effet, comme déjà évoqué dans les précédents rapports, il est conseillé de réaliser un passage de la herse étrille croisé par rapport aux lignes de semis (10-20%), il n'est toutefois pas possible de le réaliser dans l'expérimentation du fait du dispositif expérimental en micro parcelle.

De plus, le désherbage mécanique avec des outils en plein comme la herse et la houe rotative ont une efficacité beaucoup plus élevée à des stades précoces des adventices (fil blanc, cotylédon, max deux première feuilles). Après ces stades, l'efficacité et la sélectivité des outils de désherbage en plein diminuent fortement. En céréales d'hiver, il est très compliqué de pouvoir passer à ces stades (en sortie d'hiver la majorité des adventices sont au stade rosette). En effet, le froment étant semé en automne, il est très compliqué d'avoir des conditions assez sèches pour réaliser des désherbages mécaniques à

l'automne. L'insertion d'un passage de herse en automne en pré-levée a su être réalisée en 2021 et 2022 mais n'a pas permis de diminuer la pression en adventices. Ceci peut s'expliquer par :

- les conditions qui restent malgré tout humides à cette période ;
- la nécessité d'un réglage moins agressif de la herse étrille pour ne pas détruire les germes de froment ;
- la grande période de germination possible des adventices jusqu'au printemps.

Afin d'arriver à gérer la flore adventice sans herbicide (ou à une fréquence/dose plus faible), il est important de mettre en place des stratégies combinées (rotation de culture, travail du sol, gestion de la période de l'interculture...). Concernant la culture de froment d'hiver, l'un des leviers principaux de prophylaxie est le retard de la date de semis. En effet, plus le semis est tardif, moins les adventices sont aptes à germer. De plus, si le semis est tardif cela signifie qu'à la sortie d'hiver, l'adventice a eu moins de temps pour se développer, et pourrait dès lors potentiellement être plus facile à gérer par le désherbage mécanique. De plus comme démontré dans ce rapport (et les années précédentes), en cas d'infestation faible en début de saison, le désherbage mécanique n'engendre peu (voir pas) de perte de rendement. Il serait dès lors intéressant de modifier l'expérimentation pour croiser l'effet du désherbage mécanique/couplé chimique à la date de semis du froment.

Il serait toutefois, pour une question de temps et de nombre de modalités, plus facile d'utiliser un herbicide qui a, à la fois, un spectre anti-dicotylée et anti-graminée. En effet, il sera toujours possible d'analyser l'effet du désherbage uniquement sur les graminées et uniquement sur les dicotylées grâce aux comptages par espèces réalisés. En cas de présence de graminées dans l'essai en 2022-2023, il sera donc possible de tirer les mêmes informations que si les herbicides étaient séparés. De plus en cas d'année sans graminées, cela évite d'avoir un essai où la moitié des modalités ont reçu un herbicide d'aucune utilité.

5.6. Conclusion

Les années 2020-2021 et 2021-2022 ont permis de tirer des enseignements importants concernant la gestion de la flore adventice de type dicotylée (pas de graminée dans l'essai) :

- le désherbage chimique dès la demi dose reste plus efficace que le désherbage mécanique seul ;
- il ne semble pas y avoir d'effet bénéfique d'utiliser à la fois le désherbage mécanique et le désherbage chimique pour gérer la flore adventice de type dicotylées (sans doute un intérêt si la flore possède des graminées) ;
- le désherbage mécanique permet une gestion suffisante de la flore d'adventices si celle-ci est présente à une pression raisonnable (avec peu/voir pas de perte de rendement) ;
- en cas de sol battant, l'introduction de la houe rotative semble améliorer l'efficacité du désherbage grâce à un travail de la herse plus homogène ;
- en cas de fortes infestations, le désherbage mécanique peine à réaliser un désherbage suffisant sans avoir de conséquences sur le rendement et sur le potentiel salissement des parcelles pour les années futures (quantité de graines produites importantes).

Le désherbage mécanique pourrait être amélioré si celui-ci était réalisé à des stades plus précoces des adventices. C'est pourquoi un désherbage en pré-levée à l'automne avait été testé en 2021-2022 mais malheureusement le passage à l'automne n'a pas eu d'effet sur la pression en adventices. Il semble très compliqué de réaliser des désherbages mécaniques à l'automne au vu de l'humidité ambiante.

Dans une gestion de type intégré, il est important de mettre en place des techniques préventives avant les techniques curatives. C'est pourquoi, il est proposé d'ajouter un facteur date de semis (facteur influençant



fortement la levée des adventices) dans l'expérimentation de 2022-2023 afin de mettre en lumière l'effet cumulatif que pourrait avoir le désherbage mécanique et la date de semis du froment. Le postulat est que plus le semis est tardif, moins la pression en adventices est élevée à la base et plus ces adventices sont à des stades juvéniles en sortie d'hiver, permettant de ce fait une meilleure gestion par les outils de désherbage mécanique de la flore.

6. Suivi de la flore d'adventices de Sol-Résidus

6.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté au paragraphe 1.2 (page 18).

6.2. Observations

Afin de déterminer l'effet du travail du sol (labour *versus* travail superficiel) et de la gestion des résidus de cultures sur la flore d'adventices, un suivi a été réalisé cette année 2022 sur l'essai Sol-Résidus.

Pour répondre à cet objectif, les actions suivantes ont été entreprises.

1. Un stock semencier (méthode d'émergence) a été réalisé. L'échantillonnage a eu lieu le 17 janvier 2022 en prélevant pour chaque parcelle cinq points d'échantillonnage. À ces cinq points, quatre carottes d'échantillonnage de sol ont été réalisées et rassemblées dans un même échantillon composite. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière de 2 cm de diamètre et 25cm de long. Toutefois, pour pouvoir comparer la position des graines dans le sol selon les modalités en labour ou non, le carottage a été séparé en deux avec le premier réalisé sur la profondeur 0-10cm et le second 10-25cm.

Un total de 160 prélèvements a donc été réalisé (16 parcelles x 5 points par parcelles x 2 profondeurs).

2. Ces échantillons ont été mis en chambre froide pour une durée de 15 jours afin de répondre au besoin en froid de certaines espèces d'adventices pour germer.
3. Les échantillons ont ensuite été étalés dans un bac (figure 174). Ces bacs ont ensuite été disposés dans un laboratoire et maintenu humides. Un comptage et une identification de chaque adventice levée sont réalisés une fois que l'adventice a atteint une taille permettant une identification précise et celle-ci est ensuite enlevée.
4. Au cours du suivi, un stress hydrique a été réalisé entre le 08/04/2022 et le 22/04/2022 afin de stimuler les germinations une fois l'arrosage réinstallé.

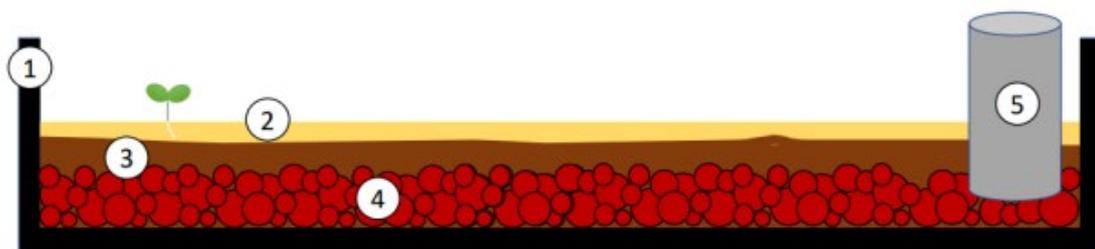


Figure 174. Schéma de bac de germination. (1) bac non perforé, (2) échantillon de terre tamisé, (3) couche de terreau, (4) couche de billes d'argex, (5) tube en PVC.

Un suivi de la flore adventice en champ a aussi été réalisé pour déterminer la flore exprimée. Pour ce faire, 5 quadrats de 50 cm x 50 cm par parcelle ont été disposés dans un rayon de 3 m du lieu de prélèvement du stock semencier.

Dans ces quadrats, un comptage a été réalisé avant le premier passage de désherbage en sortie d'hiver et un à la floraison de la culture du froment. De plus, à la floraison de la culture du froment, une biomasse des adventices et du froment a été réalisée.

Afin de caractériser la flore, des indices de biodiversité ont été calculés et une analyse en coordonnées principales a été réalisée sur l'ensemble des facteurs.

6.3. Résultats

6.3.1. Flore potentielle

L'analyse du stock semencier (qui est toujours en cours de prises de mesures) a montré une abondance plus élevée sans opération de labour (*No_Til*) plutôt qu'avec (*Til*) (figure 175) ; surtout sur l'horizon 0-10cm et dans une moindre mesure dans l'horizon 10-25cm.

La flore est principalement composée de matricaire camomille (MATCH), de vulpin (ALOMY) et de renouée des oiseaux (POLAV).

Il est à souligner que ces résultats sont provisoires puisque l'expérience est toujours en cours et que donc une partie des semences n'a pas encore germé, ce qui pourrait modifier les résultats.

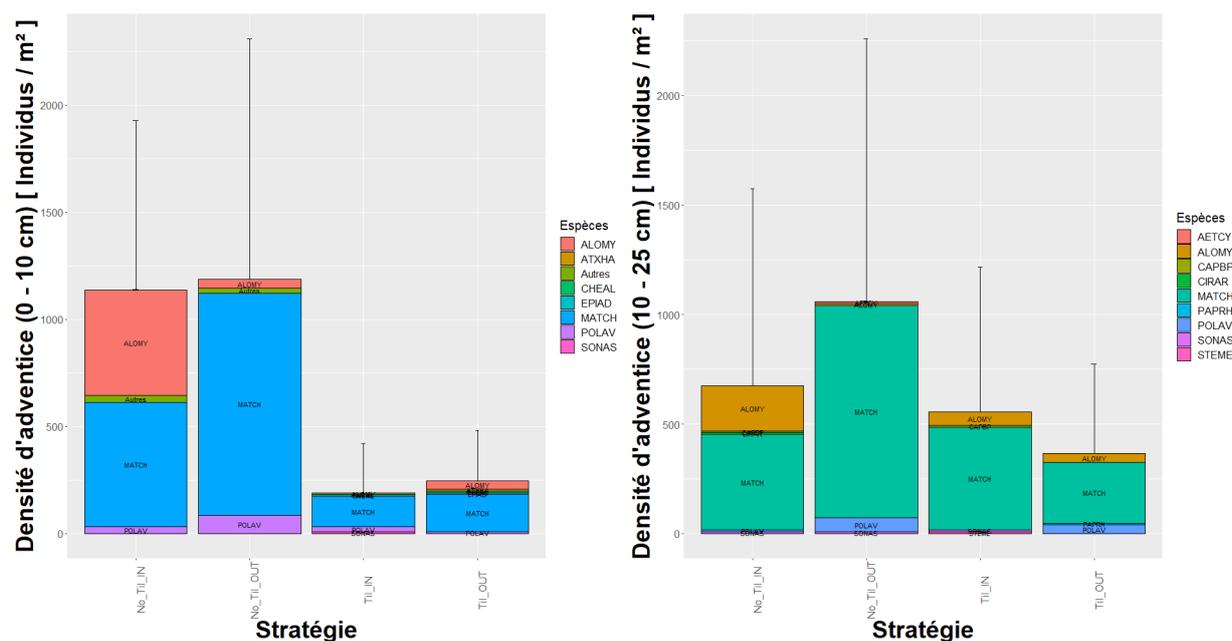


Figure 175. Proportions d'adventices par stratégie de culture pour l'horizon de surface (gauche) et l'horizon en profondeur.

6.3.2. Flore exprimée

La flore exprimée en froment a une composition d'adventices très proche du stock semencier. La flore est peu diversifiée et dominée par deux espèces, la matricaire et le vulpin (figure 176). Seul le facteur travail du sol influence la pression en adventices avec une pression en moyenne quatre fois plus élevée sans labour (figure 177). L'abondance d'adventices est très élevée (surtout en non labour) ce qui engendre potentiellement une pression élevée sur le développement du froment.

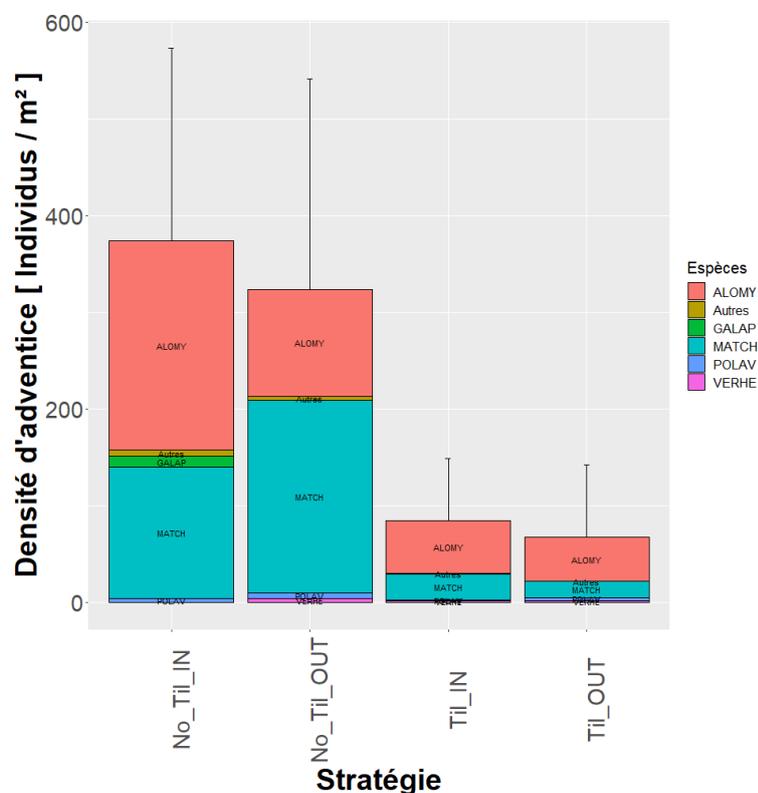


Figure 176. Proportions en adventices en fonction des stratégies de culture (1^{er} comptage).

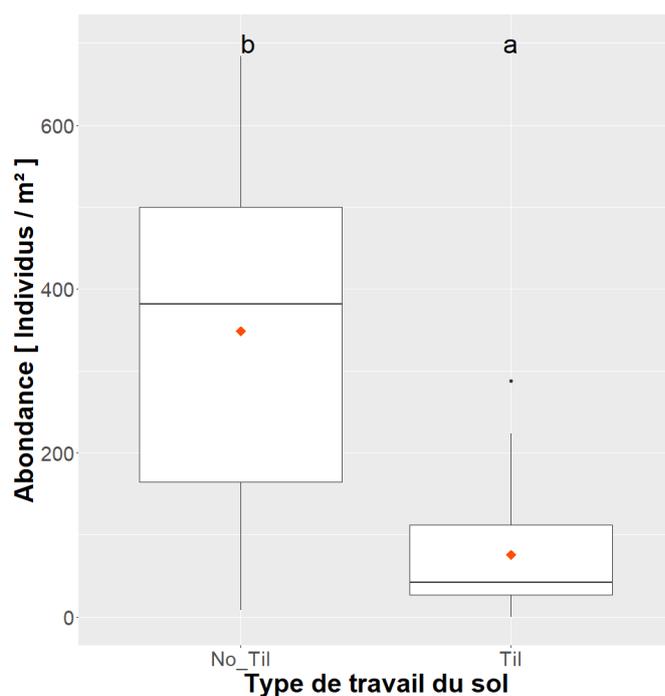


Figure 177. Influence du type de travail du sol sur l'abondance en adventices en sortie d'hiver.

Toutefois, la répartition n'est pas homogène au sein du champ comme représenté sur la figure 178 avec une infestation plus élevée dans les parcelles du bas que du haut. Il se pourrait aussi qu'il y ait un peu de salissement des parcelles en labour par celles en non labour.

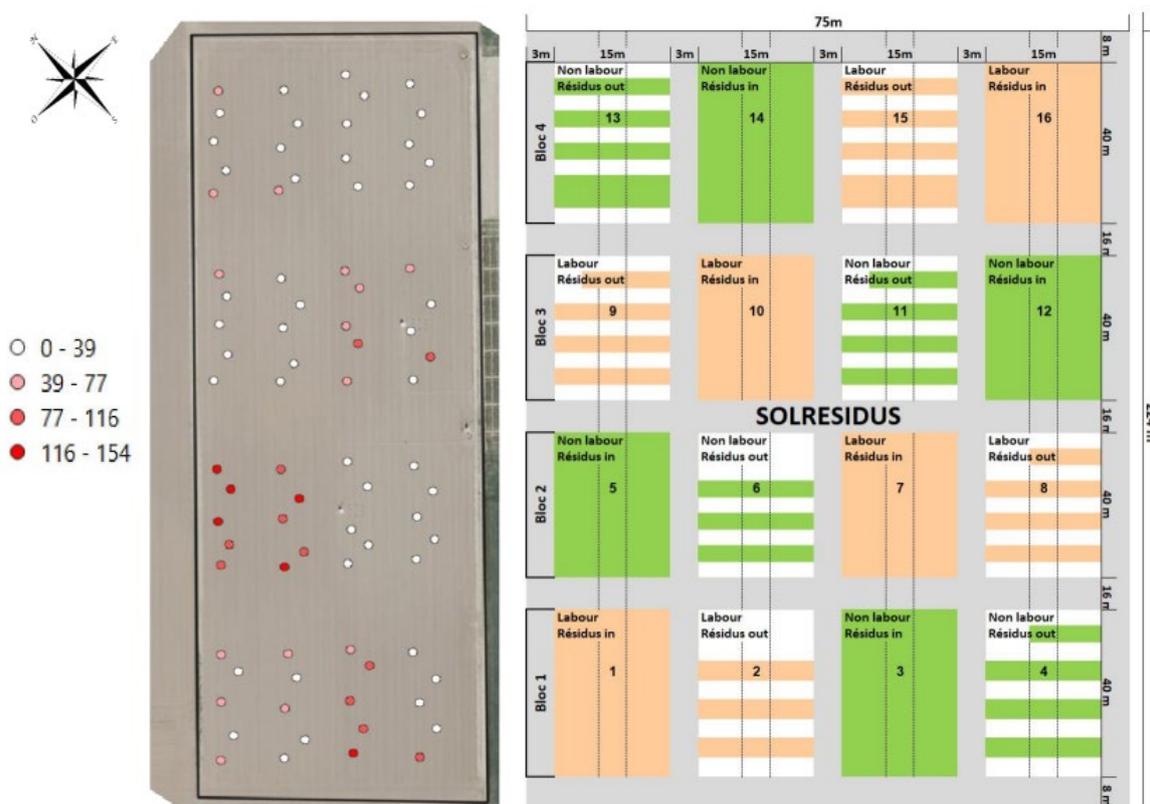


Figure 178. Représentation cartographique de la densité totale d'adventices recensées lors du deuxième comptage du projet Sol-Résidus.

Sans grande surprise, la biomasse d'adventice à la floraison du froment est aussi impactée par le travail du sol : une biomasse d'adventice plus élevée pour les parcelles en non labour (figure 179). La biomasse du froment, quant à elle, a une relation inverse avec une diminution de la biomasse en condition de non labour. Celle-ci pourrait s'expliquer par la forte présence d'adventices mais aussi par le simple fait du non labour qui influence directement le bon développement du froment.

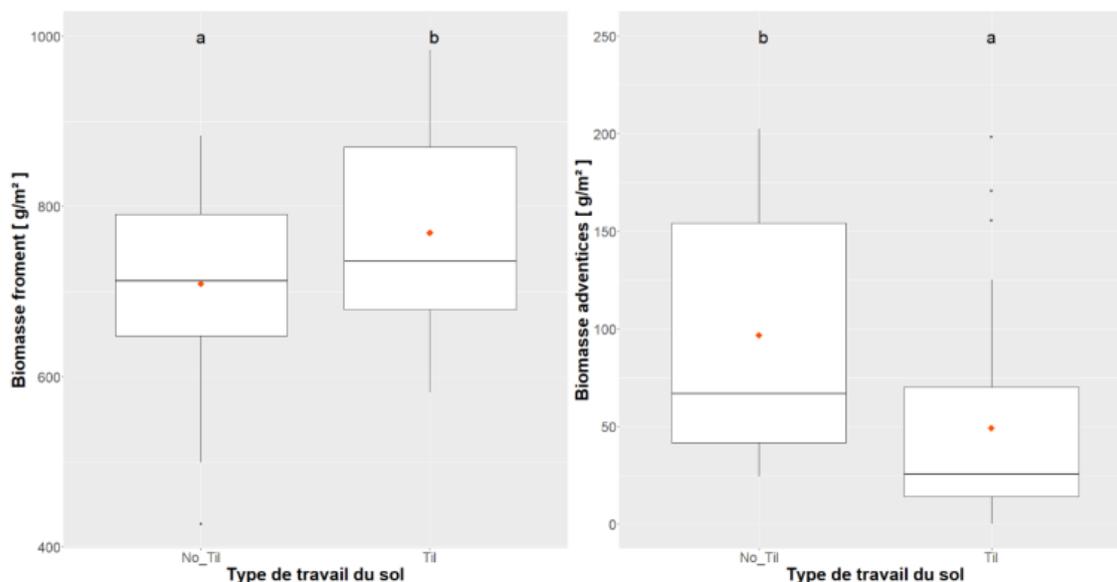


Figure 179. Biomasse du froment et des adventives en fonction du type de travail du sol (floraison du froment).

Outre l'aspect quantitatif, le nombre d'espèce d'adventives (la richesse) présentes en moyenne sur un quadrat est influencé par les deux facteurs expérimentés (travail du sol et gestion des résidus). En effet, lors du premier comptage, la richesse est influencée de manière très hautement significative par le travail du sol et de manière significative par la gestion des résidus. La richesse est à la fois légèrement améliorée par la restitution des résidus et par l'absence de labour (figure 180).

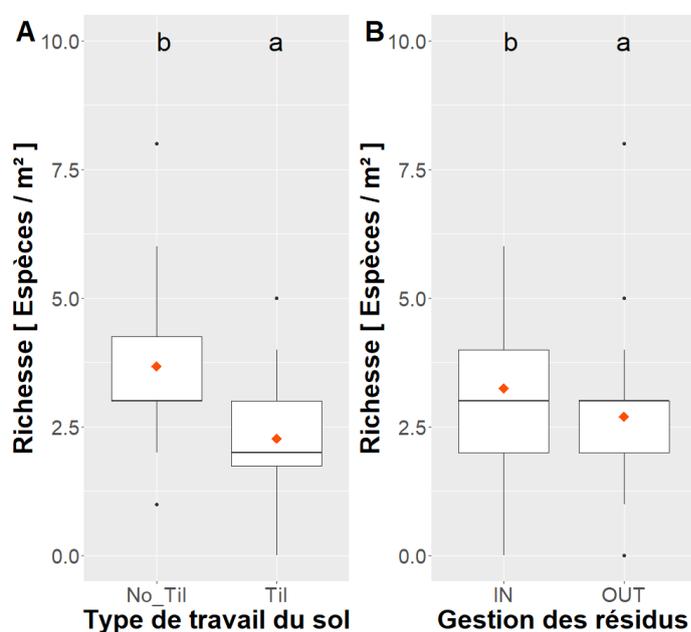


Figure 180. Influence du type de travail du sol (gauche) et de la gestion des résidus (droite) sur la richesse en espèces (1^{er} comptage).

Par contre, lors du deuxième comptage (floraison du froment), la richesse n'est impactée que par le labour (figure 181). L'absence de l'effet des résidus à ce comptage pourrait être dû à l'application d'herbicides entre ces deux comptages.

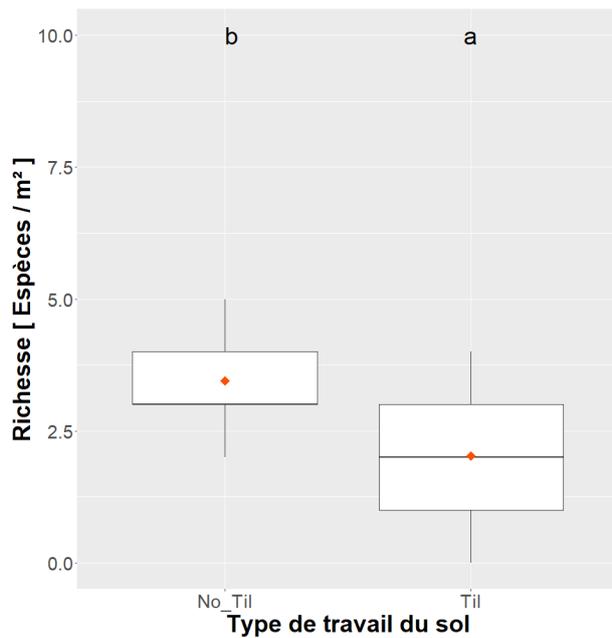


Figure 181. Influence du type de travail du sol sur la richesse en espèces (floraison du froment)

La richesse en espèces est faible sur l'essai. Ce peu de diversité floristique peut s'expliquer par l'application d'herbicides comme gestion des adventices et par une rotation historique fortement basée sur des cultures d'automne. En effet, l'herbicide étant un levier très puissant de gestion de la pression d'adventices ; seul un faible nombre d'adventices arrive à réaliser le cycle et à grainer.

De plus, une rotation riche en culture semée à l'automne a tendance à sélectionner une flore très spécifique mais aussi possiblement très agressive pour la culture. C'est pourquoi il n'est pas étonnant d'observer une pression élevée en vulpin et matricaire qui sont tous deux des adventices bien adaptées au cycle de la culture du froment.

6.4. Discussion

Grâce au suivi de la flore d'adventices de Sol-Résidus, on a pu observer un stock semencier qui est beaucoup plus élevé en non labour. Cette concentration est plus marquée dans le premier horizon du sol (0-10cm) ; ce qui peut s'expliquer tout simplement par l'absence de travail en profondeur. Cette absence de travail du sol semble poser problème quant à une bonne gestion intégrée de la flore d'adventices. En effet, cette année (culture de froment), les adventices étaient très présentes en non labour avec une levée environ 4 fois plus élevée qu'en labour.

Cette forte pression de départ a été mal contrôlée par les herbicides comme l'illustre la figure 179. Cette mauvaise efficacité du désherbage chimique peut s'expliquer par le printemps très froid et venteux. L'herbicide de rattrapage (second traitement) n'a pas permis de contrôler cette flore (surtout les vulpins). C'est pourquoi des semences sont en cours d'analyse quant à une potentielle résistance aux herbicides anti-graminées du vulpin.

Le développement des adventices a potentiellement eu un impact sur le développement du froment même si, dans ce suivi, il n'est pas possible de discriminer la part de la biomasse du froment impactée directement par l'absence de labour de celle découlant du développement des adventices.

Concernant la richesse, celle-ci est légèrement plus grande en non labour mais reste très faible. Outre l'usage d'herbicides, celle-ci s'explique sans doute par un historique de culture peu diversifié, ce qui a tendance à sélectionner une flore spécifique.

Par contre, la gestion des résidus ne semble avoir que peu d'impact quant à la pression d'adventices et pourrait peut-être avoir une légère influence sur la richesse de celle-ci (observé que lors du premier comptage.)

Dans un contexte de gestion intégrée des cultures et de restriction des herbicides (spécifiques et systématiques), il semble que se passer du labour peut engendrer une pression en adventices élevée, et donc augmenter la fréquence de traitement à l'herbicide. De plus, cela augmente le risque d'apparition de résistance au sein des populations d'adventices.

7. Diffusion des enseignements de cette convention de recherche

Comme prévu dans le programme d'activités de cette convention de recherche, les enseignements ont fait l'objet de plusieurs diffusions.

7.1. Congrès du Groupe Français de recherche sur les Pesticides

Une communication orale intitulée : Validation d'une méthode d'analyse du glyphosate dans le sol et suivi de son devenir en plein champ en fonction des pratiques culturales a été faite par Alodie Blondel et Christophe Vandenberghe lors du 50^e congrès du Groupe Français de recherche sur les Pesticides.

Résumé de la communication

En Wallonie comme ailleurs dans le monde, le glyphosate est l'herbicide non sélectif le plus utilisé. Afin d'évaluer son impact environnemental, il est important d'appréhender sa persistance dans les sols ainsi que celle de son métabolite l'AMPA et d'observer d'éventuels flux à la base de la zone racinaire.

C'est pourquoi, dans un premier temps, le développement et la validation d'une méthode d'analyse du glyphosate et de l'AMPA dans le sol, qui soit rapide, bon marché et simple ont été réalisés. Cette méthode utilise une colonne hypercarb stable mécaniquement et chimiquement et bien adaptée à l'analyse de composés polaires sans étape de dérivatisation.

Les limites de quantification atteintes sont de 40 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ pour le glyphosate et de 50 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ pour l'AMPA dans les sols. Cette méthode a été validée sur cinq sols Wallon couvrant une large gamme de pH et de teneur en carbone organique.

Suite au développement de cette méthode, deux suivis du glyphosate et de l'AMPA ont été réalisés dans le cadre du projet Sol-Phy-Ly. Du glyphosate a été appliqué une première fois, post-récolte de froment et une seconde fois, en sortie d'hiver.

Un des objectifs du projet Sol-Phy-Ly est d'évaluer le devenir des produits phytopharmaceutiques en plein champ en fonction des pratiques culturales afin de contribuer à une meilleure compréhension (i) de la dégradation des PPP dans les sols, en condition réelles de plein champ et dans quatre configurations de pratiques culturales (labour ou travail simplifié du sol et restitution ou exportation des pailles) et (ii) du flux de PPP vers les eaux souterraines.

Suite à ces applications, un suivi de la concentration en glyphosate et AMPA a été effectué une fois par semaine pour les couches 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-60 cm et 60-90 cm jusqu'à ce que la concentration dans le sol soit sous la limite de quantification.

Le suivi permanent réalisé à l'exutoire des lysimètres à 2 m de profondeur n'a jamais révélé de trace de glyphosate.

Le projet Sol-Phy-Ly bénéficie du soutien financier du Service Public de Wallonie.

La vidéo de cette présentation est disponible :

- <https://www.youtube.com/watch?v=IuSY0rybQHw>
- <http://www.gfpesticides.org/congres/555/563-videos-recueil-des-resumes-diaporamas-et-posters.html>.

7.2. Congrès d'Athènes

Une communication orale intitulée “Combining chemical and mechanical weeding in wheat” a été présentée lors du 19ème European Weed Research Society Symposium à Athènes.

Résumé de la communication

The European Union wishes to reduce by 50% the use of phytopharmaceutical products by 2030, including herbicides. It implies therefore to adapt weed management strategies in cultivated crops. Among the possible levers, with the technical and technological development, mechanical weeding is again becoming very popular. In particular, different tools can be used in cereal crops, including harrow or rotary hoe. In this context, an experiment aiming to assess different weed control strategies on soft wheat crop was implemented over three consecutive years (2018-2021).

The objective was to evaluate to which extent it is possible to reduce herbicide quantities when mechanical control is applied. The experiment was built on a split-plot design with three factors: (i) mechanical weeding, (ii) herbicides and (iii) rate of herbicides. Mechanical weeding consisted of 0, 1, 2 and 3 passes of harrow applied during the tillering phase (at regrowth after winter period), at stem extension (Z30) and first node (Z31). In addition, a pass of rotary hoe at the tillering stage and a pass of rotary hoe at the tillering stage coupled with two passes of harrow (the following day of rotary hoe and at stem extension (Z30)) were applied. Regarding the use of chemical herbicides, grass- and dicot-weeds control agents were separately applied and also different rates of herbicides were applied (zero, half and full dose). Quadrats of 0.5 × 0.5 m were marked out to record the number of weeds and to identify them down to the species level before and after every weeding event. Additionally, in 2021, weeds and crop biomass were measured at the flowering stage of wheat.

Results showed that mechanical weed control did not significantly reduce grass weed populations. On a dicot type flora, the mechanical weed control treatment combining one pass of rotary hoe with two passes of harrow seemed to result in the highest weed reduction among mechanical treatments (-48±19% compared to the control without regulation which exhibited an increase of +12±16% between the first and last measurement in 2020-2021). However, mechanical weeding did not reach out the efficacy of chemical weed control, which appeared to reduce weed numbers by 55-85%. In order to avoid the use of broadleaf weed herbicides in the long term, improved efficacy of mechanical levers is required. Other combinations of chemical and mechanical weed control will be also tested in the future.

7.3. PROTECT'eau

Les enseignements de la première triennale ont été diffusés le 29 novembre 2021 à une vingtaine de conseillers agricoles lors d'une session de formation (PROTECT'all) organisée par PROTECT'eau.

L'intervention d'une matinée a porté sur :

- le désherbage mécanique éventuellement combiné à un complément 'chimique' et
- les stocks (sol) et flux (eau) de matières actives observés sur les huit parcelles équipées d'un lysimètre.

8. Conclusions

L'année 2021-2022 est la première des trois années de la seconde triennale du projet Sol-Phy-Ly qui ambitionne de contribuer à :

- l'évaluation des flux de produits phytopharmaceutiques (PPP) par lixiviation en plein champ dans les sites équipés de lysimètres;
- la mise au point de méthodes en laboratoire pour le dosage de matières actives (y compris métabolites);
- l'évaluation de l'impact des pratiques culturales (gestion des résidus de récolte) sur la dégradation des matières actives par le sol et leur flux vers les eaux souterraines ;
- la proposition de recommandations en ce compris l'évaluation environnementale du glyphosate et
- la proposition d'alternatives.

Le partenaire Gembloux Agro-Bio Tech « Sol » a ainsi pu collecter et préparer les échantillons d'eau et de sol (prélevés à Gembloux et en Hesbaye) en vue de leur analyse par le partenaire CRA-W. En outre, il a assuré la coordination du projet et l'interprétation agronomique des résultats analytiques.

Enfin, le partenaire Gembloux Agro-Bio Tech « Phytotechnie » a mis en œuvre une nouvelle expérimentation dédiée à la recherche d'alternatives au désherbage chimique des céréales et a assuré le suivi phytotechnique de la plateforme expérimentale *Sol Résidus*.

Au cours de cette quatrième année, l'accent a principalement été mis sur l'intégration des résultats d'analyses (sol et eau) réalisées tant par le CRAW (depuis l'automne 2018) que précédemment, par l'ISSEP et la SWDE.

Dans ce cadre, l'objectif a été de mettre en relation les apports (pulvérisation), stocks (sol) et flux (eau) de PPP dans des unités ($\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$) qui permettent cette comparaison. Vingt six matières actives et plusieurs métabolites ont fait l'objet de cette analyse.

Le fil conducteur était d'observer le devenir de ces PPP dans le sol quelques semaines, quelques mois et quelques années après l'apport dans la perspective d'une évaluation de l'analyse de sol en tant qu'indicateur d'usage de PPP. En parallèle, le flux via lixiviation a également été mis en relation avec les quantités apportées et les stocks dans le sol.

Une diversité de comportement (persistance, lixiviation) a pu être observée dans les trois « familles » de PPP (insecticides, fongicides et herbicides) : certaines matières actives sont rapidement (quelques semaines) métabolisées alors que d'autres sont encore bien visibles plusieurs années après l'apport.

En matière de lixiviation, seuls quelques herbicides présentent des caractéristiques propices à un flux vers les eaux souterraines.

Enfin, en matière de désherbage des céréales, les résultats des expérimentations croisées 'chimique et/ou mécanique' ont à nouveau mis en évidence un intérêt pour une combinaison des deux techniques (réduction de dose d'herbicide et traitement mécanique). L'acquisition d'un nouvel outil (houe rotative) a ouvert de nouvelles combinaisons de mise en œuvre.

Un suivi de la flore d'adventices a été mis en œuvre sur l'expérimentation Sol-Résidus en vue d'observer si le mode de gestion (travail du sol et destination de la paille de céréale) a un impact sur la diversité et la pression des adventices ... et donc sur l'usage des PPP. Cette première année d'observation met en évidence l'intérêt du labour pour diminuer la pression d'adventices.

9. Programme d'activités 2022-2023

9.1. Workpackage 2 : « parcelles en Hesbaye »

Les contacts seront entretenus avec les agriculteurs exploitant ces parcelles afin d'enregistrer les traitements phytosanitaires réalisés. De plus, des échantillons de sol et d'eau seront prélevés aux moments opportuns en vue du dosage des substances actives et métabolites.

9.2. Workpackage 3 T1 « Sol-Résidus »

Conformément aux décisions des membres du comité d'accompagnement, la liste des insecticides 'analysables' a été étendue (cf § 3). Ces insecticides seront appliqués sur la culture qui sera installée au printemps prochain. Un suivi spécifique (fréquence d'échantillonnage de sol renforcée) sera réalisé à cette occasion.

9.3. Workpackage 3 T2 « Désherbage mécanique »

Dans une gestion de type intégré, il est important de mettre en place des techniques préventives avant les techniques curatives. C'est pourquoi, il est proposé d'ajouter un facteur date de semis (facteur influençant fortement la levée des adventices) dans l'expérimentation de 2022-2023 afin de mettre en lumière l'effet cumulatif que pourraient avoir le désherbage mécanique et la date de semis du froment.

Le postulat est que plus le semis est tardif, moins la pression en adventices est élevée à la base et plus ces adventices sont à des stades juvéniles en sortie d'hiver, permettant de ce fait une meilleure gestion par les outils de désherbage mécanique de la flore.

De plus, afin de permettre ce rajout, il est proposé de passer plus qu'à un produit de désherbage utilisé (anti-dicotylée et anti-graminée) car cela ne contraint pas une bonne interprétation des effets sur la flore adventice antidicotylée et antigraminée (cf §5.5).

9.4. Workpackage 4 : Développement de méthodes d'analyse et analyse des échantillons

Seulement quelques séries de prélèvements de sol ont été analysées avec la nouvelle méthode, ces analyses vont donc être poursuivies. Il faut implémenter cette méthode dans l'eau en y ajoutant les molécules fréquemment rencontrées dans l'eau.

Les résultats obtenus pour les analyses SDHI dans les eaux l'hiver dernier sont interpellants (cf §4) ; il va être très intéressant de pouvoir suivre l'évolution des concentrations et flux lors des prochains épisodes de lixiviation.

Dans le prochain rapport d'activités, il est proposé d'intégrer les caractéristiques physico-chimiques des matières actives suivies dans le sol et l'eau et de lire les graphiques en conséquence. De plus, la concentration moyenne (au cours de chaque période de lixiviation) de chaque matière active sera ajoutée au flux illustré dans chaque graphique.

9.5. Workpackage 5 : communication

- Compte tenu de l'intérêt des résultats obtenus pour les analyses de SDHI, il est proposé de rédiger et soumettre un article dans une revue scientifique avec comité de lecture. La revue envisagée est ESPR (Environmental Science and Pollution Research).
- Un article relatif à l'intervention réalisée lors du 50^{ème} congrès du GFP (cf § 7.1) est en cours de rédaction.
- Un poster sera présenté en novembre à l'occasion de Phloème à Paris
- Suite aux résultats des dernières années concernant le désherbage en céréales, un article scientifique sera soumis dans une revue scientifique avec comité de lecture.
- Il est proposé de réaliser un article de vulgarisation concernant le désherbage en céréales. Le canal est encore à décider (Livre blanc, sillon belge, ...)

10. Bibliographie

Actualisation des données et des indicateurs pesticides en vue de la présentation dans les rapports sur l'état de l'environnement wallon Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL) Earth and Life Institute Université catholique de Louvain. 2015. 139 pages [https://www.crphyto.be/sites/default/files/kcfinder/files/CRP_5_CORDER_ELIM_ELI_UCL_2015-1\(2\).pdf](https://www.crphyto.be/sites/default/files/kcfinder/files/CRP_5_CORDER_ELIM_ELI_UCL_2015-1(2).pdf)

Bento C., Yang X., Gort G., Xue S., van Dam R., Zomer P., Mol H., Ritsema C., Geissen V., 2016, Persistence of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in loess soil under different combinations of temperature, soil moisture and light/darkness, *Sci Total Environ* 572: 301-311.

CORDER asbl, Comité Régional Phyto et Applied microbiology – Phytopathology (ELIM-ELI-UCL), 2017. Estimation quantitative des utilisations de produits phytopharmaceutiques par les différents secteurs d'activité. 169p.

Direction de l'Etat Environnemental, 2017. Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017. 368 p. <http://etat.environnement.wallonie.be/home.html>

Ellegaard-Jensen, L., Horemans, B., Raes, B. et al., 2017. Groundwater contamination with 2,6-dichlorobenzamide (BAM) and perspectives for its microbial removal. *Appl Microbiol Biotechnol* 101: 5235. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8362-x>

EU SANTE/11813/2017 Analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed. https://ec.europa.eu/food/sites/food/files/plant/docs/pesticides_mrl_guidelines_wrkdoc_2017-11813.pdf (Access on September 20, 2018)

Gustafson D.I., 1989. Groundwater Ubiquity Score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environ. Toxicol. Chem.* 8, 339-357

SPW (2019). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, Belgique. Dépôt légal **D/2019/11802/08** <http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/>