

Rapport d'étude

Contamination de la nappe par les produits phytosanitaires - Etape 1 : Evaluation du risque lié à l'entretien des canaux

25 Novembre 2025

Fiche action « Contrat de Nappe de la Crau » - C1 – prévenir les pollutions diffuses

Document de restitution pour dossier de subvention n° 2022-45/18 Agence de l'Eau RMC

Financiers :



Auteurs : Gabrielle RUDI (AgroParisTech, UMR G-eau, chercheuse associée à l'UMR Lisah)

Sandrine NEGRO (INRAE, UMR Lisah)

François CHARRON (Institut Agro, Domaine du Merle, UMR G-eau)

Gilles BELAUD (Institut Agro Montpellier, UMR G-eau)

Version : 2

Avant-propos

Ce rapport a été établi dans le cadre de l'action C du contrat de nappe de la Crau phase 1 : « Contamination de la nappe par les produits phytosanitaires - Etape 1 : Evaluation du risque lié à l'entretien des canaux ». Cette action, construite avec le Syndicat Mixte de gestion de la Nappe Phréatique de la Crau (SYMCRU), a été soutenue financièrement par la Région Sud-PACA, et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse. La réalisation de l'étude a été confiée aux deux unités de recherche LISAH et G-eau ayant mis à disposition leur infrastructure, leurs équipements scientifiques et leur expertise pour la réalisation des travaux.

Les rédacteurs de ce rapport remercient particulièrement M. TRONC (Comité Foin de Crau) pour son appui dans la phase-test du questionnaire d'enquêtes ; Mmes HURAND et SAUTREAU, étudiantes du Master 2 Eau et Agriculture (Institut Agro, AgroParisTech, Université de Montpellier) pour leur contribution à la réalisation des enquêtes de terrain.

Synthèse de l'étude

La Crau est un territoire d'environ 600 km² dans le Sud de la France dont l'une des cultures traditionnelles est le foin de Crau. La prairie est irriguée de manière gravitaire, et cette pratique implique l'entretien régulier des canaux d'irrigation amenant l'eau jusqu'aux parcelles. Cet entretien a pour objectif de maintenir la capacité de transport hydraulique des canaux, mais également de limiter la propagation d'adventices via ces linéaires. L'entretien peut se faire de manière mécanique ou chimique. L'étude décrite ci-dessous s'inscrit dans l'objectif C1 du contrat de nappe de Crau : maintenir une eau de qualité dans la nappe par la prévention sur les pollutions diffuses, et se concentre notamment sur l'action 1 - Contamination de la nappe par les produits phytosanitaires et évaluation du risque lié à l'entretien des canaux. Cette action vise à identifier le rôle potentiel des pratiques d'entretien des canaux d'irrigation gravitaire sur les risques de contamination de la nappe par le glyphosate et, en cas de risque avéré, proposer des alternatives. La présente étude est la phase préliminaire visant (i) à caractériser dans le contexte spécifique d'un site pilote, les concentrations en contaminants après un désherbage chimique, (ii) à réaliser une enquête auprès des agriculteurs de foin de Crau, pour mieux comprendre leurs pratiques de gestion des adventices et de l'enherbement des canaux.

La première expérimentation a eu lieu au domaine expérimental et pédagogique du Merle, appartenant à Institut Agro Montpellier. L'expérimentation a impliqué le désherbage chimique de 2 canaux d'irrigation tertiaires (filiales) dans 2 parcelles différentes du domaine, caractérisées par des sols différenciés. L'herbicide appliqué est le glyphosate, et l'expérience a consisté à suivre dans l'eau et les sols des canaux et des parcelles irriguées via ces canaux, la molécule de glyphosate et son principal métabolite l'acide aminométhylphosphonique (AMPA). Conformément aux pratiques

identifiées dans la région, une date de premier traitement en mai a été retenue pour les besoins de l'expérimentation. Le 9 mai 2022, deux tronçons de filioles ont été traités au glyphosate sur 12 mètres chacun. Une irrigation a été lancée J+1 après le traitement. Plusieurs analyses ont été menées. L'eau s'écoulant dans les tronçons traités a été prélevée puis analysée à J+1 après traitement et jusqu'à 2 mois après le traitement. Des préleveurs d'eau gravitaire du sol ont été mis en place à 50 cm de profondeur dans chacun des tronçons de canal et dans chacune des parcelles, soit un total de 6 préleveurs dans chaque couple parcelle/canal. L'eau de ces préleveurs a été analysée. Des prélèvements d'eau ruisselant sur le sol de la parcelle au moment de l'irrigation, respectivement à 6m et 60m des tronçons traités, ont également été analysés pour étudier la différence de qualité entre l'eau arrivant à la parcelle et celle ayant déjà parcouru une longue distance sur la parcelle. Notons que les tronçons de filiole étudiés étaient fermés par une martelière au moment de l'expérimentation, de sorte que l'eau ne pouvait s'écouler que sur la parcelle ou s'infiltrer dans le sol (hors fuites au niveau des martelières). Tout au long de la saison d'irrigation, des échantillons de sol ont été prélevés dans les canaux et les parcelles, puis analysés.

A J+1 après traitement, au début de la mise en place de l'irrigation, des concentrations ponctuelles de glyphosate s'élevant à 680 µg/L et 445 µg/L ont été observées dans les canaux dans les eaux de surface, celles-ci diminuant ensuite au cours de l'irrigation. Ces valeurs correspondent donc à des concentrations maximales, et non à des concentrations moyennes dans l'eau d'irrigation lors de la première irrigation. Deux heures après le début de l'irrigation, les concentrations ont diminué d'un ou deux ordres de grandeur selon le canal. La concentration observée dans l'eau d'irrigation est encore d'un à deux ordres de grandeur inférieure un mois après, lors des irrigations ultérieures. Au niveau des tronçons traités, un transport d'eau contaminée vers des préleveurs enterrés à 50 cm dans le sol a été observé avec pour l'un des canaux une concentration maximale de 50,5 µg/L de glyphosate et 2,3 µg/L d'AMPA, et le deuxième canal une concentration maximale de 3,9 µg/L de glyphosate et 5,2 µg/L d'AMPA. Au niveau des parcelles, la concentration maximale observée dans les flux infiltrés à 50 cm de profondeur était de 0,06 µg/L. Des prélèvements ont également été réalisés sur la lame d'eau de surface ayant ruisselé sur la parcelle (donc l'eau d'irrigation), à 6 m du canal, et la concentration maximale observée a été de 20,2 µg/L. A 60 m du canal, la concentration maximale observée descendait à 2,0 µg/L de glyphosate. Dans cette étude, les flux les plus contaminés sont localisés au niveau des tronçons traités, et la qualité de l'eau s'infiltrant au niveau des parcelles est de meilleure qualité (les maximaux observés sont d'un ordre de grandeur moindres). Concernant le sol, les concentrations maximales observées dans les sols des canaux traités atteignent 0,65 mg/kg d'AMPA et 0,29 mg/kg de glyphosate. Ces valeurs sont inférieures (environ d'un facteur 10) deux mois après le traitement. Les sols des parcelles (à 6 m du canal) présentent une concentration maximale de 0,017 mg/kg deux jours après le traitement. Dans les parcelles, un mois après traitement, les valeurs mesurées sont proches ou sous la limite de quantification (LQ=0,01 mg/kg).

Les résultats sont donc à interpréter selon (i) un axe sanitaire (ii) un axe environnemental. Du point de vue sanitaire, nous avons observé que les canaux pouvaient transporter ponctuellement des eaux avec des concentrations maximales de 680 µg/L en surface et nous avons observé un maximum de 50 µg/L dans les eaux à 50 cm sous le sol au niveau des canaux. Dans le cas de captages privés situés à proximité des sections de canal traitées, des contaminations ponctuelles ne pourraient être exclues, bien que l'étude n'ait pas étudié ce cas en particulier. En deuxième lieu, il convient de souligner que la première irrigation après traitement peut exposer un certain nombre d'organismes vivants à la molécule de glyphosate via l'eau d'irrigation qui transite dans les canaux de surface pendant un temps limité. Du point de vue environnemental, une faible contamination globale des eaux souterraines dans la Crau par le glyphosate et l'AMPA est à souligner, selon l'ADES, le Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines (accès public) et selon les relevés du SYMCRAU. Ces observations sont probablement à mettre en lien avec l'importance des volumes apportés et infiltrés qui impliquent une dilution des contaminations (cf Action B), en lien avec la pratique d'irrigation gravitaire. Les propriétés physico-chimiques du glyphosate et de l'AMPA, et les phénomènes d'immobilisation/dégradation qui se déroulent au niveau de la zone non-saturée du sol, sont également à mettre en lien avec la faible contamination actuelle de la nappe souterraine de Crau par le glyphosate et l'AMPA. Cette expérimentation n'avait pour objectif que d'étudier le devenir du glyphosate et de l'AMPA dans le

cadre de deux canaux traités. L'utilisation d'autres molécules aux propriétés physico-chimiques contrastées aurait pu donner des résultats différents. A noter que cette expérimentation n'avait que vocation à être préliminaire, et servir de base à la mise en place d'autres expérimentations.

La deuxième expérimentation visait à caractériser les pratiques d'entretien des canaux et les pratiques de limitation des adventices dans les parcelles de foin de Crau. Cette action a été menée à partir d'enquêtes auprès de producteurs de foin de Crau. Le choix des agriculteurs contactés a été raisonné en fonction de la surface des exploitations et de la typologie de leurs cultures, de manière à sélectionner un échantillon représentatif des exploitations en culture de foin de Crau. Le questionnaire développé dans le cadre de cette enquête est de type semi-directif. Celui-ci visait en premier lieu à caractériser la conduite de l'exploitation en lien avec la stratégie de limitation de propagation des adventices à la parcelle et la gestion de l'enherbement dans les réseaux d'irrigation. En deuxième lieu, il visait à identifier les perceptions, les préoccupations et les attentes de l'exploitant vis-à-vis de la gestion des adventices et des canaux. Huit agriculteurs ont pu être enquêtés dans le cadre d'entretiens en face à face. Un questionnaire électronique, reprenant une partie des questions du questionnaire développé précédemment, a, en complément, été envoyé à 80 agriculteurs, et 14 agriculteurs y ont répondu. La taille des exploitations enquêtées varie généralement entre 9,5 et 200ha (plus un cas d'une grosse exploitation ayant près de 1000 ha), avec une Surface Agricole Utile moyenne de 132 ha.

Par rapport aux pratiques des agriculteurs concernant la gestion de l'enherbement dans les canaux d'irrigation, 10 agriculteurs sur 20 entretiennent les canaux seulement mécaniquement, 8 agriculteurs sur 20 entretiennent les canaux à la fois mécaniquement et chimiquement, et 2 entretiennent seulement chimiquement les canaux. Cette proportion peut toutefois être biaisée par la constitution de l'échantillon, sachant qu'il est difficile d'avoir un retour dans le cas de recours aux traitements chimiques. Concernant l'entretien mécanique, il est réalisé en hiver avec généralement une épaveuse et une pelle mécanique. Un seul des agriculteurs enquêtés a indiqué faire appel à un prestataire extérieur pour cette gestion mécanique. Le désherbage chimique est réalisé par l'agriculteur lui-même, généralement avec du glyphosate. Avril, juin et juillet sont les mois qui ont été les plus cités pour le traitement. Aucun des agriculteurs ne juge favorable de laisser de l'enherbement dans les canaux : en effet, la priorité est mise sur les débits parvenant aux parcelles, celui-ci pouvant être fortement réduit du fait de la présence d'une végétation dense dans les canaux.

A la parcelle, les espèces adventices citées comme étant les plus contraignantes pour l'obtention de foin de qualité (conservation de l'AOP) sont (dans l'ordre des plus citées): le sorgho d'Alep (*Sorghum halepense*), le rumex (*Rumex sp.*), le millet bâtard (*Paspalum dilatatum*) et la sétaire verte (*Setaria viridis*). Leur présence est la plus difficile à gérer après la seconde coupe (fin juillet/août). Le temps passé sur la maîtrise du développement des adventices est très hétérogène à l'échelle de la population d'exploitants enquêtés. Les agriculteurs avancent que la main d'œuvre, les exigences liées à l'AOP et le matériel sont leurs principaux obstacles pour la gestion des adventices. La gestion des adventices à la parcelle est considérée comme une tâche complexe, voire très complexe, source d'inquiétudes pour les agriculteurs. En effet, des recrudescences ont été observées ces dernières années, avec la colonisation totale de certaines parcelles par des adventices. Les exploitants mettent cette évolution des dynamiques des adventices en lien avec le changement climatique, la modification des modes de gestion des fossés de bord de route et le mode de gestion des pâturages.

L'animation et l'information autour de la gestion des adventices, des échanges approfondis avec des instituts et sociétés pourvoyeurs de solutions d'entretien mécanique, paraissent nécessaires pour maintenir une faible pression phytosanitaire dans la culture de foin de Crau.

TABLE DES MATIERES

	LISTE DES ABREVIATIONS.....	1
1	Présentation générale de l'action.....	1
1.1	La Crau, ses prairies irriguées, les pratiques d'entretien des canaux d'irrigation.....	1
1.2	Justification et objectif de l'étude	1
1.3	Cahier des charges et organisation de l'étude	2
2	Etude expérimentale : transfert d'herbicides dans les canaux et en parcelle de foin de Crau	3
2.1	Matériel et Méthodes	3
2.1.1	Localisation et configuration des parcelles étudiées au sein du domaine du Merle.....	3
2.1.2	Caractérisation des sols de la zone d'étude	4
2.1.3	Pratiques d'irrigation et pratiques phytosanitaires associées à la culture du foin de Crau..	6
2.1.4	Expérience d'épandage de glyphosate et suivi de la molécule-mère et des molécules-filles dans les eaux et les sols	7
2.1.5	Prélèvements d'échantillons d'eau d'irrigation, d'eau gravitaire et de sol	8
2.2	Résultats.....	10
2.2.1	Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA au niveau des vannes d'entrée des parcelles, et résultats des analyses multi-résidus	10
2.2.2	Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA au cours de la saison d'irrigation (avant traitement et après traitement).....	11
2.2.3	Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA dans les eaux d'irrigation lors de la journée du 10 mai 2022	12
2.2.4	Résultats de suivi du glyphosate dans les préleveurs au niveau des tronçons traités et des parcelles (à 6 m des tronçons traités).....	13
2.2.5	Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA dans les eaux de ruissellement sur la parcelle	15
2.2.6	Résultats de suivi du glyphosate et de l'AMPA dans le sol	16
2.3	Discussion	17
2.4	Conclusion et recommandations.....	19
3	Enquêtes visant à caractériser les pratiques de limitation des adventices et d'entretien des canaux en culture de foin de Crau.....	20
3.1	Matériel et Méthodes	20
3.1.1	Choix des agriculteurs enquêtés et prises de contact.....	20
3.1.2	Questionnaire.....	20
3.1.3	Prise de contact.....	20
3.2	Résultats.....	20
3.2.1	Typologie d'exploitation.....	20
3.2.2	Gestion des adventices à la parcelle	22
3.2.3	Gestion de l'enherbement des canaux.....	25
3.2.4	Mesures et pratiques visant à la limitation de l'utilisation de produits phytosanitaires.....	26
3.3	Conclusion	26
4	Conclusion générale et limites.....	27
4.1	Conclusion générale	27
4.2	Limites de l'étude.....	28

5	Bibliographie	31
6	Annexes	33
6.1	Annexe 1 : Profil moyen d'une parcelle sur le secteur 1 (Source : Mérot, 2007)	33
6.2	Annexe 2 : Fiche technique de l'herbicide utilisé pour l'expérimentation	34
6.3	Annexe 3: Essais d'infiltration au bassin fermé	35
6.4	Annexe 4: Questionnaire pour les exploitations de foin de Crau sur la conduite de l'exploitation, la gestion des adventices et la végétation des canaux.....	36
6.5	Annexe 5 : Valeurs brutes des données de concentrations de glyphosate et AMPA dans les sols et les eaux et accès aux rapports d'analyse des laboratoires prestataires (Sol : IANESCO ; Eau : TERANA)	38

LISTE DES ABREVIATIONS

AMPA	Acide aminométhylphosphonique
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CO	Carbone Organique
ETP	Equivalent Temps Plein
HVE	Haute Valeur Environnementale
MO	Matière Organique
PSE	Paiement pour Services Environnementaux

1.1 La Crau, ses prairies irriguées, les pratiques d'entretien des canaux d'irrigation

La Crau est un territoire d'environ 600 km² dans le Sud de la France, situé dans l'ancien delta caillouteux de la Durance. L'irrigation gravitaire s'y est développée entre le 12^{ème} et le 16^{ème} siècle avec de l'eau prélevée dans la Durance. Aujourd'hui, plusieurs milliers d'hectares sont toujours irrigués, formant la « Crau verte », alimentés par 400 km de canaux primaires (SYMCAU, 2016b). Parmi les cultures irriguées, une des cultures traditionnelles est le foin de Crau, un foin AOP produit à partir de prairies naturelles permanentes principalement composées de graminées et légumineuses, représentant 14 000 ha. Les prairies de foin de Crau sont installées sur des sols constitués d'un poudingue calcaire largement altéré et fissuré, dont la dégradation a laissé place à un horizon de sol fersialitique calcique (Andrieux, 1981). Dans les prairies irriguées, cet horizon de sol est surmonté d'un dépôt de limons pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres, en fonction de l'ancienneté des parcelles et des pratiques de renouvellement.

En raison de la pratique de l'irrigation gravitaire, massive au sein de ce territoire, la nappe souterraine présente la particularité de présenter des niveaux piézométriques plus élevés en été qu'en hiver (SYMCAU, 2012). Pour illustrer cette affirmation, SYMCAU (2016b) fait état d'une profondeur de nappe d'environ 3m en été et de 6m environ en hiver sur l'un des piézomètres du domaine du Merle, sur une chronique de 2004 à 2014. Ceci a pour conséquence une recharge rapide de la nappe lors des irrigations gravitaires et parfois des pluies, même si elles sont peu fréquentes en été. Les travaux de Ma et al. (2011) montrent ainsi que moins de 10h après le début de l'irrigation, l'eau apportée par l'irrigation a rejoint la nappe située 7 m plus bas en traversant le taparas.

Les pratiques phytosanitaires en culture de foin de Crau ont été peu étudiées. Elles se divisent en 2 types et concernent en grande majorité l'utilisation d'herbicides. Le premier type d'intervention consiste à éliminer la végétation des canaux d'irrigation afin de restaurer la conductivité hydraulique. En effet, dans la Crau, peu de canaux sont revêtus, et leur entretien est indispensable pour en assurer le bon fonctionnement (Jaridi, 1999). Alberdi et al. (2015) font état de 5 types de pratiques pour l'entretien des canaux d'irrigation : le désherbage mécanique, le brûlis, le curage, le nettoyage (plus souvent pour les canaux revêtus), ainsi que le désherbage chimique (employant des produits phytosanitaires). On peut noter que le désherbage dit « mécanique », généralement mené à la débroussailleuse, nécessite un opérateur de terrain, dans des conditions de travail exigeantes (bruit, port des équipements de protection etc.). Le désherbage chimique est pratiqué en raison de son faible coût et de son faible rapport main d'œuvre sur résultats. En effet, d'après Alberdi et al. (2015), le désherbage chimique a été évalué comme 20 fois moins coûteux et 4 fois moins consommateur en temps que le désherbage mécanique. Le deuxième type d'intervention est le traitement ponctuel d'adventices à la parcelle. En effet, certaines espèces de plantes sont déclassantes pour le foin de Crau dans le cadre de l'AOP, et il est donc nécessaire de les éliminer pour en éviter la propagation dans les parcelles. Les fréquences, les doses appliquées et les herbicides utilisés sont peu documentés.

Par ailleurs, l'irrigation en foin de Crau est régulière en pleine saison (à titre indicatif, on peut considérer qu'une parcelle est irriguée tous les 8-10 jours), ce qui explique que la fenêtre temporelle entre les traitements appliqués aux canaux ou aux adventices dans les parcelles et la mise en eau pour l'irrigation peut être assez courte. Ces transferts rapides d'eau, et la faible fenêtre temporelle entre traitement et irrigation, représentent un risque potentiel de transferts de contaminants d'origine agricole vers la nappe souterraine. Des enregistrements ponctuels de pollutions diffuses au niveau de la nappe (SYMCAU, 2016b) ont créé des interrogations sur ce risque.

Dans un contexte visant à diminuer la pression phytosanitaire et à préserver la qualité de l'eau souterraine dans la nappe de Crau, l'Agence de l'Eau, via le SYMCAU, a mis en place depuis 2021 (et jusque 2026) des « Paiements pour Services Environnementaux » (PSE) pour les agriculteurs de foin de Crau qui conduisent des actions favorables pour la biodiversité et l'environnement au sein de leurs exploitations. Un peu moins de 3000 ha sont concernés (sur environ 14000 ha de prairies irriguées en Crau).

1.2 Justification et objectif de l'étude

L'action s'inscrit sur l'objectif C1 du contrat de nappe : Maintenir une eau de qualité dans la nappe de la Crau par la prévention sur les pollutions diffuses.

Parmi les contaminants identifiés dans la nappe de Crau, on retrouve des herbicides dont l'origine reste à identifier. La production de foin de Crau utilise globalement peu de produits phytosanitaires.

Néanmoins, des traitements herbicides peuvent être ponctuellement appliqués en cas d'apparition d'espèces déclassantes dans le cadre de l'AOP (comme le sorgho d'Alep) susceptibles de se développer rapidement avec notamment une propagation rapide de certaines espèces lors des irrigations (Rudi et al., 2018). Le traitement herbicide chimique est aussi utilisé pour l'entretien des réseaux de transport où l'association eau+rayonnement entraîne des développements de végétation rapides, réduisant très fortement les capacités de transport hydraulique. La part que représentent les flux hydriques s'infiltrant au niveau des canaux est souvent considérée comme faible, sans que ceci n'ait été démontré (voir action B). Pour les flux de contaminants, quand bien même ces flux seraient faibles, ils pourraient représenter un risque compte tenu de la rapidité des transferts et de la faible durée entre désherbage et mise en eau (deux facteurs limitant l'immobilisation et la dégradation dans le sol). Il y a peu d'études de transfert de contaminants via les infiltrations des réseaux à surface libre. Parmi les contextes similaires, on peut citer les études menées sur des réseaux de drainage méditerranéens par l'Unité Mixte de Recherche Lisah dont l'expertise a été mobilisée sur cette étude (par exemple Dagès et al. 2015 ; 2023).

1.3 Cahier des charges et organisation de l'étude

Compte tenu des travaux menés sur le Domaine du Merle sur les flux d'eau liés à l'irrigation des prairies (étude menée pour l'Agence de l'Eau entre 2000 et 2006) et poursuivis dans divers projets de recherche, et les travaux menés sur les pratiques d'entretien (Alberdi et al., 2015; Dollinger, 2016; Rudi et al. 2018 ; rapport d'étude action B.1), une étude a été proposée à l'Institut Agro Montpellier dans le cadre de l'action C1-1 du contrat de la nappe phréatique de la Crau pour identifier le rôle potentiel des pratiques d'entretien des canaux d'irrigation gravitaire sur les risques de contamination de la nappe par les herbicides et, en cas de risque avéré, proposer des alternatives.

La présente étude **est la phase préliminaire visant à évaluer les risques de transfert de contaminants**, via la mise en évidence expérimentale des risques sur un site pilote et une enquête de pratiques. La caractérisation expérimentale est faite au Domaine du Merle où on dispose d'éléments de caractérisation des flux hydriques (infiltrations par les canaux et parcelles), grâce aux études antérieures et aux campagnes spécifiques menées pour cette étude en 2021 et 2022, en cohérence avec l'action B sur contrat de nappe.

L'étude a été menée au cours de l'année 2022, avec une phase préparatoire en 2021 sur la préparation des protocoles expérimentaux et de l'enquête de terrain. Pour sa réalisation, elle a bénéficié de l'intervention de différentes équipes :

- L'UMR Lisah, apportant son expertise scientifique sur les transferts de contaminants et ses moyens techniques pour la préparation et la réalisation de l'expérimentation
- Le Domaine du Merle/Institut Agro, pour la préparation des expérimentations et le suivi, la mise à disposition des diverses données, les relations avec les institutions et professionnels du territoire
- L'UMR G-eau, apportant son expertise scientifique sur la gestion des systèmes irrigués et ses moyens techniques.

Le présent rapport décrit les éléments suivants :

- Une première évaluation du risque que représente le désherbage chimique des canaux d'irrigation par la réalisation d'une expérimentation sur le domaine expérimental du Merle, (section 2)
- Une enquête, menée auprès d'exploitants de foin de Crau, visant à caractériser plus précisément les pratiques phytosanitaires menées dans les canaux et les parcelles (section 3).

Des éléments complémentaires sont fournis en section 6 (Annexes).

2 ETUDE EXPERIMENTALE : TRANSFERT D'HERBICIDES DANS LES CANAUX ET EN PARCELLE DE FOIN DE CRAU

2.1 Matériel et Méthodes

L'expérimentation menée vise à caractériser le risque de contamination des eaux via les pratiques d'entretien des canaux par désherbage chimique. Les canaux et parcelles étudiés sont situés au domaine expérimental et pédagogique du Merle, appartenant à Institut Agro Montpellier. L'expérimentation implique le désherbage chimique de 2 canaux d'irrigation tertiaires dans 2 secteurs différents du domaine, caractérisés par des sols différenciés. L'herbicide appliqué est le glyphosate, et l'expérience consiste en le suivi dans l'eau et les sols des canaux et des parcelles irriguées via ces canaux, de la molécule de glyphosate et de son principal métabolite l'acide aminométhylphosphonique (AMPA).

2.1.1 Localisation et configuration des parcelles étudiées au sein du domaine du Merle

Les parcelles étudiées sont identifiées et représentées sur la figure 1 (parcelles 2cd et 1h). Le choix de ces parcelles a été raisonné en fonction de leur configuration, propice à la réalisation de l'expérimentation, mais également en raison de leurs caractéristiques différenciées au niveau de la texture de leurs sols (voir Table 1). Les canaux tertiaires étudiés et ayant fait l'objet d'un traitement par le glyphosate dans le cadre de l'expérimentation ont été représentés sur la Figure 2 et mesuraient chacun 12 mètres, pour une largeur et une profondeur de 1.5 m et 1 m de profondeur environ.

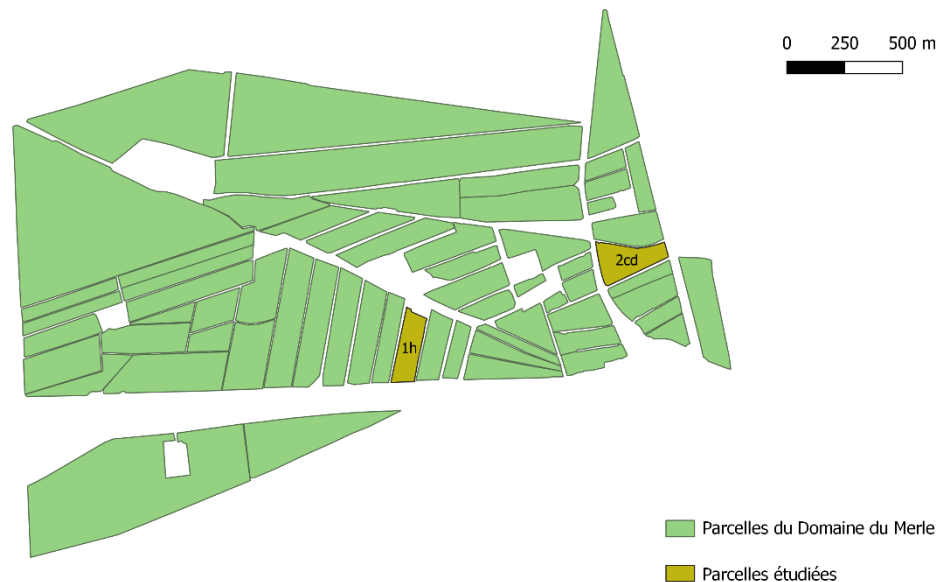


Figure 1 : Parcelles étudiées dans le cadre de l'action C (Parcelle 1h Secteur 1, Parcelle 2cd Secteur 2)

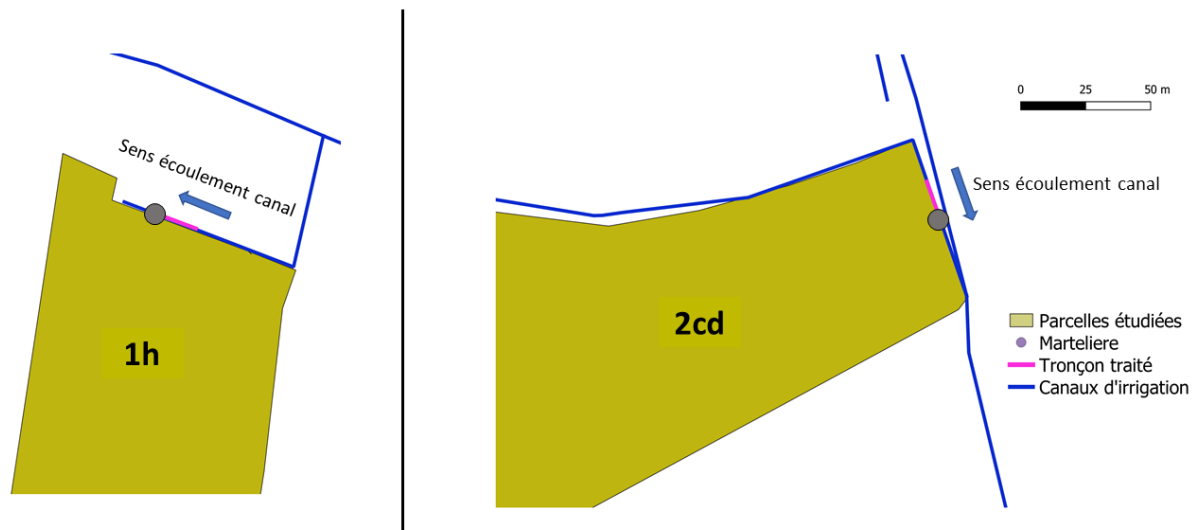


Figure 2 : Localisation des tronçons traités par rapport aux parcelles étudiées (1h et 2cd - en haut), et photographies des mêmes tronçons (1h et 2cd - en bas)

2.1.2 Caractérisation des sols de la zone d'étude

La plaine de Crau se situe dans l'ancien delta caillouteux de la Durance. La roche-mère dans cette zone est constituée d'un poudingue calcaire relativement imperméable. La fissuration et l'altération de ce poudingue explique la relative infiltrabilité de ce sol initialement imperméable. Au niveau du domaine, la profondeur de la roche-mère est variable, et va de 1 mètre de profondeur jusqu'à affleurer sur certains endroits (Mérot, 2007). Les différents nivellements opérés au cours des années ont également participé à cette hétérogénéité.

La dégradation de ce poudingue (taparas) a laissé place à un horizon de sol fersialitique calcique avec encroûtement calcaire très induré avec un taux de cailloux allant jusque 90% à proximité du poudingue mais seulement de 20% en limite supérieure de l'horizon. Dans les plaines irriguées de manière gravitaire, cet horizon est surmonté d'un horizon de surface limoneux dont l'existence s'explique par le dépôt de limons transportés via l'irrigation (Andrieux, 1981). Andrieux (1981) estime que cette couche de limons atteint plusieurs dizaines de centimètres dans les prairies centenaires. Cependant, il est à faire remarquer que ceci est modulé en fonction de l'ancienneté de la parcelle et des opérations de renouvellement.

Le profil général d'une parcelle du domaine du Merle est fourni en Annexe 1. La distribution des particules du sol (texture), le pH, la teneur en carbone organique (CO), et la teneur en carbonate de calcium (CaCO₃), ainsi que d'autres paramètres permettant de caractériser la nature des sols, ont été mesurés au laboratoire de la Chambre d'Agriculture de l'Aude (Table 1 et Table 2). Les analyses ont été réalisées sur des échantillons prélevés sur l'horizon de surface 0-10 cm, en cohérence avec les analyses réalisées pour le glyphosate et l'AMPA.

Tableau 1 : Texture et pH de l'horizon de surface (0-10 cm) à l'intérieur de la parcelle et dans les canaux étudiés (1h et 2cd)

Lieux de prélèvement	Sables grossiers (%)	Sables fins (%)	Limons grossiers (%)	Limons fins (%)	Argile (%)	pH
1H (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	135	145	98	283	339	8,2
1H (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	140	186	89	251	334	8,3
2CD (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	31	84	174	462	249	8,2
2CD (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	24	151	186	360	279	8,5

* Chacune des analyses de sol est la résultante de l'analyse d'un échantillon reconstitué à partir de 6 prélèvements de masse égale dans la parcelle à 6 m du canal, et dans le canal au niveau du tronçon traité (3 prélèvements dans la couche 0-5 cm et 3 prélèvements dans la couche 5-10 cm)

Tableau 2 : Autres paramètres physico-chimiques de l'horizon de surface (0-10 cm) des sols étudiés

Lieux de prélèvement	Carbone (g/kg)	MO (g/kg)	Azote total (g/kg)	C/N (g/kg)	Phosphate (mg/kg)	MgO (mg/kg)	K ₂ O (mg/kg)	Fer (mg/kg)
1H (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	32,2	55,38	4,3	7,49	215	572,86	89,02	157
1H (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	27,8	47,82	3,25	8,55	208	581,53	108,80	159
2CD (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	39,4	67,77	4,29	9,18	147	596,64	76,77	195
2CD (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	17	29,24	1,89	8,99	64	449,14	81,48	209

Lieux de prélèvement	Na ₂ O (mg/kg)	CEC (cmol+/kg)	Zinc (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Manganèse (mg/kg)	Al total (mg/kg)	Al échangeable (mg/kg)	Conductivité (msC/cm)
1H (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	55,8	14,5	5,7	1,8	38,3	33,2	<2	0,18
1H (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	37,51	13,6	5,1	1,7	40,6	22,2	<1,99	0,14
2CD (Prélèvement* dans parcelle, 6m après le canal)	47,12	14	5,5	1,9	27,5	23,8	<2	0,15
2CD (Prélèvement* dans canal, tronçon traité)	32,24	8,4	3,8	2,4	26,5	30	<2	0,12

* Chacune des analyses de sol est la résultante de l'analyse d'un échantillon reconstitué à partir de 6 prélèvements de masse égale dans la parcelle à 6 m du canal, et dans le canal au niveau du tronçon traité (3 prélèvements dans la couche 0-5 cm et 3 prélèvements dans la couche 5-10 cm)

Dans la parcelle 1h, la profondeur du taparas (poudingue) a été estimée à environ 50 cm et dans la parcelle 2cd à 70 cm, sur la base de sondages réalisés à la tarière. Sur la base de ces mêmes sondages, la parcelle 1h se caractérise par une densité importante de galets à de faibles profondeurs. D'après les analyses de sol réalisées, la parcelle 1h se caractérise par une proportion beaucoup plus importante de sables grossiers que la parcelle 2cd, et beaucoup moins de limons. La parcelle 1h enregistre des teneurs en phosphate plus importantes que la 2cd également. D'après la thèse de Alkassem-Alosmann (2018), des mesures de Ksat sur le domaine, menées par Juliand (2011), ont montré que ceux-ci variaient entre 1.7 mm/h et 3.5 mm/h (entre 5.10^{-7} et 10^{-6} m.s⁻¹). Des travaux menés par ICF Environnement (2009) auraient de leur côté obtenu des valeurs entre 5.10^{-5} et 2.10^{-3} m.s⁻¹ par la méthode de Porchet, selon le niveau d'altération du taparas. Cette grande variabilité des valeurs peut être expliquée par les effets d'échelle auxquelles sont considérées les capacités d'infiltration (la présence de fractures du taparas pouvant entraîner de fortes infiltrabilités alors les couches indurées non fracturées sont très peu perméables), ainsi que par la variabilité des sols due, entre autres, à l'historique des arrosages gravitaires et des nivellements. Les tests au bassin fermé réalisés sur divers canaux du domaine donnent des vitesses d'infiltration des canaux de l'ordre de 15 à 30 mm/h (4 à 8.10^{-6} m.s⁻¹, voir Annexe 3). C'est également cet ordre de grandeur qui est obtenu pour l'infiltration à l'échelle des parcelles (voir Action B), même s'il est cependant possible d'obtenir des vitesses plus élevées localement, au niveau de zones de fracture du taparas.

Le domaine du Merle s'est engagé récemment dans une démarche de PSE, mais les tronçons étudiés ont été retirés du périmètre du PSE pour les besoins de l'expérience.

2.1.3 Pratiques d'irrigation et pratiques phytosanitaires associées à la culture du foin de Crau

Le calendrier d'irrigation de la saison 2022 pour les parcelles 1h et 2cd est présenté en Figure 3 (les irrigations se sont espacées sur la fin de saison en raison de sévères restrictions liées aux sécheresses de l'été 2022). Le calendrier d'irrigation n'a pas été modifié pour les besoins de l'expérimentation. Le débit à la vanne de la parcelle 1h et de la parcelle 2cd a été pour toutes les irrigations de l'ordre de 120 L/s (information du gestionnaire).

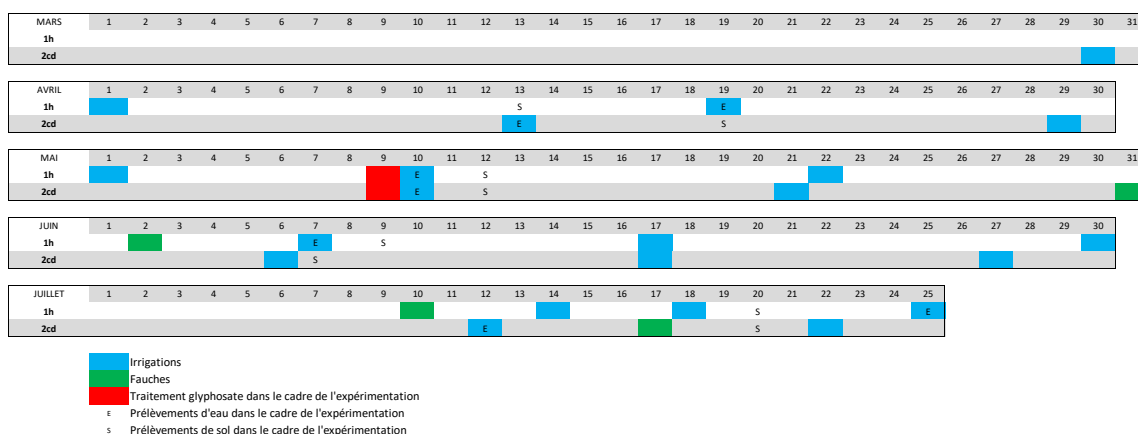


Figure 3 : Calendrier d'irrigation, fauche et autres interventions en lien avec l'expérimentation

L'entretien par herbicides des canaux d'irrigation au sein du domaine du Merle consistait historiquement à traiter 1 ou 2 fois par saison les canaux d'irrigation avec du glyphosate, avec un premier traitement au mois de mai. C'est cette date de premier traitement en mai qui a été retenue pour les besoins de l'expérimentation (rappelons qu'à ce jour, le domaine est en PSE et que les canaux ne sont plus traités chimiquement, en dehors des 2*12 m qui ont servi pour l'expérimentation).

2.1.4 Expérience d'épandage de glyphosate et suivi de la molécule-mère et des molécules-filles dans les eaux et les sols

L'expérience a consisté à traiter deux tronçons de canal tertiaire (adjacents à des parcelles de foin de Crau) avec un herbicide non-sélectif au mois de mai 2022, et à suivre ensuite en divers points de prélèvement la dynamique du glyphosate et de l'AMPA, afin d'appréhender le risque que peuvent représenter les herbicides appliqués au foin de Crau pour la nappe souterraine.

Avant l'expérience, en avril 2022, des prélèvements de sol, des eaux d'irrigation de surface et de l'eau percolant dans le sol (eau gravitaire) ont été réalisés afin de détecter éventuellement et quantifier la contamination préliminaire de ces différents compartiments.

Le 9 mai 2022, les deux tronçons de canal tertiaire ont été traités (Figure 2). Le produit utilisé a été du glyphosate (*N*-phosphonométhylglycine) Barbarian ST (360 g/L de glyphosate), distribué par la société Barclays Chemicals Ltd. (références en Annexe 2). La dose de produit a été fixée à 8 L/ha, selon la recommandation du distributeur (cf. tableau en annexe), soit, pour 50m², 40 mL de produit (soit 14,4 g de glyphosate). Le mélange a été préparé à 1,6% (gamme de dilution habituelle, soit un volume de dilution de 2,5 L pour traiter 50m²). Ce volume a été épandu sur chaque tronçon.

Le traitement au glyphosate a été réalisé 24h avant une irrigation, à l'aide d'un pulvérisateur à dos, en cohérence avec le calendrier d'épandage communément observé dans les exploitations de foin de Crau (Alberdi et al. 2015). La totalité des solutions préparées pour chacun des tronçons a été épandue par l'opérateur, afin d'assurer une quantité égale de glyphosate épandue sur chacun des tronçons.

Pour mémoire, les propriétés liées au devenir dans l'environnement du glyphosate, et de son principal métabolite l'AMPA, sont rappelées dans le tableau 3 :

Tableau 3: Propriétés du glyphosate et de l'AMPA

Propriétés	Glyphosate	AMPA
Solubilité dans l'eau à 20°C (mg/L)	100000	1466561
Volatilité (constante de Henry) (Pa.m ³ /mol)	2,21.10 ⁻⁸	0.16
Koc (L/kg)	884-60000	8027
Log Kow	-3.2	-2.17
DT50 (jours)	6.45<DT50<17.3	114<DT50<419

Source : INERIS pour Koc (coefficient de partage carbone organique-eau) et Kow (coefficient de partage octanol-eau) (<https://substances.ineris.fr/substance/1071-83-6> et <https://substances.ineris.fr/fr/substance/2279>), IUPAC

Après 24h, une irrigation a été réalisée dans les parcelles dont le canal tertiaire a été traité.

2.1.5 Prélèvements d'échantillons d'eau d'irrigation, d'eau gravitaire et de sol

Quatre types d'échantillons ont été étudiés et suivis au cours de l'expérimentation :

- (i) Pour chaque tronçon de canal traité, un prélèvement d'eau d'irrigation a été réalisé à la vanne amont en entrée de parcelle (avant passage par le tronçon traité), ainsi qu'avant la martelière (après passage par le tronçon traité), à intervalles de temps réguliers afin d'obtenir une information sur la qualité de l'eau pendant le régime transitoire ascendant, le régime permanent et le régime transitoire descendant (voir Rudi et al. 2018 pour la caractérisation des régimes dans les canaux au cours de l'irrigation). Avant épandage du glyphosate, un seul échantillon a été relevé, lorsque le régime permanent a été établi au cours de l'irrigation.
- (ii) Des préleveurs d'eau gravitaire du sol ont été mis en place à 50 cm de profondeur dans chacun des tronçons de canal et dans chacune des parcelles, soit un total de 6 préleveurs dans chaque couple parcelle/canal. Les préleveurs sont espacés chacun de 3 mètres et les préleveurs à la parcelle sont espacés de 6 mètres du canal (voir figure 4). La situation à 6 mètres du canal a été choisie pour à la fois garantir une certaine avancée de l'eau dans la parcelle et s'affranchir de l'influence du bulbe 3D du canal (Dagès et al. 2008) et donc pour limiter le risque de contamination via l'eau s'infiltrant directement dans le canal (qui pourrait influencer nos résultats). Cependant, il n'était en revanche pas possible de s'éloigner trop loin car nous souhaitons garantir que le sol à l'endroit des préleveurs serait suffisamment saturé pour permettre le recueil d'eau gravitaire à cette profondeur. Les préleveurs ont été fabriqués manuellement à l'aide de tubes plastiques fermés et percés (diamètre 10 cm et hauteur 10.2 cm). Ceux-ci ont ensuite été recouverts d'un bas à maille fine pour éviter l'entrée massive de sédiments grossiers, mais permettre l'entrée d'eau (voir figure 5). Le matériau utilisé pour les bas possède a priori un comportement neutre vis-à-vis de la rétention du glyphosate, même si aucune expérimentation n'a été mise en œuvre pour le prouver formellement. Les préleveurs ont été enfoncés dans le sol à 50 cm de profondeur à l'aide d'une tarière (parcelle 2cd) ou d'une foreuse (parcelle 1h) puis recouverts des matériaux suivants (gravier, bentonite, terre, bentonite) suivant le schéma proposé en figure 6. La profondeur a été choisie de manière pratique puisqu'elle correspondait à la fin de l'horizon limoneux dans la parcelle avec la profondeur de sol la plus faible (parcelle 1h). Par ailleurs, à titre indicatif, le SYMCRAU (SYMCRAU, 2016a) considère qu'au-delà d'1 mètre de profondeur, la qualité de l'eau qui percole jusqu'à la nappe reste globalement stable. En effet, en dessous de cette zone, la nature du substrat, rendu perméable par l'altération de la roche-mère, ainsi que la faible teneur en matière organique, ajouté au fait que la densité de communautés bactériennes diminue largement sous la zone racinaire des plantes, implique que les phénomènes de dégradation et d'immobilisation (notamment sorption) ne sont plus significatifs au-dessous de cette profondeur.
- (iii) Des prélèvements d'eau ruisselant sur le sol de la parcelle, au niveau des préleveurs parcelle, soit à 6 m des tronçons traités, et à 60 m des tronçons traités, ont également été analysés pour étudier la différence de qualité entre l'eau de surface arrivant à la parcelle et celle ayant déjà parcouru une longue distance sur la parcelle.
- (iv) Tout au long de la saison d'irrigation, des échantillons de sol ont été prélevés à chaque lieu de prélèvement (2 localisations canal et 2 localisations parcelle * 3 répétitions). Les prélèvements ont été réalisés sur l'horizon 0-5 cm et 5-10 cm (0-10 cm correspondant à la profondeur de sol prélevée pour la caractérisation de la contamination par le glyphosate dans les sols superficiels agricoles dans Bento et al. 2016). En effet, le glyphosate et l'AMPA sont immobilisés majoritairement dans les premiers centimètres du sol (Laitinen et., 2006 ; Okada et al. 2016, Yang et al. 2015), et il n'est généralement pas nécessaire de réaliser des prélèvements de sol à des profondeurs supérieures à 15-20 cm. Comme chaque localisation comporte 3 répétitions, des prélèvements en quantité égale ont été prélevés dans

chaque répétition puis mélangés pour constituer un échantillon homogène unique de 500 mg, envoyé au laboratoire pour détecter une présence éventuelle de glyphosate ou d'AMPA avant et après expérience (voir Figure 3 pour les périodicités de prélèvements).

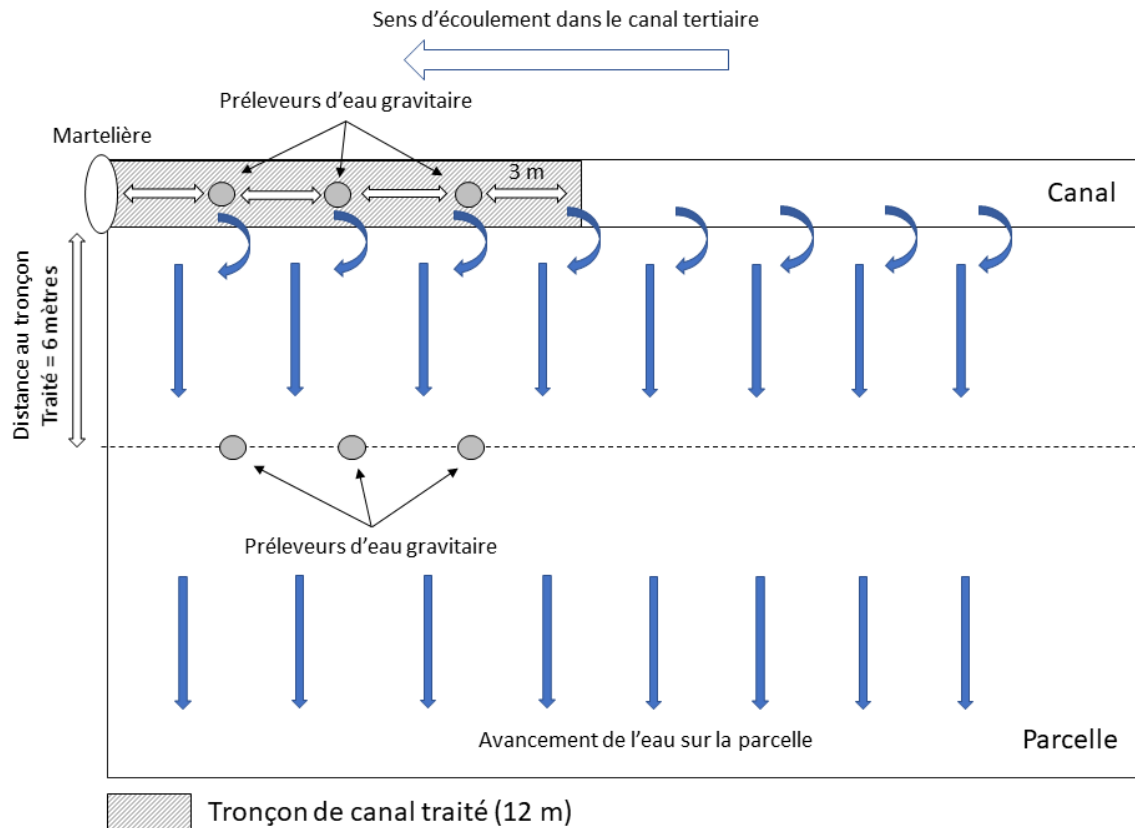


Figure 4 : Position des préleveurs d'eau enterrés à 50 cm dans le sol du canal tertiaire et dans la parcelle. La configuration est la même pour la parcelle 1h et la 2cd. Les préleveurs à 60m n'ont pas été représentés.

Le tableau 4 résume les différents prélèvements réalisés :

Tableau 4 : Prélèvements réalisés au cours de l'expérimentation pour le suivi du glyphosate et de l'AMPA

Echantillon d'eau d'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> - A l'entrée de la vanne amont - Echantillon moyen asservi au débit juste avant la martelière (2 en transitoire montant, 3 en régime permanent et 1 en transitoire descendant), variable selon les conditions terrain
Eau d'irrigation ruisselant sur le sol	<ul style="list-style-type: none"> - Au niveau des préleveurs à 6 mètres sur parcelle - En bout de parcelle à 60 mètres <p>Au moment où le front d'irrigation y parvient, dans la mesure du possible</p>
Echantillon d'eau gravitaire	<ul style="list-style-type: none"> - Dans les 12 préleveurs situés dans la zone : 25 minutes après l'immersion du préleveur, puis 1h30 après*
Echantillons de sol	<ul style="list-style-type: none"> - A proximité des préleveurs dans les horizons 0-5 et 5-10 cm

*Ces durées ont été calculées dans l'optique de récupérer le front d'eau percolée et les eaux de percolation de milieu d'irrigation, sur l'hypothèse d'une conductivité hydraulique à saturation de $5.10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$ (ICF Environnement 2009). Dans la pratique, ces durées n'ont pas été tout à fait respectées, puisque le front d'infiltration a eu une durée très variable de transit suivant l'état d'humidité du sol à la parcelle, lors de la saison d'irrigation.

Le calendrier des prélèvements est disponible en Figure 3. Le glyphosate et l'AMPA dans les échantillons d'eau ont été analysés par TERANA (La Drôme Laboratoire), et dans le sol par le laboratoire IANESCO.



Figure 5 : Photographie d'un préleveur passif d'eau gravitaire

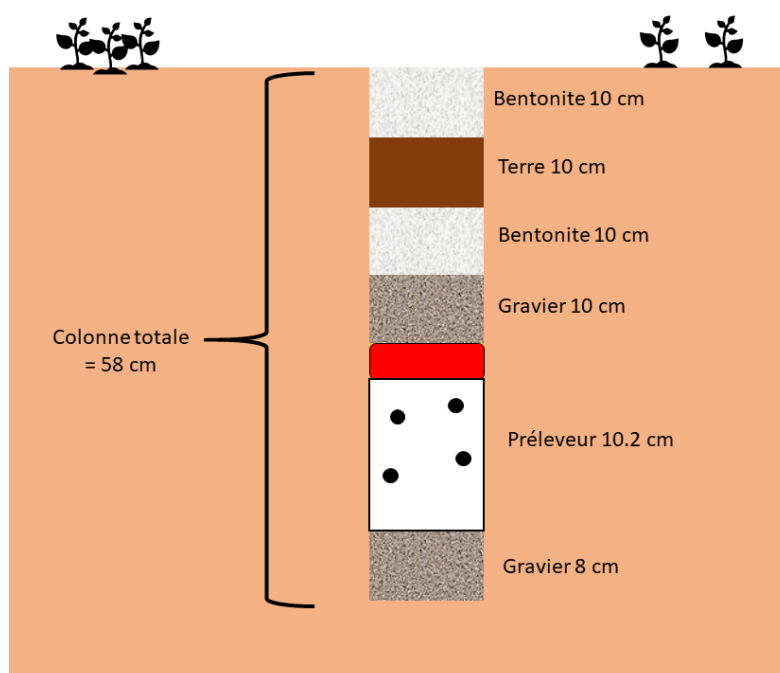


Figure 6 : Schéma de l'installation des préleveurs d'eau gravitaire

2.2 Résultats

2.2.1 Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA au niveau des vannes d'entrée des parcelles, et résultats des analyses multi-résidus

Tableau 5 : Concentration en glyphosate et AMPA au niveau des vannes d'entrée des 2 parcelles 1h et 2cd

Parcelle	Date	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
1h	10/05/2022	0.03	<0.03*
	07/06/2022	1.08	0.25
	25/07/2022	<0.03*	<0.03*
2cd	10/05/2022	<0.03*	<0.03*
	12/07/2022	<0.03*	<0.03*

* La valeur de 0.03 µg/L correspond à la limite de quantification du glyphosate et de l'AMPA pour le laboratoire prestataire des analyses. L'incertitude pour les valeurs de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés (> 0.03 µg/L).

Nous constatons qu'au niveau de la parcelle 1h, les 2 prélèvements réalisés aux dates du 10/05/2022 et 07/06/2022 ont fait état de glyphosate et d'AMPA (pour le 07/06) dans les eaux en entrée (donc avant passage dans le tronçon traité). Ceci laisse supposer que les eaux d'irrigation au cours du mois de juin auraient pu être contaminées au glyphosate et AMPA avant entrée sur le domaine, puisque le domaine n'utilise plus ces molécules. Cependant, nous notons que les valeurs de l'échantillon du 07/06 (1.08 µg/L pour le glyphosate et 0.25 µg/L pour l'AMPA) paraissent relativement élevées pour des valeurs en entrée de parcelles. De plus, les prélèvements réalisés dans le canal traité 10 minutes avant présentent des concentrations inférieures (en moyenne 0.6 µg/L pour le glyphosate et 0.12 µg/L pour l'AMPA, alors que la logique voudrait que la valeur trouvée dans le canal soit supérieure ou égale). Nous suspectons donc une certaine forme de contamination ou erreurs de manipulation au terrain ou au laboratoire, même l'hypothèse d'une contamination avant entrée parcelle ne peut pas être écartée pour cette période de l'année.

Pour trois de ces prélèvements, une analyse multi-résidus sur plus de 400 pesticides a également été réalisée ; les résultats sont disponibles en Annexe 5.

2.2.2 Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA au cours de la saison d'irrigation (avant traitement et après traitement)

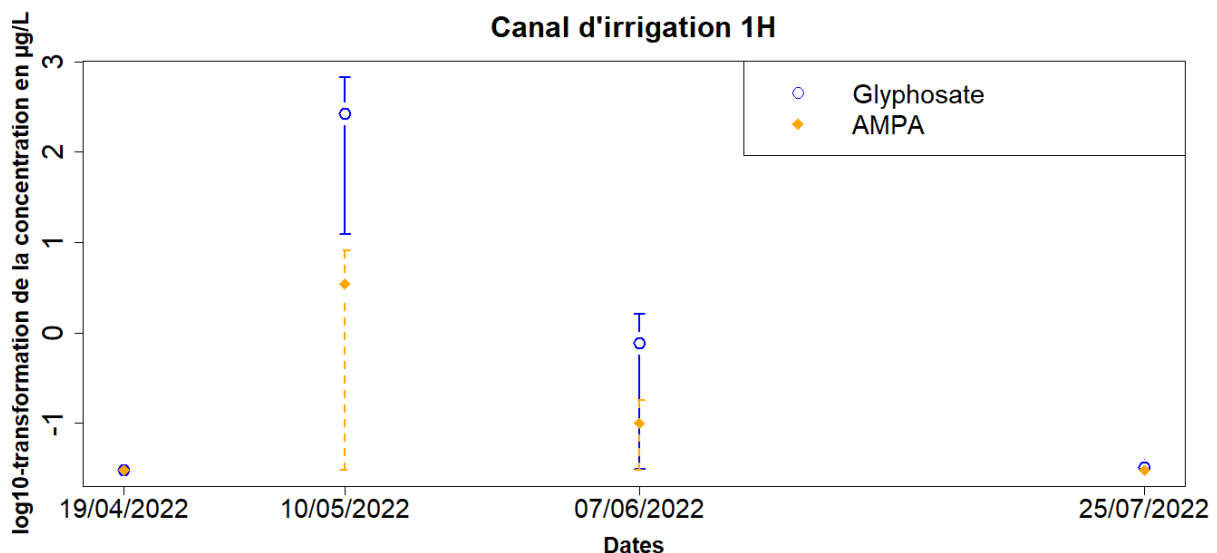


Figure 7 : Evolution de la concentration (moyenne) en glyphosate et en AMPA dans les eaux d'irrigation au long de la saison d'irrigation au niveau du tronçon traité (1h). Les valeurs sont log-transformées. Les barres d'erreur correspondent aux valeurs minimales et maximales enregistrées sur l'ensemble des valeurs mesurées de la journée. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés (> 0.03 µg/L).

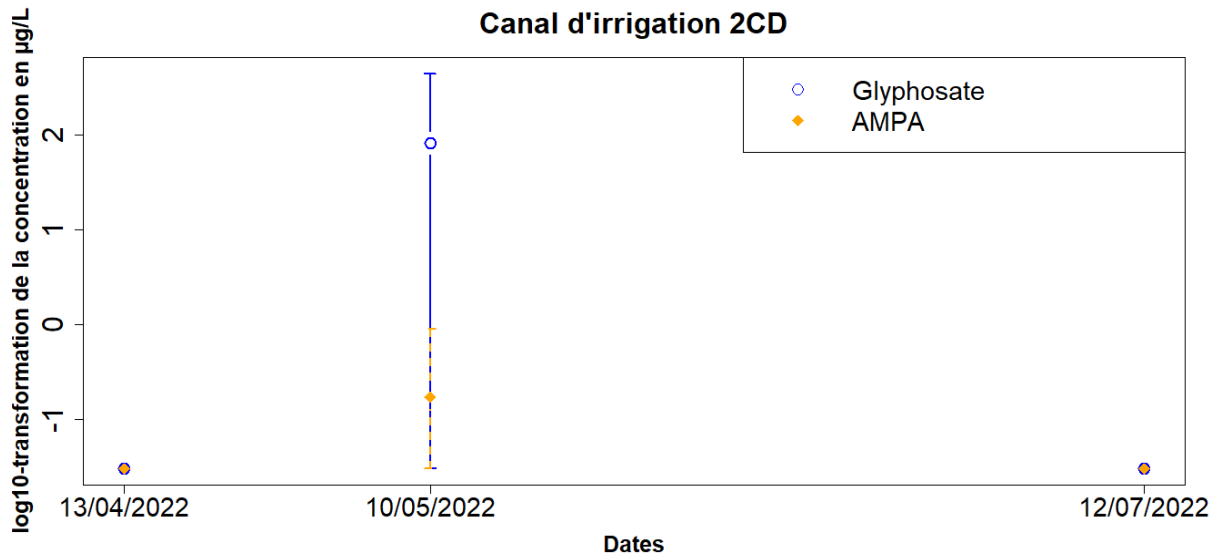


Figure 8 : Evolution de la concentration (moyenne) en glyphosate et en AMPA dans les eaux d'irrigation au long de la saison d'irrigation au niveau du tronçon traité (2cd). Les valeurs sont log-transformées. Les barres d'erreur correspondent aux valeurs minimales et maximales enregistrées sur l'ensemble des valeurs mesurées de la journée. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés ($> 0.03 \mu\text{g/L}$).

Les résultats des figures 7 et 8 montrent que les valeurs les plus importantes ont été observées à J+1 après traitement (le 10/05, cf Figure 3). La dispersion des valeurs autour de la moyenne au cours de cette journée du 10/05 est relativement élevée. Le détail de la journée du 10/05 est donné dans la partie suivante. Le détail des valeurs mesurées est disponible en Annexe 5.

2.2.3 Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA dans les eaux d'irrigation lors de la journée du 10 mai 2022

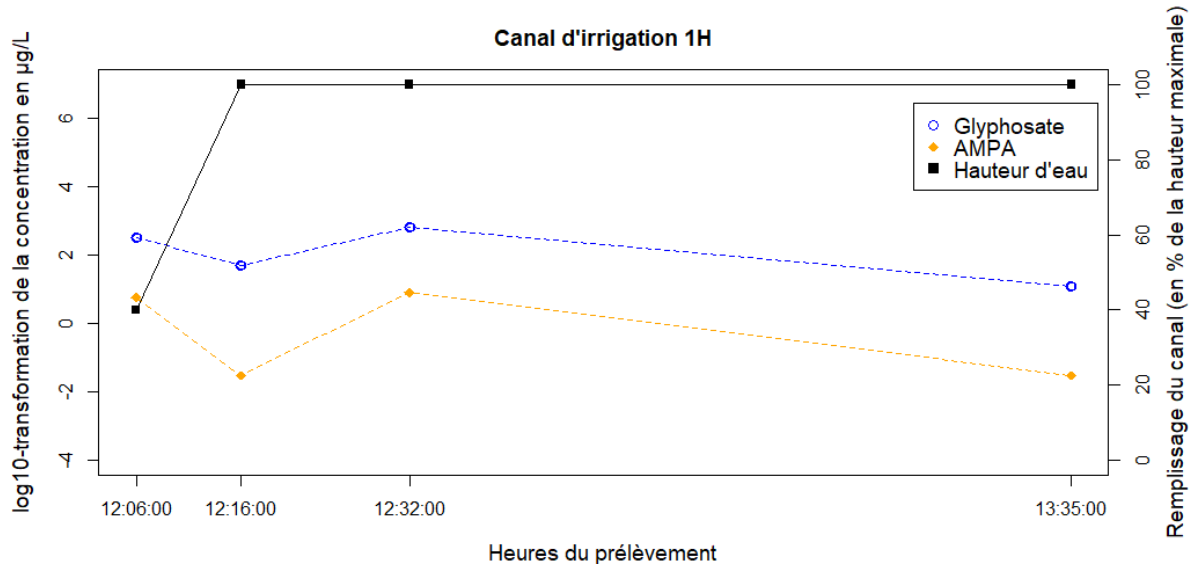


Figure 9 : Evolution de la concentration en glyphosate et AMPA dans les eaux d'irrigation au niveau du tronçon traité de la 1h, journée du 10 mai 2022 (J+1 après traitement). Les valeurs sont log-transformées. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés ($> 0.03 \mu\text{g/L}$).

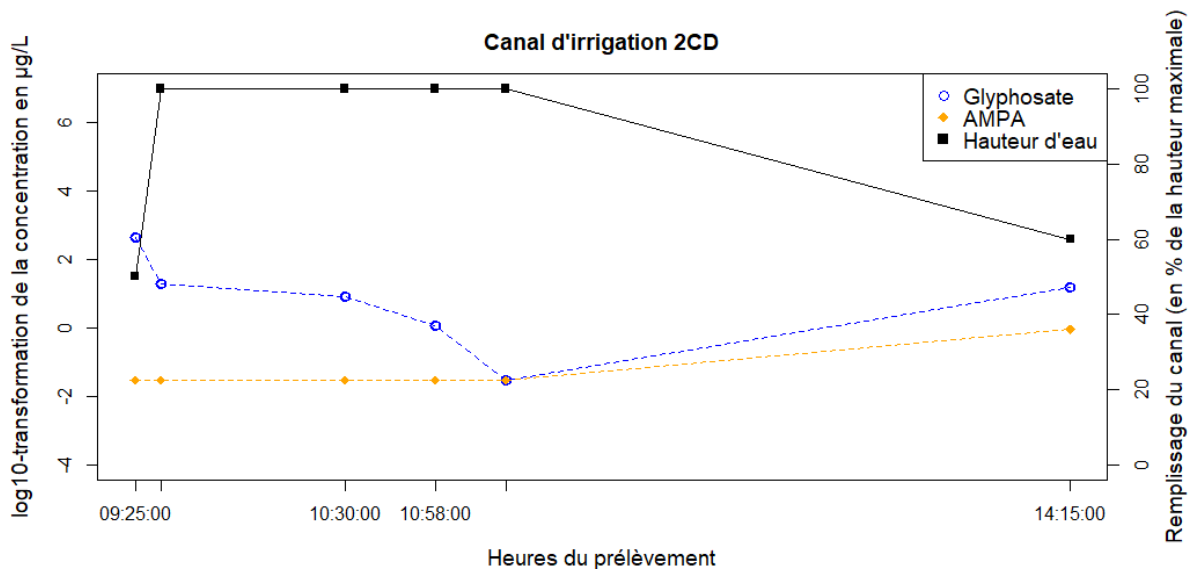


Figure 10 : Evolution de la concentration en glyphosate et AMPA dans les eaux d'irrigation au niveau du tronçon traité de la 2cd, journée du 10 mai 2022 (J+1 après traitement). Les valeurs sont log-transformées. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés (> 0.03 µg/L).

Les valeurs mesurées au cours de la journée du 10 mai 2022 (Figures 9 et 10) font état de concentrations maximales en glyphosate en début d'irrigation égales à 680 µg/L (1h) et 445 µg/L (2cd). Cette concentration tend à diminuer rapidement au cours du temps, une fois le premier "lessivage" réalisé. Une ré-augmentation des valeurs à la fin de l'irrigation dans la parcelle 2cd (Figure 10), sur des eaux de fond de canal stagnantes après la fin de l'irrigation, tend à laisser supposer que des phénomènes de désorption peuvent se mettre en place lorsque les temps de séjour de l'eau dans le canal s'allongent.

2.2.4 Résultats de suivi du glyphosate dans les préleveurs au niveau des tronçons traités et des parcelles (à 6 m des tronçons traités)

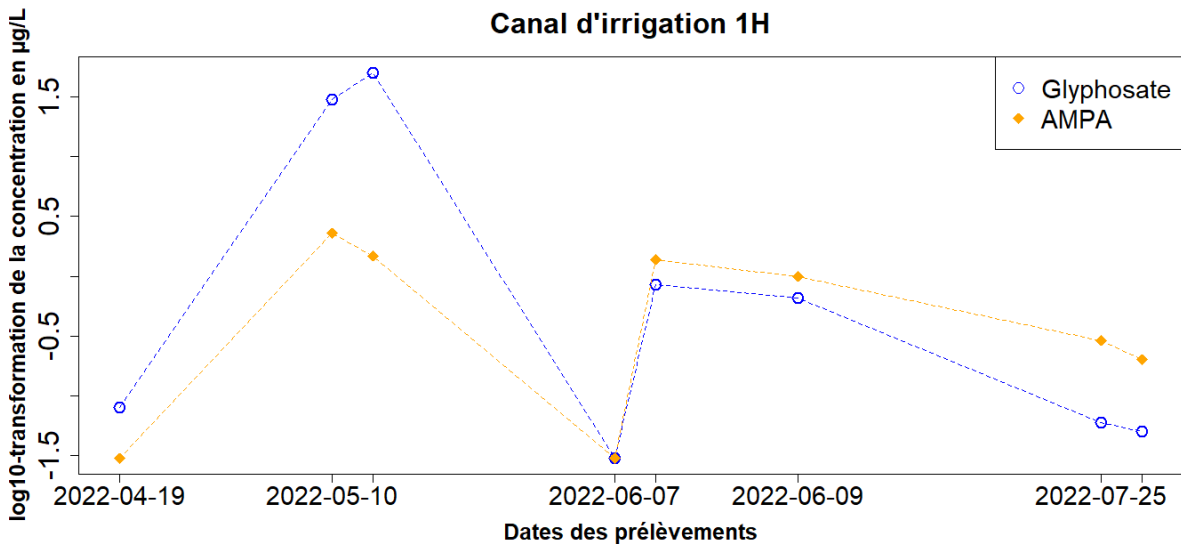


Figure 11 : Evolution des concentrations en glyphosate et en AMPA dans les eaux des préleveurs (moyenne) du tronçon traité de la parcelle 1h. Les valeurs sont log-transformées. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés (> 0.03 µg/L). A noter que les dates en abscisse ne sont pas à l'échelle, pour améliorer la visibilité.

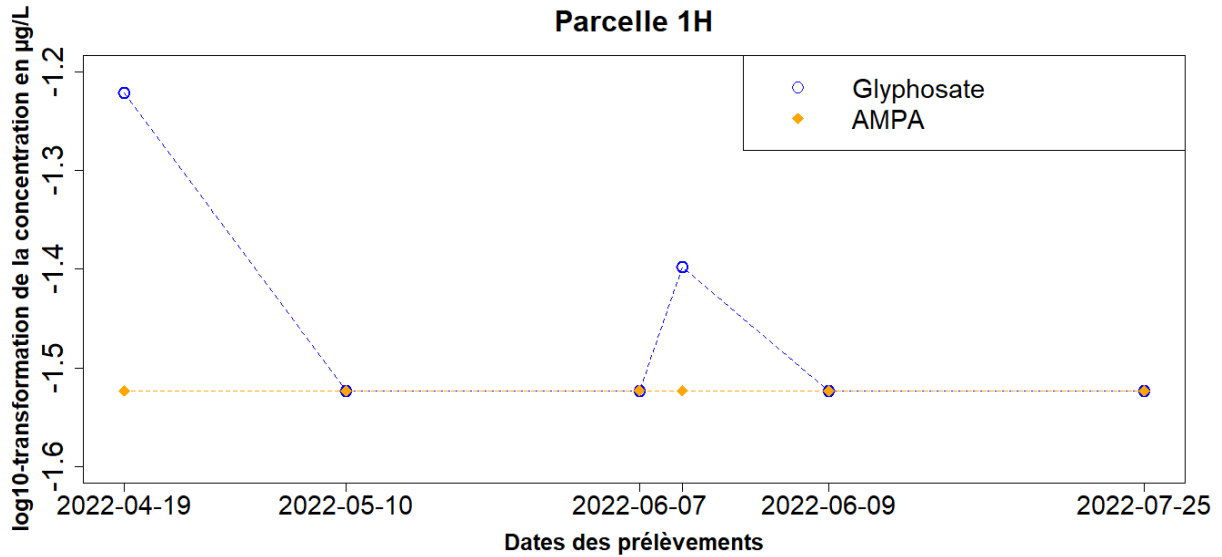


Figure 12 : Evolution des concentrations en glyphosate et AMPA dans les eaux des préleveurs (moyenne) dans la parcelle 1h. A noter que les dates en abscisse ne sont pas à l'échelle, pour améliorer la visibilité. Les valeurs sont log-transformées. L'incertitude pour les mesures de glyphosate et d'AMPA est de 25 % pour les résultats quantifiés (> 0.03 µg/L). A noter que les dates en abscisse ne sont pas à l'échelle, pour améliorer la visibilité.

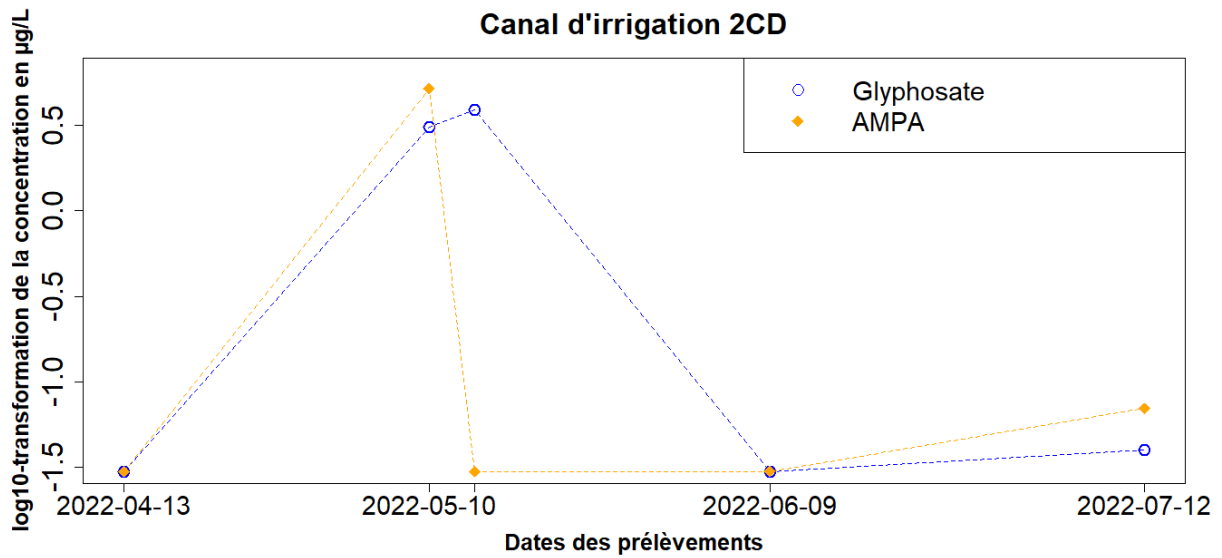


Figure 13 : Evolution des concentrations en glyphosate et en AMPA dans les eaux des préleveurs (moyenne) du tronçon traité de la parcelle 2cd. A noter que les dates en abscisse ne sont pas à l'échelle, pour améliorer la visibilité.

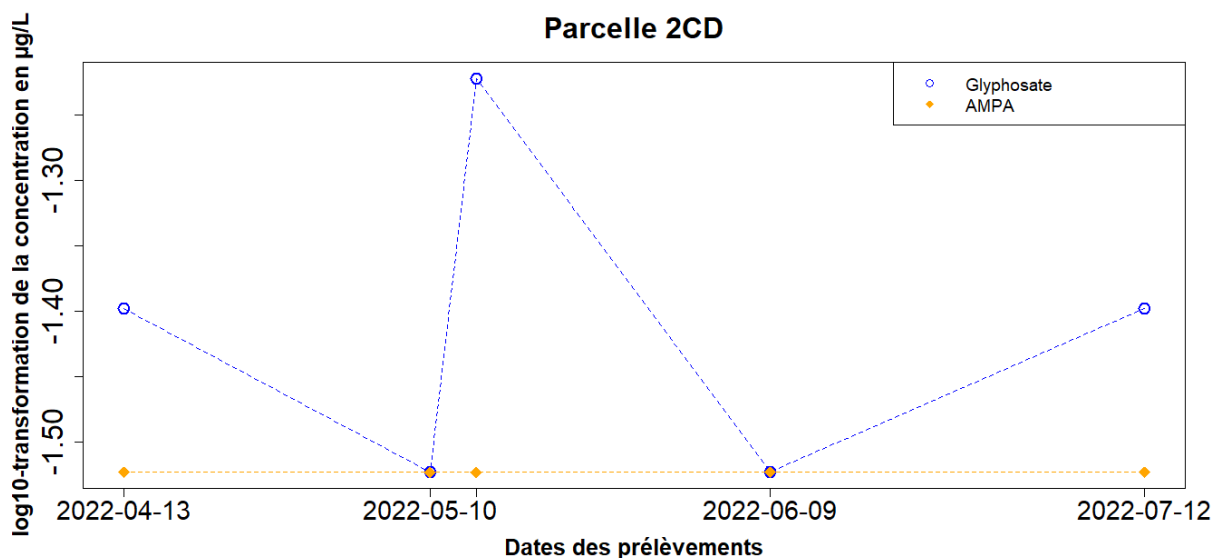


Figure 14 : Evolution de la concentration en glyphosate et en AMPA dans les eaux au niveau des préleveurs (moyenne) de la parcelle 2cd. A noter que les dates en abscisse ne sont pas à l'échelle, pour améliorer la visibilité.

Les résultats des figures 11 à 14 montrent (i) que les concentrations mesurées dans les préleveurs en fond de canal sont supérieures à celles mesurées dans les préleveurs des parcelles (ii) que des concentrations maximales de 50 µg/L de glyphosate et 2,2 µg/L d'AMPA pour la 1h et 3,9 µg/L de glyphosate et 5,17 µg/L d'AMPA pour la 2cd ont été mesurées au niveau du canal lors de la journée du 10/05 (concentrations donc susceptibles de rejoindre la nappe souterraine si l'on considère qu'en-dessous de cette zone, il est peu probable que des phénomènes de dégradation et d'immobilisation puissent encore se réaliser de manière significative) (iii) qu'il existait, préalablement au traitement réalisé pour l'expérimentation (en avril), une faible contamination de l'eau dans les préleveurs par le glyphosate. Cette contamination peut résulter à la fois de la contamination de l'eau d'irrigation avant entrée sur le domaine, ou bien de phénomènes de désorption de glyphosate piégé dans le sol, mais cette dernière hypothèse est moins probable au sens où, dans aucun des cas, de l'AMPA n'a été observé dans les préleveurs avant début de l'expérimentation (et l'AMPA est la forme prépondérante dans le sol).

Le détail des valeurs mesurées est disponible en Annexe 5.

2.2.5 Résultats du suivi du glyphosate et de l'AMPA dans les eaux de ruissellement sur la parcelle

Tableau 6 : Concentrations des eaux de ruissellement sur les parcelles 1h et 2cd à 6m (au niveau des préleveurs parcelle) et à 60 m des tronçons traités

Parcelle	Date	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
1h Eau ruisselant sur la parcelle au niveau des préleveurs (à 6m)	10/05/2022	20.2	<0.6 (LQ=0.6)
	07/06/2022	0.27	<0.03 (LQ=0.03)
1h Eau ruisselant sur la parcelle à 60 m du tronçon traité	10/05/2022	2.02	<0.3 (LQ=0.03)
	07/06/2022	0.31	0.04 (LQ=0.03)
2cd Eau ruisselant sur la parcelle au niveau des préleveurs (à 6m)	10/05/2022	1.3	<0.03 (LQ=0.03)
2cd Eau ruisselant sur la parcelle à 60 m du tronçon traité	10/05/2022	0.98	<0.03 (LQ=0.03)

* LQ : Correspond à la limite de quantification du glyphosate et de l'AMPA pour le laboratoire prestataire des analyses

Les résultats du tableau 6 montrent que les concentrations d'eau ruisselant sur le sol des parcelles lors des irrigations s'élèvent pour le 10/05 à 20.2 µg/L en concentration maximale pour la 1h et 1.3 µg/L en concentration maximale pour la 2cd. Une contamination est également observée 1 mois après, lors de l'irrigation du 07/06 pour la 1h. Deux points méritent d'être soulignés : (i) l'abattement de concentration entre le début de parcelle et 60 m après n'est pas clairement mis en évidence (il peut se laisser supposer pour le 10/05 pour la 1h, mais pas visible sur les autres points, et par ailleurs cette différence de concentration peut également s'expliquer par des différences de concentration au niveau du canal d'irrigation qui seraient ensuite observables à la parcelle) (ii) l'AMPA n'est mesuré que le 07/06 à très faible concentration.

Ceci laisse supposer qu'il n'y a pas de re-contamination (ou très faiblement) des eaux lors de leur avancement sur la parcelle (pas d'AMPA alors qu'il est majoritaire dans les sols). A l'inverse, il est difficile de statuer sur l'existence de phénomènes de sorption significatifs lors de l'avancement de l'eau sur la parcelle. Enfin, la concentration observée le 07/06 à la parcelle est probablement à mettre en lien avec la qualité d'eau d'irrigation avant passage dans le tronçon traité (Tableau 5).

2.2.6 Résultats de suivi du glyphosate et de l'AMPA dans le sol

Les différents suivis de la teneur en glyphosate et en AMPA dans les sols sont présentés en Figure 15. Nous constatons que le canal de la parcelle 1h disposait d'un stock résiduel en AMPA avant le début de l'expérimentation (0.030 mg/kg pour l'horizon 0-5 cm et 0.037 mg/kg pour l'horizon 5-10 cm). A la date du 12 mai (3 jours après le traitement), les stocks de glyphosate et d'AMPA augmentent dans les sols des canaux. Ces stocks sont plus importants dans le tronçon traité de la parcelle 2cd que dans le tronçon traité de 1h. Dans les sols de la parcelle 1h, de l'AMPA et du glyphosate ont été quantifiés le 12 mai et le 9 juin à hauteur de 0,017 et 0,011 mg/kg. Aucune valeur au-dessus des limites de quantification n'a été mesurée dans les sols de la parcelles 2cd.

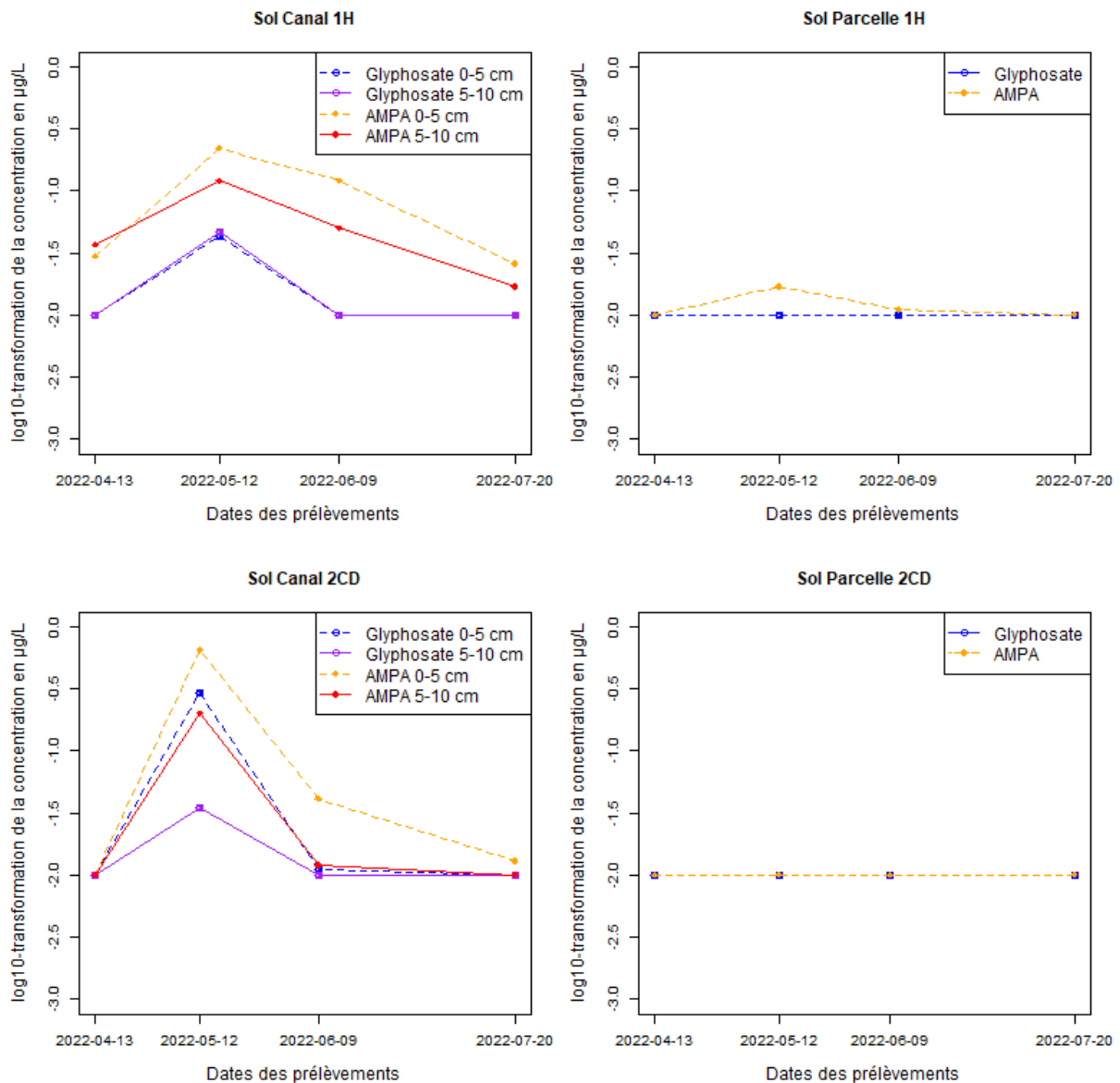


Figure 15 : Evolution de l'AMPA et du glyphosate dans les sols des canaux (0-5 cm et 5-10 cm) et des parcelles (au niveau des préleveurs à 6 m du tronçon traité)

Les résultats des analyses de sol montrent que l'AMPA est la forme prédominante rencontrée dans le sol au cours de la saison, que ce soit en termes de fréquence ou de concentration. Avant le début de l'expérience, en avril 2022, les sols du canal 1h contenaient un faible stock d'AMPA, résultant très probablement des traitements menés sur les années antérieures. Par ailleurs, pour tous les points de mesures dans les canaux et toutes les dates, le stock de glyphosate et d'AMPA dans l'horizon 0-5cm est supérieure au stock dans la couche 5-10 cm. Ceci est à mettre en relation avec le Koc de l'AMPA et du glyphosate (Tableau 3). De façon concordante avec ce qui a été observé au niveau des préleveurs, sur mai, à J+1 après irrigation, il est observé des concentrations de 2 ordres de grandeur plus importants dans les sols du tronçon traité que dans les sols de la parcelle, montrant ainsi qu'une partie du glyphosate épandu est immobilisé dans les horizons de surface du canal (ou sur les autres constituants telles que la litière), rapidement après épandage.

Le détail des valeurs mesurées est disponible en Annexe 5.

2.3 Discussion

Eaux de percolation et risque de contamination des eaux souterraines

De nombreux auteurs soulignent que le glyphosate et l'AMPA sont rarement détectés à des concentrations importantes dans les eaux souterraines (Battaglin et al., 2014; Poiger et al., 2017). Les

différentes mesures réalisées par le SYMCRAU sur les différents points de relevés (SYMCRAU, 2016) et observés dans la base de données ADES vont également dans ce sens. Même si les résultats de cette expérimentation montrent que les concentrations en glyphosate peuvent être ponctuellement importantes dans les eaux qui percolent dans le sol (50 µg/L observé ponctuellement dans le préleveur du canal de la parcelle 1h), il faut mettre cela en perspective avec le fait que les traitements ne sont réalisés que 1 à 3 fois par saison (voir 2^{ème} expérimentation), que les concentrations diminuent lors des irrigations suivantes, et que l'importante quantité d'eau transitant par ces systèmes permet probablement de diluer, au niveau de la nappe, des concentrations ponctuellement élevées. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent une différence (d'un ordre de grandeur) entre les concentrations mesurées en glyphosate au niveau des préleveurs canaux au niveau de la 1h et de la 2cd. Il est possible de supposer que le fort taux de galets, de sables grossiers, et la forte teneur en phosphate observée dans le canal 1h (Tableaux 1 et 2), puissent expliquer sa moindre capacité à immobiliser le glyphosate, bien que ceci reste à confirmer (nb : concernant l'influence du phosphate, celle-ci est hautement spéculative et difficile à prédire, voir Padilla & Selim, 2019).

Eaux de surface transitant dans les canaux

Cette expérimentation, menée de façon très localisée, a permis d'observer que les concentrations en glyphosate dans les eaux de surface après la première irrigation suivant application, peuvent atteindre des concentrations maximales de 445 µg/L et 680 µg/L, pour seulement 12 m de canaux traités (attention il s'agit de concentrations maximales qui diminuent rapidement une fois que le régime permanent est atteint). Cependant ces valeurs observées sont susceptibles d'être très variables selon les pratiques de l'exploitant. En effet, d'un côté, le fait que seulement 12 m de canaux aient été traités (longueur faible) laisse penser qu'il est possible d'observer des concentrations plus importantes sur d'autres exploitations ou configurations. Cependant, irriguer 24h après le traitement dans le cadre de cette expérimentation est la configuration la plus défavorable. Dans les faits, sans être impossible, cette situation devrait être exceptionnelle, car il est logique d'attendre plusieurs jours pour mettre un canal en eau après un traitement herbicide.

Dans tous les cas, les eaux transitant dans les canaux, de un à quelques jours après traitement, sont susceptibles d'exposer des organismes vivants (êtres humains mais aussi faune sauvage, animaux d'élevage ou domestiques susceptibles de s'abreuver directement dans les canaux), à la molécule de glyphosate (et dans une moindre mesure à l'AMPA). Par mesure de précaution, il faut donc limiter l'accès des animaux d'élevage aux canaux et parcelles venant d'être traités pendant une dizaine de jours, et lors de la première irrigation après traitement, afin de limiter des risques de transfert dans la chaîne alimentaire. Cette éventualité de contact avec les animaux d'élevage est toutefois peu susceptible de se produire car les animaux d'élevage ne sont généralement pas sur les exploitations aux périodes des traitements.

Sols

La prédominance de l'AMPA dans les sols (en termes de fréquence et de concentration) concorde avec des analyses réalisées en 2015 sur des parcelles agricoles à l'échelle de l'Europe (Silva et al. 2018). Les valeurs trouvées dans cette expérience se situent également dans la fourchette de valeurs observées pour les cultures fourragères à l'échelle de l'Europe (valeurs mesurées généralement inférieures à 0.25 mg/kg dans Silva et al. 2018), à part pour une valeur 3j après traitement de 0.65 mg/kg. Ces stocks dans les sols diminuent rapidement après traitement (deux mois après la première irrigation, et donc suite à plusieurs irrigations, les stocks ont diminué d'un ou deux ordres de grandeur à la fois dans le canal et dans la parcelle, et par ailleurs, l'eau qui percole est également peu contaminée 1 mois après le traitement). Les sols ne paraissent donc pas jouer un rôle important de relargage de glyphosate plusieurs semaines après traitement. Par ailleurs, le rapport AMPA/glyphosate dans le sol, 3 jours après traitement, laisserait supposer que des phénomènes de dégradation se mettent en place rapidement dans les sols (a priori les conditions sont favorables en système de prairie irriguée de Crau puisque la chaleur et l'humidité accélèrent la dégradation du glyphosate, voir Bento et al. 2016).

Export de la molécule hors de la zone de traitement par transferts de surface

Dans le cadre de cette expérimentation, il a été observé un export modéré de la molécule de glyphosate et de son métabolite l'AMPA, en dehors de la zone de traitement. En effet, quelle que soit la date, les sols au niveau des parcelles, à 6m du canal, sont faiblement contaminés. Par ailleurs, les préleveurs d'eau gravitaire dans les parcelles ont enregistré pour le 10 mai (J+1 après expérimentation), une concentration maximale de 0,06 µg/L, ce qui reste relativement faible (alors que la concentration maximale en préleveur sous tronçon traité est de 50 µg/L). Au niveau des eaux ruisselant sur la parcelle,

un maximum de 20 µg/L a été enregistré J+1 après traitement à 6m du tronçon traité, et des concentrations inférieures ou égales à 2 µg/L sur les autres mesures.

Par ailleurs, il est reporté dans Yang et al. (2015) que le transport de glyphosate et d'AMPA sous forme particulaire pouvait être significatif dans certains écosystèmes (dans son expérience, 4-5% exporté sous forme dissoute et 8-11% sous forme particulaire après épandage). Cependant, il est à noter que les conditions hydrodynamiques de surface dans les parcelles de foin de Crau (faible vitesse de l'écoulement, faible hauteur d'eau, résistance à l'écoulement élevée du fait de la densité de végétation) sont assez favorables à la sédimentation et la rétention physique des particules au niveau des premiers mètres de la parcelle. L'export hors du tronçon traité et son transport sur de longues distances dans la parcelle sous cette forme particulaire est donc assez peu probable.

2.4 Conclusion et recommandations

En conclusion, du point de vue sanitaire, nous avons observé que les canaux pouvaient transporter ponctuellement des eaux avec des concentrations maximales de 680 µg/L en surface et nous avons observé un maximum de 50 µg/L dans les eaux à 50 cm sous le sol au niveau des canaux. Dans le cas de captages privés situés à proximité des sections de canal traitées, des contaminations ponctuelles ne pourraient être exclues, bien que l'étude n'ait pas étudié ce cas en particulier et n'apporte aucun élément quantitatif de caractérisation de ce risque. En deuxième lieu, il convient de souligner que la première irrigation après traitement pourrait exposer un certain nombre d'organismes (notamment les animaux d'élevage, sauvages et domestiques), à de l'eau contaminée avec du glyphosate.

Cependant, les mesures de qualité des eaux souterraines paraissent actuellement rassurantes concernant le glyphosate et l'AMPA, selon la base de données de l'ADES. Les raisons qui peuvent être mises en lumière sont les suivantes. En premier lieu, il est important de rappeler que les volumes importants infiltrés au niveau des canaux et des parcelles (cf Action B) impliquent une dilution probablement significative de la contamination au niveau des nappes. En deuxième lieu, les propriétés physico-chimiques du glyphosate et de l'AMPA (notamment leur coefficient de partage carbone organique/eau K_{oc}), les phénomènes de dégradation qui sont susceptibles de se dérouler au niveau de la zone non-saturée du sol en raison des conditions climatiques (cf Bento et al. 2016), ainsi que la baisse rapide observée des concentrations au cours de l'irrigation laissent penser que les périodes de contamination les plus importantes sont limitées dans le temps après le désherbage.

Les recommandations suivantes peuvent être émises :

- Limiter le désherbage des filioles, qui de toute manière sont amenées à déborder pour irriguer les parcelles et se concentrer sur les réseaux primaires et secondaires. Lorsque c'est la perte de capacité de transport hydraulique qui justifie le traitement, envisager un sur-dimensionnement des canaux pourrait permettre d'espacer les besoins d'intervention, avec toutefois le risque d'augmenter les infiltrations et donc la perte de débit entre l'amont et l'aval (selon la capacité d'infiltration des canaux) et l'augmentation des temps de transfert à la mise en eau.
- Maximiser le temps entre le traitement chimique et l'irrigation qui suit : comme les irrigations sont généralement espacées d'une dizaine de jours pendant la haute saison, ceci suppose que le traitement chimique se fasse très rapidement après une irrigation, une fois le ressuyage observé (il n'est pas favorable de traiter lorsqu'une lame d'eau est encore observable en fond de canal). Ceci permet que les processus d'immobilisation et de dégradation du glyphosate dans les sols et sur le matériel de fond de canal (litière) se mettent en place, limitant ainsi les transferts vers les eaux de surface et souterraines.
- Eviter le traitement simultané de longs linéaires reliés entre eux pour éviter un effet d'accumulation de la substance active en bout de linéaire.
- Eviter l'abreuvement/pâturage des animaux d'élevage dans des zones traitées pendant une dizaine de jours, afin de limiter la contamination de la chaîne alimentaire, et limiter le contact entre l'eau des canaux et les animaux domestiques pendant cette période,

Il peut être envisagé d'inclure ces pratiques de gestion des canaux dans les cahiers des charges des PSE. Certaines sont déjà couramment mises en pratique (comme la prise en considération des risques sanitaires et l'espacement des durées entre irrigation et traitement), d'autres peuvent être difficilement applicables dans certains contextes.

3.1 Matériel et Méthodes

3.1.1 Choix des agriculteurs enquêtés et prises de contact

Le choix des agriculteurs contactés a été raisonné en fonction de la surface des exploitations et de la typologie de leurs cultures, de manière à sélectionner un échantillon représentatif des exploitations en culture de foin de Crau. Afin de réaliser cette sélection, le choix a été fait de se baser sur la classification des différents systèmes de production réalisés par Ibgui (2021) dans le cadre du diagnostic agraire mené sur la Crau.

De la même manière que dans Turquet (2022), les exploitations à enquêter ont ensuite été sélectionnées sur la base de leur positionnement géographique dans la plaine de la Crau. A l'intérieur des différentes classes, la sélection s'est réalisée de manière aléatoire de manière à constituer un échantillon aléatoire stratifié.

3.1.2 Questionnaire

Le questionnaire développé dans le cadre de cette enquête est de type semi-directif. Celui-ci vise en premier lieu à caractériser la conduite de l'exploitation en lien avec la stratégie de limitation de propagation des adventices à la parcelle et la gestion de l'enherbement dans les réseaux d'irrigation. En deuxième lieu, il vise à identifier les pratiques, les préoccupations et les attentes de l'exploitant vis-à-vis de la gestion des adventices et des canaux. Le questionnaire développé est disponible en Annexe 4. Celui-ci débute par une phase de présentation de l'exploitation, de son contexte, des principaux projets et défis de l'exploitant, visant à obtenir des informations sur le type d'exploitation et son système de production, à mettre en lien avec les pratiques. La deuxième étape concerne la perception de l'exploitant concernant sa vision de la pression par les adventices et de son évolution au cours des dernières années, ses modes de gestion des adventices à la parcelle, ainsi que les pratiques et les moyens alloués à la gestion des canaux. Le questionnaire se termine par des questions visant à mettre en exergue les besoins des agriculteurs, en termes d'animation, autour de ces questions. Huit agriculteurs ont pu être enquêtés dans ce cadre, après une phase-test au domaine du Merle.

L'exploitation des résultats respecte l'anonymat des participants.

3.1.3 Prise de contact

Les enquêtés ont d'abord été contactés par téléphone, et des rendez-vous ont été pris pour réaliser les enquêtes de visu. Dans certains cas (covid, impossibilité de se déplacer, ...), les enquêtes ont été réalisées par visioconférence. Toutes les personnes contactées n'ont pas forcément été interrogées. Quand une personne n'a pu être interrogée, celle-ci est ensuite remplacée par un représentant d'une exploitation de la même catégorie (voir classification Ibgui, 2021). Une enquête auprès d'un exploitant dure entre 1h30 et 2h.

Les enquêtes se sont déroulées à partir de novembre jusque février. Cette période de l'année a été sélectionnée puisqu'elle correspondait à la période de creux pour le travail de l'exploitation.

3.1.4. Questionnaire électronique

Un questionnaire électronique (Annexe 5), reprenant une partie des questions du questionnaire développé précédemment, a, en complément été envoyé à 80 agriculteurs. 14 agriculteurs ont répondu à ce questionnaire.

3.2 Résultats

3.2.1 Typologie d'exploitation

La taille des exploitation enquêtées varie essentiellement entre 9,5 et 200ha (SAU moyenne de 132 ha), avec un cas supplémentaire d'une grosse exploitation ayant près de 1000 ha (Figure 16). Le pourcentage de l'exploitation en culture de foin de Crau irriguée va de moins de 10% à 100% et représente en moyenne 63 ha pour les exploitations enquêtées. En plus des prairies irriguées en foin de Crau, les exploitations enquêtées disposent de coussouls, de parcelles en arboriculture, et de cultures céréalières.

Certaines exploitations possèdent du bétail (ovins en particulier, mais également bovins), ou un élevage équin. Six agriculteurs enquêtés sont en Agriculture Biologique sur au moins une partie de l'exploitation. Deux de ces exploitants disposent d'un label supplémentaire type HVE ou Bleu Blanc Cœur. Les longueurs de linéaires avancées par les agriculteurs (canaux d'irrigation et fossés de colature) sont variables, de seulement 0,3 km à 24 km de canaux (Figure 17), ce qui correspond à une densité de 37 m par hectare sur les exploitations enquêtées (sur la SAU totale). Notons que 6 exploitants sur les 22 enquêtés n'avaient pas d'estimation de la longueur de linéaires présents sur leur exploitation. La quasi-totalité des exploitants enquêtés possèdent des canaux non-revêtus. L'ETP (Equivalent Temps Plein) annuel est compris entre 1,5 et 2,5. Certainement en lien avec le contexte climatique de l'été 2022, les restrictions d'eau sont considérées par tous les agriculteurs comme le défi majeur de l'exploitation à court-terme. Le deuxième défi le plus cité par les agriculteurs est l'augmentation des charges (électricité, engrais, coût du matériel), par rapport à un chiffre d'affaires qui n'évolue pas.

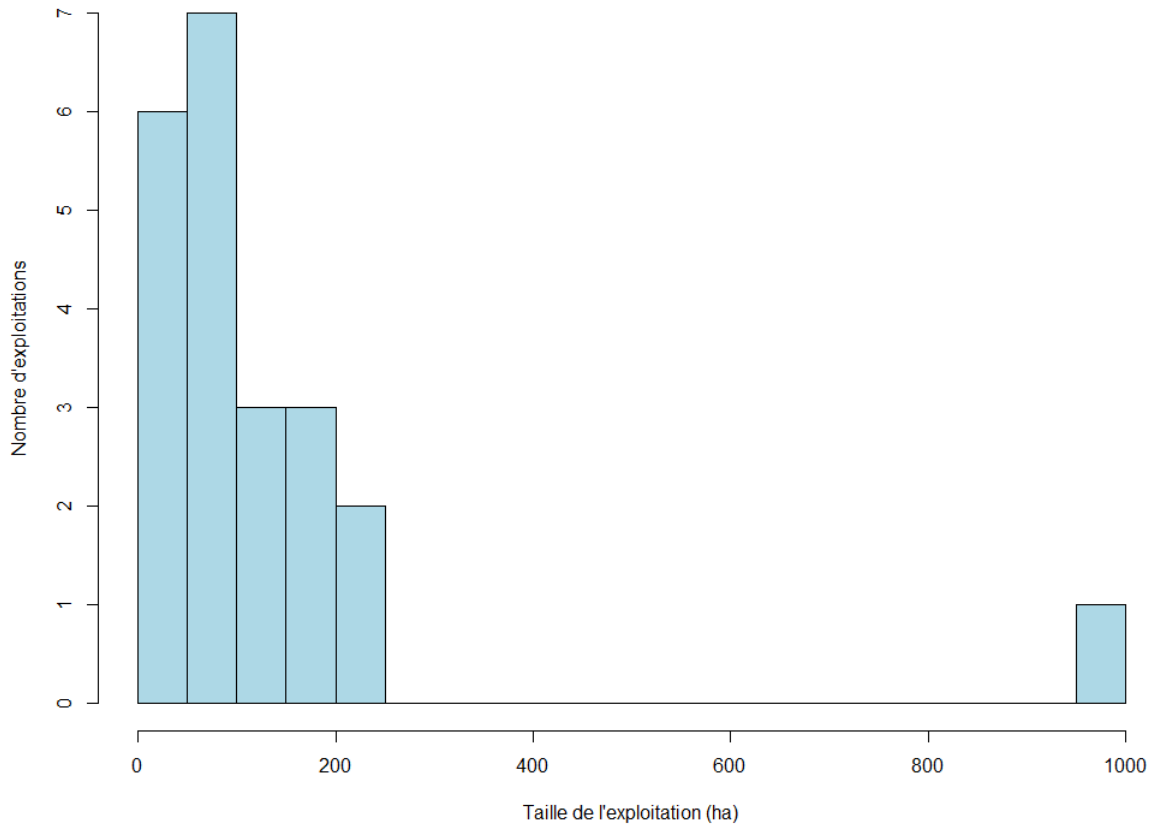


Figure 16 : Répartition des tailles d'exploitation enquêtées

Répartition de la longueur des canaux

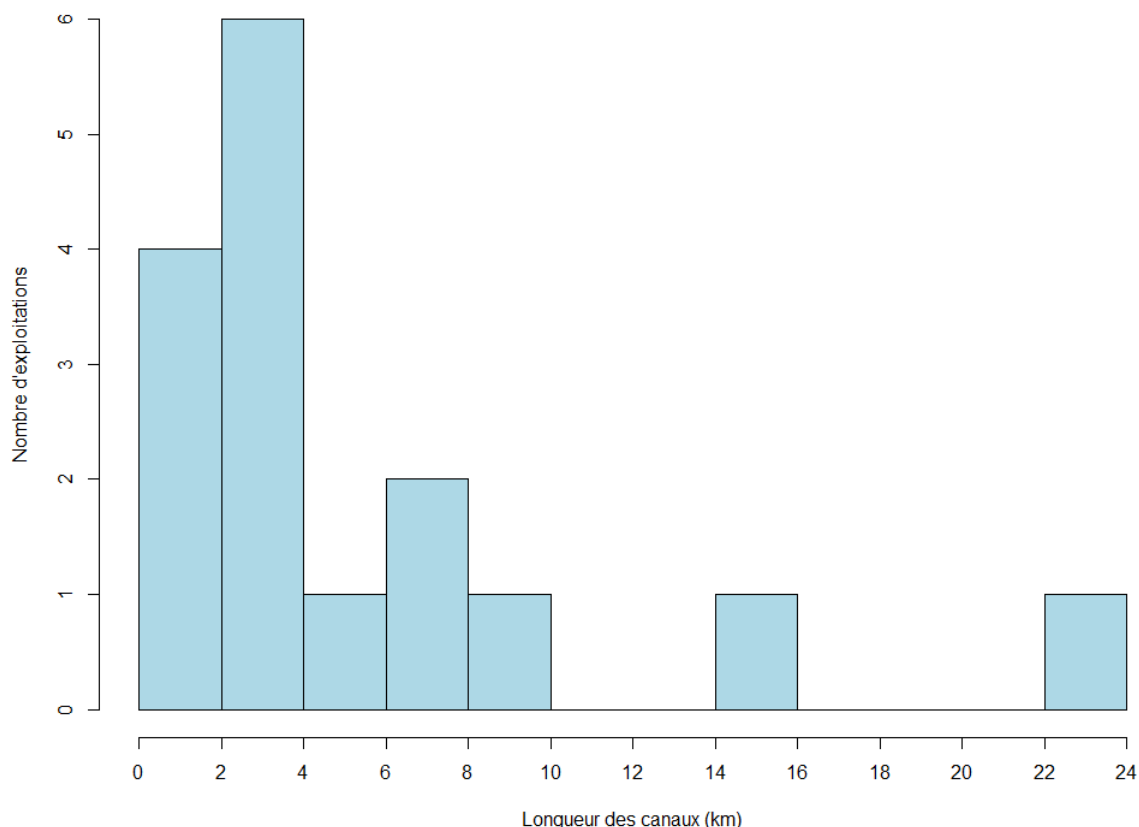


Figure 17 : Longueur des linéaires (canaux d'irrigation, fossés de colature) dans les exploitations enquêtées

3.2.2 Gestion des adventices à la parcelle

Les espèces adventices les plus citées comme étant contraignantes pour l'obtention de foin de qualité (conservation de l'AOP) sont (dans l'ordre des plus citées) : le sorgho d'Alep (*Sorghum halepense*), le rumex (*Rumex sp.*), le millet bâtard (*Paspalum dilatatum*) et la sétaire verte (*Setaria viridis*). (Tableau 8). Leur présence est la plus difficile après la seconde coupe (fin juillet/août).

Espèces citées	Nombre de citations par les exploitants
Sorgho d'Alep - <i>Sorghum halepense</i>	20
Rumex - <i>Rumex sp.</i>	16
Millet bâtard - <i>Paspalum dilatatum</i>	13
Sétaire verte - <i>Setaria viridis</i>	13
Carotte sauvage - <i>Daucus carota</i>	8
Panisse américaine (<i>Setaria italica</i> ou <i>Echinochloa crus-galli</i> ?)	7
Sauge des prés – <i>Salvia pratensis</i>	6
Chiendent – <i>Elymus sp.</i>	1
<i>Juncus subnodulosus</i> Schrank	1
Moutarde des champs - <i>Sinapis arvensis</i>	1
« Petite mioque » ?	1
« Céleri » ?	1

Tableau 7 : Espèces citées en tant qu'adventices du foin de Crau par les agriculteurs, et nombre de fois où celles-ci ont été citées (par ordre décroissant)

Selon les agriculteurs enquêtés, les dynamiques des adventices ont évolué au cours des 20 dernières années. Deux d'entre eux attribuent cela au changement climatique, avec notamment une température plus importante au printemps, interprétée comme favorisant le développement précoce du sorgho d'Alep (présent à la première coupe, alors qu'il y était historiquement absent). La sécheresse dégradant également l'état de la prairie au cours de l'été, les agriculteurs observent une recrudescence d'adventices "opportunistes", favorisées par le manque de compétition avec les espèces constitutives du foin. Deux

agriculteurs observent que le nivellement des parcelles paraît également favorable à l'installation de communautés d'adventices telles que le sorgho d'Alep. Les bords de route (fossés notamment) semblent impliqués dans la propagation des adventices, d'après la majorité des agriculteurs qui ont répondu à cette question, notamment ceux gérés par les collectivités et les ASA, moins fréquemment entretenus que les canaux situés sur les exploitations (les plantes ont donc la capacité de monter en graines). Sept agriculteurs sur 8 (ayant répondu à cette question) considèrent que du matériel végétal est susceptible d'être transporté dans leurs canaux (graines, morceaux de rhizomes), puis de servir la colonisation de leurs parcelles.

Les moyens pour traiter les adventices à la parcelle sont le désherbage mécanique seulement pour 9 agriculteurs, le désherbage chimique seulement pour 5 agriculteurs, et une combinaison des deux pour 5 agriculteurs. Parmi les exploitations qui utilisent seulement le désherbage mécanique, on retrouve logiquement les exploitations en Agriculture Biologique, mais pas seulement. On trouve également une décroissance du pourcentage d'agriculteurs réalisant uniquement un désherbage de type mécanique lorsque la surface de prairies irriguées augmente (Figure 18). Parmi les exploitants du groupe « Désherbage mécanique » seulement, 5 d'entre eux ont évoqué la fauche précoce comme technique de lutte contre les adventices. Cela a été évoqué 2 fois dans le groupe mixte « Désherbage chimique/Désherbage mécanique ». Le nivellement, si correctement réalisé, a également été évoqué 7 fois comme un facteur pouvant limiter le développement des adventices (ce qui peut paraître en contradiction avec ce qui a été avancé plus haut, mais ce ne sont pas les mêmes interrogés).

Les agriculteurs enquêtés considèrent la gestion des adventices à la parcelle comme une tâche « complexe ou très complexe » (Figure 19), mais le temps passé sur cette tâche est très hétérogène à l'échelle de la population d'exploitants enquêtés. La tâche est considérée comme peu coûteuse à coûteuse (Figure 19). Dans la grande majorité des cas (7 agriculteurs sur 8 ayant répondu à cette question), les agriculteurs réalisent généralement les interventions par eux-mêmes. Le traitement chimique ou mécanique est réalisé "par tache", majoritairement en juillet-août-septembre. Deux des agriculteurs ont cité le glyphosate pour réaliser ce traitement, et les produits à base de fluazifop-P-butyl ont également été mentionnés, mais généralement sans information sur la formulation utilisée. Les doses appliquées sont difficiles à obtenir car les agriculteurs connaissent les dilutions qu'ils réalisent pour le produit, mais ne communiquent pas la concentration de leur produit, ni la dose de solution réellement appliquée sur leurs parcelles pour la gestion des adventices (souvent parce que ce sont des informations qu'ils ne connaissent pas par cœur, contrairement aux autres éléments demandés). Sur l'ensemble de l'exploitation, les agriculteurs considèrent que le coût de ce traitement chimique est faible (entre 250 et 500 €/par an). Un agriculteur enquêté considère qu'une bonne gestion de la parcelle limite la propagation d'adventices, mais avance des difficultés à trouver de l'information sur une gestion appropriée pour limiter ce risque.

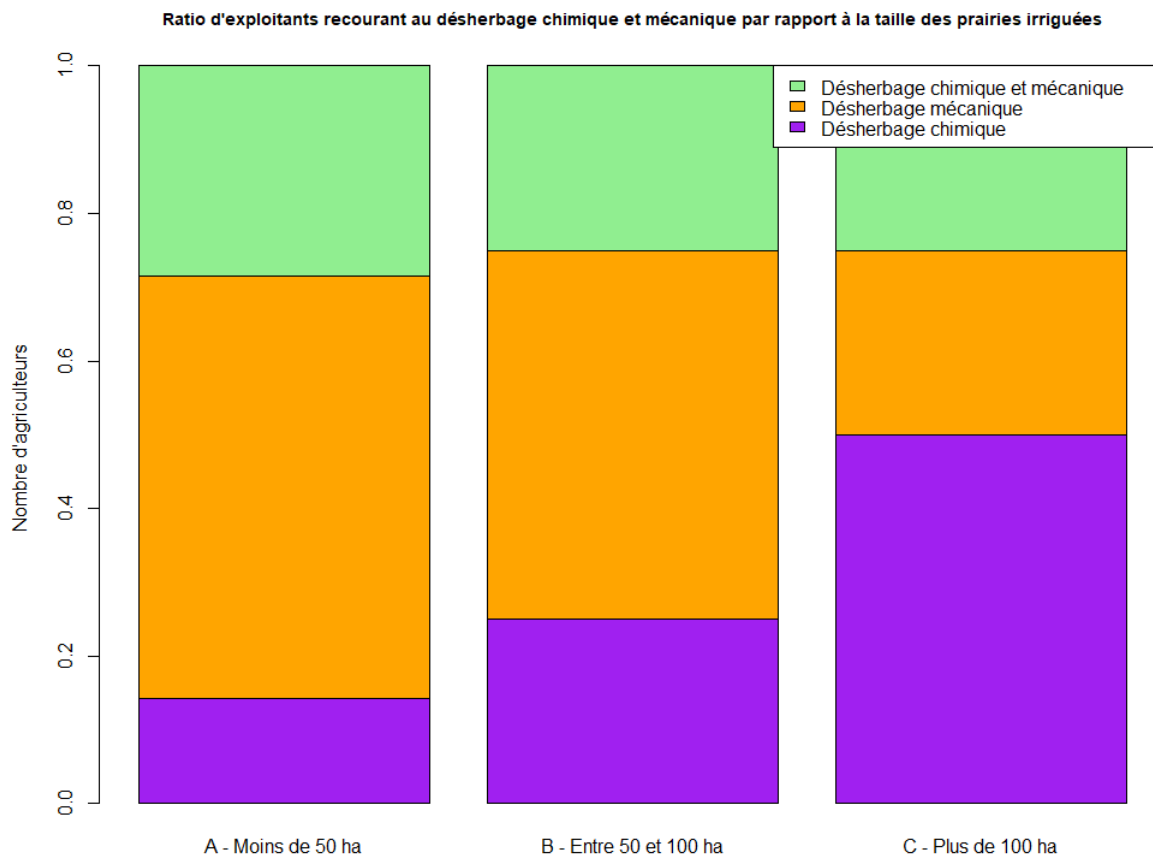


Figure 18 : Ratio d'exploitations réalisant du désherbage chimique, mécanique ou une combinaison des deux à la parcelle en fonction de la surface de prairies irriguées

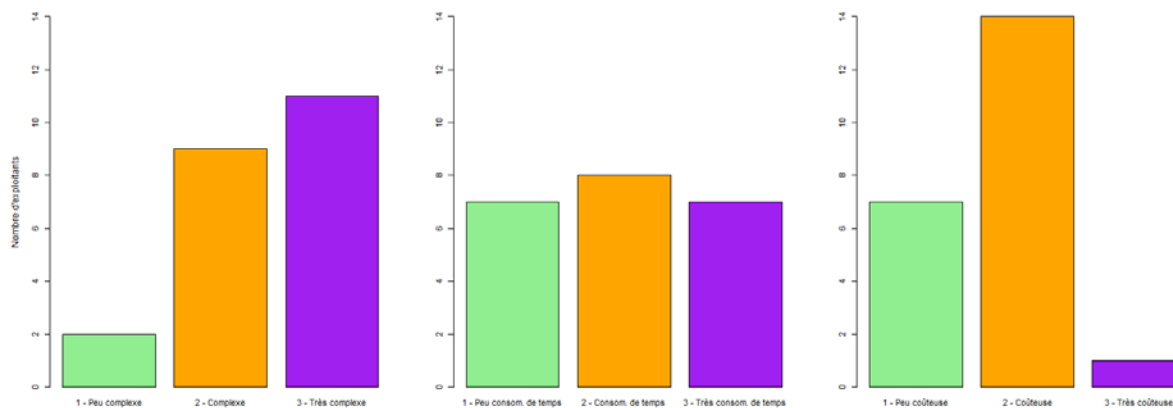


Figure 19 : Perception des agriculteurs concernant la gestion des adventices à la parcelle (Nb : Une tâche peu consommatrice de temps a été évaluée entre 0 et 3 jours pour 1 ETP, consommatrice de temps entre 3 et 10 jours pour 1 ETP et très consommatrice de temps plus de 10 jours pour 1 ETP.)

Le pâturage de mi-octobre à début mars est considéré par cinq des agriculteurs (sur 8 ayant répondu à cette question) comme bénéfique dans la lutte contre les adventices, sauf en cas de surpâturage. Deux autres le considèrent comme un désavantage et un dernier ne se prononce pas. Les brebis semblent consommer la plupart des adventices sauf *Paspalum dilatatum*, même si les espèces prairiales sont consommées en premier lieu. Un des agriculteurs relève le fait que les animaux ne consomment pas en priorité les adventices et qu'il peut en résulter un avantage compétitif pour les adventices. Quatre des agriculteurs insistent sur le fait que le pâturage doit être bien conduit.

Les agriculteurs avancent que la main d'œuvre, les exigences liées à l'AOP et le matériel sont leurs principaux obstacles pour la gestion des adventices (Figure 20), et deux d'entre eux considèrent qu'il n'y a pas aujourd'hui d'alternative viable au traitement herbicide en raison de son faible coût, de la rapidité de sa réalisation et de son action dans le temps (repousse 2 fois moins rapide qu'en cas de gestion mécanique), et enfin en raison du confort relatif que le traitement herbicide procure au regard de la pénibilité d'un entretien mécanique (débroussailluse) notamment lors des périodes chaudes.

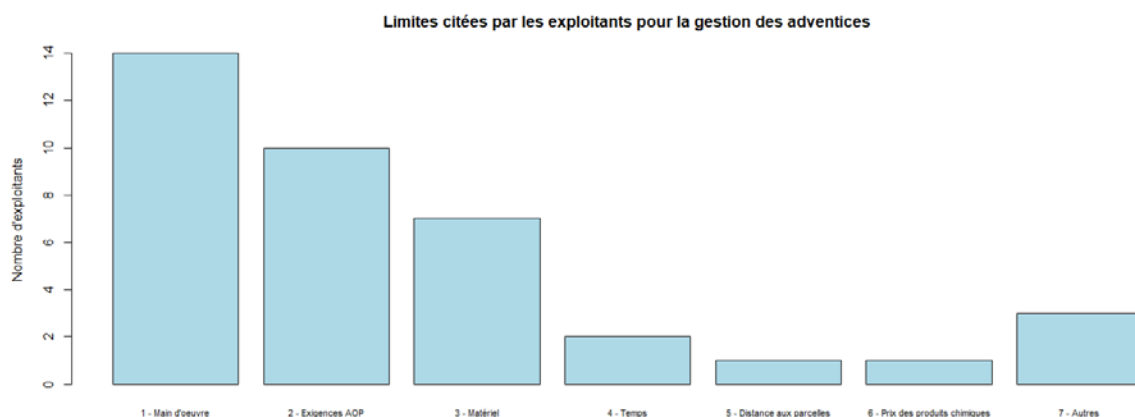


Figure 20: Limites citées par les agriculteurs dans la gestion des adventices

3.2.3 Gestion de l'enherbement des canaux

La plupart des agriculteurs enquêtés entretiennent leurs canaux soit de manière mécanique seulement, soit à la fois de manière mécanique et chimique (Figure 21). Concernant l'entretien mécanique, il est réalisé en hiver avec généralement une épareuse et une pelle mécanique. Un seul des agriculteurs enquêtés a indiqué faire appel à un prestataire extérieur pour cette gestion mécanique (environ 3 k€). Le désherbage chimique est réalisé par l'agriculteur lui-même, généralement avec du glyphosate. Avril, juin et juillet sont les mois qui ont été cités pour le traitement, avec une fréquence comprise entre 1 fois et 3 fois par an. Majoritairement le fond de canal est traité, les bords en second lieu. Les volumes utilisés varient entre 1,5 et 5,5 L/km de canaux (cohérent avec Alberdi et al., 2015).

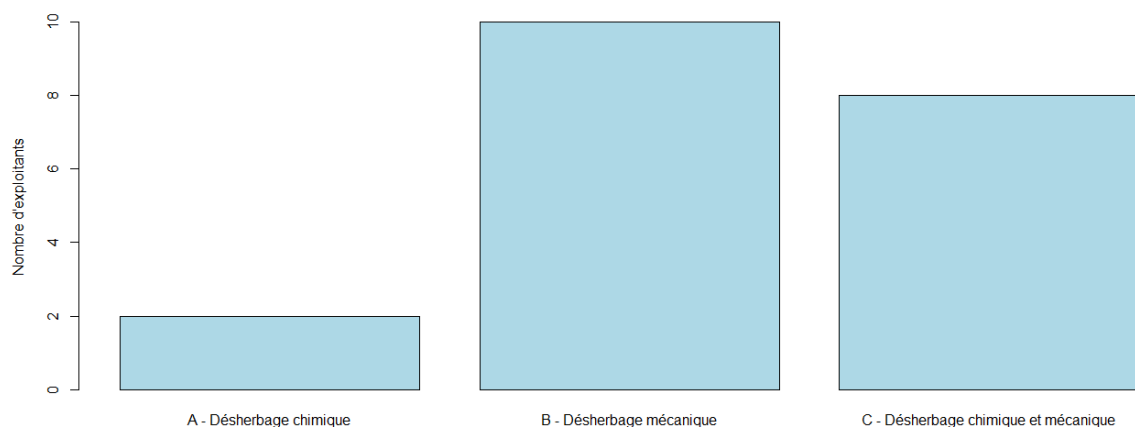


Figure 21 : Nombre d'exploitants déclarant entretenir ses canaux (i) soit de manière chimique seulement (ii) soit de manière mécanique (iii) soit de manière chimique et mécanique

Les agriculteurs traitent chimiquement les canaux pour soit (i) restaurer la capacité hydraulique (ii) restaurer la capacité hydraulique ET limiter la propagation d'adventices. Aucun des agriculteurs ne juge favorable de laisser de l'enherbement dans les canaux : en effet, la priorité est mise sur les débits parvenant aux parcelles, celui-ci peut être assez faible pour les parcelles en bout de réseau. La tâche est considérée comme de peu complexe à complexe. Elle est peu consommatrice de temps pour le traitement

chimique (0-3j par an) et considérée comme très consommatrice de temps pour le désherbage mécanique (plus de 10 jours). Un agriculteur affirme utiliser du matériel en commun pour l'entretien de ses canaux. Selon les agriculteurs enquêtés, il n'y a pas d'autre traitement phytosanitaire sur leurs parcelles de foin de Crau, autres que ceux déjà mentionnés (gestion des adventices à la parcelle, et gestion de l'enherbement des canaux).

3.2.4 Mesures et pratiques visant à la limitation de l'utilisation de produits phytosanitaires

Tous les agriculteurs enquêtés considèrent qu'ils ont bien été incités ces dernières années à la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires. Les PSE (Paiements pour Services Environnementaux) ont été cités 2 fois, et les MAEC (Mesures AgroEnvironnementales et Climatiques) 1 fois. Une disparition totale de l'utilisation des herbicides en culture de foin de Crau se traduirait, selon 2 agriculteurs sur 3, par une perte de résultat d'exploitation (Figure 22).

Tous les agriculteurs enquêtés disent être en relation avec leurs voisins ou d'autres agriculteurs de la zone, et évoquer avec eux la question de la gestion des adventices. Les agriculteurs enquêtés seraient intéressés pour échanger de façon plus approfondie sur la gestion des adventices, et ont évoqué des visites de salons, de l'information sur de nouvelles machines de désherbage mécanique, des échanges avec des scientifiques et des instituts techniques, des organisations plus formelles d'échanges entre exploitants pour échanger les bonnes pratiques sur ce sujet. Tous se disent intéressés pour participer éventuellement à une journée technique sur le sujet.

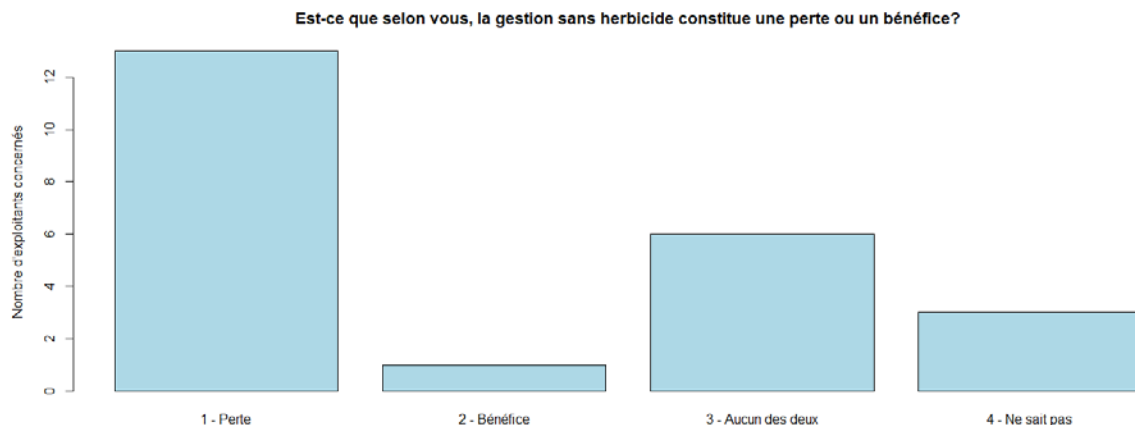


Figure 22 : Gestion sans herbicides et bénéfices/pertes financières

3.3 Conclusion

Les agriculteurs enquêtés utilisent des produits phytosanitaires en foin de Crau (i) à la parcelle pour limiter la propagation d'adventices susceptibles de déclasser le foin de Crau (ii) dans les canaux d'irrigation pour restaurer la capacité hydraulique et s'assurer que des débits suffisants parviennent à leurs calans pour l'irrigation. La pratique d'entretien des canaux est considérée comme peu complexe et fait généralement intervenir 1 à 2 interventions mécaniques au cours de l'hiver, et 1 à 3 interventions chimiques au cours de l'été. La gestion des adventices à la parcelle est considérée comme une tâche complexe, voire très complexe, source d'inquiétudes pour les agriculteurs. En effet, des recrudescences ont été observées ces dernières années, avec la colonisation totale de certaines parcelles par des adventices. Les exploitants mettent cette évolution des dynamiques des adventices en lien avec le changement climatique (chaleurs printanières plus précoces notamment), la modification des modes de gestion des fossés de bord de route et la gestion des pâturages.

Concernant les interventions chimiques, quand celles-ci sont favorisées par rapport aux autres pratiques, elles le sont en raison de leur efficacité et de leur faible coût.

Tous les agriculteurs enquêtés semblent avoir conscience des enjeux liés à la réduction de l'utilisation d'herbicides en foin de Crau, et des impacts potentiels de leurs modes de gestion sur la qualité de l'eau. Cependant, la plupart des agriculteurs (même ceux impliqués dans des démarches agroécologiques) affirment ne pas avoir connaissance d'alternatives viables aux herbicides dans la culture de foin de Crau, et affirment que la disparition des herbicides en foin de Crau se traduirait par une perte de résultat d'exploitation. Les exploitants sont intéressés par la formalisation d'échanges au tour de la gestion des adventices dans le cadre de la culture de foin de Crau, au-delà des échanges informels entre exploitants.

En termes de recommandations, à l'échelle locale, continuer l'animation autour des alternatives à la gestion sans herbicides, à la fois dans les canaux et les parcelles, constitue un levier pour maintenir ou réduire les traitements sur ce type de culture, même en contexte de changements climatiques et de mutation dans les exploitations, par exemple sous la forme de journées techniques. Les leviers financiers d'incitation à la gestion mécanique, quelle qu'en soit la forme, paraissent également favorables puisqu'elles peuvent permettre aux exploitants de faire éventuellement appel à des prestataires extérieurs pour réaliser certains des travaux. Enfin, la recherche et son transfert sur les dynamiques d'émergence des adventices et les moyens de lutte paraissent à moyen et long-terme fondamentales pour assurer une dynamique de coopération sur la zone d'études autour de ces questions.

4 CONCLUSION GENERALE ET LIMITES

4.1 Conclusion générale

Le désherbage chimique de deux canaux d'irrigation au glyphosate dans le cadre de cette expérimentation a engendré ponctuellement des concentrations maximales de 680 µg/L et 445 µg/L dans l'eau de surface lors de leur mise en eau à J+1 après traitement. Deux heures après le début de l'irrigation, les concentrations ont diminué d'un ou deux ordres de grandeur selon le canal. Au niveau des tronçons traités, un transport d'eau contaminée vers des préleveurs enterrés à 50 cm dans le sol, a été observé avec pour l'un des canaux une concentration maximale de 50,5 µg/L de glyphosate et 2,3 µg/L d'AMPA, et le deuxième canal un maximum de 3,9 µg/L de glyphosate et 5,2 µg/L d'AMPA. Au niveau des parcelles, la concentration maximale observée dans les flux infiltrés à 50 cm de profondeur était de 0,06 µg/L. Des prélèvements ont également été réalisés sur la lame d'eau de surface ayant ruisselé sur la parcelle, à 6 m du canal, et la concentration maximale observée était de 20 µg/L. A 60 m du canal, la concentration maximale observée était de 2,0 µg/L de glyphosate. Dans cette étude, les flux les plus contaminés sont localisés au niveau des tronçons traités, et la qualité de l'eau s'infiltrant au niveau des parcelles est de meilleure qualité. La contamination de l'eau diminue lors des irrigations ultérieures. La teneur en AMPA observée dans les sols des canaux s'élève à 0,65 mg/kg et 0,22 mg/kg deux jours après le traitement. Elle diminue de deux ordres de grandeur dans les 2 mois suivant le désherbage.

Ainsi, nous avons observé qu'à J+1 après traitement, les canaux pouvaient transporter ponctuellement des eaux avec des concentrations maximales supérieures de plusieurs ordres de grandeur à la concentration médiane lors de cette même irrigation. Ces pics de concentration sont plus atténués dans les eaux à 50 cm sous le sol au niveau des canaux. Du point de vue sanitaire, cela implique d'éviter une exposition au moment de la mise en eau. Dans le cas de captages privés situés à proximité des sections de canal traitées, des contaminations ponctuelles ne pourraient être exclues, bien que l'étude n'ait pas étudié ce cas en particulier. En deuxième lieu, il convient de souligner que la première irrigation après traitement peut exposer un certain nombre d'organismes vivants à la molécule de glyphosate via l'eau d'irrigation qui transite dans les canaux de surface pendant un temps limité.

Cependant, les mesures de qualité des eaux souterraines paraissent actuellement rassurantes concernant le glyphosate et l'AMPA, selon la base de données de l'ADES et les mesures du SYMCRAU. Les raisons qui peuvent être mises en lumière sont les suivantes. En premier lieu, il est important de rappeler que les volumes importants infiltrés au niveau des canaux et des parcelles (cf Action B) impliquent une dilution probablement significative de la contamination au niveau des nappes. En deuxième lieu, les propriétés physico-chimiques du glyphosate et de l'AMPA et les phénomènes d'immobilisation/dégradation qui se déroulent au niveau de la zone non-saturée du sol, ainsi que la baisse rapide observée des concentrations au cours de l'irrigation laissent penser que les périodes de contamination sont limitées dans le temps après le désherbage.

Par rapport aux pratiques des agriculteurs concernant la gestion de l'enherbement dans les canaux d'irrigation, 10 des 20 agriculteurs de l'échantillon enquêté entretiennent les canaux seulement mécaniquement, 8 agriculteurs sur 20 entretiennent les canaux à la fois mécaniquement et

chimiquement, et 2 entretiennent seulement chimiquement les canaux. Les agriculteurs peuvent traiter chimiquement les canaux pour soit (i) restaurer la capacité hydraulique (ii) restaurer la capacité hydraulique ET limiter la propagation d'adventices. Aucun des agriculteurs ne juge favorable de laisser de l'enherbement dans les canaux. En effet, la priorité est mise sur les débits parvenant aux parcelles : d'une part, la forte densité de végétation est favorable à l'infiltration qui induit une perte de débit disponible ; d'autre part, la capacité de transport hydraulique peut être réduite fortement (jusqu'à des facteurs 2 ou 3). Le désherbage chimique est réalisé par l'agriculteur lui-même, généralement avec du glyphosate. Avril, juin et juillet sont les mois qui ont été cités pour le traitement. Majoritairement le fond de canal est traité, les bords en second lieu. Dans les parcelles, la gestion des adventices est considérée comme une tâche complexe, voire très complexe, source d'inquiétudes pour les agriculteurs. En effet, des recrudescences ont été observées ces dernières années, avec la colonisation totale de certaines parcelles par des adventices. Les exploitants mettent cette évolution des dynamiques des adventices en lien avec le changement climatique, la modification des modes de gestion des fossés de bord de route et le mode de gestion du pâturage.

Cette étude ne se focalisait que sur le devenir du glyphosate et de l'AMPA. L'utilisation d'autres molécules aux propriétés physico-chimiques différentes aurait pu donner des résultats différents. A noter que cette étude n'avait que vocation à être préliminaire, pour déterminer s'il serait intéressant de mettre en place d'autres expérimentations.

4.2 Limites de l'étude

Les limites de la partie I de l'étude sont les suivantes :

1. Représentativité des mesures

Cette étude ne concernait que les conditions spécifiques de 2 canaux et parcelles étudiées au domaine du Merle (cependant représentatifs des types de sol sur lesquels est cultivé le foin de Crau, mais sans en représenter l'exhaustivité). Les résultats ne peuvent être extrapolés à d'autres parcelles sans une analyse du type de sol, de la profondeur du sol, des pratiques de désherbage, et de l'hydrologie et l'hydrogéologie du terrain.

Par ailleurs, les restrictions d'irrigation lors de l'été 2022 ont eu un impact sur le déroulement de l'étude et ont empêché l'un des prélèvements intermédiaires.

2. Type de molécules étudiées

Cette étude ne portait que sur le glyphosate, l'AMPA et le glufosinate (glufosinate jamais détecté dans le cadre de cette étude). En dehors de ces 3 molécules, aucune autre molécule n'a été recherchée dans les eaux de la parcelle, en dehors de 3 analyses plus exhaustives d'identification d'autres produits phytosanitaires dans les eaux parvenant au domaine (Voir Analyse multi-résidus, Annexe V). Cela n'exclut donc pas la présence d'autres molécules. Par ailleurs, la formulation du produit peut avoir un impact sur son devenir dans l'environnement (selon les marques, les additifs de type surfactants peuvent avoir des effets différents). C'est donc le cas pour le glyphosate utilisé dans le cadre de cette étude.

3. Pratique du désherbage dans l'expérimentation

Le domaine du Merle étant dans une démarche de non-recours aux produits phytosanitaires lors de l'expérimentation, seuls 2 tronçons de 12 mètres ont été traités pour les besoins de l'expérimentation. Ces conditions ne sont pas représentatives des pratiques du territoire en termes de traitement chimique.

Par ailleurs, l'expérimentation propose une mise en eau 1 jour après traitement, ce qui est la configuration la plus défavorable en termes de contamination. Ceci ne représente pas nécessairement les pratiques habituelles qui doivent intégrer différentes contraintes (organisation du travail, météo...). Il serait intéressant de comparer plusieurs configurations (différents délais avant mise en eau) pour en évaluer les effets sur la contamination des eaux de surface et souterraine.

4. Hydrodynamique

Cette expérience ne permet pas de caractériser l'hydrodynamique du système étudié, et d'avoir une idée précise des dynamiques de transfert des contaminants dans la nappe et dans le sol. L'expérience avait vocation à donner des ordres de grandeur de contaminations sous la zone racinaire, et dans les canaux après 1^{re} irrigation après traitement, et irrigations ultérieures.

5. Ecotoxicologie

Les personnels impliqués dans cette étude ne possédant pas de connaissance spécifique sur les effets potentiellement toxiques des molécules étudiées sur les organismes vivants, le rapport ne se prononce en aucun cas sur des valeurs maximales à ne pas dépasser. L'ANSES¹, l'INRS² et le PPDB³ peuvent servir de références pour ces questions.

Perspectives :

Il conviendrait, pour approfondir la caractérisation du risque de contamination dans le prolongement de cette étude :

- de réaliser des prélèvements dans les zones à enjeux (captages privés, zones d'abreuvement) pour caractériser les concentrations réelles dans ces zones.
- de quantifier précisément les volumes d'eau infiltrés au niveau des parcelles et des canaux pour évaluer plus finement les effets de dilution.

Les limites de la partie II de l'étude sont les suivantes :

1. Représentativité des agriculteurs rencontrés

Au total, 22 agriculteurs ont pu être interrogés, ce qui représente environ 8% des agriculteurs. Ce pourcentage, significatif, doit cependant être modéré par le fait que tous les agriculteurs n'ont pas répondu à toutes les questions.

2. Difficultés à obtenir des données précises concernant l'utilisation des produits phytosanitaires

Lors d'enquêtes, il est souvent difficile d'obtenir des informations précises sur les pratiques d'utilisation des produits phytosanitaires, notamment en termes de produits utilisés, de dosage et de longueur du linéaire traité.

Recommandations :

Au-delà du recours à des méthodes alternatives d'entretien des canaux ou, à défaut, d'un usage raisonné du recours aux herbicides et notamment au glyphosate dans la culture du foin de Crau, les recommandations suivantes peuvent être émises :

- Eviter le traitement simultané de longs linéaires reliés entre eux pour éviter un effet d'accumulation de la substance active en bout de linéaire,
- Limiter le désherbage des filioles, qui de toute manière sont amenées à déborder pour irriguer les parcelles et se concentrer sur les réseaux primaires et secondaires. Lorsque c'est la perte de capacité de transport hydraulique qui justifie le traitement, envisager un sur-dimensionnement des canaux pourrait permettre d'espacer les besoins d'intervention
- Maximiser le temps entre le traitement chimique et l'irrigation qui suit : comme les irrigations sont généralement espacées d'une dizaine de jours pendant la haute saison, ceci suppose que le traitement chimique se fasse très rapidement après une irrigation, une fois le ressuyage observé (il n'est pas favorable de traiter lorsqu'une lame d'eau est encore observable en fond de canal). Ceci permet que les processus d'immobilisation et de dégradation du glyphosate dans les sols

¹ <https://www.anses.fr/fr/content/glyphosate-1%E2%80%99anses-fait-le-point-sur-les-donn%C3%A9es-de-surveillance>

² https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_273

³ <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm>

et sur le matériel de fond de canal (litière) se mettent en place, limitant ainsi les transferts vers les eaux de surface et souterraines.

- Eviter l'abreuvement/pâturage des animaux d'élevage dans des zones traitées pendant une dizaine de jours, afin de limiter la contamination de la chaîne alimentaire, et limiter le contact entre l'eau des canaux et les animaux domestiques pendant cette période,
- Continuer l'animation et les incitations autour des alternatives à la gestion sans herbicides,
- Éventuellement ajouter les pratiques de gestion des canaux dans les cahiers des charges des PSE.

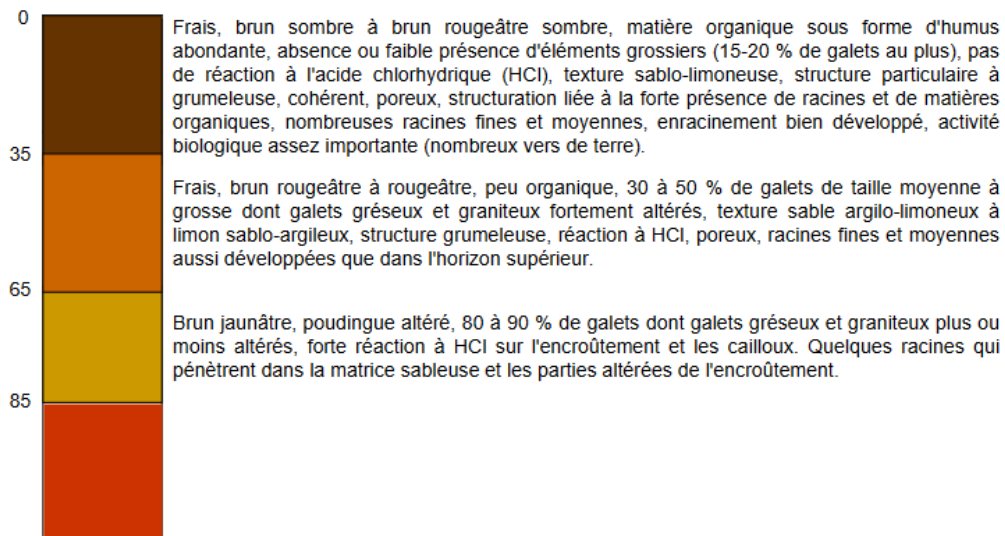
- Alberdi, P., Richard, J., Bailly, J., Belaud, G., & Biarnès, A. (2015). Pratiques d'entretien des canaux d'irrigation et fossés de colature dans la Crau. Projet Scientifique « *Eau et Agriculture* », master Sciences de l'Eau, Montpellier, AgroParisTech, Institut Agro, Université de Montpellier
- Alkassem-Alosman, M. (2016). *Caractérisation des irrigations gravitaires au moyen d'un modèle d'écoulement et de mesures in-situ : Application à l'optimisation de l'irrigation du foin de Crau par calan* [These de doctorat, Avignon]. <https://www.theses.fr/2016AVIG0679>
- Andrieux, P. (1981). *Etude des sols du Domaine du Merle—Méthodes et premiers résultats*. [Mémoire d'ingénieur]. Ecole Nationale Agronomique de Montpellier.
- Bento, C. P. M., Yang, X., Gort, G., Xue, S., van Dam, R., Zomer, P., Mol, H. G. J., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2016). Persistence of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in loess soil under different combinations of temperature, soil moisture and light/darkness. *Science of The Total Environment*, 572, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.215>
- Dagès, C., Samouëlian, A., Negro, S., Storck, V., Huttel, O., & Voltz, M. (2015). Seepage patterns of Diuron in a ditch bed during a sequence of flood events. *The Science of the Total Environment*, 537, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.130>
- Dagès, C., Voltz, M., & Ackerer, P. (2008). Parameterization and evaluation of a three-dimensional modelling approach to water table recharge from seepage losses in a ditch. *Journal of Hydrology*, 348(3–4), 350–362. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.004>
- Dagès, C., Voltz, M., Bailly, J.-S., Crevoisier, D., Dollinger, J., & Margoum, C. (2023). PITCH : A model simulating the transfer and retention of pesticides in infiltrating ditches and channel networks for management design purposes. *Science of The Total Environment*, 891, 164602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164602>
- Ibgui, P. (2021). Analyse-diagnostic agraire de la plaine de la Crau Bouches-du-Rhône, France : L'irrigation au coeur des transformations du paysage et des modes d'exploitation du milieu de la plaine de la Crau. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech, Paris, 120p.
- ICF Environnement. (2009). Rapport n° AIX-09-098-IL F V1. Synthèse géologique et hydrogéologique. Evaluation quantitative de l'impact sur la ressource en eau. 109 pp.
- Jaridi, I., Couillandeu, S., & Office International de l'Eau. Limoges. FRA. (1999). *Eau et agriculture—Curage des canaux d'irrigation : Techniques, stratégies et financement,—Baignade et effluents d'élevage : Une association à risques : Le point dans les pays développés*. Office International de l'Eau.
- Juliand J. (2011). Caractérisation du fonctionnement hydrique d'un sol de Crau sous prairie irriguée. Rapport M1 Hydrogéologie Sol et Environnement, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse.
- Laitinen, P., Siimes, K., Eronen, L., Rämö, S., Welling, L., Oinonen, S., Mattsoff, L., & Ruohonen-Lehto, M. (2006). Fate of the herbicides glyphosate, glufosinate-ammonium, phenmedipham, ethofumesate and metamitron in two Finnish arable soils. *Pest Management Science*, 62(6), 473-491. <https://doi.org/10.1002/ps.1186>
- Ma, D., Doussan, C., Charron, F., Di Pietro, L., Olivoso, A., Chapelet, A., (2011). Caractérisation de la recharge de la nappe à l'échelle parcellaire par l'irrigation par submersion : Une approche couplée Hydrologie - Géophysique, in: *Échanges Hydriques Et Gazeux & Hydrogéophysique. Presented At The Milieux Poreux Et Géophysique*, Orléans, France.
- Mérot, A. (2007). *Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué : Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un outil d'aide à la décision* [Thèse, École nationale supérieure agronomique (Montpellier)]. <http://www.theses.fr/2007ENSA0023>
- Okada, E., Costa, J. L., & Bedmar, F. (2016). Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage. *Geoderma*, 263, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.009>

- Padilla, J. T., & Selim, H. M. (2019). Interactions among Glyphosate and Phosphate in Soils : Laboratory Retention and Transport Studies. *Journal of Environmental Quality*, 48(1), 156-163. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.06.0252>
- Rudi, G., Bailly, J.-S., Belaud, G., & Vinatier, F. (2018). Characterization of the long-distance dispersal of Johnsongrass (*Sorghum halepense*) in a vegetated irrigation channel. *River Research and Applications*, 34(9), 1219–1228. <https://doi.org/10.1002/rra.3356>
- SYMCRAU. (2013). *Suivi piézométrique de la nappe de Crau, Année 2012*.
- SYMCRAU. (2016a). *Bulletin sur l'état qualitatif des eaux de la nappe de Crau, Année 2015*.
- SYMCRAU. (2016b). *Contrat de nappe de Crau : Pour une gestion durable et solidaire de la ressource en eau souterraine. TOME 1 : Diagnostic, enjeux et stratégie du contrat*.
- Turquet, P. (2022). Vulnérabilité des producteurs de foin de Crau aux conditions d'accès à l'eau, à la main d'œuvre, aux marchés. Mémoire de fin d'études, ENGEES et Institut Agro Montpellier, 90p.
- Yang, X., Wang, F., Bento, C. P. M., Xue, S., Gai, L., van Dam, R., Mol, H., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2015). Short-term transport of glyphosate with erosion in Chinese loess soil—A flume experiment. *Science of The Total Environment*, 512-513, 406-414. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.071>

6.1 Annexe 1 : Profil moyen d'une parcelle sur le secteur 1 (Source : Mérot, 2007)

Profondeur

(cm)



6.2 Annexe 2 : Fiche technique de l'herbicide utilisé pour l'expérimentation

Figure Annexe 2.1: Fiche technique du produit commercialisé sous le nom de « Barbarian »

Barclay
CROP PROTECTION

Barbarian[®] ST

Autorisation de Mise sur le Marché n° 2150140 délivrée le 12 août 2015
Concentré soluble (SL) contenant 360g/l de glyphosate (sel d'isopropylamine)

HERBICIDE FOLIAIRE SYSTÉMIQUE NON SÉLECTIF
RÉSERVÉ À UN USAGE EXCLUSIVEMENT PROFESSIONNEL

BARBARIAN ST - Glyphosate 360 g/L (30,9% p/p)

H411 - Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme

P264 - Se laver soigneusement les mains après manipulation.
P273 - Eviter le rejet dans l'environnement
P391 - Recueillir le produit répandu.
P501 - Éliminer le contenu/réceptacle dans le lieu d'élimination conformément à la réglementation locale.

EUH401 Respectez les instructions d'utilisation pour éviter les risques pour la santé humaine et l'environnement.

SP1 - Ne pas polluer l'eau avec le produit ou son emballage. (Ne pas nettoyer le matériel d'application près des eaux de surface. Éviter la contamination via des systèmes d'évacuation des eaux à partir des cours de ferme ou des routes).

Délai de rentrée : 6 heures (8 heures sous abri).

ATTENTION

UF1 : D0DG-E0K3-K00G-9ATA

Le fabricant garantit uniquement la qualité du produit. Ne pouvant contrôler l'application et l'emploi, il ne peut garantir les résultats et n'accepte aucune responsabilité pour les dégâts qui pourraient résulter de l'application.
Fiche de données de sécurité disponible sur demande pour les professionnels : consulter notre site internet www.barclay.ie

En cas d'urgence, appeler le 15 ou le 112 ou le centre anti poison (n° d'appel : 01 40 05 48 48), puis signalez vos symptômes au réseau Phytattitude (n° vert : 0800 887 887 - appel gratuit depuis un poste fixe).

Détenteur : SINON EU GMBH Im Alten Dorle 37 (Volksdorf) D-22359 Hamburg Allemagne
Tel. +49 40 6599 5039

Distribué par : Barclay Chemicals (R&D) Ltd., Damastown Way, Damastown Industrial Park, Mulhuddart, Dublin 15, Irlande. Tel: +353 1 8112900
Fax: +353 1 8224678 Email: info@barclay.ie Site Internet: www.barclay.ie

© Barbarian est une marque déposée de Barclay Chemicals (R&D) Ltd.

N° de lot et date de fabrication : voir emballage

Préparation de la bouillie

Ce produit s'emploie après solubilisation dans l'eau. Agiter légèrement en versant le produit dans la cuve.

USAGES Traitements généraux - Désherbage - Cultures installées	Dose maximale d'emploi	Zone non traitée aquatique
Pour lutter contre les adventices vivaces sur grandes cultures et cultures légumières	7 L/Ha	5 m
Pour lutter contre les adventices vivaces avant plantation sur cultures installées et sur toutes espèces fruitières et vigne. Pulvérisation par taches.	8 L/ha	5m
Pour lutter contre les adventices bisannuelles sur toutes espèces fruitières et vigne	6 L/Ha	5m
Pour lutter contre les dicotylédones bisannuelles sur grandes cultures, cultures légumières, toutes espèces fruitières, vigne et forêt	6 L/Ha	5m
Pour lutter contre les adventices et les graminées annuelles sur toutes espèces fruitières et vigne	4 L/ha	5m
Pour lutter contre les dicotylédones annuelles sur grandes cultures, cultures légumières, toutes espèces fruitières, vigne et forêt	6 L/ha	5m
Pour lutter contre les adventices vivaces sur forêt dégageant	6 L/ha	5m
Pour lutter contre les graminées annuelles sur grandes cultures, cultures légumières et forêts	3 L/ha	5m
Utilisation en traitement avant récolte sur blé tendre d'hiver et/ou blé dur et le blé panifiable et orge de printemps ou d'hiver et l'orge de brasserie <i>Utilisation interdite sur les céréales destinées à la production de semences</i> 1 application par an à partir du stade BBCH 85 Délai avant récolte : 7 jours	6 L/ha	5m

6.3 Annexe 3: Essais d'infiltration au bassin fermé

Principe : le canal dont on veut caractériser l'infiltrabilité est bouché à ses extrémités et rempli d'eau. Une sonde enregistreuse suit la vitesse de vidange du canal. Le volume infiltré est mesuré directement par l'abaissement du niveau d'eau. Celui-ci peut être corrigé des fuites (en les mesurant) et de l'évaporation, de l'ordre de quelques mm/j au maximum – généralement négligeable au regard de la vitesse d'infiltration dans le canal dès lors que la durée de l'essai est courte, ou effectuée la nuit.



Figure Annexe 3.1: fermeture d'un canal pour test au bassin fermé, et sondes de pression utilisées (Diver® et Hobo®)

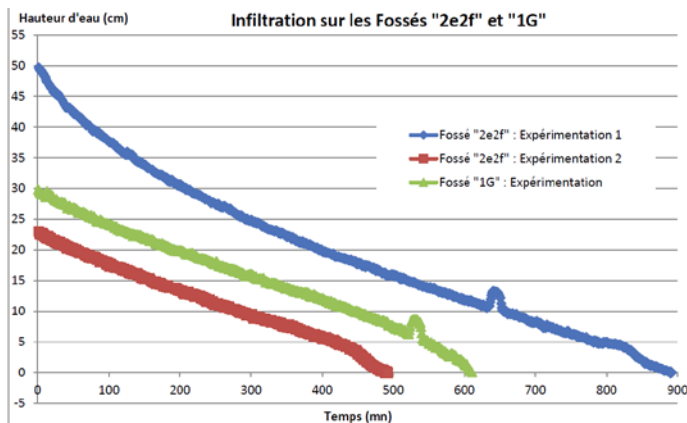


Figure Annexe 3.2 : enregistrement niveaux d'eau dans les canaux



Figure Annexe 3.3: canal 1g – parcelle irriguée latéralement



Figure Annexe 3.4: canal 2e2f, lors de tests préliminaires de suivi de traceur passif

6.4 Annexe 4: Questionnaire pour les exploitations de foin de Crau sur la conduite de l'exploitation, la gestion des adventices et la végétation des canaux

Objectifs :

- Caractériser le type d'exploitation dans ses grandes lignes
- Caractériser la conduite de l'exploitation en lien avec la stratégie de limitation de propagation des adventices à la parcelle et la gestion des réseaux d'irrigation
- Identifier les préoccupations et les attentes de l'exploitant vis-à-vis de la gestion des adventices et des canaux

Enquêteur :
Date :
Exploitant :
Nom de l'exploitation :
Adresse :
Coordonnées :

I. PHASE DE PRESENTATION ET TRAJECTOIRE DE L'EXPLOITANT

L'enquêteur en premier lieu présente dans cette partie les objectifs de l'enquête : le groupe questionné, la temporalité et les résultats escomptés. L'enquêteur s'engage sur une restitution globale des résultats de l'enquête et précise que le traitement des données sera réalisé de manière anonymisée.

Il invite également l'exploitant à valider le parcellaire concerné par la production du foin de Crau et les longueurs de linéaires (canaux et fossés de colature) sur une carte. Ce support peut également servir pour identifier les pratiques suivant la typologie de linéaire.

I.1. Pourriez-vous me présenter votre exploitation ? son histoire et ses activités ?

Notamment :

- Surface totale et surface en foin de Crau ?
- Quelles autres activités à part le foin de Crau ?
- Surface irriguée ?
- Longueur approximative des canaux sur le domaine ? (non-revêtu/revêtu/colature)
- Année d'installation ?
- Mode de production, mentions ou certifications environnementales ? (AB / HVE /...)
- Nombre d'ETP (travailleurs en équivalent temps plein) sur l'exploitation ?

I.2. Quels projets principaux avez-vous pour l'exploitation sur le court et long-terme ?

I.3. Quels défis rencontrez-vous sur cette exploitation ?

II. PERCEPTION DE L'EXPLOITANT SUR LA GESTION DES ADVENTICES ET L'ENTRETIEN DES CANAUX

Dans cette partie, l'enquêteur recueille les informations auprès de l'exploitant en prenant garde de ne pas influencer sa réponse.

II.1. Quelles sont les plantes non-désirées (ou adventices ?) sur votre exploitation ?

II.2. A quelles périodes de l'année leur présence est la plus difficile à gérer ?

II.3. Avez-vous remarqué des évolutions sur la dynamique des adventices au cours des 20 dernières années (type de plante, spatialité, temporalité de leur présence) ? et pourquoi à votre sens ?

II.4. Combien de parcelles sur votre total de parcelles sont actuellement concernées par la présence d'adventices (en quantité considérée comme gênante) ?

II.5. Est-ce que l'évolution de la gestion des fossés de bord de route par les collectivités vous paraît jouer un rôle dans la propagation des adventices, et vous a donc conduit à adapter vos techniques de gestion sur votre exploitation ?

II.6. Moyens pour gérer les adventices à la parcelle :

- Avec quelle(s) technique(s) gérez-vous ces adventices ? (*Ici essayer d'avoir une information la plus précise possible, et en cas d'utilisation d'herbicides le produit et le type d'application*)
- A quelles périodes de l'année ?
- Localisation des traitements ? surfaces approximatives ? Doses appliquées ?
- Pour quel coût ?
- Faites-vous appel à un prestataire extérieur ? utilisez-vous du matériel mis en commun ?
- Considérez-vous la gestion des adventices à la parcelle :
 - o Comme une tâche peu complexe/complexe/très complexe ?
 - o Comme une tâche peu consommatrice de temps (0-3 jours par an pour 1 ETP) / consommatrice de temps (3 à 10 jours par an pour 1 ETP) / très consommatrice de temps ? (supérieure à 10 jours pour 1 ETP)
- Selon vous, est-ce que les canaux vous semblent impliqués dans la propagation des adventices ?

II.7. Moyens pour gérer la végétation des canaux :

- Avec quelle technique ? (*Ici essayer d'avoir une information la plus précise possible, et en cas d'utilisation d'herbicides le produit et le type d'application*)
- Quels types de canaux (canaux de transport ou tertiaires= filioles ; fossés de colature) ?
- Avec quelles doses (si produits phytosanitaires) ?
- A quelles périodes de l'année ?
- Localisation : Fond, bords, berges
- Pour quel coût ?
- Faites-vous appel à un prestataire extérieur ? utilisez-vous du matériel mis en commun ?
- Acceptez-vous d'avoir des canaux tertiaires = filiole temporairement envahis par la végétation ?
- Si vous traitez avec des produits phytosanitaires les canaux, est-ce pour : (i) restaurer l'écoulement dans le canal (ii) pour réduire la quantité d'adventices? (iii) les deux
- Considérez-vous la gestion de l'enherbement dans les canaux :
 - o Comme une tâche peu complexe/complexe/très complexe ?
 - o Comme une tâche peu consommatrice de temps (0-3 jours par an pour 1 ETP) / consommatrice de temps (3 à 10 jours par an pour 1 ETP) / très consommatrice de temps ? (supérieure à 10 jours pour 1 ETP)

II.8. Si applicable, quel rôle joue selon vous le pâturage dans la gestion des adventices ?

II.9. Qu'est-ce qui représente une limite pour vous dans la gestion des adventices dans les propositions suivantes ?

- La main d'œuvre
- Le matériel
- La distance aux parcelles
- Les exigences de qualité du foin AOP
- La configuration de la parcelle et des canaux
- Autre :

II.10. Quel type d'engrais utilisez-vous sur les parcelles de foin de Crau et en quelles quantités ? Est-ce que vous utilisez des produits phytosanitaires (hors herbicides) pour d'autres raisons sur l'exploitation ?

II.11. Avez-vous eu la perception ces 10 dernières années que l'on vous incitait à gérer alternativement les adventices et vos canaux pour protéger la nappe de Crau et l'environnement au sens large? A votre sens, a-t-on mis des outils d'incitation à votre disposition ?

II.12. Est-ce qu'une gestion sans herbicide à la parcelle et dans les canaux pourrait représenter un bénéfice ou une perte sur votre résultat d'exploitation ? pourrait vous permettre de souscrire aux PSE ? avec quelles répercussions économiques et organisationnelles pour l'exploitation? (le chiffrer si possible en + et en -)

II.13. Avez-vous recours à des conseils ou échanges informels (avec voisins par exemple) autour de la gestion des adventices ?

II.14. Quels types de « conseil » ou retours d'expériences vous sembleraient idéaux pour la gestion des adventices ? Sous quel format ?

6.5 Annexe 5 : Valeurs brutes des données de concentrations de glyphosate et AMPA dans les sols et les eaux et accès aux rapports d'analyse des laboratoires prestataires (Sol : IANESCO ; Eau : TERANA)

6.5.1. Sols

Parcelle 1H

Canal 0-5 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
13-avr	0,03	<0,010
12-mai	0,22	0,043
09-juin	0,12	<0,010
20-juil	0,026	<0,010

Canal 5-10 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
13-avr	0,037	<0,010
12-mai	0,12	0,046
09-juin	0,05	<0,010
20-juil	0,017	<0,010

Parcelle 0-5 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
13-avr	<0,010	<0,010
12-mai	0,017	<0,010
09-juin	0,011	<0,010
20-juil	<0,010	<0,010

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien : <https://seafiler.agroparistech.fr/d/df9a0cdf4f4e48ee98d1/>

Parcelle 2CD

Canal 0-5 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
19-avr	<0,010	<0,010
12-mai	0,65	0,29
07-juin	0,041	0,011
20-juil	0,013	<0,010

Canal 5-10 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
19-avr	<0,010	<0,010
12-mai	0,2	0,035
07-juin	0,012	<0,010
20-juil	<0,010	<0,010

Parcelle 0-5 cm	AMPA (mg/kg)	Glyphosate (mg/kg)
13-avr	<0,010	<0,010
12-mai	<0,010	<0,010
07-juin	<0,010	<0,010
20-juil	<0,010	<0,010

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/df9a0cdf4f4e48ee98d1/>

6.5.2. Eaux circulant dans les canaux : concentrations

1H : Eau d'irrigation dans le canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
19/04/2022	13h15	<0,03	<0,03
10/05/2022	12h06	320	5,8
10/05/2022	12h16	50,8	<0,03
10/05/2022	12h32	680	8,06
10/05/2022	13h35	12,3	<0,03
07/06/2022	10h	0,34	0,06
07/06/2022	10h05	0,86	0,18
07/06/2022	11h38	0,31	<0,03
07/06/2022	13h40	1,6	0,13
07/06/2022	15h09	<0,03	<0,03
25/07/2022	9h25	<0,03	<0,03
25/07/2022	9h37	<0,03	<0,03
25/07/2022	11h30	0,04	<0,03
25/07/2022	12h30	<0,03	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/c8e527d6bca64d0cbc4d/>

2CD : Eau d'irrigation dans le canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
13/04/2022	-	<0,03	<0,03
10/05/2022	9h25	445,5	0,03

10/05/2022	9h33	19,16	0,03
10/05/2022	10h30	8,4	0,03
10/05/2022	10h58	1,13	0,03
10/05/2022	11h20	0,03	0,03
10/05/2022	14h15	14,96	0,9
12/07/2022	9h02	<0,03	<0,03
12/07/2022	9h25	<0,03	<0,03
12/07/2022	10h	<0,03	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/1177215ee59e432d8952/>

6.5.3. Eaux échantillonnées dans les préleveurs enterrés à 50 cm dans le sol sous les canaux : concentrations

1H : Eau de percolation sous le canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
19/04/22	13h17	0,08	<0,03
10/05/22	12h38	30,2	2,29
10/05/22	13h25	50,5	1,48
07/06/22	10h50	<0,03	<0,03
07/06/22	11h40	0,85	1,38
09/06/22	-	0,66	1
25/07/22	10h02	0,06	0,29
25/07/22	11h07	0,05	0,2

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/09adc7d11a82410ea281/>

2CD : Eau de percolation sous le canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
13/04/22	13h15	<0,03	<0,03
10/05/22	10h05	3,1	5,17
10/05/22	11h10	3,88	<0,03
09/06/22	10h05	<0,03	<0,03
12/07/22	11h	0,04	0,07

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/c727cb3dcac64ad5bd87/>

6.5.4. Eaux échantillonnées dans les préleveurs enterrés à 50 cm dans le sol sous les parcelles : concentrations

1H : Eau de percolation sous les parcelles

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
19/04/22	13h25	0,06	<0,03
10/05/22	15h40	<0,03	<0,03

07/06/22	11h55	<0,03	<0,03
07/06/22	13h45	0,04	<0,03
09/06/22	-	0,03	<0,03
25/07/22	11h10	<0,03	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/b3e3651526734527b3d7/>

2CD : Eau de percolation sous les parcelles

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
13/04/22	13h15	0,04	<0,03
10/05/22	11h40	<0,03	<0,03
10/05/22	14h05	0,06	<0,03
09/06/22	-	<0,03	<0,03
12/07/22	11h	0,04	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/5f62677b2aa5425abf18/>

6.5.5. Eaux de ruissellement sur la parcelle à 6 m et 60 m du canal : concentrations

1H : Eau de ruissellement à 6 m du canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
10/05/22	12h53	20,2	<0,6
07/06/22	10h20	0,27	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/a6a0af0440c34a34b69f/>

1H : Eau de ruissellement à 60 m du canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
10/05/2022	13h06	2,02	<0,3
07/06/2022	10h29	0,31	0,04

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/db56a3a7f0ac48808816/>

2CD : Eau de ruissellement à 6 m du canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
10/05/22	10h37	1,3	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafiler.agroparistech.fr/d/828f5ac2bd2b455e8253/>

2CD : Eau de ruissellement à 60 m du canal

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)
10/05/22	10h46	0,98	<0,03

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafire.agroparistech.fr/d/6f1d6fb3c9464d0f979a/>

6.5.6. Eaux au niveau de la vanne d'entrée de la parcelle avant traitement : concentrations

Vanne entrée 1H (avant tronçon traité)

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Métolachlore (R+S) (µg/L)	Flurochloridone (µg/L)	Ofurace (µg/L)	Anthraquinone (µg/L)
10/05/2022	12h26	0,03	<0,03	0,06	0,015	<0,01	<0,0050
07/06/2022	10h14	1,08	0,25	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
25/07/2022	9h48	<0,03	<0,03	<0,01	<0,0050	0,018	0,006

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafire.agroparistech.fr/d/3d50d6db9e4a48e6921a/>

Vanne entrée 2CD (avant tronçon traité)

Journée	Heure	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Métolachlore (R+S) (µg/L)	Flurochloridone (µg/L)	Anthraquinone (µg/L)
10/05/2022	9h43	<0,03	<0,03	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré
10/05/2022	14h	Non mesuré	Non mesuré	0,05	0,083	0,013
12/07/2022	9h	<0,03	<0,03	Non mesuré	Non mesuré	Non mesuré

Résultats d'analyses du laboratoire disponibles à ce lien :
<https://seafire.agroparistech.fr/d/8bad18e9a8864fb099f0/>

