

**Bassin versant de la Souffel : Fonctionnement hydrologique,
transport & devenir des pesticides - saison culturale 2019
(Projet PollISO)**



Sylvain Payraudeau, Professeur, ENGEES
Gwenaël Imfeld, Directeur de recherche, CNRS
UMR 7063 - Institut Terre et Environnement Strasbourg (ITES)
Université de Strasbourg, ENGEES, CNRS
1, rue Blessig, 67084 STRASBOURG Cedex, FRANCE

	Institut	Terre & Environnement
de Strasbourg ITES UMR 7063		
de l'Université de Strasbourg		&  & 

Financiers



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE



**AGENCE
DE L'EAU
RHIN-MEUSE**

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE,
DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER



Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE

L'Europe s'invente chez nous

Contenu

Remerciements.....	3
Préambule	4
Encart n°1 : Principe de l'Analyse Isotopique Composé Spécifique (AICS)	6
Résumé en 12 éclairages	7
Recommandations.....	9
Détails de l'état des lieux en 12 éclairages.....	10
1. La Souffel, un fonctionnement hydrologique atypique par rapports aux rivières alsaciennes	10
2. Caractérisation de l'assolement et applications du S-métolachlore en 2019.....	14
3. Périodes et processus clés pour le transport du S-métolachlore depuis les parcelles	16
4. Une quantification très fréquente du S-métolachlore, quasi-exclusivement dans la phase dissoute	19
5. Dépassement très fréquent des seuils de potabilité et de la Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour le S-métolachlore	20
6. Un taux d'export du S-métolachlore se situe dans la fourchette basse des références régionales et nationales	21
7. Les parcelles, siège principal de la dégradation du S-métolachlore	22
8. Une très faible capacité « d'auto-épuration » du S-métolachlore de l'Avenheimerbach.....	24
9. L'apport du S-métolachlore est homogène sur l'ensemble de la Souffel	26
10. Les stations d'épuration contribuent largement aux masses exportées	29
11. La dégradation quasi-complète du S-métolachlore est associée à une prédominance de produits de transformation persistants durant la saison	31
12. Le S-métolachlore contribue à la somme totale des pesticides en 2019.....	35
Conclusions & recommandations.....	37
Bibliographie.....	40

Remerciements

Cet état des lieux sur la Souffel s'inscrit dans le projet PolISO financé par l'Agence de l'Eau Rhin Meuse (AERM, n°170293) et la Région Grand-Est. Cette synthèse repose sur les résultats obtenus dans le cadre des travaux de thèse (2017-2020) de Boris Droz (co-financement AERM et Région Grand-Est) et de Guillaume Drouin (Formation Complémentaire Par la Recherche financée par le Ministère du transition écologique). Cet état des lieux s'est appuyé sur les interactions avec l'ensemble des acteurs intervenants sur le territoire de la Souffel. Nous souhaitons ainsi remercier l'ensemble de ces acteurs réunis au sein du Groupe Connaissance Souffel et de l'opération Agr'Eau Souffel pour leur contribution à cet état des lieux : l'Agence de l'Eau Rhin Meuse, le SDEA, la CRAGE, la Chambre d'Agriculture d'Alsace, le Comptoir Agricole, l'Eurométropole de Strasbourg, la cellule hydrométrie de la DREAL, la DDT et les élus et agriculteurs du Comité de Pilotage Agr'Eau Souffel.

Nous tenons spécifiquement remercier les deux animateurs en charge de la préservation de la qualité de la Souffel : Blandine Fritsch et Laurent Mergnac pour leur support à toutes les étapes de cet état des lieux. Nous remercions l'ensemble des collègues de notre Institut Terre et Environnement de Strasbourg pour leur soutien dans les phases de collecte et d'analyse des échantillons de sol, d'eau et de sédiments ainsi que pour la cartographie de l'occupation du sol du sous-bassin de l'Avenheimerbach et l'extraction des données issues des enquêtes sur les pratiques phytosanitaires.

Nous souhaitons enfin remercier les agriculteurs du sous-bassin de l'Avenheimerbach pour avoir facilité l'implantation des stations de mesures, la collecte d'échantillons de sol, et pour avoir répondu à l'enquête sur leurs pratiques phytosanitaires pour l'année 2019.

Préambule

A la demande du groupe Connaissance Souffel et dans le cadre du projet PollISO (n°170293) financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse (AERM) et la région Grand-Est, **cet état des lieux vise à caractériser :**

- **le fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Souffel;**
- **la dégradation et le transport des produits phytosanitaires des parcelles jusqu'à l'exutoire de la Souffel, en ciblant le S-métolachlore comme molécule modèle.**

Les **résultats associés aux deux objectifs sont résumés en 12 éclairages après cette introduction puis détaillés pour chacun d'entre eux dans la suite de ce document** en vue de l'étape de conception et de priorisation des actions sur la Souffel. **Une recommandation générale basée sur les faits scientifiques est également donnée à la suite de cette introduction.**

L'herbicide S-métolachlore a été choisi pour cette étude en raison de l'importance des quantités utilisées en France mais également au niveau international, qui le classe à la 5^{ème} place des molécules vendues dans le monde. Il est fréquemment détecté dans les eaux de surface et les eaux souterraines notamment en raison de sa solubilité (490 mg/L) et de sa capacité de sorption (coefficient de partition octanol-eau : $\log K_{ow} = 3.05$). La concentration moyenne annuelle du S-métolachlore sur la station AERM à l'exutoire de la Souffel à Mundolsheim a systématiquement dépassé les 0.1 µg/L entre 2014 et 2018 avec une valeur maximale de 2.9 µg/L pour l'année 2015. En Alsace, l'étude ERMES en 2016 réalisée par l'APRONA, puis le suivi annuel de l'AERM met en évidence le problème récurrent de la présence des produits de transformation hydrophiles, dont ceux du S-métolachlore, dans la nappe souterraine en Alsace au-delà du seuil de potabilité de 0.1 µg/l pour l'acide sulfonique (ESA) et l'acide oxanilique (OXA) et au-delà du seuil de vigilance de 0.9 µg/l pour l'OXA.

Méthodologie.

La campagne de suivi s'est déroulée **du 1^{er} mars au 1^{er} octobre 2019** incluant un **suivi en continu de trois stations automatiques** en amont et aval de l'**Avenheimerbach** et à **Mundolsheim** (Figure 1). Des échantillons proportionnels aux volumes d'eau écoulés ont été collectés pendant 31 semaines soit 58, 69 et 67 échantillons d'eau pour ces trois stations respectivement. En parallèle de ce suivi en continu, des **prélèvements mensuels ponctuels ont été réalisés sur neuf points en rivières** et sur les **trois rejets de stations d'épurations** (Stutzheim, Truchtersheim et Griesheim) (Figure 1). Les échantillons issus des suivis continus et ponctuels ont été filtrés avant l'analyse pour déterminer la concentration de S-métolachlore dans la phase dissoute (< 0.45 µm) et particulaire (> 0.45 µm). Les sédiments en rivière ont été prélevés chaque semaine sur les trois stations automatiques et à chaque relevé mensuel sur les neuf points. La couche superficielle des sols des parcelles en maïs et betteraves à sucre a été échantillonnée (0-30 cm) pour analyser chaque mois les concentrations en S-métolachlore. Le nombre total d'analyse pour ces deux suivis est de 275 phases dissoutes, 93 phases particulières, de 76 sédiments et de 12 sols sur lesquels le S-métolachlore a été recherché. **Le suivi mensuel de l'AERM sur huit points de la Souffel** a également été intégré à cet état des lieux pour prendre en compte les produits de dégradation du S-métolachlore et situer le S-métolachlore parmi les pesticides observés en 2019 (Figure 1).

Le projet PollISO visait également à développer et tester l'utilisation de l'analyse isotopique composé spécifique (AICS) comme marqueur de la dégradation permettant pour la première fois à l'échelle d'un bassin versant de quantifier la persistance du S-métolachlore dans les sols puis durant son transfert vers et dans les rivières. Le principe de l'AICS est rappelé dans l'encart 1.

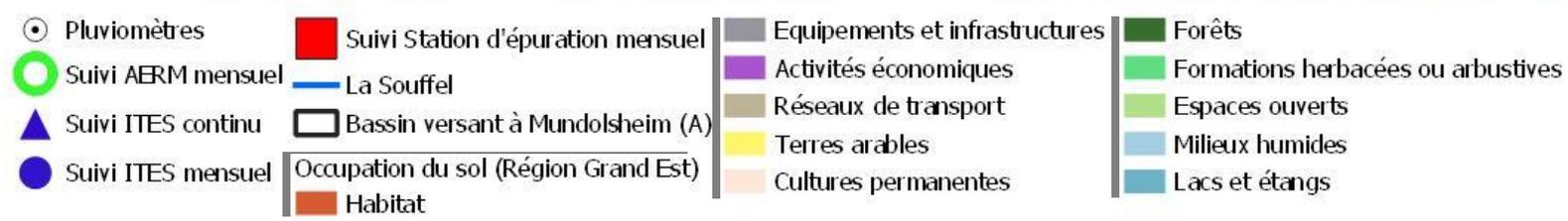
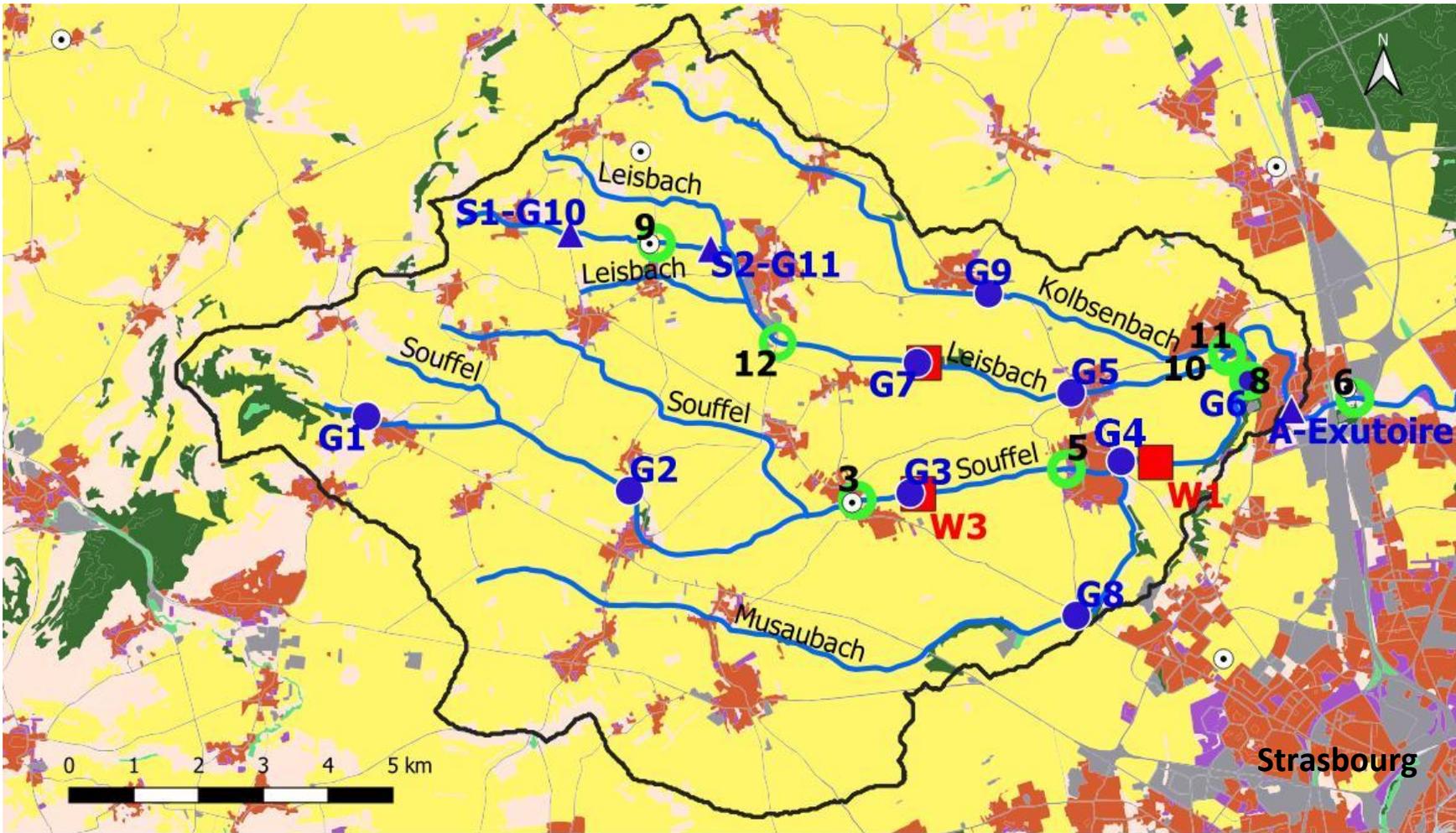


Figure 1 : Points de suivi de l'étude 2019 sur le bassin versant de la Souffel avec le suivi d'ITES comprenant le suivi continu automatisé (trois points) et mensuel (neuf points) de la Souffel et le suivi des rejets des trois stations d'épurations, et avec le réseau de suivi mensuel de l'AERM (huit points).

Encart n°1 : Principe de l'Analyse Isotopique Composé Spécifique (AICS)

Confrontés dans les années 90 à des pollutions marquées, les gestionnaires des aquifères contaminés par des polluants organiques industriels (BTEX, solvants chlorés) (Imfeld et al., 2008) ou par les nitrates (Ohte, 2013) ont largement bénéficié du développement de l'analyse isotopique composé-spécifique (AICS). L'AICS consiste à caractériser et utiliser les signatures isotopiques des éléments, comme le carbone, l'azote ou l'hydrogène des polluants organiques. Chaque polluant est en effet caractérisé par des ratios isotope lourd/isotope léger (e.g. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) qui lui sont propres. Cette signature isotopique dépend du processus chimique de synthèse et/ou de l'origine du contaminant. Par exemple, l'origine des nitrates, provenant de fertilisants minéraux, des déjections animales ou de rejets de stations d'épuration, ont ainsi pu être différenciés en fonction de leur ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ (Nestler et al., 2011 ; Fenech et al., 2012 ; Ohte, 2013), ouvrant ainsi la voie à des plans d'actions ciblés par usage.

La signature isotopique de la molécule est modifiée en fonction des processus qu'elle subit, permettant de retracer son histoire depuis son introduction dans l'environnement jusqu'à la prise d'échantillon dans la masse d'eau ciblée. Certains processus non destructifs comme l'adsorption sur des particules solides ou la volatilisation n'ont qu'un effet limité sur l'enrichissement isotopique (Imfeld et al., 2014, 2016). La dilution n'induit aucune modification de ces ratios (Fig. a2, dans la rivière). Une évolution de ces ratios au sein des hydrosystèmes (Fig. a2, sur le versant) et au cours du temps permet donc la mise en évidence et la quantification des processus destructifs de biodégradation et dans une moindre mesure d'hydrolyse ou de photo-dégradation (Elsner et al., 2010). Les processus de dégradation entraînent un enrichissement en isotope lourd des éléments constitutifs du polluant (e.g., ^{13}C , ^2H , ^{15}N).

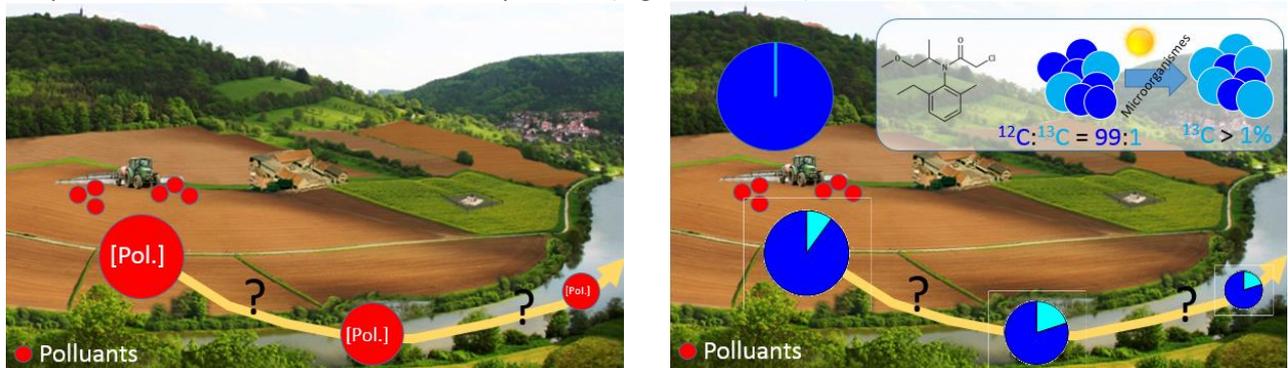


Fig. a : Complémentarité (1) des mesures de concentration d'un polluant organique et (2) de sa signature isotopique (ici, par exemple, pas de modification de la signature isotopique en rivière sur les carbones du *S*-métochloré $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ traduisant une dilution, alors que la forte modification de la signature isotopique du *S*-métochloré sur le versant traduit sa dégradation dans les sols agricoles)

Pourquoi seuls les processus de dégradation modifient la signature isotopique des polluants organiques ?

Les processus de dégradation (biodégradation, photolyse et hydrolyse) vont rompre des liaisons spécifiques entre éléments (C, N, H, O, Cl...) au sein de la molécule. L'énergie à fournir pour rompre une liaison moléculaire est plus élevée si elle implique un isotope lourd (e.g., ^{13}C , ^2H , ^{15}N). Ainsi une liaison impliquant des isotopes lourds est plus stable. Au cours de la biodégradation, les molécules contenant une majorité d'isotopes légers vont être préférentiellement dégradées. Par conséquent, plus la dégradation sera avancée, plus le pool de molécules non dégradées sera enrichi en isotopes lourds. Des modèles mathématiques ont été développés pour relier la signature isotopique au degré de dégradation des polluants organiques (Mariotti et al, 1981 ; Coplen et al., 2011, Alvarez et al., 2016). Ces modèles prédictifs nécessitent des expériences de référence en laboratoire pour associer chaque processus de dégradation (biodégradation, hydrolyse, photolyse) à la dynamique d'enrichissement en isotope lourd.

Résumé en 12 éclairages

1. La Souffel, un fonctionnement hydrologique atypique par rapports aux rivières alsaciennes

La Souffel est caractérisée sur la durée de l'étude par un débit moyen par unité de surface 10 fois inférieur aux rivières voisines au nord et au sud. Cette différence s'explique par l'absence de partie vosgienne à l'amont de la Souffel à la différence autres rivières alsaciennes. Cette caractéristique souligne la vulnérabilité de la Souffel aux périodes de sécheresse et une capacité de dilution moindre des flux de polluants par rapport aux rivières alsaciennes. Les écoulements liés à l'infiltration sous les parcelles puis à un écoulement latéral de sub-surface ou plus profond ont principalement contribué aux flux d'eau dans l'Avenheimerbach en 2019.

2. Caractérisation de l'assolement et applications du S-métolachlore en 2019

Au total 9.0 ± 3.0 kg de S-métolachlore ont été appliqués sur la betterave et 89.1 ± 27.6 kg sur le maïs sur le sous-bassin versant de l'Avenheimerbach. La masse totale de S-métolachlore appliquée à l'échelle de la Souffel se situe ainsi entre $4\ 909 \pm 116$ et $9\ 224 \pm 217$ kg.

3. Périodes et processus clés pour le transport du S-métolachlore depuis les parcelles

La comparaison des patrons de pluies (intensités, durée, quantité) et des masses exportées de S-métolachlore en 2019 souligne l'impact majeur des épisodes de pluie, ruisselants ou non, intervenant dans les jours et semaines qui suivent les applications, sur l'export saisonnier du S-métolachlore. L'infiltration du S-métolachlore sous les parcelles puis son transport via les écoulements horizontaux de sub-surface et souterrains ont contribué majoritairement en 2019 à son transport depuis les parcelles vers l'Avenheimerbach. Les évènements de pluie entre le 1^{er} mars et le 15 juin ont contribué à 91% des masses de S-métolachlore exportées.

4. Une quantification très fréquente du S-métolachlore, quasi-exclusivement dans la phase dissoute

Le transport de S-métolachlore exclusivement sous forme dissoute confirme la prédominance des écoulements de sous-surface et une faible occurrence d'évènements ruisselants érosifs en 2019 sur la Souffel. Les sédiments de la rivière n'ont pas joué de rôle significatif de puits (stockage) ou de sources (relargage) lors du transport amont-aval dans la Souffel.

5. Dépassement très fréquent des seuils de potabilité et de la Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour le S-métolachlore

La fréquence de dépassement du seuil de potabilité et de la valeur en projet de NQE pour le S-métolachlore est élevée et du même ordre de grandeur à l'exutoire de l'Avenheimerbach et de la Souffel. Sur l'Avenheimerbach, cette fréquence de dépassement atteint 70% pour le seuil de potabilité de $0.1 \mu\text{g/L}$ et 58% pour la valeur projet de NQE de $0.07 \mu\text{g/L}$ (INERIS, juillet 2021). Ce seuil atteint 81% pour le seuil de potabilité et 93% pour la valeur en projet de NQE à l'exutoire de la Souffel soulignant l'impact potentiel du S-métolachlore sur la dégradation de la qualité de la ressource en eau et sur l'écosystème aquatique, sans même prendre en compte l'impact écotoxicologique du cocktail de pesticide (fiche 12) et de ses produits de transformation (fiche 11).

6. Un taux d'export du S-métolachlore se situe dans la fourchette basse des références régionales et nationales

Le taux d'export du S-métolachlore est du même ordre de grandeur aux exutoires de l'Avenheimerbach avec entre 0.04 et 0.08 % et de la Souffel avec entre 0.04 et 0.12% des masses appliquées. Ces taux d'export du S-métolachlore se situent dans la fourchette basse régionale observée pour une année hydro-climatique non-ruisselante et non-érosive.

7. Les parcelles, siège principal de la dégradation du S-métolachlore

Le sol agricole constitue le compartiment sur lequel est appliqué le S-métolachlore mais représente également le siège principal de la dégradation du S-métolachlore dans le bassin versant.

8. Une très faible capacité « d'auto-épuration » du S-métolachlore de l'Avenheimerbach

A l'échelle de la Souffel sur l'ensemble des 79 km de linéaires de rivières, la dégradation du S-métolachlore au sein des cours d'eau sur la saison culturale est estimée à 12.7 ± 3.1 %. Cela indique une capacité limitée de dégradation de cet herbicide dans la rivière. La dégradation n'atteint pas 2% dans le tronçon de l'Avenheimerbach.

9. L'apport du S-métolachlore est homogène sur l'ensemble de la Souffel

L'année 2019, peu ruisselante, et le suivi spatial mensuel hors crue ne permettent pas de hiérarchiser des secteurs à risque accru de transport de S-métolachlore. Cette homogénéité des apports de S-métolachlore peut s'expliquer par une proportion de surface en maïs et en betterave homogène sur l'ensemble des sous-bassins.

10. Les stations d'épuration contribuent largement aux masses exportées

Pour les sept prélèvements mensuels, les rejets des stations contribuent entre 12 % et 100 % de la masse de S-métolachlore à l'aval des 3 tronçons impactés. Sur la période mars-octobre 2019, la contribution des rejets de stations d'épurations est estimée à 53 ± 24 % de la masse de S-métolachlore mesurée à l'exutoire.

11. La dégradation quasi-complète du S-métolachlore est associée à une prédominance de produits de transformation persistants durant la saison

Les deux produits de transformation prédominants du S-métolachlore, quelle que soit la saison, sont l'ESA et le NOA avec une contribution minoritaire de l'OXA. La prépondérance de l'ESA et le NOA comme produits de transformation observés sur la Souffel souligne la prédominance des écoulements de sous-surface avant les écoulements de surface qui génèrent majoritairement de l'OXA. 40% des prélèvements de 2019 dépassent la limite de potabilité de 0.1 µg/L en considérant le S-métolachlore mais 80% dépassent la limite de 0.5 µg/L en considérant le S-métolachlore, l'ESA et le NOA. Ceci souligne l'impact de ces deux produits de transformation sur la qualité des eaux de surface

12. Le S-métolachlore contribue à la somme totale des pesticides en 2019

Le S-métolachlore représente 11.9 ± 18.1 % de la somme totale des concentrations des pesticides (exprimées en µg/L sur les échantillons bruts intégrant les phases dissoutes et particulaires) mesurées par l'AERM sur la Souffel en 2019.

Recommandations

Compte tenu du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Souffel, des sources et des voies de transport des résidus de pesticides identifiées, de l'homogénéité des apports des résidus de pesticides et de la faiblesse du service écosystémique d'*auto-épuration* de la Souffel, nous recommandons :

1. De prendre en compte très sérieusement et urgemment la forte vulnérabilité en terme quantitatif de la Souffel aux épisodes de sécheresse dans les plans de gestion des prélèvements d'eau présents et futurs et dans les projets de réutilisation des eaux issues de la station d'épuration de Griesheim sur Souffel pour assurer la pérennité des écoulements de la Souffel amont-aval au cours de l'année ;
2. De résoudre urgemment le problème récurrent de non-conformité des pratiques de lavages et/ou de remplissage des pulvérisateurs dans les cours de ferme connectées aux stations d'épuration pour réduire significativement les concentrations et les masses de pesticides transférées à l'aval des rejets de ces stations ;
3. De tenir compte sérieusement de la vulnérabilité de l'écosystème aquatique et de la très mauvaise qualité de l'eau récurrente due au transfert des pesticides et des produits de transformation associés en menant des actions d'envergure pour diminuer très significativement, soit plus de 50%, les surfaces recevant des pesticides à l'échelle de la Souffel. Ces actions doivent limiter les transferts horizontaux de surface et verticaux sous les parcelles en préservant une portion significative du paysage de part et d'autre des cours d'eau et en développant une mosaïque d'infrastructures agro-écologiques (plantation de haies, création de mares, aménagements d'hydraulique douce). Toute action qui développera sur la Souffel une agriculture sans pesticides, et plus généralement sans intrants chimiques de synthèse, sera efficace pour protéger la santé humaine mais aussi environnementale.

Détails de l'état des lieux en 12 éclairages

1. La Souffel, un fonctionnement hydrologique atypique par rapports aux rivières alsaciennes

La Souffel est caractérisée sur la durée de l'étude par un débit moyen par unité de surface 10 fois inférieur aux rivières voisines au nord et au sud. Cette différence s'explique par l'absence de partie vosgienne à l'amont de la Souffel à la différence autres rivières alsaciennes. Cette caractéristique souligne la vulnérabilité de la Souffel aux périodes de sécheresse et une capacité de dilution moindre des flux de polluants par rapport aux rivières alsaciennes. Les écoulements liés à l'infiltration sous les parcelles puis à un écoulement latéral de sub-surface ou plus profond ont principalement contribué aux masses d'eau dans l'Avenheimerbach en 2019.

Du 1^{er} mars au 1^{er} octobre 2019 la pluie sur le bassin versant est de 358 mm ± 50 mm (moyenne et écart type avec les huit stations utilisées). Sur ces sept mois, 2019 se situe comme la 5^{ème} année la plus sèche sur les 20 dernières années (2000-2019 : moyenne de 418 ± 79 mm). En termes de température moyenne sur ces sept mois, 2019 se situe avec 16.3°C à la 3^{ème} place des années les plus chaudes (2000-2019 : moyenne de 15.7 ± 0.7 °C sur la station MétéoFrance d'Entzheim). L'évapotranspiration potentielle sur ces sept mois, avec 120 mm, se situe également à la 3^{ème} place (2000-2019 : moyenne de 108 ± 8.2 mm sur la station MétéoFrance d'Entzheim). Le débit moyen journalier à Mundolsheim sur ces sept mois est de 115 ± 137 L/s. Ce débit moyen est dix fois moins important que sur la Zorn (au nord) ou la Bruche (au sud) sur la même période une fois rapporté à la superficie amont des stations de mesures (Figure 2).

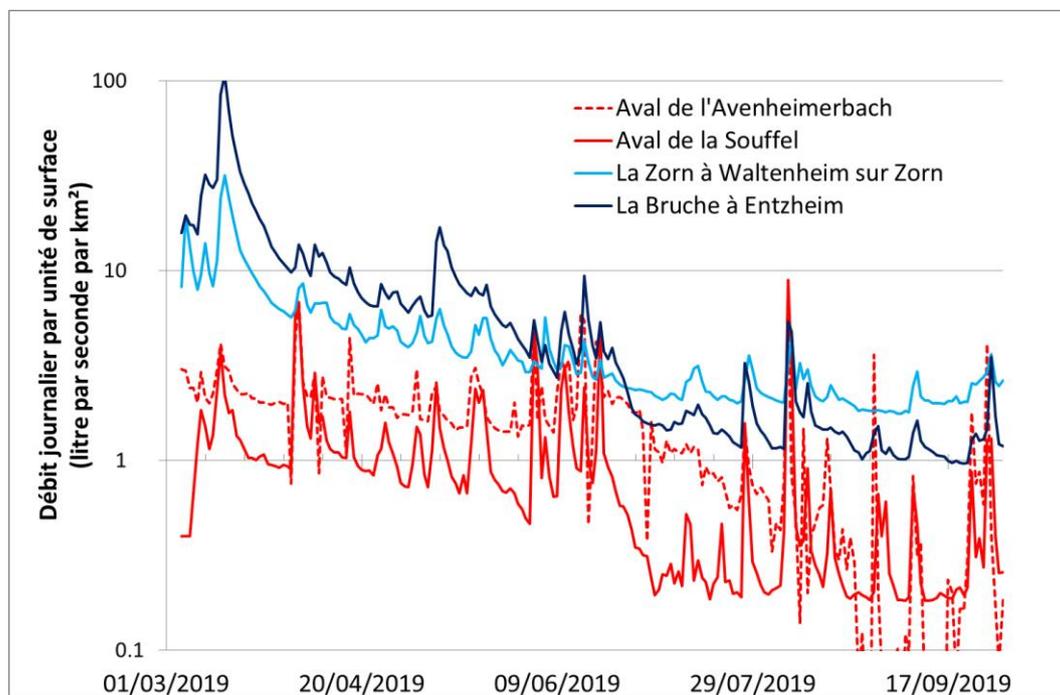


Figure 2 : Débits journaliers par unité de surface (en L/s/km²) à l'aval de l'Avenheimerbach, à l'aval de la Souffel, La Zorn et la Bruche entre le 1^{er} mars et le 1^{er} octobre 2019 (les débits sont représentés en échelles logarithmiques pour mieux visualiser les différences en crue et en étiage)

Ce différentiel s'explique par la géographie du bassin de la Souffel qui ne contient pas de contribution vosgienne. Ce comportement avait déjà été mis en évidence avant l'arrêt de la station DREAL à Mundolsheim avec un débit moyen annuelle spécifique (1975-2000) trois fois moins élevé que la Zorn et cinq fois moins que sur la Bruche. Cette caractéristique souligne la vulnérabilité accrue de la Souffel durant les périodes de sécheresse et une capacité de dilution moindre des flux de polluants.

Le débit spécifique limité de la Souffel associé aux rejets des trois stations d'épurations expliquent la forte contribution de ces rejets domestiques aux volumes journaliers mesurés à l'exutoire de la Souffel (Figure 3). Ces rejets représentent entre 20 et 67 % des volumes mensuels de la Souffel pour les mois de mai à juin puis d'octobre à décembre. Pour les mois de juillet à septembre, ces rejets dépassent 100% du débit de la Souffel avec de 109% (août) et 122 % (juillet) signifiant un transfert de masses d'eau principalement des eaux de surface de la Souffel vers les eaux souterraines. Ces pertes sont comprises entre 909 m³/j en juillet et 1066 m³/j en août. Le Musaubach au sud du bassin versant a été asséché lors des suivis mensuels de juillet à octobre.

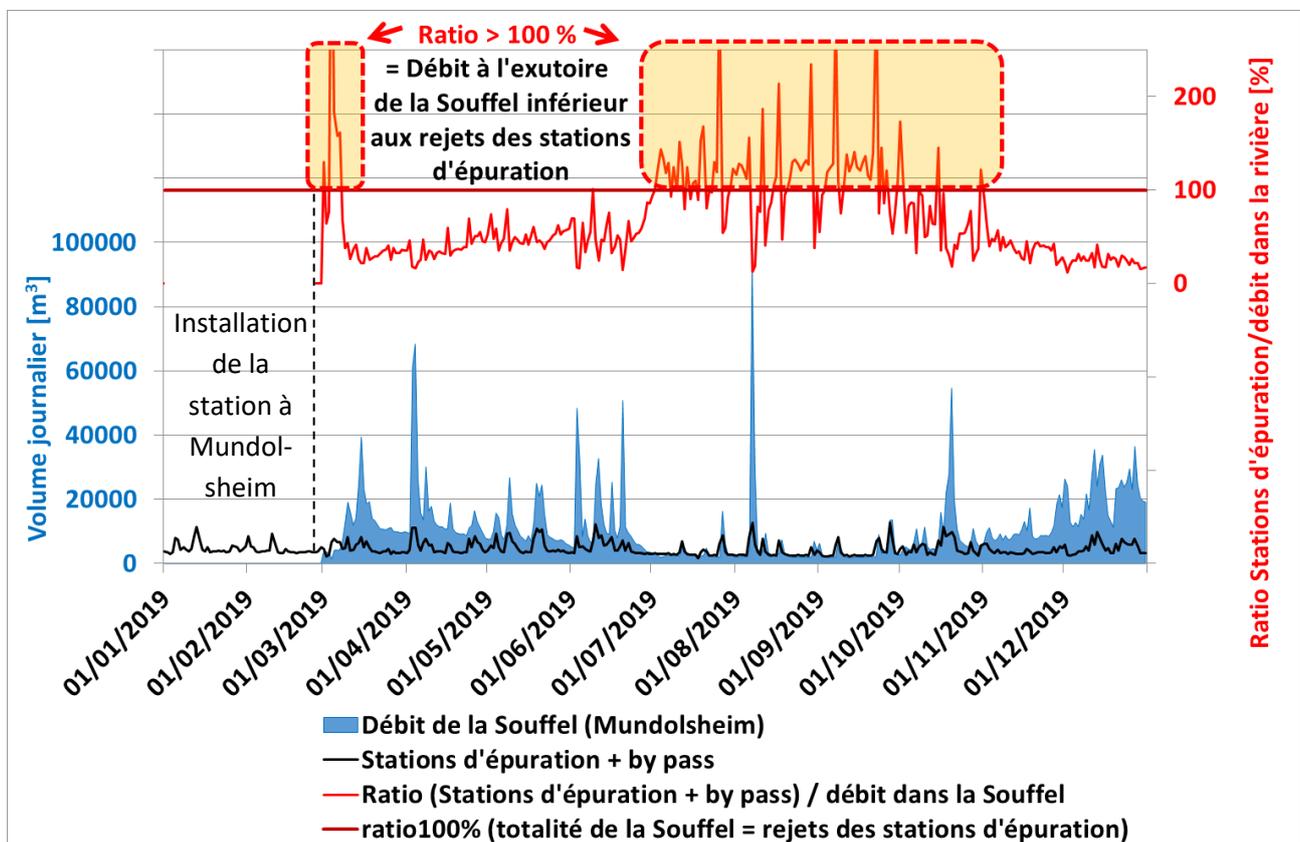


Figure 3 : Contribution des rejets des trois stations d'épuration (incluant les volumes des by-pass qui équipent les stations d'épuration pour évacuer les volumes d'eaux pluviales) aux volumes journaliers mesurés à l'exutoire de la Souffel à Mundolsheim.

Les concentrations des points les plus en amont comme G1 à Kuttolsheim et S1 à Avenheim présentent de fortes concentrations en nitrate avec respectivement une moyenne de 56 ± 2 mg/L (n = 7 sur la saison de Mars à Octobre) et 69 ± 13 mg/L (n = 7) soulignant l'impact de l'absence de zones non agricoles à l'amont comme les autres rivières alsaciennes (Figure 4). La valeur médiane des concentrations en nitrate des sept stations amont est ainsi de 44 mg/L (n = 46). Les concentrations en nitrates des rejets des trois stations d'épuration sont beaucoup plus faibles avec une valeur médiane de 10 mg/L (n = 20), soulignant l'effet du traitement par boues activées. La contribution significative des rejets des stations d'épuration (Figure 3) au débit de la Souffel à l'aval est confirmée par la concentration en nitrate plus faible pour les stations à l'aval des rejets de station avec une valeur médiane de 29.5 mg/L (n = 35). Les stations d'épuration jouent donc sur le bassin versant de la Souffel un rôle de dilution des nitrates associés au lessivage des engrais depuis les parcelles agricoles.

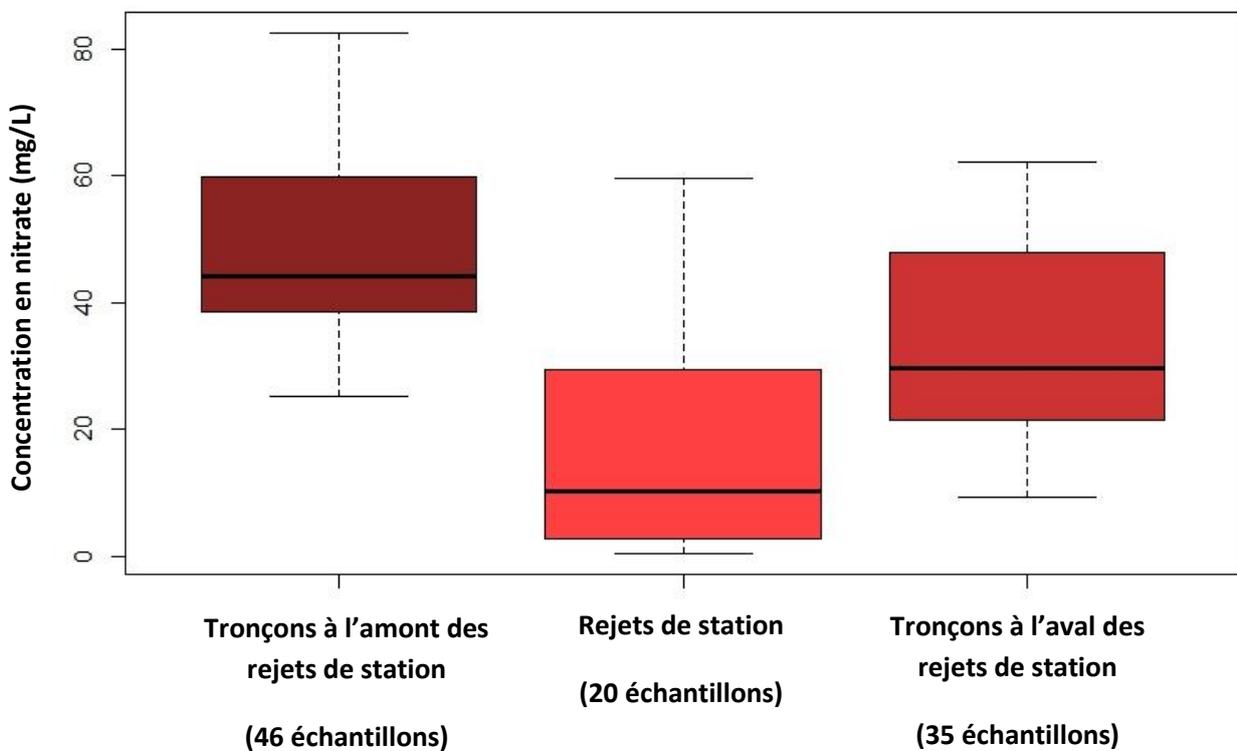


Figure 4 : Concentrations en nitrate d'amont (points non influencés par les rejets, G1, G2, G3, G8, G9, et S1 et S2, Figure 1) en aval des rejets des 3 stations d'épuration (G4, G5, G6, G7 et exutoire, Figure 1) avec les rejets des trois stations d'épurations

Sur l'Avenheimerbach, l'analyse des intensités de pluie (< yy mm/j), des matières en suspension (entre XX et YY mg/L) et des variations de la conductivité (< TT µsv) souligne une contribution limitée du ruissellement de surface sur la période d'étude de mars à octobre 2019 (Figure 5). Seulement deux épisodes de pluie sur les 17 observés du 1^{er} mars au 1^{er} octobre 2019 ont ainsi généré une signature de ruissellement de surface significative dans la rivière (matières en suspension > 10 mg/L, voir figure 5) et modification de la conductivité YY). Ces deux épisodes se rapprochent des valeurs observées en rivières après des coulées d'eau boueuse comme observées en 2012 sur la commune d'Alteckendorf pour un orage de période de retour 40 ans (matières en suspension 39 g/L et conductivité chutant de 850 à 100 µs/cm, Lefrancq et al., 2017).

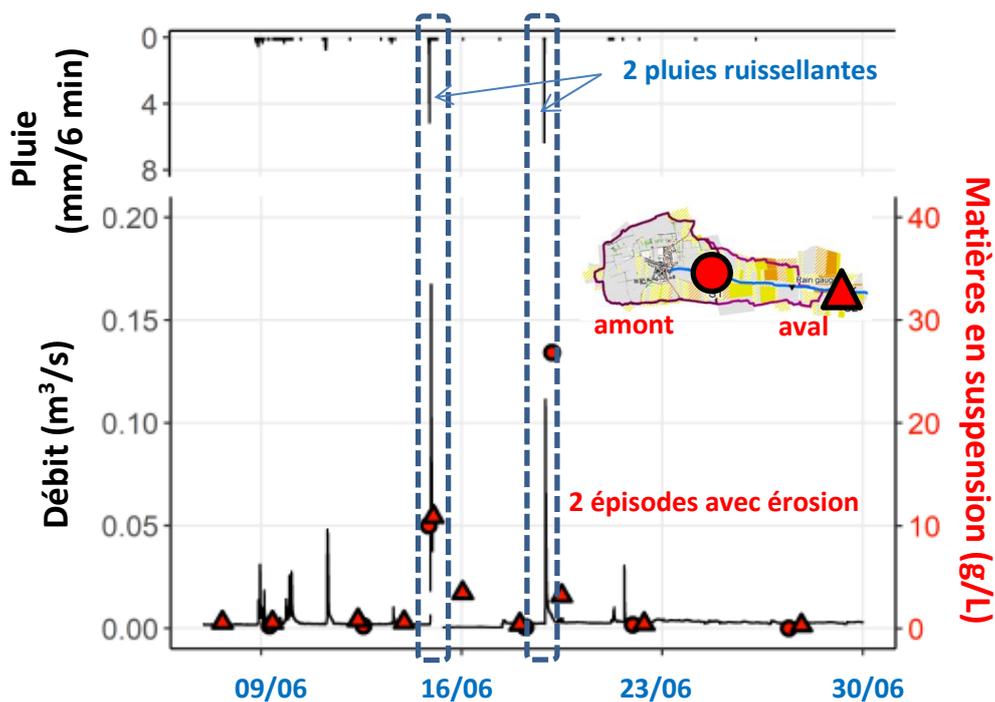


Figure 5 : Evolution des débits à l'amont de l'Avenheimerbach et des matières en suspension (amont et aval de l'Avenheimerbach) au mois de juin 2019 pour cibler les deux épisodes ayant provoqué très probablement du ruissellement avec plus de 10 g/L de matières en suspension.

En dehors de ces deux évènements ruisselants (les 15 et 19 juin), le volume écoulé dans l'Avenheimerbach est donc associé à des écoulements principalement liés à l'infiltration sous les parcelles puis à un écoulement latéral (i) de sub-surface dont une partie peut être captée par des drains agricoles si existants et (ii) vers la nappe d'accompagnement de la Souffel qui est en contact avec la Souffel elle-même sans que le protocole de mesure ne permette de distinguer la contribution relative de l'origine souterraine.

2. Caractérisation de l'assolement et applications du S-métolachlore en 2019

Au total 9.0 ± 3.0 kg de S-métolachlore ont été appliqués sur la betterave et 89.1 ± 27.6 kg sur le maïs sur le sous-bassin versant de l'Avenheimerbach. La masse totale de S-métolachlore appliquée à l'échelle de la Souffel se situe ainsi entre $4\,909 \pm 116$ et $9\,224 \pm 217$ kg.

En collaboration avec la Chambre d'Agriculture d'Alsace et l'animatrice de la mission eau Madame Blandine Fritsch, une enquête ciblant les traitements herbicides sur le maïs et la betterave à sucre a été envoyée aux 60 exploitants du sous-bassin versant de l'Avenheimerbach. Les retours de 26 exploitants ont permis de caractériser les pratiques sur 44% des surfaces en maïs et sur 40% de celles en betteraves à sucre présentes sur ce sous-bassin. Les fourchettes minimales et maximales d'application de S-métolachlore sont de 576 à 672 g/ha (moyenne = 608 g/ha) sur la betterave à sucre et de 768 à 1264 g/ha (moyenne = 863 g/ha) sur le maïs. Une campagne systématique de terrain réalisée en juin 2019 a permis de caractériser l'assolement sur les 3.6 km² de ce sous-bassin versant de l'Avenheimerbach. La figure 6 représente la répartition journalière des apports de S-métolachlore sur le sous-bassin de l'Avenheimerbach (en g/ha de maïs ou betterave enquêtés) avec deux périodes distinctes : 2^{ème} quinzaine d'avril pour quasi-systématiquement 2 applications séparées de 10 jours en moyenne sur la betterave et une unique application sur la deuxième quinzaine de mai sur le maïs. Certaines applications ont été réalisées des jours de pluie mais en l'absence le plus souvent des heures d'application, il n'est pas possible de savoir si ces applications ont eu lieu avant ou après la pluie.

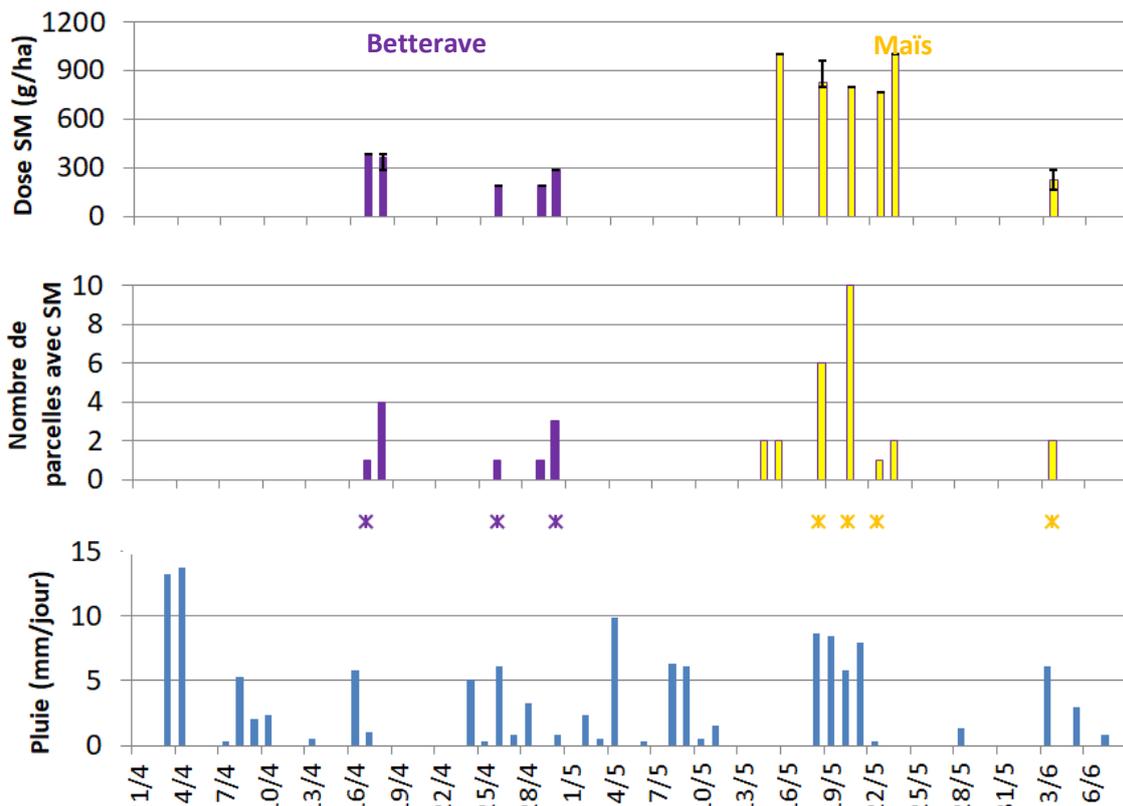


Figure 6 : Application du S-métolachlore entre avril et début juin sur la betterave à sucre (6 parcelles) et sur le maïs (22 parcelles) des 26 exploitants ayant répondu à l'enquête sur le sous-bassin de l'Avenheimerbach. La répartition journalière des applications sur les 28 parcelles est exprimée en g/ha et les barres minimum et maximum correspondent aux valeurs extrêmes des doses lorsque l'application concerne plusieurs parcelles. Les astérisques correspondent à des applications les jours de pluie.

L'assolement sur l'ensemble des 121 km² pour 2019 n'étant pas disponible dans le cadre du Recensement Parcellaire Généralisé (RPG) lors de la réalisation de cette étude, une projection a été réalisée sur la base de l'analyse des rotations des assolements du RPG de 2015, 2016, 2017 et 2018. Sur ces 4 années, la proportion de betterave à sucre est très stable avec 12.0 ± 0.5 % de la superficie du bassin versant, tout comme celle du maïs avec 51.2 ± 1.7 %. Une analyse des rotations sur ces 4 années a permis d'estimer la probabilité d'avoir une culture recevant du S-métolachlore (maïs ou betterave à sucre) (Figure 7).

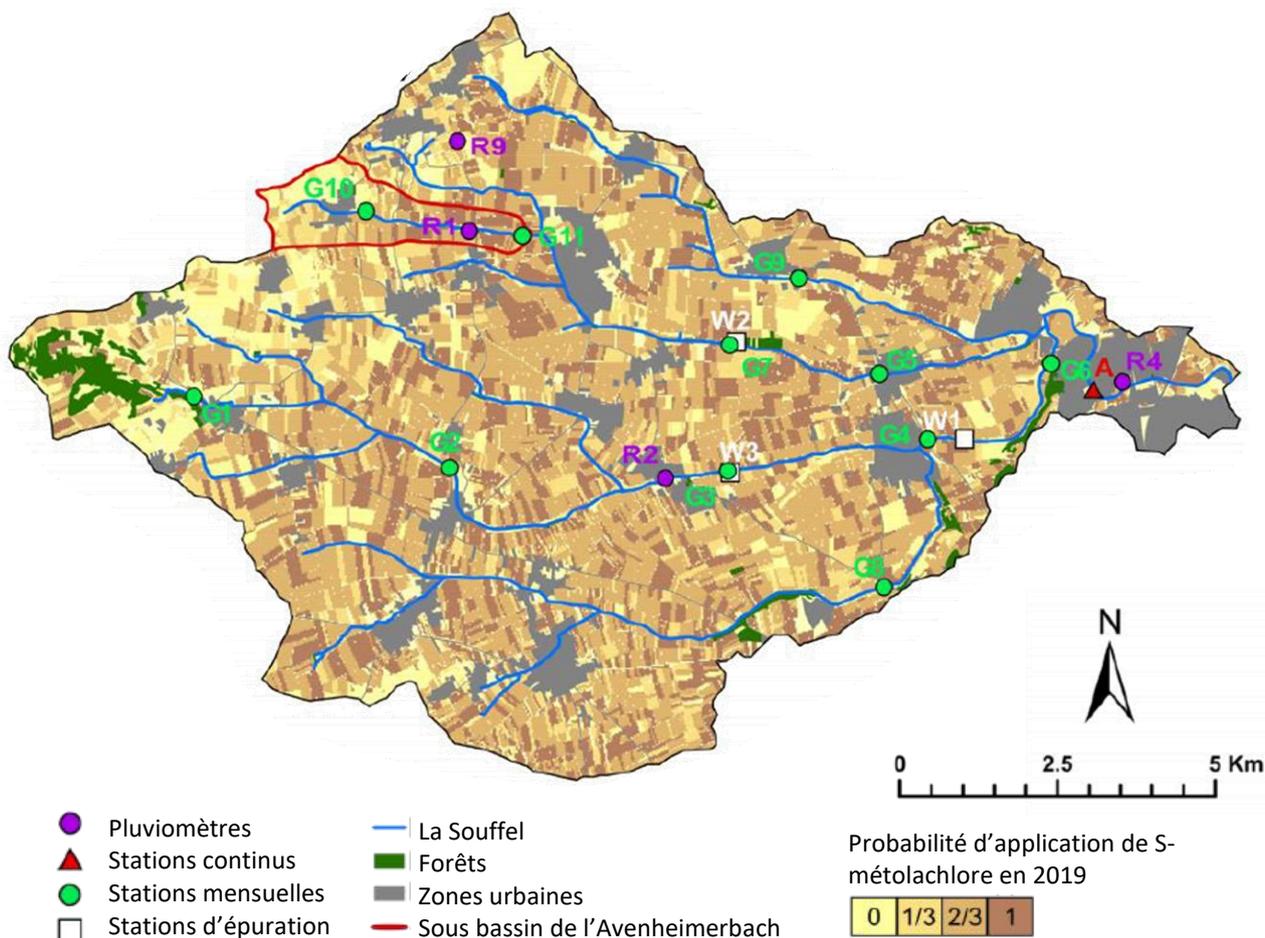


Figure 7 : Probabilité par parcelle d'avoir en 2019 une culture recevant du S-métolachlore (maïs ou betterave à sucre) sur la base de l'analyse des rotations culturales parcellaires observées entre 2015 et 2018 via le RPG.

La masse appliquée sur les 121 km² est donc estimée sur la base de la probabilité d'avoir de la betterave à sucre et du maïs sur chaque parcelle en 2019 et en fonction de ces trois scénarios d'application. Le premier scénario s'appuie sur la dose réglementaire avec 576 g/ha sur betterave et 1920 g/ha sur maïs. Le deuxième scénario repose sur les préconisations de réduction de la Chambre d'Agriculture avec 384 g/ha sur betterave et 1280 g/ha sur maïs. Le troisième scénario utilise les doses minimales, moyennes et maximales déclarées dans l'enquête sur l'Avenheimerbach. La masse totale de S-métolachlore appliquée en 2019 à l'échelle de la Souffel se situe ainsi entre $4\,909 \pm 116$ et $9\,224 \pm 217$ kg.

3. Périodes et processus clés pour le transport du S-métolachlore depuis les parcelles

La comparaison des patrons de pluies (intensités, durée, quantité) et des masses exportées de S-métolachlore en 2019 souligne l'impact majeur des épisodes de pluie, ruisselants ou non, intervenant dans les jours et semaines qui suivent les applications, sur l'export saisonnier du S-métolachlore. L'infiltration du S-métolachlore sous les parcelles puis son transport via les écoulements horizontaux de sub-surface et souterrains ont contribué majoritairement en 2019 à son transport depuis les parcelles vers l'Avenheimerbach. Les évènements de pluie entre le 1^{er} mars et le 15 juin ont contribué à 91% des masses de S-métolachlore exportées.

L'analyse des caractéristiques des pluies (intensités maximales), des caractéristiques hydrochimiques (matières en suspension, conductivité) et de la réponse hydrologique sur l'Avenheimerbach met en lumière un écoulement principalement de sub-surface des versants vers la rivière lors des épisodes de pluie en 2019 avec uniquement deux évènements ruisselants.

En début de saison, de mars à avril, le débit journalier à l'aval est en moyenne égal à 2.9 fois le débit à l'amont alors que le ratio des superficies des bassins versants amont sur aval n'est que de 1.6. L'Avenheimerbach entre les deux points de suivi est principalement alimenté latéralement et verticalement par la nappe d'accompagnement. En août et septembre 2019, le débit à l'aval n'est plus que de 0.7 fois le débit à l'amont traduisant une perte verticale vers la nappe d'accompagnement.

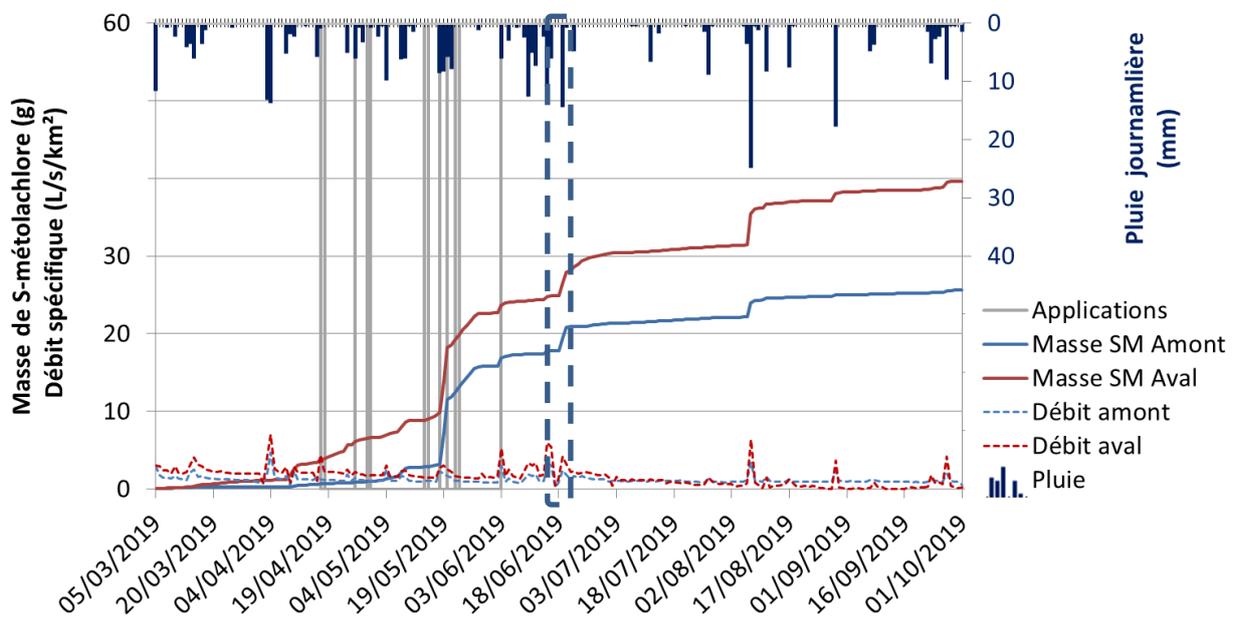


Figure 8 : Débits spécifiques (en L/s/km²) et cumuls de S-métolachlore quantifiés (g) en amont et aval de l'Avenheimerbach et rappel des dates d'application obtenus par enquêtes et de la pluviométrie journalière (en pointillé les 2 épisodes ruisselants)

En termes de masse de S-métolachlore, les deux épisodes ruisselants (les 15 et 19 juin) ont contribué à 13.5 et 9.5 % de la masse exportée, respectivement, en amont et en aval de l'Avenheimerbach (Figure 8). Les 15 autres épisodes de pluie moins intenses (intensité < 3 mm/h) et les périodes sèches ont contribué à 86.5 et 90.5 % de la masse exportée, respectivement, en amont et en aval de l'Avenheimerbach.

A l'échelle de l'Avenheimerbach, un seul épisode de pluie non ruisselant intervenant deux jours après le début des applications principales sur maïs (pluie du 18 au 21 mai) a contribué à 54% de l'export de S-métolachlore sur la saison.

A l'échelle de la Souffel, les évènements de pluie entre le 1^{er} mars et le 15 juin ont contribué à 91% des masses exportées alors que les suivants, du 15 juin au 1^{er} octobre, ont contribué à seulement 9% de ces masses (Figure 9D).

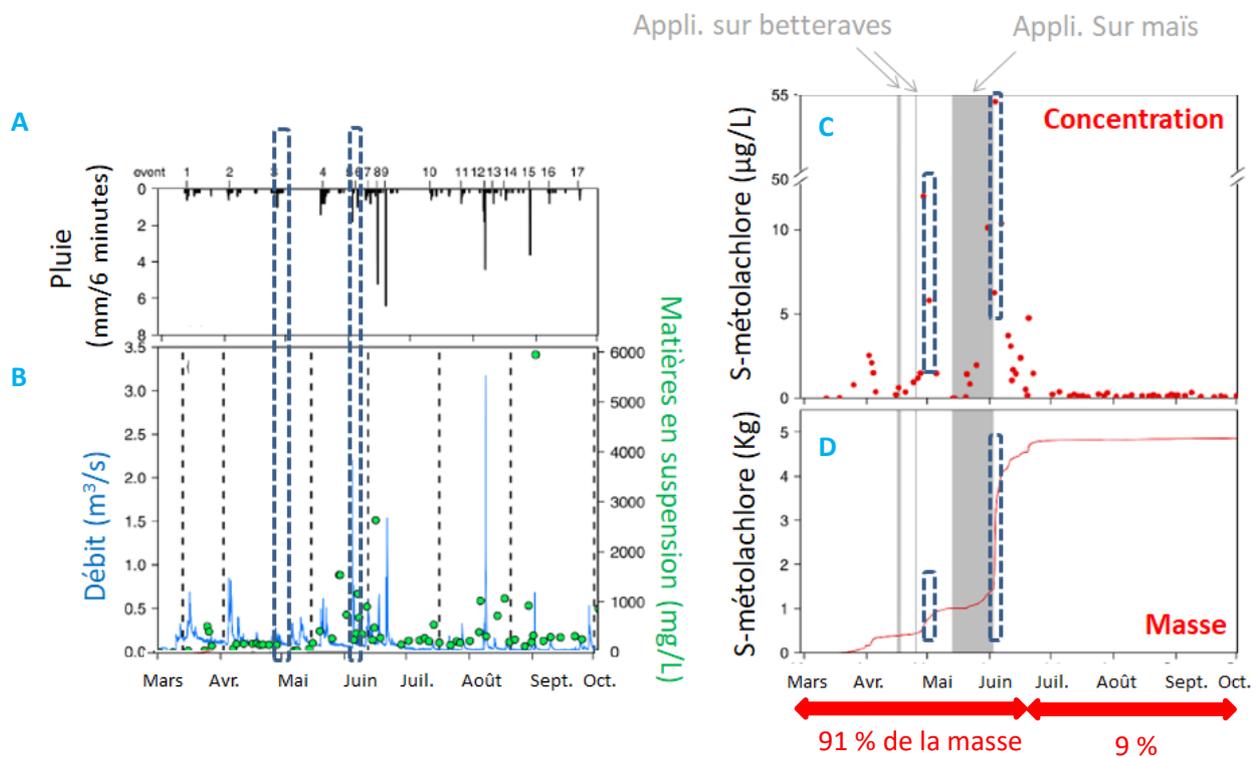


Figure 9 : Intensités des pluies moyennées (8 pluviomètres sur la totalité du bassin versant de la Souffel) de mars à octobre 2019 (A) débit et matières en suspension à l'exutoire de la Souffel à Mundolsheim (B), avec les concentrations (C) et les flux cumulés en S-métolachlore (D). Les bandes grises correspondent aux applications de S-métolachlore issues de l'enquête sur l'Avenheimerbach. Les 2 zones hachurées en bleu identifient sur les 4 graphiques (A, B, C et D) les 2 épisodes ayant générés les concentrations de S-métolachlore les plus fortes

L'épisode de pluie n°3, tout début mai, contribue à mobiliser une part du S-métolachlore appliquée sur betterave la deuxième quinzaine d'avril (selon enquête sur l'Avenheimerbach). A l'inverse l'épisode de pluie n°4 (mi-mai), qui a provoqué un transfert important sur l'Avenheimerbach, n'a pas eu le même impact à l'exutoire (Figure 9D). Cette observation suggère un décalage de quelques jours des applications sur une part significative des parcelles en maïs de la Souffel par rapport à l'Avenheimerbach. Les fortes concentrations en S-métolachlore observées à l'exutoire de la Souffel début juin (Figure 9C) correspondent donc aux premiers épisodes de pluie de début (épisodes 5 et 6) qui suivent la fin des applications de S-métolachlore sur maïs, même si ce ne sont pas les plus intenses. Il est à noter une première période de forte concentration (> 1 µg/L)

fin mars début avril qui traduit probablement une application de *S*-métolachlore précoce sur le bassin de la Souffel avec un rejet ponctuel lié au rinçage de cuve vers un réseau connecté à une des stations d'épuration. Cette hypothèse est renforcée par la présence significative du *S*-métolachlore dans les rejets de stations d'épuration lors de la campagne d'avril (voir section 10). La dynamique des concentrations en *S*-métolachlore et la répartition saisonnière des flux soulignent que la Souffel est vulnérable aux apports de *S*-métolachlore dans les jours qui suivent les applications en cas d'épisode de pluie indépendamment du processus de transport : de surface si ruissellement avec pluie intense, ou de sous-surface et souterrain pour des pluies d'intensités plus modérées. A partir de juillet, soit un mois après les dernières applications de *S*-métolachlore, les différents épisodes de pluie même intenses et les hautes eaux associées ne contribuent quasiment plus à l'export de *S*-métolachlore des parcelles vers la Souffel car le stock initial a été fortement dégradé. Cette dynamique de dégradation du *S*-métolachlore dans la couche superficielle du sol est discutée dans le point 7 de ce rapport en valorisant le suivi des concentrations de cet herbicide dans les sols du sous-bassin de l'Avenheimerbach.

4. Une quantification très fréquente du S-métolachlore, quasi-exclusivement dans la phase dissoute

Le transport de S-métolachlore exclusivement sous forme dissoute confirme la prédominance des écoulements de sous-surface et une faible occurrence d'évènements ruisselants érosifs en 2019 sur la Souffel. Les sédiments de la rivière n'ont pas joué de rôle significatif de puits (stockage) ou de sources (relargage) lors du transport amont-aval dans la Souffel.

Le S-métolachlore est quasi-systématiquement quantifié dans l'eau filtrée. A l'échelle de l'Avenheimerbach, le S-métolachlore est ainsi quantifié dans 88 et 96% des échantillons d'eau respectivement pour le point amont (sur 58 éch.) et le point aval (sur 69 éch.) récoltés entre le 5 mars et le 1^{er} octobre 2019. Les quelques échantillons non quantifiés ont systématiquement été récoltés en début de saison avant les premières applications (mi-mars à mi-avril). A l'aval de la Souffel, le S-métolachlore est quantifié sur 96% des 67 échantillons entre le 5 avril et le 1^{er} octobre. La fréquence de quantification du S-métolachlore pour le suivi mensuel sur les neuf points en rivières (60 échantillons) est de 73%. Le suivi mensuel de l'AERM sur 8 points supplémentaires confirme la présence systématique du S-métolachlore notamment en hiver (décembre à mars) mais à des concentrations plus faibles ($0.04 \pm 0.02 < \mu\text{g/L}$ en moyenne sur les 8 points).

Par contre le S-métolachlore n'a jamais été quantifié sur les matières en suspension représentant 9, 24 et 35 échantillons respectivement sur le point amont et aval de l'Avenheimerbach et à l'aval de la Souffel. Ceci est dû, le plus souvent, à une masse de matières en suspension trop faible pour permettre la quantification. De même, aucune des 25 analyses sur les matières en suspension du suivi mensuel n'a permis de quantifier le S-métolachlore pour les mêmes raisons. Le fait que le transport particulaire ne contribue pas significativement au transport du S-métolachlore sur la Souffel corrobore les résultats obtenus à Alteckendorf (47-ha) pour la saison culturale 2016 (Alvarez Zaldivar et al., 2018). Pour cette étude réalisée entre mars et juillet 2016, les intensités de pluies modérées n'avaient pas provoqué d'érosion. Cependant, une campagne menée en 2012 sur le même bassin versant d'Alteckendorf, a mis en évidence un transport particulaire à hauteur de 47% de la masse totale de S-métolachlore exportée dans la rivière lors d'un évènement d'orage de période de retour de 40 ans. Le transport de S-métolachlore exclusivement sous forme dissoute en 2019 indique une prédominance d'écoulement de sub-surface associée une faible occurrence d'évènements ruisselants érosifs sur la Souffel pour cette année spécifique.

Associés à ce faible transport particulaire, la proportion de quantification du S-métolachlore dans les sédiments de la Souffel aux trois points de suivi continu est très faible, correspondant à 13, 3 et 2 % respectivement sur le point amont (sur 16 éch.) et aval (sur 32 éch.) de l'Avenheimerbach et à l'aval de la Souffel (sur 41 éch.). La fréquence de quantification du S-métolachlore dans les sédiments de la Souffel atteint 7% pour le suivi mensuel sur les neuf points (sur 55 éch.) avec de très faibles concentrations. Les faibles quantités de S-métolachlore dans les sédiments de la Souffel en 2019 indiquent que les sédiments n'ont pas joué un rôle significatif de puits (stockage) ou de sources (relargage) lors du transport du S-métolachlore dans la rivière au cours de la saison culturale du maïs et de la betterave à sucre.

5. Dépassement très fréquent des seuils de potabilité et de la Norme de Qualité Environnementale (NQE) pour le S-métolachlore

La fréquence de dépassement du seuil de potabilité et de la valeur en projet de NQE pour le S-métolachlore est élevée et du même ordre de grandeur à l'exutoire de l'Avenheimerbach et de la Souffel. Sur l'Avenheimerbach, cette fréquence de dépassement atteint 70% pour le seuil de potabilité de 0.1 µg/L et 78% pour la valeur projet de NQE de 0.07 µg/L (INERIS, juillet 2021). Ce seuil atteint 81% pour le seuil de potabilité et 93% pour la valeur en projet de NQE à l'exutoire de la Souffel soulignant l'impact potentiel du S-métolachlore sur la dégradation de la qualité de la ressource en eau et sur l'écosystème aquatique, sans même prendre en compte l'impact écotoxicologique du cocktail de pesticide (fiche 12) et de ses produits de transformation (fiche 11).

De mars à octobre, les concentrations en S-métolachlore dépassent pour 52% des échantillons d'eau filtrée les 0.1 µg/L et pour 57% la valeur en projet de NQE de 0.07 µg/L pour le S-métolachlore) pour le point amont de l'Avenheimerbach. La fréquence augmente sur le point aval de l'Avenheimerbach avec 70% de dépassement des 0.1 µg/L et 78% de dépassement de la valeur en projet de NQE. La fréquence de dépassement atteint 81% pour le seuil de 0.1 µg/L et 93% de la NQE à l'exutoire de la Souffel soulignant l'impact potentiel du S-métolachlore auquel s'ajoute celui de ses produits de transformation sur la dégradation de la qualité de la ressource en eau et sur l'écosystème aquatique.

Sur les 60 échantillons en phase dissoute du suivi mensuel sur les neuf points en rivières, 50% dépassent les 0.1 µg/L et 55% dépassent la valeur en projet de NQE. Les échantillons collectés mensuellement dans les rejets des trois stations d'épuration dépassent les 0.1 µg/L pour 76% des 21 échantillons et également pour 76% la valeur en projet de NQE.

6. Un taux d'export du S-métolachlore se situe dans la fourchette basse des références régionales et nationales

Le taux d'export du S-métolachlore est du même ordre de grandeur aux exutoires de l'Avenheimerbach avec entre 0.04 et 0.08 % et de la Souffel avec entre 0.04 et 0.12% des masses appliquées. Ces taux d'export du S-métolachlore se situent dans la fourchette basse régionale observée pour une année hydro-climatique non-ruisselante et non-érosive.

Le taux d'export du S-métolachlore est calculé comme la proportion de la masse exportée en rivière par rapport à la masse appliquée à l'amont. La masse exportée sur le point amont de l'Avenheimerbach est de 25.6 g soit 0.09 % des 28.3 ± 8.8 kg appliqués. Sur le point aval de l'Avenheimerbach, la masse de S-métolachlore exportée est estimée à 39.6 g correspondant à 0.06 % des 69.8 ± 21.8 kg appliqués. A l'échelle de la Souffel, le taux d'export se situe entre 0.04 et 0.12 % des masses appliquées selon les scénarios d'application, avec un export saisonnier de 4.87 ± 1.00 kg de S-métolachlore mesuré à l'exutoire de la Souffel.

La fourchette haute de ce taux d'export est à comparer à la donnée locale obtenue en 2016 sur une portion de la commune d'Alteckendorf (en tête de bassin du Minversheimerbach, affluent de la Zorn, 47 ha) avec un taux d'export massique de 0.29 % du S-métolachlore appliqué pour une saison sans évènement érosif. La fourchette basse de ce taux d'exportation sur la Souffel correspond également au 0.07% observé dans le sud-ouest sur le bassin versant maïsicole de la Save.

Ce taux d'export massique sur la Souffel en 2019 est deux ordres de grandeur plus faible que celui observé en 2012 sur le bassin d'Alteckendorf qui avait atteint 3.4 % de la quantité appliquée sur la saison culturale (avril-Septembre) dont 49% de la masse exportée de S-métolachlore était associée aux particules de sol érodées. Plus de 96% de l'export de S-métolachlore vers la rivière avait eu lieu lors d'un unique épisode érosif massif (51 mm dans la nuit du 20 au 21 mai 2012).

Sur la base unique de 2019, la fourchette d'export sur la Souffel indique une valeur de base, susceptible d'être significativement plus élevée (>1%) en cas d'épisodes érosifs.

7. Les parcelles, siège principal de la dégradation du S-métolachlore

Le sol agricole constitue le compartiment sur lequel est appliqué le S-métolachlore mais représente également le siège principal de la dégradation du S-métolachlore dans le bassin versant.

Un suivi mensuel des concentrations du S-métolachlore et des signatures isotopiques a été réalisé sur les 10 premiers cm de sol des parcelles proches (< 100 m) des deux exutoires amont et aval de l'Avenheimerbach (S1 – amont et S2 – aval) (Figure 10B). Les signatures isotopiques n'ont pas pu être valorisées en raison de quantités extraites trop faibles. Ce suivi a donc été couplé à une modélisation de la dégradation en fonction de la température et de la teneur en eau du sol et des signatures isotopiques (Alvarez-Zaldivar et al., 2018) qui montre que $87 \pm 2\%$ du S-métolachlore a été dégradé localement dans cette couche superficielle de sol au cours de la saison culturale. Cette dégradation implique l'apparition de plusieurs produits de transformation dont l'ESA, l'OXA, le NOA-413173 et le CGA-357704, plus solubles, qui seront lessivés lors des épisodes de pluie successifs.

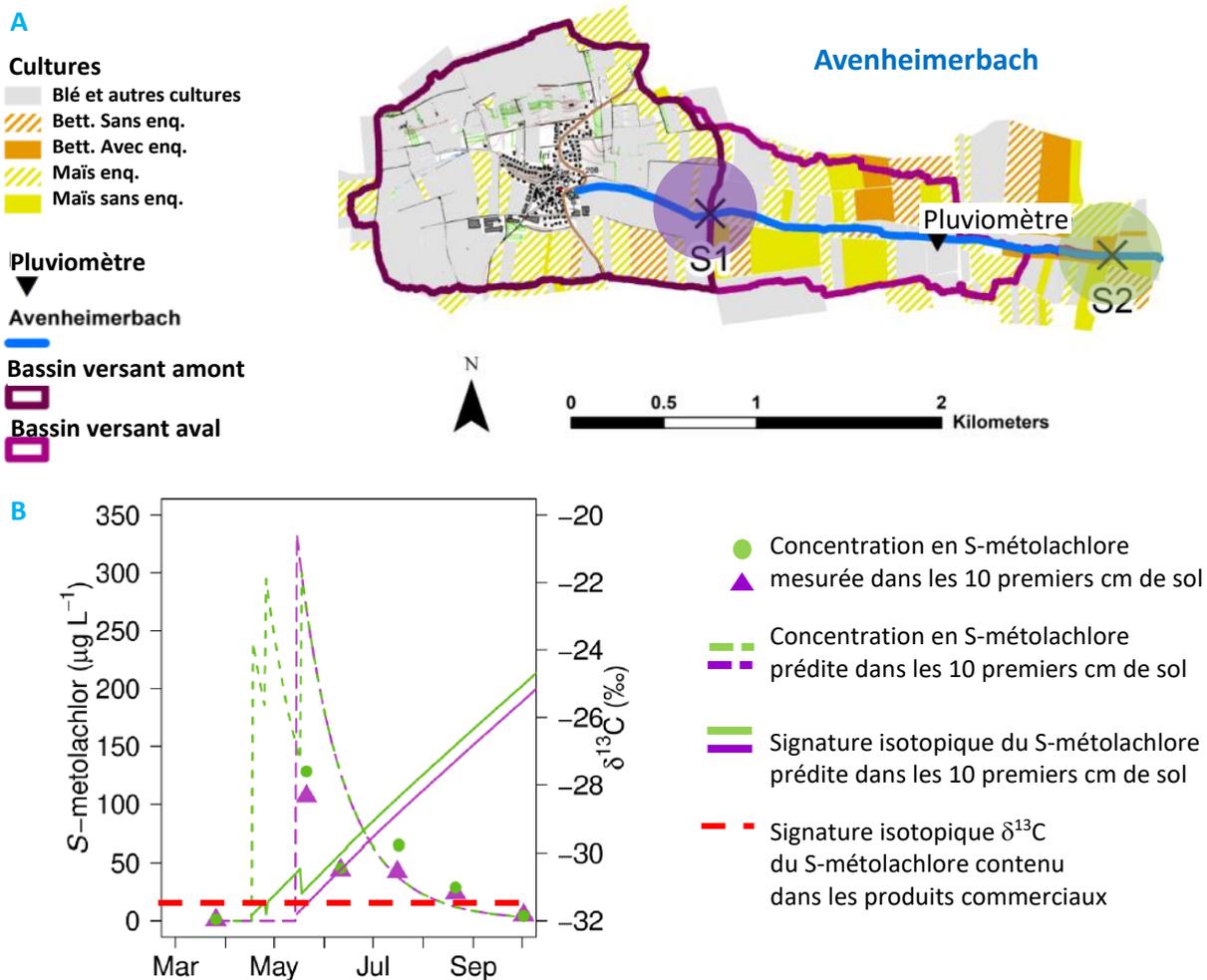


Figure 10 : Prélèvements de sol autour de S1 (violet) et S2 (en vert) pour la quantification de la concentration en S-métolachlore (A) et évolution de la concentration en S-métolachlore observée et simulée dans les 10 premiers cm de sols et simulation de sa signature isotopique (voir l'encart n°1 sur l'AICS en début de rapport) traduisant la dégradation (autour de S1 en violet et de S2 en vert) (B)

La contribution des produits de transformation du S-métolachlore est discutée dans la section n°11. Les 13 % restant du S-métolachlore appliqués et non dégradés à la fin octobre, correspondent à la fois à la portion

volatilisée (entre 1 et 5% selon les études), prélevée par les plantes, ce qui a été entraîné par ruissellement et infiltration et à ce qui reste dans le sol à la fin de la campagne de mesure (Lefrancq et al., 2017).

8. Une très faible capacité « d'auto-épuration » du S-métolachlore de l'Avenheimerbach

A l'échelle de la Souffel sur l'ensemble des 79 km de linéaires de rivières, la dégradation du S-métolachlore au sein des cours d'eau sur la saison culturale est estimée à 12.7 ± 3.1 %. Cela indique une capacité limitée de dégradation de cet herbicide dans la rivière. La dégradation n'atteint pas 2% dans le tronçon de l'Avenheimerbach.

A l'échelle des 2.2 km de linéaire de l'Avenheimerbach (Figure 11A), moins de 2% de la masse en amont est dégradée. Cela s'explique principalement du fait du temps de transit réduit entre 1.4 et 1.7 h et à une interaction verticale limitée avec la zone hyporhéique (interface eau de surface-eau souterraine) notamment en raison du profil morphologique peu diversifié.

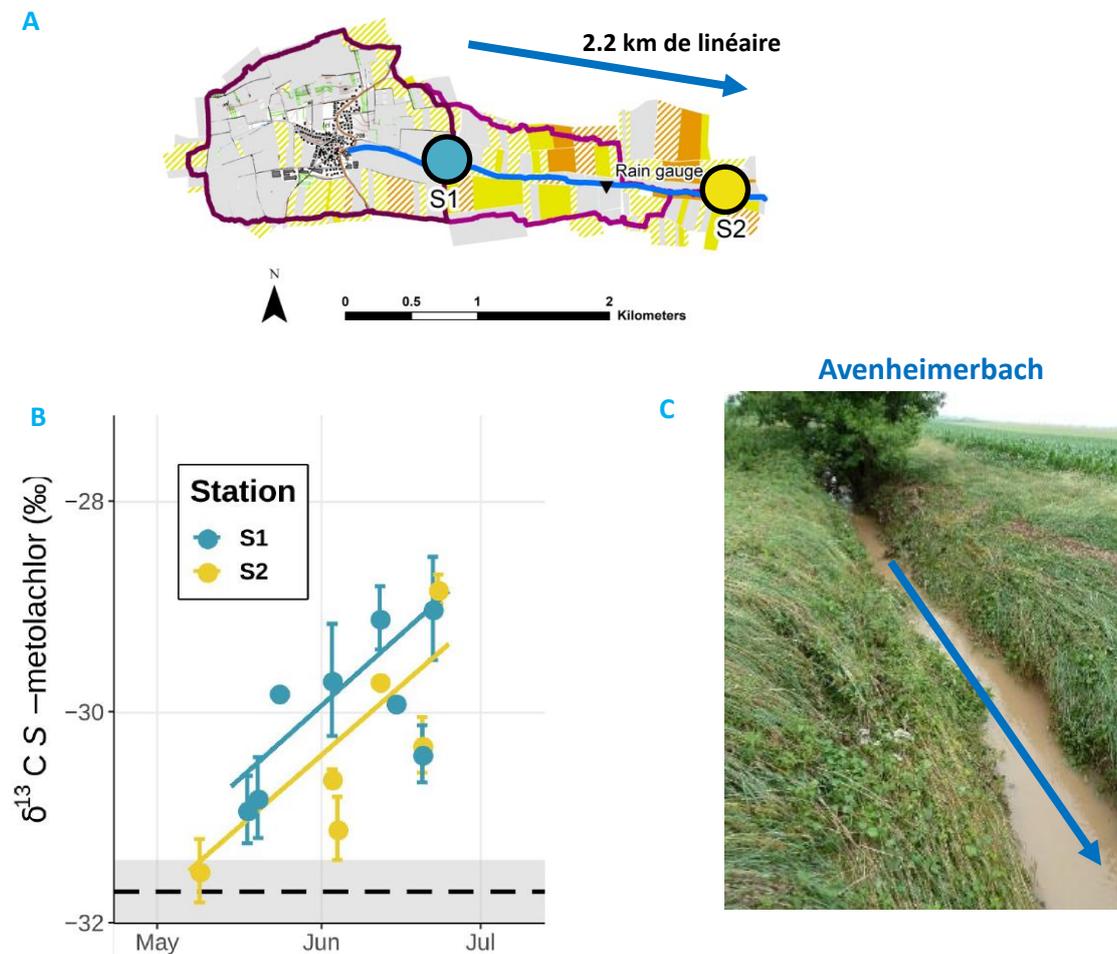


Figure 11 : Localisation des points amont (bleu) et aval (en jaune) sur l'Avenheimerbach (A) et évolution des signatures isotopiques du carbone contenu dans le S-métolachlore mesuré dans la phase dissoute en amont et en aval de l'Avenheimerbach lors de la saison 2019, avec un rappel de la section de mesure à aval de l'Avenheimerbach (C)

Cette estimation repose sur les constantes de dégradation du S-métolachlore issues des expériences au laboratoire de biodégradation à l'interface eau et sédiment (Droz et al., 2021) et de photolyse dans la colonne d'eau (Drouin et al., 2021).

Sur l'Avenheimerbach, l'évolution saisonnière de la signature isotopique $\delta^{13}C$ du carbone constituant le S-métolachlore en amont (en bleu, figure 11B) et en aval (en jaune, Figure 11B) met en évidence une nette

augmentation entre la signature initiale du S-métolachlore dans les produits commerciaux ($-31.7\text{‰} \pm 0.3$, pour Camix®, Mercantor Gold®, Dual Gold® et S-Metolastar®), testés grâce à une collaboration avec le Comptoir agricole trait en pointillé noir, Figure 11B) et le mois de juillet (-28.8‰). Cette signature reflète la dégradation en cours au sein des sols agricoles (voir section 7). Par contre, la comparaison de l'évolution amont-aval de cette signature isotopique durant toute la saison (pentes des 2 courbes en jaune et bleu, Figure 11B) demeure inférieure à 0.2‰ ce qui souligne un très faible taux de dégradation du S-métolachlore dans l'Avenheimerbach lui-même. Cette différence non significative n'a pas permis d'utiliser cet outil pour en déduire le degré de dégradation.

Comme le temps de transit entre S1 et S2 est réduit (entre 1.4 et 1.7h), nous avons testé l'effet d'un scénario qui viserait à doubler ce temps de transit et qui correspondrait par exemple à un reméandrage du cours d'eau. Une modélisation de ce tronçon en doublant sa longueur n'a permis d'obtenir sur la saison qu'une dégradation de 3% du S-métolachlore le long de ce linéaire. Ainsi, si la renaturation est bénéfique sur le fonctionnement hydro-écologique des cours d'eau, cette simulation met en évidence la limite sur la dégradation du S-métolachlore et plus généralement sur les pesticides solubles et modérément hydrophobes, comme le S-métolachlore.

A l'échelle de la Souffel, un bilan de masses utilisant les débits et masses de S-métolachlore rejetés par les stations d'épurations et mesurés en rivière permet d'évaluer à $12.7 \pm 3.1\%$ la dégradation du S-métolachlore le long des 79 km de linéaires de rivière. Ceci montre une capacité limitée d'auto-épuration du S-métolachlore dans ce linéaire, ce qui est confirmée par la proximité de la signature isotopique simulée dans les sols au cours de la saison (Figure 12, courbes bleu et mauve) et celle mesurée à l'exutoire du bassin versant (Figure 12, triangles rouges).

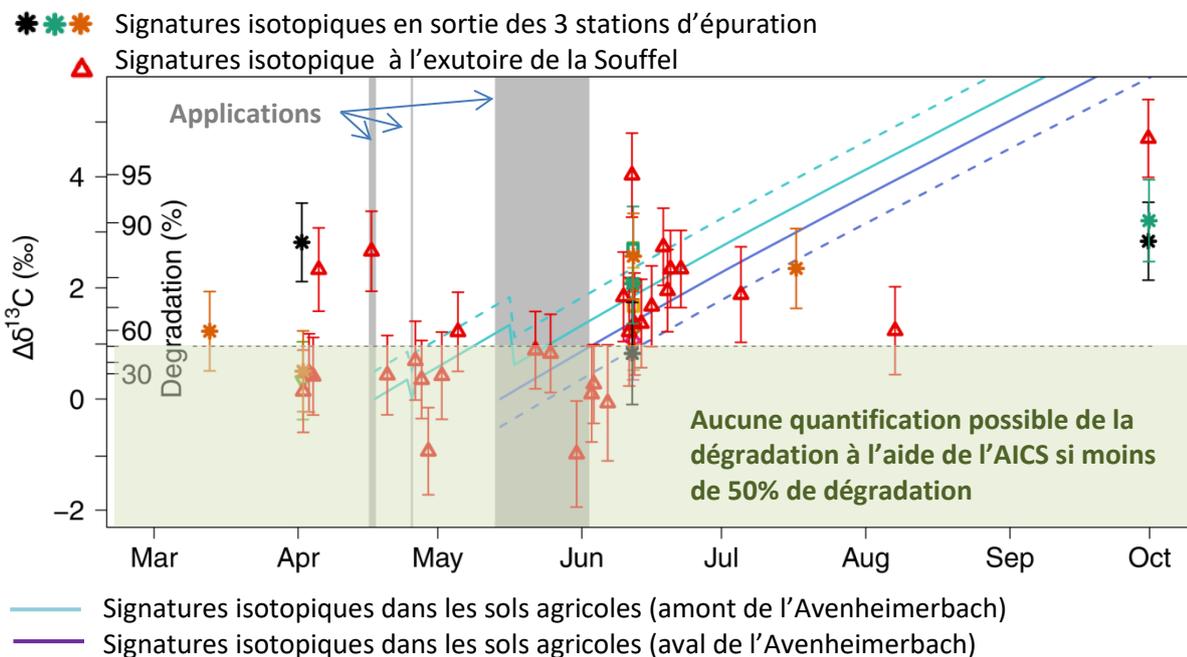


Figure 12 : Evolution saisonnière de la signature isotopique de S-métolachlore (voir encart sur l'AICS en début de rapport) en sortie de stations d'épuration (étoiles noire, verte et orange) et à l'exutoire de la Souffel (triangle rouge), avec un rappel des périodes d'application du S-métolachlore sur l'Avenheimerbach et de l'évolution des signatures isotopiques dans les 10 premiers cm de sol des parcelles à moins de 100m de la station amont et aval de l'Avenheimerbach. La zone verte souligne la limite de quantification de la dégradation qui est possible pour un $\Delta\delta^{13}\text{C} \geq 1\text{‰}$ et donc une dégradation $\geq 50\%$

9. L'apport du S-métolachlore est homogène sur l'ensemble de la Souffel

L'année 2019, peu ruisselante, et le suivi spatial mensuel hors crue ne permettent pas de hiérarchiser des secteurs à risque accru de transport de S-métolachlore. Cette homogénéité des apports de S-métolachlore peut s'expliquer par une proportion de surface en maïs et en betterave homogène sur l'ensemble des sous-bassins.

Les neuf points du suivi mensuel sur la Souffel permettent de caractériser l'évolution amont-aval sur 11 tronçons distincts (Figure 13). Cette analyse montre que la concentration évolue d'un mois à l'autre, mais qu'à chaque date de prélèvement la concentration n'évolue pas significativement de l'amont à l'aval des tronçons, en se situant sur une ligne 1:1. Ceci traduit un apport homogène par écoulements de sous-surface et souterrains.

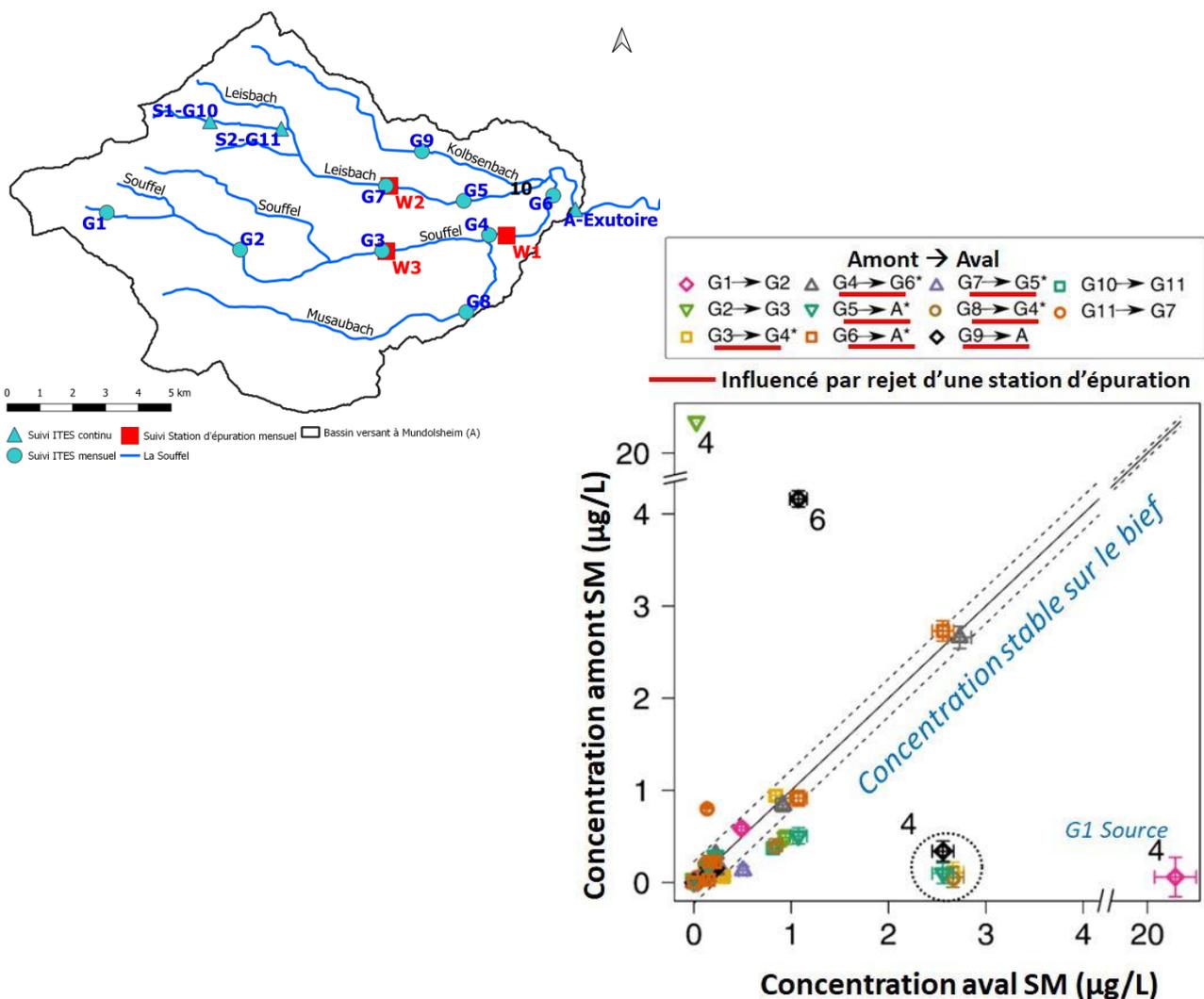


Figure 13 : Concentration de S-métolachlore en amont (ordonnée) et en aval (abscisse) des 11 tronçons de la Souffel suivis mensuellement. Les sept tronçons influencés par un rejet de station d'épuration sur le tronçon ou à l'amont sont soulignés en rouge. La ligne théorique noire représente l'équilibre des concentrations le long du tronçon (concentration amont = concentration aval). Pour les points s'éloignant de cette droite, le numéro du mois est indiqué 4 = avril et 6 = juin. La lettre A correspond à l'exutoire de la Souffel

A l'exception du tout début de saison (points identifiés « 4 » pour avril), les apports des stations d'épuration ne modifient pas significativement les concentrations amont et aval sur les sept tronçons concernés. Pour ces trois points observés en avril avec une plus forte concentration à l'aval, nous faisons l'hypothèse d'un

rejet de S-métolachlore directement entre la cour de ferme et la station d'épuration, alors que le S-métolachlore pulvérisé au champ n'a pas encore été mobilisé lors d'épisodes pluvieux. Le seul apport marqué sur un tronçon sans rejets de stations d'épuration a été observé en avril entre la source de la Souffel à Kuttolsheim (G1 source) et le point aval traduisant un apport significatif de S-métolachlore sur la portion de territoire entre ces deux points. Sur ce tronçon, les données des mois suivant mettent en évidence une concentration équivalente entre la source et le point aval suggérant une contamination de la source par le S-métolachlore appliqué à l'amont de celle-ci.

Inversement, les trois points présentant des concentrations significativement plus élevées à l'amont qu'à l'aval sont :

- Le tronçon sans station d'épuration entre G2 et G3 sur la Souffel en avril pour lequel un traitement précoce a pu être réalisé à l'amont mais pas encore sur le sous-bassin du tronçon induisant une dilution et une diminution des concentrations.
- le tronçon du Kolbsenbach de G9 jusqu'à l'exutoire (A) à l'amont duquel un probable traitement tardif (mi-juin) induit une concentration plus forte qu'à l'exutoire de la Souffel où le reste du réseau hydrographique joue un rôle de dilution.
- le tronçon G11 vers G7 montre une potentielle dilution avec une réduction de la concentration à l'aval des sous-affluents du Leisbach.

Sur l'Avenheimerbach, la mesure en continue des débits permet de faire l'analyse amont-aval directement en masse, soit en gramme de S-métolachlore par jour et par m² pour pouvoir normaliser les flux par la surface des sous-bassins amont et aval.

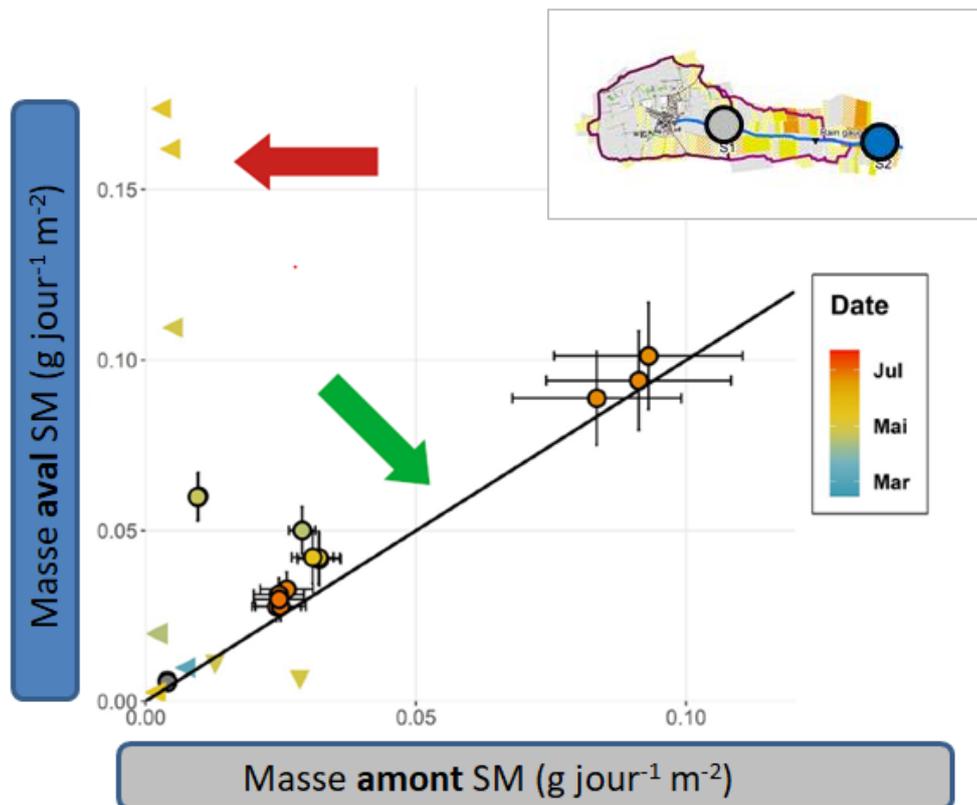


Figure 14 : Masse en aval (ordonnée) et en amont (abscisse) de l'Avenheimerbach. La ligne théorique noire représente l'apport homogène par unité de surface le long du tronçon (masse spécifique amont = masse spécifique aval ; en g par jour et par m²)

Comme à l'échelle de la Souffel, la quasi-totalité des points de mesures s'alignent sur la droite 1:1, traduisant un apport homogène des flux de S-Métolachlore par unité de surface entre l'amont et l'aval du tronçon de l'Avenheimerbach. Les quelques points indiqués par la flèches rouges (Figure 14) traduisent un export de S-métolachlore plus important depuis les parcelles entre l'amont et l'aval du tronçon par rapport à celles à l'amont de la station amont de l'Avenheimerbach.

10. Les stations d'épuration contribuent largement aux masses exportées

Pour les sept prélèvements mensuels, les rejets des stations contribuent entre 12 % et 100 % de la masse de S-métolachlore à l'aval des 3 tronçons impactés. Sur la période mars-octobre 2019, la contribution des rejets de stations d'épurations est estimée à $53 \pm 24\%$ de la masse de S-métolachlore mesurée à l'exutoire.

Les rejets des trois stations d'épuration contribuent significativement au débit de la Souffel voire totalement durant la période estivale, hors épisodes de pluie qui réactive la contribution « naturelle » de la Souffel (Figure 15). Le suivi mensuel de mars à Octobre d'un point situé immédiatement à l'amont de chacun des rejets et du rejet lui-même visait à quantifier la contribution de ces rejets aux flux de S-métolachlore. Celui-ci est quasi-systématiquement quantifié dans 95% des 21 échantillons en phase dissoute du suivi mensuel des rejets des trois stations d'épuration. Cette source ponctuelle de contamination par le S-métolachlore confirme les résultats de l'étude SDEA menés en 2015.

Pour les sept prélèvements mensuels réalisés en 2019, les rejets des stations contribuent à entre 12 % et 100 % de la masse de S-métolachlore à l'aval des 3 tronçons impactés (Figure 15). Sur la période MarS-Octobre, la contribution des rejets de stations d'épurations est estimée à $53 \pm 24\%$ à la masse de S-métolachlore mesurée à l'exutoire. Cette estimation s'appuie sur les signatures isotopiques du S-métolachlore et les débits à l'exutoire et en sortie de stations d'épuration.

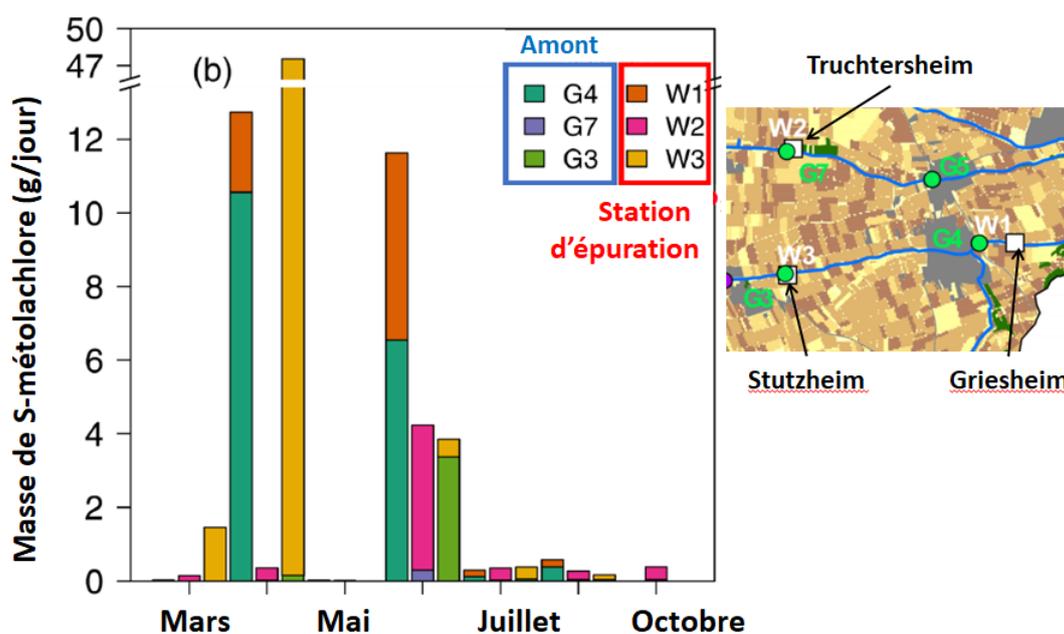


Figure 15 : Contribution relative de la Souffel et des rejets de stations d'épuration sur les trois tronçons concernés. Chaque barre correspond à une mesure ponctuelle des masses de S-métolachlore dans la Souffel à l'amont des rejets des stations et du rejet lui-même, réalisée chaque mois de Mars à Octobre) (excepté septembre)

La contribution de ces rejets ponctuels, mise en évidence sur le S-métolachlore, concerne très probablement d'autres molécules actives. Une recherche d'autres micro-polluants à l'aide d'une méthode d'analyse RESTECK sur 304 composés quantifiables en chromatographie en phase gazeuse sur l'ensemble des échantillons mensuels en sortie de stations d'épuration a ainsi mis en évidence la présence de plusieurs autres herbicides utilisés en agriculture : le diméthénamide (dans les produits commerciaux *Isard*, *Novall*, *Alabama*), l'éthofumésate (*Boxer* et *Betanal*), le lénacil (*Venzar*), la terbuthylazine (*Calaris*) et la diméthazone

(*Colzor, Centium, Clomastar, ...*). Cette observation souligne donc, qu'en parallèle de la prévention et de la réduction de la pollution diffuse, une voie d'amélioration de la qualité de l'air consiste à travailler sur des actions spécifiques pour stopper cette pollution ponctuelle d'origine agricole en amont des réseaux d'assainissement.

Les signatures isotopiques du S-métolachlore en sortie de stations d'épuration permettent d'estimer la contribution de la dégradation (incluant un clivage moléculaire) depuis la source par rapport à la dissipation totale du S-métolachlore (par dilution, sorption). Il est ainsi possible de remonter aux masses initiales ayant contribué à ces rejets. Sous réserve d'hypothèses réalistes des masses résiduelles des fonds de cuve lors du lavage, une estimation du nombre équivalent de pulvérisateurs ayant pu contribuer à cette masse initiale peut être fournie.

11. La dégradation quasi-complète du S-métolachlore est associée à une prédominance de produits de transformation persistants durant la saison

Les deux produits de transformation prédominants du S-métolachlore, quelle que soit la saison, sont l'ESA et le NOA avec une contribution minoritaire de l'OXA. La prépondérance de l'ESA et le NOA comme produits de transformation observés sur la Souffel souligne la prédominance des écoulements de sous-surface avant les écoulements de surface qui génèrent majoritairement de l'OXA. 40% des prélèvements de 2019 dépassent la limite de potabilité de 0.1 µg/L en considérant le S-métolachlore mais 80% dépassent la limite de 0.5 µg/L en considérant le S-métolachlore, l'ESA et le NOA. Ceci souligne l'impact de ces deux produits de transformation sur la qualité des eaux de surface

Sur la saison marS-octobre, le bilan de masse entre les applications estimées et les masses mesurées à l'exutoire indique que 98.9 ± 4.7 % du S-métolachlore appliqué a été dégradé dans les sols et, dans une moindre mesure (voir éclairage 8), dans la rivière. Cette dégradation s'accompagne d'une formation de produits de transformation dont quatre d'entre eux sont suivis et trois sont systématiquement quantifiés sur les huit points du suivi mensuel de l'AERM sur la Souffel en 2019 : ESA, OXA, le NOA-413173 (Figure 16). Le CGA-357704 n'a jamais été quantifié en 2019. La proportion du S-métolachlore sur la somme du S-métolachlore et des trois produits de transformation (exprimée en équivalent molaire S-métolachlore) représente 49.2 ± 28.9 % au printemps, 26.1 ± 14.1 % en été, 14.2 ± 6.0 % à l'automne et 4.4 ± 2.1 % en hiver.

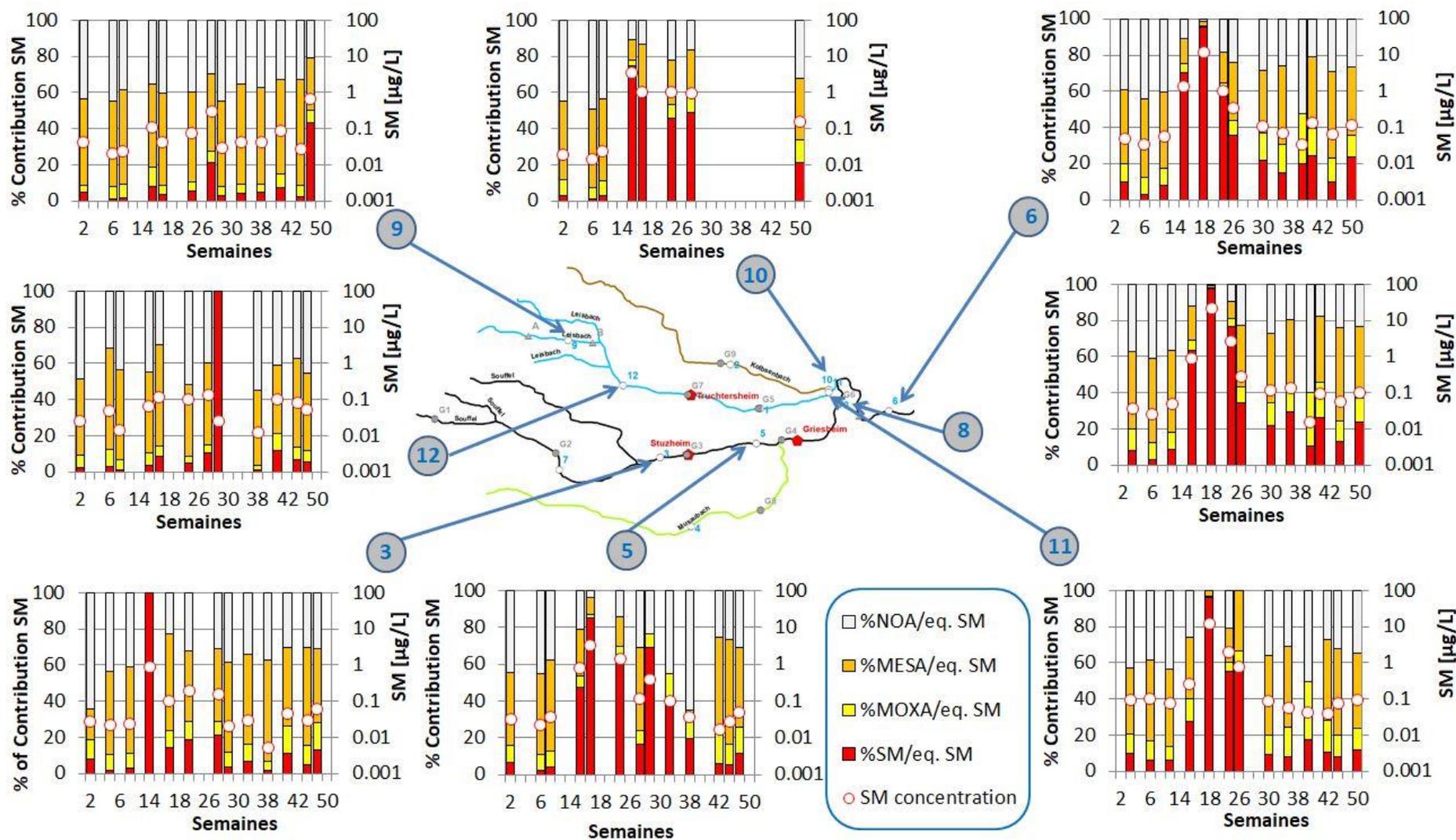


Figure 16 : Concentrations en S-métolachlore sur les huit stations de suivi mensuel de l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse en 2019 (sur l'axe secondaire des ordonnées à droite de chaque graphique, figurés rond rouge avec fond blanc, représentées en échelle logarithmique de 0.001 à 100 $\mu\text{g/L}$) et contribution relatives des trois produits de transformation (le CGA n'a jamais été quantifié en 2019) à la concentration totale (calculée comme la somme de la concentration de S-métolachlore et de celles des trois produits de transformation exprimées en équivalent molaire S-métolachlore ; axe des ordonnées à gauche des graphiques)

Cette évolution saisonnière souligne l'impact de la période d'application au printemps où les concentrations en *S*-métolachlore sont équivalentes à la somme des quatre produits de transformation (exprimée en équivalent molaire *S*-métolachlore). Les concentrations en produits de transformation augmentent au cours de la saison, contribuant pour plus de 95% de la somme « *S*-métolachlore + produits de transformation » en hiver (Figure 16). Cette évolution s'accompagne d'une diminution de deux ordres de grandeurs de la concentration en *S*-métolachlore avec $2.52 \pm 3.10 \mu\text{g/L}$ au printemps, $0.24 \pm 0.31 \mu\text{g/L}$ en été, $0.10 \pm 0.07 \mu\text{g/L}$ à l'automne et $0.04 \pm 0.02 \mu\text{g/L}$ en hiver (Figure 16).

Les deux produits de transformation prédominants en termes de concentration (exprimée en équivalent molaire *S*-métolachlore) sont l'ESA et le NOA quelle que soit la saison avec une contribution minoritaire de l'OXA. La prépondérance de l'ESA et le NOA comme produits de transformation observés sur la Souffel souligne la prédominance des écoulements de sous-surface devant les écoulements de surface qui génèrent majoritairement de l'OXA comme observé sur le bassin versant d'Alteckendorf en 2012 (Lefrancq et al. 2017 et Rose et al., 2018).

A l'échelle de l'Avenheimerbach, le point mis en place par l'AERM au milieu du tronçon étudié permet de suivre la contribution des produits de transformation lors des trois prélèvements mensuels qui succèdent aux applications.

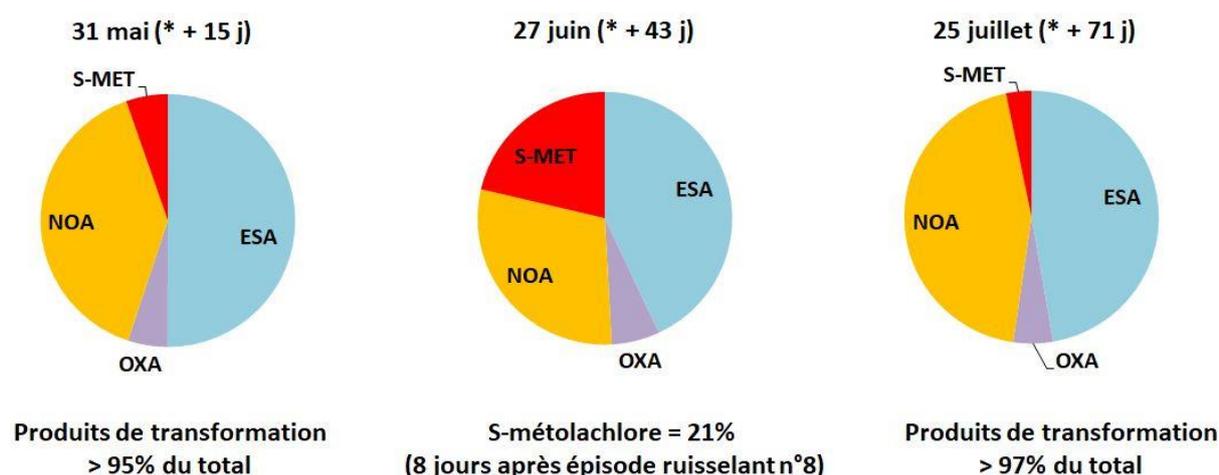


Figure 17 : Evolution temporelle (entre mai et juillet 2019) de la contribution des produits de transformation du *S*-métolachlore (ESA, OXA et NOA) à la somme des concentrations (*S*-métolachlore « *S*-MET » + produits de transformation exprimés en équivalent molaire *S*-métolachlore « ESA », « OXA » et « NOA ») sur le point de l'AERM sur l'Avenheimerbach. * dernières application mi-mai

Quinze jours après la dernière application connue, le *S*-métolachlore ne représente que 5% du totale des concentrations de *S*-métolachlore et de ses quatre produits de transformation (exprimées en équivalent molaire *S*-métolachlore ; Figure 17). Plus d'un mois après la dernière application connue, la proportion de *S*-métolachlore repasse à 21% lors du prélèvement de juin qui fait suite à un épisode ruisselant (le 8^{ème} épisode de pluie depuis le début de la saison). Ceci traduit le risque de remobilisation d'une partie du *S*-métolachlore présent dans les sols par ruissellement et érosion. Deux mois après les dernières applications, fin juillet 2019, le *S*-métolachlore représente moins de 5% du total des concentrations (*S*-métolachlore + trois produits de transformation) traduisant l'épuisement du stock de *S*-métolachlore exportable (voir section 3, Figures 8 et 9).

L'OXA a un seuil de vigilance de $0.9 \mu\text{g/L}$ qui n'est jamais dépassé en 2019 avec une moyenne des concentrations sur la Souffel égale à de $0.082 \pm 0.037 \mu\text{g/L}$ (min = 0.015 ; max = $0.232 \mu\text{g/L}$,

quantification dans 100% des 96 échantillons). L'ESA présente une moyenne des concentrations de $0.48 \pm 0.23 \mu\text{g/L}$ (min = 0.07 ; max = 1.19 $\mu\text{g/L}$). L'ESA est quantifié dans 94% des 96 échantillons (limite de quantification = 0.01 $\mu\text{g/L}$). Le NOA est détectée dans 98% des 96 échantillons en 2019 (limite de quantification = 0.02 $\mu\text{g/L}$) avec une moyenne des concentrations de $0.424 \pm 0.268 \mu\text{g/L}$ (min = 0.084 ; max = 1.490 $\mu\text{g/L}$).

En 2022, l'ANSES avait retenu l'ESA et le NOA comme produits de transformation pertinents pour l'évaluation de la potabilité des eaux vis-à-vis de la consommation humaine, et donc soumis au seuil de 0.1 $\mu\text{g/L}$. En septembre 2022, l'ESA et le NOA ont été requalifiés comme "non pertinents" sur la base des connaissances actuelles avec un seuil de 0.9 $\mu\text{g/L}$. La pertinence de l'ESA et du NOA reste cependant soumis à la production de nouvelles connaissances écotoxicologiques. En adoptant un principe de précaution si ces deux produits de transformations étaient de nouveaux considérés comme pertinents et sur la base des données mensuelles de l'AERM sur les huit points de mesures, 40% des prélèvements de 2019 dépassent la limite de potabilité de 0.1 $\mu\text{g/L}$ en considérant uniquement le S-métolachlore, et 80% dépassent la limite de potabilité multi-molécules de 0.5 $\mu\text{g/L}$ en considérant le S-métolachlore, l'ESA et le NOA. Ceci souligne l'impact prépondérant de l'ESA et du NOA sur la qualité des eaux de surface.

12. Le S-métolachlore contribue à la somme totale des pesticides en 2019

Le S-métolachlore représente 11.9 ± 18.1 % de la somme totale des concentrations des pesticides (exprimées en $\mu\text{g/L}$ sur les échantillons bruts intégrant les phases dissoutes et particulaires) mesurées par l'AERM sur la Souffel en 2019.

Cette étude a ciblé le S-métolachlore, herbicide appliqué sur le maïs et la betterave. L'étude des données mensuelles de l'AERM permet de replacer les concentrations du S-métolachlore par rapport à l'ensemble des pesticides mesurés dans le cadre de ce suivi. Il est à noter que le paramètre « somme des pesticides » n'est fourni que pour 35% des 98 échantillons prélevés en 2019 sur les huit stations. Lorsque ces deux paramètres sont fournis, le S-métolachlore représente 11.9 ± 18.1 % de la somme totale des concentrations des pesticides mesurés par l'AERM. La portée de cette comparaison est limitée par le fait que chaque pesticide a une masse spécifique, mais elle permet de replacer la problématique du S-métolachlore dans la signature complète des activités anthropiques sur le bassin de la Souffel.

La figure 18 représente la somme des pesticides quantifiés mensuellement depuis 2014 sur la Souffel au niveau de Mundolsheim par l'AERM. Cette figure permet d'identifier la contribution significative du S-métolachlore chaque printemps, mais également sa contribution relative par rapport à la totalité des pesticides quantifiés. Ce suivi permet de souligner que la Souffel est durablement impactée par les pesticides avec un dépassement systématique depuis 2014 du seuil de potabilité ($0.5 \mu\text{g/L}$ pour le total des substances recherchées). La période « printemps-été » dépasse également depuis 2014 le seuil de potabilisation ($5 \mu\text{g/L}$ tous pesticides confondus) qui interdirait toute utilisation de l'eau de la Souffel pour produire de l'eau potable quels que soient les processus de traitement envisagés. La comparaison entre les années est à considérer avec précaution puisque le nombre de substances et de produits de transformation varie et augmente au cours des 7 dernières années. Sur 2019, l'ensemble des pesticides dépasse chaque mois $4 \mu\text{g/L}$ à l'aval de la Souffel à Mundolsheim.

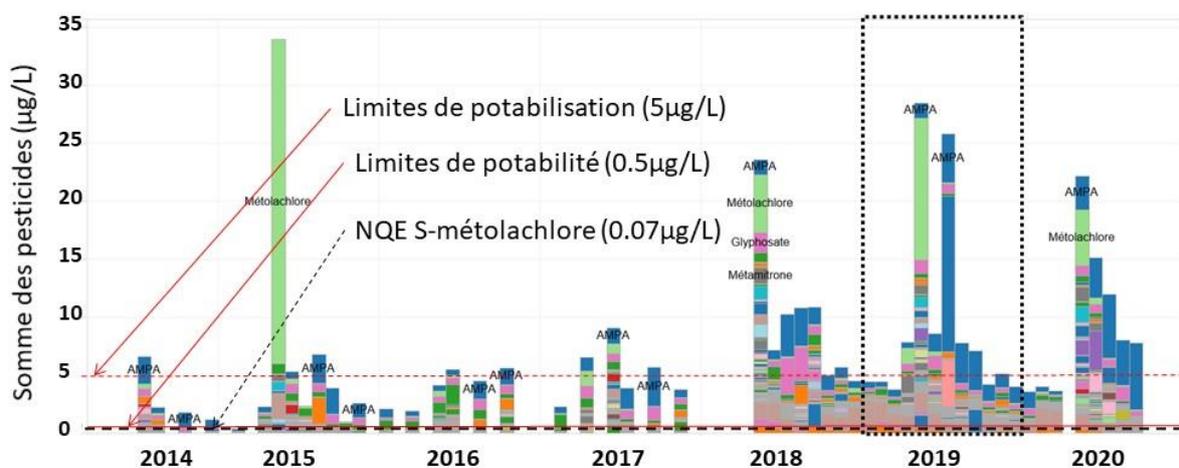


Figure 18 : Somme des pesticides quantifiés mensuellement par l'AERM à l'aval de la Souffel (Station de Mundolsheim)

Le S-métolachlore représente donc une substance dont la contribution (et celles de ses métabolites) à la somme des pesticides mesurés en rivière est significative, et coexiste avec un cocktail d'autres substances actives.

Conclusions & recommandations

La mobilisation des acteurs de la Souffel (agriculteurs, Chambre d'Agriculture d'Alsace, le Comptoir agricole, SDEA, AERM, EMS) a permis de réaliser cette étude concernant le fonctionnement hydrologique de la Souffel et du transfert de pesticides de mars à octobre 2019 à la double échelle d'une tête de bassin versant l'Avenheimerbach (3.6 km²) et du bassin de la Souffel (121 km²). L'objectif du groupe connaissance Souffel était de **produire un état des lieux permettant de reconquérir durablement la qualité de l'eau pour protéger la santé humaine et environnementale.**

En termes quantitatif, cette étude confirme la **forte vulnérabilité de la Souffel aux épisodes de sécheresse** avec des assèchs de certaines portions comme le Musaubach sur toute la période estivale. Les débits spécifiques (débit par unité de surface de bassin versant) de la Souffel sont significativement plus faibles que pour les rivières voisines. Sur les portions de rivière à l'aval du bassin versant, les rejets des stations d'épuration assurent temporairement la quasi-totalité des débits en période estivale. **Par conséquent, pour assurer la pérennité amont-aval et au cours de l'année de cette ressource cette vulnérabilité en terme quantitatif doit être intégrée non seulement dans la gestion des prélèvements d'eau actuels et envisagés dans la Souffel mais également dans le cadre des projets de réutilisation des eaux issues de la station de Griesheim sur Souffel.**

Sur la Souffel, les stations d'épuration jouent un rôle significatif de dilution des flux de nitrate car les rejets d'origine domestique sont deux fois moins concentrés que la teneur en nitrate d'origine agricole mesurée en amont des rejets. **La quantification systématique du S-métolachlore et de plusieurs autres herbicides d'origine agricole dans les rejets des stations d'épuration en 2019 confirme un problème récurrent de non-conformité des pratiques de lavage et/ou de remplissage des pulvérisateurs dans les cours de ferme connectées à ces stations. L'arrêt ferme et clair de ces pratiques permettrait une forte diminution des concentrations en pesticides à l'aval des rejets des stations, évaluée pour le S-métolachlore à la moitié des masses quantifiées à l'exutoire.**

La capacité de dilution limitée par la Souffel induit **une forte vulnérabilité de l'écosystème aquatique au transport des pesticides et produits de transformation associés depuis les parcelles.** L'étude amont-aval des concentrations du S-métolachlore dans la Souffel indique que les apports de S-métolachlore sont homogènes le long de la Souffel. Cette homogénéité des apports doit être reliée à la répartition homogène des terres arables dans le bassin de la Souffel et à la proportion importante qu'elles représentent sur l'ensemble du bassin versant. Sur la base des mesures mensuelles de l'AERM des trois dernières années (2018-2020), **les efforts en termes de réduction et de fractionnement des doses ne suffiront pas à réduire significativement les concentrations totales en pesticides et produits de transformation associées (>4 µg/L chaque mois en 2018, 2019 et 2020 avec des pics supérieurs à 20 µg/L chaque printemps).** Au vu du potentiel de dilution réduit de la Souffel et du taux de contamination chronique par les pesticides tout au long de l'année, y compris pendant les années peu érosives comme 2019, **une réduction d'au moins 50% des surfaces recevant des pesticides doit être envisagée, planifiée et accompagnée en termes de changement d'itinéraires techniques et de systèmes de culture notamment pour éviter des sols nus au printemps caractérisé par des pluies intenses.** Celle-ci permettrait de réduire d'au moins 50% la pollution diffuse et de 75% la concentration totale des pesticides, en intégrant les actions sur les pratiques de lavage dans les cours de ferme, pour

viser une concentration totale **en pesticides et produits de transformation associées** sous les 1 µg/L au cours de l'année et sous les 5 µg/L au printemps .

Cette réflexion de réduction des surfaces recevant des pesticides implique une étape de priorisation qui peut s'appuyer sur le travail mené par la Chambre Régionale d'Agriculture Grand-Est **sur la contribution des parcelles agricoles à la pollution des cours d'eau par ruissellement. Les évènements ruisselants et érosifs peuvent en effet augmenter d'un à deux ordres de grandeur les flux de pesticides transportés depuis les parcelles vers les rivières** par rapport à une année hydro-climatique sans évènements érosifs majeurs. La période « printemps-été » 2019 correspond justement à ce type de contexte hydro-climatique sans évènement érosif majeur. Ces processus de transport de surface n'ont donc joué qu'un rôle mineur sur la mobilisation du S-métolachlore et de ces produits de transformation en 2019. Avec un taux d'export apparemment faible du S-métolachlore vers la rivière, estimé entre 0.04% et 0.12% des quantités appliquées, **la saison 2019 souligne donc que la mobilisation de cet herbicide et de ses produits de transformation plus solubles par transport vertical sous les parcelles lors de l'infiltration de l'eau de pluie suffit à altérer très significativement la qualité de la Souffel** en terme de potabilité et d'impact écotoxicologique sur le milieu aquatique. **La réflexion sur la réduction des surfaces recevant des pesticides doit donc également intégrer ces transferts verticaux en préservant une portion significative du paysage de part et d'autre des cours d'eau** où les échanges entre eaux souterraines et eaux de surface ont lieu.

Rappel des recommandations

Compte tenu du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Souffel, des sources et des voies de transport des résidus de pesticides identifiées, de l'homogénéité des apports des résidus de pesticides et de la faiblesse du service écosystémique d'*auto-épuration* de la Souffel, nous recommandons :

1. De prendre en compte très sérieusement et urgemment la forte vulnérabilité en terme quantitatif de la Souffel aux épisodes de sécheresse dans les plans de gestion des prélèvements d'eau présents et futurs et dans les projets de réutilisation des eaux issues de la station d'épuration de Griesheim sur Souffel pour assurer la pérennité des écoulements de la Souffel amont-aval et au cours de l'année ;
2. De résoudre urgemment le problème récurrent de non-conformité des pratiques de lavage et/ou de remplissage des pulvérisateurs dans les cours de ferme connectées aux stations d'épuration pour réduire significativement les concentrations et les masses de pesticides transférées à l'aval des rejets de ces stations ;
3. De tenir compte sérieusement de la vulnérabilité de l'écosystème aquatique et de la très mauvaise qualité de l'eau récurrente due au transfert des pesticides et des produits de transformation associés en menant des actions d'envergure pour diminuer très significativement, soit plus de 50%, les surfaces recevant des pesticides à l'échelle de la Souffel. Ces actions doivent limiter les transferts horizontaux de surface et verticaux sous les parcelles en préservant une portion significative du paysage de part et d'autre des cours d'eau et en développant une mosaïque d'infrastructures agro-écologiques (plantation de haies, création de mares, aménagements d'hydraulique douce). Toute action qui développera sur la Souffel une agriculture sans pesticides, et plus généralement sans intrants chimiques de synthèse, sera efficace pour protéger la santé humaine mais aussi environnementale.

Strasbourg, le 2 septembre 2021,

Sylvain Payraudeau, Professeur, ENGEES

Gwenaël Imfeld, Directeur de recherche, CNRS

UMR 7063 - Institut Terre et Environnement Strasbourg (ITES)

Université de Strasbourg, ENGEES, CNRS

1, rue Blessig, 67084 STRASBOURG Cedex, France

Bibliographie

- Alvarez, P., Centler, F., Maier, U., Thullner, M., Imfeld, G., 2016. Biogeochemical modelling of in situ biodegradation and stable isotope fractionation of intermediate chloroethenes in a horizontal subsurface flow wetland. *Ecological Engineering*. 90, 170-179.
- Alvarez-Zaldivar, P., Payraudeau, S., Meite, F., Masbou, J., Imfeld, G., 2018. Pesticide degradation and export losses at the catchment scale: insights from compound-specific isotope analysis (CSIA). *Water Research*, 139, 198-207.
- Coplen, T.B., 2011. Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and δ -ratio measurement results. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 25, 2538-2560.
- Drouin, G., Droz, B., Leresche, F., Payraudeau, S., Masbou, J., Imfeld, G., Direct and Indirect Photodegradation of Atrazine and S-metolachlor in Agriculturally Impacted Surface Water and Associated C and N Isotope Fractionation, en préparation pour *Environmental Science: Processes & Impacts*
- Droz, B., Drouin G., Maurer L., Villette C., Payraudeau S. & Imfeld, G., 2021. Phase-Transfer and Biodegradation of Pesticides in Water–Sediment Systems explored by Compound-Specific Isotopes Analysis (CSIA) and Conceptual Modeling. *Environmental Science & Technology*, 55, 4720-4728.
- Elsner, M., 2010. Stable isotope fractionation to investigate natural transformation mechanisms of organic contaminants: principles, prospects and limitations. *Journal of Environmental Monitoring*. 12, 2005-2031.
- Fenech, C, Rock, L, Nolan, K, Tobin, J, Morrissey, A., 2012. The potential for a suite of isotope and chemical markers to differentiate sources of nitrate contamination: A review. *Water Research*. 46, 2023-2041.
- Fenner, K., Canonica, S., Wackett, L.P., Elsner, M., 2013. Evaluating Pesticide Degradation in the Environment: Blind Spots and Emerging Opportunities. *Science*. 341, 752-758.
- Imfeld, G., Alvarez-Zaldivar, P., Wisselmann, S., Lefrancq, M., Payraudeau, S., 2016. Compound-specific Isotope Analysis (CSIA) of pesticides at the catchment scale. JESIUM (Joint European Stable Isotopes User group Meeting), 4–9 September, Ghent University, Belgium.
- Imfeld, G., Kopinke, F.D., Fischer, A., Richnow, H., 2014. Carbon and hydrogen isotope fractionation of benzene and toluene during hydrophobic sorption in multistep batch experiments. *Chemosphere*. 107, 454-461.
- Imfeld, G., Nijenhuis, I., Nikolausz, M., Zeiger, S., Paschke, H., Drangmeister, J., Grossmann, J., Richnow, H.H., Weber, S., 2008. Assessment of in situ degradation of chlorinated ethenes and bacterial community structure in a complex contaminated groundwater system. *Water Research*. 42, 871-882.
- Lefrancq, M., Payraudeau, S., Guyot, B., Millet, M., Imfeld, G., 2017. Degradation and transport of the chiral herbicide S-metolachlor at the catchment scale: combining observation scales and analytical approaches. *Environmental Science & Technology*. 51(22):13231-13240.
- Mariotti, A., Germon, J.C., Hubert P., Kaiser, P., Letolle, R., Tardieux, A., Tardieux, P., 1981. Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: Some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes. *Plant Soil*. 62 (3), 413-430.
- Nestler, A., Berglund, M., Accoe, F., Duta, S., Xue, D., Boeckx, P., Taylor, P., 2011. Isotopes for improved management of nitrate pollution in aqueous resources: review of surface water field studies. *Environmental Science and Pollution Research*. 18, 519-533.
- Ohte, N., 2013. Tracing sources and pathways of dissolved nitrate in forest and river ecosystems using high-resolution isotopic techniques: a review. *Ecological Research*. 28, 749-757.
- Rose, E.R., Coupe R.H., Capel, P.D, Webb, R.M.T, 2018. Holistic assessment of occurrence and fate of metolachlor within environmental compartments of agricultural watersheds. *Science of the Total Environment*, 612:708-719.