

SURVENANCE, ORIGINE ET COMPORTEMENT DES MICROPOLLUANTS DANS LE SYSTÈME KARSTIQUE ALIMENTANT LES SOURCES DU MONT DE CHAMBLON

Phases 11 & 21 (SIA 103)

Pré-étude PSC4 pour la construction de la station de production et de traitement du
Cossaux et le raccordement au réservoir de Chamblon

Période étudiée : mars 2019 à septembre 2020



Avec des remerciements au Service des Energies d'Yverdon, FCM-lab, Mandaterre et le Service de l'eau de Lausanne pour leur contribution majeure.

Table des matières

1. Mesure C4 du PDRDE	2
1.1. Contexte hydrogéologique.....	2
1.2. Préambule.....	4
1.3. Cadre de l'étude préliminaire.....	6
2. Méthodologie.....	7
3. Résultats et discussion.....	13
3.1. Résultats préliminaires	13
3.2. Analyses des micropolluants	16
3.3. Suivi de crue	21
3.4. Matière organique	26
4. Discussion générale	27
4.1. Survenance, origine et comportement des micropolluants dans le système karstique.	27
4.2. Substances problématiques décelées	35
4.3. Qualité de l'eau des deux sources.....	38
4.4. A traiter par la chaîne de traitement	39
4.5. Proposition de chaîne de traitement	41
5. Conclusion	41
6. Bibliographie	43
7. Annexes	44
8.1. Annexe 1 : Descriptif et validation du monitoring.....	44
8.2. Annexe 2 : Analytes	46
8.3. Annexe 3 : Courbes de calibration	49
8.4. Annexe 4 : Débits.....	54
8.5. Annexe 5 : Résultats des pesticides.....	56
8.6. Annexe 6 : Affinités des pesticides.....	58

1. Mesure C4 du PDRDE

La Société Anonyme de Gestion des Eaux du Nord Vaudois (SAGENORD) souhaite mettre en œuvre les mesures préconisées dans son plan directeur régional (PDRDE). La mesure C4 (Figure 1), portant sur la construction de la station de production et de traitement du Cossaux et le raccordement au réservoir de Chamblon, est étudiée dans cette étude préliminaire (phases SIA 11-21). Le projet PSC4 ayant été initié par la Commune d'Yverdon-les-Bains en 2018 (Service des Energies), il a été repris, en 2019, par SAGENORD.

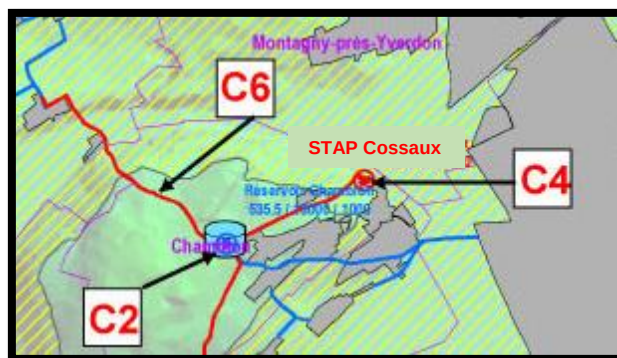


Figure 1 : Zoom sur le projet à court terme 4 (C4) du Plan directeur régional de distribution de l'eau

Suite aux résultats d'une recherche préliminaire, le Service des Energies s'est préoccupé de la problématique des micropolluants survenant dans les eaux souterraines. Les sources du Cossaux et du Moulinet seraient épisodiquement affectées par la présence de produits phytosanitaires (PPh) et de résidus de médicaments (Morasch 2013). De plus, la source du Cossaux, actuellement utilisée en tant qu'eau potable, est fréquemment mise hors service en cas de turbidité ou de teneur en matières organiques trop élevée.

Dans le cadre de la pré-étude (phase SIA 21), le bureau FCM-lab a été mandaté pour effectuer une synthèse hydrogéologique des sources du Cossaux et du Moulinet, mettant ainsi en évidence un lien clair entre l'impact hydrologique de la perte de la Feurtille, située à Baulmes, et les deux sources (FCM-lab 2018). Le rapport mentionne que « l'état actuel des connaissances hydrogéologiques sur le système karstique alimentant les sources du Mont de Chamblon peut être qualifié de bon à très bon ». Néanmoins, il met en lumière une lacune à combler, à savoir, la thématique des micropolluants. L'origine et le comportement des produits phytosanitaires et pharmaceutiques doivent être investigués durant toute une année hydrogéologique selon un éventail de produits fréquemment détectés dans les eaux souterraines, voire eaux de surface. Les analyses doivent être effectuées en fonction de trois critères : les différentes conditions d'écoulement de base (basses, moyennes et hautes eaux), les crues et le moment d'application des produits phytosanitaires.

1.1. Contexte hydrogéologique

SITUATION

Les sources du Moulinet, du Cossaux, de Grange Décoppet constituent les principales émergences du Mont de Chamblon, situées dans au contrebas nord de la commune de Chamblon. Deux zones de protection ont été délimitées pour les sources du Moulinet et du Cossaux. La première se situe à Chamblon et la seconde à Baulmes (Figure 2).

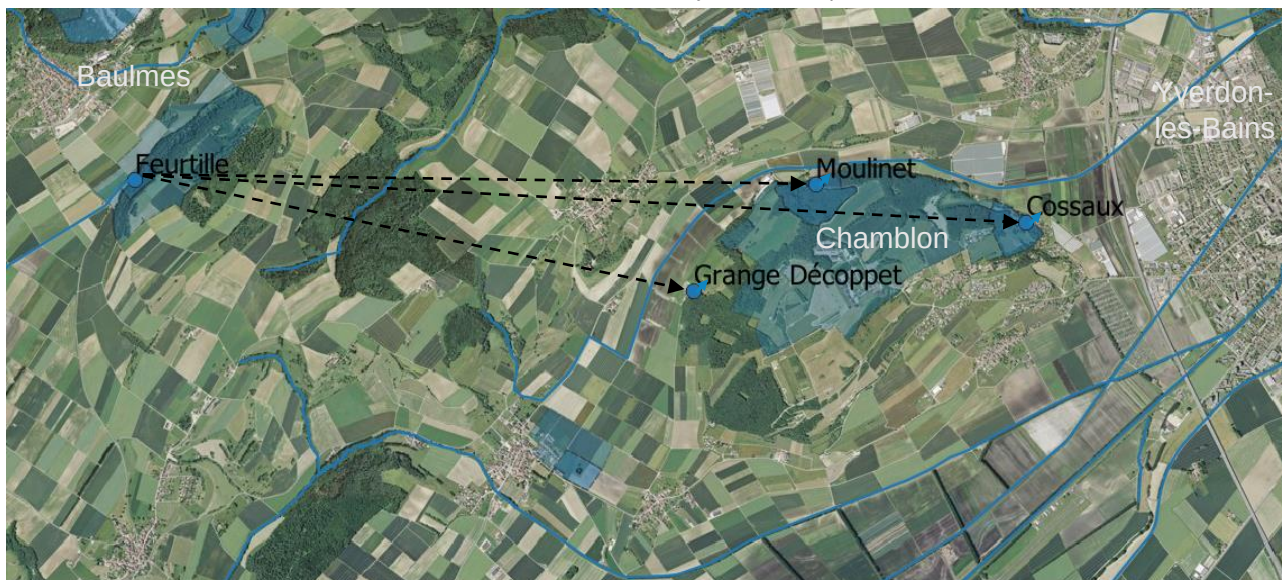


Figure 2 : Localisation des principales sources du Mont de Chamblon, de la perte de la Feurtille et des zones de protection

Les principales émergences du Mont de Chamblon sont formées de plusieurs composantes (Figure 3) : la composante « karstique » autogène¹, s'infiltrant dans la chaîne du Jura ; la composante « Feurtille » allogène, alimentée par l'eau s'infiltrant dans la perte de la Feurtille située au pied de la colline de Pipechat, au sud du village de Baulmes ; la composante « thermale » autogène, provenant des calcaires plus profonds du Malm et la composante « Mont de Chamblon » autogène, provenant de l'infiltration des précipitations dans les couches calcaires du Mont de Chamblon.

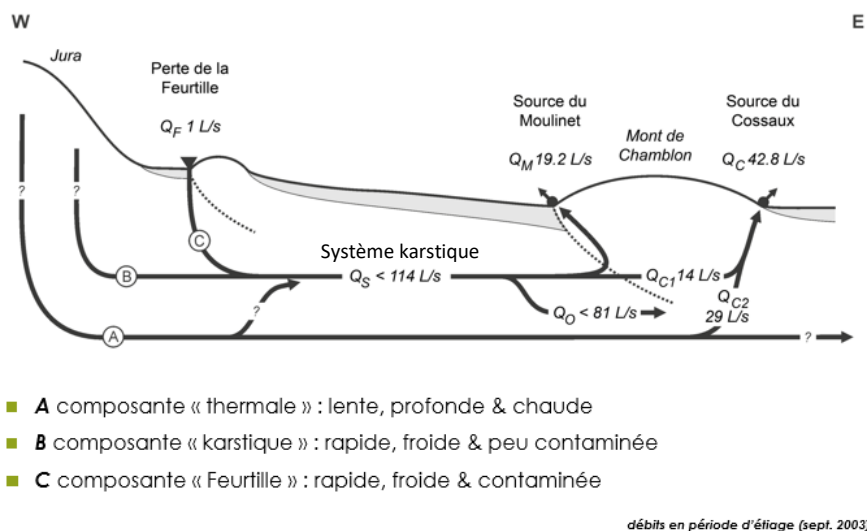


Figure 3 : Modèle conceptuel des écoulements selon FCM-lab

Grâce à des essais de traçages effectués entre la perte de la Feurtille et les principales sources du Mont de Chamblon, lors de différentes conditions d'écoulement de base, Pronk (2009) a pu démontrer un taux de restitution cumulé pour les sources du Cossaux et du Moulinet stable à env. 30%. A l'échelle annuelle, l'eau s'infiltrant à la perte contribue à 5 à 10% du volume s'écoulant dans le système karstique. Néanmoins, cette contribution varie fortement dans le temps. La qualité de l'eau des sources est ponctuellement détériorée suite à des événements de crues à la perte de la Feurtille. L'arrivée d'eau polluée allochtone se manifeste notamment par une augmentation nette de la turbidité, de la matière organique, des nitrates et des indicateurs de contaminations fécales.

¹ Nous conférons dans ce rapport que l'origine allochtone est attribuée à l'eau de surface s'infiltrant de la Feurtille alors que l'origine autochtone est liée aux processus intrakarstiques.

1.2. Préambule

CADRE LÉGAL

Les captages sont protégés par des zones de protection des eaux souterraines où notamment l'utilisation de produits phytosanitaires est réglementée. Dans les zones S1, l'emploi de produits phytosanitaires est interdit. Dans les zones S2, les substances actives ci-dessous (Tableau 1) ne sont pas autorisées, à condition que le distributeur d'eau en informe les exploitants concernés.

Interdiction d'utilisation de produits phytosanitaires dans les zones de protection des eaux souterraines ...			
... S2			... S2 et S _n ¹
Liste 1 ²	Liste 2 ³		
Aldicarbe Isoxaflutole	Aminopyralid Azoxystrobin Bentazone Chloridazone Dimethachlore Dazomet (DMTT) Fluopicolide Flutolanil Glufosinate Isoproturon Lenacile	Métazachlore Oryzalin Penconazol Penoxsulam Pethoxamide Picloram Pinoxaden S-Metolachlor Terbuthylazin Triclopyr(ester) Tritosulfuron	Cléthodime Nicosulfuron Quinmerac

Tableau 1 : Interdiction d'utilisation de produits phytosanitaires dans les zones de protection des eaux souterraines S2 selon l'OFAG. La liste 1 s'applique aussi aux zones de protection S3. Version du 1 janvier 2020

En complément de la liste du Tableau 1, l'Union suisse des paysans (USP) déconseille vivement le bentazone, le chloridazone, le fluopicolide et le S-Métolachlore dans les zones de protection S3.

Malgré leur interdiction, de nombreuses substances sont détectées dans les eaux souterraines. Le rapport des résultats de l'observatoire des eaux souterraines (NAQUA), publié par l'OFEV (2009), fait un état des lieux exhaustif des substances (substances actives et métabolites) décelées dans les eaux souterraines. Entre 2004 et 2006, il en a dénombré 297. D'après le rapport, l'atrazine ainsi que ses métabolites, la simazine et la terbuthylazine sont détectés dans une grande partie des sites analysés ; le métabolite du dichlobenil est également souvent détecté. Actuellement, toutes les substances citées sont interdites, à part la terbuthylazine. Cependant, elle est interdite en zone S2.

Afin de respecter les exigences de la législation sur les denrées alimentaires, l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux) indique une valeur de 100 ng/L à ne pas dépasser pour chaque pesticide individuel et 500 ng/L pour la somme des pesticides². Il est techniquement et économiquement impossible, à l'heure actuelle, de mesurer l'ensemble des substances actives homologuées en Suisse³ (env. 400) et les milliers de métabolites associés ainsi que les dizaines de substances persistantes après interdiction.

Le cadre légal Suisse n'établit pas de liste de substances actives à mesurer pour assurer une qualité d'eau suffisante. L'association professionnelle des distributeurs de gaz, d'eau et de chaleur à distance (SSIGE) et l'Office fédéral de la sécurité alimentaire et des affaires vétérinaires (OSAV) proposent d'établir une liste de substances problématiques au cas par cas en incluant les principes de proportionnalité et de bon sens, afin d'appliquer correctement la Directive W12 ainsi que les exigences de la LEaux. En effet, les moyens financiers des distributeurs d'eau, la taille de population alimentée, les sources de contamination potentielles, tant diffuses que ponctuelles, ainsi que les techniques d'analyses des laboratoires disponibles diffèrent d'un distributeur d'eau à l'autre.

² Dont les produits phytosanitaires et biocides, selon les critères définis principalement dans l'OPBD, OPOVA, OPPh, OEaux et LChim ainsi que les annexes correspondantes, régulièrement mises à jour.

³Liste des substances homologuées en Suisse disponible par le lien : <https://www.psm.admin.ch/fr/wirkstoffe>

La SSIGE et l'OPBD interdisent la consommation de l'eau contenant des « substances pertinentes⁴ » dont la concentration dépasse 100 ng/l. Elles sont souvent considérées comme plus persistantes et facilement lessivables. Elles seraient classées à risque pour les captages.

D'après l'expérience de la SSIGE, de manière générale, les substances à risque plus élevé sont souvent des produits de dégradation - aussi appelés des métabolites - alors que les substances mères ont tendance à se dégrader plus rapidement dans l'environnement.

Depuis janvier 2020, la liste des métabolites pertinents a été complétée par les produits de dégradation du chlorothalonil. Ces derniers se retrouvent dans la plupart des captages situés à proximité de zones agricoles.

RÉSULTATS DES CAMPAGNES PLUS ANCIENNES

La problématique des micropolluants a été peu étudiée avant 2019 dans le système karstique alimentant les sources du Mont de Chamblon. La seule étude existante est celle de Barbara Morasch (2013). Elle a pu mettre en évidence la présence de concentrations décelables de produits phytosanitaires et de résidus de médicaments. De manière générale, les concentrations des micropolluants mesurées au Moulinet sont supérieures à celles du Cossaux mais nettement inférieures à celles de la Feurtille. Les produits phytosanitaires les plus fréquemment décelés étaient : l'atrazine (interdite depuis 2012), le chloridazone (utilisé pour les cultures de betteraves) et le propiconazole (utilisé pour les cultures de céréales). Les produits pharmaceutiques sont par contre détectés à des concentrations plus importantes aux sources qu'à la Feurtille, impliquant potentiellement une autre source de pollution ponctuelle au Mont de Chamblon. Les prélèvements des échantillons n'ayant toutefois pas pris en compte le temps de transit entre la perte et les sources, les résultats des trois sites ne peuvent être directement comparés. De plus, les analyses ont été faites de manière expérimentale et sans certification de qualité. Les résultats doivent donc être utilisés avec précaution.

Deux campagnes, effectuées en 2014 par le Service de l'eau dans le cadre de l'autocontrôle, ont mis en évidence la présence de certains produits phytosanitaires et de quelques métabolites à la source du Cossaux. Une substance persiste particulièrement dans le système malgré son interdiction en 2012 : l'atrazine (ainsi que ses métabolites). Deux campagnes ont été réalisées : la première en conditions instables en hautes eaux et l'autre en moyennes eaux stables.

Dans le cadre de la deuxième campagne du Cossaux (28.04.2014), une analyse complémentaire, axée notamment sur les métabolites, a été effectuée au laboratoire TZW. Les métabolites des matières actives suivantes ont été analysées : chloridazon, chlorothalonil, diméthachlore, diméthénamide, dimoxystrobine, flufénacet, métalaxyl, métazachlore, quinmérac, S-metolachlore, tolyfluanid, topamezone, trifloxystrobin et tritosulfon. Deux métabolites ont été décelés : les métabolites du chloridazon (56 ng/L) et du chlorothalonil (R417888, 11 ng/L), alors que les substances mères correspondantes, moins persistantes, n'ont pas été détectées.

ORIGINES DE POLLUTIONS PROBABLES

Dans le cas des sources du Cossaux et du Moulinet, plusieurs origines de pollution possibles ont été identifiées dans le cadre de la présente étude : industrielle, médicale, vétérinaire ou agricole.

Deux zones d'études sont à investiguer : le Mont de Chamblon et le bassin versant de la perte de la Feurtille. Le Mont de Chamblon pourrait être impacté par différents vecteurs de pollution, sans ordre particulier :

⁴ Sont jugées pertinentes les substances dont le métabolite présente un effet pesticide ou dont la substance mère ou le métabolite sont classés comme toxiques (EC₅₀). La persistance (DT_{1/2}) du produit et le lessivage (K_{oc}) doivent être pris en compte dans le calcul du facteur de risque.

- Médicaments humains, en cas de fuites des eaux usées provenant de l'hôpital de Chamblon ou de la caserne, selon les données de Barbara Morasch (2013),
- Fuites d'eaux usées domestiques,
- Pertes provenant de la station d'essence,
- Ruissellement des routes,
- Sites pollués de type stands de tir,
- Résidus de produits phytosanitaires ou biocides autorisés en zone S3.

Le bassin d'alimentation de la perte de la Feurtille est moins bien protégé par les zones de protection. Sa pollution peut également avoir des origines différentes :

- Produits phytosanitaires provenant de l'agriculture intensive de la plaine de Baulmes, selon les données de Barbara Morasch (2013),
- Antibiotiques d'origine bovine ou porcine,
- Ruissellement des eaux des routes,
- Sites pollués de type stations d'essences désaffectées ou stands de tir,
- Dépôts de bois à proximité de la perte.

1.3. Cadre de l'étude préliminaire

OBJECTIFS

Afin de compléter la synthèse hydrogéologique de FCM-lab (2018) et dans le cadre de l'étude de faisabilité pour la construction d'une nouvelle chaîne de traitement du Cossaux, la survenance, l'origine et le comportement des micropolluants sont étudiés dans le système karstique alimentant les sources du Mont de Chamblon. Une meilleure identification des lieux de pollution, des substances fréquemment décelées et de leur temps de séjour dans le système karstique, une connaissance de leurs relations avec d'autres paramètres physico-chimiques, des concentrations maximales individuelles et sommées des groupes de micropolluants, des variations des concentrations des micropolluants à diverses échelles temporelles etc. permettra d'identifier une solution adéquate pour le traitement des micropolluants présents dans les eaux des sources.

ORGANIGRAMME

En phase SIA 21, le projet de la chaîne de traitement requiert une collaboration transversale entre différents acteurs (Figure 4). La Commune d'Yverdon-les-Bains est propriétaire des sources d'eau alors que SAGENORD est la (probable) future propriétaire des installations de traitement. Le bassin d'alimentation du canal de Baulmes est également concerné, plus particulièrement la municipalité et les exploitants des terrains agricoles de Baulmes et Rances. Parmi les mandataires, le bureau Fcm-lab s'occupe du volet hydrogéologie, le Service de l'eau des analyses de qualité de l'eau et assistance technique, et Mandaterre de la partie relationnelle avec les exploitants agricoles ainsi que de la compilation des données sur les pratiques agricoles.

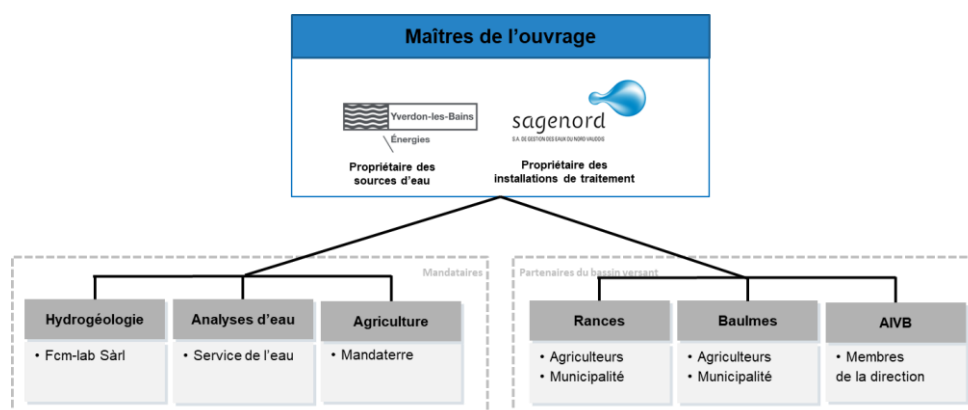


Figure 4 : Organigramme du Pré-projet PSC4

2. Méthodologie

2.1. Analyse de micropolluants selon des conditions hydrogéologiques et agronomiques connues

Afin de permettre une analyse de micropolluants selon des conditions hydrogéologiques identifiables et agronomiques connues, un programme de prélèvements a été défini pour cibler les pollutions allochtones et anthropiques. Une investigation a été faite notamment sur les origines de pollution industrielle, médicale, vétérinaire et agricole.

MONITORING

Dans le but de qualifier les conditions hydrogéologiques dans lesquelles les prélèvements sont effectués, quelques paramètres ont été suivis en continu sur les sites de la Feurtille, du Cossaux et du Moulinet. FCM-lab a été mandaté pour la validation des données disponibles entre mars 2019 et septembre 2020. Elles serviront également à déterminer les caractéristiques de la future chaîne de traitement et son pré-dimensionnement.

Les paramètres mesurés en continu ont permis de quantifier les débits, la turbidité, la matière organique, la température et la conductivité électrique, selon le Tableau 2. Les caractéristiques des appareils employés et les méthodes de validation des données sont décrites en annexe.

Une sonde de niveau a été installée dans le bassin de décantation à la perte de la Feurtille. Le Cossaux est, quant à lui, équipé d'appareils de mesure en continu permettant de mesurer le débit, la turbidité, la matière organique, la température et la conductivité électrique. L'eau est prélevée dans le captage des eaux mélangées provenant des 8 forages. Le Moulinet est constitué de 7 exutoires dont actuellement deux sont captés : le 6a et le 6b. Les niveaux d'eau de ces deux sources sont connus. Les eaux se rejoignent ensuite au Moulinet total où le niveau d'eau est également mesuré en continu. Grâce à des courbes de tarages, les niveaux d'eau sont convertis en débits. De plus, un fluorimètre a été installé à l'exutoire 6a du Moulinet : il permet de mesurer en continu la turbidité, la matière organique, la température et la conductivité électrique.

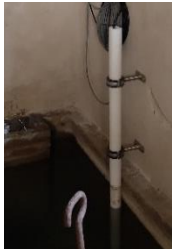
	Feurtille	Cossaux	Moulinet		
					
	perte	captage	6a	6a + 6b	total
Débit	X	X	X	X	X
Turbidité		X	X		
Matière organique		X	X		
Température		X	X		
Conductivité électrique		X	X		

Tableau 2 : Paramètres mesurés en continu sur les sites de la Feurtille, du Cossaux et du Moulinet

DÉMARCHE PARTICIPATIVE

Le bassin d'alimentation topographique de la perte de la Feurtille, défini dans le cadre de cette étude, correspond à un périmètre d'environ 7.14 km² (Figure 5). Le bassin alimente le canal de Baulmes. Il est séparé du bassin versant du Mujon au sud ainsi que du bassin de la Baumine au nord du périmètre.

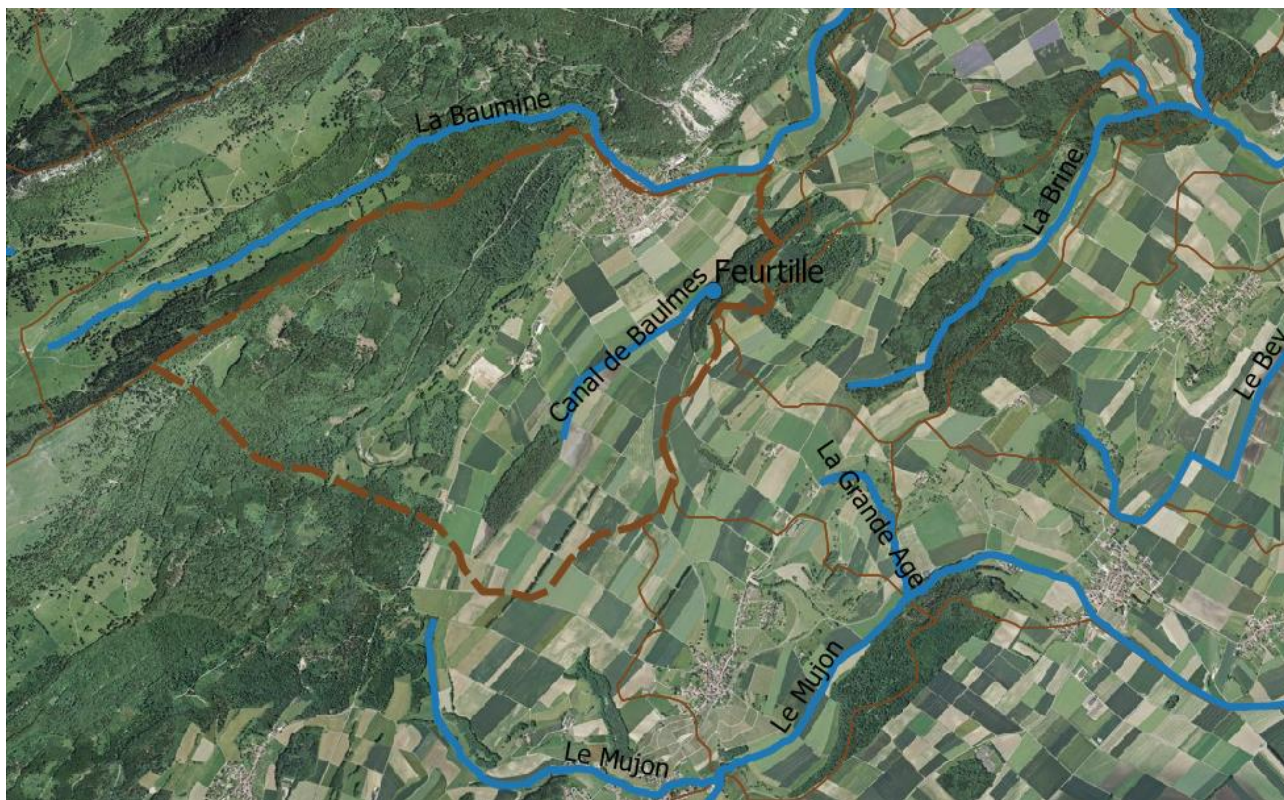


Figure 5 : Délimitation du bassin d'alimentation topographique de la perte de la Feurtille brun – trait épais. Autres bassins versants délimités en brun – trait fin.

L'occupation du sol du bassin d'alimentation du canal de Baulmes est divisée en trois grandes parties : l'ouest du périmètre possède une couverture forestière ; le nord de la zone est urbanisé alors que la partie proche du canal de Baulmes est majoritairement agricole. En écartant les forêts et les zones construites, la zone d'étude définie pour le mandat avec Mandaterre correspond à environ 3 km².

Une démarche participative a été mise en place afin de répondre à deux objectifs principaux. A court terme, une meilleure connaissance des substances actives utilisées par les agriculteurs et de la période d'application a permis de mieux cibler les micropolluants à mesurer lors des différentes campagnes et la définition des périodes à risque. A long terme, la démarche participative pourrait mener à une réduction de la pollution en amont, ou à l'utilisation de produits plus aisément adsorbables sur du charbon actif.

PROGRAMME D'ÉCHANTILLONNAGE

FCM-lab a défini un plan d'échantillonnage à mettre en œuvre. Les analyses sont effectuées par le laboratoire du Service de l'eau de Lausanne. Plusieurs types de campagnes ont été prévues afin d'évaluer les valeurs minimales et maximales en micropolluants en fonction des niveaux d'eau, de la contribution des eaux s'infiltrant à la Feurtille au débit du système karstique et du risque de pollution par la composante agricole. Ces analyses permettent, d'une part, de confirmer le lien entre les mesures à la Feurtille et aux sources. D'autre part, elles permettent de mettre en évidence des caractéristiques problématiques à prendre en compte pour la définition de la future chaîne de traitement. Les eaux de la source du Moulinet ayant longtemps été considérées comme impropres à la consommation, l'étude pourrait permettre de reconsidérer cette hypothèse.

Chaque campagne de prélèvements se fait sur 3 sites : Feurtille (perte), Cossaux (captage eau brute) et Moulinet (exutoire 6a), tout en prenant en considération le temps de transit d'une masse d'eau entre la perte et les sources.

La formule utilisée pour obtenir le débit du système karstique (FCM-lab, 2018) :

$$Q_S = 3.45 * Q_M + 47.9$$

Où Q_S correspond au débit du système en l/s et Q_M le débit du Moulinet total en l/s.

La relation utilisée pour l'estimation du temps de transit dominant d'une masse d'eau entre la perte de la Feurtille et les sources (FCM-lab, 2018) :

$$T_{dom_{F-M}}[h] = 2728 * \bar{Q}_M^{-0,70}$$

$$T_{dom_{F-C}}[h] = 1645 * \bar{Q}_M^{-0,61}$$

$T_{dom_{F-M}}$ correspond au temps de transit dominant entre la Feurtille et le Moulinet exprimé en heures, et $T_{dom_{F-C}}$ entre la Feurtille et le Cossaux. Le débit moyen du Moulinet total est calculé entre le moment du départ de la masse d'eau à la Feurtille et l'arrivée à la source en question.

Les campagnes de prélèvements peuvent se subdiviser en trois types :

- Les campagnes dites « en conditions hydrogéologiques stables » sont faites en étiage prononcé ($Q_M < 20\text{l/s}$), étiage ($20\text{l/s} < Q_M < 50\text{l/s}$), basses eaux ($80\text{l/s} < Q_M < 120\text{l/s}$), moyennes eaux ($200\text{l/s} < Q_M < 250\text{l/s}$) et hautes eaux ($Q_M > 350\text{l/s}$). Elles permettent de mettre en évidence une pollution, à priori moins prononcée, lors des conditions d'écoulement de base ($Q_F/Q_S < 10\%$). Afin de respecter les critères de stabilité hydrogéologique, la perte de la Feurtille ne doit pas avoir subi de crue, alors que le niveau de turbidité et de matière organique des sources doit être stabilisé. Ces échantillons sont dépourvus d'influence allochtone importante. Les temps de transit dominants doivent être plus ou moins respectés.
- Les campagnes dites « en conditions hydrogéologiques instables » sont caractérisées par une contribution allochtone maximale aux deux sources. Elles renseignent sur les périodes à risques, identifiées en fonction de la part de la Feurtille dans le système karstique ou de la période d'application des produits phytosanitaires. Cette part doit au minimum être plus élevée que les 5 à 10% rencontrés généralement en situation hydrogéologique stable (idéalement $Q_F/Q_S > 15\%$). Au moins une campagne est prévue avec un quotient de plus de 30% ($Q_F/Q_S > 30\%$, worst case). Les temps de transit dominants sont respectés avec précision. L'eau à la perte de la Feurtille est prélevée à la pointe de la crue alors que les sources sont prélevées au moment du pic de la matière organique ($COT_{allo} \gg COT_{init}$). Les rares effondrements de berges ou désherbages donnent également lieu à des accumulations d'eau. Les hausses de niveau doivent donc être accompagnées de précipitations à Baulmes ou Bullet / La Frétaz ou l'Auberson pour confirmer la présence d'une crue.
- Une campagne de « suivi de crue » est effectuée en basses eaux, après une longue période sèche. Dans un premier temps, par anticipation de la crue, une campagne constituée de trois

échantillons est prélevée en conditions hydrogéologiques stables afin d'obtenir un état initial. Suite à des précipitations intenses (minimum ~70mm cumulés en 3 jours, en basses eaux), un échantillon est prélevé à la Feurtille à 2/3 de la montée de la crue pour obtenir plus ou moins le pic de turbidité, puis au pic de la crue pour le pic de matière organique. Pour rappel, ces deux paramètres ne sont pas monitorés à la Feurtille. Par la suite, les débits aux sources commencent à augmenter et une première turbidité autochtone ($Turb_{auto}$) est observable grâce au monitoring. Des échantillons sont prélevés aux sources, correspondant à la masse d'eau du pic de crue à la Feurtille. Ils sont caractérisés par un pic de turbidité et/ou de matière organique allochtones ($Turb_{allo}$ et COT_{allo}). Un trio d'échantillons est prélevé en décrue en respectant les temps de transit dominants. Dans le cas concret, nous avons observé une deuxième crue à la Feurtille, peu de temps après la première. Nous avons profité de l'échantillonner afin d'étudier si la pollution reste à un niveau similaire ou si une première crue lessive la majorité des polluants.

MÉTHODES D'ANALYSE

Selon les origines de pollutions probables des sources du Mont de Chamblon, identifiées dans le Tableau 3, le Service de l'eau dispose d'une panoplie de méthodes d'analyses. L'analyse des micropolluants comprend les pesticides, les médicaments, les indicateurs de pollution urbaine, les sucres de synthèse et les composés perfluorés, tous mesurés par méthode LC-MS/MS. D'autres pesticides et les composés organiques volatils sont analysés par méthode GC-MS/MS. D'autre part, l'analyse des métaux et des cations est effectuée par ICP-MS. Quelques anions ont été analysés par spectrophotométrie. La concentration en COT est connue par analyseur InfraRouge. La bactériologie a été analysée par comptage, après mise en culture sur plaques.

Origine	Industrie	Médecine humaine	Médecine animale	Agriculture	Microbiologie
Exemples	Stations essence, routes, pollués	Antidépresseurs, antibiotiques	Antibiotiques	Herbicides, insecticides	Contamination fécale
Types de substances	COV, métaux	Matières actives médicaments humains	Matières actives médicaments vétérinaires	Matières actives PPh et métabolites	Bactéries indicatrices

Tableau 3 : Origines de contamination possibles pour les sources du Mont de Chamblon

En complément, une campagne d'échantillons approfondie été faite en étiage prononcé. Dans ces conditions hydrogéologiques particulières, les sources seraient à priori exemptes d'influence directe des micropolluants originaires de la perte de la Feurtille :

- D'une part, le laboratoire Doc-Labor a pu définir la qualité de matière organique grâce à la méthode LC-OCD-OND. La liste des analytes est disponible en annexes.
- D'autre part, l'analyse effectuée par le laboratoire TZW par LC-MS/MS a permis la mesure d'autres métabolites où le risque de détection a été jugé important. La liste des analytes est disponible en annexes.

CHOIX DES ANALYTES

Le distributeur d'eau se doit d'effectuer une analyse des substances à risque, pouvant potentiellement se retrouver dans l'eau brute, et ce pour chaque adduction. La directive W12 propose une analyse de risque selon le concept « système d'analyse des risques et de maîtrise des points critiques » (HACCP). Cette méthode inclue l'évaluation des origines de pollution potentielles. Pour les micropolluants d'origine agricole, il est important d'estimer le risque de retrouver des résidus de certaines substances mères, supérieur pour certaines, selon le type d'agriculture pratiquée dans la zone d'alimentation. La perte de la Feurtille constituant la zone de pollution agricole potentielle, une analyse des pratiques agricoles a permis de mettre en évidence les produits phytosanitaires utilisés, pouvant potentiellement se retrouver dans les eaux du canal de Baulmes. Des résidus peuvent, par la suite, se retrouver dans les eaux des sources du Mont de Chamblon.

SUBSTANCES MÈRES

Les substances les plus utilisées en 2019 ont été le métamitron, le glyphosate, le chlorméquat (non analysé), le chlortoluron, le 2,4-D et le s-métalochlore (Tableau 4). Quelques exploitants auraient probablement également utilisé des produits contenant du chlorothalonil et du chloridazon. La plupart des substances les plus utilisées a pu être analysée. L'OFAG met particulièrement en garde les exploitants pour ne pas utiliser les substances à risque pour les captages. Elles sont soumises à des restrictions d'utilisation, notamment en zones karstiques ou/et à proximité de captages ou de cours d'eau. Dans la plaine de Baulmes, en plus du chlorothalonil et du chloridazon, parmi les substances à risques pour les captages, ont été utilisés en quantités non négligeables : le s-métalochlore, le bentazone, le phenmedipham, l'éthofumésate, le prothioconazole, le diméthénamide-P, le flufénacet et la terbuthylazine. Ces substances pourront potentiellement être détectées dans les eaux des sources du Mont de Chamblon.

Substance active	Type	Culture	A risque pour captages	Analysé
Métamitron	H	Betterave		X
Glyphosate	H	Divers		X
Chlorméquat	R	Céréales		
Chlortoluron	H	Céréales		X
2,4-D	H	Céréales		X
S-Metolachlore	H	Betterave	X	X
Fenpropimorphe	F	Divers		
Bentazone	H	Divers	X	X
Hydroxyde de cuivre	F	Betterave		
Phenmedipham	H	Betterave	X	
Ethofumésate	H	Betterave	X	X
Asulame	H	Prairie		
Epoxiconazole	F	Divers		X
Dicamba	H	Maïs		
Prothioconazole	F	Divers	X	
Diméthénamide-P	H	Divers	X	X
Flufénacet	H	Divers	X	X
Terbuthylazine	H	Maïs	X	X
Pyraclostrobine	F	Céréales		
Fenpropidine	F	Betterave		
Trinexapac-éthyl	R	Céréales		
Lénacile	H	Betterave	X	
Pendiméthaline	H	Divers		X
Metsulfuron-méthyl	H	Divers		
Métrafénone	F	Céréales		
Ethéphon	R	Céréales		
Diflufénican	H	Céréales		X
Amidosulfuron	H	Céréales		X
Prochloraz	F	Céréales		
Napropamide	H	Colza	X	X
Tribénuron-méthyle	H	Divers		
Fluoxastrobine	F	Céréales	X	
Bixafen	F	Céréales	X	
Florasulame	H	Céréales		
Foramsulfurone	H	Maïs	X	X
Tébuconazole	F	Divers		X

Tableau 4 : Liste des substances actives mères par ordre décroissant d'utilisation, où au minimum un kg a été utilisé dans le bassin versant de la Perte de la Feurtille, selon les entretiens avec les exploitants agricoles, 2019. H pour herbicide, R pour régulateur de croissance, F pour fongicide (et I pour insecticide). Les substances à risque pour les captages sont listées par l'OFAG, elles sont sujettes à des restrictions d'application. Substances notamment analysées dans la présente étude.

MÉTABOLITES

Les métabolites pertinents, tirés du document de l'OFAG « Pertinence des métabolites de produits phytosanitaires dans les eaux souterraines et dans l'eau potable » (version du 06 avril 2020), et devant également satisfaire la norme des 100 ng/l, sont listés dans le Tableau 5. Les métabolites pertinents pouvant potentiellement se retrouver dans le canal de Baulmes, liés à une utilisation de PPh dans le bassin d'alimentation, sont marqués d'une croix. Les autres métabolites pertinents ont une probabilité très faible de se retrouver dans le canal, les produits correspondant étant appliqués sur des cultures inexistantes dans le bassin d'alimentation (vigne etc.).

SAGENORD a pu effectuer une analyse sur la grande majorité des métabolites pertinents. Trois d'entre eux font exception : Le SYN548008 du chlorothalonil, le M1a de l'isoproturon et le NOA 407854 du Pinoxaden. Il serait judicieux de les faire analyser ailleurs postérieurement.

Substance active	Métabolite pertinent	PEC > LD	Feurtille	Analyses effectuées	Commentaire
Amisulbrom	IT-14				Pas d'utilisation avérée du pesticide
	IT-4				Pas d'utilisation avérée du pesticide
Atrazin	Desisopropyl	X		SE	Substance interdite persistante
	Desethyl	X		SE	Substance interdite persistante
Chlorothalonil	R417888	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	R471811	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	R418503	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	R419492	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	R611965	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	R611968	X		SE	Substance interdite persistante
	SYN507900	X		SE + TZW	Substance interdite persistante
	SYN548008	X		Manque	Substance interdite persistante
	SYN548581	X		SE	Substance interdite persistante
Dazomet (DMTT)	Methyl isothiocyanate				Pas d'utilisation avérée du pesticide
Isoproturon	M1a	X		Manque	Utilisation à la Feurtille
Metazachlor	BH 479-09	X		TZW	Utilisation à la Feurtille
	BH 479-11	X		TZW	Utilisation à la Feurtille
Oryzalin	OR-20				Pas d'utilisation avérée du pesticide
	OR-15				Pas d'utilisation avérée du pesticide
Penconazole	CGA 71019				Pas d'utilisation avérée du pesticide
Pinoxaden	NOA 407854 (M2)	X		Manque	Utilisation à la Feurtille
Propachlor	ESA	?			Probablement pas d'utilisation du pesticide
Terbuthylazine	Desethyl (MT1)	X		SE	Utilisation à la Feurtille

Tableau 5 : Analyse du risque de détection des métabolites pertinents dans canal de Baulmes. Les concentrations prévisibles de la substance mère ou/et du métabolite (PEC) dans la Feurtille et donc potentiellement dans les sources du Mont de Chamblon, en-dessus des limites de détection (LD), symbolisées par un X. Analyses disponibles au Service de l'eau (SE) et au Technologiezentrum Wasser (TZW).

Il a été jugé également nécessaire d'effectuer des mesures sur des métabolites non pertinents. Alors que les concentrations peuvent légalement dépasser les 100 ng/l, à haute concentration, ces métabolites (Tableau 6) peuvent notamment baisser l'efficacité de la chaîne de traitement.

Substance active	Métabolite non pertinent	PEC Feurtille > LD	Analyses effectuées
Chloridazon	dephenyl	X	SE + TZW
	methyl desphenyl	X	SE + TZW
Chlorothalonil	R182281	X	TZW
	R611553	X	TZW
	R950097	X	TZW
	SYN546872	X	SE + TZW
Dimethachlor	CGA 354742 (ESA)	X	SE + TZW
	CGA 50266 (OXA)	X	SE + TZW
	CGA 369873	X	TZW
Dimethenamid-P	ESA/M23	X	TZW
	ESA/M27	X	SE + TZW
	ESA/M31	X	TZW
Flufenacet	M2	X	TZW
Metalaxyl	CGA 108906	X	TZW
	CGA 62826	X	TZW
Metamitron	Desamino	X	TZW
Metazachlor	BH 479-04 (OXA)	X	SE + TZW
	BH 479-08 (ESA)	X	SE + TZW
	BH 479-09	X	TZW
Quinmerac	BH 518-2	?	TZW
S-Metolachlor	CGA 354743 (ESA)	X	SE + TZW
	GCA 51202 (OXA)	X	SE + TZW
	GCA 368208	X	TZW
	NOA 413173	X	TZW
Terbuthylazine	MT23	X	TZW
	SYN545666	X	TZW
Trifloxystrobin	CGA 321113	?	TZW
	NOA 413161	?	TZW
	NOA 413163	?	TZW
Tritosulfuron	BH 635-4	?	TZW

Tableau 6 : Analyse du risque de détection des métabolites non pertinents dans canal de Baulmes, selon les entretiens avec les agriculteurs. PEC dans la Feurtille et donc potentiellement dans les sources du Mont de Chamblon, en-dessus des LD, symbolisées par un X. Analytes mesurés par le SE et TZW.

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats préliminaires

DÉMARCHE PARTICIPATIVE DANS LE BASSIN D'ALIMENTATION DE LA FEURTILLE

Sur la totalité du bassin versant topographique alimentant la perte de la Feurtille, la moitié de la surface est constituée de forêts, 19% de prairies, pâturages et herbages, 2% de marais et 6% de surfaces bâties. En 2019, les 23% restants sont des surfaces destinées aux grandes cultures, potentiellement problématiques pour l'eau potable, telles que principalement les céréales, le maïs, le colza et la betterave. Environ 40% de la surface du bassin versant est en rotation de cultures. Les herbicides constituent 68% des produits appliqués, suivis des fongicides avec 21%. Env. 70% des produits auraient été utilisés entre le mois d'avril et mai. La durée moyenne de la demi-vie des substances appliquées étant à ~ 50 jours $\pm$ 120 jours, **les eaux des sources ont un risque plus élevé d'être contaminées entre avril et mi-juillet. Les substances les plus utilisées en 2019 ont été le métamitron, glyphosate, chlorméquat, chlorolutron, 2,4-D et s-métolachlore.**

D'après les échanges avec Mandaterre, il est probable que les effets du réchauffement climatique induisent une utilisation plus intense des PPh. L'évolution des caractéristiques physico-chimiques des milieux pourrait rendre plus propice la prolifération des insectes ravageurs et des maladies sur les cultures, nécessitant une utilisation plus prononcée d'insecticides et de fongicides par unité de surface. Or, les effets sur la propagation future des plantes adventices seraient moins connus : le recours aux herbicides pourrait tant baisser qu'augmenter. La culture de la betterave, gourmande en PPh (not. chloridazon), serait peut-être vouée à disparaître prochainement dans cette région. Les PPh utilisés et les polluants stockés dans l'environnement vont évoluer de manière peu prévisible.

CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES

Malgré les canicules estivales prononcées de 2019, les pluies ont pu éviter un stress hydrique aux sources. Par contre, un étiage prononcé est identifiable l'année suivante au mois de septembre : la Feurtille est quasiment arrivée à sec alors que les sources non pérennes du Moulinet ont été tarées.

Durant la période étudiée, entre mars 2019 et septembre 2020, le débit a atteint 600 l/s au Moulinet après plus de 110mm tombés en 10 jours en mars 2019. En hautes eaux, 15mm de précipitations peuvent suffire pour rendre l'eau du Cossaux impropre à la consommation, alors qu'en étiage, il faut >60mm de précipitations cumulées sur 3-4 jours, voire plus sur sol sec. Les débits classés et les relations entre les débits des exutoires sont disponibles en annexe 4.

D'après la Figure 6, la teneur en matière organique (représentées par le COTc, une modélisation du COT continu) est, en tout temps, plus élevée au Moulinet qu'au Cossaux. Une exception est observable à la fin du mois d'août 2020, où un événement inhabituel s'est produit au Cossaux, probablement lié à un effondrement karstique. Le Moulinet n'a pas été impacté par cet événement.

L'arrivée de particules inorganiques d'origine karstique se manifeste par une augmentation de la turbidité autochtone. Des pics sont observables env. quelques heures après des précipitations intenses, en particulier après de longues périodes sèches. La turbidité allochtone, due à l'arrivée d'eau chargée en provenance de la perte est, quant à elle, toujours manifeste. Lors de la période étudiée, la turbidité est montée à 85 NTU au Moulinet, en moyenne 10 à 15 fois plus qu'au Cossaux.

Le Cossaux aura été mis entièrement en décharge 163 jours sur les 580 jours de production potentiels étudiés (soit 28% du temps), pour cause de qualité de l'eau brute insuffisante. L'eau du Cossaux n'aura quasiment pas été servie aux Yverdonnois en période hivernale. Or, lors des étés 2019 et 2020, les mises hors service⁵ auront été peu nombreuses, par rapport à d'autres années.

⁵ Lors de l'étude, les valeurs seuils pour la mise hors service se situaient au-delà de 1 NTU pour la turbidité et une valeur CAS_{254nm} supérieure à 3 e/m.

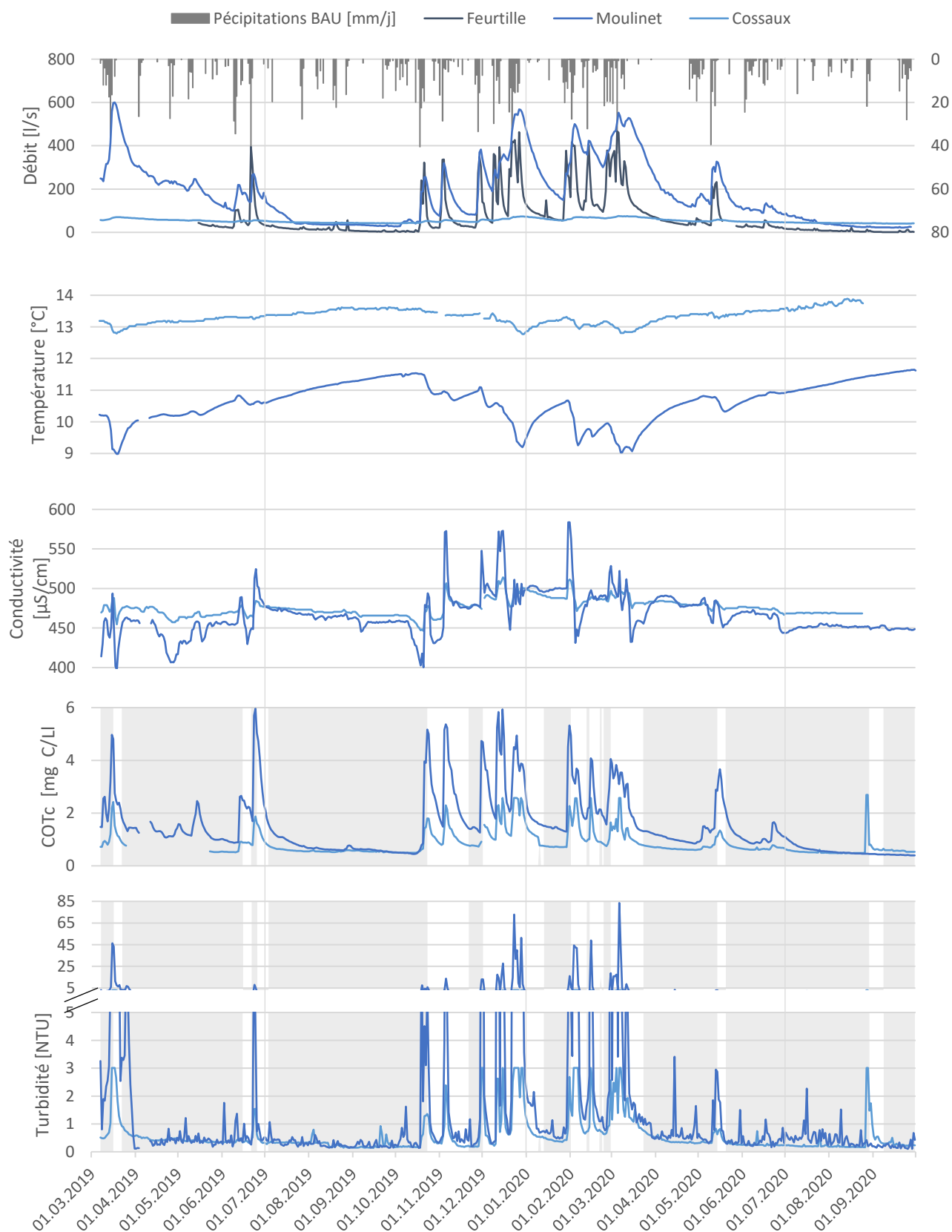


Figure 6 : Données continues calibrées, récoltées entre mars 2019 et septembre 2020 au Moulinet (composante 6a) et au Cossaux (mélange des composantes de la source). Du haut vers le bas : précipitations journalières à Baulmes, débit, température, conductivité, COT modélisé à partir des données d'extinction UV ou fluorescence UV et turbidité. Les données de turbidité et de matière organique au-delà de 3 unités ne sont pas enregistrées par le système de monitoring du Cossaux, les valeurs maximales réelles sont plus élevées, mais inférieures à celles du Moulinet. Les zones grises claires représentent les périodes où le Cossaux est conforme en termes de COT et de turbidité, les zones blanches correspondent à des mises hors service.

DÉBITS CLASSÉS ET RELATIONS ENTRE LES DÉBITS

RELATIONS ENTRE LES DÉBITS

La relation entre les débits du Cossaux et du Moulinet diffère légèrement d'une année à l'autre (cf. annexes). Elle est relativement linéaire en condition hydrogéologique stable entre les basses et moyennes eaux : pour des débits allant de 50 à 350 l/s. En hautes eaux, les sources sont souvent en condition hydrogéologique instable où la réponse à la mise en charge du système n'est pas toujours identique.

Les exutoires pérennes du Moulinet 6a et 6b sont actuellement captées. En hautes eaux (à partir de ~350 l/s), ces exutoires voient leurs débits augmenter (annexe 4). La source 6b constitue une plus grande part du Moulinet total que la source 6a. En 2019 et 2020, les deux exutoires sommés ont formé 50% du débit du Moulinet total à l'étiage prononcé. Les autres 50% ont probablement été alimentés par la 3^{ème} source pérenne 7b. En période hivernale et en hautes eaux, les deux eaux captées n'ont représenté qu'environ 12-13% du débit total du Moulinet : dans ces conditions, la majorité du flux est alimentée par les sources non pérennes.

DÉBITS CLASSÉS

Le débit d'étiage (Q_{347} tel que décrit dans LEaux) du Cossaux, moyenné sur les 10 dernières années (2010 à 2019) **correspond à 41.5 l/s** (cf. annexes). Celui du Moulinet ne peut pas être calculé précisément : les données ne sont pas disponibles sur les 10 dernières années. Par extrapolation, nous pouvons déduire que cette valeur de Q_{347} devrait se situer entre 18 et 19 l/s.

Entre 2005 et 2020, c'est l'année 2006 qui a enregistré les valeurs maximales aux sources et à la perte. Une première crue à 1300 l/s à la perte avait partiellement inondé la plaine. Par la suite, à Baulmes, sont tombées plus de 200mm de précipitations cumulées en 2 semaines, sur sol déjà saturé jusqu'au 10 avril 2006. Par conséquent, un débit de 1170 l/s a été mesuré à la Feurtille. Suite auquel, le débit maximal du Moulinet total a été enregistré : le lendemain, la sonde a enregistré un niveau équivalent à 720 l/s. Le 12 avril 2006, le débitmètre du Cossaux a enregistré 89 l/s.

L'année d'étude 2019 a été une année tout à fait moyenne en termes de débits. Par contre, l'année 2020 a été particulièrement peu productive en étiage. Les pluies d'été 2020 n'auraient pas rechargé le système karstique de manière suffisante.

Selon les prévisions climatiques (OFEV 2020), le profil hydraulique de l'année 2020 serait une norme à moyen terme : des hivers plus pluvieux, des fontes de neiges abrégées et des été plus secs.

3.2. Analyses des micropolluants

VALIDATION DES CAMPAGNES DE PRÉLÈVEMENTS

Les campagnes de prélèvements ont été planifiées sur une période d'un an et demi entre mars 2019 et septembre 2020 (Figure 7). Tous les prélèvements prévus par 3 échantillons (Feurtille, Cossaux et Moulinet) en conditions hydrogéologiques stables sont validés par le monitoring (Tableau 7) : les temps de transit entre la perte et les sources ont été globalement respectés ; les eaux prélevées aux sources correspondent rétrospectivement à des eaux stables à la perte. Ces conditions stables ont prévalu dans le système durant une période de 3 jours (>2 jours de transit) en hautes eaux à 3 mois (>14 jours de transit) en étiage prononcé précédant les campagnes.

En conditions stables, le débit était en général corrélé de manière positive avec le COTc et la turbidité et de manière négative avec la température.

	Unité	Etiage prononcé		Etiage		Basses eaux		Moyennes eaux		Hautes eaux	
		M	C	M	C	M	C	M	C	M	C
Débit	l/s	21	40	~28	42.5	80	45	228	56	430	72
COTc	mgC/l	0.4	0.5	0.6	0.5	1.1	0.7	1.3	0.8	1.5	0.9
Cond.	µS/cm	447	456	463	470	443	467	408	457	455	482
Turb.	NTU	0.03	0.19	0.06	0.16	0.15	0.23	0.2	0.4	0.7	0.9
Temp.	°C	11.7	~14	11.2	13.6	10.9	13.5	10.2	13.2	9.3	12.9

Tableau 7 : Paramètres continus liés aux échantillonnages en conditions hydrogéologiques stables au Moulinet (M) et Cossaux (C)

Les échantillons en conditions hydrogéologiques instables ont été prélevés lors d'une période à risque élevé (petite crue d'été) ainsi que lors d'une période à risque faible (grande crue d'automne). La campagne de suivi de crue s'est déroulée en automne pendant les divers moments clés. Ceux-ci sont décrits dans un chapitre dédié « suivi de crue ». Cependant, aucune campagne n'a pu être réalisée lors d'une grande crue ($Q_F/Q_S > 30\%$) et en période à risque agronomique élevé⁶ : les valeurs de la journée (12 mai 2020), où l'eau a été probablement la plus contaminée durant la période d'étude, en termes de micropolluants, ne sont pas connues.

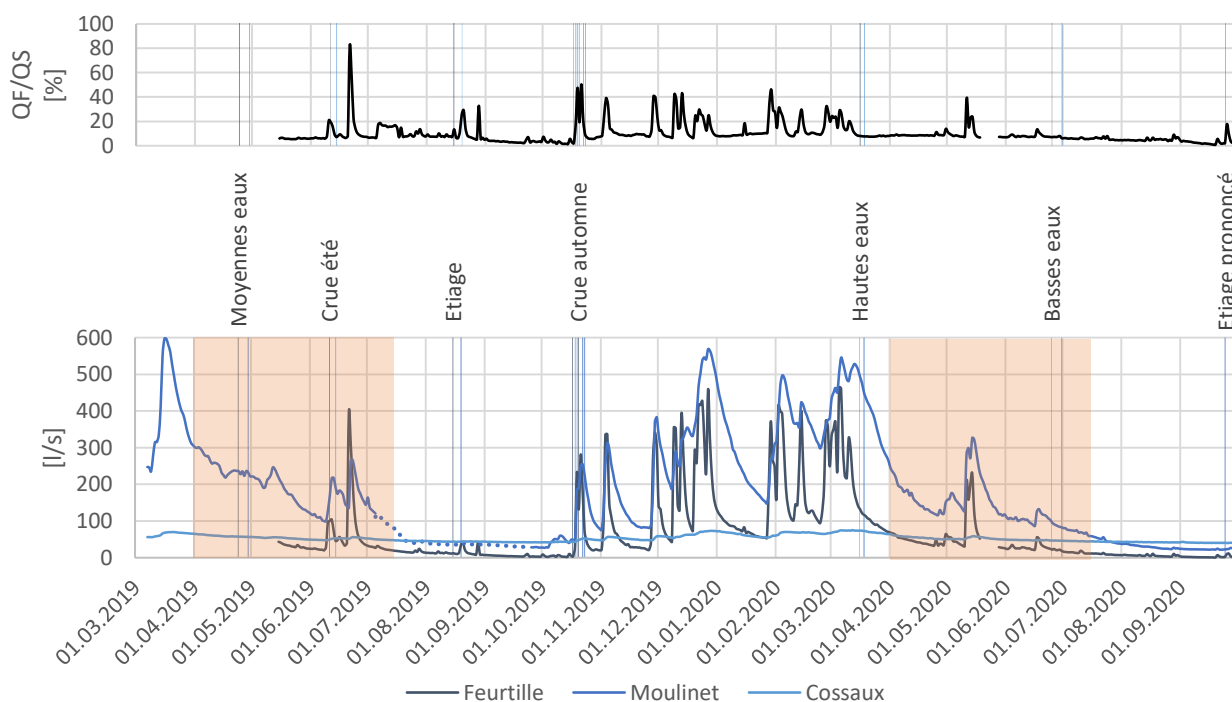


Figure 7 : En haut : part du débit de la Feurtille sur le débit du système. En bas : dates des campagnes de prélèvements et indication des périodes agronomiques à risque élevé (Σ pesticides) en orange. Une estimation du Moulinet en pointillé.

⁶ En raison de la fermeture partielle des laboratoires lors du semi-confinement COVID-19.

ORIGINE DE POLLUTION DES MICROPOLLUANTS

Nous nous intéressons ici aux micropolluants par opposition aux macropolluants. Nous analysons par exemple les composés organiques dérivés des médicaments, pesticides ou hydrocarbures mais également des composés inorganiques tels que les éléments traces métalliques.

Les résultats classés par origines de pollution probables liées aux deux zones d'alimentation sont synthétisés ci-dessous. Un tableau dédié à l'origine de pollution agricole est inséré dans la page suivante. Le Tableau 8 indique qu'aucune pollution liée aux routes, hydrocarbures, ou sites pollués n'a été détectée. Un stand de tir a été assaini dans la zone S3 du Mont de Chamblon récemment par Prona (2017), où aucune contamination au Plomb n'a été décelée aux sources.

Les données récoltées en 2013 par Barbara Morasch sur la pollution des sources par les médicaments ne sont plus d'actualité : les concentrations actuelles des résidus de produits pharmaceutiques⁷ se situent en dessous des limites de détection alors que dans son étude des concentrations notables étaient détectées aux sources. Il est important de mentionner les travaux les travaux sur le réseau d'assainissement de la commune de Chamblon effectués entre temps. Ceux-ci n'ont dans tous les cas pas péjoré la situation. Les eaux ne sont ni polluées par des fuites liées au réseau d'assainissement de l'Hôpital de Chamblon ni par celui de la perte de la Feurtille. Cependant, l'anti-inflammatoire Naproxen fait exception. Il a été retrouvé dans la Feurtille et dans les sources en concentrations significatives. D'autre part, l'antimicrobien « sulfadiméthoxine », utilisé pour le bétail en médecine vétérinaire, n'est détecté dans aucune des eaux.

		Analytes	Normes	Feurtille	Moulinet	Cossaux
				Min/med/max (n)	Min/med/max (n)	Min/med/max (n)
Industrie	Comp. volatils	ΣCOV i=62	10 µg/l	0/1/2 (4)	0/0/0.5 (5)	0/0/0.6 (5)
	Métaux :	Aluminium	200 µg/l	9.5/22.4/51.8 (5)	5.1/9.3/10.2 (5)	1.1/3.8/6.6 (5)
		Cadmium	3 µg/l	nd (5)	nd (5)	nd (5)
		Chrome	50 µg/l	nd (5)	nd (5)	nd (5)
		Cobalt	- µg/l	nd (5)	nd (5)	nd (5)
		Cuivre	1000 µg/l	nd/nd/3.5 (5)	nd (5)	3.1/3.3/3.1 (5)
		Fer tot	200 µg/l	9.2/18.5/42.3 (5)	3.1/6.4/8.9 (5)	1.2/2.7/8.2 (5)
		Manganèse tot	50 µg/l	2.3/4.5/24 (5)	nd (5)	nd (5)
		Nickel	20 µg/l	nd/nd/2.7 (5)	nd (5)	nd (5)
		Plomb	10 µg/l	nd (5)	nd (5)	nd (5)
		Zinc	5000 µg/l	2.3/2/2.3 (5)	nd (5)	2.3/2.9/3.5 (5)
	Comp. Perfl. :	PFNA	100 ng/l	nd (3)	nd (5)	nd (5)
		PFOA	500 ng/l	nd (3)	nd (5)	nd (5)
		PFOS	300 ng/l	nd/nd/12 (3)	nd/nd/16 (5)	nd (5)
Médecine humaine et eaux usées	Médicaments	Hydrochlorothiazide	100 ng/l	nd/nd/7 (1)	nd (2)	nd (2)
		Ketoprofen		nd (4)	nd/nd/5 (6)	nd (6)
		Naproxen		nd/nd/27 (4)	nd/nd/28 (6)	nd/nd/14 (6)
		Metformin	10000 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Autres i=28		nd (4)	nd (6)	nd (6)
	Traceurs usées	1H-Benzotriazole	1000000 ng/l	nd/nd/35 (4)	5/6/10 (6)	5/6/22 (6)
		Caffeine	100000 ng/l	nd/nd/5 (4)	nd (6)	nd/nd/10 (6)
		Methyl-1H-Benzo.	100 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Acesulfame K	100000 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Aspartame	10000 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Cyclamate	10000 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Saccharin	10000 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)
		Sucralose	10000 ng/l	nd (4)	nd/nd/48 (6)	nd (6)
Médecine animale	Médicament vétérinaire	Sulfadiméthoxine	100 ng/l	nd (4)	nd (6)	nd (6)

Tableau 8 : Synthèse des campagnes sur les micropolluants au Service de l'eau (SE), hors pesticides, 2019-2020, nd : non décelé. Les normes sont tirées de la version du 01.07.2020 de l'OPBD. N : nombre d'analyses. I : nombre d'analytes.

La pollution apportée par des pesticides (Tableau 9) devra être traitée par la future chaîne de traitement afin que le Cossaux puisse être utilisé en permanence. Les substances détectées aux sources sont, dans la grande majorité, mesurées à des concentrations plus élevées à la Feurtille.

⁷ Dont une liste complète de tous les analytes se trouve en annexe.

De plus, les entretiens effectués par Mandaterre dans le cadre de la démarche participative confirment également l'utilisation des produits phytosanitaires en lien avec les substances détectées dans les sources analysées. La somme des pesticides à la Perte de la Feurtille est en moyenne en dessus des 500 ng/l, alors que le maximum enregistré au Moulinet (575 ng/l) est également au-dessus de la norme en période à risque agronomique. Par contre, la proportion plus élevée des composantes karstiques profondes semblent diluer suffisamment l'apport d'eau de la Feurtille au Cossaux, réduisant ainsi la pollution aux pesticides à des valeurs en-dessous des 500 ng/l.

	Analytes	Normes	Feurtille	Moulinet	Cossaux	
Agriculture	Somme Pesticides	∑ pesticides et métabolites pertinents i=80	500 ng/l	63/467/2874 (8)	39/77/575 (11)	35/55.5/185 (11)
	2.4 D	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/29 (8)	nd (11)	nd (11)
	Amidosulfron	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/10 (8)	nd (11)	nd (11)
	Atrazine	Substance mère	100 ng/l	nd/9/15 (8)	6/11/16 (11)	nd/7/11 (11)
		desethyl	100 ng/l	nd/8/19 (8)	6/11/19 (11)	nd/10/17 (11)
		deisopropyl	100 ng/l	nd (8)	nd (11)	nd (11)
	Bentazon	Substance mère	100 ng/l	nd/13/45 (8)	nd (11)	nd (11)
	Boscalid	Substance mère	100 ng/l	nd/9/14 (8)	nd (11)	nd (11)
	Chloridazon	Substance mère	100 ng/l	nd/10/190 (8)	nd/nd/22 (11)	5/8/10 (11)
		dephenyl	10000ng/l	334/336/338 (2)	29/57/96 (3)	44/51/62 (3)
		methyl desphenyl	10000ng/l	155/216/277 (2)	12/26/83 (3)	20/25/63 (3)
	Chlorothalonil	(R471888)	100 ng/l	9/36/288 (8)	nd/11/29 (12)	nd/7/20 (12)
		(R471811)	100 ng/l	290 (1)	39/42/60 (3)	54/80/114 (3)
		(R611553)	100 ng/l	nd (1)	nd (1)	nd (1)
		(R611965)	100 ng/l	nd (1)	nd (1)	nd (1)
		(R611968)	100 ng/l	nd (1)	nd (1)	nd (1)
		(SYN507900)	100 ng/l	nd (1)	nd (3)	nd (3)
		(SYN546872)	100 ng/l	nd (1)	nd (1)	nd (1)
		(SYN548581)	100 ng/l	nd (1)	nd (1)	nd (1)
	Chlorpyrifos	Substance mère	100 ng/l	nd (8)	nd/7/7 (11)	nd (11)
	Chlortoluron	Substance mère	100 ng/l	nd/112/225 (8)	nd/17/31 (11)	nd/7/7 (11)
	Dichlobenil	(2,6 dichlorobenzamide)	10000ng/l	nd/nd/5 (7)	nd (11)	nd (11)
	Diflufenican	Substance mère	100 ng/l	nd/18/19 (8)	nd (11)	nd (11)
	Dimethachlor	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/20 (8)	nd (11)	nd (11)
	Dimethenamid-P / Dimethenamide	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/120 (8)	nd/nd/100 (11)	nd/nd/36 (11)
	Epoxiconazole	Substance mère	100 ng/l	nd/36/94 (8)	nd (11)	nd (11)
	Ethofumesate	Substance mère	100 ng/l	nd/46/80 (8)	nd/5/58 (11)	nd/9/9 (11)
	Flufenacet	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/40 (8)	nd (11)	nd (11)
	Foramsulfuron	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/130 (8)	nd/nd/10 (11)	nd (11)
	Glyphosate	Substance mère	100 ng/l	nd/60/104 (8)	nd (11)	nd (11)
		(AMPA)	10000 ng/l	nd/57/62 (8)	nd (11)	nd (11)
	Ioxynil	Substance mère	100 ng/l	nd (8)	nd/nd/12 (11)	nd (11)
	Irgarol / Cybutryne	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/5 (8)	nd (11)	nd/nd/5 (11)
	Mecoprop	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/5 (8)	nd/nd/6 (11)	nd/nd/10 (11)
	Metalaxyl-M	Substance mère	100 ng/l	nd/109/259 (8)	nd/35/88 (11)	nd/11/12 (11)
	Metaldéhyde	Substance mère	100 ng/l	nd/26/31 (8)	nd/6/7 (11)	nd/nd/6 (11)
Metamitron	Substance mère	100 ng/l	nd/9.5/1260 (8)	nd/161/245 (11)	nd/53/82 (11)	
Metazachlor	Substance mère	100 ng/l	nd/20/47 (8)	nd/10/11 (11)	nd (11)	
	(ESA/BH 479-08)	10000 ng/l	26/53/79 (2)	nd (11)	nd (11)	
	(OXA/BH 479-04)	10000 ng/l	29/38/47 (2)	nd/nd/9 (3)	nd (11)	
Metconazole	Substance mère	100 ng/l	nd (8)	nd/nd/7 (11)	nd (11)	
S-Metolachlor / Metolachlor	Substance mère	100 ng/l	nd/12/488 (8)	nd/40/73 (11)	nd/12/25 (11)	
Phosalone	Substance mère	100 ng/l	nd (8)	nd/nd/5 (10)	nd (11)	
Propamocabe	Substance mère	100 ng/l	nd (8)	nd/nd/8 (3)	nd/nd/8 (3)	
Propiconazole	Substance mère	100 ng/l	nd/nd/19 (8)	nd/nd/16 (11)	nd/9/10 (11)	
Terbutylazine	Substance mère	100 ng/l	nd/191/363 (8)	nd/nd/29 (11)	nd/nd/8 (11)	
	(Terbutylazine desethyl)	100 ng/l	nd/nd/68 (8)	nd/nd/6 (11)	nd (11)	

Tableau 9 : Synthèse de l'annexe 5, pesticides décelés au moins une fois au SE, 2019-2020, nd : non décelé. Les mesures de 2019 ne prennent pas en compte le métabolite R471811 du Chlorothalonil, la méthode analytique n'étant pas encore disponible. Normes tirées de la version du 01.07.2020 de l'OPBD. N : nombre d'analyses. I : nombre d'analytes.

Depuis son interdiction en 2020, les concentrations en chlorothalonil R471888 ont fortement chuté : il n'est plus détectable en conditions hydrogéologiques stables. Par contre, les concentrations du métabolite persistant R471811 ont oscillé autour des 100 ng/l dans la source Cossaux peu après l'interdiction des produits contenant cette substance. Quand la « composante Feurtille » est fortement diluée dans la « composante système karstique », en étiage prononcé, le R471811 n'est presque plus détectable dans les sources. Le Moulinet, en conditions hydrogéologiques stables, contient des concentrations de ces métabolites plus faibles que le Cossaux. La tendance s'inverse lors des campagnes en conditions hydrogéologiques instables où le Moulinet est plus impacté.

Quelques analyses de métabolites du chloridazon mettent en évidence des concentrations élevées à la Feurtille en conditions hydrogéologiques stables. Aucune mesure de cette substance n'a été faite en conditions instables (la méthode d'analyse datant de 2020), où des concentrations probablement plus élevées pourraient baisser l'efficacité de la future chaîne de traitement.

ANALYSE AVANCÉE DES MÉTABOLITES SANS INFLUENCE DE LA FEURTILLE

Sans impact significatif de la Perte de la Feurtille, ($Q_F/Q_S < 1\%$) **en étiage prononcé, les sources sont quasiment exemptes de résidus de produits phytosanitaires** selon le laboratoire TZW⁸.

Selon le Tableau 10, le chlorothalonil n'aurait pas été détecté en étiage prononcé aux sources. Il est néanmoins à noter que les limites de détection sont élevées : il est probable que des concentrations traces soient présentes, proches des 25 ng/l. En croisant les analyses des différents laboratoires, les seuls métabolites présents dans les sources en permanence sont les résidus du chloridazon, de l'atrazine, le TFA et peut-être du chlorothalonil.

A noter que les métabolites du chloridazon, chlorothalonil, métazachlore et S-Métalochlore persistent dans les eaux de la Feurtille. Suite à des événements orageux printaniers intenses, il faut probablement s'attendre à des concentrations de ces métabolites, pour les produits autorisés, nettement plus élevées dans les sources. Seules les métabolites non pertinents du métazachlore ont été détectés dans la Feurtille : les deux métabolites pertinents BH 479-09 et BH 479-11 sont en-dessous du seuil de détection. Le Chlorothalonil R471811 contamine encore la Feurtille même en étiage très prononcé.

Il arrive que la Suisse réagisse avec un temps de retard quant à l'interdiction de pesticides problématiques pour l'environnement. Le chloridazon a été retiré des substances autorisées dans l'Union Européenne en 2018 pour son caractère très persistant dans les eaux. Or, la substance est encore autorisée et utilisée en Suisse. Ses métabolites ne figurent pas dans la liste des « métabolites pertinents ». A cause de la nécessité de lutter contre les plantes adventices de la culture de la betterave, les produits, sous dénominations commerciales de Chloridazon, Jumper, Pyramin ou encore Pyrazon, continuent de polluer les eaux des sources du Mont de Chamblon.

⁸ Résultats non comparables avec ceux du Service de l'eau : seuils de détection légèrement différents.

Substance mère	Métabolite	Utilisation	Feurtille	Cossaux	Moulinet	Métabolites pertinents
			ng/l	ng/l	ng/l	
Chloridazon		betterave	<10	<10	<10	
	Desphenyl-Chloridazon (B)		290	59	40	
	Methyldesphenyl-Chloridazon (B1)		84	20	<20	
Chlorothalonil		interdit	<10	<10	<10	
	Chlorothalonil-R 182281		<25	<25	<25	
	Chlorothalonil-R 417888/M12		<10	<10	<10	x
	Chlorothalonil-R 418503/M13		<10	<10	<10	x
	Chlorothalonil-R 419492/M8		<25	<25	<25	x
	Chlorothalonil-R 471811/M4		120	<25	<25	x
	Chlorothalonil-R 611553		<25	<25	<25	
	Chlorothalonil-R 611965/M5		<25	<25	<25	x
	Chlorothalonil-R 950097		<25	<25	<25	
	Chlorothalonil-SYN 507900		<25	<25	<25	x
	Chlorothalonil-SYN 546872		<25	<25	<25	
Dimethachlor		colza	<10	<10	<10	
	Dimethachlor-CGA 50266		<10	<10	<10	
	Dimethachlor-CGA 354742		<10	<10	<10	
	Dimethachlor-CGA 369873		<20	<20	<20	
Dimethenamid(-P)		divers	<10	<10	<10	
	Dimethenamid-P-M23		<20	<20	<20	
	Dimethenamid-P-M27		<20	<20	<20	
	Dimethenamid-P-M31		<50	<50	<50	
Dimoxystrobin		non homologué	<10	<10	<10	
	Dimoxystrobin-505/M08		<20	<20	<20	
	Dimoxystrobin-505/M09		<20	<20	<20	
Flufenacet		céréales	<10	<10	<10	
	Flufenacet-M2		<20	<20	<20	
Flurtamone		non homologué	<25	<25	<25	
Metalaxyl(-M)		maïs	<10	<10	<10	
	Metalaxyl-M-CGA 108906		<20	<20	<20	
	Metalaxyl-M-CGA 62826/NOA 409045		<20	<20	<20	
Metamitron		betterave	<10	<10	<10	
	Desamino-Metamitron		<10	<10	<10	
Metazachlor		colza	<10	<10	<10	
	Metazachlor-BH 479-4		24	<10	<10	
	Metazachlor-BH 479-8		45	<10	<10	
	Metazachlor-BH 479-9		<20	<20	<20	x
	Metazachlor-BH 479-11		<20	<20	<20	x
	Metazachlor-BH 479-12		36	<20	<20	
Quinmerac		betterave, colza	<10	<10	<10	
	Quinmerac-BH 518-2		<20	<20	<20	
(S-)Metolachlor		betterave	<10	<10	<10	
	S-Metolachlor-CGA 351916/CGA 51202		<10	<10	<10	
	S-Metolachlor-CGA 368208		<20	<20	<20	
	S-Metolachlor-CGA 380168/CGA 354743		34	<10	<10	
	S-Metolachlor-NOA 413173		<20	<20	<20	
Terbuthylazin		maïs	<10	<10	<10	
	Terbuthylazin-MT23		<50	<50	<50	
	Terbuthylazin-SYN 545666/SM6		<50	<50	<50	
Tolyfluanid		non homologué	<20	<20	<20	
Topramezone		non homologué	<25	<25	<25	
	Topramezon-N3		<20	<20	<20	
Trifloxystrobin		divers	<10	<10	<10	
	Trifloxystrobin-CGA 321113		<50	<50	<50	
	Trifloxystrobin-NOA 413161		<50	<50	<50	
	Trifloxystrobin-NOA 413163		<50	<50	<50	
Tritosulfuron		betterave	<25	<25	<25	
	Tritosulfuron-BH 635-4/635M01		<20	<20	<20	
Dichlofluanid		interdit				
	N,N-Dimethylsulfamid		<10	<10	<10	
Flufenacet, Trifloxystrobin, Tritosulfuron etc.		divers				
	TFA (Trifluoracetat)		670	240	230	

Tableau 10 : Analyse avancée de métabolites de pesticides effectuée chez TZW en étiage prononcé, hors influence de la Feurtille sur les sources. Les métabolites pertinents analysés sont marqués d'un « x ».

3.3. Suivi de crue

PRÉLÈVEMENTS

Le suivi de crue a été prévu après une période de basses eaux ou à l'étiage suite à plusieurs semaines d'absence de précipitations afin de connaître la situation initiale stable, avant la pollution des sources. Les légères pluies du 15 octobre n'ont pas impacté les sources.

Par la suite, les 66mm de précipitations cumulées, tombées entre le 18 et 19 octobre, ont conduit à une crue à la Feurtille. Le débit de la perte de la Feurtille a pris l'ascension de 3.5 à 240 l/s en l'espace de 18 heures (Figure 8). Les 34mm supplémentaires de pluies du 21 octobre ont mené à une seconde crue où le débit est monté à nouveau, cette fois-ci, à 280 l/s. Les parts de la Feurtille dans le système étaient de 45% pour la première crue et de 38% pour la seconde crue, ce qui les classe dans la catégorie des grandes crues ($Q_F/Q_S > 30\%$). En parallèle, un pic de turbidité autochtone est observable aux deux sources lors de l'orage, en premier au Moulinet et deux heures plus tard au Cossaux, avec un pic nettement plus prononcé au Moulinet. Il correspond à la mise en charge du système karstique, mise en évidence par l'augmentation du débit des sources.

Puis, après deux jours et demi, l'arrivée des eaux chargées de la Feurtille se manifeste par une augmentation de la turbidité et de la concentration en matière organique aux sources du Mont de Chamblon. Les deux pics de matière organique et de turbidité se confondent au Cossaux alors qu'au Moulinet le pic de turbidité arrive peu avant le pic de matière organique. L'eau prélevée au Moulinet le 19 octobre correspond au pic de matière organique et non pas de turbidité. Tous ces apports d'eaux chargées allochtones ont été observés légèrement plus tôt à la source du Moulinet qu'à la source du Cossaux.

En l'espace de 20 heures, le débit de la source du Moulinet a évolué d'une situation initiale d'étiage (40 l/s) à une situation de crue (240 l/s). Lors de cet événement, le débit de la source du Cossaux n'a augmenté que de 10 l/s, soit de 42 à 52 l/s. La source du Moulinet constitue une sorte de trop-plein naturel pour le Cossaux, encaissant le surplus du débit et des eaux chargées.

Le 23 octobre, les sources ont été impactées une seconde fois par l'arrivée des eaux chargées.

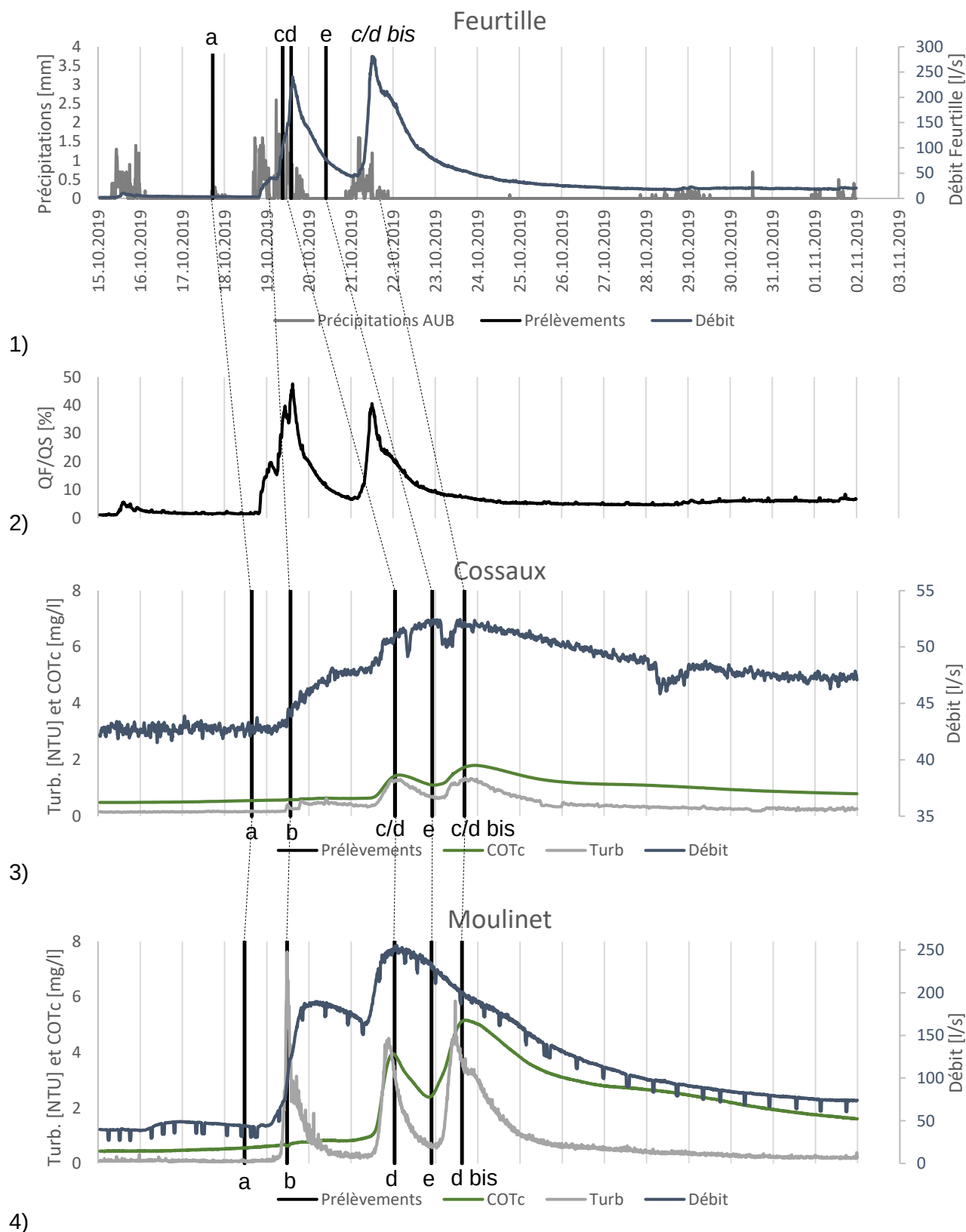


Figure 8 : Prélèvements lors du suivi de crue. a : conditions hydrogéologiques initiales (conditions stables) ; b : turbidité autochtone maximale due à la mise en charge du système karstique ; c : turbidité allochtone maximale due à l'arrivée des eaux turbides de la perte de la Feurtille ; d : teneur en matière organique maximale due à l'arrivée des eaux chargées de la perte de la Feurtille ; e : conditions de récession à la perte de la Feurtille ; c/d bis : turbidité et matière organique allochtones maximales dues à l'arrivée d'une seconde crue à la Feurtille. 1) débit de la Feurtille et précipitations à l'Auberson. 2) part du débit de la Feurtille sur le débit du système karstique. 3) turbidité, débit et matière organique (calculée depuis ext. UV_{254nm}) au Cossaux. 4) turbidité, débit et matière organique (calculée depuis fluoresc. UV) au Moulinet 6a.

EVOLUTION DES SOMMES DES CONCENTRATIONS EN PESTICIDES SUR LE COURT TERME

Lors du suivi de crue, la somme des pesticides (Figure 9) dans les sources a été dans les normes en conditions initiales stables (prélèvements « a » de la Figure 8). Par contre, la perte était 2 à 3 fois plus polluée que les sources. Etant déjà en dehors de la période agronomique à risque, peu de pesticides sont détectables.

Suite aux précipitations, le pic de turbidité autochtone (prélèvements « b ») n'a pas apporté de pollution supplémentaire : la remise en charge du système karstique n'a pas augmenté la somme des pesticides mesurés. Certains micropolluants ont été dilués alors que la concentration d'autres a légèrement augmenté, résultant par un bilan moyen neutre.

L'arrivée des eaux chargées de la Feurtille au Moulinet et au Cossaux a pollué les eaux du Moulinet, mais, de manière contre-intuitive, le Cossaux n'a pas encore été particulièrement affecté. Alors que les paramètres mesurés en continu (prélèvements « d »), indiquaient une eau chargée par des pics de COT et Turb_{allo}, le pic de pollution liée aux pesticides ne semble pas encore être atteint. Il semble être temporellement décalé avec les pics de matière organique ou de turbidité. Une piste à explorer serait de vérifier si le pic de pollution aux micropolluants pourrait être mieux lié à des paramètres indiquant une modification de l'équilibre chimique dans l'eau du type pH. L'échantillonnage pourrait être encore optimisé dans le futur pour la recherche du moment où la concentration maximale des micropolluants est mesurable. Les substances ayant une affinité plus forte avec l'eau que la matière organique (cf. annexe 6) auraient probablement tendance à survenir dans un deuxième temps.

Au moment de la décrue, les paramètres continus mesurant la matière organique et la turbidité avaient considérablement baissés (prélèvements « e »). Ces paramètres mesurés en laboratoire ont également descendu. Après un jour, l'eau est devenue plus limpide et la concentration totale des pesticides a également baissé, au Moulinet. Par contre elle n'aurait pas encore eu le temps de descendre au Cossaux. C'est dans cet échantillon que l'on observe le pic de pollution, notamment des polluants très solubles. Afin de démontrer au mieux une baisse de pollution due aux micropolluants en décrue, il aurait fallu attendre au moins deux jours, l'équivalent du temps de transit pendant cette crue. Or, l'arrivée d'une deuxième crue nous a contraint à effectuer le prélèvement plus tôt, après un jour seulement. L'échantillon « e » n'est donc pas totalement valide.

Par la suite, une nouvelle crue a amené des eaux chargées aux sources. De manière prévisible, la pollution au Moulinet était plus faible que pendant la première crue. L'affirmation est à nouveau moins évidente à formuler pour le Cossaux.

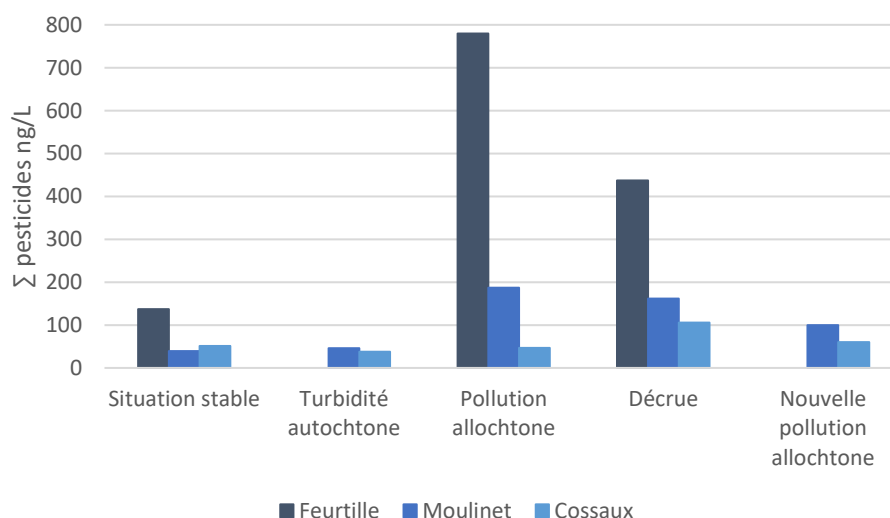


Figure 9 : Evolution des sommes des concentrations en pesticides selon crue de juin 2019 (hors chlorothalonil R471888). Les masses d'eau des sources correspondantes rétrospectivement à la Feurtille, ont été regroupées.

EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN PESTICIDES INDIVIDUELS SUR LE COURT TERME

Après le suivi de crue, il a été possible de séparer les pesticides en deux catégories. La première contient les micropolluants présents dans les sources avant même l'arrivée de la pollution allochtone provenant de la perte et une deuxième catégorie où les micropolluants sont mesurables seulement à partir du moment où l'eau chargée de la perte arrive aux sources. Les micropolluants présents dans le premier graphique sont peu nombreux, hormis l'atrazine et quelques restes de l'application récente de métolachlore, le DEET et l'oxadixil ne sont pas utilisés dans l'agriculture. La majorité des micropolluants mesurés lors du suivi de crue n'était pas détectable en situation initiale. Au Moulinet, les micropolluants présents en plus grande concentration étaient le chloroluron (une des substances les plus utilisées par les agriculteurs à Baulmes) et le Métalaxyl-M. Ils ont été identifiés lors du pic de COT. Au Cossaux, c'est le métabolite du chlorothalonil qui a été mesuré en plus grande concentration, lors de la phase de décrue.

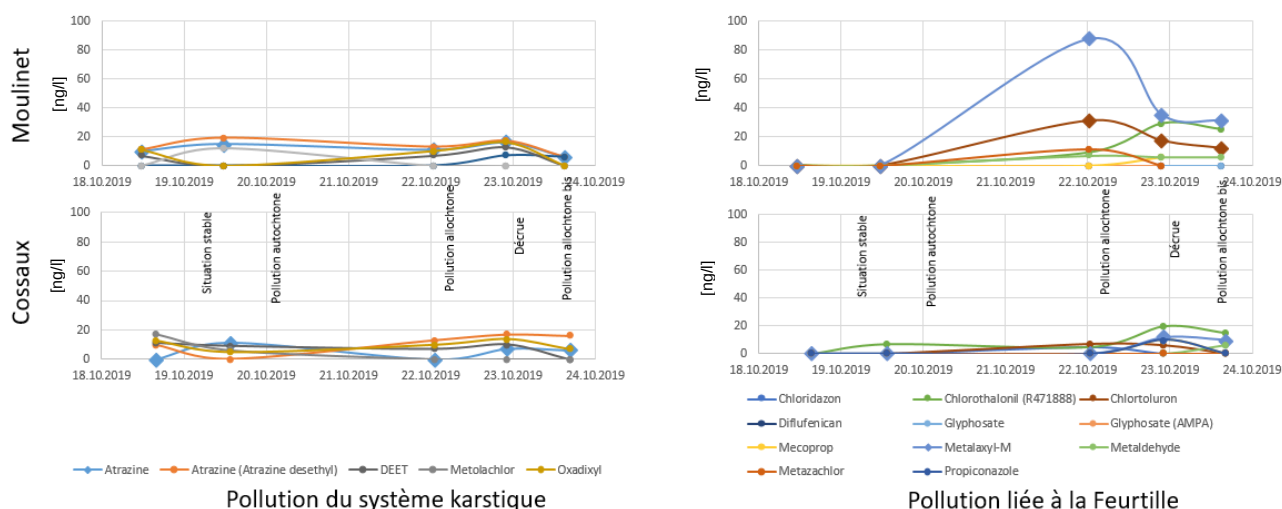


Figure 10 : Pesticides mesurés lors du suivi de la crue d'octobre 2019 au Moulinet et au Cossaux.

Alors que les concentrations maximales de la majorité des pesticides mesurés au Moulinet ont été détectés lors du prélèvement « d » correspondant au pic de matière organique, le métabolite R471888 du chlorothalonil fait exception. La concentration maximale de ce dernier a été mesurée lors du prélèvement « e » correspondant à la phase de la décrue. Le même comportement a été observé au Cossaux. La courbe correspondante à la Feurtille indique également une pollution moindre lors des pics de matière organique « d » et de turbidité « c » alors que la concentration maximale a été mesurée en phase de décrue « e ». Les concentrations du R471888 sont restées ici dans les normes aux sources. Cependant, le R471811 étant généralement mesuré à des concentrations plus élevées d'un facteur 2 à 3, il est très probable qu'il ait été hors normes.

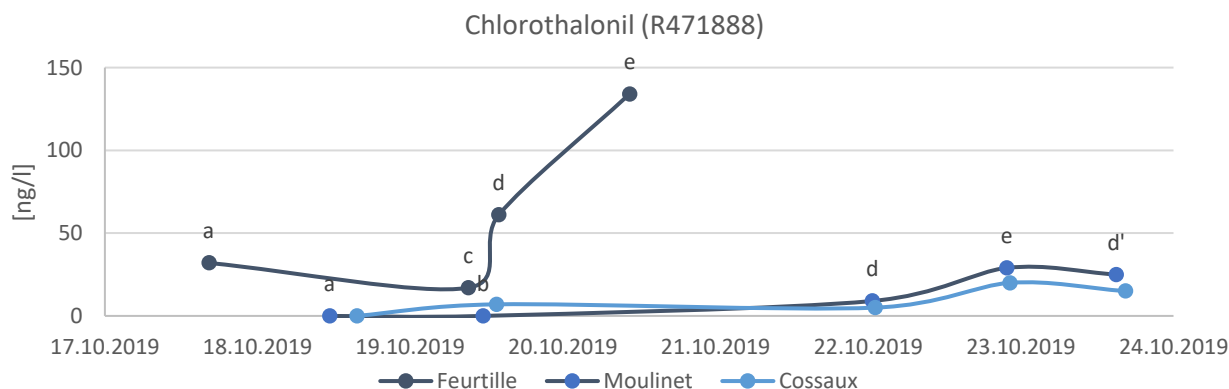


Figure 11 : Métabolite du chlorothalonil R471888 pendant le suivi de crue à la Feurtille, Moulinet et Cossaux, selon prélèvements de la figure 13.

ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES SUR LE COURT TERME

Lors du suivi de crue, quelques paramètres liés aux macropolluants ont été mesurés (Figure 12). En situation initiale « a », les concentrations des anions tels que les sulfates et nitrates étaient plus basses à la perte et aux sources. Lors du pic de crue à la Feurtille, les concentrations ont nettement augmenté. En phase de décrue « e », les concentrations des anions sont redescendues, pour remonter à nouveau lors de l'impact de la deuxième crue « d' ». Les analyses de Potassium, de Sodium et de chlorures ont montré des variations similaires, mais à des concentrations plus faibles.

Les concentrations des cations, quant à elles, sont redescendues pendant la phase turbide « c » à la Feurtille, pour remonter par la suite en pic de crue « d ». Elles n'ont pas eu le temps de redescendre en phase de décrue « e ». La Feurtille était plus chargée en calcium que les sources alors que l'effet inverse a été observé pour le magnésium. La variabilité des mesures de dureté de l'eau a été similaire à celle du calcium.

Quant au pH, il était légèrement basique en situation stable à la Feurtille « a ». Lors de la crue, il est devenu plus neutre. En phase de décrue, il est légèrement remonté. Un comportement similaire a été observé aux sources. **Lors du suivi de crue, une diminution du pH semble corrélée avec une détérioration de la qualité chimique des sources.** L'augmentation des concentrations d'anions (nitrates, sulfates etc.) dans l'eau peut notamment entraîner la diminution du pH dans l'eau.

Les mesures de COT étaient corrélées avec les mesures de COTc mesurées en continu aux sources. Les deux crues successives de la Feurtille ont amené à chaque fois de la matière organique aux sources. L'échantillon « d » de la Feurtille à 36mg C/l a apporté au Moulinet et au Cossaux respectivement 4 et 1.4mg C/l le 22 octobre 2019.

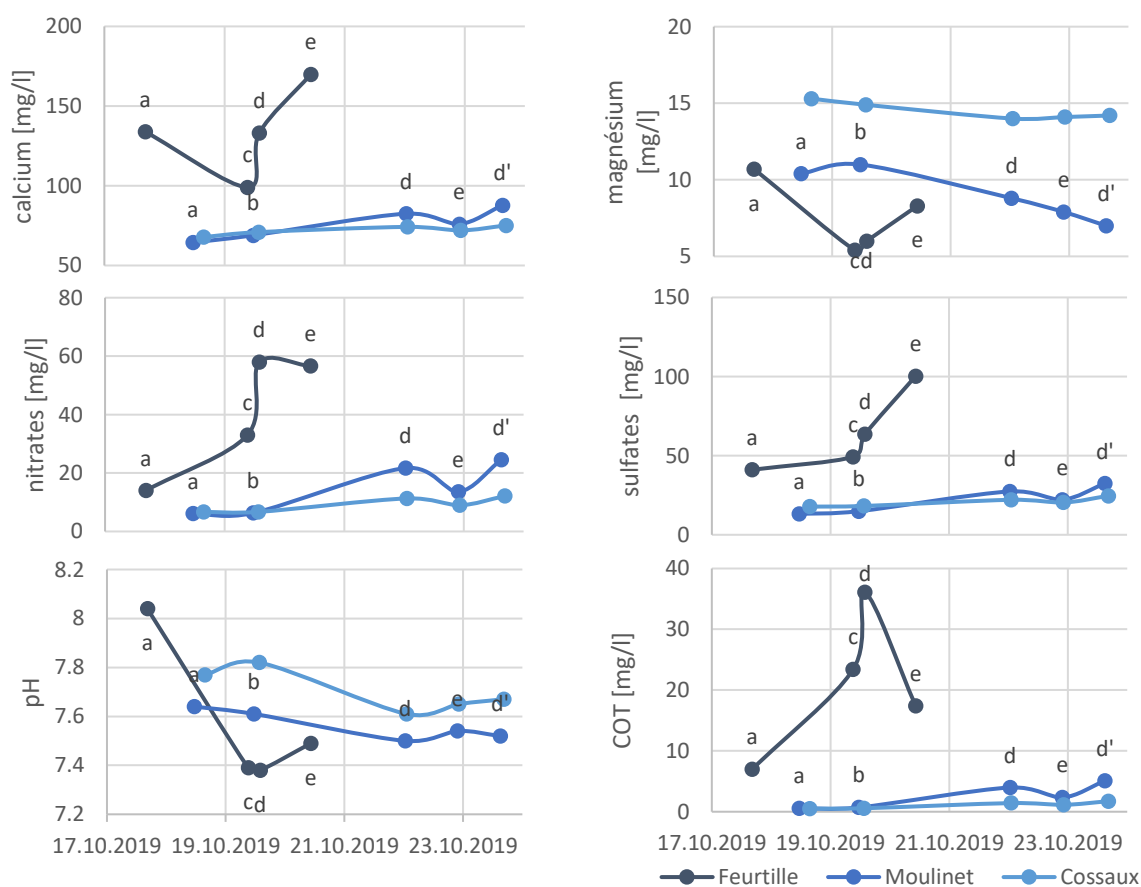


Figure 12 : Calcium, magnésium, nitrates, sulfates, pH et COT mesurés dans la Feurtille, Moulinet 6a et Cossaux lors du suivi de la crue d'octobre 2019, selon les prélèvements de la figure 13.

3.4. Matière organique

TYPE DE MATIÈRE ORGANIQUE

Une bonne corrélation est obtenue entre les données en continu (CAS₂₅₄ au Cossaux ou Fluorescence UV), et les données en laboratoire (absorbance UV à 254nm ainsi que le COT). Les relations sont disponibles en annexes. En conditions hydrogéologiques stables, la matière organique des eaux des sources se caractérise par une signature différente de celle qui est mesurée lors des conditions instables. Un rapport entre l'adsorption UV_{254nm} sur le COT dépassant le seuil de 3 unités décrit, en général, une matière organique fortement influencée par la perte de la Feurtille.

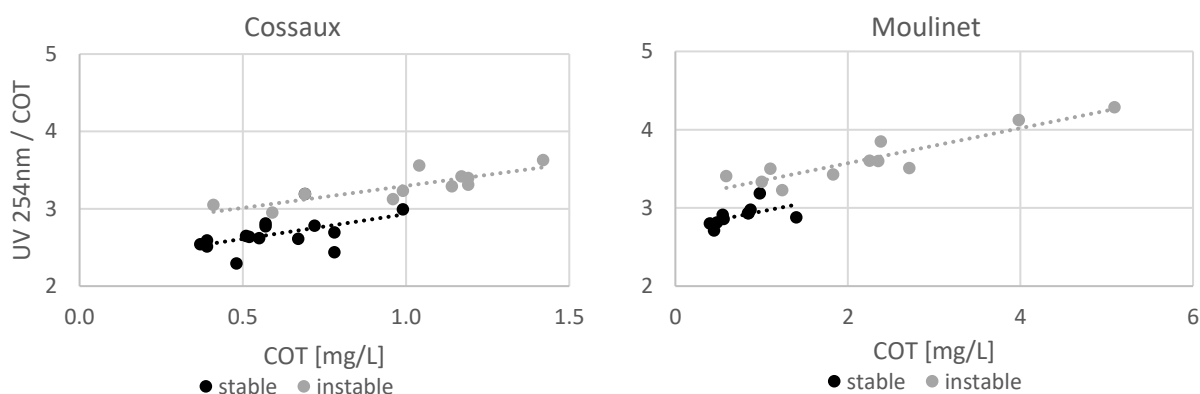


Figure 13 : Signatures de la matière organique aux sources en conditions hydrogéologiques stable et instable.

Les analyses de type de matière organique naturelle (MON) ont été réalisées afin d'estimer son potentiel colmatant. La matière organique dissoute peut se séparer en deux catégories : hydrophobe ou hydrophile. Le CDOC hydrophile comprend les biopolymères, potentiellement problématiques.

Ces analyses ont été effectuées en étiage, alors que la part de la Feurtille dans les sources était négligeable. Selon le Tableau 11, la matière organique est, pour les trois sites, constituée d'environ **60% de substances humiques d'origine pédogène**, par opposition à une origine aquagène. Les biopolymères prennent leur origine dans les eaux de surfaces. A la Feurtille, la part de biopolymères n'est pas très élevée mais chargée en protéines, ce qui reflète une matière organique d'origine bactérienne. La concentration en colloïdes transparents organiques indique un potentiel colmatant élevé⁹ dans le canal de Baulmes. Cependant, dans les sources, ces concentrations sont en dessous du seuil de détection. **Sans influence de la Perte de la Feurtille, les sources sont d'excellente qualité et biologiquement stables.** Aucune mesure n'a pour l'instant été faite lors d'une crue : la conclusion reste à valider dans des conditions hydrologiques moins favorables.

COD												Coll. inorg. SAC	SUVA SAC COD /
	CO hydro phobe	CO hydrophile											
		Bio polymères					Substances humiques		Blocks	LMW Acide	LMW neutre		
					Prot. % biopoly	Coll. org. ug/L C		Aroma. L/(mg*m)					
	ug/L C % COD	ug/L C % COD	ug/L C % COD	ug/L C % COD			ug/L C % COD	L/(mg*m)	ug/L C % COD	ug/L C % COD	ug/L C % COD	/m	L/(mg*m)
Feurtille	1556	158	1408	118	57	20	807	4.58	250	<1	234	<0.01	3.63
%	100	10.1	92.6	7.5			51.5		16		14.9		
Moulinet	363	47	316	4	-	<1	215	3.43	50	<1	47	<0.01	3.03
%	100	13.0	92.3	1.2			59.1		13.9		12.9		
Cossaux	329	31	298	2	-	<1	194	3.39	53	<1	49	0.01	2.98
%	100	9.4	84.3	0.6			59.0		16.1		14.9		

Tableau 11 : Type de matière organique en étiage, Feurtille (11.09.20), Moulinet (18.09.20), Cossaux (18.09.20). La Feurtille est prélevée en temps sec, la part de la Feurtille dans le système (<1%). COD : carbone organique dissous.

⁹ Une concentration de colloïdes organiques plus élevée que 5 ppb indique le potentiel colmatant moyen des membranes UF ou OI alors qu'au-dessus de 20 ppb, le potentiel devient très élevé.

4. Discussion générale

Dans ce chapitre sont discutés les diverses interactions entre les micropolluants dans les eaux des sources et leur environnement ainsi qu'entre la perte et les sources du Mont de Chamblon. Ensuite, les substances problématiques sont mises en évidence ainsi que les éléments à traiter. Puis, une chaîne de traitement est proposée afin de pouvoir utiliser le Cossaux en tout temps.

4.1. Survenance, origine et comportement des micropolluants dans le système karstique

SURVENANCE DES PESTICIDES À LA PERTE DE LA FEURTILLE

LESSIVAGE DES PRODUITS PHYTOSANITAIRES À LA PERTE

Prenons l'exemple de deux produits phytosanitaires appliqués à une période différente (Figure 14). L'herbicide Carmina a été appliqué en pré-levée pour les cultures de blé. Environ 18kg de chlortoluron ont été appliqués dans le bassin d'alimentation de la Feurtille en octobre 2019. L'herbicide Dual Gold a été, quant à lui, utilisé pour les cultures de betterave. Environ 14kg de s-metalochlor ont été appliqués entre mai et mi-juin 2019. En conditions hydrogéologiques stables, les deux substances mères ne sont quasiment pas décelables dans la perte. Cependant, lors de la crue d'automne, le chlortoluron appliqué le mois précédent a été mesuré en concentrations élevées. Il en est de même pour le s-metalochlor, mais en période printanière.

A l'échelle d'une année hydrogéologique, il est possible d'observer un comportement similaire d'une grande partie des autres substances mères détectées : suite aux premières précipitations intenses dans le bassin d'alimentation de la perte après l'application récente du PPh, une concentration du pesticide significativement plus élevée pourra être mesurée dans le canal de Baulmes.

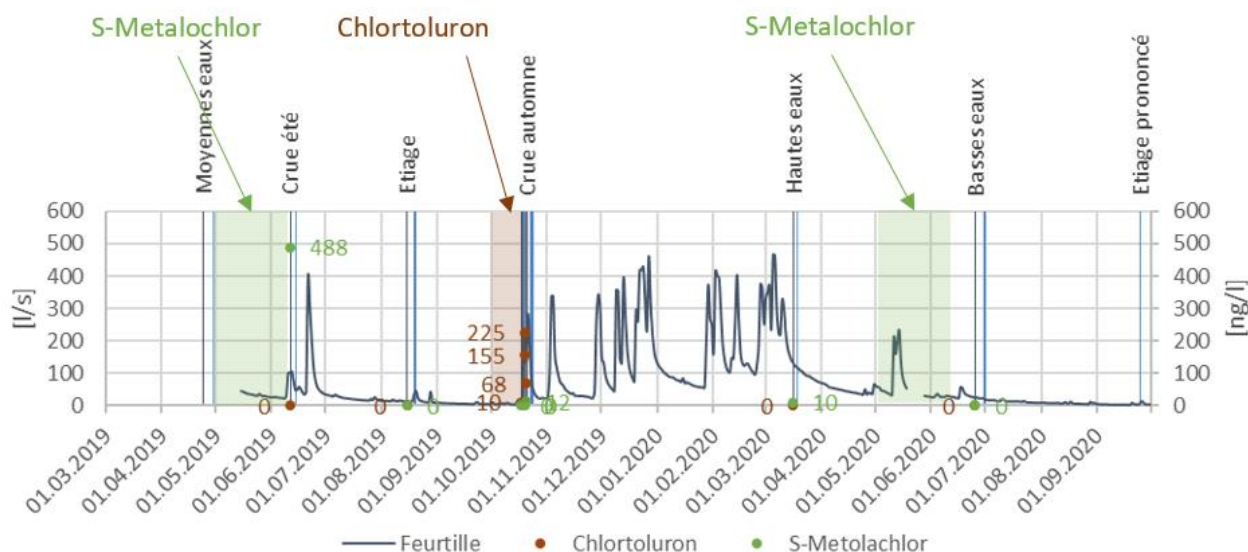


Figure 14 : Période d'application du chlortoluron et du S-Metalochlor et concentrations mesurées dans la perte

Le suivi de crue a démontré qu'en général, quelques heures après des pluies abondantes, les concentrations des micropolluants présents dans la Feurtille augmentent par rapport à une situation initiale, où le sol était sec et la variation du débit était faible. Les pesticides se retrouvent lessivés et acheminés de manière efficace par les eaux fortement drainées en direction de la perte.

La majorité des produits ayant été utilisés entre le mois d'avril et mai, la probabilité de détection de concentrations de pesticides sommées supérieures à 500 ng/l, suite à une crue à la perte, serait plus élevée en période de **printemps jusqu'à mi-été**. Elle serait plus faible le reste de l'année et quasiment nulle en hiver. Certaines substances sont par contre détectables toute l'année à la perte. Les métabolites CGA 380168/354743 du s-metalochlor sont, par exemple, persistants dans les eaux (Tableau 10). Ils sont détectables dans les eaux même lors de l'étiage prononcé.

EVOLUTION DE LA SOMME DES PESTICIDES À COURT TERME À LA PERTE

Il est possible de constater une corrélation à court terme entre les concentrations de pesticides sommées et les variations de débits à la Feurtille, selon la Figure 15. La somme des pesticides mesurée est maximale lors de la pointe de la crue. En réalité, le moment exact du pic de la somme des pesticides n'est pas connu : il se peut qu'il soit décalé de quelques heures du pic de débit. Ceci peut être expliqué notamment par le comportement physico-chimique de certains polluants. Cet aspect est développé plus loin dans ce rapport, dans un chapitre dédié. Puis, elle tend en effet à diminuer en phase de décrue à la perte de la Feurtille avec la diminution des concentrations des pesticides non persistants.

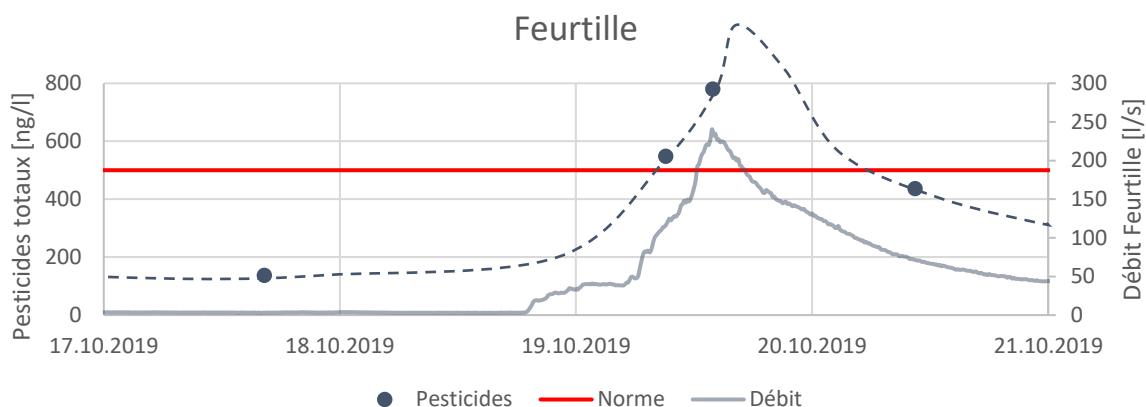


Figure 15 : Evolution temporelle de la somme des pesticides à la perte de la Feurtille lors du suivi de crue, en traitillé, l'évolution de la somme des pesticides estimée

SURVENANCE DES PESTICIDES AUX SOURCES DU MONT DE CHAMBLON

PESTICIDES PRÉSENTS DANS LE SYSTÈME INTRAKARSTIQUE DES SOURCES

Suite aux précipitations intenses, le débit du système peut accélérer. Quand elles ont lieu suite à une longue période sèche, le Moulinet et le Cossaux, dans une moindre mesure, deviennent généralement turbides. Une augmentation des concentrations d'un pesticide lors des pics de turbidité autochtone est liée à la remise en suspension des particules intrakarstiques à proximité des sources. Lors de cet évènement, les concentrations de COT restent stables (Pronk, 2008).

Lors de cette turbidité autochtone, les concentrations en atrazine doublent par rapport aux conditions initiales stables (Figure 16). Elles diminuent lors de la turbidité allochtone. Une pollution à l'atrazine dans le système karstique est identifiable à proximité directe des sources du Moulinet et du Cossaux.

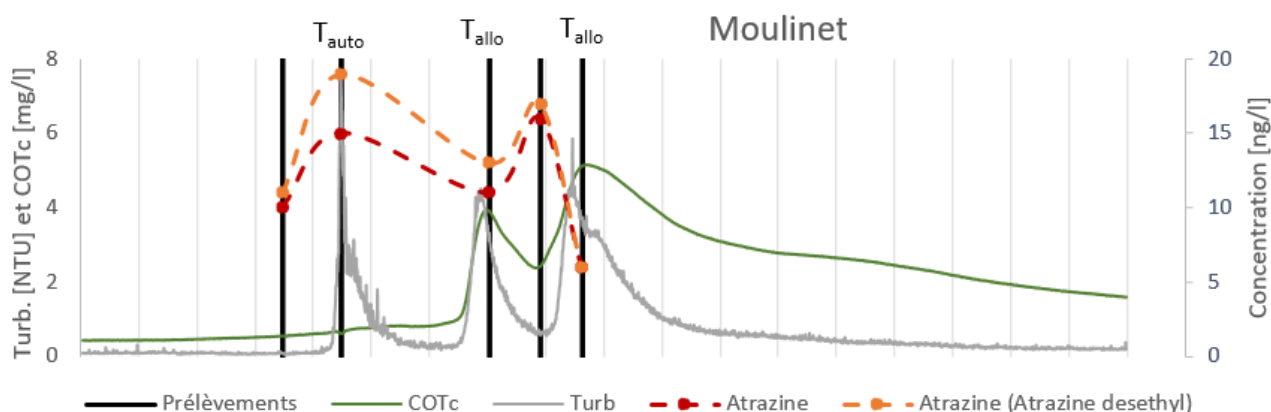


Figure 16 : Evolution des concentrations en atrazine lors du suivi de crue au Moulinet

En conditions hydrogéologiques instables, lorsque le système karstique est mis en charge, aucune substance nouvelle n'est apparue lors du suivi de crue avec l'apparition de la turbidité autochtone. Ceci indiquerait que le principal lieu de contamination aux PPh se trouve ailleurs qu'à proximité immédiate des captages. Les micropolluants analysés auraient probablement peu d'affinité avec les matières en suspension présentes naturellement dans le système karstique. Hormis l'atrazine, seuls les métabolites du chlorothalonil, très solubles, ont été retrouvés en plus grandes quantités au Cossaux, lors du pic de turbidité autochtone, lors de l'accélération du débit de la source.

PESTICIDES ACHEMINÉS AUX SOURCES PAR LA CRUE DE LA PERTE

Après comparaison des valeurs décelables dans la perte et dans les sources, il est à constater que la valeur médiane des concentrations des pesticides individuels est plus élevée en conditions hydrogéologiques instables qu'en conditions stables (Figure 17). Les crues de la perte de la Feurtille ont détérioré la qualité des sources, particulièrement en ce qui concerne les valeurs extrêmes.

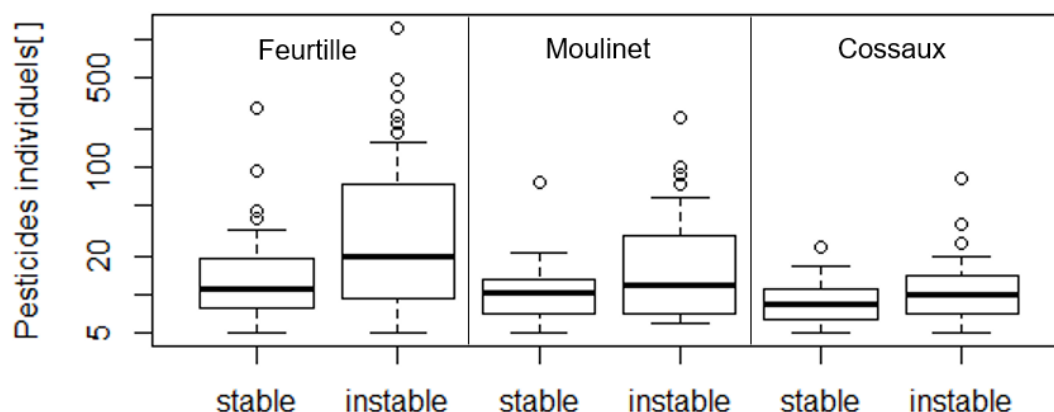


Figure 17 : Boxplot des concentrations (échelle logarithmique) des pesticides individuels détectables en conditions hydrogéologiques stables ou/et instables à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux, hormis chlorothalonil et chloridazon. Le rectangle allant du premier quartile au troisième quartile est coupé par la médiane. Les segments indiquent le premier et neuvième décile. Les cercles représentent des valeurs extrêmes.

ORIGINE DES PESTICIDES DÉTECTÉS AUX SOURCES DU MONT DE CHAMBLON

Bien qu'une influence du bassin d'alimentation du mont de Chamblon ne peut être écartée, aucune pollution notable par les micropolluants n'y a été clairement identifiée. Les indices semblent concorder sur une **pollution essentiellement agricole et provenant majoritairement de la Feurtille**.

IMPACT DE LA FEURTILLE SUR LA POLLUTION SOMMÉE DES SOURCES

Suite aux résultats de la démarche participative et au calcul du temps moyen de demi-vie des substances appliquées, la période à risque agronomique spécifique aux sources a été déterminée entre avril et mi-juillet. En 2019-2020, quand la part du débit de la Feurtille dans le système karstique (Q_F/Q_S) alimentant les sources a dépassé les 5% en étiage et les 10% en hautes eaux, elle a en général été liée à l'arrivée d'une crue, amenant potentiellement des micropolluants aux sources. Selon la Figure 18, les sommes des pesticides et métabolites pertinents hors période à risque, même lors d'une grande crue, ont toujours été dans les normes. En effet, ces sommes n'ont pas dépassé les 500ng/l dans les sources suite aux périodes nécessitant moins d'application de produits phytosanitaires. Par contre, en période agronomique à risque élevé, principalement suite à la lutte contre des plantes adventices printanières, cette somme a excédé les 500ng/l au Moulinet, lors d'une petite crue. Par extrapolation, nous pouvons imaginer que cette somme pourrait facilement excéder les 3 fois la norme au Moulinet avec une plus grande crue qui excéderait un Q_F/Q_S de 50%.

Les milieux karstiques constituent des ressources vulnérables aux pollutions. Elles s'y propagent rapidement, cependant, ces aquifères sont également vite vidangés et assainis naturellement. Les pollutions ont l'avantage d'être moins persistantes que dans d'autres types de captages grâce au renouvellement rapide des eaux. Les variations de pollutions sont saisonnières : hors période agronomique à risque élevé, la pollution aux micropolluants d'origine agricole (Σ pesticides) devient presque nulle (hormis la pollution de fond par les polluants persistants).

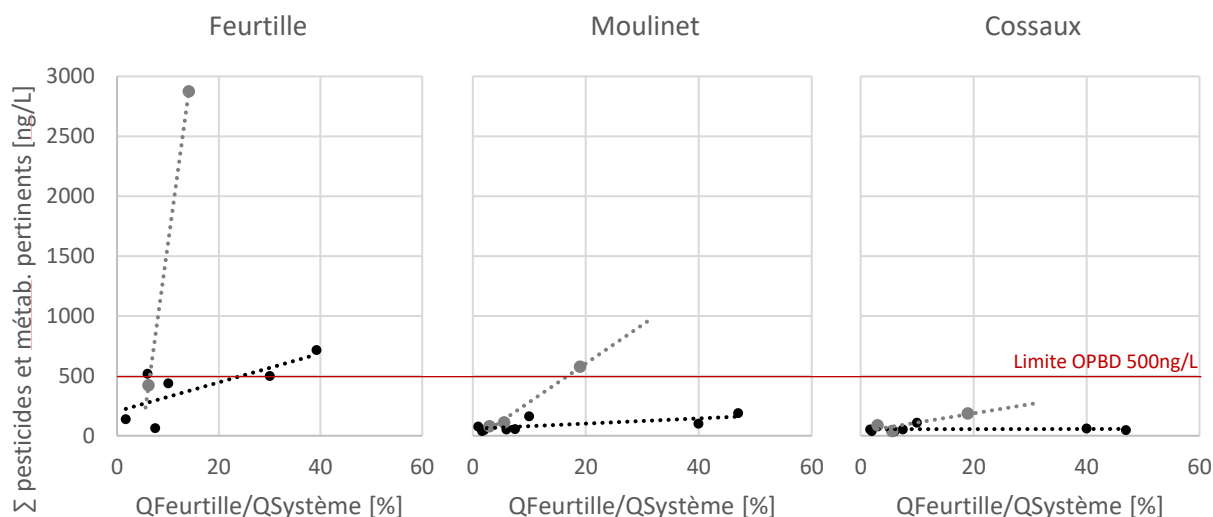


Figure 18 : Somme des pesticides et métabolites ($i = \sim 80$) selon la définition de l'OPBD (hors chlorothalonil R471811 pour les échantillons de 2019), selon des échantillons récoltés entre 2019 et 2020. En gris : les analyses en période agronomique à risque élevé. En noir : les analyses en période agronomique à risque réduit

2/3 des substances utilisées dans le bassin d'alimentation de la Feurtille (selon les entretiens effectués par Mandaterre) et considérées comme « substances à risque pour captages » par l'OFAG ont été analysées. Ceci devrait nous renseigner de manière suffisante sur l'ampleur de pollution de la plaine agricole à Baulmes en ce qui concerne les micropolluants individuels.

L'évolution temporelle des pesticides sommés à la Feurtille, au Cossaux et au Moulinet (Figure 19) indique qu'en conditions hydrogéologiques stables, la somme des pesticides est dans les normes

(en-dessous de 500 ng/l) aux sources, alors qu'elle ne l'est plus au Moulinet lors de la crue d'été. Afin de pouvoir comparer les données, les 80 analytes ont été pris comme base d'analyse commune à tous les sites. Lorsque le nouveau métabolite du chlorothalonil R471811 est également pris en considération dans la somme, il contribue d'une manière importante à augmenter la dite somme.

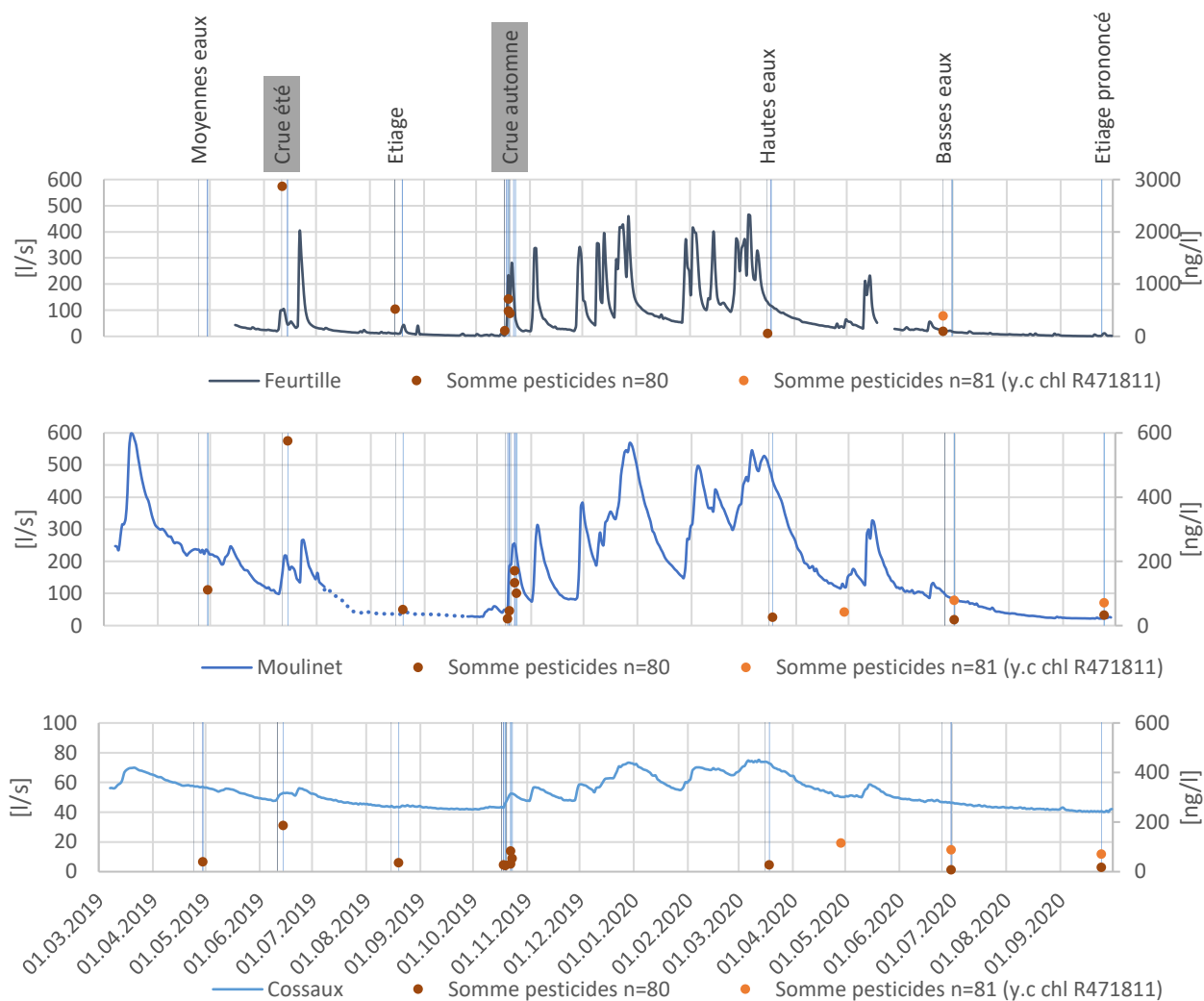


Figure 19 : Evolution temporelle des pesticides somméés à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux sur n=80 analytes, définition de la somme des pesticides selon l'OPBD

RÉPARTITION DES PESTICIDES INDIVIDUELS DANS LES EAUX DU SYSTÈME

Pour une même masse d'eau, les concentrations des polluants, amenés de manière ponctuelle par le lessivage d'une crue, sont, en moyenne, **~3 fois plus élevées au Moulinet qu'au Cossaux** (Figure 20). Il existe néanmoins une grande disparité entre les diverses substances, notamment dû aux profils physico-chimiques différents des micropolluants. Par contre, cette répartition de la pollution diffuse en conditions stables est, en moyenne, équivalente entre les deux sources, où le Moulinet est de qualité similaire au Cossaux. Les métabolites du chlorothalonil, très solubles dans l'eau, auront tendance à s'éloigner de la matière organique. Nous pourrions poser l'hypothèse que le **Moulinet étant plus chargé en matière organique, qui joue un rôle protecteur**, éloignerait la substance du Moulinet, en conditions hydrogéologiques stables.

Il a été possible de faire un lien entre les quantités de produits phytosanitaires utilisés dans la plaine de Baulmes (selon entretiens de Mandaterre de 2019) et les concentrations mesurées dans le canal de Baulmes. Le facteur de dilution des substances entre la perte et les sources – à travers une même masse d'eau – est hétérogène. Néanmoins, une tendance logique peut être observée : plus les concentrations sont élevées à la Feurtille, plus le risque de les retrouver dans les deux sources

augmente (Figure 20). En conditions instables, le Cossaux et le Moulinet ont été, en moyenne, env. respectivement 15 fois et 5 fois moins pollués par les pesticides amenés par pollution allochtone que la Feurtille. En conditions stables, les écarts sont moins prononcés : le Cossaux et le Moulinet ont été en moyenne env. 5 fois moins pollués que la Feurtille.

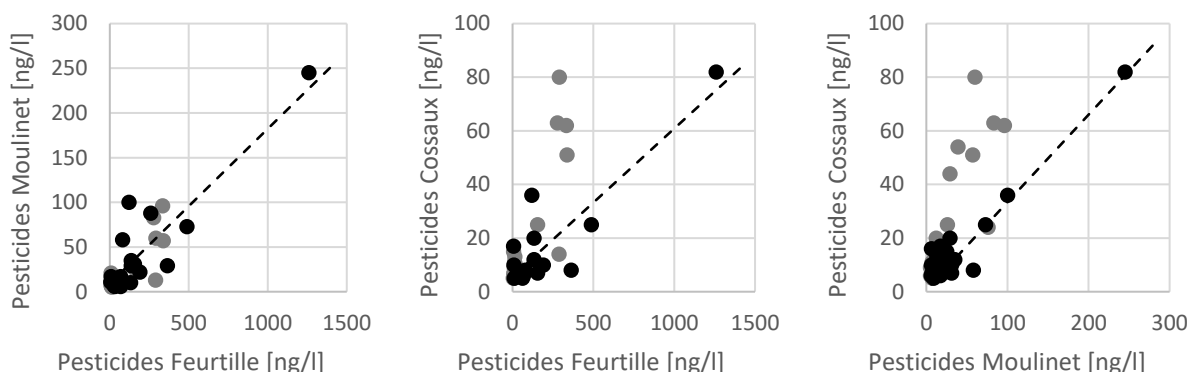


Figure 20 : Relation entre les concentrations des pesticides individuels mesurés dans la Feurtille et les masses d'eau correspondantes au Moulinet 6a et au Cossaux ainsi qu'entre les deux sources. Les analyses en conditions hydrogéologiques stables sont indiquées en gris et celles en conditions hydrogéologiques instables, dont courbe de tendance, en noir

La répartition des micropolluants dans les eaux du système karstique semble dépendre de plusieurs facteurs. Lors des crues, les vitesses de courant étant importantes, les parts des masses d'eau sont divisées de manière relativement mathématique dans le système karstique. De manière générale, lors d'une contamination par une crue, la pollution du Moulinet augmente d'un facteur 3 par rapport au Cossaux, pour les polluants rattachés à la matière organique. Par contre, en conditions stables, la vitesse du courant étant plus faible, les forces moléculaires (par exemple de type Van der Waals) entrent plus facilement dans l'équation. La répartition semble plutôt être dictée par la polarité des composés. La matière organique étant moins présente dans le Cossaux, les micropolluants organiques hydrophiles auraient probablement plus tendance à s'orienter vers le Cossaux, quand la vitesse du courant est suffisamment faible pour permettre à ces forces d'agir. La matière organique jouerait peut-être un rôle protecteur dans la source du Moulinet, où les métabolites du chlorothalonil ont tendance à être repoussées et orientées vers le Cossaux.

COMPORTEMENT DES PESTICIDES DÉTECTÉS AUX SOURCES

SURVENANCE MAXIMALE SELON LE PROFIL PHYSICO CHIMIQUE DES SUBSTANCES

La majorité des micropolluants seraient lessivés dans les premières heures, voire premiers jours lors de la crue à la Feurtille. Le pic de concentration des micropolluants ne semble pas totalement coïncider avec les mesures de COTc. En effet, les pics de pollution observés pendant de suivi de crue n'apparaissent pas au même moment pour chaque polluant individuel. Certains seraient emmenés par adsorption aux particules inorganiques apportés depuis la Feurtille, d'autres avec la matière organique et des derniers, très solubles avec une eau devenue moins turbide.

D'après la Figure 21, il est possible de différencier plusieurs types de polluants. Un premier échantillon est prélevé en conditions stables ; un second lors de la montée de la crue et une hausse de la turbidité ; le troisième est prélevé lors du débit maximal suite auquel le COT a probablement encore augmenté ; le dernier est prélevé en phase de décrue alors que la turbidité de l'eau est redevenue stable. Chronologiquement, la concentration maximale du chlortoluron survient en premier, celle du metalaxyl-M en second et celle du Chlorothalonil en dernier. Le chlortoluron est également la substance la moins soluble des trois (74 mg/l), suivie du Metalaxyl-M (7'100 mg/l), puis du chlorothalonil (18'000 mg/l), très soluble. La concentration maximale des métabolites du chlorothalonil survient en phase de décrue, alors que l'eau est devenue moins turbide. Les

substances les moins solubles seraient lessivées en premier alors que les substances les plus solubles seraient lessivées en dernier.

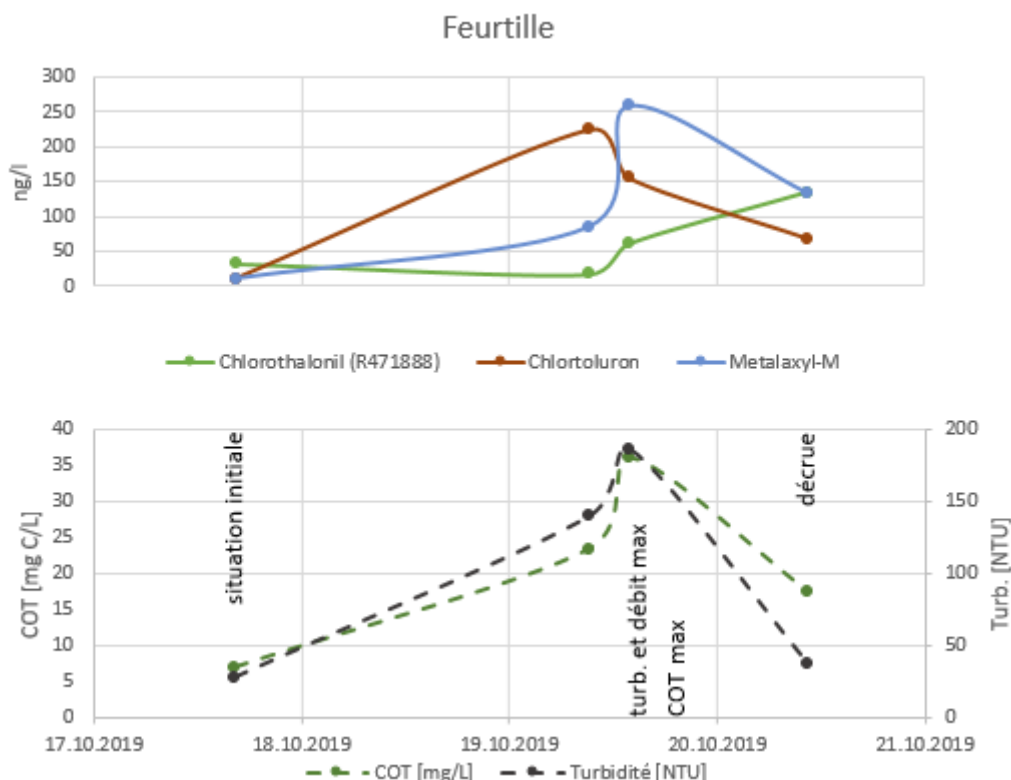


Figure 21 : Concentrations en Chlorothalonil, Chlortoluron et Metalaxyl-M à la Feurtille

Cette observation est particulièrement intéressante pour l'analyse des métabolites du chlorothalonil. Cette substance hydrophile aurait tendance à être lessivée dans un deuxième temps avec les eaux interstitielles, non liée à la matière organique.

INTERACTIONS ENTRE LA SURVENANCE DES MICROPOLLUANTS ET DES MACROPOLLUANTS

Contrairement aux hypothèses de base, la pollution totale aux micropolluants n'est pas corrélée à la teneur en matière organique, sur le long terme ou à l'échelle d'une année hydrogéologique. Elle n'est pas non plus dépendante des régimes hydriques, hormis pour le chloridazon. Autrement dit, en conditions hydrogéologiques stables, la teneur en matière organique a généralement tendance à augmenter en même temps que le débit du système karstique (Tableau 7). Or, en hiver, la période où les valeurs de matière organique de base sont souvent maximales, les pesticides ne sont presque pas appliqués et presque pas détectables dans les analyses effectuées dans les eaux des sources (hormis la pollution de base). Les concentrations des macropolluants de type cations ou anions liés à l'agriculture sont également corrélées avec les concentrations de matière organique. De ce fait, les concentrations de nitrates ou de sulfates retrouvées aux sources ne sont pas directement corrélées avec la présence de résidus de pesticides à l'échelle d'une année hydrogéologique.

Par contre, la relation devient plus manifeste à court terme, c'est-à-dire à l'échelle du temps dominant du transit des sources. L'arrivée d'une crue se manifeste notamment par une augmentation du COTc ainsi qu'une augmentation de la part du débit de la Feurtille dans le débit du système karstique. Ces deux paramètres permettent d'alerter la détérioration de la qualité de l'eau liée à la matière organique et la microbiologie ainsi qu'une potentielle arrivée de micropolluants. En plus des facteurs énumérés précédemment, le niveau de pollution dépendra également de la période d'application des produits phytosanitaires et ainsi des stocks de micropolluants mobiles et présents dans les sols.

INTERACTIONS ENTRE LES MICROPOLLUANTS ET LES PARAMÈTRES MESURÉS EN CONTINU

D'après l'annexe 5, hormis les substances persistantes, la majorité des pesticides n'est détectable qu'après un événement de crue ou suite à une application récente du produit dans le bassin d'alimentation de la Feurtille.

En conditions hydrogéologiques stables, les valeurs de COTc et de turbidité ont tendance à augmenter avec le débit (Tableau 7). Une fois les analyses de pesticides classées par régimes hydriques (annexe 5), pour la majorité des pesticides à courte durée de vie, aucune corrélation n'a pu être définie entre le débit de base et les concentrations mesurées. Cependant, les métabolites persistants du chloridazon semblent faire exception (Figure 22) : plus le débit est élevé, plus les concentrations mesurées – tant dans les sources que dans la perte – sont élevées. Cette observation est faite sur la base de seulement trois échantillons, elle est à prendre avec précaution. Les résidus semblent persistants dans l'environnement, longtemps après son application qui a eu lieu en période estivale.

Alors que l'atrazine n'est plus utilisé, il se retrouve encore dans les eaux du Moulinet. Une hausse des concentrations de la substance mère de l'atrazine est souvent accompagnée d'une hausse des concentrations mesurée de son métabolite principal, le desethyl atrazine. Ayant un faible potentiel d'adsorption sur le sol, il a un fort potentiel d'infiltration dans les eaux souterraines.

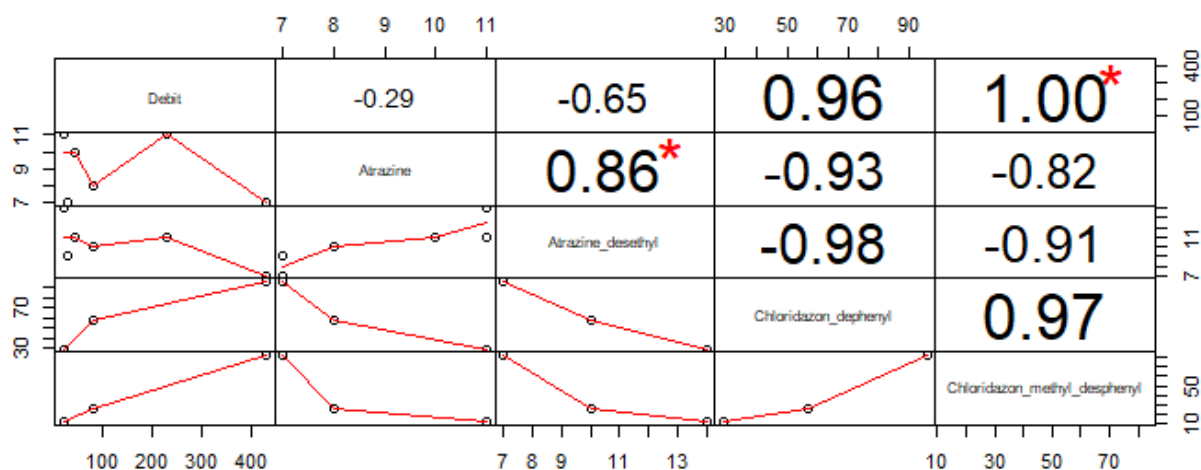


Figure 22 : Matrice de corrélation entre les données de débits et quelques micropolluants persistants d'origine agricole, pour des conditions hydrogéologiques stables au Moulinet. * p-value = 5% : les corrélations sont significatives quand elles sont munies d'une étoile. Une corrélation positive entre deux variables indique que les valeurs d'une variable tendent à augmenter lorsque celles de l'autre variable augmentent. Une corrélation négative entre deux variables indique que les valeurs d'une variable tendent à augmenter lorsque celles de l'autre variable diminuent. Une corrélation proche de 0 indique qu'il n'y a aucun lien entre des valeurs des variables. Les débits sont indiqués en l/s alors que les pesticides sont indiqués en ng/l.

Le monitoring actuel des sources du Cossaux semble efficace pour alerter une détérioration de la qualité de l'eau en termes de particules en suspension, de matières organiques et des bactéries indicatrices d'une contamination fécale. Les seuils de mise en et hors service ont été étudiés en fonction des normes légales liées à la turbidité et à l'efficacité du système de chloration. Par contre, le monitoring actuel permet d'alerter une potentielle pollution aux micropolluants, sans pour autant connaître l'ampleur de la pollution. Celle-ci dépend fortement des pratiques culturales en cours et ne peut pas être mesurée par l'intermédiaire des appareils de mesure en continu à disposition pendant la durée de l'étude. Les analyses en laboratoire ont montré un potentiel pour une éventuelle meilleure détermination de la pollution par les micropolluants grâce à l'utilisation d'un pH mètre. Ce dernier paramètre semble varier en fonction de la pollution aux pesticides présents dans les eaux, indiquant une modification de l'équilibre chimique de l'eau.

4.2. Substances problématiques décelées

FRÉQUENCE ET GRAVITÉ DES PESTICIDES INDIVIDUELS DÉTECTÉS

30% des substances à comportement pesticide analysées au Service de l'Eau ont été détectées au moins une fois à la Feurtille. Au Moulinet et au Cossaux, le pourcentage s'élève respectivement à 18 et à 15 des substances analysées.

Les graphiques fréquence-gravité de la Figure 23 permettent de mettre en évidence les substances à risque pour les deux sources étudiées. Il est jugé accru quand les concentrations dépassent au moins une fois les limites légales des 100 ng/L et quand la substance est détectée au moins dans la moitié des échantillons. D'après les analyses, aucune substance mère ou métabolite pertinent ne représente un risque accru pour les sources selon les normes et données de 2019. Depuis 2020, la réglementation sur le chlorothalonil ayant été adaptée, le métabolite R471811 est devenu pertinent et apparaît désormais dans la zone à risque élevée. Cependant, il n'a été mesuré qu'une seule fois en-dessus des normes au Cossaux, peu de temps après l'interdiction du produit. La non-conformité semble avoir été exceptionnelle : toutes les mesures suivantes se sont révélées dans les normes. Il reste à confirmer si les concentrations ne vont pas augmenter à nouveau en hautes eaux.

Sur les 90 groupes de substances mesurées (substances mères avec leurs métabolites)¹⁰, 21 ont été détectées dans les sources. Dans la majorité des cas, quand les concentrations relevées dans les analyses dépassaient les concentrations traces, il a été possible d'établir un lien avec les pratiques culturales du bassin d'alimentation de la Feurtille (et l'utilisation de PPh spécifiques).

En conditions hydrogéologiques stables, des concentrations traces de quelques substances actives ou de métabolites sont décelées en tout temps dans les sources. C'est, par exemple, le cas de l'atrazine et ses métabolites : ces polluants persistants restent présents dans les eaux alors que les produits contenant cette matière active ne sont plus homologués en Suisse depuis une dizaine d'années. Les métabolites du chloridazon et peut-être aussi les métabolites du chlorothalonil sont également présents en concentrations traces tout au long de la période d'observation et augmentent avec le débit du système karstique. Des traces d'atrazine et d'oxadixyl sont détectables dans la majorité des échantillons, tous deux interdits depuis de nombreuses années.

D'autres substances problématiques pour d'autres captages répertoriés sur le plateau suisse, telles que la simazine, alachlor, diazinon, dichlobenil, isoproturon, linuron, toutes interdites depuis plus ou moins longtemps, ne sont plus détectables dans les sources du Cossaux ni à la Feurtille.

Certains produits chimiques à caractère insecticide ou biocide ont été mesurés dans les sources, non homologués par l'OFAG. Ils n'ont pas été utilisés par les exploitants agricoles. Par exemple, le DEET est un insecticide utilisé contre les tiques, souvent retrouvé dans les cours d'eau suisses. Il est présent en quantités traces dans de nombreux échantillons. Des traces d'Irgarol ont également été détectées une fois. Ce biocide, lessivé par les pluies, pourrait provenir du traitement de bois de construction.

Les substances mères ayant dépassé (ou presque) les concentrations légales sont le métamitron, le diméthénamid-P, le métalaxyl-M et le métolachlore. Lors de la grande crue de mai 2020, en période à risque agricole, il est très probable qu'elles aient toutes dépassé les normes. Le métamitron étant la substance la plus utilisée dans le bassin d'alimentation de la Feurtille, c'est également celle qui a été mesurée en plus grandes concentrations. Le produit semble être facilement lessivé mais peu persistant : il n'est plus détecté hors de la période à risque.

¹⁰ Dont de nouvelles substances font partie du screening effectué par le Service de l'Eau en 2020, incluant notamment parmi nouveaux les analytes, les métabolites du chlorothalonil, du chloridazon, du S-métolachlore, du métazachlore, diméthénamide-P et du diméthachlore.

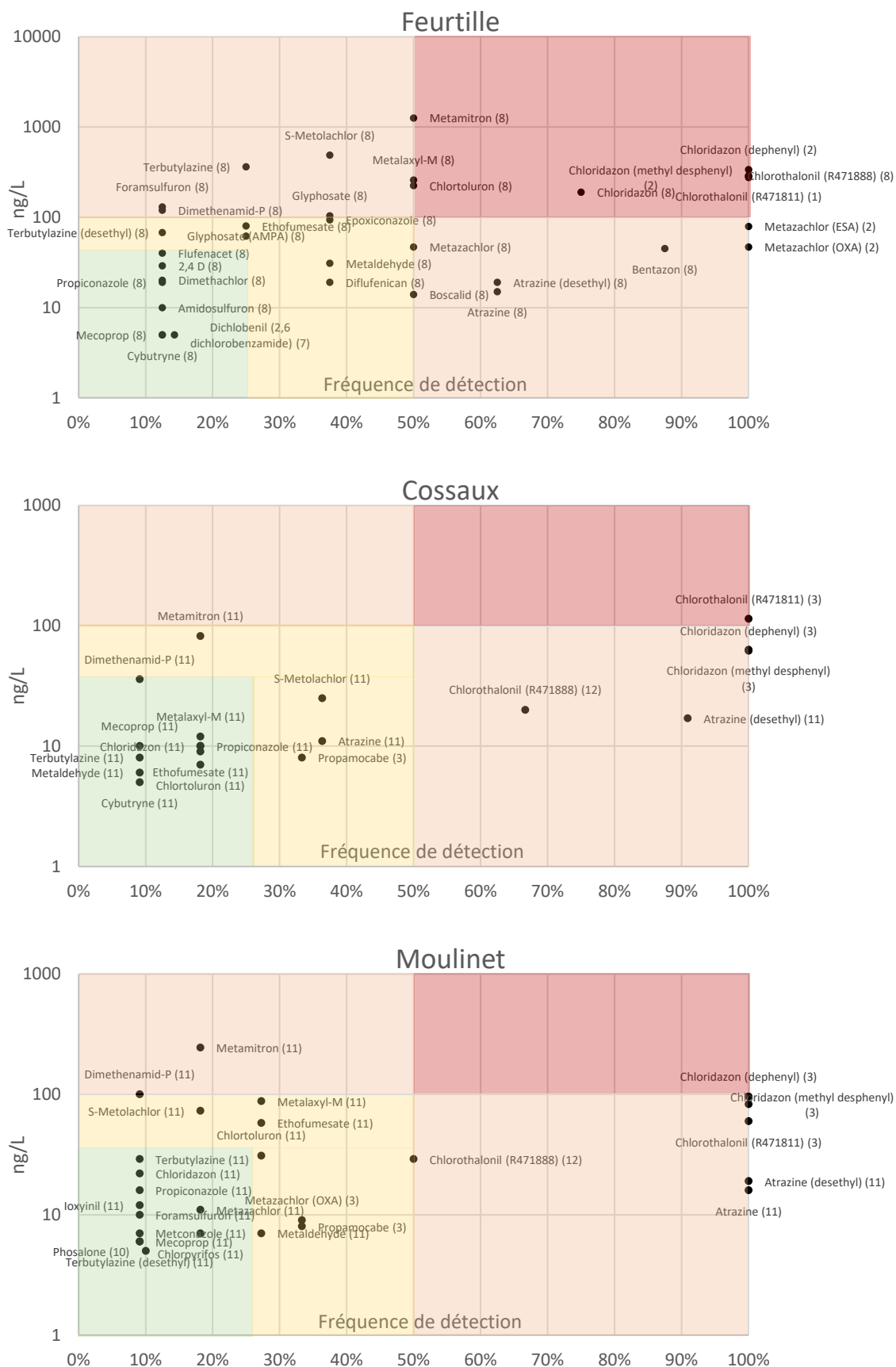


Figure 23 : Graphiques fréquence-gravité pour le trio d'échantillons Feurtille, Cossaux et Moulinet. Les substances pesticides sont classées à risque en fonction de la fréquence de détection dans les échantillons analysés (n correspond au nombre d'analyses) et les concentrations maximales rencontrées pendant les analyses de 2019 et 2020 au Service de l'eau

EVOLUTION TEMPORELLE DES CONCENTRATIONS DU CHLOROTHALONIL

Alors que l'utilisation des produits phytosanitaires contenant du chlorothalonil a été interdite, avec effet immédiat, en janvier 2020, les métabolites sont toujours détectables dans les eaux. Les méthodes d'analyse pour le métabolite R471888 étant disponibles au Service de l'eau bien avant 2019, le R471811 n'a pu être analysé qu'à partir d'avril 2020.

En conditions hydrogéologiques stables, le R471888 déjà était détectable à des concentrations traces en 2014. Plus récemment, en 2019, une présence de traces du même métabolite est visible hors période d'application et hors précipitations intenses. D'après la Figure 24, le R471888 n'est quasiment plus détectable dans les eaux des sources du Moulinet et du Cossaux depuis 2020. En revanche, le R471811 est détecté en concentrations nettement plus importantes, dépassant une fois les normes au Cossaux. Sur les trois valeurs mesurées au Cossaux, il est possible d'observer une diminution des concentrations. Cette diminution des concentrations avec le temps peut être soit corrélée à la variation des débits, soit au temps de dégradation du métabolite. Ces premiers résultats suggèrent que **le chlorothalonil ne constituera pas une problématique contraignante pour l'exploitation de ces ressources à l'avenir**. Afin de vérifier l'hypothèse, une nouvelle analyse a été effectuée en hautes eaux en 2021 où la concentration mesurée a été effectivement plus élevée qu'en étiage (71 ng/l), mais moindre que les 114 ng/l de l'échantillon prélevé l'année précédente dans des conditions hydrogéologiques similaires.

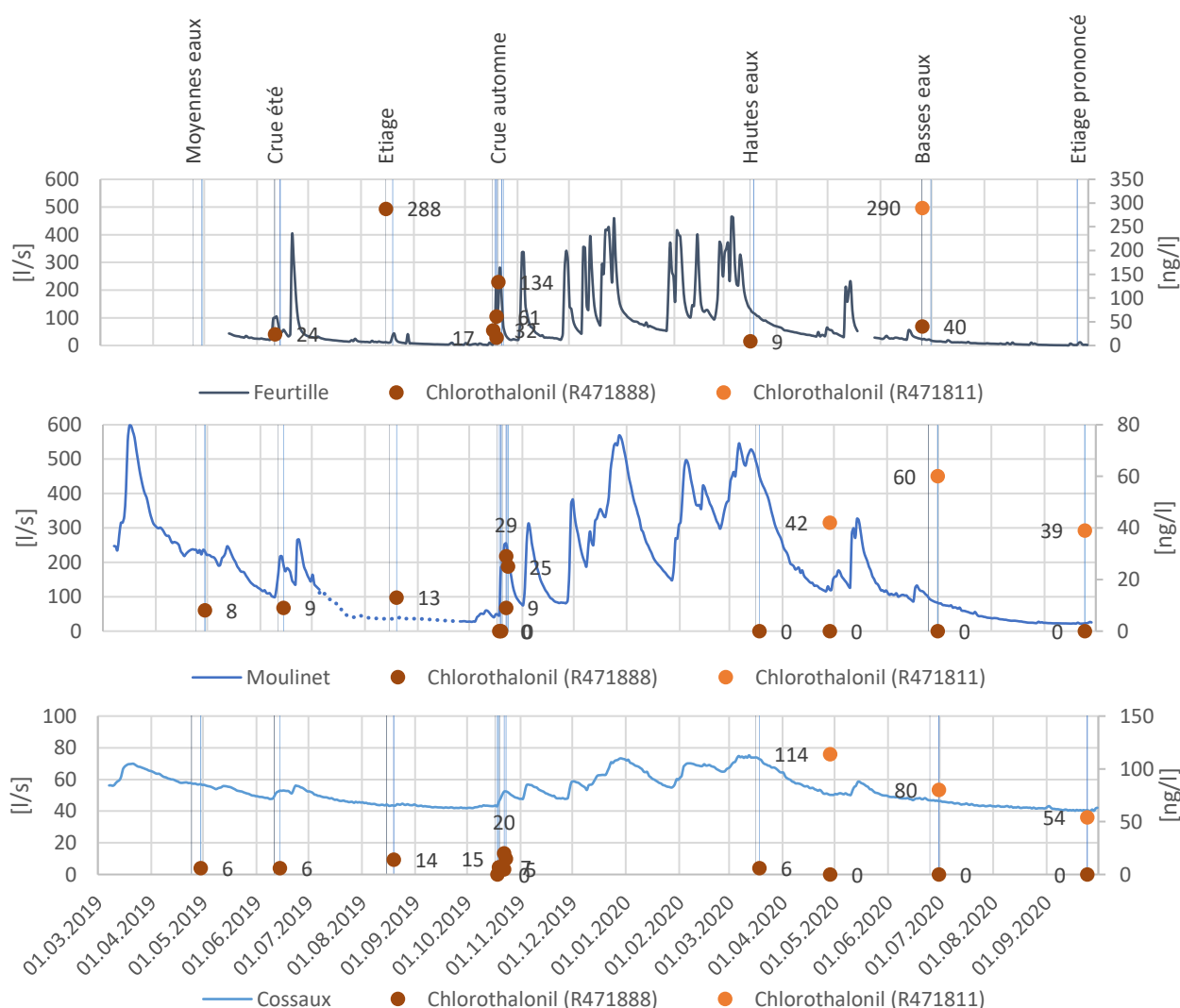


Figure 24 : Evolution temporelle des concentrations des métabolites de chlorothalonil R47188 et R471811 à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux comparée aux débits

SUBSTANCES PROBLÉMATIQUES

Les analyses ont mis en évidence une substance particulièrement problématique à traiter. Les métabolites du chlorothalonil subissent, pour l'instant, un taux d'abattement insuffisant par les méthodes de traitements simples. D'après les connaissances actuelles, l'osmose inverse permettrait une élimination efficace de ce micropolluant présent dans les eaux des sources du Mont de Chamblon. Cette méthode complexe et onéreuse ne paraît pas adaptée pour les objectifs fixés à l'heure actuelle dans le PDRDE. Une autre méthode alternative consisterait en l'utilisation de charbon actif avec un renouvellement relativement fréquent du substrat. Des essais pilotes sont actuellement effectués par le Canton de Vaud pour évaluer les diverses possibilités de traitement :

- Charbon actif micrograin sur pilote Carboplus (RWB, EAWAG, Canton, STEREAU, Seau)
- Membranes fibre creuse (Seau, NXfiltration)
- Couplage ozone/charbon actif micrograinsur pilote Opacarb (Seau, Véolia)
- Couplage ozone/charbon actif en grain (Seau)
- Osmose inverse basse pression (Seau, CSD, WAMAX)

D'ailleurs, **les métabolites du chlorothalonil ont été détectés dans toutes les adductions principales de la ville d'Yverdon-les-Bains, que ce soit au lac de Neuchâtel, au puits d'Onnens et à la source du Cossaux, dans une moindre mesure.** Une étude à l'échelle du PDRDE pourrait être pertinente pour déterminer les taux d'abattement nécessaires pour chacune des adductions, pour une mise en conformité du réseau. Néanmoins, des discussions sont en cours entre la confédération et Syngenta pour adapter la législation en supprimant le chlorothalonil de la liste des métabolites pertinents.

Il est généralement admis que les métabolites sont plus difficiles à traiter dans l'eau que les substances mères. Des traces des substances mères et/ou de leurs produits de dégradation sont présents de manière récurrente dans les deux captages : atrazine, chlorothalonil, métazachlore, s-métolachlore (anciennement métolachlore), therbutylazine, diméthachlore et diméthénamide-P (anciennement diméthénamide). Ce sont des substances retrouvées généralement dans les captages liés à des zones d'alimentation karstiques en Suisse et sous influence agricole. Des dépassements ponctuels en printemps de métamitron ont été détectés aux sources du Moulinet. C'est la substance la plus utilisée dans le bassin d'alimentation du canal de Baulmes. La métaldéhyde est également difficile à traiter par charbon actif. Elle est restée à des concentrations traces dans les sources. Le métabolite AMPA du glyphosate, difficile à traiter, pourrait être présent à des concentrations traces dans les sources. Comme la limite de détection pour cet analyte est élevée, et vu que des concentrations significatives sont retrouvées dans la Feurtille, il est probable qu'il se retrouve dans les sources à des concentrations traces.

La liste est non exhaustive, elle est sujette à modification d'une année à l'autre selon les normes en vigueur, les changements des pratiques culturelles ou et les nouvelles données analytiques. Les critères pris en compte pour déterminer les substances problématiques sont ceux qui pourraient faire diminuer l'efficacité du charbon actif ou augmenter le risque de colmatage. Une concentration élevée du micropolluant, une haute solubilité, un poids moléculaire faible, un comportement hydrophile, le type de polarité, un faible facteur de bioconcentration et un caractère lipophile peuvent mener à un traitement insuffisant dans une future chaîne de traitement peu complexe.

4.3. Qualité de l'eau des deux sources

Les paramètres généralement abordés pour déterminer une chaîne de traitement sont résumés dans le Tableau 12. Les données de Michiel Pronk (2008) sont plus représentatives des valeurs maximales que celles qui ont été récoltées entre 2019 et 2020. En effet, durant la crue exceptionnelle de 2006, des valeurs maximales mesurées pour les débits, COTc et turbidité ont été mesurées. Les valeurs minimales d'étiage au Moulinet sont estimées entre 18 et 19 l/s (avec env. 10% de précision). Les paramètres dépassants les normes légales dans les deux sources sont : la turbidité, le carbone

organique total, les GAM, les *E. coli*, les entérocoques, la somme des pesticides au Moulinet et quelques dépassements ponctuels de pesticides individuels dans les deux sources.

La turbidité maximale observée au Moulinet a atteint 186 NTU au Moulinet alors qu'au Cossaux des valeurs de 9.9 NTU ont été enregistrées par les appareils de mesure en continu. Le COTc serait monté au Moulinet et au Cossaux jusqu'à respectivement 10.8 et 3.2 mg C/l. Quant aux GAM, 8'680 colonies formant des unités par ml ont été mesurées au Moulinet contre 2'150 au Cossaux. La somme des pesticides a dépassé une fois les normes avec une valeur de 575 ng/l au Moulinet. Quant aux micropolluants individuels, le R471811 a été mesuré une fois au-dessus des normes au Cossaux (114 ng/l) alors que les concentrations du métamitron ont atteint 245 ng/l au Moulinet. Malgré que la qualité des eaux soit manifestement impactée par l'agriculture intensive, les valeurs des nitrates n'ont jamais dépassé les normes. Les engrais agricoles n'ont pas détérioré la qualité des eaux de manière importante. Les nitrates, nitrites, le fer ou encore le manganèse ne risquent pas d'impacter l'efficacité de la chaîne de traitement, les valeurs étant dans les normes. Il serait envisageable de profiter de faire baisser les concentrations en calcium et magnésium, en même temps que la teneur des micropolluants, afin de limiter le pouvoir calcifiant de l'eau.

Paramètre	Unité	Source du Moulinet			Source du Cossaux			
		Moy.	Méd.	Min-Max	Moy.	Méd.	Min-Max	
Paramètres continus		normes						
Débit	[L/min]	9420	6660	1200-44220	3240	2880	2580-5280	
Temp.	[°C]	8-15	10.6	10.7	8.6-11.6	13.2	13.3	12.3-13.6
CE	[µS/cm]	200-800	458	459	309-627	470	469	428-520
Turbidité	[NTU]	1	1.6	0.7	0.1-186	0.4	0.2	0.1-9.9
COTc	[mg C/l]	1.4	1.1	0.2-10.8	0.7	0.6	0.3-3.2	
Physico-chimie								
Nitrates	[mg/l]	40	12	10	4.4-31.0	8	8	5.4-14.5
Calcium	[mg/l]	77	74	64-104	66	72	65-82	
Magnésium	[mg/l]	9	9	4.9-14.3	15	15	12.7-17.7	
Dureté	[°f°]	23	23	20.4-28.5	25	24	23.8-32.2	
Oxydabilité	[mg/l]	3	5	5	3.4-8.3	2	2	1.9-2.9
COT	[mg C/l]	2	1.73	1.17	0.55-5.09	0.83	0.75	0.41-1.82
COD	[mg C/l]	1.50	1.09	0.67-3.08	0.86	0.68	0.46-1.41	
Fer	[mg/l]	200	7	7	4.3-8.9	3	2	1.2-4.5
Manganèse	[mg/l]	50	<1	<1	<1	<1	<1	<1
pH		6.8-8.2	7.54	7.47	7.47-7.66	7.67	7.66	7.57-7.82
Microbiologie								
GAM	[CFU/ ml]	300	177	131	14-8680	107	37	2-2150
E. Coli	[CFU/100 ml]	0	15	3	0-648	18	1	0-183
Entéro.	[CFU/100 ml]	0	9	2	0-480	3	1	0-123
Micropolluants								
Σ Pesticides	[ng/l]	500	127	77	39-575	74	56	35-185
Chlorothalonil R471811	[ng/l]	100	47	42	39-60	83	80	54-114
Métamitron	[ng/l]	100	161	161	76-245	53	53	24-82
Σ COV	[µg/l]	10	0	0	0-0.5	0	0	0.6
Metformine (médicament)	[ng/l]	10000	<25	<25	<25	<25	<25	<25

Tableau 12 : Résumé des paramètres mesurés en continu et des analyses de qualité de l'eau effectuées par Michiel Pronk 2005-2007 et SAGENORD 2019-2020. Les normes sont tirées de l'OPBD et de la directive W12 SSIGE. Les paramètres dépassants les normes ont été indiqués en rouge

4.4. A traiter par la chaîne de traitement

DIAGNOSTIQUE

Afin d'obtenir une eau potable en tout temps à partir des eaux du Mont de Chamblon, SAGENORD propose un traitement de la totalité des eaux du Cossaux. Le traitement de son eau brute ne devrait pas nécessiter de mettre en œuvre des moyens disproportionnés, si l'objectif est de diminuer les concentrations en chlorothalonil et d'autres pesticides et non de les supprimer. Cependant, la qualité de la source du Moulinet étant nettement plus variable, pour des valeurs seuils de turbidité et de COTc encore à déterminer, il serait probablement plus judicieux de ne pas l'acheminer vers la station du Cossaux mais de la purger en direction du Bey. Ceci dans le but de minimiser la maintenance de

l'usine de traitement ou d'éviter de surinvestir pour un faible gain de quantités d'eau produite. Une fois le pic de pollution passé, elle pourrait être traitée en parallèle avec le Cossaux. En dehors de ces pics de pollution élevés, la qualité de l'eau du Moulinet est tout à fait correcte et similaire à celle du Cossaux en période d'étiage. Il reste encore à déterminer les débits résiduels pour le Moulinet.

Les éléments à traiter par la future chaîne de traitement, que ce soit dans le Cossaux seul ou les deux sources confondues, seront :

- des **micropolluants organiques** découlant de l'utilisation de **pesticides** ainsi que leurs **métabolites**, dont notamment le traitement des molécules à terminaisons d'acides sulfoniques des métabolites du chlorothalonil, du métamitron ou du chloridazon etc. ;
- deux types de **matière organique**, la première d'origine plutôt géogène et la deuxième liée aux eaux de surface ;
- des **particules en suspension** de taille variée lors de la manifestation d'une turbidité autochtone et des particules majoritairement de petite taille (0.9-10µm) lors d'une turbidité allochtone liée à la Perte de la Feurtille ;
- la **microbiologie** arrivant de manière simultanée avec la turbidité allochtone

Outre les améliorations dépassement des limites légales, l'eau des sources ayant une origine karstique, une diminution des concentrations en calcium et magnésium pourrait être également envisagée, par la même occasion.

FLUX DE QUELQUES PESTICIDES INDIVIDUELS

Afin d'anticiper la quantité de micropolluants à traiter, une estimation de quelques flux de quelques pesticides est faite dans ce sous-chapitre en fonction des débits de base et des crues.

Il est possible d'observer que le bilan des flux entrant (Feurtille) et sortant (système karstique) sont non nuls. Les concentrations des pesticides n'étant pas mesurées en continu, les échantillons ont été prélevés en fonction du temps de transit de l'eau et non en fonction du temps de transit de chaque pesticide individuel. La survenance et de temps de transit étant légèrement différents pour chaque pesticide, la comparaison des données récoltées lors d'une crue n'est pas pertinente. En conditions stables, les flux d'atrazine sont notamment plus importants au Moulinet qu'à la Feurtille, indiquant une contamination du système karstique.

µg/s	Atrazine (desethyl)			Chloridazon (dephenyl)		
	F	M	C	F	M	C
Etiage prononcé		0.29	0.36		0.69	1.76
Etiage		0.25	0.34			
Basses eaux	0.28	0.80	0.32	8.45	4.56	2.30
Moyennes eaux		2.58	0.54			
Hautes eaux	1.40	3.10	0.54	43.42	41.28	4.46
Max crue	0.66	4.00	0.88			

Tableau 13 : Flux de pesticides persistants à la Feurtille (F), au Moulinet (M) et au Cossaux (C)

µg/s	Metamitron			Chlorothalonil (R471811)		
	F	M	C	F	M	C
Etiage prononcé					0.819	2.16
Etiage						
Basses eaux	0.15	0	0	7.25	4.8	3.6
Moyennes eaux		17.328	1.344			
Hautes eaux						
Max crue	104.58	39.93	4.26			

Tableau 14 : Flux de pesticides à risque à la Feurtille (F), au Moulinet (M) et au Cossaux (C) en fonction des débits pour le métamitron et le chlorothalonil

4.5. Proposition de chaîne de traitement

Une première proposition de chaîne de traitement peut être présentée ici (Figure 25). Afin d'ôter les particules de granulométrie plus grossière, un préfiltre de type dessableur serait nécessaire. Le charbon actif permettra par la suite de traiter les polluants organiques dissous peu solubles, une partie de la matière organique hydrophobe ainsi que de certaines particules. Si l'efficacité du charbon actif (CA) n'est pas optimale, le traitement pourrait être complété par une ozonation préliminaire. Le type de CA devra pouvoir absorber des pics de pollutions printanières, d'où l'efficacité, l'âge moyen du charbon actif et les débits spécifiques devront être maîtrisés. Il serait préconisé d'apporter du CA neuf chaque année, pour la période du printemps, afin d'adsorber au mieux les pics de pollution les plus problématiques de l'année hydrogéologique. Ensuite, l'ultrafiltration (UF) permettra de traiter la matière organique plus grossière, la bactériologie et les résidus de CA. Il serait également possible d'inverser l'ordre des éléments constituant le traitement au CA et UF si le type de CA le permet. Le type de matière organique n'étant pas encore bien connu, il est probable qu'un prétraitement de celle-ci soit nécessaire. Les micropolluants, étant de taille plus faible que la taille des membranes, ne seront pas traités par l'UF. La désinfection finale, probablement au chlore ou par traitement UV, permettra d'éliminer l'activité biologique restante.

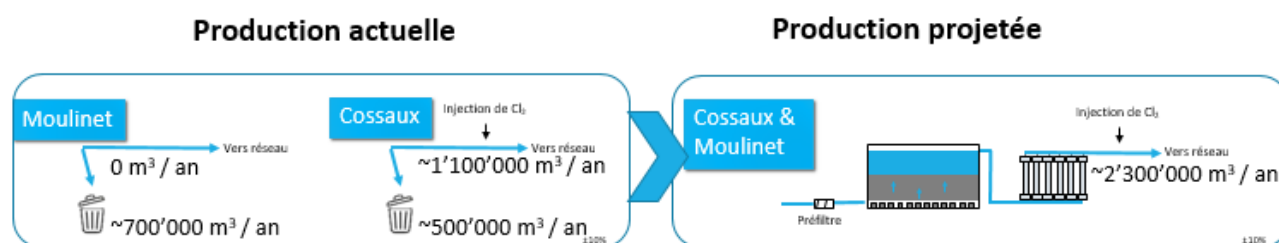


Figure 25 : Schéma de la situation de production des eaux actuelle et la production souhaitée

5. Conclusion

La présente étude a permis de mieux comprendre le comportement, l'origine et la survenance des micropolluants dans le système karstique des sources du Mont de Chamblon. Les pollutions généralisées d'origines industrielles, routes, stations d'essences, sites pollués, hôpitaux etc. ont pu être écartées. Cependant, la pollution aux pesticides nécessitera un traitement plus ou moins complexe selon les objectifs visés. Une somme des pesticides a été mesurée supérieure à 500 ng/l au Moulinet alors que le Cossaux est resté dans les normes. Quant aux pesticides individuels, les eaux du Cossaux sont polluées par quelques métabolites persistants dérivés de l'atrazine, du chloridazon ou encore du chlorothalonil. Il se peut également qu'il y ait des dépassements des normes en termes d'autres substances mères, telles que le métamitron par exemple.

Les composantes thermales semblent peu ou pas contribuer à la pollution des sources (Tableau 15). En effet, lorsque la part de la Feurtille dans le système est négligeable, la pollution des sources devient très faible. La composante karstique est par contre légèrement polluée par quelques substances et métabolites persistants. Notamment des concentrations d'atrazine ou d'oxadixyl sont présentes de manière constante et augmentent lors de la mise en charge du système karstique. La pollution principale est liée à l'utilisation de produits phytosanitaires dans la perte de la Feurtille. Le réseau de drainages aux diamètres conséquents évacue de manière efficace les eaux récoltées lors des crues en direction de la perte. Le stock de substances phytosanitaires du bassin d'alimentation de la Feurtille, présent dans l'environnement, est maximal au printemps jusqu'à mi-été. Il est quasiment nul en hiver. La pollution des sources augmente lorsque la part du débit de la Feurtille sur le débit du système est supérieure aux 5% (étiage) à 10% (hautes eaux) rencontrés lors des conditions hydrogéologiques stables. Un concept de protections des ressources devra être étudié.

Origine	Composante	Pesticides selon condition hydrogéologique	
		Stable	Instable
Allogène	Feurtille	++	++++
	Karstique	+	+
Autogène	Thermale	-	-
	Mont de Chamblon	-	-

Tableau 15 : Appréciation des apports en pesticides allogènes et autogènes par les composantes des eaux des sources du Mont de Chamblon, classées du plus faible impact (-) au plus grand impact (++++), aux sources du Mont de Chamblon

Pour être conforme aux normes de l'OPBD, le mélange des eaux distribuées et les flux de polluants depuis des réservoirs de SAGENORD devront être étudiés. L'adaptation du cadre législatif de l'OPBD au début de l'année 2020 et notamment de la liste des métabolites pertinents, a mis en évidence une nouvelle problématique à traiter sur le réseau d'approvisionnement SAGENORD – Yverdon-les-Bains. Le métabolite du chlorothalonil R471811 a été détecté en concentrations supérieures à 100ng/l dans la source du Cossaux, le puits d'Onnens et l'eau du lac de Neuchâtel.

Yverdon-les-Bains, SAGENORD et l'ACRG ont le devoir de se mettre en conformité à court terme, suite à la contestation du Canton. Dans ce cadre, il est recommandé d'élaborer un rapport complémentaire au PDRDE. Il aura comme objectif la définition d'une solution optimale et durable de production d'eau depuis les sources du Mont de Chamblon (Cossaux et Moulinet), comparativement acceptable par rapport à une nouvelle station de production depuis le lac de Neuchâtel. Il est recommandé de mettre en place un dispositif permettant d'abattre au moins une part des pesticides. Il n'est effectivement pas exclu que des concentrations de pesticides individuels supérieures 100ng/l soient mesurables dans les eaux du Cossaux. Le taux d'abattement souhaité pour le chlorothalonil, qui sera étudié dans le rapport complémentaire au PDRDE, déterminera une grande partie de la chaîne de traitement choisie. Ce rapport indiquera également si la pollution à la perte pourra être écartée par une déviation du canal et si le Moulinet pourra être valorisé de manière durable en tant que source d'eau potable. Un concept de protection des eaux dans le bassin d'alimentation de la Feurtille compatible avec une utilisation agricole des sols sera défini, afin de maîtriser l'émission de polluants de la Feurtille vers les sources du Mont de Chamblon et optimiser leur traitement à la station de production du Cossaux.

SAGENORD recommande également de continuer les analyses du type de matière organique présente dans les sources, afin de déterminer si elle est de nature colmatante lors des diverses conditions hydrogéologiques rencontrées. Ce rapport complémentaire sur le type de matière organique présente dans les sources du Mont de Chamblon déterminera le type de traitement adéquat pour celle-ci.

SAGENORD,

Yverdon-les-Bains, avril 2021

Olga Kocab

6. Bibliographie

Fcm-lab 2014. Sources du Cossaux et du Moulinet, synthèse hydrogéologique.

Morasch B. 2013. Occurrence and dynamics of micropollutants in a karst aquifer. *Environmental Pollution* 173 : 133-137.

OFEV. 2020. La Suisse bientôt à court d'eau ? L'impact des changements climatiques sur notre gestion de l'or bleu. N° 4/2020. *L'environnement*.

Pronk, M. 2008. Origin and behaviour of microorganisms and particles in selected karst aquifer systems (Doctoral dissertation, Université de Neuchâtel).

Prona SA. 2017. Ancien stand de tir à 300m de Chamblon, investigation technique et projet d'assainissement.

Schnegg, P. A. 2002. An inexpensive field fluorometer for hydrogeological tracer tests with three tracers and turbidity measurement. In *Articles of the Geomagnetism Group at the University of Neuchâtel, Groundwater and Human Development* (pp. 1484-1488).

7. Annexes

8.1. Annexe 1 : Descriptif et validation du monitoring

Feurtille

Sur le site de la Feurtille, la hauteur d'eau est mesurée en continu depuis le bassin de décantation (point d'observation déplacé par rapport à l'emplacement dans la thèse de Michiel Pronk). Les données de la sonde de pression hydrostatique 0 à 2m H₂O (Waterpilot FMX21 de Endress+Hauser 4 à 20 mA) à pression relative sont transmises (une fois par heure) en mA à la base de données Tetra2. Une correction est appliquée aux mesures de niveau selon un niveau de référence manuel. Les données de base sont obtenues par transformation du signal en mA en hauteur d'eau (4 et 20 mA correspondant à 0 et respectivement 2 m). Ces hauteurs d'eau sont ensuite corrigées par rapport à la position de la sonde vis-à-vis du niveau d'eau de référence de la station, résultant en la hauteur d'eau brute. Enfin, des mesures manuelles bimensuelles permettent de corriger d'éventuelles dérives de la sonde et fournissent le niveau d'eau calibré. Le fond de l'ouvrage correspond à une hauteur de 0m et le haut de l'ouvrage, au niveau supérieur de la grille, à 3m de hauteur. En parallèle, une nouvelle courbe de tarage a été établie par FCM-lab entre 2019 et 2020 sur la gamme entière des débits souvent rencontrés (0 et 400 l/s). La sonde a été déplacée le 16 août 2019, la calibration a été adaptée en conséquence. Les données des débits calibrés sont disponibles depuis le 16 mai 2019 avec une granulométrie de 10 minutes.

Moulinet

Sur le site du Moulinet total, une sonde de pression hydrostatique de 0 à 1m H₂O (Waterpilot FMX21 de Endress+Hauser 4 à 20 mA) à pression relative permet de mesurer la hauteur d'eau. Le suivi de ce paramètre à ce point d'observation est primordial car il permet de déterminer le débit du système karstique et les temps de transit entre la perte de la Feurtille et les sources du Cossaux et du Moulinet. La hauteur d'eau est recalée en fonction d'un limnimètre installé sur place. Ensuite, un traitement identique est appliqué sur les données pour l'obtention des débits selon une courbe de tarage avec une plage de validité entre 12 et 600 l/s. Un débit de 12 l/s peut être obtenu lors des pompages en étiage prononcé. Il ne correspond pas aux valeurs « naturelles ». L'appareil fonctionne depuis le 25 février 2019. A partir du 5 juillet 2019 environ, les fuites dans le déversoir ont significativement augmenté. La déstabilisation de l'ouvrage est probablement liée à la mise en place d'une crépine par un agriculteur. Les données sont donc inexploitable à partir de cette date. La réparation provisoire par l'entreprise de Pippo du 19 septembre 2019 a permis de réduire sensiblement les fuites grâce à l'installation d'une bâche. Le 24 septembre 2019, un petit barrage a été installé un peu plus en amont sous le pont avec une deuxième sonde de pression, ce qui a permis une redondance de données en cas de travaux sur l'exutoire. Les hauteurs d'eau sont à nouveau disponibles à double depuis le 25 septembre 2019. Cependant, une nouvelle courbe de tarage a dû être déterminée. Plus tard, le 24 juillet 2020, la sonde du déversoir a dû être démontée pour effectuer les travaux de renaturation du Bey. L'ouvrage a été remis en état, minimisant ainsi les différentes fuites en amont, en-dessous et sur les côtés de l'ouvrage. A la fin des travaux, le barrage sous le pont a été démonté et les données sont à nouveau disponibles depuis novembre 2020 depuis l'exutoire. La définition des nouvelles calibration et courbe de tarage sont actuellement en cours.

Sur le site du Moulinet 6a, une sonde de pression hydrostatique de 0 à 1m H₂O (Waterpilot FMX21 de Endress+Hauser 4 à 20 mA) à pression relative permet de mesurer la hauteur d'eau. Un traitement identique aux autres sites est appliqué sur les données pour l'obtention des débits calibrés pour une plage de validité entre 4.5 et 21.5 l/s.

Sur le même site, un fluorimètre de terrain GGUN-FL30 (Schnegg, 2002) est installé à côté de la sonde de pression. Plusieurs médias non traités sont envoyés sur le serveur Tetra2 : le média 103 = température, le 100 = LED1 (uranine), le 101 = LED2 (rhodamine), le 102 = LED3 (fluorescence

UV), le 108 = turbidité et le 109 = conductivité électrique. Les données sont exportées depuis Tetra2 en TDS et subissent une première calibration fournie avec l'appareil (affiche xml) pour convertir les données de mV en ppm pour les traceurs (LED 1 à 3). Une correction est faite sur les mesures en fonction de la turbidité. Ensuite, les données subissent une calibration manuelle en fonction des données de référence mesurées au laboratoire (extinction UV, COT et COD) ou à l'aide d'un conductimètre manuel pour la conductivité électrique et la température. Le seul manque de données se situe entre le 3 et 11 avril. Afin de permettre la comparaison entre les données du Cossaux et du Moulinet en termes de quantité de matière organique, les données de fluorescence UV sont transformées en COT par des droites de corrélation. Les données de turbidité ne sont pas modifiées. Elles risquent néanmoins d'être très légèrement sous-estimées par rapport aux mesures en laboratoire. L'appareil de mesure est maintenu toutes les deux semaines. Après ces interventions, la turbidité descend artificiellement alors que la fluorescence UV augmente.

Sur le site du Moulinet 6a + 6b, une sonde de pression hydrostatique de 0 à 1m H₂O (Waterpilot FMX21 de Endress+Hauser 4 à 20 mA) à pression relative permet de mesurer la hauteur d'eau. Un traitement identique aux autres sites est appliqué sur les données pour l'obtention des débits calibrés, pour une plage de validité entre 0 et 75 l/s. Comme les valeurs du Moulinet total, les données sont influencées par des pompages correspondant à environ 14 l/s.

Cossaux

Sur le site du Cossaux, un monitoring a déjà été mis en place par le Service des Energies et les données sont disponibles depuis le SCADA. Les mesures se font sur eau brute non filtrée mais légèrement dégazée, afin de minimiser les fausses données liées à la mauvaise interprétation des bulles par les appareils de mesure. Les appareils sont nettoyés tous les mois et subissent un maintien par le fournisseur chaque début d'année depuis 2020. L'eau dédiée aux appareils de mesure est pompée depuis le fond de la chambre de captage de la source. Le débit de la pompe est réglé de sorte qu'il soit suffisamment élevé pour apporter de l'eau fraîche en permanence aux appareils mais suffisamment bas pour que la pression dans le dégazeur soit correcte.

La mesure de turbidité se fait à l'aide du Sigrist-Photometer WTM500. Les mesures correspondent bien à celles du laboratoire.

L'extinction UV à 254nm (CAS₂₅₄) est mesurée à l'aide du Sigrist-Photometer ColorPlus. La relation entre l'absorbance à 254nm mesurée en laboratoire et la concentration en COT, est unique à chaque masse d'eau. Pour ce qui est des données récoltées pour la présente étude, entre le 1 janvier 2019 et le 25 mars 2019, seule la valeur M1 est disponible. Ensuite, l'appareil de mesure a cessé de fonctionner correctement. Il a ainsi été remis en service le 23 mai 2019 après une intervention du fournisseur où la mesure SAK₂₅₄ fonctionnait à nouveau.

La température et la conductivité électrique continues sont enregistrées depuis une sonde unique WTW TetraCon. La conductivité continue a été ramenée à la température spécifique de 20°C, cependant, mais actuellement on utilise plutôt la température de référence à 25°C. La conductivité mesurée toutes les deux semaines de manière manuelle est par contre ramenée à la température spécifique de 20°C. En calibrant la température et la conductivité sur l'appareil manuel, il est non seulement possible de suivre la variabilité temporelle des données, mais les données des deux sources peuvent également être comparées entre-elles. Il arrive que la pompe alimentant les appareils de mesure soit réglée à un débit trop faible, apportant une quantité insuffisante d'eau fraîche. N'étant pas représentatif de la réalité, ce type de valeurs est alors écarté. La qualité des mesures continues a été vérifiée depuis le 1^{er} janvier 2019. Depuis le 24 août 2020, la sonde WTW a cessé de fonctionner correctement. Elle est remplacée après la période étudiée. Une nouvelle calibration des données sera nécessaire.

8.2. Annexe 2 : Analytes

Service de l'eau

Origine	Type	Analytes	
Industrie, lessivage routes, sites pollués, stations d'essence	COV	Benzene Bromochloromethane Bromodichlorométhane Bromobenzene Bromoforme Bromomethane Butylbenzene Chloro-2-toluène Chloro-4-toluène Chlorobenzene Chloroforme Chlorure de vinyle 1,2-Dichloroethylene cis 1,3-Dichloropropylene cis 1,2-Dibromoethane 1,2-Dibromomethane 1,2,3-Dibromochloropropane Dibromochloromethane Dibromomethane 1,1-Dichloroethane 1,1-Dichloroethylene 1,1-Dichloropropylene 1,2-Dichlorobenzene 1,2-Dichloroethane 1,2-Dichloropropane 1,3-Dichlorobenzene 1,3-Dichloropropane 1,4-Dichlorobenzene Dichloromethane ETBE Ethylbenzene	Hexachlorobutadiene Isopropylbenzene Xylene m,p Naphtalene Xylene ortho Propylbenzene Styrene 1,1,1,2-Tetrachloroethane Tetrachloroethylene Toluene 1,2-Dichloroethylene Trans 1,3-Dichloropropylene trans 1,1,1-Trichloroethane 1,1,2-Trichloroethane 1,2,3-Trichlorobenzene 1,2,3-Trichloropropane 1,2,4-Trichlorobenzene Trichloroethylene Trichlorofluoromethane Trichloromonofluoromethane 1,3,5-Trimethylbenzene 1,1-Dichloroethylene 1,2,4-Trimethylbenzene Chloromethane Dichlorobromomethane MTBE p-isopropyltoluene sec-Butylbenzene Tert-Butylbenzene Tetrachloromethane THM
	Métaux	Aluminium Cadmium Chrome Cobalt Cuivre Fer total Manganèse tot Nickel Plomb Zinc	
	Composés perfluorés	PFNA PFOA PFOS	
Eaux usées ou impact de l'hôpital	Matières actives médicaments humains	Acetylsulfamethoxazole Acide diatrizoïque Amisulpride Atenolol Azithromycine Bezafibrate Carbamazepine Carisoprodol Citalopram Clarithromycine Clofibril acid Diclofenac Erythromycine Gabapentin Hydrochlorothiazide Ibuprofen	Iopromide Irbesartan Ketoprofen Mefenamic acid Memantine Mepivacaine Metformin Méthénamine Metoprolol Naproxene Paracetamol Propranolol Sotalol Sulfamethoxazole Venlafaxine

	Sucres etc	1H-Benzotriazole Caffeine Methyl-1H-Benzotriazole Acesulfame K Aspartame Cyclamate Saccharin Sucralose	
Animal et microbiologie	Matières actives médicaments vétérinaires	Sulfadiméthoxine	
	Bactéries indicatrices et matière organique	Oxydabilité KMnO4 COT COD Absorbance 254 nm filtrée et non filtrée Escherichia Coli Entérocoques Germe aérobies	
Agriculture	Matières actives PPh (et métabolites)	2,4 D Aclonifen Alachlor Amidosulfuron Atrazine Atrazine (Atrazine desethyl) Atrazine (Atrazine deisopropyl) Azoxystrobin Bentazon Boscalid Butafenacil Carbendazim Chloridazon Chloridazon (dephenyl) Chloridazon (methyl desphenyl) Chlorothalonil (R471888) Chlorothalonil (R471811) Chlorothalonil (R611553) Chlorothalonil (R611965) Chlorothalonil (R611968) Chlorothalonil (SYN507900) Chlorothalonil (SYN546872) Chlorothalonil (SYN548581) Chlorfenvinphos Chlorpyrifos Chlortoluron Clethodime Clomazone Cyanazine Cyproconazole Cyprodinil DEET Diazinon Dichlobenil Dichlobenil (2,6 dichlorobenzamide) Dichlorprop Diflubenzuron Diflufenican Dimefuron Dimethachlor Dimethachlor (ESA/CGA 354742)) Dimethachlor (OXA/CGA 50266) Dimethenamid-P Dimethenamid-P (ESA/M27) Dimethoate Dimetomorph Dinoseb Diuron Epoxiconazole Ethofumesate	Fluroxypyr-1-methylheptyl ester Flusilazole Foramsulfuron Glufosinate Glufosinate Ammonium Glyphosate Glyphosate (AMPA) Imazamox Imidacloprid Ioxynil Iprovalicarb Irgarol / Cybutryne Isoproturon Linuron MCPA Mecoprop Mesotrione Metalaxyl-M Metaldehyde Metamitron Metazachlor Metazachlor (ESA/BH 479-08) Metazachlor (OXA/BH 479-04) Metconazole Methoxyfenozide Metolachlor / S-Metolachlor Metolachlor (ESA) Metolachlor (OXA) Metribuzin Napropamid Nicosulfuron Orbencarb Oxadixyl Penconazole Pendimethalin Phosalone Primicarbe Propamocabe Propaquizafop Propiconazole Prosulfocarb Pymetrozine Simazine Spiroxamine Sulcotrione Tebuconazole Terbufos Terbutryn Terbutylazine

		Fenprothrin Fipronil Flazasulfuron Fluazifop-P-Butyl Flufenacet Fluometuron Fluquinconazole	Terbutylazine desethyl(MT1) Thiamethoxam Thifensulfuron-methyl Triclosan Triflumizole Trifluralin Vinclozin
	Anions et cations	Potassium Sodium Chlorures Fluorures Nitrates Sulfates Ammonium Nitrites Phosphate Silice	

Tableau 16 : Analytes utilisés pour le présent rapport pour l'analyse du type des micropolluants au Service de l'eau de Lausanne.

TZW :

Pesticides et métabolites	chlorthalozon desphenylchlorthalozon methylchlorthalonil chlorthalonil chlorthalonil-R 182281 chlorthalonil-R 417888/M12 chlorthalonil-R 418503 chlorthalonil-R 419492/M8 chlorthalonil-R 471811 chlorthalonil-R 611553 chlorthalonil-R 611965/M5 chlorthalonil-R 950097 chlorthalonil-SYN 507900 chlorthalonil-SYN 546872 dimethachlor dimethachlor-CGA 50266 dimethachlor-CGA 354742 dimethachlor-CGA 369873 dimethenamid dimethenamid-P-M 23 dimethenamid-P-M 27 dimethenamid-P-M 31 dimoxystrobin dimoxystrobin-505-M08 dimoxystrobin-505-M09 flufenacet fufenacet-M2 metalaxyl metalaxyl-M-CGA 108906 metalaxyl-M-CGA 62826/NOA 409045	metamitron desamino-metamitron metazachlor metazachlor-BH 479-11 metazachlor-BH 479-12 metazachlor-BH 479-4 metazachlor-BH 479-8 metazachlor-BH 479-9 quinmerac quinmerac-BH 518-2 S-metolachlor S-metolachlor-CGA 351916/CGA 51202 S-metolachlor-CGA 368208 S-metolachlor-CGA 380168/CGA 354743 S-metolachlor-NOA 413173 terbutylazine terbutylazine-MT23 terbutylazine-SYN 545666/SM6 tolylfluorid N,N-dimethylsulfamide topramezone topramezone-N3 trifloxystrobin trifloxystrobin-CGA 321113 trifloxystrobin-NOA 413161 trifloxystrobin-NOA 413163 tritosulfuron tritosulfuron-BH 635-4/635M01 flurtamone trifluoroacetic acid (TFA)
---	---	--

Tableau 17 : Analytes utilisés pour le présent rapport pour l'analyse des métabolites à DVGW-Technologiezentrum Wasser de Karlsruhe.

Doc-Labor :

COD hydrophobe				
COD hydrophile	Bio-polymères dont colloïdes organiques	Substances humiques	Résidus de produits humiques	Faible poids moléculaire
Colloïdes inorganiques				

Tableau 18 : Analytes utilisés pour le présent rapport pour l'analyse du type de matière organique chez Doc-Labor de Karlsruhe.

8.3. Annexe 3 : Courbes de calibration

Qualité des eaux du Cossaux

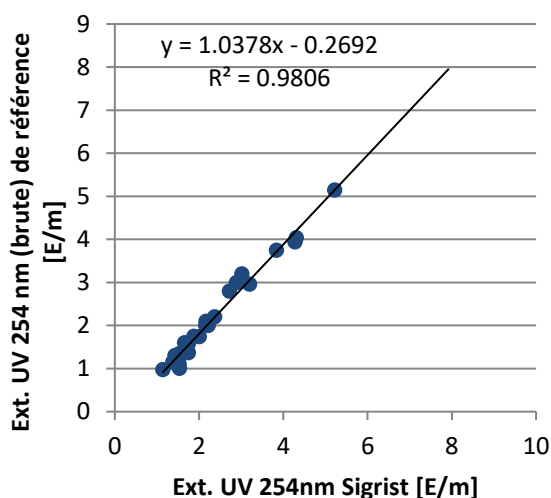
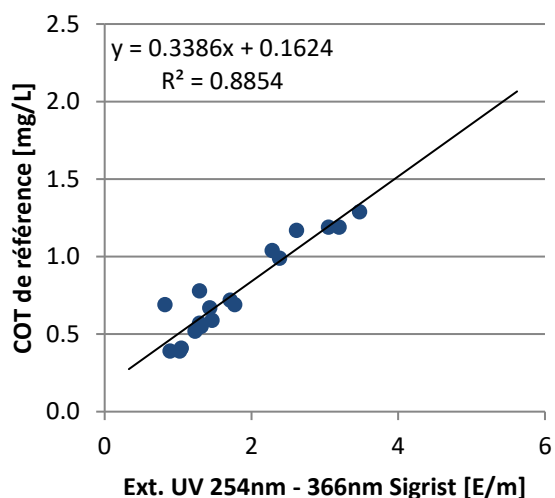
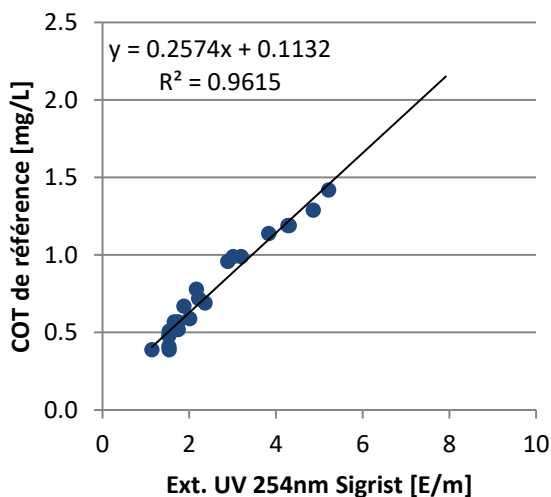
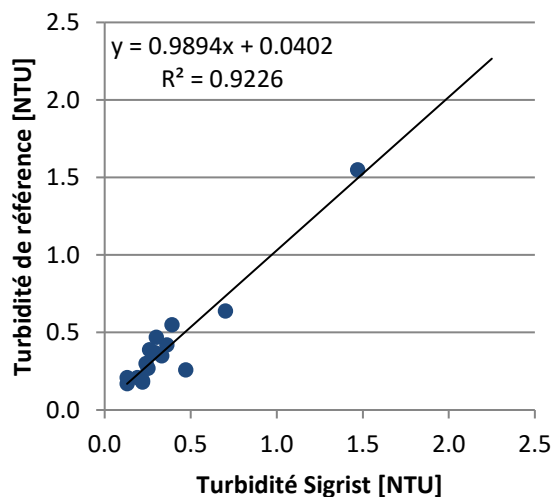
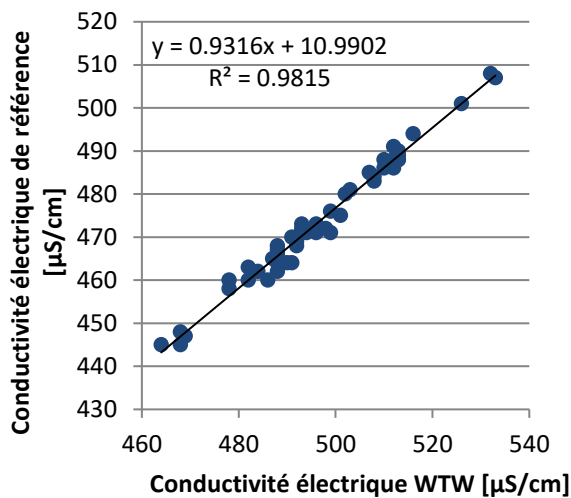
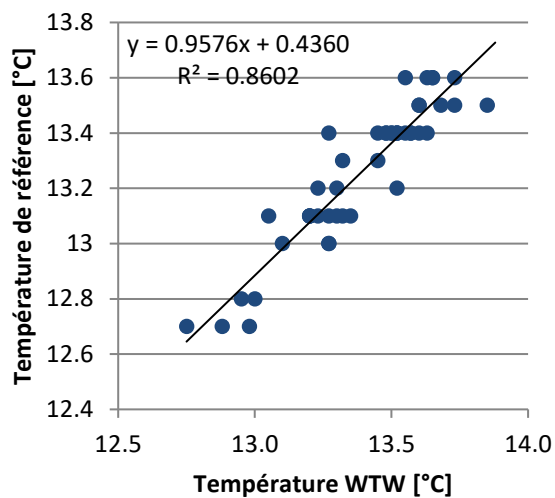


Figure 26 : Température, conductivité électrique, turbidité, COT et Extinction UV 254nm au Cossaux. Valeurs mesurées en continu, en abscisses, sont calibrées en fonction des valeurs mesurées manuellement ou en laboratoire, en ordonnée.

Qualité des eaux du Moulinet 6a

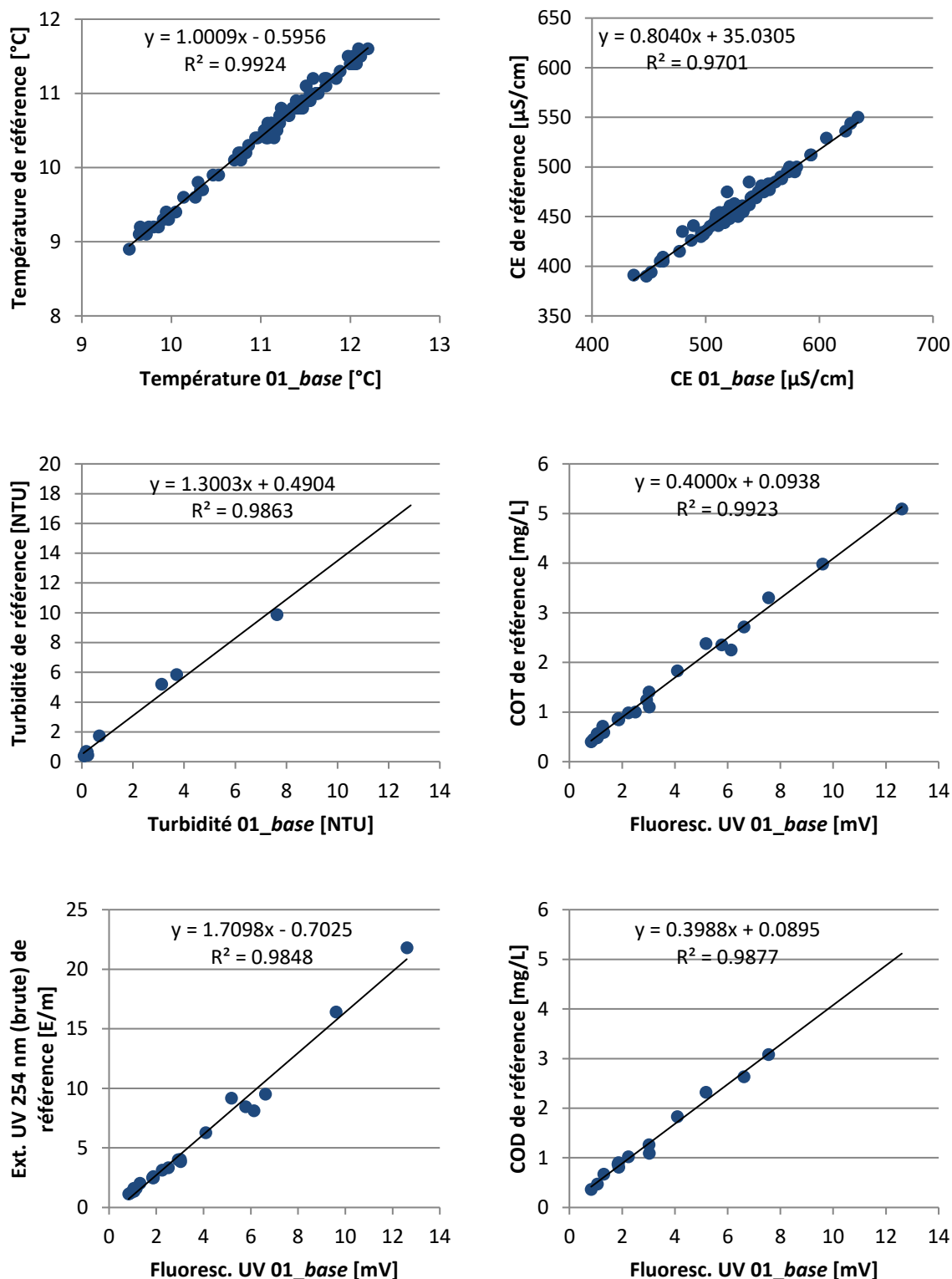


Figure 27 : Température, conductivité électrique, turbidité, COT et Extinction UV 254nm au Moulinet 6a. Valeurs mesurées en continu, en abscisses, sont calibrées en fonction des valeurs mesurées manuellement ou en laboratoire, en ordonnée. Les données de base (sans aucun traitement) sont récupérées à partir du fluorimètre.

Données de niveaux d'eau

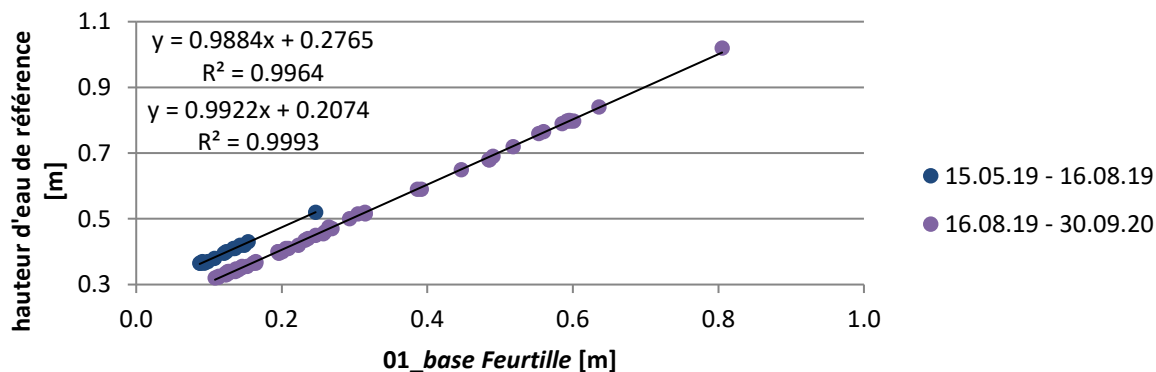
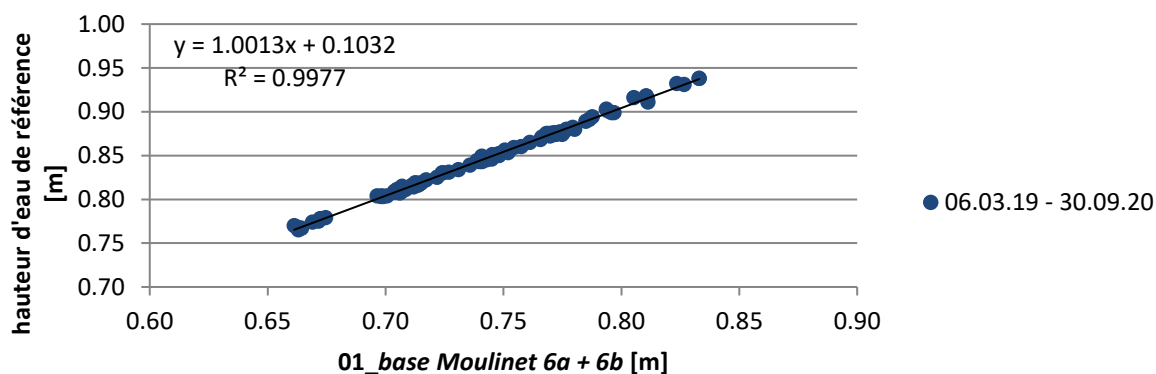
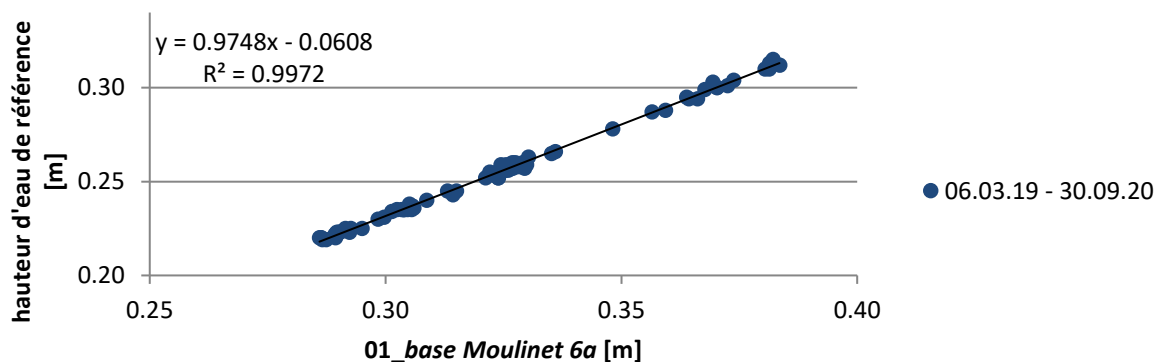
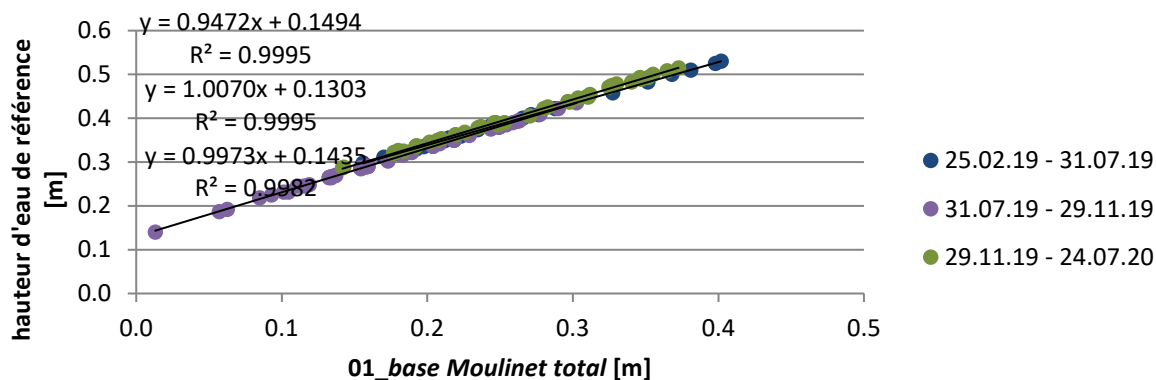
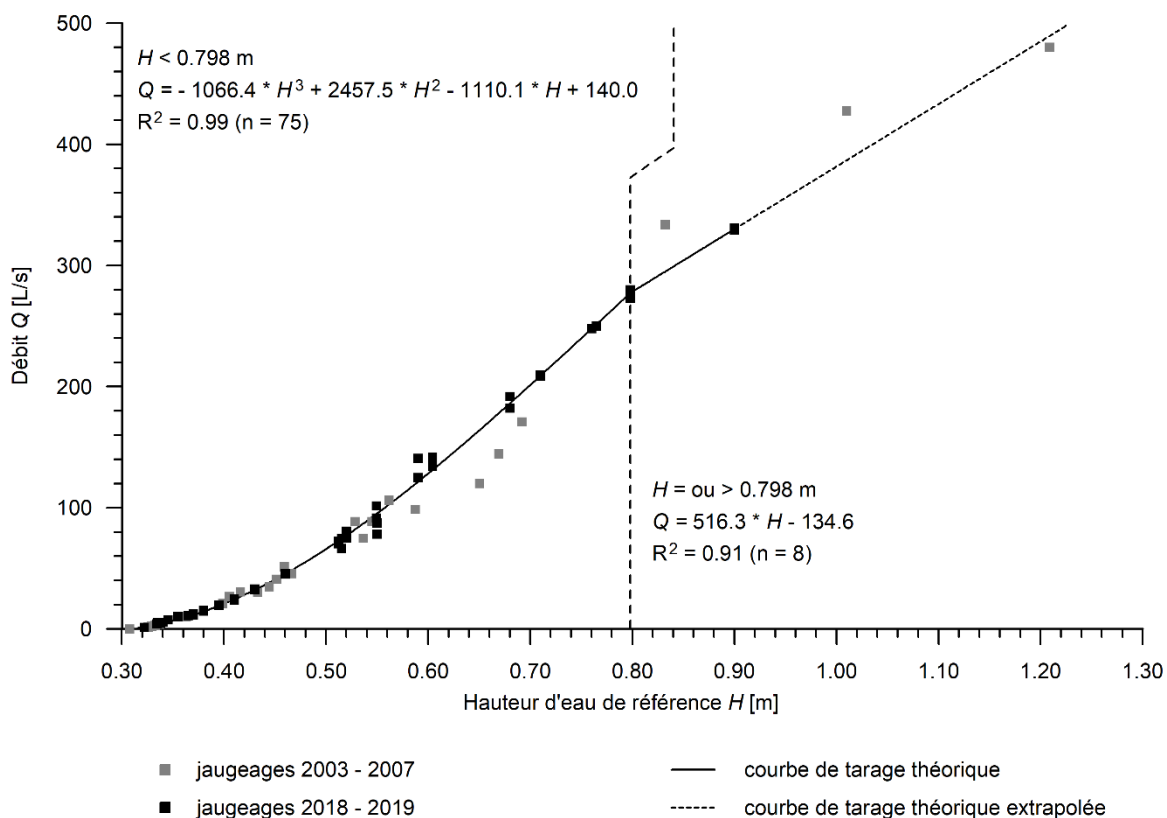


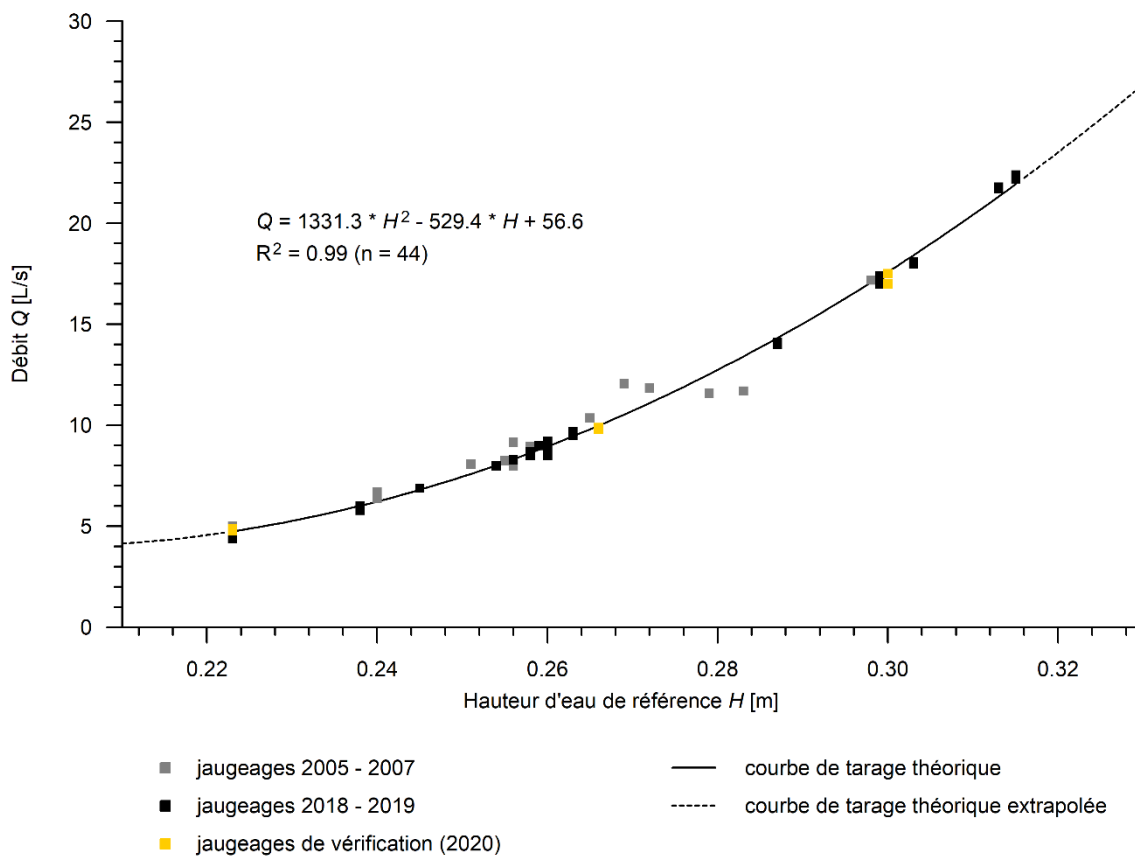
Figure 28 : Données de base pour les divers niveaux d'eau et leur hauteur de référence.

Rapports en niveaux d'eau et débit jaugés

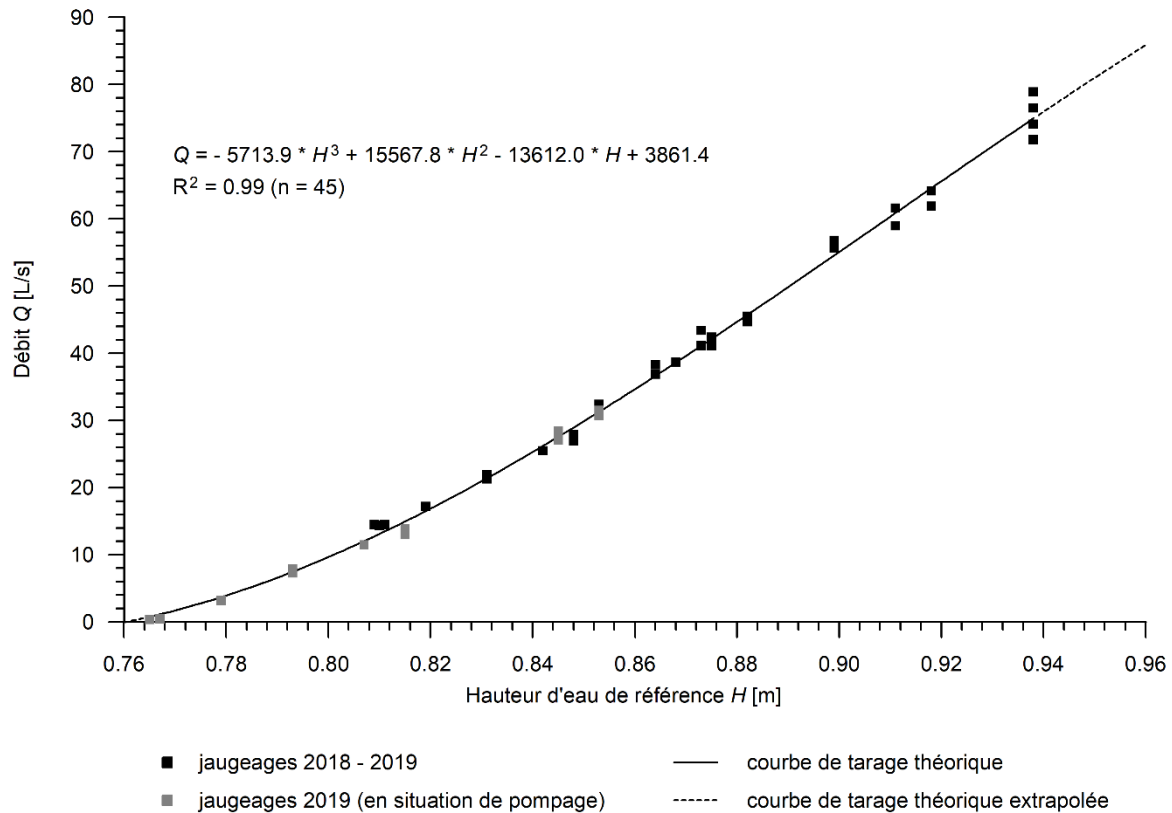
Feurtille



Moulinet 6a



Moulinet 6a + 6b



Moulinet total

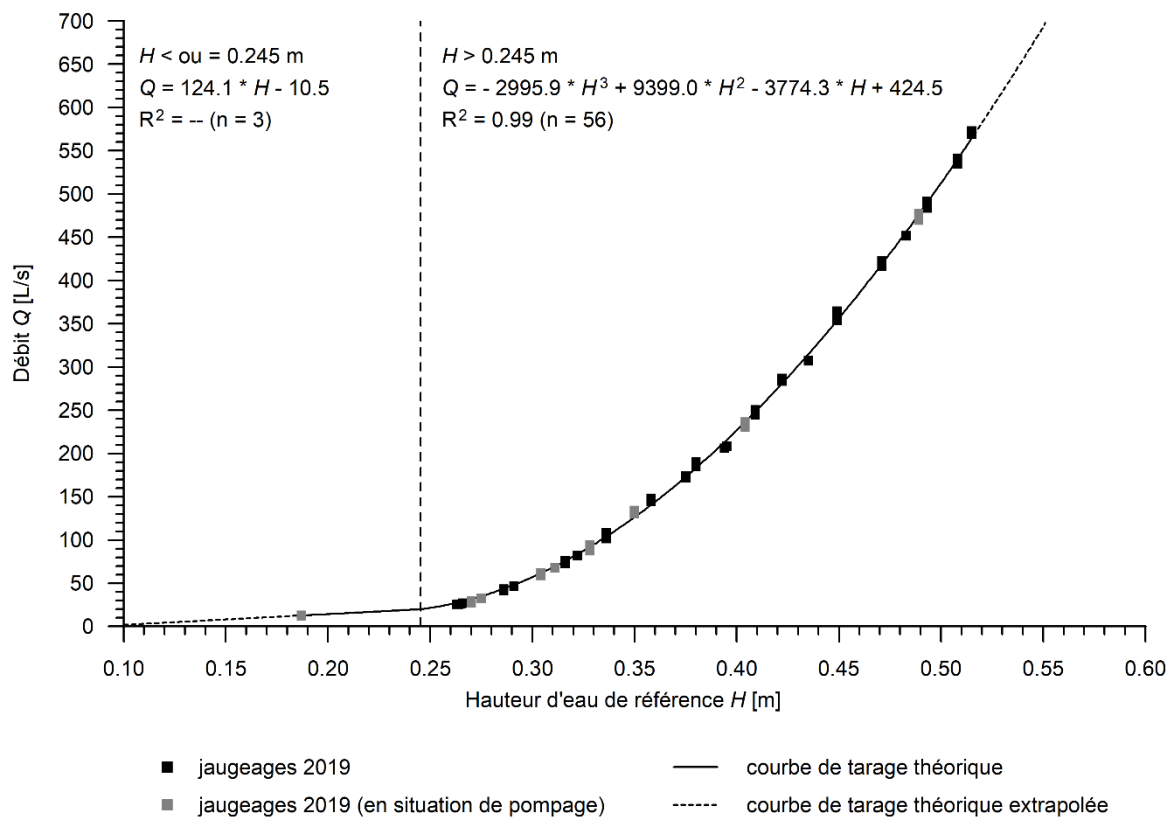


Figure 29 : Courbes de tarage effectuées par FCM-lab pour la Feurtille, l'exutoire du Moulinet 6a, la somme des exutoires 6a + 6b et le Moulinet total

8.4. Annexe 4 : Débits

RELATIONS ENTRE LES DÉBITS

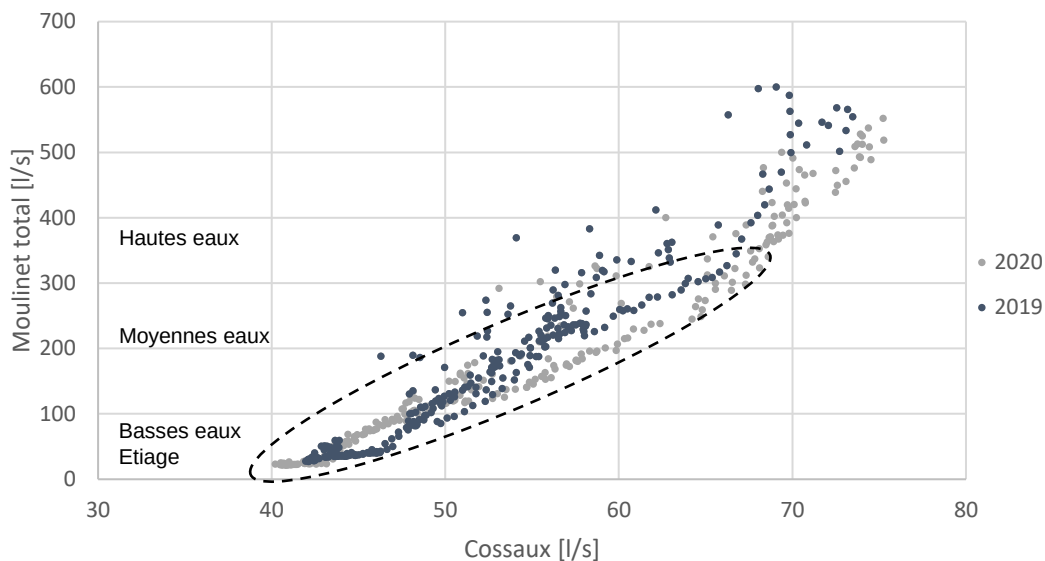


Figure 30 : Relation entre les débits journaliers maximaux du Cossaux et du Moulinet. Une sélection des débits maximaux a permis d'exclure les données obtenues lors des pompages des maraîchers. Le 90% des données en situation hydrogéologique stable est représenté par l'ellipse de confiance. La limite basse de chaque régime hydrique est indiquée en toutes lettres. Données de 2019-2020.

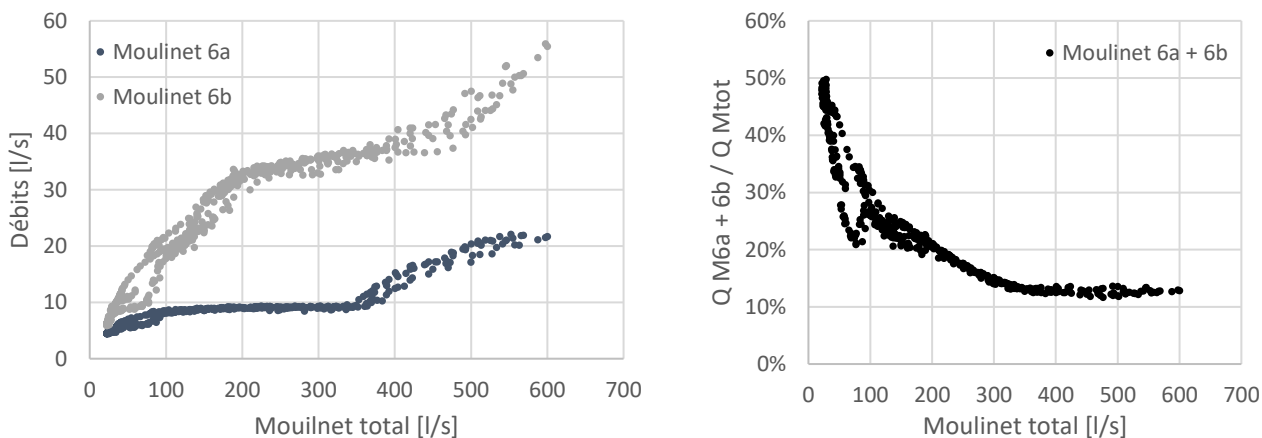


Figure 31 : A gauche : relation entre les débits journaliers maximaux obtenus au Moulinet et aux sources pérennes 6a et 6b. A droite : part des sources captées sur le débit du Moulinet total en fonction du débit du Moulinet total, données de 2019-2020.

DÉBITS CLASSÉS

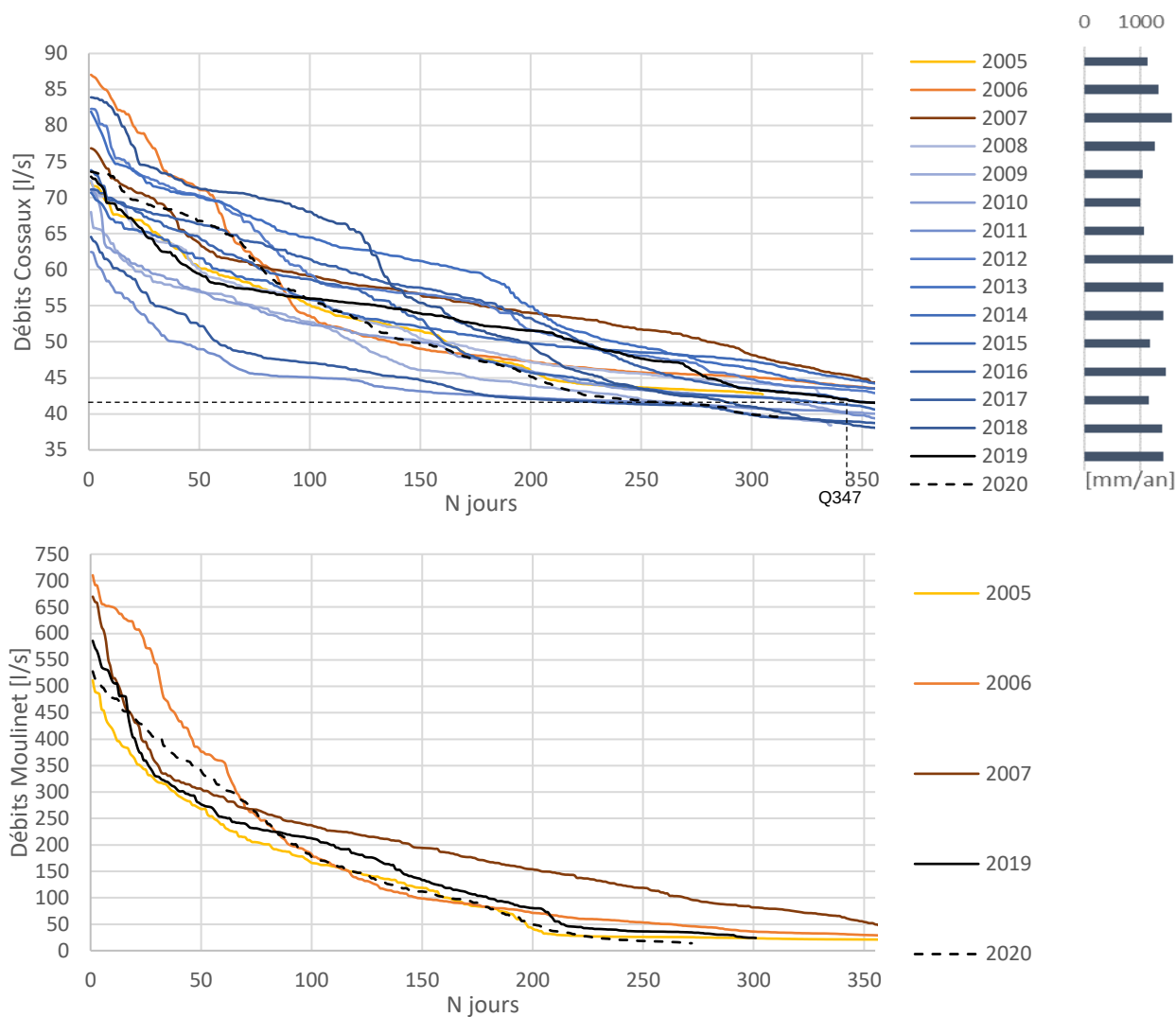


Figure 32 : Débits moyens journaliers classés par années civiles. En haut : débits du Cossaux et précipitations cumulées annuelles tombées à Baulmes. En bas : débits du Moulinet, hors pompages. Les données ne sont pas disponibles pour la totalité des années 2019 et 2020 au Moulinet total. Données de 2005 à 2007 tirées de la thèse à M. Pronk (2008).

		Feurtille								Moulinet								Cossaux																
		août.19	oct.19	juin.20	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	sept.20	août.19	oct.19	avr.20	juin.20	avr.19	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	sept.20	août.19	oct.19	avr.20	juin.20	avr.19	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	
Type d'échantillonnage		2	2	3	5	7c	7d	7e	8	1	2	2	3	3	4	5	7b	7c	7d	7d'	8	1	2	2	3	3	4	5	7b	7d	7e	7d'	8	
Substance mère																																		
Métabolite pertinent																																		
Métabolite non pertinent																																		
2,4 D		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	29	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Acclonifen		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Alachlor		nd	nd						nd					nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd					nd			nd	nd	nd	nd	nd	
Amidosulfuron		10	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Atrazine		10	15	9	6	nd	nd	nd	5	11	7	10		8	11	7	15	11	16	6	11	7	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
		nd	19	11	8	nd	nd	6	8	14	9	11		10	11	7	19	13	17	6	12	9	8	10		7	9	7	nd	nd	13	17	16	10
Atrazine (desethyl)		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Atrazine (deisopropyl)		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Azoxystrobin		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Bentazon		45	13	13	13	8	6	nd	5	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Boscalid		7	nd	nd	nd	10	14	8	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Butafenacil		nd	nd			nd	nd	nd	nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Carbendazim		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Chloridazon		8	5	nd	nd	10	10	15	190	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	10	
Chloridazon (dephenyl)					338	334				29												44						51		62				
Chloridazon (methyl desphenyl)					155	277				12												20						25		63				
Chlorothalonil (R471888)		288	32	40	9	17	61	134	24		13	nd	nd	nd	8	nd	nd	9	29	25	9	nd	14	nd	nd	nd	6	6	7	5	20	15	6	
Chlorothalonil (R471811)					290					39			42	60			nd					54				114	80							
Chlorothalonil (R611553)					nd																					nd								
Chlorothalonil (R611965)					nd																					nd								
Chlorothalonil (R611968)					nd																					nd								
Chlorothalonil (SYN507900)					nd					nd			nd	nd								nd			nd		nd							
Chlorothalonil (SYN546872)					nd																					nd								
Chlorothalonil (SYN548581)					nd																					nd								
Chlorfenvinphos		nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd		nd	nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Chlorpyrifos		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	7	6	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Chlortoluron		nd	10	nd	nd	225	155	68	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	31	17	12	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	7	6	nd	nd	
Clethodime		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Clomazone		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cyanazine		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cyproconazole		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Cyprodinil		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
DEET		nd	12	27	nd	5	nd	nd	nd	nd	nd	7		nd	nd	nd	nd	7	13	nd	nd	nd	nd	11		nd	nd	nd	9	7	10	nd	nd	
Diazinon		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Dichlobenil		nd	nd			nd	nd	nd	nd		nd			nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd		nd		nd	nd	nd	nd	nd	
Dichlobenil (2,6 dichlorobenzamide)		nd	nd	nd		nd	5	nd	nd	nd		nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Dichlorprop					nd					nd				nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd		nd							
Diflubenzuron		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Diflufenican		nd	nd	nd	nd	18	19	9	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Diméfuron		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Diméthachlor		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	20	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Diméthachlor (ESA)					nd					nd				nd								nd				nd								
Diméthachlor (OXA)					nd					nd				nd								nd				nd								
Diméthénamid-P		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	120	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	100	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	36	
Diméthénamid-P (ESA)					nd					nd				nd								nd				nd								
Diméthoate		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Dimetomorph		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Dinoseb		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Diuron		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Epoxiconazole		94	nd	nd	nd	11	nd	nd	36	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Ethofumesate		nd	nd	nd	11	nd	nd	nd	80	nd	nd	nd		nd	5	5	nd	nd	nd	nd	58	nd	nd	nd		nd	nd	9	nd	nd	nd	nd	8	
Fenpropathrin		nd	nd			nd	nd	nd			nd			nd			nd	nd	nd	nd			nd			nd			nd	nd	nd	nd		
Fipronil		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd						nd		nd	nd	nd	nd	nd			nd			nd		nd	nd	nd	nd	nd		
Flazasulfuron		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Fluazifop-P-Butyl		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Flufenacet		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	40	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Fluometuron		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Fluquinconazole		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Fluroxypyr-1-méthylheptyl ester		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Flusilazole		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd															

		Feurtille								Moulinet								Cossaux															
		août.19	oct.19	juin.20	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	sept.20	août.19	oct.19	avr.20	juin.20	avr.19	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	sept.20	août.19	oct.19	avr.20	juin.20	avr.19	mars.20	oct.19	oct.19	oct.19	oct.19	juin.19	
Type d'échantillonnage		2	2	3	5	7c	7d	7e	8	1	2	2	3	3	4	5	7b	7c	7d	7d	8	1	2	2	3	3	4	5	7b	7d	7e	7d	8
Metazachlor		nd	6	nd	nd	19	47	20	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	11	nd	8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Metazachlor (ESA)				26	79					nd	nd	nd	nd	nd	nd	9						nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Metazachlor (OXA)				29	47					nd												nd											
Metconazole		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	7	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Methoxyfenozide				nd	nd					nd			nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd				nd	nd	nd						
S-Metolachlor		nd	nd	nd	10	nd	nd	12	488	nd	nd	nd	nd	nd	7	nd	nd	nd	nd	nd	73	nd	nd	17	nd	nd	5	6	nd	nd	nd	25	
Metolachlor (ESA)				nd	nd					nd			nd	nd								nd			nd	nd							
Metolachlor (OXA)				nd	nd					nd			nd	nd								nd			nd	nd							
Metribuzin			nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Napropamid		nd	nd			nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Nicosulfuron				nd	nd					nd			nd		nd							nd			nd		nd						
Orbencarb		nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Oxadixyl		nd	15	6	6	5	nd	nd	8	5	nd	11	nd	nd	21	nd	10	16	nd	nd	6	nd	13	nd	nd	15	5	10	14	7	nd		
Penconazole		nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Pendimethalin		nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Phosalone		nd	nd			nd	nd	nd	nd	nd	5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Primicarbe				nd	nd								nd		nd							nd			nd		nd						
Propamocabe				nd	nd					nd			nd		8							nd			nd		8						
Propaquizafop		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Propiconazole		nd	nd	19	nd	nd	nd	nd	nd	nd	16	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	8	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	10	nd	nd	
Prosulfocarb		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd			
Pymetrozine		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Simazine		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Spiroxamine		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Sulcotrione				nd	nd					nd			nd		nd										nd		nd						
Tebuconazole			nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd			nd		nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Terbufos		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd		nd		nd		nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Terbutryn				nd	nd					nd			nd									nd			nd								
Terbutylazine		19	nd	nd	nd	nd	nd	nd	363	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	29	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	8		
Terbutylazine (desethyl)		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	68	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Thiamethoxam				nd	nd					nd			nd		nd							nd			nd		nd						
Thifensulfuron-methyl		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Triclosan		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	
Triflumizole				nd	nd					nd			nd		nd							nd			nd			nd					
Trifluralin			nd			nd	nd	nd	nd			nd					nd	nd	nd	nd			nd					nd	nd	nd	nd	nd	
Vinclozin												nd			nd								nd						nd	nd	nd	nd	
Somme pesticides et métabolites pertinents		517	137	421	63	497	713	437	2874	76	50	39	42	78	111	55	46	187	162	100	575	76	35	51	114	87	39	50	38	47	106	60	185
Somme pesticides et tous métabolites		517	137	969	800	548	780	437	2874	117	50	39	42	161	111	243	46	187	162	100	575	140	35	51	114	163	39	175	38	47	106	60	185
i (analytes)		77	85	106	96	85	85	85	80	99	77	85	3	101	80	96	85	85	85	85	83	99	77	85	3	106	80	96	85	85	85	80	

Conditions hydrogéologiques	Type d'échantillonnage
Stables	1. Etiage prononcé
	2. Etiage
	3. Basses eaux
	4. Moyennes eaux
	5. Hautes eaux
Instables	7. Suivi d'une grande crue
	8. Petite crue

Tableau 19 : Survenance des pesticides individuels par régime hydrique. Les valeurs pour les pesticides individuels dépassant les 100ng/l indiqués en rouge. La somme des pesticides et métabolites pertinents ne doit pas dépasser les 500ng/l. Nd : non décelé. Les valeurs sont indiquées en ng/l.

8.6. Annexe 6 : Affinités des pesticides

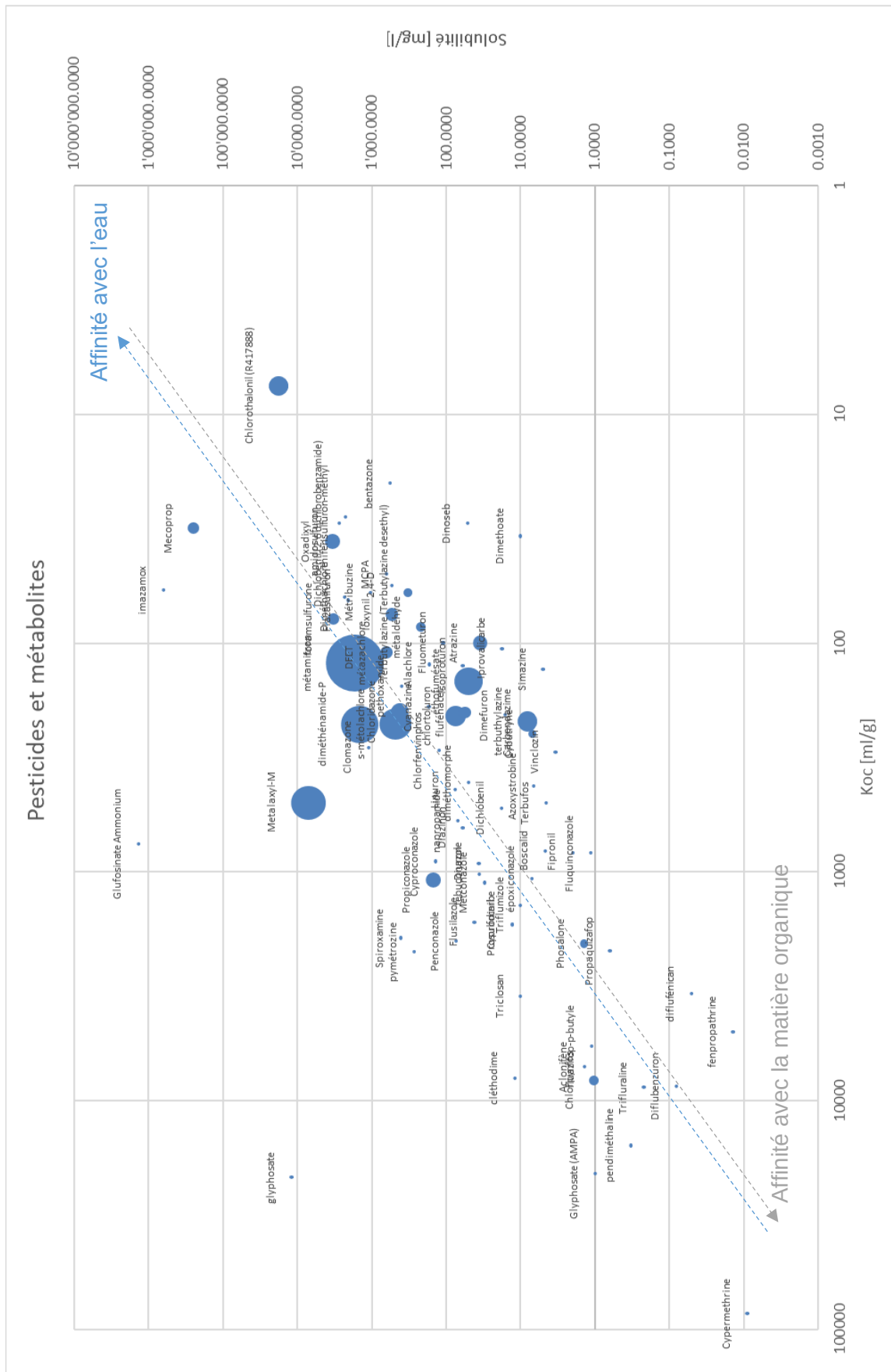


Figure 33 : Affinités des substances à caractère pesticide avec l'eau ou la matière organique, taille des cercles proportionnelle aux concentrations maximales mesurées aux sources