

TYPE DE MATIÈRE ORGANIQUE PRÉSENTE 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

2021

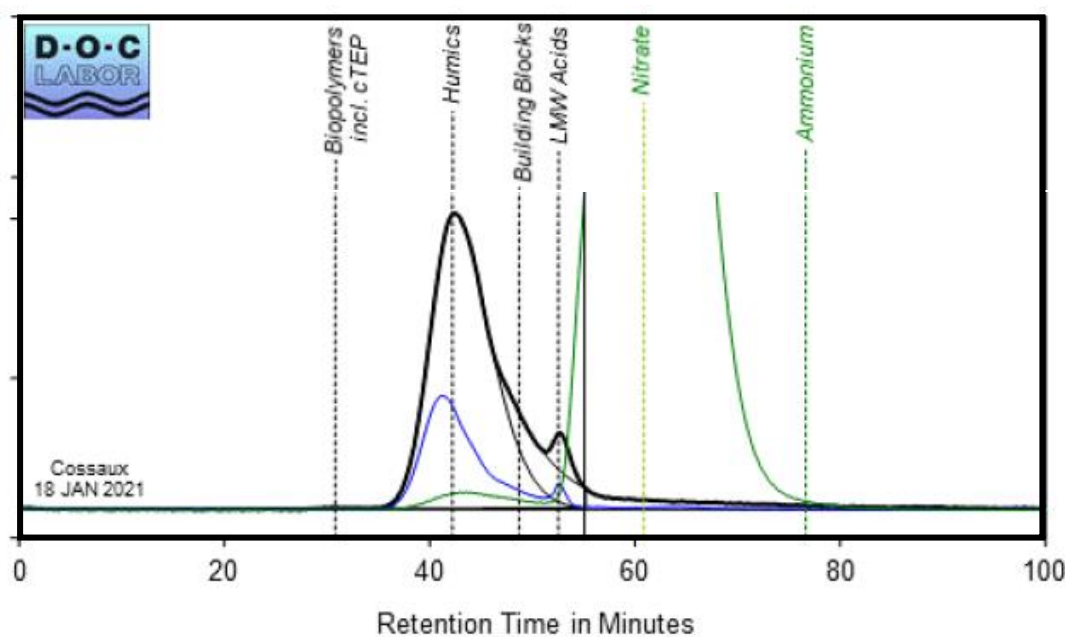


Table des matières

1. Mesure C4 du PDRDE	2
2. Méthodologie.....	2
3. Résultats et discussion.....	3
3.1. Résultats des analyses	3
3.2. Origines de la matière organique.....	5
3.3. Possibilités de traitement.....	6
4. Conclusion	7
5. Bibliographie	8
6. Annexes	9
8.1. Annexe 1 : Courbes de calibration MON et résultats de bactériologie	9
8.2. Annexe 2 : Résultats analyses approfondies de matière organique	13

1. Mesure C4 du PDRDE

La SAGENORD souhaite mettre en œuvre les mesures préconisées dans son plan directeur régional. Le présent rapport apporte quelques éléments de réflexion préliminaires pour la mesure C4, en complément aux analyses effectuées sur les micropolluants. Le projet porte notamment sur la construction de la station de traitement du Cossaux et peut-être également du Moulinet.

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 de la matière organique (MO) aux sources dont la composition était jusqu'ici peu connue. Les eaux de surface du canal de Baulmes sont mélangées à d'autres eaux plus profondes du système karstique. Elles émergent ensuite dans les basses altitudes du Mont de Chamblon (dont sources du Moulinet et du Cossaux).

Des quantités de MO élevées sont présentes épisodiquement aux sources. Il a été jugé nécessaire d'évaluer sa nature afin de définir un traitement approprié. Un nombre et une occurrence de la MO colmatante élevés pourraient nécessiter une filière de traitement supplémentaire.

2. Méthodologie

MONITORING ET PROGRAMME D'ÉCHANTILLONNAGE

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. Ils ont permis de quantifier notamment les débits et la variabilité de la matière organique, selon le Tableau 1.

	Feurtille	Cossaux	Moulinet		
	Perte	captage	6a	6a + 6b	total
Débit	Sonde de niveau	Débitmètre	Sonde de niveau	Sonde de niveau	Sonde de niveau
Matière organique		Extinction UV _{254nm}	Fluorescence UV		

Tableau 1 : Paramètres mesurés en continu sur les sites de la Feurtille, du Cossaux et du Moulinet

Deux types de campagnes ont été organisées :

- Les campagnes dites « en conditions hydrogéologiques stables » sont classées en fonction du débit du Moulinet (QM). Elles peuvent être faites en étiage prononcé ($QM < 20\text{l/s}$), étiage ($20\text{l/s} < QM < 50\text{l/s}$), moyennes eaux ($200\text{l/s} < QM < 250\text{l/s}$) et hautes eaux ($QM > 350\text{l/s}$). La campagne en basses eaux n'a pas été effectuée, la situation ne s'étant pas présentée durant la période étudiée.
- Les campagnes dites « en conditions hydrogéologiques instables » sont caractérisées par une contribution allochtone de la matière organique fortement augmentée aux deux sources par rapport aux conditions d'écoulement de base. Elles sont liées à des crues à la Feurtille.

ANALYSES

Plusieurs types de campagnes ont été mises en place pour cette étude sur 3 sites de prélèvements : Feurtille (ouvrage de la perte), Cossaux (captage des eaux mélangées) et Moulinet (exutoire 6a).

Des analyses fréquentes de matière organique (COT, COD, KMnO_4 , $\text{UV}_{254\text{nm}}$) et de bactériologie (E. Coli, GAM, Entérocoques) ont été effectuées sur les sources par le Service de l'eau.

D'autres campagnes plus ciblées en conditions hydrogéologiques stables et instables ont été effectuées, en utilisant le temps de transit d'une masse d'eau entre la perte et les sources. Le laboratoire Doc-Labor a pu définir la qualité de matière organique grâce à la méthode LC-OCD-OND. La chromatographie liquide (LC) est analysée grâce à trois détecteurs : le détecteur de carbone organique (OCD), le détecteur $\text{UV}_{254\text{ nm}}$ (UVD) et le détecteur d'azote organique (OND).

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats des analyses

MATIÈRE ORGANIQUE ET BACTÉRIOLOGIE

Une bonne corrélation est obtenue entre les données de matière organique mesurées en laboratoire (absorbance UV_{254nm} ainsi que le COT ou le COD). Les courbes de corrélation sont disponibles en annexes. En conditions hydrogéologiques stables, la matière organique contenue dans les eaux des sources se caractérise par une signature différente de celle qui est mesurée lors des conditions instables. Les deux signatures sont similaires pour les deux sources : un rapport entre l'absorbance UV_{254nm} sur le COT dépassant le seuil de 3 unités a décrit, en général, une matière organique fortement influencée par la perte de la Feurtille. La matière organique de la Feurtille a, quant à elle, une signature différente des sources, caractérisée par une variabilité importante de sa composition.

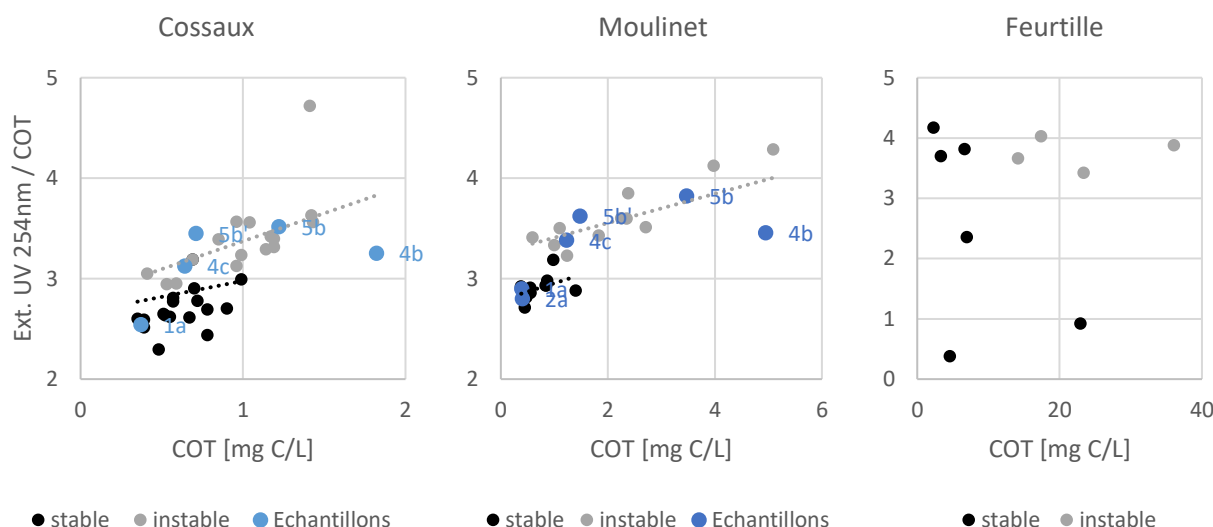


Figure 1 : Signatures de la matière organique aux sources et à la perte en conditions hydrogéologiques stable et instable (données 2019-2021). Echantillons prélevés dans le cadre des analyses LC-OCD-OND mises en évidence en bleu. 1. Etiage prononcé ; 2. Etiage ; 4. moyennes eaux ; 5. Hautes eaux. A, condition hydrogéologique stable ; b, condition hydrogéologique instable ; c, décrue

Afin d'estimer le potentiel colmatant de la matière organique naturelle (MON), des analyses de type de MON ont été effectuées. La matière organique dissoute peut se séparer en deux catégories : hydrophobe ou hydrophile. Le HOC hydrophobe peut comprendre des hydrocarbures naturels et des humines peu solubles. Le CDOD hydrophile comprend, par tailles décroissantes :

1. les biopolymères. Ces molécules organiques à haut poids moléculaire (>100'000 g/mol) comportent les colloïdes organiques, les polysaccharides et les protéines. La concentration en colloïdes organiques (particules colloïdales transparentes exopolymères (cTEP)) exprime la part potentielle responsable de l'encrassement des membranes d'ultrafiltration ou d'osmose inverse. Selon la littérature scientifique, entre 1 et 5 ppb C : le potentiel est faible ; entre 5 à 20 ppb C : le potentiel est moyen ; à plus de 20 ppb : le potentiel est élevé. Ces molécules ne sont pas absorbables par l'UV_{254nm} (UVD), cependant, la méthode de multidétection avec le carbone organique (OCD) permet la mise en évidence de cette matière organique problématique.
2. les substances humiques
3. des fragments appelés building blocks
4. de molécules de masse moléculaire faible (BPM) dont les alcools, aldéhydes, acides aminés

Enfin, les colloïdes inorganiques seraient liés à la présence d'hydrates de fer ou du soufre colloïdal.

En période stable (Figure 2) la MON présente à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux est constituée majoritairement de substances humiques. En période instable (Figure 3), cette part devient plus importante. Les biopolymères prennent leur origine dans les eaux de surfaces. A la Feurtille, leur part n'est pas élevée mais chargée en protéines en tout temps, ce qui reflète une MON d'origine bactérienne tant à l'étiage qu'en hautes eaux. La part restante de la MON est constituée de Carbone organique hydrophobe, de building blocs et molécules neutres de masse moléculaire faible.

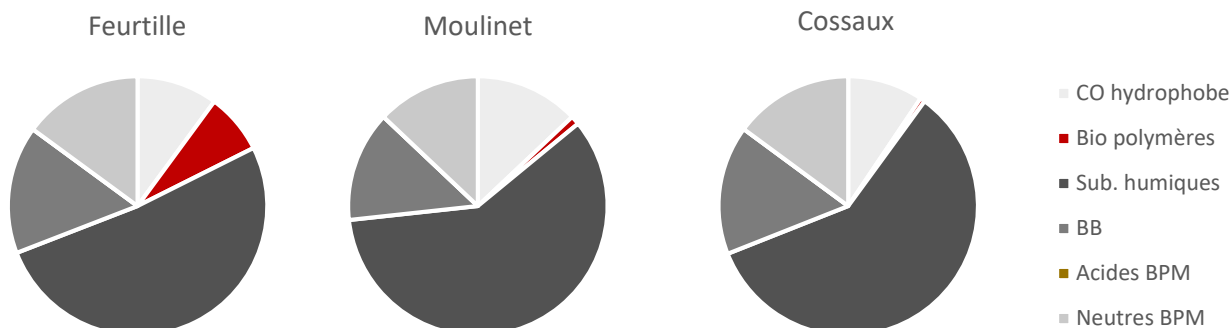


Figure 2 : Composition de la MON à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux à l'étiage prononcé en conditions stables

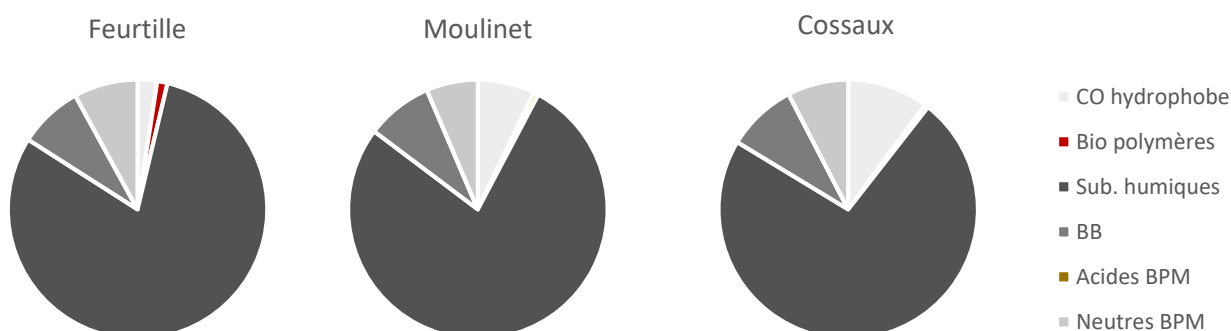


Figure 3 : Composition de la MON à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux en moyennes eaux en conditions instables

La concentration en colloïdes transparents organiques (cTEP) indique un potentiel colmatant élevé dans le canal de Baulmes (Figure 4 et annexe 2). Cependant, au Moulinet, ces concentrations sont presque toujours en-dessous du seuil de détection. Au Cossaux, ces substances problématiques sont non décelables : elles sont en permanence diluées dans les eaux karstiques non chargées en colloïdes organiques. En étiage prononcé, quand l'influence du débit de la Feurtille sur le débit du système est négligeable, les sources du Moulinet et du Cossaux sont biologiquement plus stables.

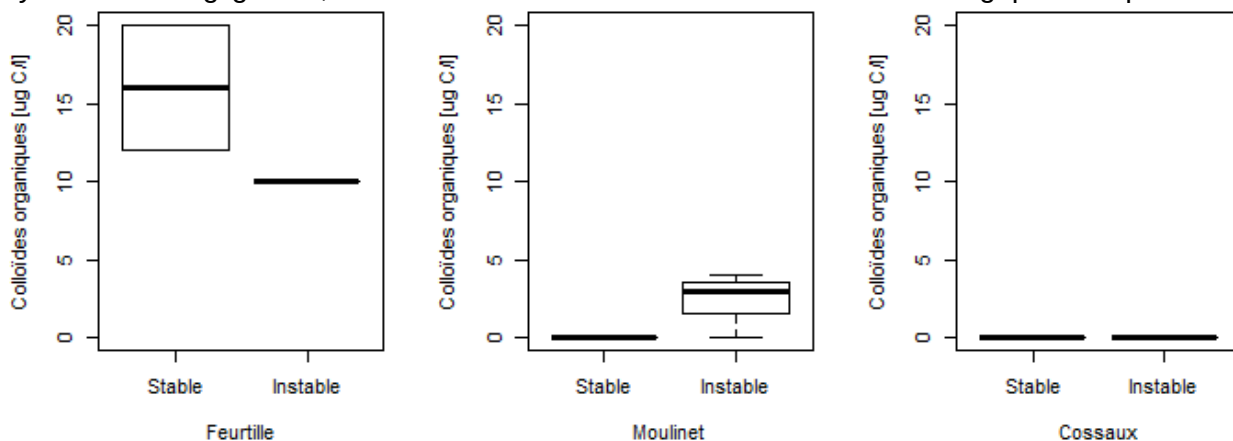


Figure 4 : Concentrations en colloïdes organiques (cTEP) à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux. Attention : un seul échantillon a été prélevé à la Feurtille en conditions instables : données non représentatives.

3.2. Origines de la matière organique

De manière générale, les substances humiques peuvent être notamment d'origine pédogène ou aquagène. Les SH pédogènes, formés essentiellement à partir des débris végétaux humifiés, sont formés en milieu terrestre et sont transportés jusqu'au milieu aquatique par ruissèlement ou percolation. Les SH aquagènes sont formés notamment par la dégradation d'algues.

Selon le diagramme des substances humiques (SH) (adaptée de Huber et al. 2011, Figure 5), celles-ci sont majoritairement de type acide fulvique pédogène à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux. Elles viennent donc majoritairement par ruissèlement ou par les drainages à la perte de la Feurtille. Les débris d'algues poussant dans le canal ne contribueraient que très peu à la MON mesurée dans les eaux. Plus l'influence de la perte de la Feurtille est importante, plus les SH tendent à être réfractaires. A l'inverse, sans influence de la perte de la Feurtille, en étiage prononcé, le type de SH devient plus facilement biodégradable.

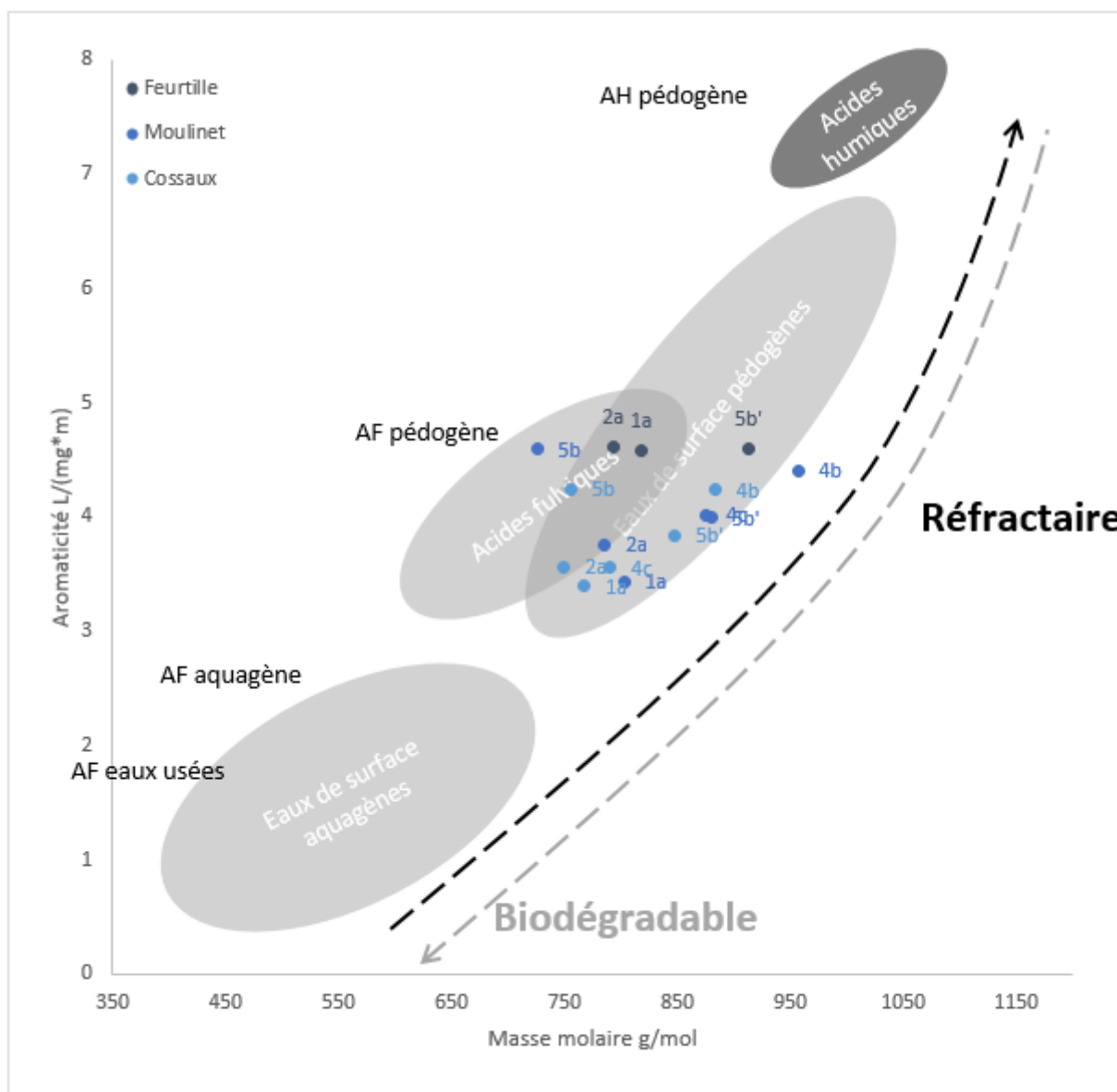


Figure 5 : Diagramme substances humiques (SH) adapté depuis Huber et al. (2011). AF : acides fulviques ; AH : acides humiques. 1. Étiage prononcé ; 2. Étiage ; 4. moyennes eaux ; 5. Hautes eaux. A, condition hydrogéologique stable ; b, condition hydrogéologique instable ; c, décroue.

3.3. Possibilités de traitement

Dans le tableau ci-dessous sont résumées les dernières données disponibles sur la matière organique et bactériologie aux sources (selon Fcm-lab. 2014., Pronk M., Urfer D. & Bonnet C. 2020., SAGENORD. 2020. et présente étude). La source du Cossaux subit une variabilité moindre en règle générale et est biologiquement plus stable que la source du Moulinet. Les sources subissent néanmoins toutes les deux des détériorations de la qualité de l'eau suite à des crues à la perte de la Feurtille. Environ un tiers de la production du Cossaux, l'équivalent de plus de 500'000 m³, est mis à la décharge chaque année, notamment pour raison de concentrations en MON trop élevées et une contamination microbiologique. C'est un volume d'eau qui mériterait d'être traité afin de ne plus être mis à la décharge. Au Cossaux, le COT ne dépasse que faiblement la norme légale lorsque la source est mise hors service. Son traitement ne devrait donc pas nécessiter de moyens lourds. De plus elle est en tout temps exempte de cTEP. Cependant, un moyen plus efficace devrait être mis en place pour la désinfection de la source. En conditions stables l'eau contient un peu plus de 20'000 cellules par ml, par contre en conditions instables, il a déjà été mesuré plus de 400'000 cellules par ml.

Paramètre	Unité		Source du Moulinet		Source du Cossaux	
			Min	Max	Min	Max
Paramètres continus		normes				
COT continu	[mg C/l]		0.2	10.8	0.3	3.2
Physico-chimie						
Oxydabilité	[mg/l]	3	3.4	8.3	1.9	2.9
Extinction UV _{254nm}	[E/m]		<1.5	21.8	<1.5	5.15
COT	[mg C/l]	2	0.55	5.09	0.41	1.82
COD	[mg C/l]		0.36	4.47	0.33	1.70
Substances humiques	[ug C/l]		215	3462	194	1240
Biopolymères	[ug C/l]		0	27	0	9
cTEP	[ug C/l]		0	4	0	0
Building Blocs	[ug C/l]		50	268	53	148
Σ LMW Acides et neutres	[ug C/l]		50	287	43	129
Microbiologie						
GAM	[CFU/ ml]	300	14	8680	2	2150
E. Coli	[CFU/100 ml]	0	0	648	0	183
Entéro.	[CFU/100 ml]	0	0	480	0	123
Cytométrie en flux						
TTC	[k cellules/ ml]				23	472
LNA/TCC	[%]				67	79
ICC/TCC	[%]				77	96

Tableau 2 : Valeurs minimales et maximales des données de matière organique et microbiologie au Moulinet et au Cossaux

Entre 50% à 70% de la matière organique dissoute étant des SH de type acide fulvique pédogène, la flocculation pourrait s'avérer efficace pour traiter jusqu'à 70% de ces SH selon les échanges avec Dr. Huber du laboratoire DocLabor. Néanmoins, au vu des faibles concentrations de SH, cette méthode s'avère peu pertinente.

En prenant en considération les divers seuils de coupures des méthodes de filtration, l'ultrafiltration ne permettrait que de traiter les biopolymères (en incluant la bactériologie). Ceci ne constitue qu'un faible pourcentage de la matière organique à traiter. La nanofiltration permettrait de traiter la majorité de la MON dont les biopolymères, les SH et les building blocs selon Wei & Amy (2012). L'osmose inverse permettrait évidemment de traiter l'entièreté de la matière organique, mais, cette méthode est disproportionnée pour le traitement de la matière organique aux sources. Le potentiel colmatant de l'eau étant faible, (faible nombre d'occurrences et la basse teneur de cTEP) l'ultrafiltration serait une option envisageable tant en début de chaîne de traitement qu'en fin de chaîne, moyennant la mise en place ou pas, d'une coagulation en ligne.

Un traitement biologique pourrait être efficace pour éliminer une partie de la matière organique, étant donné qu'une partie de la matière organique est de type biodégradable, mais il n'est pas indispensable.

4. Conclusion

La perte de la Feurtille impacte peu la qualité d'eau des sources du Cossaux pendant les périodes instables en considérant les fractions colmatantes de la matière organique. Elle amène surtout des substances humiques qui sont moins problématiques à traiter. Son impact est par contre important en considérant la bactériologie tant en conditions stables qu'instables.

Une désinfection ou un traitement sera nécessaire en tout temps afin d'abattre les indicateurs de contamination fécale présents autant en conditions hydrogéologiques instables que stables. La mesure continue d'extinction UV a une faible corrélation avec les mesures de bactériologie. En effet, dans les eaux du Cossaux, une faible valeur d'extinction UV n'exclue pas la présence de bactériologie. La corrélation entre l' UV_{254nm} et le COT ou COD étant bonne, les mesures d'extinction UV permettent d'estimer facilement la quantité de matière organique dans l'eau et notamment des substances humiques.

Selon les résultats des analyses, les coûts d'exploitation liés au traitement de la matière organique ne devraient pas être élevés au Cossaux étant donné que celle-ci est de nature non colmatante : les rétrolavages ne devraient pas être trop nombreux grâce à l'absence de biopolymères problématiques. Ces derniers sont majoritairement d'origine bactérienne. De plus, un traitement biologique pourrait aider à éliminer une partie des substances humiques qui seraient biodégradables, mais celui-ci n'est pas indispensable si seul le Cossaux est traité. En résumé, selon les analyses, un procédé d'ultrafiltration seul pourrait absorber des pics de MON au Cossaux. Le Moulinet, quant à lui, nécessiterait une filière de traitement supplémentaire pour absorber les pics de concentrations en substances humiques ou une mise en décharge via un monitoring.

SAGENORD,

Yverdon-les-Bains, octobre 2021

Olga Kocab

5. Bibliographie

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

Huber, S. A., Balz, A., Abert, M., & Pronk, W. 2011. Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography–organic carbon detection–organic nitrogen detection (LC-OCD-OND). *Water research*, 45(2), 879-885.

Pronk M., Urfer D. & Bonnet C. 2020. Etat microbiologique de l'eau potable. Etude par cytométrie en flux des eaux alimentant la région d'Yverdon-les-Bains – Grandson. *Aqua & Gas* 06/2020: 22-29.

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

SAGENORD. 2020. Survenance, origine et comportement des micropolluants dans le système karstique alimentant les sources du Mont de Chamblon.

Wei, C. H., & Amy, G. 2012. Membrane fouling potential of secondary effluent organic matter (EfOM) from conventional activated sludge process. *Journal of Membrane and Separation Technology*, 1(2), 129-136.

6. Annexes

8.1. Annexe 1 : Courbes de calibration MON et résultats de bactériologie

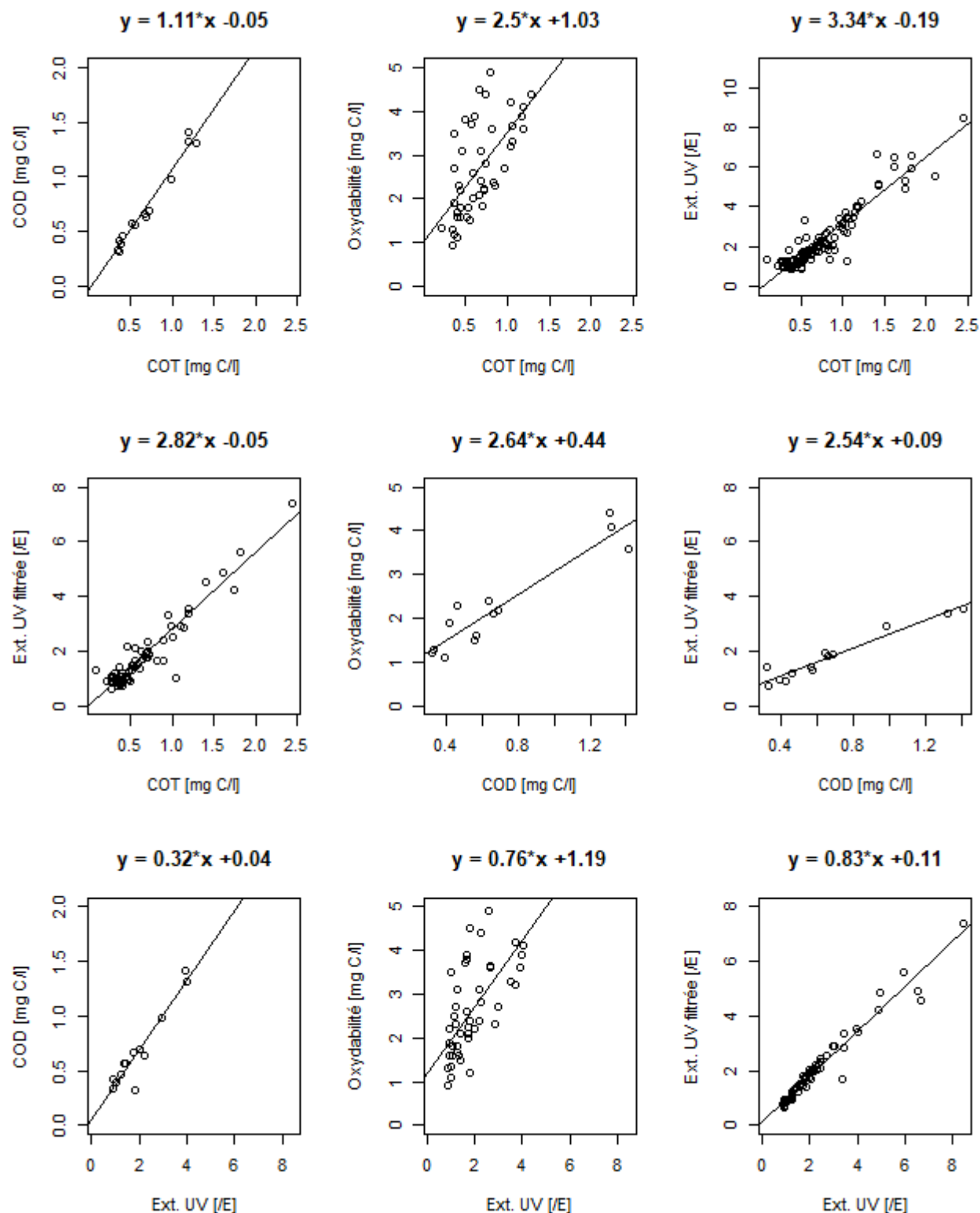


Figure 6 : Courbes de calibration pour les données de matière organique au Cossaux entre 2004 et 2021.

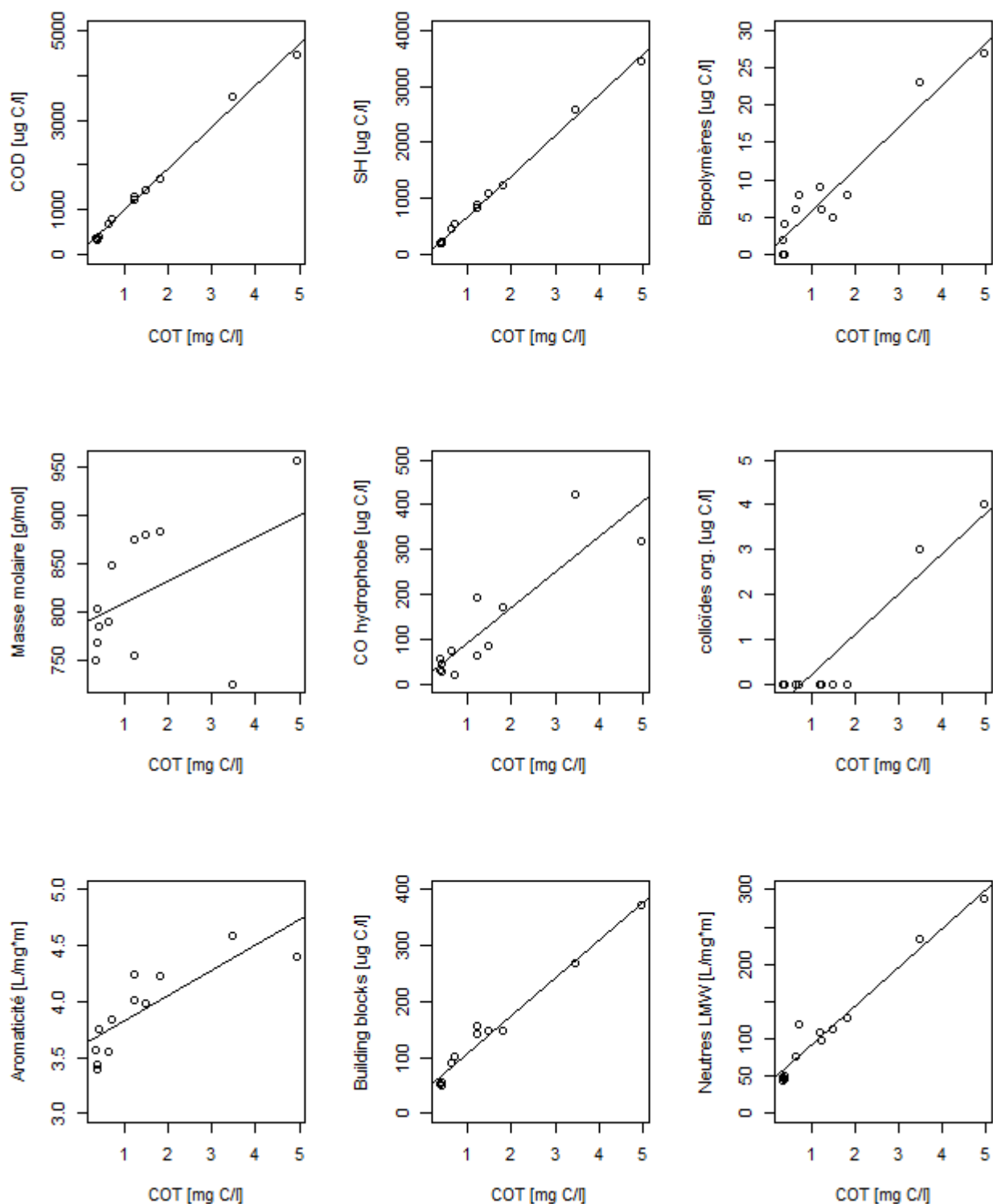


Figure 7 : Nuages de points entre les données de DocLabor avec le COT à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux entre 2019 et 2021

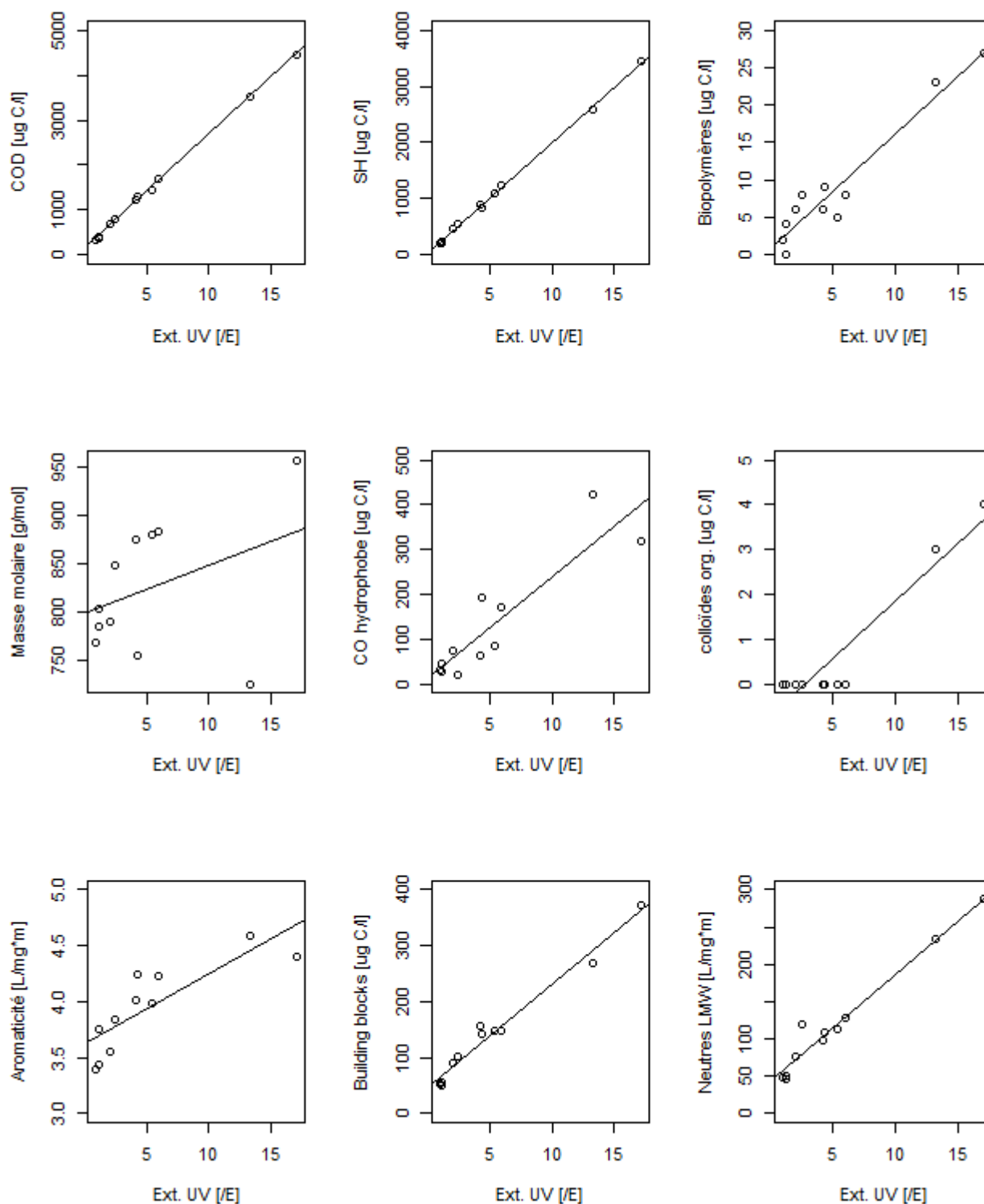


Figure 8 : Nuages de points entre les données de DocLabor avec l'Extinction UV_{254nm} à la Feurtille, au Moulinet et au Cossaux entre 2019 et 2021

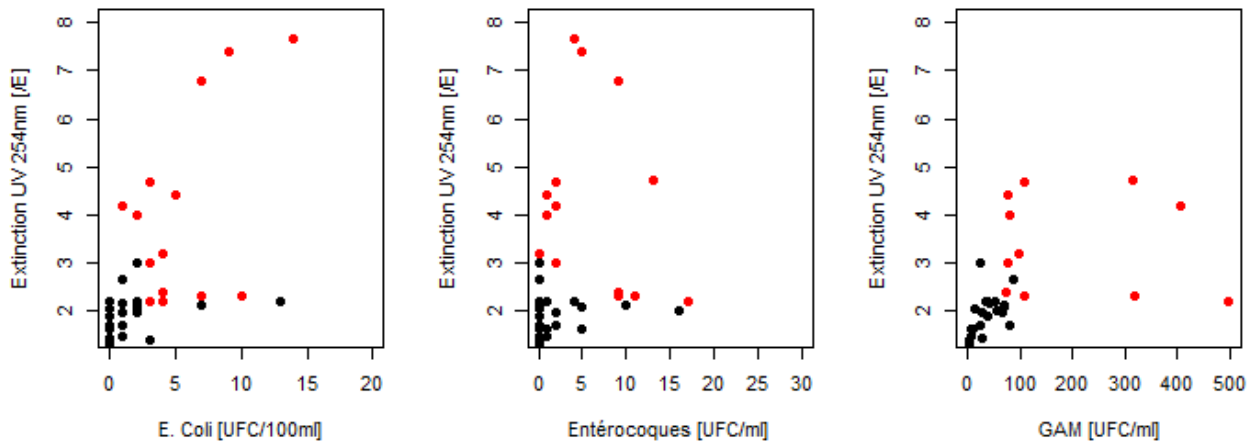


Figure 9 : Résultats de bactériologie au Cossaux (2020-2021) en fonction de l'extinction UV_{254nm}, conditions hydrogéologiques stables en noir et instables en rouge

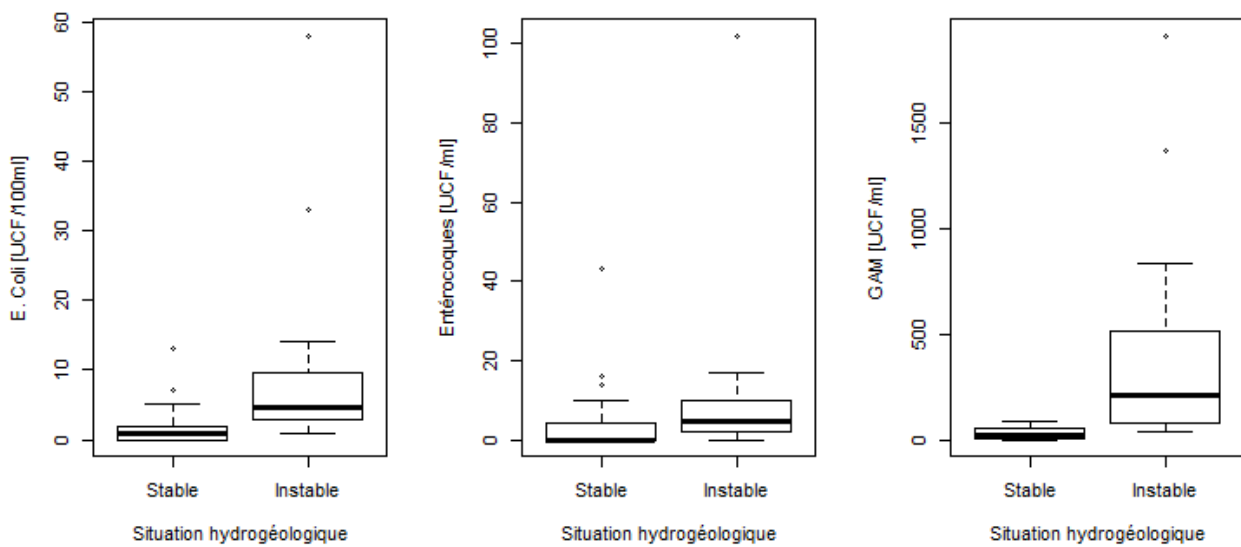


Figure 10 : Résultats de bactériologie au Cossaux (2020-2021) en fonction de la situation hydrogéologique

8.2. Annexe 2 : Résultats analyses approfondies de matière organique

		COD												Coll. inorg.	SUVA		
		Site	ug/L C	CO hydrophobe ug/L C	CO hydrophile					Substances humiques		M g/mol	BB ug/L C	Acides BPM ug/L C	Neutres BPM ug/L C	SAC /m	SAC / COD L/(mg*m)
					ug/L C	Bio polymères ug/L C	Prot. % BP	Coll. org. ug/L C	ug/L C	Aroma. L/(mg*m)							
Date			% COD	% COD	% COD	% COD			% COD			% COD	% COD	% COD			
17.08.2020	F1	Feurtille	1982	146	1836	73	64	12	1190	4.61	793	297	<1	275	<0.01	4.05	
		%	100	7.4	92.6	3.7			60			15		13.9			
31.08.2020	M1	Moulinet	379	29	350	<1	-	<1	244	3.75	786	55	<1	50	0.12	3.44	
		%	100	7.7	92.3				64.2			14.6		13.3			
28.08.2020	C1	Cossaux	363	57	306	<1	-	<1	210	3.56	750	53	<1	43	0.08	2.57	
		%	100	15.7	84.3				57.2			14.6		11.9			
11.09.2020	F2	Feurtille	1556	158	1408	118	57	20	807	4.58	818	250	<1	234	<0.01	3.63	
		%	100	10.1	89.9	7.5			51.5			16		14.9			
18.09.2020	M2	Moulinet	363	47	316	4	-	<1	215	3.43	803	50	<1	47	<0.01	3.03	
		%	100	13	87	1.2			59.1			13.9		12.9			
18.09.2020	C2	Cossaux	329	31	298	2	-	<1	194	3.39	768	53	<1	49	0.01	2.98	
		%	100	9.4	90.6	0.6			59			16.1		14.9			
18.01.2021	M3	Moulinet	4465	318	4147	27	62	4	3462	4.4	957	371	<1	287	0.05	4.12	
		%	100	7.1	92.9	0.6			77.5			8.3		6.4			
18.01.2021	C3	Cossaux	1696	171	1525	8	51	<1	1240	4.23	884	148	<1	129	<0.01	3.95	
		%	100	10.1	89.9	0.5			73.1			8.7		7.6			
16.03.2021	M4	Moulinet	3537	423	3113	23	68	3	2589	4.59	726	268	<1	233	<0.01	3.91	
		%	100	12	88	0.6			73.2			7.6		6.6			
16.03.2021	C4	Cossaux	1291	194	1097	9	-	<1	839	4.24	756	141	<1	108	<0.01	3.57	
		%	100	15	85	0.7			65			10.9		8.4			
07.05.2021	F5	Feurtille	7233	176	7057	93	34	10	5809	4.59	913	579	<1	576	<0.01	4.37	
		%	100	2.4	97.6	1.3			80.3			8		8			
11.05.2021	M5	Moulinet	1454	84	1370	5	-	<1	1105	3.99	880	149	<1	112	<0.01	3.92	
		%	100	5.8	94.2	0.3			76			10.2		7.7			
10.05.2021	C5	Cossaux	784	19	765	8	-	<1	537	3.84	848	101	<1	119	<0.01	3.83	
		%	100	2.4	97.6	1.1			68.5			12.9		15.2			
14.06.2021	M6	Moulinet	1211	63	1148	6	<1	<1	889	4.01	875	155	<1	98	<0.01	3.54	
		%	100	5.2	94.8	0.5			73.3			12.8		8.1			
14.06.2021	C6	Cossaux	697	76	621	6	<1	<1	448	3.55	791	90	<1	77	<0.01	3.11	
		%	100	10.9	89.1	0.9			64.3			12.9		11			

Tableau 3 : Résultats des analyses faites par méthode LC-OCD-OND par le laboratoire Doc Labor. COD : Carbone organique dissous ; CO : carbone organique ; Prot : protéines ; BP : biopolymères ; coll. org : colloïdes organiques (particules exopolymères transparentes colloïdales) ; aroma : aromatiques ; M : masse molaire ; BB : building blocs ; BPM : bas poids moléculaire ; Coll. inorg. : colloïdes inorganiques ; SUVA : ratio de SAC et DOC

<i>Date</i>		<i>Site</i>	<i>COT mg C/L</i>	<i>UV_{254nm} /m</i>	<i>GAM UFC/ml</i>	<i>E. Coli UFC/100ml</i>	<i>Entéro UFC/ml</i>	<i>Condition</i>	<i>Débit l/s</i>	<i>UV/COT</i>
17.08.2020	F1	Feurtille						stable	7	
31.08.2020	M1	Moulinet	0.4	1.12	15	1	2	stable	29	2.80
28.08.2020	C1	Cossaux	0.36		8	0	1	stable	41.5	
11.09.2020	F2	Feurtille						stable	1.5	
18.09.2020	M2	Moulinet	0.39	1.13	11	4	1	stable	22	2.90
18.09.2020	C2	Cossaux	0.37	0.94	9	1	1	stable	40	2.54
18.01.2021	M3	Moulinet	4.95	17.1				instable	215	3.45
18.01.2021	C3	Cossaux	1.82	5.92	1368	9	5	instable	55	3.25
16.03.2021	M4	Moulinet	3.47	13.26				instable	300	3.82
16.03.2021	C4	Cossaux	1.22	4.29				instable	62	3.52
07.05.2021	F5	Feurtille						instable	75	
11.05.2021	M5	Moulinet	1.48	5.36				instable	360	3.62
10.05.2021	C5	Cossaux	0.71	2.45				instable	52	3.45
14.06.2021	M6	Moulinet	1.23	4.16				stable	230	3.38
14.06.2021	C6	Cossaux	0.64	2				stable	55	3.13

Tableau 4 : Résultats des analyses faites au Service de l'Eau pour les mêmes échantillons que dans le tableau 3 ainsi que description des conditions de prélèvement. Les données en italique ont été récoltées à un jour d'écart, en période stable.