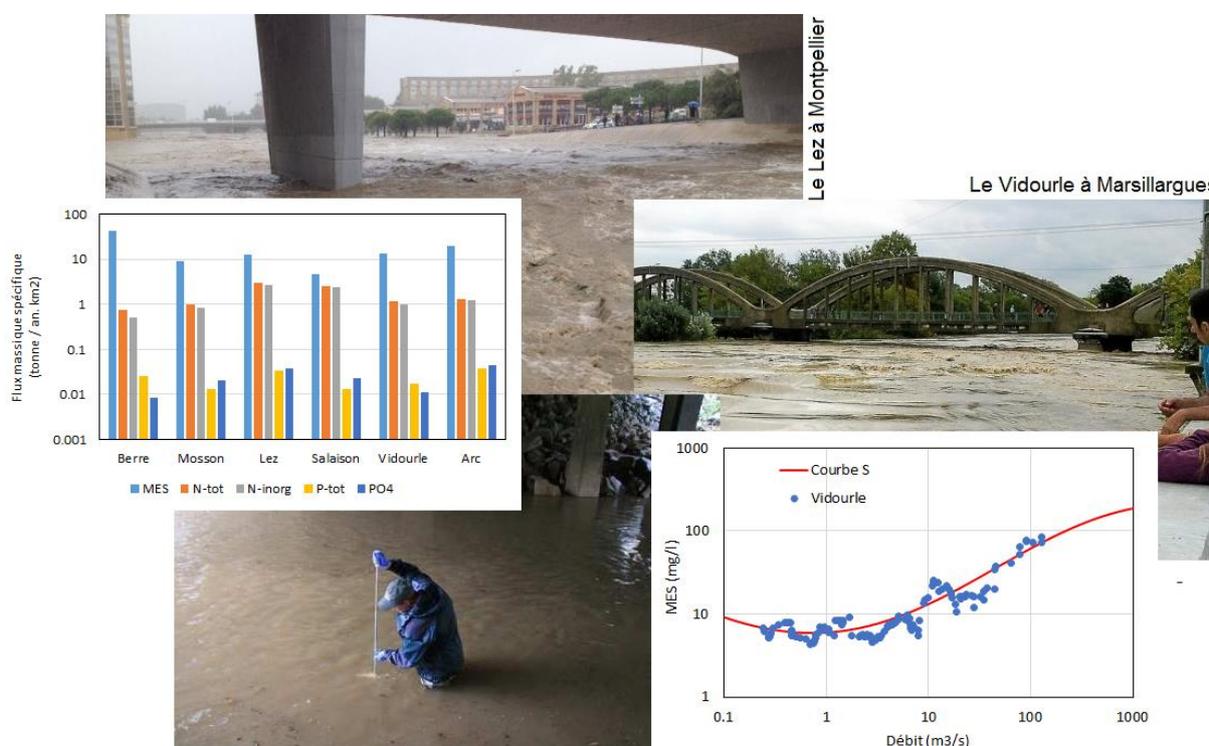


CALCULS DE FLUX POLLUANTS SUR LES TRIBUTAIRES DES LAGUNES DU BASSIN RHONE MEDITERRANEE



Juin 2022

TABLE DES MATIERES

1. Cadre de l'étude.....	4
1.1. Contexte de l'étude.....	4
1.2. Principes de calcul des flux de nutriments	5
1.2.1. Principales méthodes de calcul des flux de nutriments	5
1.2.2. Types de relation concentration – débit.....	6
1.3. Présentation des six tributaires étudiés	7
1.3.1. La Berre	8
1.3.2. La Mosson	9
1.3.3. Le Lez.....	10
1.3.4. Le Salaison	11
1.3.5. Le Vidourle.....	11
1.3.6. L'Arc	12
1.3.7. Comparaison des six bassins versants étudiés.....	13
2. Analyse préalable des données de débits	16
2.1. Evolution des débits des bassins versants étudiés	17
2.2. Comparaison des débits aux pluies efficaces	23
2.3. Distribution statistique des débits.....	30
2.4. Conclusion sur les débits	34
3. Analyse préalable des données de concentrations	37
3.1. Représentativité temporelle des échantillonnages 'qualité'	37
3.2. Particularités concernant les données 'qualité'	40
3.2.1. Limites de détection / quantification	40
3.2.2. Variabilité temporelle	42
3.2.3. Modification du territoire ou des sources de pollution.....	42
3.3. Effet de la saison	45
3.4. Evolution des concentrations durant les crues.....	47
3.5. Choix de la moyenne ou de la médiane.....	51
3.6. Relation entre concentration et débit	52
3.7. Relation entre paramètres	53
4. Etablissement des relations concentration - débit	65
4.1. Considérations préliminaires	65
4.2. Relations MES - Débit.....	68
4.3. Relations Azote - Débit	71
4.4. Relations Phosphore - Débit.....	74
4.5. Concentrations médianes par classes standardisées de débit spécifique	76
4.6. Concentrations médianes par classes de débit propres à chaque cours d'eau	79
4.7. Conclusion sur les relations nutriments - débit	83
5. Calcul des flux de nutriments apportés aux lagunes	85
5.1. Flux apportés par la Berre	85
5.2. Flux apportés par la Mosson.....	90
5.3. Flux apportés par le Lez	94
5.4. Flux apportés par le Salaison.....	98
5.5. Flux apportés par le Vidourle	101
5.6. Flux apportés par l'Arc.....	105
5.7. Comparaison des flux annuels moyens	109
5.8. Discussion des résultats	110

5.9.	Comparaison des concentrations prises en compte par les méthodes MP et ID	112
5.10.	Importance des données de crues dans la méthode ID	121
5.11.	Importance des données de crues dans la méthode MP	122
5.12.	Comparaison des résultats des méthodes MP et ID selon les données de crues disponibles .	125
5.13.	Recommandations en matière d'acquisition de données en temps de crue	127
6.	Bilan des études menées sur l'Etang de l'Or sur les apports de polluants.....	129
6.1.	Principaux résultats des études menées sur les apports de polluants	129
6.1.1.	Quantification des écoulements – SupAgro 2017	129
6.1.2.	Apports de nutriments – SupAgro 2018	131
6.1.3.	Estimation des flux – HYDRIAD 2018.....	131
6.1.4.	Apports des eaux souterraines – Thèse de Marine DAVID 2019	135
6.1.5.	Estimation des flux du BV Est – HYDRIAD 2021	137
6.1.6.	Illustration du coût d'acquisition de connaissances sur l'étang de l'Or	139
6.2.	Principaux acquis génériques (transposables) des études menées sur l'Etang de l'Or	140
6.2.1.	Problématique littorale des lagunes	140
6.2.2.	Problématique hydrologique des lagunes	141
6.2.3.	Rôle des eaux souterraines	142
6.2.4.	Caractérisation des apports	142
7.	Estimation de la qualité des eaux dans les bassins versants non renseignés	144
7.1.	Echelle spatiale d'analyse.....	144
7.2.	Choix des facteurs 'explicatifs'	147
7.3.	Analyse factorielle discriminante (regroupement)	148
7.4.	Regroupement hiérarchique (clusters).....	156
7.5.	Analyse en Composantes Principales (ACP)	158
7.6.	Régressions linéaires multi-paramètres	161
7.6.1.	Etablissement des régressions linaires multi-paramètres	162
7.6.2.	Calcul d'estimation des concentrations probables	165
7.6.3.	Vérification sur les six tributaires étudiés	166
7.6.4.	Application aux principales lagunes méditerranéennes	170
8.	Transposition des connaissances et des acquis	174
8.1.	Principaux constats et préconisations	174
8.2.	Cheminement méthodologique proposée pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes	176
9.	Cas des micropolluants pesticides	181
9.1.	Concentrations en Glyphosate et AMPA	181
9.1.1.	Période 2010-2021	181
9.1.2.	Effet de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA	184
9.2.	Autres molécules détectées.....	186
9.3.	Relation entre concentrations de pesticides et débits	189
10.	Annexe 1 : Dates d'échantillonnage du suivi régulier renforcé	192
11.	Annexe 2 : Dates d'échantillonnage du suivi spécifique de l'étude 'crues'	195
12.	Annexe 3 : Application de la méthode d'estimation des flux hydriques sur vingt bassins versants méditerranéens	196
13.	Annexe 4 : Cheminement méthodologique proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes	213
14.	Liste des figures	214
15.	Liste des tableaux	223

Préambule

Les stations échantillonnées lors des épisodes de crue et concernées par ce rapport sont les suivantes ;

- 06175320 : La Berre à Portel-des-Corbières 1
- 06189675 : La Mosson à Lattes
- 06189500 : Le Lez à Lattes
- 06300400 : Le Salaison à Mauguio
- 06192000 : Le Vidourle à St-Laurent-d'Aigouze
- 06195500 : L'Arc à Berre-l'Etang

Mentionnons que les stations hydrométriques qui y sont rattachées ne correspondent pas forcément à ces mêmes points mais peuvent être légèrement décalées.

Les codes SANDRE des paramètres utilisés dans ce rapport sont les suivants :

- MES : 1305
- Azote Kjeldahl : 1319
- Ammonium : 1335
- Nitrite : 1339
- Nitrate : 1340
- Phosphore total : 1350
- (Ortho) Phosphate : 1433

L'azote inorganique est la somme de l'ammonium, du nitrite et du nitrate. L'azote total est la somme de l'azote Kjeldhal, du nitrite et du nitrate. Si la concentration en azote inorganique est supérieure à la concentration en azote total, cette dernière valeur est utilisée pour l'azote total.

Les unités utilisées dans ce document sont les suivantes :

- Débit : m^3/s (M.m³/s pour million de m³/s)
- Débit spécifique : $m^3/s / km^2$ (débit divisé par la superficie du bassin versant)
- Volume cumulé annuel : M.m³/an (million de m³ par an)
- Concentrations de MES et nutriments : mg/l
- Concentrations de pesticides : $\mu g/l$
- Flux massiques de MES et nutriments : tonne/an
- Flux massiques de pesticides : kg/an

1. Cadre de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) (2000/60/EC) a pour but d'établir une politique globale communautaire dans le domaine de l'eau. L'objectif général était d'atteindre le bon état écologique des masses d'eau en Europe d'ici 2015 sauf exemption motivée. Pour ce faire, une typologie au sein de chaque milieu a été mise en œuvre. La DCE définit les eaux de transition comme des « masses d'eaux de surface à proximité des embouchures de rivières, qui sont partiellement salines en raison de leur proximité d'eaux côtières, mais qui sont fondamentalement influencées par des courants d'eau douce ».

Au sens de la DCE, les lagunes méditerranéennes sont définies comme des « plans d'eau saumâtres, libres, permanents, de surface supérieure ou égale à 50 hectares ». Plus généralement, les lagunes sont des plans d'eau littoraux, souvent de faibles profondeurs et caractérisés par la présence d'une communication avec la mer plus ou moins permanente. Ces échanges leur confèrent un caractère saumâtre, allant des eaux nettement marines, voire sursalées, aux eaux plus douces sous l'influence d'apports continentaux.

Les lagunes sont des milieux de transition entre le continent et la mer. Les apports polluants provenant des bassins versants sont pour partie consommés par les organismes au sein de la lagune, stockés dans le sédiment, exportés vers la mer. Les charges importantes de polluants apportées lors des dernières décennies ont conduit ces milieux à se dégrader (phénomène d'eutrophisation). Dans un objectif de restauration des écosystèmes lagunaires, la connaissance des flux de nutriments et de substances arrivant aux lagunes est un enjeu prioritaire.

L'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a engagé une réflexion sur ce sujet depuis 2014 dont il découle les éléments suivants :

- Une étude menée par l'Agence (Le Fur, 2014) a établi un premier bilan des flux de nutriments via deux méthodes de calcul complémentaires (méthode des intervalles de débits et méthode des moyennes pondérées) et a défini un réseau de suivi optimisé des flux pour les milieux lagunaires. Les méthodologies proposées ne visent pas une caractérisation fine des flux polluants mais cherchent à les dimensionner correctement en complétant et optimisant les réseaux de suivis existants.
- Un réseau de suivi des flux de nutriments apportés par les tributaires aux lagunes a été mis en place depuis 2015. Il a porté sur 10 lagunes (12 masses d'eau) et visé le suivi de 18 cours d'eau tributaires à une fréquence bimensuelle à mensuelle. Pour plus de détails : https://www.eaurmc.fr/jcms/dma_40433/fr/connaissance-des-lagunes-bilan-et-strategie-dans-le-cadre-de-lamise-en-uvre-du-sdage-2016-2021
- Une première étude de prélèvements d'échantillons d'eau dans six (6) de ces tributaires de lagunes lors d'épisodes de crues a couvert la période septembre 2015 – août 2017. Les dates d'échantillonnage du suivi régulier renforcé et du suivi spécifique de l'étude 'crues' sont précisées aux Annexes 1 et 2.
- La fréquence de suivi des pesticides a été accrue à partir de 2016. Au total, 12 cours d'eau ont été suivis à une fréquence mensuelle (cours d'eau principaux), et 8 à une fréquence bimestrielle (cours d'eau secondaires). A partir de 2017, les 6 tributaires échantillonnés lors des épisodes de crues ont également été suivis à une fréquence bimensuelle (deux fois par mois).

- Une première interprétation a été réalisée sur les données issues du réseau de suivi des flux et des données issues des prélèvements par temps de crues durant les deux années de suivi 2015 et 2016.
- Une deuxième étude de prélèvements en période de crues a été menée sur trois (3) ans supplémentaires (2017-2020) de façon à disposer d'une chronique de cinq (5) ans au total.

A l'issue de cette acquisition renforcée de connaissances sur ces six (6) tributaires, une dernière étude a été lancée visant l'interprétation poussée des données acquises et la mise au point des méthodes d'extrapolation nécessaires pour l'estimation des flux polluants apportés aux lagunes. Ce rapport présente les résultats de cette étude.

1.2. Principes de calcul des flux de nutriments

1.2.1. Principales méthodes de calcul des flux de nutriments

Une vingtaine de méthodes de calcul des flux ont été recensées dans la littérature (Phillips et al. 1999). Les méthodes sont principalement (Birgand et al. 2009 ; 2010) :

- des méthodes basées sur les moyennes utilisant les données disponibles de concentrations et de débits mesurés ;
- des méthodes d'interpolation qui génèrent des données numériques de concentrations entre deux échantillons consécutifs ;
- des méthodes de régression qui recréent des données de concentrations à partir des corrélations entre concentrations et débits.

Les deux derniers types de méthodes nécessitent des jeux de données importants, suffisants pour réaliser les interpolations et régressions. Ces méthodes ont entre autres été testées dans le cadre de l'étude de BETURE-CEREC réalisée pour l'IFEN en 2001 (Application et comparaison de méthodes de calcul de flux des nutriments et matières en suspension aux exutoires des fleuves français dans le cadre des réponses à la commission OSPAR). Il est ressorti de cette application que les coefficients de régression obtenus sont plutôt faibles, ce qui remet en question la pertinence de ces méthodes pour des cours d'eau à forte variabilité de débits tels les cours d'eau méditerranéens.

Parmi les méthodes du premier type, on peut distinguer différentes approches de calcul des flux :

- produit de la moyenne des concentrations par la moyenne des débits échantillonnés (Preston et al. 1989) ;
- moyenne des flux instantanés (Preston et al. 1989), avec parfois la prise en compte des débits sans mesure des concentrations (Cooper, 2004) ;
- calcul avec hypothèse d'une moyenne constante autour de l'échantillon (Meybeck et al. 1994) ;
- produit du volume annuel écoulé par la moyenne arithmétique des concentrations (Shih et al. 1994) ;
- produit du volume annuel écoulé par la concentration moyenne pondérée par les débits échantillonnés (Littlewood, 1992), avec parfois utilisation d'un facteur de correction basé sur la covariance des données (Cohn, 1995). La méthode de Littlewood est également utilisée par Phillips et al. (1999) et Moatar et al. (2010).

Meybeck et al. (1994) ont discuté plusieurs de ces méthodes dans le cadre d'une étude inter-agences d'évaluation des flux polluants dans les rivières.

Dans le cadre d'une autre étude réalisée pour l'Agence de l'Eau RMC en 1997 (Évaluation des apports polluants des bassins-versants côtiers de la région PACA), CETIIS a appliqué plusieurs des méthodes décrites par Meybeck et al. (1994). L'étude de CETIIS ne conclut cependant pas favorablement sur l'utilisation de ces méthodes avec les données du RNB, sauf comme première approximation.

Dans le cadre d'une étude réalisée pour l'Agence de l'Eau RMC (Evaluation des flux d'apports polluants à la Méditerranée, hors Rhône), SIEE (2003) a aussi utilisé certaines des méthodes décrites par Meybeck et al. (1994) :

- moyennes pondérées (pour les flux dissous) ;
- intervalles de débits (pour les flux dissous ou particuliers ; affectation d'une concentration au débit) ;
- débits classés (pour les flux particuliers ; affectation d'un flux au débit).

SIEE a noté que pour la pollution dissoute, la méthode des intervalles de débit, qui conduit de façon générale à des valeurs plus fortes que celles des moyennes pondérées, permet de prendre mieux en compte l'hydrologie de chaque année en particulier et s'avère donc préférable à la méthode des moyennes pondérées. Pour les MES, la méthode des intervalles de débits est également apparue meilleure.

Birgand et al. (2009) ont montré quant à eux que la méthode de Littlewood (1992) utilisant le produit du volume annuel écoulé par la concentration moyenne pondérée par les débits échantillonnés donnait la meilleure estimation, et donc était à utiliser en priorité.

Birgand et al (2010) ont évalué l'incertitude introduite par un échantillonnage peu fréquent. Une de leur conclusion est que toutes les méthodes qui n'utilisent pas un enregistrement continu du débit ont donné de très mauvais résultats et ne sont donc pas recommandées. La méthode du rapport de concentration moyen pondéré en fonction du débit s'est avérée la plus performante. Leurs résultats suggèrent la réactivité hydrologique des bassins versants pourrait être un facteur clé dans la prévision des niveaux d'incertitude.

Différents projets de recherche français ont récemment porté sur l'amélioration des calculs de flux, la prise en compte des incertitudes ou l'optimisation des campagnes d'échantillonnage. On peut citer :

- le projet Variflux dans lequel une dizaine de méthodes ont été explorées, dont certaines étaient nouvelles (Moatar et al ; 2010) ;
- le projet de l'Université de Tours (avec l'appui de l'Agence Française de Biodiversité) (Minaudo et Moatar 2018).

1.2.2. Types de relation concentration – débit

Dans de nombreux cas, il a été constaté une relative corrélation entre les concentrations et les débits, que ce soit de façon globale (au travers de toute la chronique disponible), au sein d'une saison donnée (par exemple en conditions hivernales), ou au travers d'un évènement de crue.

L'ajustement de relations du type $C = a Q^b$ (où a et b des paramètres d'ajustement de la relation) a été tenté dans diverses études. Si $b < 0$, les flux croissent moins vite que les débits, ce qui correspond généralement à un phénomène de dilution de l'élément transporté avec le débit. Si $b > 0$, les flux croissent plus vite que les débits, ce qui indique une exacerbation du transport avec le débit, telle celle observée par exemple dans le cadre d'une érosion.

Le Tableau 1 résume les types de relations qui ont pu être observées entre la concentration et le débit. Si les données sont suffisantes, on peut étudier l'évolution de la concentration en fonction du débit

et le phénomène d'hystérésis généralement observé. Le graphique de la concentration en fonction du débit peut expliquer le fonctionnement du transport en relation avec l'hydrodynamique de l'écoulement et l'origine des apports. Ce type de courbe peut également renseigner sur l'évolution des concentrations pour les périodes de crue où les informations ne sont pas disponibles.

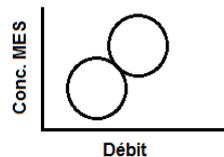
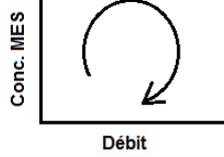
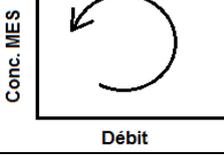
Type de relation	Forme de courbe	Interprétation
Relation bi-univoque rectiligne		Matériaux remobilisés, déjà érodés et désolidarisés des berges (Lenzi et Lorenzo, 2000)
Relation en huit		Dépend de la disponibilité en MES et des débits (William, 1989)
Horaire orthograde		Présence de matériaux mobilisable près de l'exutoire (Soler et al, 2006)
Anti-horaire rétrograde		Sources plus éloignées des matériaux (Garcia Ruiz et al, 2000)

Tableau 1 : Types de relation pouvant être observées entre la concentration et le débit

1.3. Présentation des six tributaires étudiés

Les six tributaires étudiés de la façade méditerranéenne sont d'Ouest en Est : la Berre, la Mosson, le Lez, le Salaison, le Vidourle et l'Arc (Tableau 2 et Figure 1)

Cours d'eau	Masse d'eau / Station	Localisation	Coordonnées (Lambert 93)	
			X	Y
La Berre	FRDR208 6175320	Portel-des-Corbières au pont du domaine de Lastours (11)	691 814	6 216 731
La Mosson	FRDR144 6189675	Lattes, Maurin (34)	769 537	6 272 155
Le Lez	FRDR142 6189500	Lattes 2, Pont Méjean (34)	772 548	6 275 019
Le Salaison	FRDR141 6300400	Mauguio 2, 150 m en aval du pont de la D172 (pont des Aiguerelles) (34)	781 066	6 279 305
Le Vidourle	FRDR134b 6192000	St Laurent d'Aigouze, pont D34 (34)	796 112	6 282 956
L'Arc	FRDR129 6195500	Berre – l'Etang. Pont de Mauran (13)	872 484	6 269 636

Tableau 2 : Tributaires et stations de suivi de la qualité



Figure 1 : Localisation des stations hydrométriques et qualité

Les six cours d'eau ont des régimes hydrologiques très différents et sont influencés par des conditions météorologiques très contrastées. C'est en particulier le cas des quatre cours d'eau de la région de Montpellier – Lunel qui sont fortement soumis aux événements méditerranéens (cévenols).

1.3.1. La Berre

La Berre prend source à l'est du Massif des Corbières au nord du col de Mairolles (434 m), sur la commune de Quintillan, à 430 m d'altitude. Sa longueur est de 52,7 km. Ce cours d'eau traverse les Corbières dans le sens SO-NE avant de se jeter dans l'étang de Bages-Sigean, sur la commune de Port-la-Nouvelle.

Son bassin versant (225 km²) est soumis à un climat méditerranéen. Il s'inscrit essentiellement dans des terrains primaires et secondaires. Les pentes moyennes passent progressivement de 1,8 % dans le bassin amont à 0,26 % à Portel-des-Corbières. Ce cours d'eau se caractérise par un développement ponctuel et relativement limité de sa plaine alluviale fonctionnelle le long de la quasi-totalité de son parcours. Ce n'est en effet qu'à partir de Portel-des-Corbières, à proximité du niveau de base, que cette plaine se développe de façon continue.

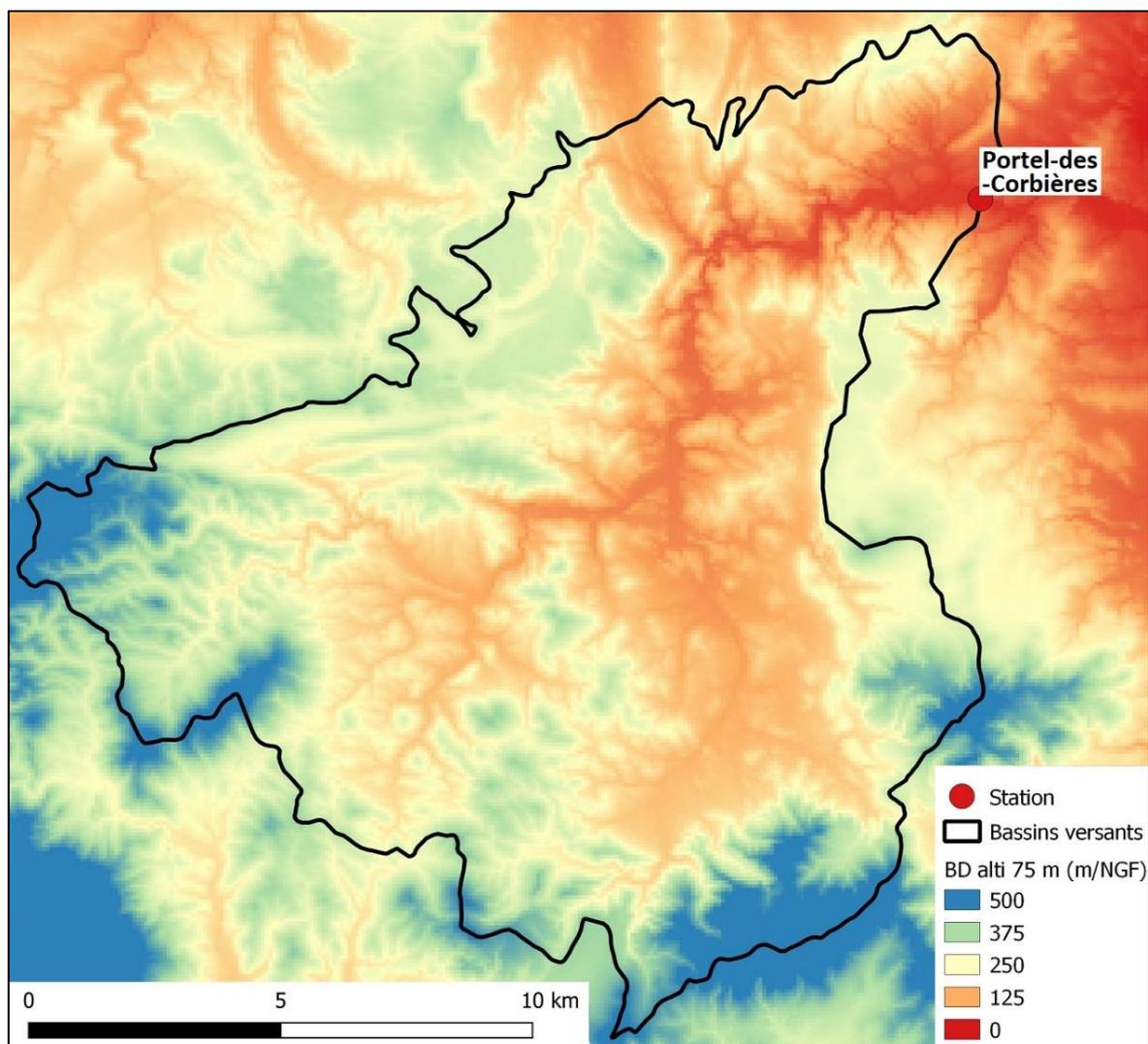


Figure 2 : Répartition des altitudes sur le bassin versant de la Berre

1.3.2. La Mosson

La Mosson, longue de 39,3 km, est un cours d'eau héraultais prenant sa source dans la garrigue sur la commune de Montarnaud. Il longe la limite occidentale de la ville de Montpellier pour se déverser dans le Lez et dans l'étang de l'Arnel. La Mosson appartient au bassin côtier d'une superficie totale de 653 km², composé du sous-bassin de la Mosson (70 % de la superficie) et de celui du Lez (30 %).

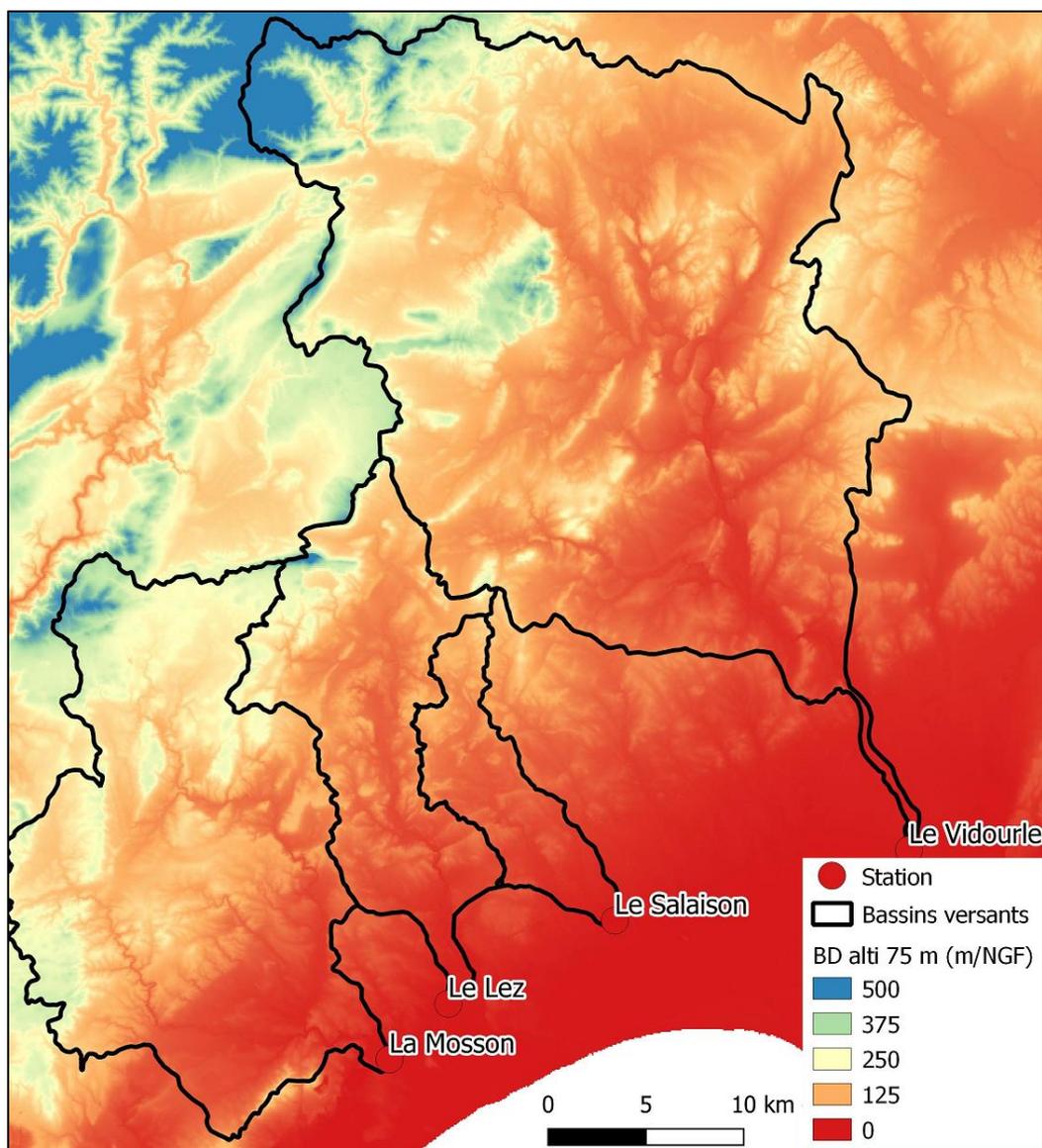


Figure 3 : Répartition des altitudes sur les bassins de la Mosson, du Lez, du Salaison et du Vidourle

La Mosson utilise les bassins éocènes jusqu'à la commune de Grabels puis s'engage dans une percée épigénique entre Grabels et la Paillade. Le bassin de la commune de Grabels est une cuvette presque fermée (hémicycle) résultant de l'érosion différentielle entre les calcaires blancs environnants et un laccolithe basaltique central (intrusion de roches magmatiques).

Le bassin est caractérisé par des épisodes climatiques extrêmes et difficiles à anticiper. La Mosson est en amont une rivière intermittente. Son écoulement ne devient pérenne qu'à partir de Grabels grâce à des sources telles que L'Avy, Fontcaude et Martinet dans la commune de Juvignac. La vallée de la Mosson de Grabels à Saint-Jean-de-Védas longe des environnements urbanisés dans un contexte de milieux préservés avec des espaces boisés et des prairies, dans une continuité de ripisylve dense.

1.3.3. Le Lez

Le Lez est un fleuve côtier héraultais de 29,6 km de longueur, prenant sa source à Saint-Clément-de-Rivière. La Source du Lez est la résurgence du vaste ensemble karstique sous-jacent aux garrigues nord montpelliéraines. Cette source est captée et alimente la ville de Montpellier en eau potable.

Dans sa partie amont, il s'écoule vers le sud dans une étroite plaine entre Saint-Clément-de-Rivière et Montferrier-sur-Lez et Clapiers. Il passe entre les reliefs montpelliérains du bois de Montmaur et Castelnau-le-Lez au fond d'une gorge, traverse ensuite la ville de Montpellier et rejoint la plaine littorale et Lattes. Le Lez traverse ensuite les étangs palavasiens par un canal naturel formé entre l'étang d'Arnel et l'étang de Méjean et rejoint la mer Méditerranée à Palavas-les-Flots.

Son bassin versant est constitué à 36,8 % de forêts et milieux semi-naturels, à 28,9 % de territoires artificialisés, à 28,0 % de territoires agricoles, à 4,5 % de surfaces en eau, à 1,9 % de zones humides.

Le Lez connaît le même régime que les cours d'eau du Languedoc : généralement calme, il est susceptible de fortes et rapides crues lors d'épisodes cévenols. Le Lez reçoit en soutien d'étiage les eaux du Rhône fournies par la compagnie du Bas-Rhône Languedoc à un débit de 160 l/s. Cette eau est fournie au Lez en amont de Montpellier, lorsqu'il passe entre les reliefs de Montpellier et de Castelnau-le-Lez.

1.3.4. Le Salaison

Le Salaison est un cours d'eau côtier héraultais, alimentant l'étang de l'Or à l'Est de Montpellier. Long de 24,9 km, il prend sa source sur la commune de Guzargues, dans les calcaires de Montaud, et rejoint l'étang de l'Or par un delta artificiel constitué de deux bras au lieu-dit des Cabanes du Salaison. Le Salaison est un affluent important pour l'étang de l'Or dont il représente 16% des apports d'eau douce. Son bassin versant d'une superficie de 67 km² s'intègre dans celui de l'étang de l'Or (410 km²).

Le Salaison parcourt la garrigue et les vignes, principalement alimenté par les eaux de ruissellement pluvial pour atteindre la plaine agricole où sont implantés les vergers et le maraîchage. Quelques sources disséminées comme celle des Deux Platanes au Crès l'alimentent sur son trajet. Le bassin versant du Salaison conserve une vocation agricole dominante, cependant, du fait de sa proximité avec la commune de Montpellier, il est le plus urbanisé des sous bassins versant de l'étang de l'Or. Il conserve également un aspect relativement naturel en amont.

1.3.5. Le Vidourle

Le Vidourle est un fleuve côtier méditerranéen traversant les départements du Gard et de l'Hérault. Il prend sa source à St-Roman-de-Codières (au Sud-Est du massif de l'Aigoual), en bordure des Cévennes et débouche en mer au Grau-du-Roi.

Le bassin versant du Vidourle (798 km²) s'organise d'amont en aval en quatre secteurs (Ginger, 2012) :

- Haut Vidourle : La partie amont du bassin, aux reliefs escarpés, s'étend de la source du Vidourle située au pied du Liron (massif granitique des Cévennes) jusqu'à St Hippolyte du Fort. Dans ce secteur montagneux, aux altitudes supérieures à 500 m et aux pentes fortes, le Vidourle se présente comme un cours d'eau torrentiel, à forte pente. Les massifs sont essentiellement cristallins et imperméables sur une petite partie du bassin supérieur, puis calcaires jurassiques. Ces derniers présentent une perméabilité importante du fait d'une intense fracturation qui a permis le développement d'un système karstique.
- Plateaux sous-cévenniques : Dans ce secteur essentiellement calcaire et karstique, le Vidourle et ses affluents perdent une grande partie de leur débit en faveur d'écoulements souterrains, ce qui provoque des assecs quasi-permanents. Les cours d'eau ont creusé des gorges extrêmement étroites et sinueuses dans les calcaires, interrompues localement par

de petits bassins plus larges, creusés à la faveur d'affleurements de calcaires argilo-marneux plus sensibles à l'érosion.

- Moyen Vidourle : Dans ce secteur, le cours d'eau traverse une région plissée formée de collines ou monts allongés et orientés NNE-SSW, d'altitude moyenne, et drainée par des cours d'eau à faible pente capables cependant de crues importantes en raison de la violence des averses et de l'imperméabilité des sols. A partir de Lecques, la lithologie se modifie avec l'apparition des terrains d'âge oligocène (conglomérats, marnes gréseuses) et le relief s'adoucit.
- Bas Vidourle : La partie basse du Vidourle commence à l'aval de Gallargues, où après avoir franchi les derniers contreforts rocheux constitués par les collines calcaro-marneuses du Pioch des Garrigues et de l'oppidum d'Ambrussum, le cours d'eau débouche dans une plaine littorale qui se développe entre l'A9 et la mer. Le Vidourle est aujourd'hui endigué depuis l'autoroute A9 jusqu'à son embouchure et surmonte sa plaine d'environ 2 m.

Le secteur amont est couvert en alternance d'une végétation de garrigue basse à chênes kermès et de pinèdes de pins d'Alep. La viticulture est l'activité principale de la plaine. Les autres productions agricoles sont essentiellement céréalières aménagées préférentiellement en bordure du Vidourle.

1.3.6. L'Arc

L'Arc prend sa source entre Saint-Maximin-la-Sainte-Baume et Pourcieux (Var) à 493 m d'altitude, au pied du mont Aurélien (879 m) et se jette dans l'étang de Berre (Bouches-du-Rhône) par un petit delta. Sa longueur est de 85 km pour une pente moyenne inférieure à 1 %. Il occupe une dépression orientée Est-Ouest.

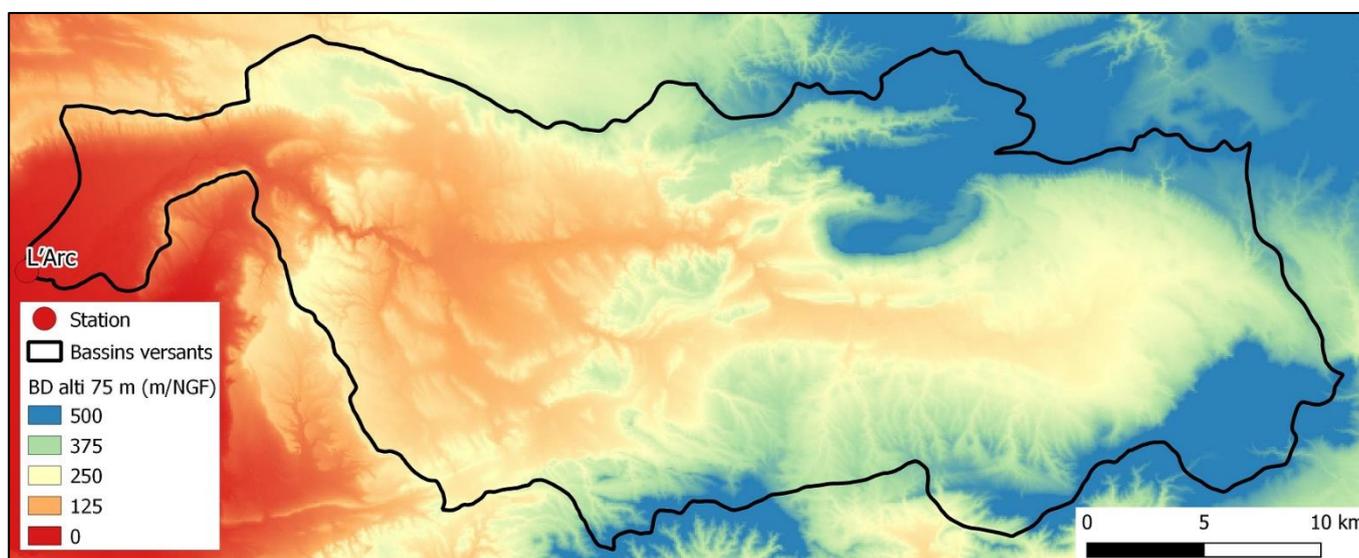


Figure 4 : Répartition des altitudes sur le bassin versant de l'Arc

Son bassin versant (728 km²) correspond à une région de collines, modelée dans un substrat sédimentaire (calcaires, marnes et argiles) et soumise à un climat de type méditerranéen. Du point de vue géologique, le bassin versant s'inscrit dans le vaste synclinal d'Aix-en-Provence, dont le cœur est façonné dans les argiles et les marnes du Crétacé supérieur, de l'Éocène et de l'Oligocène, alors que les principaux reliefs (massifs de la Sainte-Victoire et de l'Aurélien) sont formés de calcaires du Jurassique. Dans ce secteur, les reliefs ont des pentes fortes comprises entre 10 et 15°, pouvant aller jusqu'à 25 à 30°. La pente moyenne est de 5,5%.

L'urbanisation est peu développée (10 % de la superficie totale), mais la densité de population atteint 350 hab./km². Les reliefs sont couverts de pinèdes et de garrigues. La plaine alluviale, dont les pentes sont très faibles (0,2 à 3°) et les sols plus profonds, porte la plupart des terres agricoles (céréales, vignes et vergers).

1.3.7. Comparaison des six bassins versants étudiés

Le Tableau 3 et la Figure 5 synthétise les principales caractéristiques géographiques des six bassins versants des tributaires étudiés. La Berre présente un rapport Pente / Superficie bien plus élevé que les autres bassins versants.

Tributaire	Superficie (km ²)	Pente moyenne des versants (%)
Berre	207.3	19.9
Mosson	359.5	8.6
Lez	165.5	9.1
Salaison	63.8	4.5
Vidourle	775.3	10.1
Arc	711.1	11.1

Tableau 3 : Caractéristiques géographiques des six bassins versants étudiés

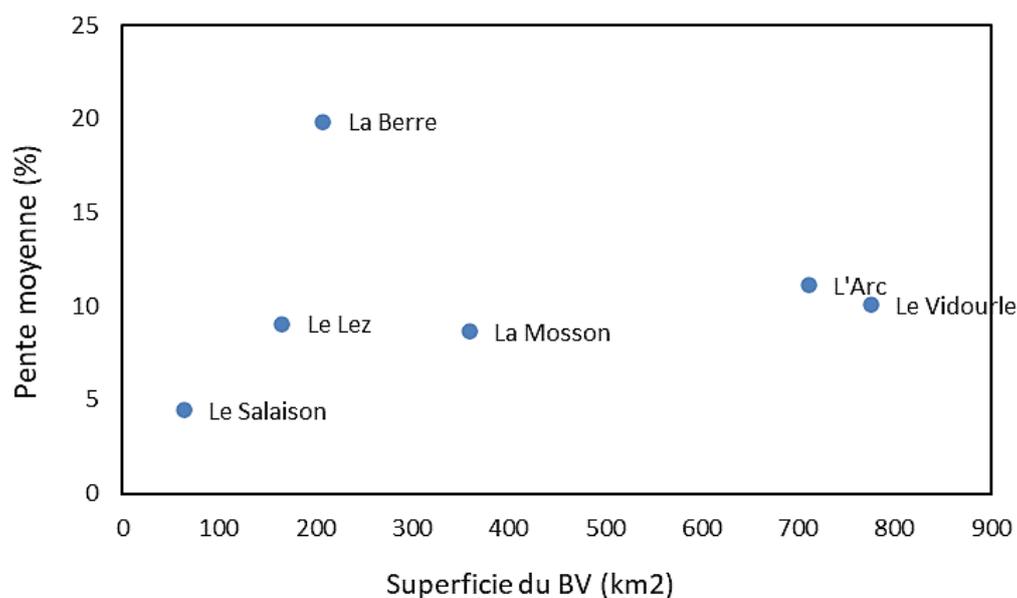


Figure 5 : Caractéristiques géographiques des six bassins versants étudiés

Le Tableau 4 et les Figure 6 et Figure 7 résument l'occupation des sols des six bassins versants. On note la grande variabilité de ces indicateurs sur les six bassins versants.

Tributaire	Agricole (%)	Urbain + activités (%)	Population totale (x1000)	STEP
Berre	29.2	0.5	2.4	9
Mosson	33.4	19.8	84.8	18
Lez	26.3	32.5	338.9	7
Salaison	27.8	12.6	32.4	1
Vidourle	48.7	29.5	54.9	65
Arc	44.3	3.8	286.3	25

Tableau 4 : Occupation des sols sur les six bassins versants étudiés

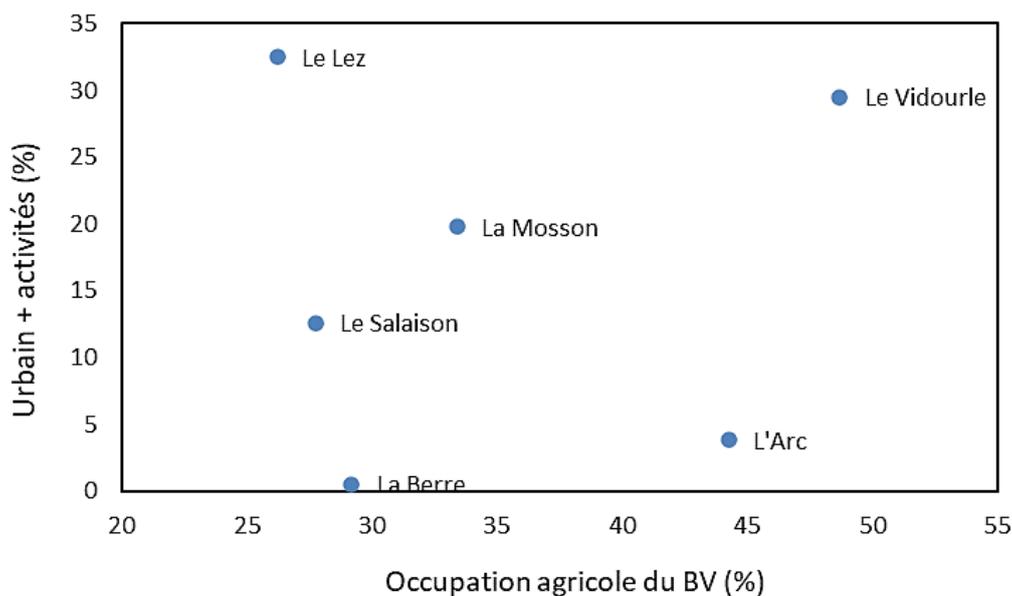


Figure 6 : Occupation des sols sur les six bassins versants étudiés

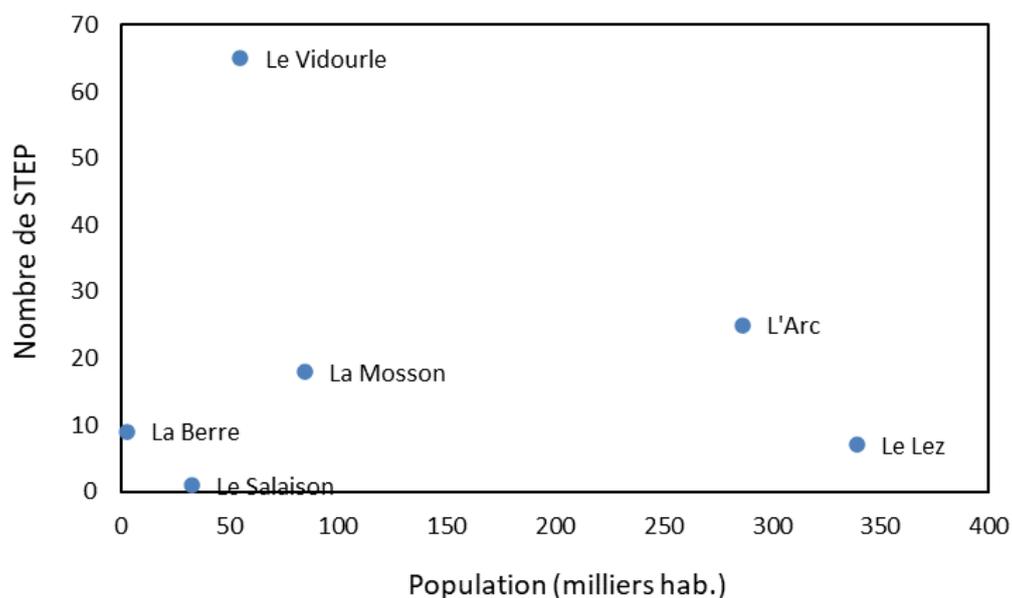


Figure 7 : Population et nombre de station d'épuration des six bassins versants étudiés

→ Les six bassins versants étudiés présentent des caractéristiques suffisamment différentes et contrastées pour être jugés représentatifs de la diversité des bassins versants de la bordure méditerranéenne (continentale) française.

- La Berre présente un bassin versant moyennement étendu, possédant une forte pente moyenne, une très faible population, et une occupation agricole modérée.
- La Mosson présente un bassin versant étendu, de pente moyenne assez faible, avec une occupation urbaine assez importante, une population modérée et une occupation agricole également modérée.
- Le Lez présente un bassin versant moyennement étendu, de pente moyenne assez faible, avec une occupation urbaine très importante, une très forte population et une occupation agricole modérée.
- Le Salaison présente un bassin versant de faible étendu et très faible pente, avec une occupation urbaine intermédiaire, une population très importante en regard de sa taille et une occupation agricole modérée.
- Le Vidourle présente un très grand bassin versant, de pente moyenne modérée, avec une population faible et une occupation agricole importante, occupant tout la moitié aval du bassin versant.
- L'Arc présente un très grand bassin versant, très allongé, de pente moyenne modérée, avec une occupation urbaine faible mais très concentrée dans sa partie aval, une population faible en regard de sa taille et une occupation agricole importante, occupant tout l'axe central moitié du bassin versant.

2. Analyse préalable des données de débits

Les six tributaires étudiés ont été sélectionnés par l'Agence de l'Eau car ils disposent entre autres des stations hydrométriques permettant de connaître les débits requis pour le calcul des flux de polluants. Une réflexion sur la qualité intrinsèque de ces valeurs de débits a été menée, puisque le calcul des flux de polluants aux lagunes en dépend directement. Afin de mettre en œuvre une méthode de calcul des flux, il est en effet nécessaire de disposer de données fiables de débits et de données de concentrations représentatives des différentes conditions hydrologiques. Les stations hydrométriques disponibles et actuellement actives sur ces six bassins versants sont indiquées au Tableau 5.

Station	Nom	X	Y	Surface BV	Débits
La Berre					
Y0824001	Durban-Corbières	639080	1777020	76 km ²	2009 - 2021
Y0824010	Villesèque-des-Corbières	640706	1781850	166 km ²	1970 - 2021
Y0824030	Portel-des-Corbières	647915	1783273	225 km ²	2009 - 2021
La Mosson					
Y3142010	Saint-Jean-de-Védas	720118	1840044	306 km ²	1981 - 2021
Le Lez					
Y3204020	Saint-Clément-de-Rivière	721884	1858386	0 km ²	1987 - 2021
Y3205010	Triadou	723506	1859760	84.2 km ²	2008 - 2021
Y3204010	Montferrier-sur-Lez	723911	1851214	115 km ²	1975 - 2021
Y3204030	Montpellier Garigliano	726099	1847555	150 km ²	1998 - 2021
Y3204040	Lattes 3ème écluse	726080	1841310	170 km ²	2008 - 2021
Le Salaison					
Y3315080	Mauguio	734199	1846657	50.8 km ²	1986 - 2021
Le Vidourle					
Y3414005	Quissac	733757	1879756	241 km ²	2002 - 2021
Y3444020	Vic-le-Fesq	737905	1875950	500 km ²	1987 - 2021
Y3454010	Sommières	741276	1866108	650 km ²	1984 - 2021
Y3454005	Gallargues-le-Montueux	746434	1859631	770 km ²	2009 - 2021
Y3464010	Marsillargues	748955	1853525	798 km ²	1969 - 2019
L'Arc					
Y4022010	Meyreuil	857353	1838411	303 km ²	1972 - 2021
Y4122040	Aix-en-Provence	841002	1839489	650 km ²	1996 - 2021
Y4122020	Berre-l'Étang	828027	1837196	728 km ²	1971 - 2021

Tableau 5 : Stations hydrométriques actives des six bassins versants étudiés

Les données hydrométriques ont été vérifiées quant à un possible effet des marées sur les niveaux d'eau mesurés et conséquemment sur les débits qui en sont déduits. Les données n'ont pas montré d'effet notable des marées. Les forts débits peuvent cependant toujours être entachés d'incertitude, étant souvent situés en dehors de la courbe de tarage de la station.

2.1. Evolution des débits des bassins versants étudiés

Les débits horaires de toutes ces stations ont été récupérés, exprimés en débit spécifique, cumulés et mis en graphiques. Les débits spécifiques sont obtenus en divisant le débit (m^3/s) par la superficie (km^2) du bassin versant en amont de la station. L'utilisation des débits spécifiques ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) plutôt que des débits (m^3/s) permet de comparer les données acquises sur les différentes stations d'un bassin versant ou de plusieurs bassins versants. Les figures suivantes comparent pour chaque bassin les débits spécifiques cumulés ainsi obtenus sur la période d'août 2010 à août 2020, soit 10 années hydrologiques.

Nous privilégions dans ce rapport la représentation des débits en courbe cumulée car celle-ci est plus lisible, permet de s'affranchir des décalages temporels liés à l'inertie des bassins versants, permet une comparaison directe entre bassins versants et illustre bien l'effet des années sèches et des années humides.

Les courbes cumulées des débits sont élaborées en convertissant en m^3/j les données de débits initialement exprimées en m^3/s puis en les cumulant journée par journée. Les courbes cumulées des débits spécifiques sont élaborées de la même façon mais en divisant les débits par les surfaces respectives des bassins versants au droit des stations hydrométriques de suivi du débit.

- **Berre**

Sur la Berre, la station de Durban diffère très fortement des deux autres (Figure 8) et ne semble pas fonctionner correctement. Certains années (2010-2011 ; 2014-2016) montrent en effet des courbes croissant de façon très importante. Les deux autres stations sont assez semblables en termes de cumul, même si la station de Portel-des-Corbières présente un cumul plus faible d'un quart environ. La différence entre les deux stations varie fortement d'une année sur l'autre (Figure 9).

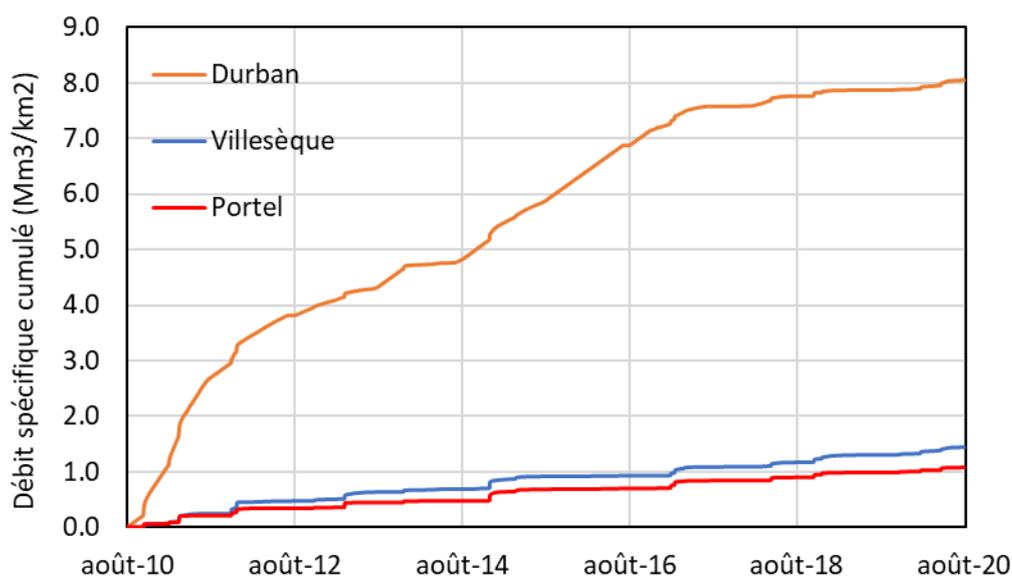


Figure 8 : Débits spécifiques cumulés de la Berre

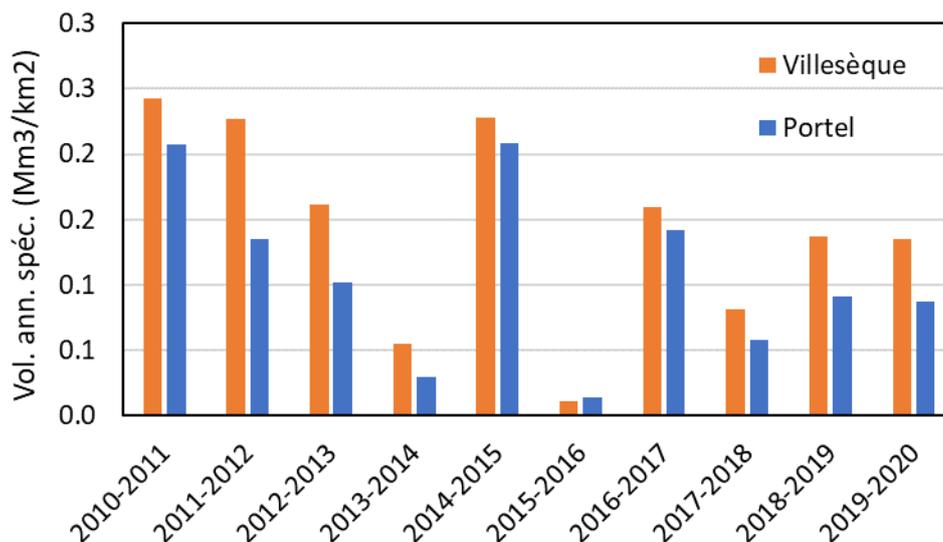


Figure 9 : Volumes spécifiques annuels de la Berre

La comparaison des volumes cumulés (M.m³/s) montre que l'écoulement enregistré est à peu près le même à Portel-des-Corbières qu'à Villesèque, malgré un bassin versant 35% plus étendu. Les débits mesurés à Portel-des-Corbières semblent donc sous-estimés ou partiels.

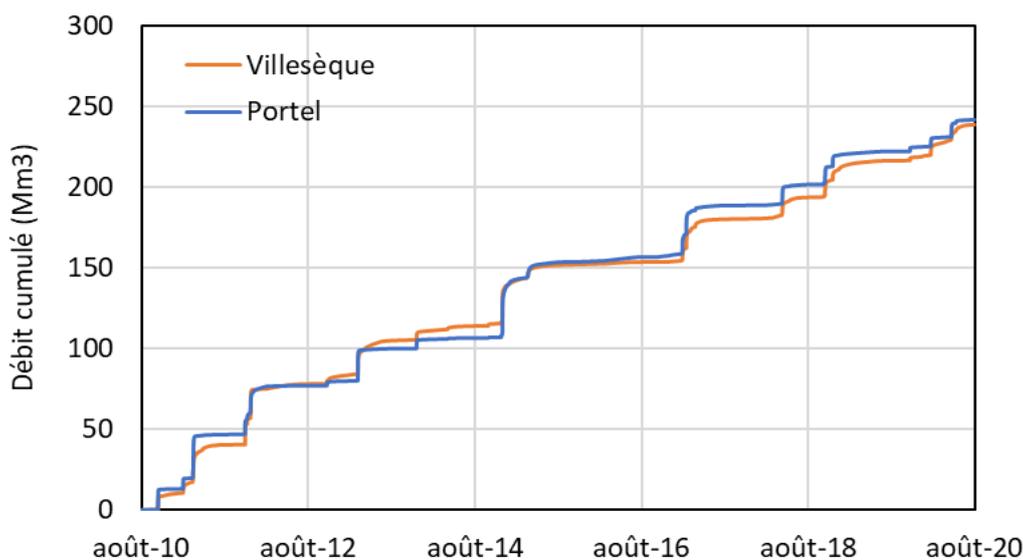


Figure 10 : Débits cumulés de la Berre

La sous-estimation des débits passants pourrait provenir du site d'implantation de la station (Figure 11). Le fond du lit de la Berre au droit de la station est en effet constitué d'une épaisse formation de galets, au sein desquels un écoulement hyporhéique important peut vraisemblablement prendre place.

Il n'est pas non plus exclu que des pertes karstiques puissent avoir lieu entre Villesèque et Portel, même si cela n'a jamais été noté. De très nombreuses résurgences karstiques existent en effet en contrebas (extérieur) de ce bassin versant.

Le débit de la Berre mesuré à Portel des Corbières semble ainsi exclure environ un tiers du débit d'écoulement total du bassin versant.



Figure 11 : Vue aérienne du site d'implantation de la station de Portel-des-Corbières

- **Tributaires de la région montpelliéraine : Mosson, Lez et Salaison**

Les débits spécifiques cumulés du Lez (Figure 12) sont de façon globale assez semblables entre eux, mais diffèrent beaucoup d'une année sur l'autre (Figure 13), de façon variable selon les années (les volumes annuels les plus importants ne sont pas toujours observés sur les mêmes stations).

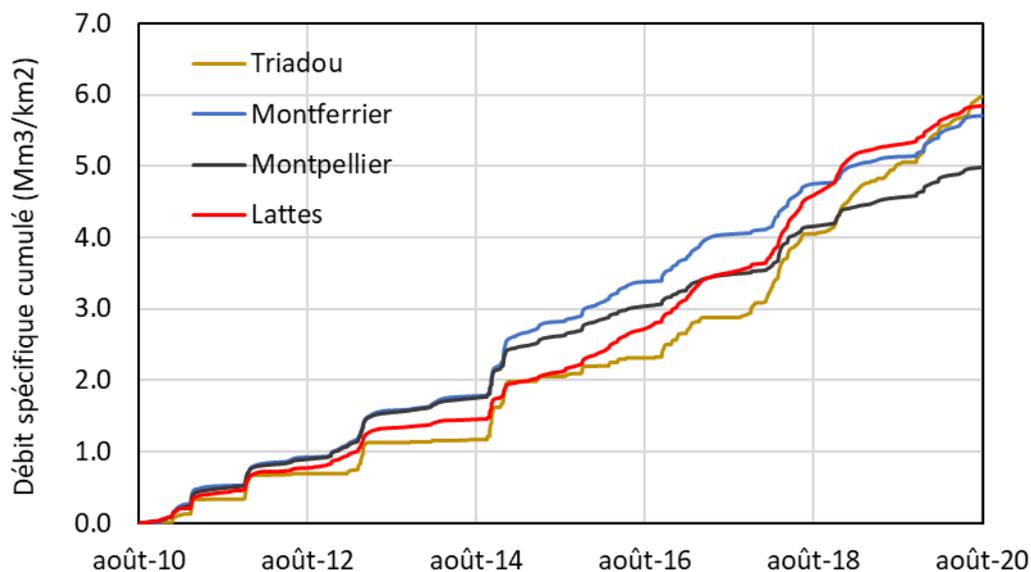


Figure 12 : Débits spécifiques cumulés du Lez et de son affluent amont le Lirou (au Tiradou)

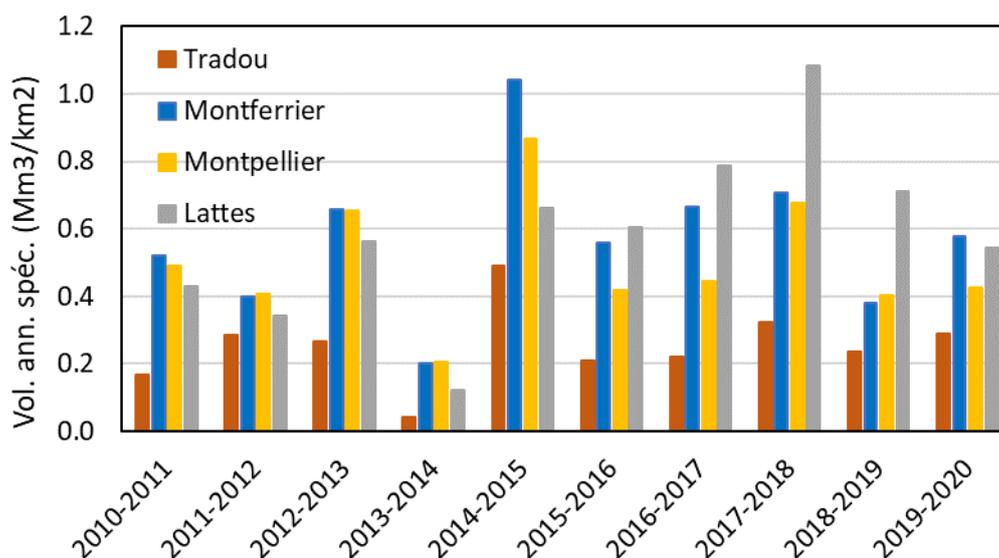


Figure 13 : Volumes spécifiques annuels du Lez et de son affluent amont le Lirou (au Tiradou)

Si on compare les deux stations aval (Montpellier-Garigliano et Lattes), on remarque que le débit spécifique cumulé à Lattes est environ 20% plus élevé que celui à Montpellier. Ceci ne peut être expliqué par les apports au Lez des eaux du Rhône (en soutien d'étiage) via le canal BRL puisque ceux-ci ne représentent que quelques Mm^3/an , alors que la différence de volumes cumulés entre les deux stations est de l'ordre de $67 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Cette différence semble cependant pouvoir être expliquée par le ruissellement beaucoup plus important prenant place en milieu urbain. L'application d'un coefficient de ruissellement de 100% à la pluie tombant sur les 20 km^2 de bassin additionnel séparant les deux stations permet de générer la différence de volume cumulé observée.

A titre d'illustration, la Figure 14 compare les débits spécifiques cumulés du Lez, de la Mosson et du Salaison.

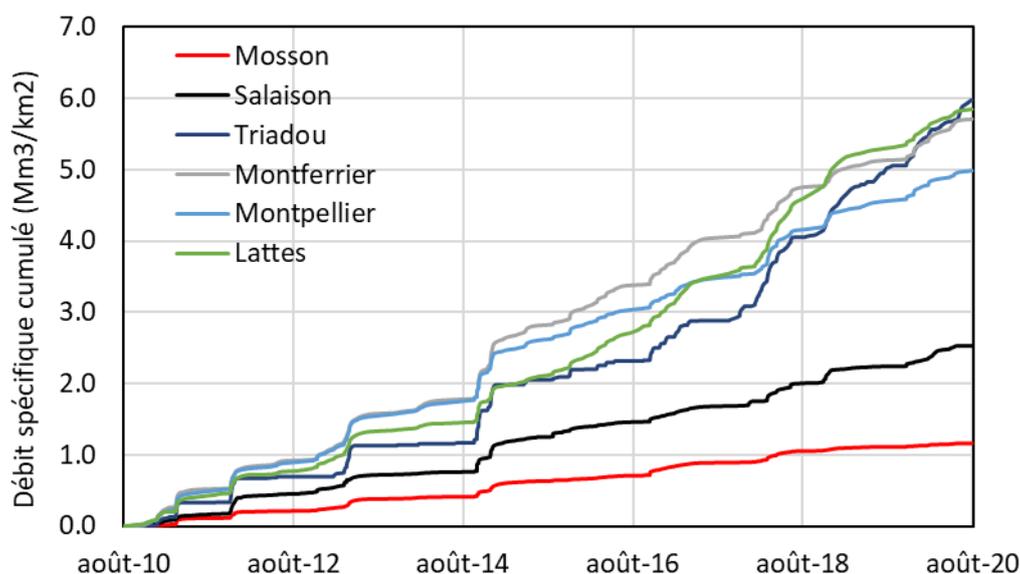


Figure 14 : Comparaison des débits spécifiques cumulés du Lez (et son affluent amont le Lirou au Tiradou), de la Mosson et du Salaison

Comme ces trois bassins versants sont limitrophes, de tailles limitées et statistiquement soumis aux mêmes apports pluviométriques, on s'attendrait à ce que les débits spécifiques (reliés directement et principalement à la pluie) soient identiques d'un BV à l'autre et d'une station à l'autre.

On remarque cependant que les débits spécifiques cumulés du Salaison et de la Mosson sont bien plus faibles que ceux du Lez. Les débits spécifiques du Salaison sont plus de deux fois plus faibles que ceux du Lez, et près de 6 fois plus faibles pour la Mosson. Dans le cas du Salaison, ceci peut être dû pour partie aux nombreux prélèvements sur les nappes qui prennent place dans le bassin versant. Pour la Mosson cependant, les prélèvements ne sont pas très importants et ne peuvent donc expliquer ce déficit hydrique. Il est cependant reconnu que des pertes karstiques prennent place dans ce bassin versant et que de nombreuses exurgences karstiques existent en contrebas à l'extérieur) de ce bassin versant, dans et autour de l'étang de Thau.

- **Vidourle**

La Figure 15 présente les débits spécifiques cumulés du Vidourle. Cette figure confirme les problèmes de la station de Marsillargues initialement prévue pour le calcul des flux. Les quatre autres stations présentent des débits spécifiques cumulés très proches, diminuant légèrement d'amont en aval. Cette diminution peut être attribuée à la diminution de la pluie depuis les Cévennes vers la plaine littorale et à une utilisation croissante des nappes d'amont en aval. Le même constant « amont-aval » est également observé de façon globale année par année (Figure 16).

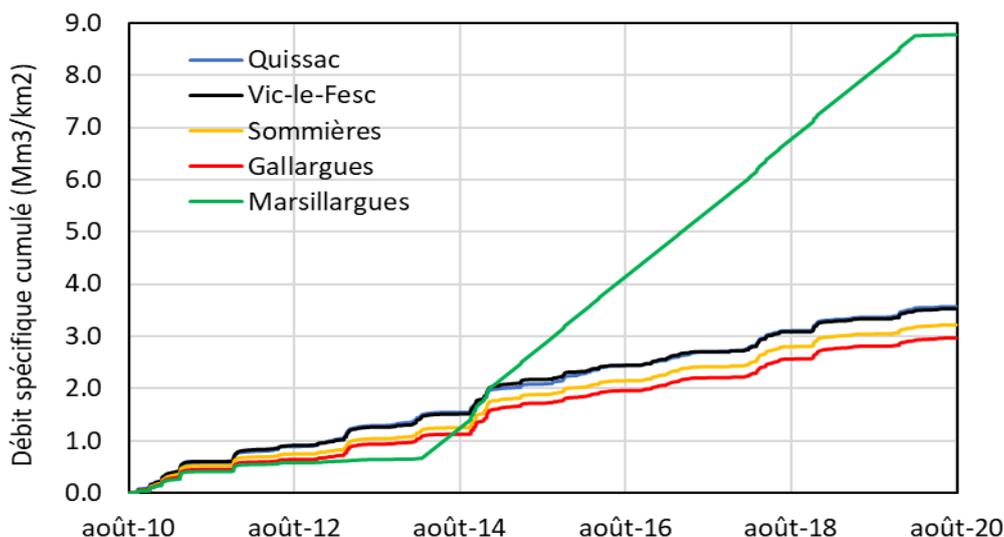


Figure 15 : Débits spécifiques cumulés du Vidourle

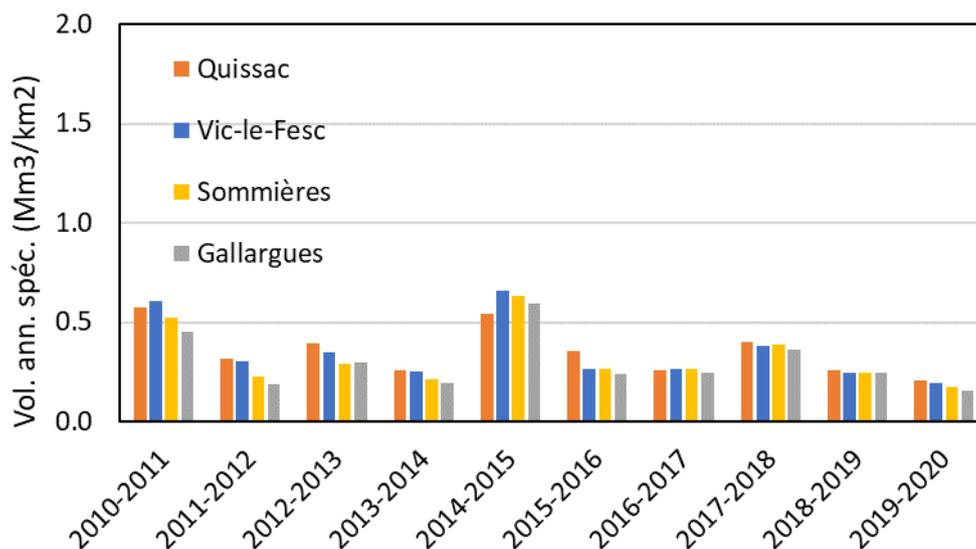


Figure 16 : Volumes spécifiques annuels du Vidourle

- **Arc**

La Figure 17 présente les courbes cumulées pour l’Arc et la Figure 18 les volumes annuels correspondants. Les courbes ne sont pas tout à fait semblables et ne montrent pas la même organisation amont-aval que pour le Vidourle. Les cumuls annuels montrent des différences importantes d’une station à l’autre, dans un ordre variant selon les années. Cette variabilité semble être imputable à la grande extension longitudinale du bassin-versant (Figure 4), sur lequel les pluies peuvent donc être très hétérogènes (en particulier quant à la localisation et l’importance des événements méditerranéens).

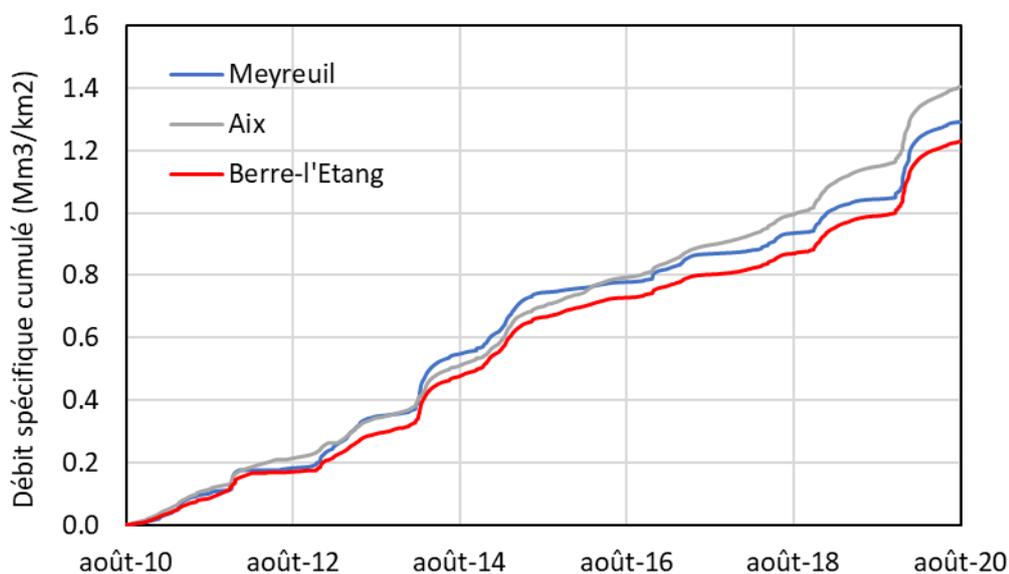


Figure 17 : Débits spécifiques cumulés de l’Arc

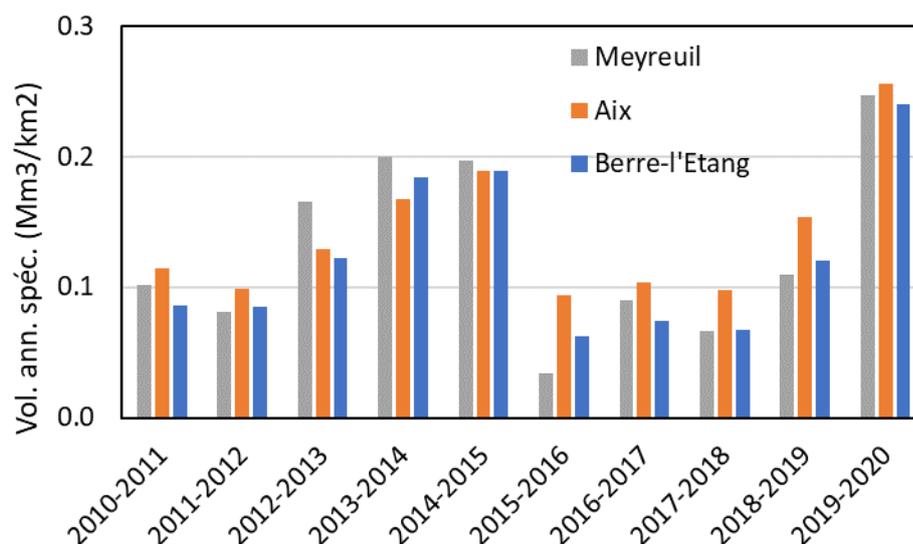


Figure 18 : Volumes spécifiques annuels de l'Arc

2.2. Comparaison des débits aux pluies efficaces

Les débits spécifiques cumulés (résultats discutés à la section précédente) ont été comparés aux volumes d'eau résultant des pluies survenant sur les bassins versants étudiés. Une partie des pluies retourne cependant vers l'atmosphère du fait de l'évapotranspiration et doit donc être prise en compte dans le calcul des volumes d'eau générant potentiellement des écoulements superficiels ou souterrains.

- Evapotranspiration : retour d'eau vers l'atmosphère due à de l'évaporation de l'eau du sol et à la transpiration des plantes ;

De même, les prélèvements induisant des exportations d'eau à l'extérieur du bassin versant (y compris vers l'atmosphère dans le cas de l'irrigation) devront être pris en compte.

Les précipitations efficaces ont d'abord été calculées, à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Précipitation efficace} = \text{Précipitation} - \text{Evapotranspiration} - \text{Variation de la Réserve Utile}$$

- Précipitations efficaces : part de la pluie disponible pour le ruissellement (écoulement sur le bassin versant) et la recharge des nappes ;
- Réserve utile du sol : quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et restituer aux racines pour la vie végétale.

Pour ce faire, les valeurs décennales de pluies des stations Météo-France présentes sur les bassins versants ont été acquises sur la même période de septembre 2010 à août 2020. Les stations dont les données étaient disponibles sur cette période sont les suivantes :

- Durban et Portel-des-Corbières pour la Berre ;
- Montarnaud et Fabrègues pour la Mosson ;
- Prades-le-Lez pour le Lez et le Salaison ;
- Saint-Hippolyte-de-Fort, Saint-Nazaire - Canaules, et Villevieille pour le Vidourle ;
- Aix-en-Provence pour l'Arc.

Les données décennales d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont également été acquises.

Les valeurs de réserve utile du sol (RU) utilisées pour le calcul proviennent de la base de données régionale BDSol L-R pour les cinq tributaires de la région Occitanie. Ces données ont une résolution spatiale bien plus fine que celles de la base de données GISSOL, utilisées quant à elle pour l'Arc en l'absence de données plus précises.

Pour le calcul des précipitations efficaces, il est nécessaire de disposer des données requises à un pas de temps donné. Nous avons opté pour un pas de temps décadaire (10 jours) compatible avec les durées moyennes des périodes de pluie, le transfert de l'eau au travers du sol, la persistance des flaques en surface et la résistance des plantes au manque d'eau. Un pas de temps plus grand (mensuel par exemple) lisse trop les événements de pluie et de sécheresse (et minimise la recharge) alors qu'un pas de temps plus court (journalier par exemple) limite l'évapotranspiration et surestime généralement la recharge.

Durant un événement de pluie, la quantité d'eau qui peut entrer dans le sol est fonction de l'espace disponible qui s'y trouve, c'est-à-dire de la différence entre la porosité totale du sol et le contenu en eau déjà présent dans le sol. L'eau qui ne peut entrer dans le sol est disponible pour le ruissellement. Dans cette approche de calcul hydro-pédologique, le ruissellement hortonien (prenant place à la surface du sol) est alors calculé comme l'eau qui ne peut s'infiltrer dans le sol et non à partir d'un coefficient de ruissellement arbitraire.

- **Berre**

Sur la Berre (Figure 19), les volumes cumulés des débits mesurés sont inférieurs (moitié moindres) que les volumes de pluie efficace issus de la station de Durban ou de celle de Portel. Notons qu'il y a très peu de prélèvements (à tout le moins déclarés) ; les prélèvements ne peuvent donc être évoqués pour expliquer cette différence.

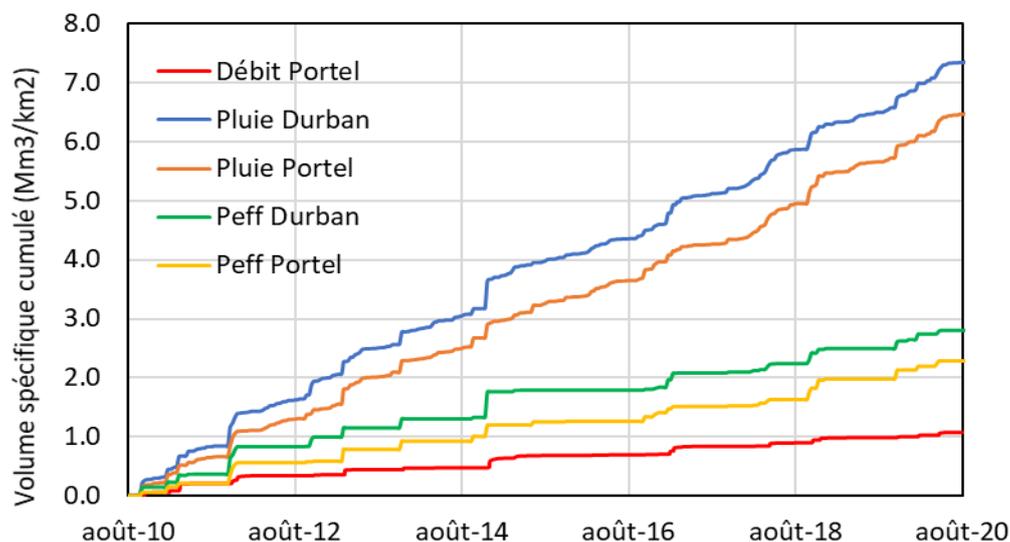


Figure 19 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits de la Berre

La différence entre les cumuls des débits observés et les précipitations efficaces peut avoir plusieurs origines :

- les pluies mesurées à Durban et Portel ne sont pas représentatives de l'intégralité du bassin versant (malgré la petite taille de ce dernier) ;
- la prise en compte de l'évapotranspiration est sous-estimée dans le calcul ;
- une part importante de l'écoulement prend place dans les nappes (écoulements souterrains) ou dans les alluvions constituant le fond de la station hydrométrique ;

- la courbe de tarage de la station est erronée ;
- des pertes importantes, de type karstique, ont dans ce bassin versant et exportent l'eau vers l'extérieur du bassin (alimentant de la sorte les exurgences karstiques présentes dans la plaine et sur le littoral).

- **Mosson**

Sur la Mosson (Figure 20), deux stations météorologiques sont disponibles.

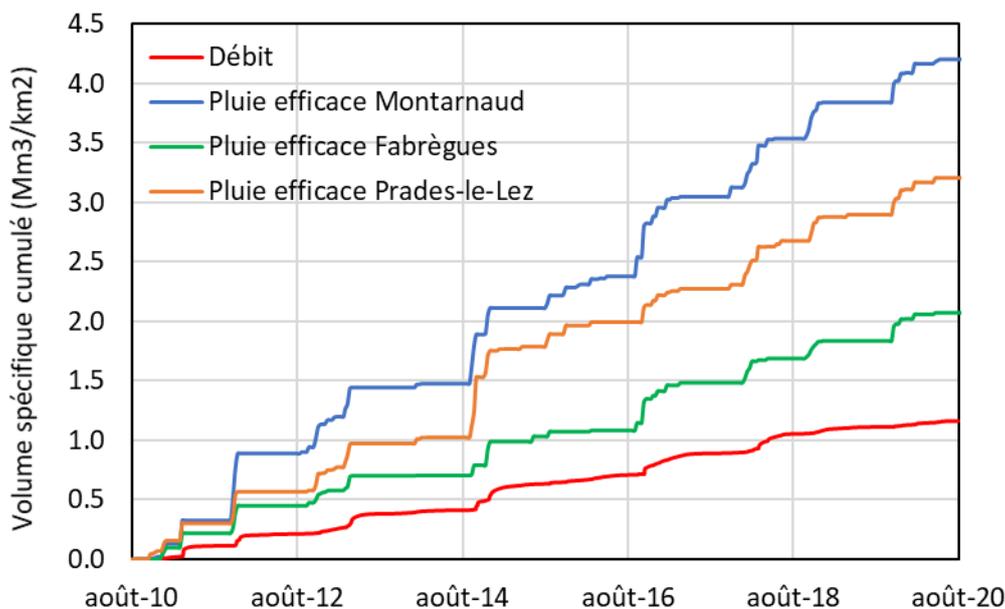


Figure 20 : Volumes spécifiques cumulés des débits de la Mosson et des pluies efficaces

Celle de Fabrègues fournit un cumul des précipitations efficaces légèrement supérieur au cumul des débits spécifiques alors que la station de Montarnaud fournit un cumul considérablement plus élevé. Par comparaison, le graphique présente aussi le cumul pour la station de Prades-le-Lez située dans le bassin versant du Lez, un peu à l'Est du BV de la Mosson.

La comparaison du cumul des débits avec celui des précipitations efficaces desquelles sont soustraits les prélèvements exercés sur le BV (Figure 21) place la courbe cumulée de Fabrègues légèrement en dessous de celle des débits, alors que celle de Montarnaud est deux fois plus élevée. Le cumul pour Prades-le-Lez se situant entre les deux. Les débits de la Mosson mesurés à la station hydrométrique aval sembleraient être plus dépendants des pluies observées dans le Sud (Fabrègues) et l'Est (Prades-le-Lez) du BV que de celles observées à l'Ouest (Montarnaud)

Ceci devrait cependant être étudié à la lumière des importantes pertes karstiques qui prennent place dans la partie Ouest du BV de la Mosson, au niveau du Causse l'Aumelas situé à l'Ouest immédiat de Montarnaud.

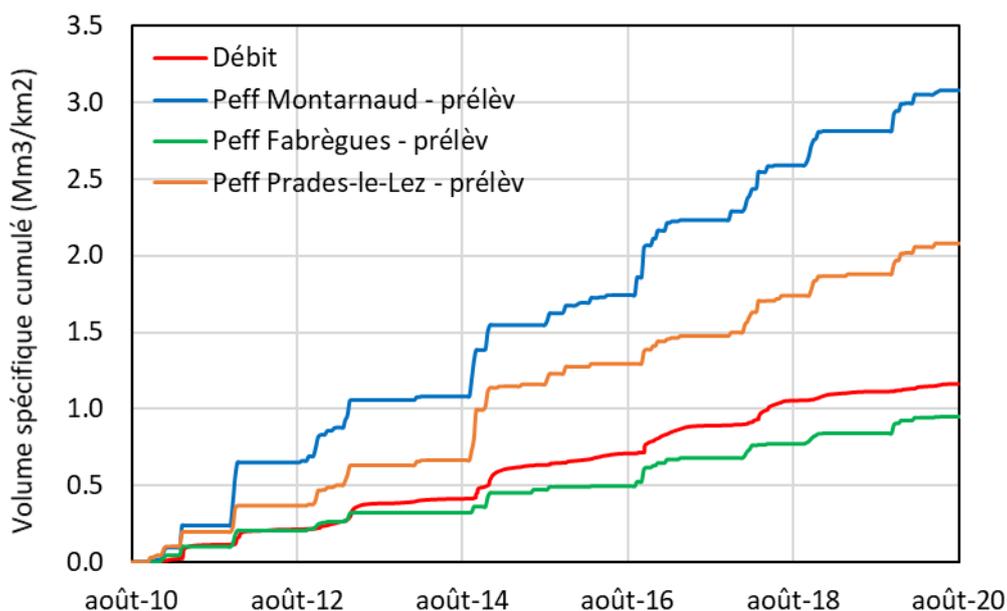


Figure 21 : Volumes spécifiques cumulés des débits de la Mosson et des pluies efficaces (réduites des prélèvements exercés sur le BV)

- **Lez**

Sur le Lez (Figure 22), le cumul des débits spécifiques mesurés à la station la plus aval est supérieur au cumul des pluies efficaces réduites des prélèvements (notons que les prélèvements - hors Source du Lez - sont faibles).

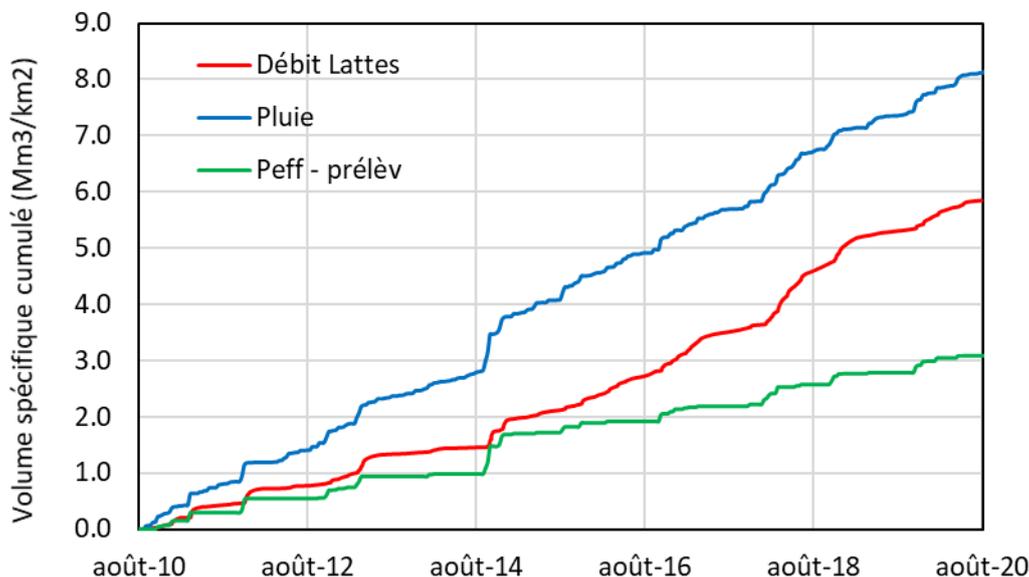


Figure 22 : Volumes spécifiques cumulés des débits du Lez

Ceci peut résulter de plusieurs causes :

- les apports par la Source du Lez sont issus d'un impluvium non intégré dans le bassin versant et donc dans le calcul des débits spécifiques ;
- les apports d'eau du Rhône (canal BRL) pour le soutien des étiages ne sont pas pris en compte ;

- le ruissellement direct généré par l'imperméabilisation des surfaces urbaines n'est pas considéré dans le bilan.

Notons que les courbes cumulées des débits et des précipitations efficaces (moins les prélèvements) sont assez proches jusqu'en 2015, année à partir de laquelle la courbe des débits présente une pente identique à celle de la pluie cumulée. A compter de 2016, soit le ruissellement s'est intensifié, soit les apports externes ont augmenté, soit les prélèvements amonts (Source du Lez) ont baissé (ou toute combinaison de ces différentes causes possibles).

- **Salaison**

Pour le Salaison (Figure 23), le débit spécifique cumulé est très semblable au cumul des précipitations efficaces défalqué des prélèvements.

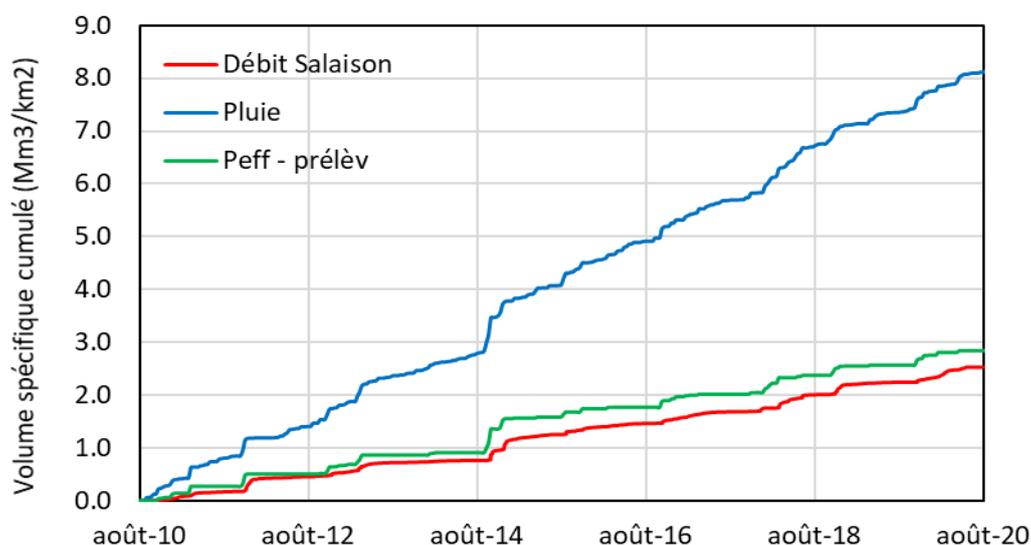


Figure 23 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits du Salaison

- **Vidourle**

Pour le Vidourle (Figure 24), les débits spécifiques cumulés sont légèrement inférieurs aux pluies cumulées.

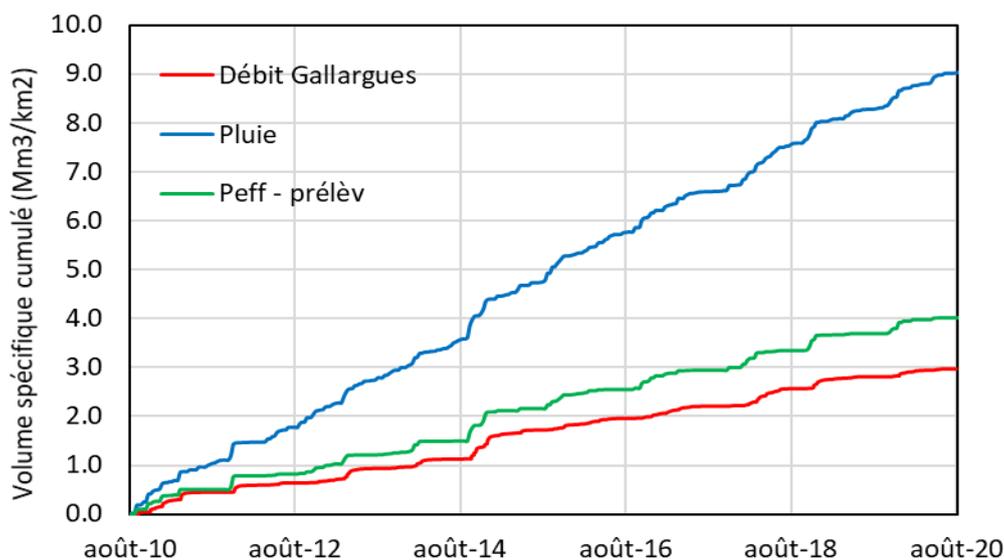


Figure 24 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits du Vidourle

- **Arc**

Pour l'Arc (Figure 25), les débits spécifiques cumulés sont très proches des pluies efficaces cumulées (réduites des prélèvements exercés sur le BV).

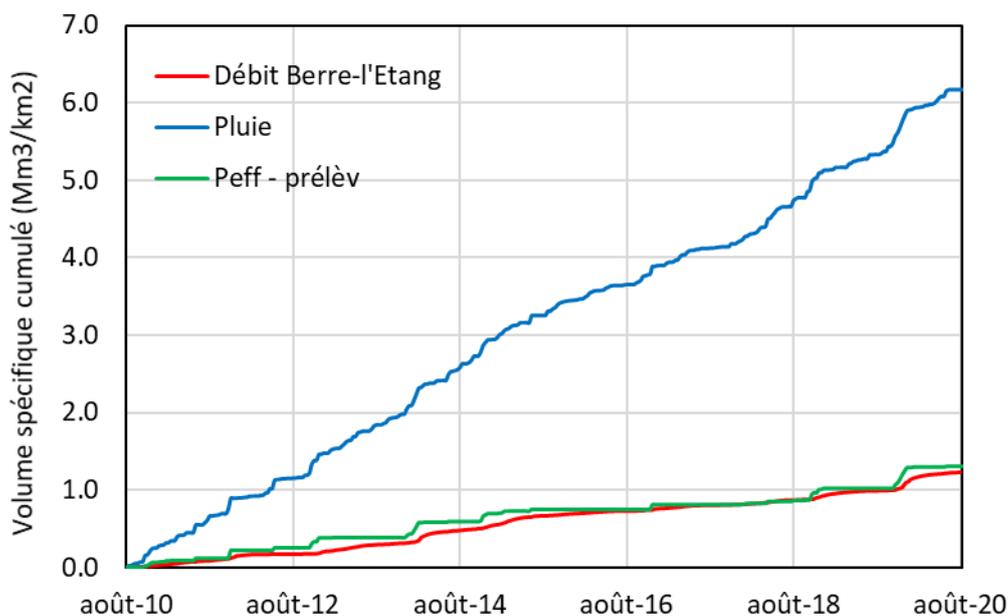


Figure 25 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits de l'Arc

- **Comparaison des tributaires**

La Figure 26 présente le rapport entre les débits spécifiques cumulés aux différentes stations et les précipitations efficaces cumulées diminuées des prélèvements.

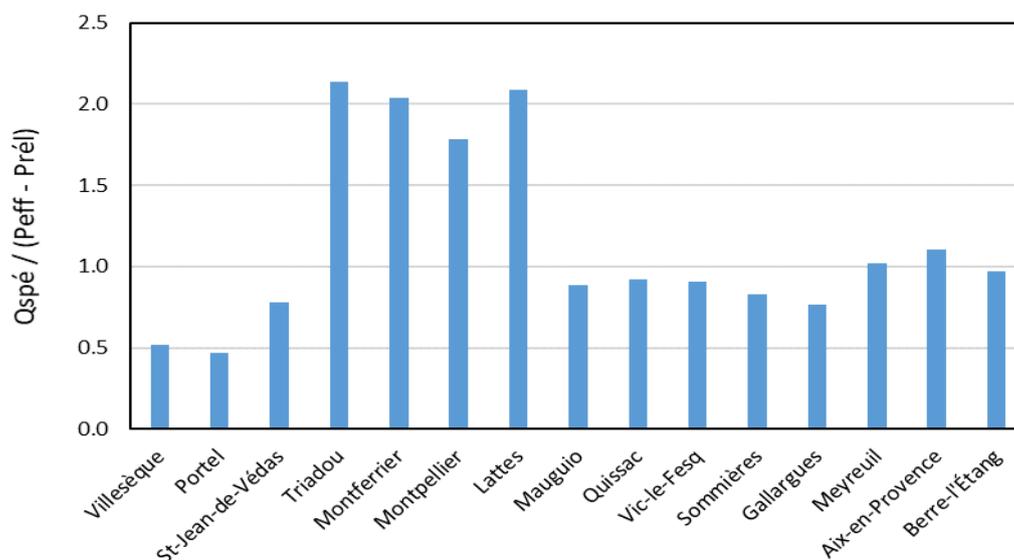


Figure 26 : Rapport entre les débits spécifiques cumulés et les précipitations efficaces cumulées diminuées des prélèvements

→ Pour le Salaison, le Vidourle et l'Arc, ce rapport est voisin de 1, indiquant que les débits spécifiques sont en accord avec la pluie efficace et les prélèvements. Pour la Berre et la Mosson, le rapport est voisin de 0.5, indiquant qu'une part importante d'eau ne serait pas incluse dans les débits mesurés aux stations (écoulements souterrains ou problèmes de stations). Pour le Lez, le rapport est voisin de 2, indiquant un apport d'eau important (Source du Lez, soutiens d'étiage BRL, ruissellement urbain).

La Figure 27 présente les mêmes résultats, mais pour le Lez avec des débits spécifiques cumulés corrigés des apports de la Source du Lez (~31.4 M.m³/an) et du soutien d'étiage BRL (~7 M.m³/an). Avec cette correction, les rapports du Lez sont voisins de 1, sauf pour la station de Lattes où l'exacerbation du ruissellement urbain n'a pas été pris en compte.

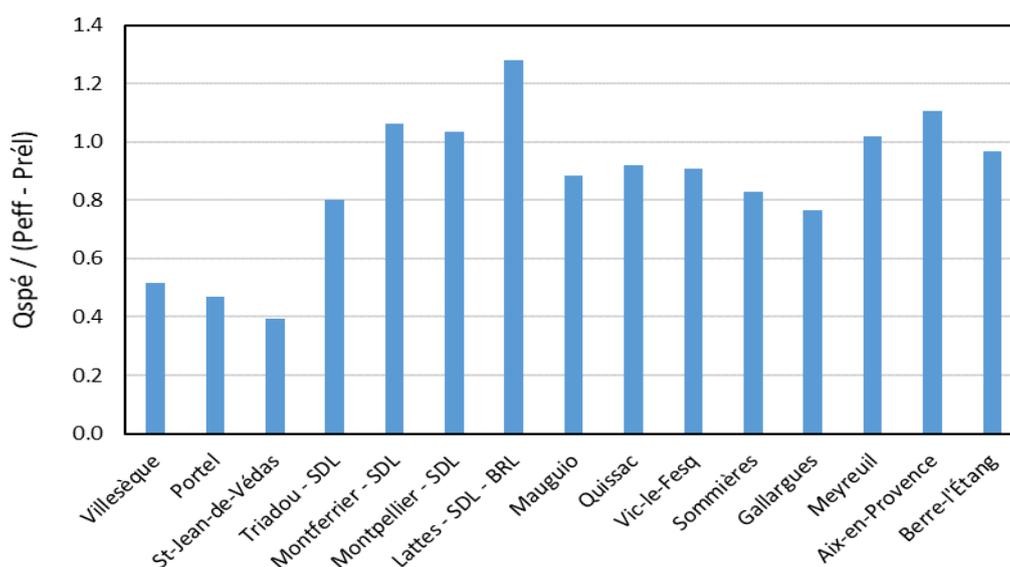


Figure 27 : Rapport entre les débits spécifiques cumulés et les précipitations efficaces cumulées diminuées des prélèvements (avec les débits du Lez diminués des apports de la Source du Lez et du soutien d'étiage de BRL)

→ Pour quatre bassins versants, il est donc possible d'évaluer le débit d'écoulement à l'aide des seules données des pluies efficaces, des prélèvements et des apports autres. Pour deux bassins versants en revanche, des connaissances supplémentaires seraient requises. Pour ces deux bassins, ont été évoqués un possible rôle des écoulements souterrains (vraisemblablement de type karstique) ou un éventuel problème de station de mesure. Notons que ces deux bassins ne disposent que d'une ou deux stations.

→ Cette partie du travail a été développée et étendue à une vingtaine de bassins versants de la façade méditerranéenne. Les résultats obtenus sont présentés à l'Annexe 3 et dans le cadre d'un article scientifique : « *Banton O., St-Pierre S., Giraud A., Stroffek S. 2022. A Rapid Method to Estimate the Different Components of the Water Balance in Mediterranean Watersheds. Water 2022, 14(4), 677. doi:10.3390/w14040677* ». La revue scientifique Water étant open-access, l'article peut être téléchargé librement.

L'application de cette méthode d'estimation simplifiée sur 20 fleuves et tributaires de lagunes de la façade méditerranéenne métropolitaine a montré qu'elle peut être rapidement mise en œuvre à partir de données existantes et facilement disponibles. Elle permet entre autres d'évaluer et de discuter :

- La représentativité de la station hydrométrique située à l'exutoire d'un bassin versant ;
- La réactivité du bassin aux épisodes méditerranéens de pluie intense ;
- La contribution des eaux souterraines aux écoulements ;
- L'importance des apports extérieurs potentiels ;
- L'importance des sorties occultes (souterraines) potentielles.

Cette approche ne peut toujours se suffire en elle-même et peut nécessiter une connaissance à « dire d'expert ». L'information fournie par cette méthode est importante puisqu'elle permet de discuter l'information fournie par les stations hydrométriques, et ce d'autant plus que ces dernières peuvent ne pas toujours refléter l'intégralité du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Pour les petits bassins versants non jaugés, cette approche peut être utilisée, au moins en première approximation. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter d'acquisition de données, ni la mise en œuvre d'un modèle pluie-débit dont les incertitudes seraient aussi importantes, en particulier en ce qui a trait aux entrées et sorties occultes.

2.3. Distribution statistique des débits

Une analyse statistique des données de débit a été réalisée afin de vérifier l'homogénéité des données. L'objectif était multiple :

- Vérifier si la distribution des débits suit une loi de distribution normale ou log-normale
- Vérifier si la distribution est unimodale ou multimodale.

Une loi de distribution normale a la forme d'une cloche symétrique. Une loi de distribution log-normale a la forme d'une cloche asymétrique, déformée vers la gauche. Elle est log-normale si la distribution des valeurs logarithmiques correspondantes suivent une loi normale. Une loi est unimodale si la distribution ne présente qu'un mode, c'est-à-dire qu'une seule 'bosse'. Elle est multimodale si elle comporte plusieurs 'bosses' (vois exemple à la Figure 28).

Une variable X est log-normalement distribuée si la distribution de ses valeurs logs $Y = \log(X)$ suit une distribution normale. Une distribution log-normale est caractérisée par une asymétrie gauche, d'autant plus importante que l'écart-type de la population sera grand devant la moyenne.

Une distribution bimodale résulte par exemple de la fusion de deux distributions unimodales distinctes. Une distribution multimodale semblerait indiquer que les débits sont générés par des processus

relativement indépendants. Ce pourrait être par exemple des débits reliés à l'écoulement de base du drainage des nappes, aux pluies usuelles, aux événements exceptionnels de type méditerranéen, à des crues karstiques, etc.

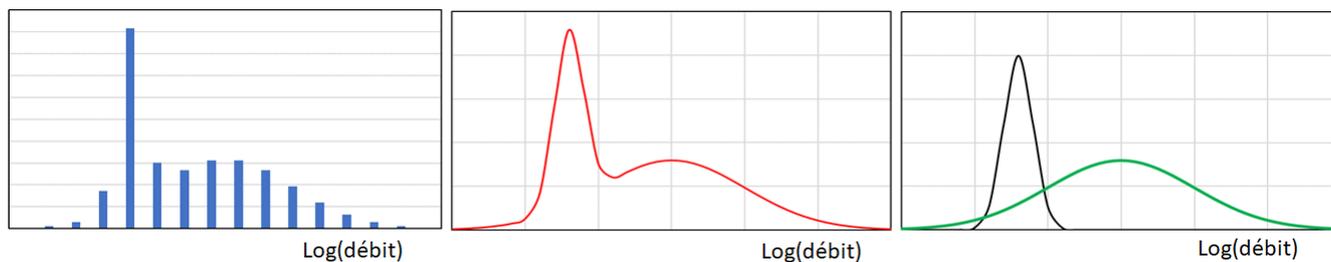


Figure 28 : Exemple d'une population log-normale bimodale représentée en histogramme de fréquence, en fonction de probabilité bimodale et en fonctions de probabilité unimodales

Les figures suivantes présentent les histogrammes de fréquence des différentes populations de mesures de débit. Les débits sont représentés en échelle logarithmique.

- **Berre**

Sur la station de la Berre à Portel-des-Corbières (Figure 29), les débits suivent une distribution logarithmique bimodale, avec un premier mode dominant vers $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ et un mode bien plus faible vers $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

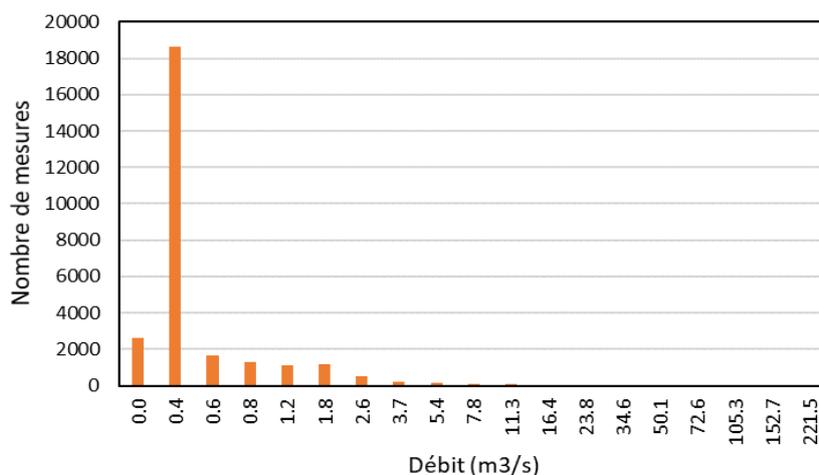


Figure 29 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de la Berre (station de Portel-des-Corbières)

- **Mosson**

Sur la station de la Mosson à Saint-Jean-de-Védas (Figure 30), les débits suivent une distribution logarithmique trimodale, avec un premier mode dominant vers $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, un deuxième vers $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ et un dernier mode plus faible vers $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

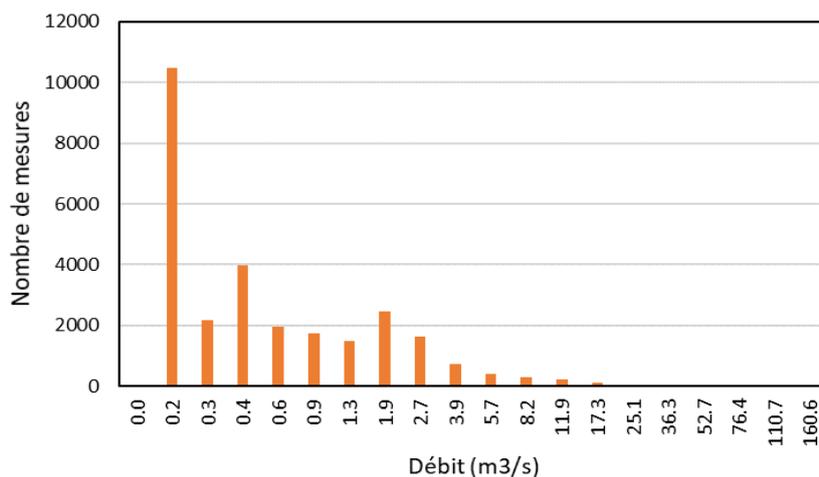


Figure 30 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de la Mosson (station de Saint-Jean-de-Védas)

- **Lez**

Sur la station du Lez à Lattes (Figure 31), les débits suivent également une distribution logarithmique trimodale, avec un premier mode légèrement dominant vers 0.7 m³/s, un deuxième vers 2.0 m³/s et un dernier mode plus faible vers 8.3 m³/s.

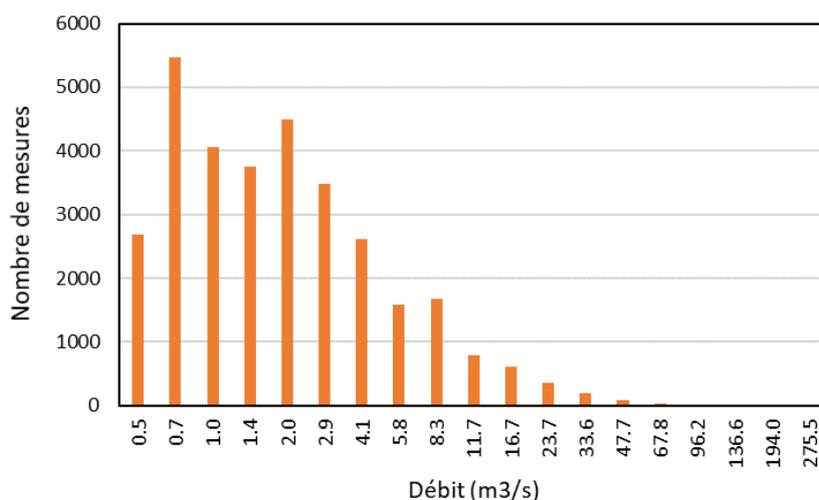


Figure 31 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Lez (station de lattes)

- **Salaison**

Sur la station du Salaison à Manguio (Figure 32), les débits suivent également une distribution logarithmique trimodale, avec un premier mode dominant vers 0.1 m³/s, un deuxième vers 0.3 m³/s et un dernier mode bien plus faible vers 2.0 m³/s.

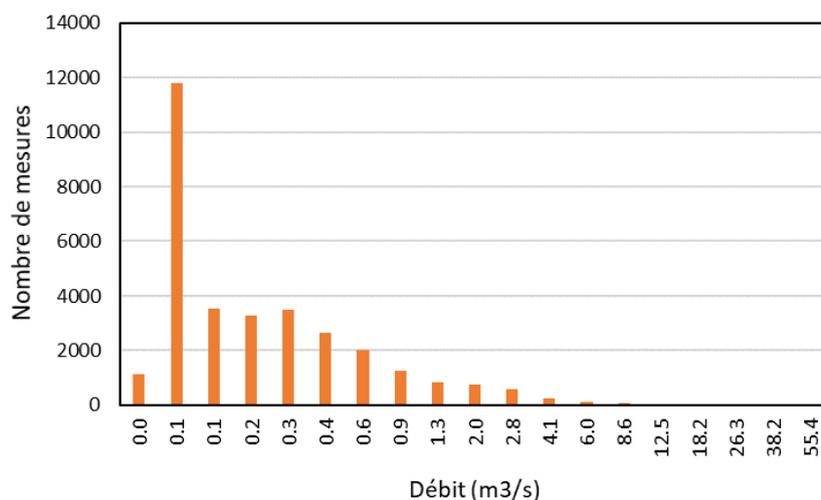


Figure 32 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Salaison (station de Mauguio)

- **Vidourle**

Sur la station du Vidourle à Gallargues (Figure 33), les débits semblent plutôt suivre une distribution logarithmique bimodale, avec un premier mode dominant vers $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ et un deuxième vers $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

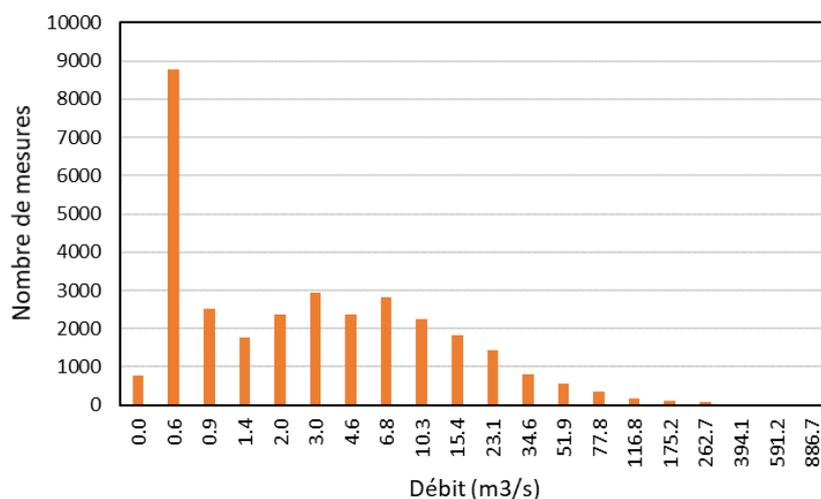


Figure 33 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Vidourle (station de Gallargues)

- **Arc**

Sur la station de l'Arc de Berre l'Etang (Figure 34), la distribution semble presque unimodale, avec une mode vers $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

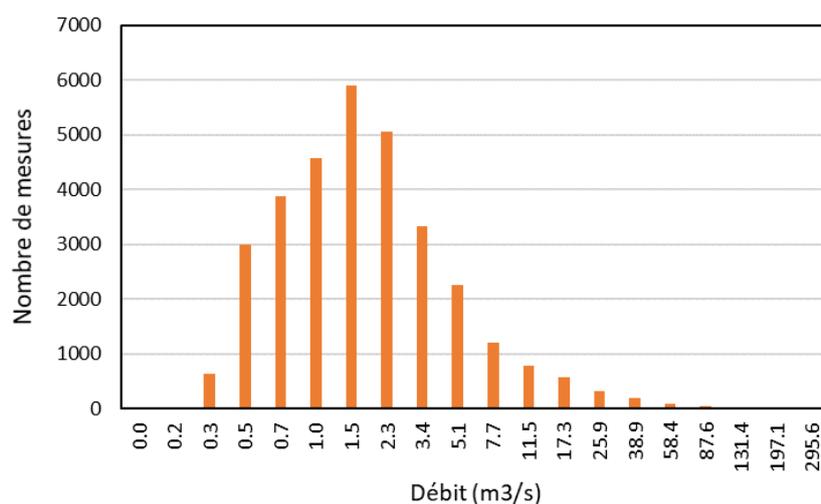


Figure 34 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de l'Arc (station de Berre-l'Etang)

2.4. Conclusion sur les débits

L'étude des séries chronologiques de débits des différentes stations hydrométriques des six bassins versants étudiés a fait ressortir les constats suivants :

- **Certaines stations présentent des problèmes** importants depuis plusieurs années. Parmi celles-ci, la station de Marsillargues sur le Vidourle, initialement pressentie pour le calcul des flux, ne peut être utilisée et a été remplacée par la station de Gallargues-le-Montueux. Sur la station du Vidourle à Marsillargues, les débits ne sont jamais inférieurs à 31.7 m³/s, même en l'absence d'écoulement.
- La comparaison des stations d'un même bassin versant permet également de mettre en évidence des problèmes particuliers. La station de Portel-des-Corbières sur la Berre semble par exemple montrer une importante sous-estimation des débits, possiblement attribuable à un écoulement de l'eau dans l'épaisse couche de galets formant le lit du cours d'eau au droit de la station, mais également à des pertes karstiques non reconnues à ce jour mais pouvant expliquer les nombreuses résurgences prenant place dans la plaine littorale. La station hydrométrique aval du Lez à Lattes (3^e écluse) montre à l'opposé un apport d'eau important entre cette station et la station précédente (Montpellier – Pont Garigliano). Cet apport d'eau ne peut être imputable au soutien d'étiage depuis le canal BRL. Le rôle d'une exacerbation du ruissellement urbain liée à l'imperméabilisation des sols semble pouvoir par contre être évoquée.
- La comparaison des débits spécifiques de bassins versants voisins (Mosson/Lez, Lez/Salaison, Lez/Vidourle) illustre l'impact des prélèvements exercés sur les nappes de certains bassins. La faiblesse de certains débits spécifiques ne peut cependant être toujours expliquée par ces prélèvements. C'est le cas de la Mosson qui montre un important déficit de débit spécifique, qui semble attribuable aux importantes pertes karstiques prenant place sur ce bassin versant et alimentant les nombreuses sources karstiques présentes dans la plaine littorale.
- Il n'est pas impossible non plus que des forts débits soient erronés car situés en dehors de la courbe de tarage établie pour chaque station hydrométrique. Il n'est également pas exclu qu'une partie importante du débit ne passe pas par la station hydrométrique durant ces périodes (cas des plaines inondables).

- **Globalement, les débits spécifiques cumulés de la plupart des stations sont en cohérence avec les cumuls de pluies efficace calculés**, après la prise en compte des prélèvements, des apports extérieurs et des pertes connues. La pluie efficace est calculée en tenant compte des précipitations, de l'évapotranspiration calculée par Météo-France et de la réserve utile des sols. Les pluies efficaces induisent du ruissellement direct et la recharge des nappes. Le volume cumulé des pluies efficaces, défalqué des prélèvements et augmenté des éventuelles restitutions, devrait donc se retrouver à l'exutoire du bassin versant, sauf dans le cas de transferts hors bassin ou d'écoulements souterrains sortant directement dans les lagunes ou en mer.
- Les débits spécifiques cumulés sont généralement 10 à 20% inférieurs aux cumuls de pluie efficace, ce qui reflète les prélèvements exercés sur les ressources. Ils sont bien inférieurs à la pluie efficace cumulée pour les stations sur lesquelles le débit spécifique s'est avéré faible par comparaison avec les autres stations voisines. A l'inverse, dans le cas du Lez, les débits spécifiques cumulés sont supérieurs au cumul de pluie efficace du fait des apports karstiques de la Source du Lez, des apports BRL et d'une exacerbation du ruissellement en milieu urbain.
- **La connaissance des pluies efficaces¹, des prélèvements exercés sur le bassin versant² et des apports autres permet d'évaluer de façon réaliste les volumes d'écoulement pour la plupart des bassins versants.** Pour la Berre et la Mosson, le devenir d'une part importante du bilan hydrique n'est pas bien connue, même si l'existence de nombreuses résurgences karstique en aval extérieur de ces bassins versants semble pouvoir expliquer les déficits hydriques constatés.
- **Les pluies efficaces (ajustées des prélèvements, des apports extérieurs et des pertes) peuvent donc être envisagées comme une alternative pour le calcul des débits d'écoulement à l'exutoire**, soit dans le cas de bassins versants non jaugés, soit dans le cas de stations défectueuses. La bonne couverture nationale en stations météorologiques (qu'elles soient du réseau Météo-France, des conseils départementaux, des organismes de recherche, des entreprises privées, des organismes agricoles, ou même d'amateurs) permet de caractériser ces pluies efficaces avec une bonne précision.
- Les bassins versants étudiés montrent que la seule connaissance des pluies efficaces, et des prélèvements, restitutions et apports anthropiques, ne suffit cependant pas toujours pour reproduire de façon précise les débits mesurés. Il n'est pas exclu que ce soit les débits mesurés eux-mêmes qui puissent être entachés d'incertitudes (inféoflux ou débits sous-estimés) ou non exhaustif (écoulement ne passant pas par la station hydrométrique, débit situé hors de la courbe de tarage). Dans ce cas-là, les flux contribués aux lagunes pourraient être sous-estimés en utilisant les débits des stations hydrométriques incriminées. **Une connaissance minimale du fonctionnement du bassin versant et des écoulements souterrains paraît donc nécessaire, au moins « à dire d'expert ».**
- L'analyse statistique des débits a montré que leurs distributions suivent des lois log-normales, bi- ou tri-modales. La présence de plusieurs modes indique des populations différenciées de débits. Ces différentes populations pourraient être reliées aux différents types d'écoulement : écoulement de base (drainage des nappes), ruissellement superficiel en période de pluies normales, ruissellement quasi-total de la pluie lors des événements exceptionnels de type méditerranéen, apports des crues karstiques, etc. Dans le calcul des flux contribués par les tributaires des lagunes, la multimodalité est intrinsèquement prise

¹ Le calcul des précipitations efficaces peut être réalisée à l'aide de l'outil ESPERE du BRGM téléchargeable sur : <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/espere-estimation-pluie-efficace-recharge-selon-differentes-methodes>

² Les données des prélèvements déclarés sont téléchargeables sur : <https://bnpe.eaufrance.fr/>

en compte par la méthode des intervalles de débits, puisqu'une concentration est attribuée à chaque classe de débit.

- **Les courbes cumulées des débits mesurés sur les différentes stations montrent pour certaines stations des courbes très lisses et pour d'autres des courbes en marches d'escalier.** Ces dernières reflètent l'effet des ruissellements très importants prenant place durant les épisodes méditerranéens. A l'inverse, **les courbes très lisses reflètent le rôle tampon des écoulements hypodermiques et souterrains.**
- Les **recommandations** suivantes peuvent être faites :
 - En ce qui a trait aux six tributaires étudiés, ne pas utiliser les données hydrométriques de la station du Vidourle à Marsillargues ; pour compléter les lacunes de données, utiliser les données de la station hydrométrique située à l'amont de la station défaillante (s'il en existe une), ou celle du bassin versant voisin (idéalement de taille similaire) en corrigeant les données au prorata des surfaces respectives des deux bassins versants ;
 - Dans le cas de l'étude de nouveaux tributaires, réaliser au préalable une triple vérification : (1) avec les stations hydrométriques amont, en exprimant les courbes cumulées en débits spécifiques ; (2) avec les bassins versants voisins (en débits spécifiques également) ; (3) avec les volumes cumulés calculés à l'aide des pluies efficaces et des prélèvements.

3. Analyse préalable des données de concentrations

3.1. Représentativité temporelle des échantillonnages ‘qualité’

Afin de mettre en œuvre une méthode de calcul des flux, il est nécessaire de disposer de données fiables de débits et de données de concentrations représentatives des différentes conditions hydrologiques, c'est-à-dire le plus possible de toute la gamme de débits. Les graphiques suivants permettent de vérifier le degré de couverture des échantillonnages sur la plage des débits observés sur la période 2010-2020. Ces graphiques présentent en bleu la courbe des débits classés et en rouge les débits ayant fait l'objet d'un échantillonnage pour les analyses de la qualité. Précisons cependant que cette période de suivi n'a pas forcément connu les plus fortes intensités de crues.

- **Berre**

Les échantillonnages de qualité de la Berre (Figure 35) couvrent bien toute la gamme des débits, hormis les quelques débits de crue supérieurs à $200 \text{ m}^3/\text{s}$. La crue la plus forte ($197 \text{ m}^3/\text{s}$), échantillonnée en février 2017, correspondrait à une crue quadriennale³. Notons que la courbe des débits classés présente une forme particulière, avec une rupture marquée vers $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, qui est pourrait être reliée au rôle de l'inféroflux⁴ masquant les débits faibles et moyens ou à la saturation des pertes karstiques⁵.

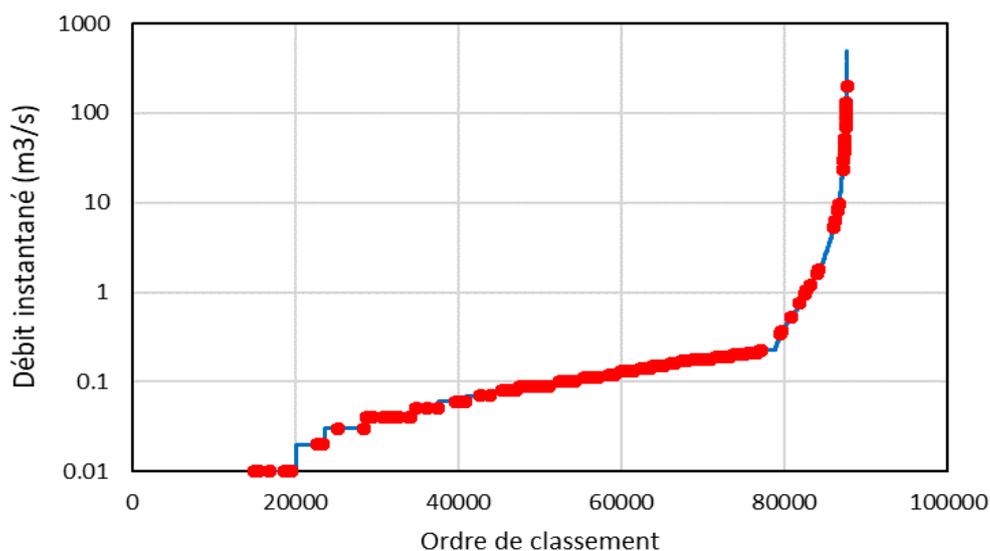


Figure 35 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur la Berre (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Portel des Corbières)

³ Une crue quadriennale est une crue dont la probabilité de survenir est statistiquement d'une fois tous les quatre ans (environ tous les quatre ans selon les connaissances historiques disponibles).

⁴ L'inféroflux est la partie de l'écoulement d'un cours d'eau qui se produit, sous le cours d'eau, au sein de ses alluvions.

⁵ Les pertes karstiques correspondant aux fuites d'un cours d'eau s'écoulant en tout ou en partie vers un réseau karstique souterrain.

- **Mosson**

Les échantillonnages de qualité de la Mosson (Figure 36) couvrent bien toute la gamme des débits, hormis les quelques débits de crue supérieurs à 150 m³/s. La plus forte crue (143 m³/s), échantillonnée en octobre 2016, correspondrait à une crue cinquantennale.

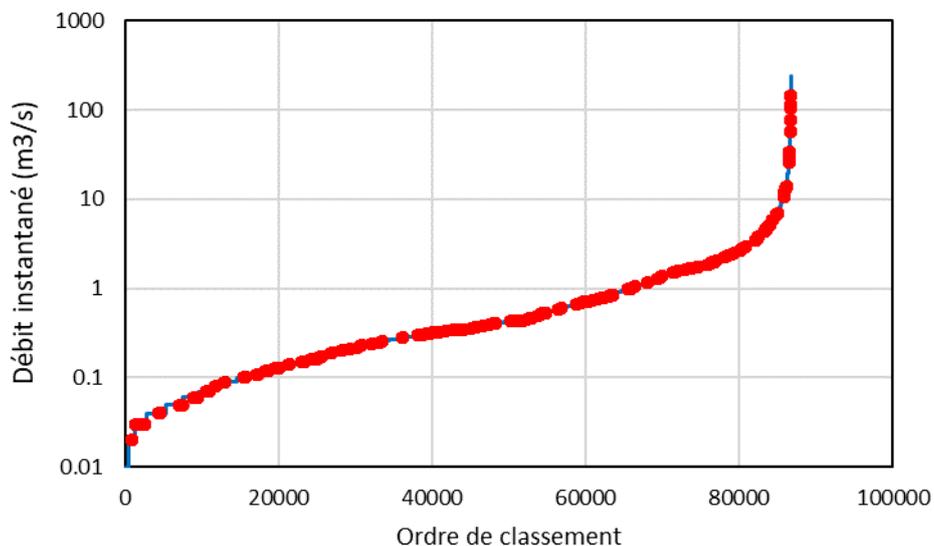


Figure 36 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur la Mosson (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Saint-Jean-de-Védas)

- **Lez**

Les échantillonnages de qualité du Lez (Figure 37) couvrent la gamme des débits jusqu'à 78 m³/s. Les débits supérieurs (entre 80 et 720 m³/s n'ont pu être échantillonnés).

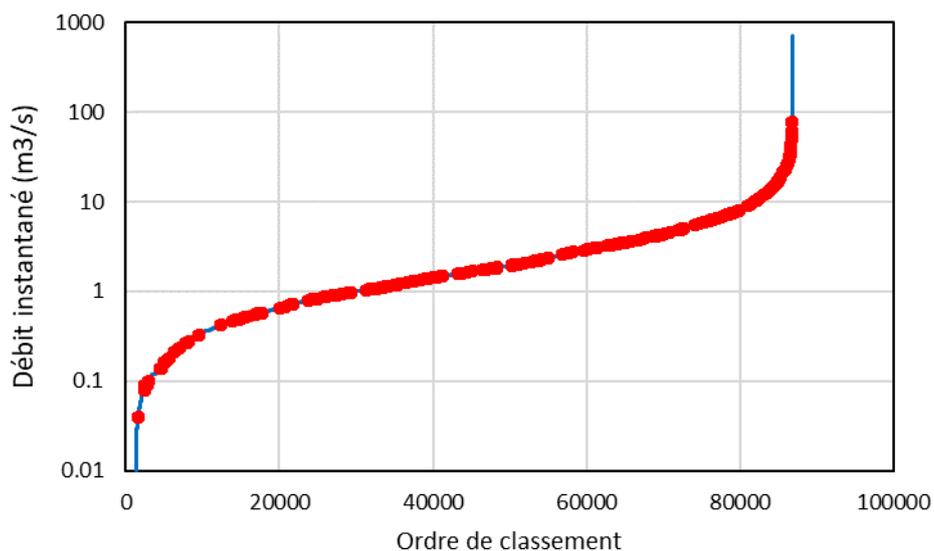


Figure 37 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Lez (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Lattes)

- **Salaison**

Sur le Salaison (Figure 38), les échantillonnages couvrent bien la gamme des débits. La crue la plus forte ($87 \text{ m}^3/\text{s}$), échantillonnée en octobre 2019, correspondrait à une crue cinquantennale.

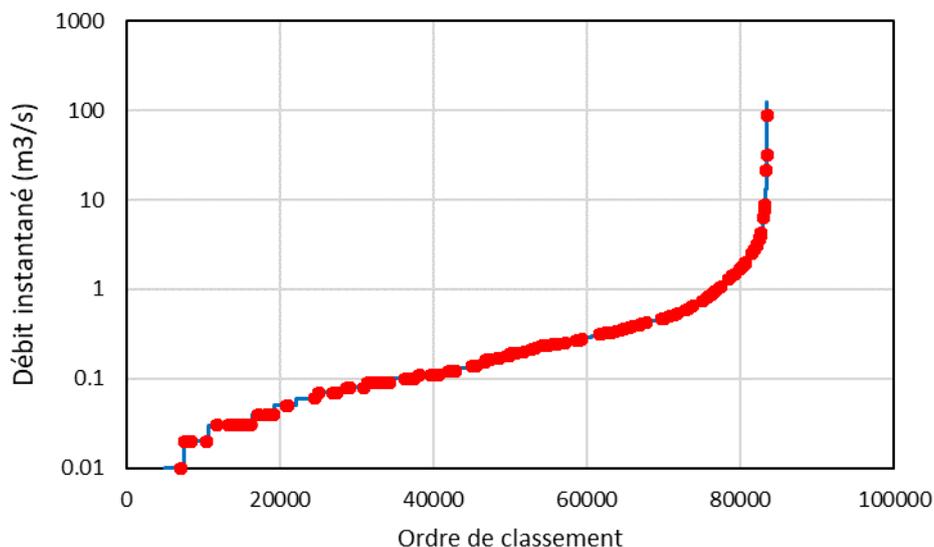


Figure 38 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Salaison (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Manguio)

- **Vidourle**

Sur le Vidourle (Figure 39), les échantillonnages couvrent bien la gamme des débits. La crue la plus forte ($419 \text{ m}^3/\text{s}$), échantillonnée en novembre 2018, correspondrait à une crue d'ordre quinquennal.

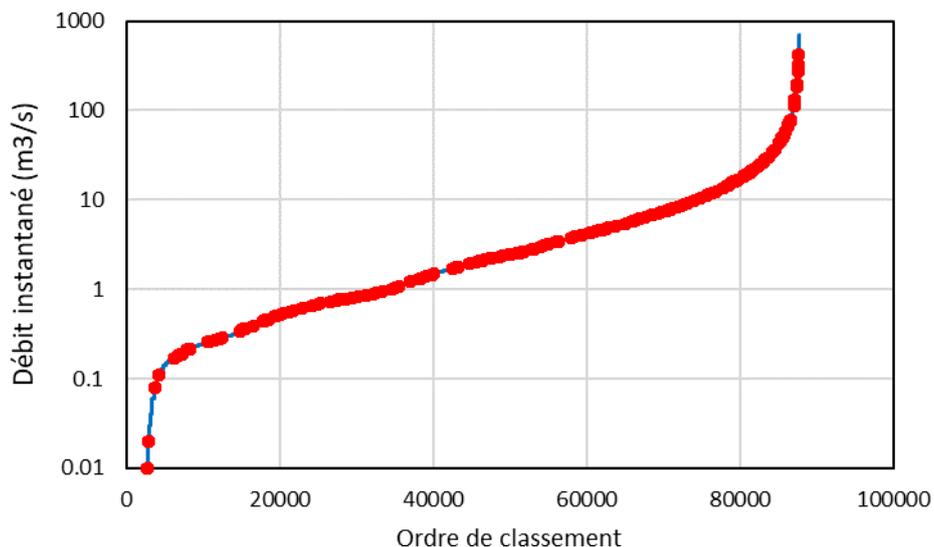


Figure 39 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Vidourle (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Gallargues-le-Montueux)

- **Arc**

Sur l’Arc (Figure 40), les échantillonnages couvrent bien la gamme des débits. La crue la plus forte ($98 \text{ m}^3/\text{s}$), échantillonnée en novembre 2011, correspondrait à une crue trentennale.

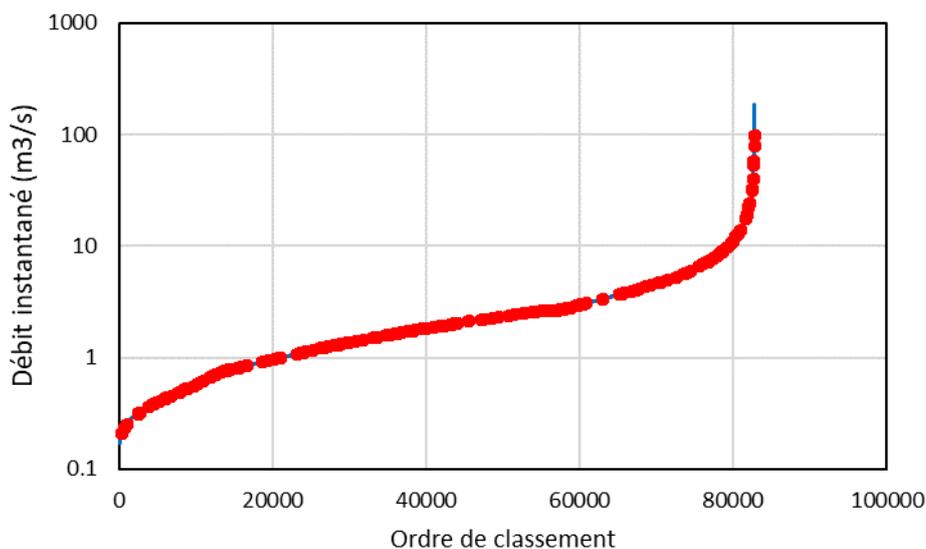


Figure 40 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur l’Arc (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Berre-l’Étang)

Toutes ces courbes montrent que les suivis menés durant cinq (5) ans avec l’échantillonnage des crues ont permis d’acquérir quasi partout les données souhaitées, requises par les méthodes de calcul.

3.2. Particularités concernant les données ‘qualité’

Trois types de problèmes affectent les données de qualité et peuvent créer un biais dans le calcul des flux :

- Le premier est lié aux limites de détection / quantification ;
- Le deuxième est lié à la forte variabilité temporelle des concentrations ;
- Le troisième est induit par une modification importante du territoire ou des sources de pollution.

3.2.1. Limites de détection / quantification

La Figure 41 illustre le problème lié aux limites de détection / quantification. Dans l’exemple fourni, on remarque que quatre limites de détection / quantification différentes ont concerné le PO4 : 0.005, 0.01, 0.02 et 0.03 mg/l. Ces différentes limites sont dues à des laboratoires différents et à l’évolution temporelle des limites de quantification. Dans le cas du PO4, plus de la moitié des concentrations sont inférieures aux limites de quantification, mais vraisemblablement non nulles.

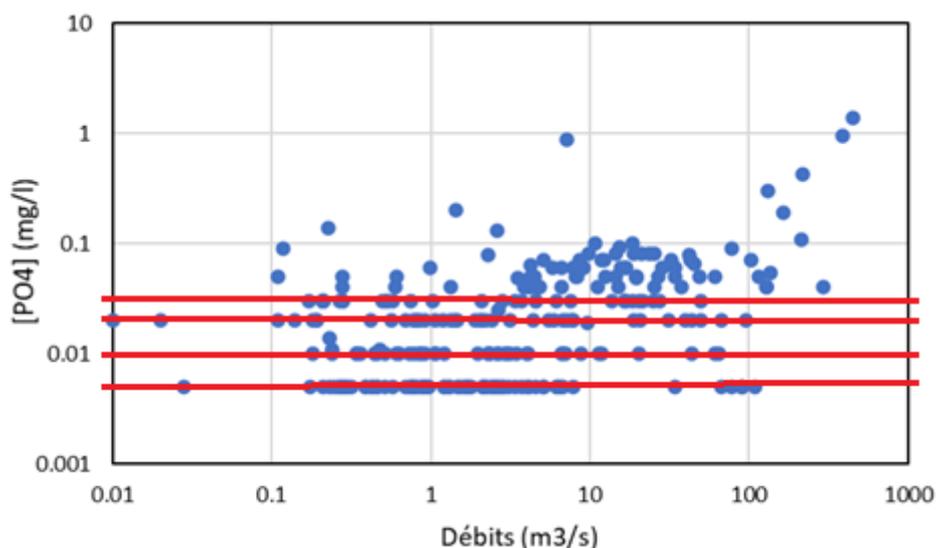


Figure 41 : Relation entre les concentrations de PO4 et les débits du Vidourle (données 2001-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr) – les lignes rouges illustrent les différentes limites analytiques de détection/quantification caractérisant les données

La Figure 42 est une autre illustration de ce problème, avec l'azote Kjeldahl. Dans ce dernier cas, on remarque qu'on ne dispose que d'un très faible nombre de réelles données.

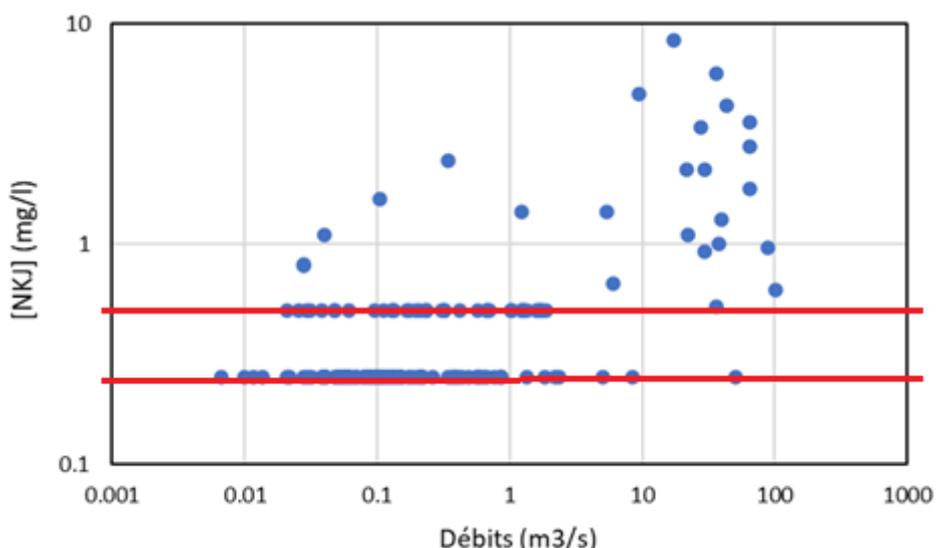


Figure 42 : Relation entre concentrations d'azote total Kjeldahl et débits de la Berre (données 2000-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr) – les lignes rouges illustrent les différentes limites analytiques de détection/quantification caractérisant les données

Dans le cas où l'on souhaite prendre en compte ces données inférieures aux limites de quantification, deux possibilités s'offrent classiquement :

- Considérer pour chaque valeur incriminée, une concentration égale à la moitié de la limite de détection / quantification ; ceci s'applique généralement pour les paramètres dont on considère que les concentrations ne sont pas nulles ;
- Considérer une valeur nulle, ceci concerne généralement les paramètres dont on considère que la valeur est a priori nulle ou proche de zéro (cas des pesticides par exemple).

3.2.2. Variabilité temporelle

La variabilité temporelle des concentrations entrave également le calcul des flux, en particulier dans le cas des méthodes par classe de débits et des jeux limités de données, où cela peut générer des distributions de valeurs en dents de scie. Pour limiter l'impact de ce problème, une moyenne mobile (glissante) est parfois utilisée. Pour ce faire, les débits sont classés en ordre croissant et la moyenne de plusieurs valeurs consécutives de concentrations (par exemple 10) est calculée. La Figure 43 illustre cette approche. Dans cet exemple, la méthode permet de mieux mettre en évidence la relation entre les paramètres (MES et P-tot) et les débits.

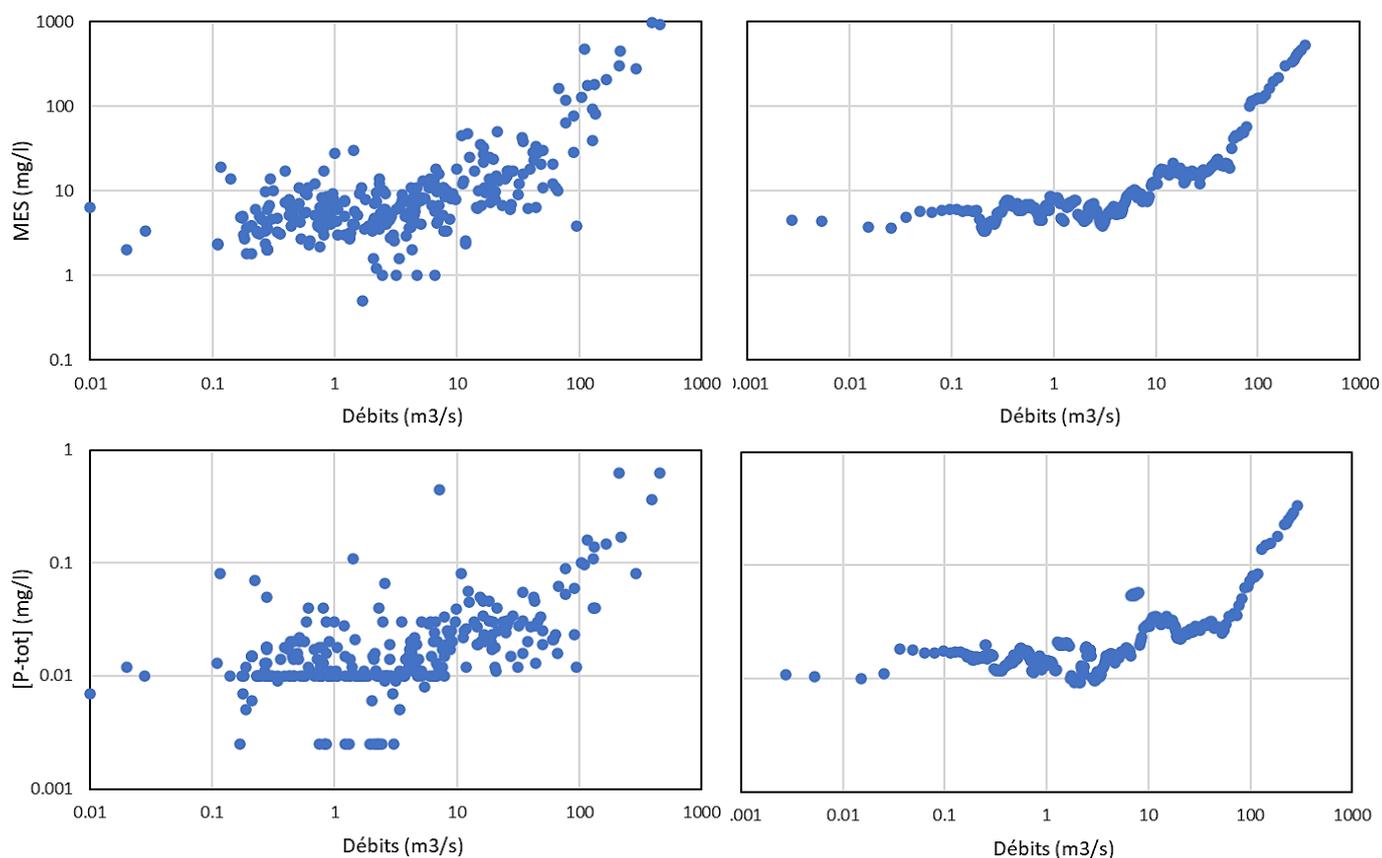
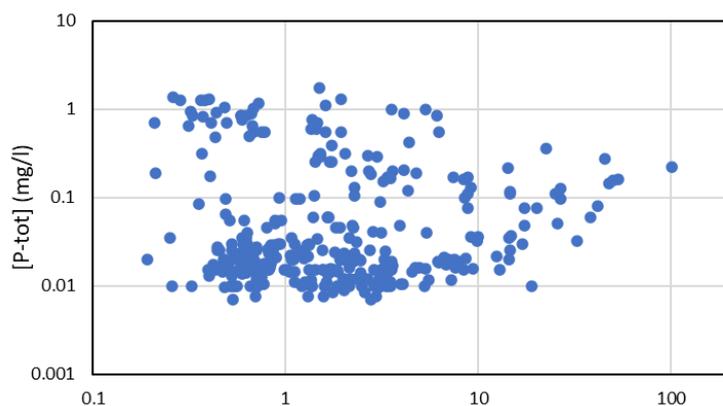


Figure 43 : Relation entre concentrations de MES (en haut) et Phosphore total (en bas) et débits du Vidourle (données 2001-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) – données brutes à gauche, moyennes mobiles sur 10 valeurs à droite

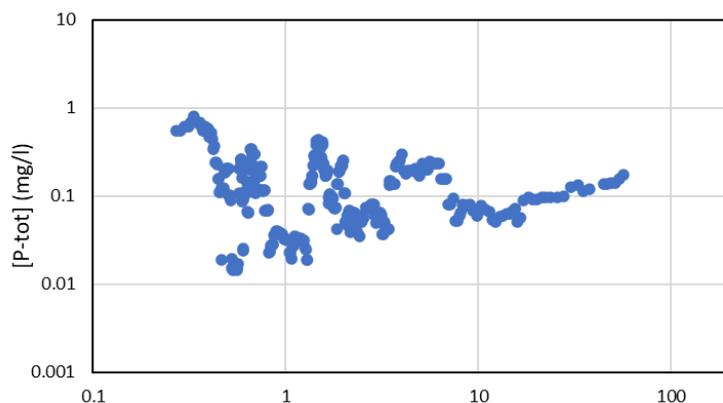
3.2.3. Modification du territoire ou des sources de pollution

Dans le cas des longues séries temporelles, la probabilité que survienne une modification du territoire ou des sources de pollution est plus importante.

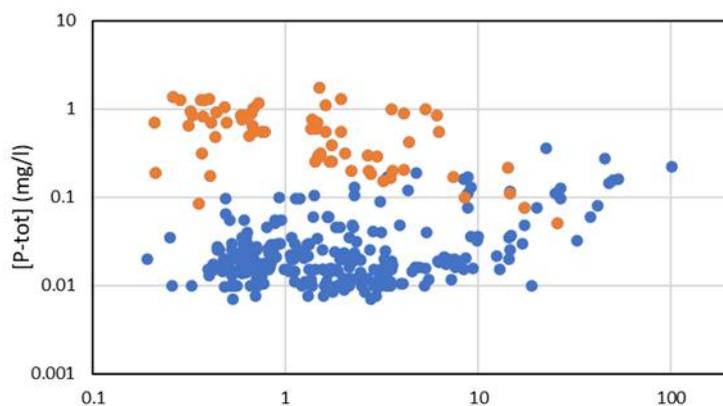
La Figure 44 présente l'exemple des concentrations de phosphore total dans l'eau du Lez. L'application d'une moyenne mobile sur cette série de données ne permet pas d'obtenir une relation satisfaisante entre le phosphore total et le débit.



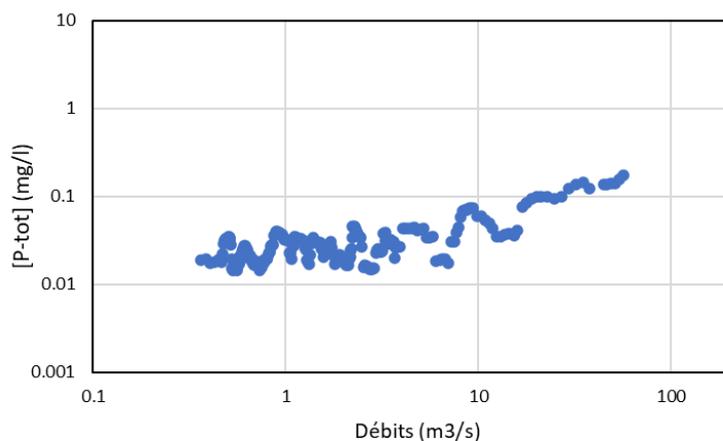
Ensemble des données de concentrations de phosphore total de la période 2000-2020



Moyennes mobiles (des concentrations de phosphore total) de 10 échantillons de débits voisins (débits classés croissants)



Ensemble des données avec séparation des données antérieures et postérieures à 2009



Moyennes mobiles (des concentrations de phosphore total) de seules données postérieures à 2009

Figure 44 : Concentrations de phosphore total en fonction du débit du Lez (données 2000-2020 issues des bases de données NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr) montrant deux populations différentes reliées à une modification de la source principale de pollution en 2005 ; la relation est améliorée en prenant en compte les seules données postérieures à 2006

L'étude des données montre en fait que la série temporelle est composée de deux populations différentes (concentrations mesurées avant et après 2005). Ceci reflète l'importante modification de la source de pollution survenue en 2005, à savoir la modification de la station de traitement des eaux usées de l'Agglomération de Montpellier.

La Figure 45 illustre également la présence de deux populations dans le cas du Salaison.

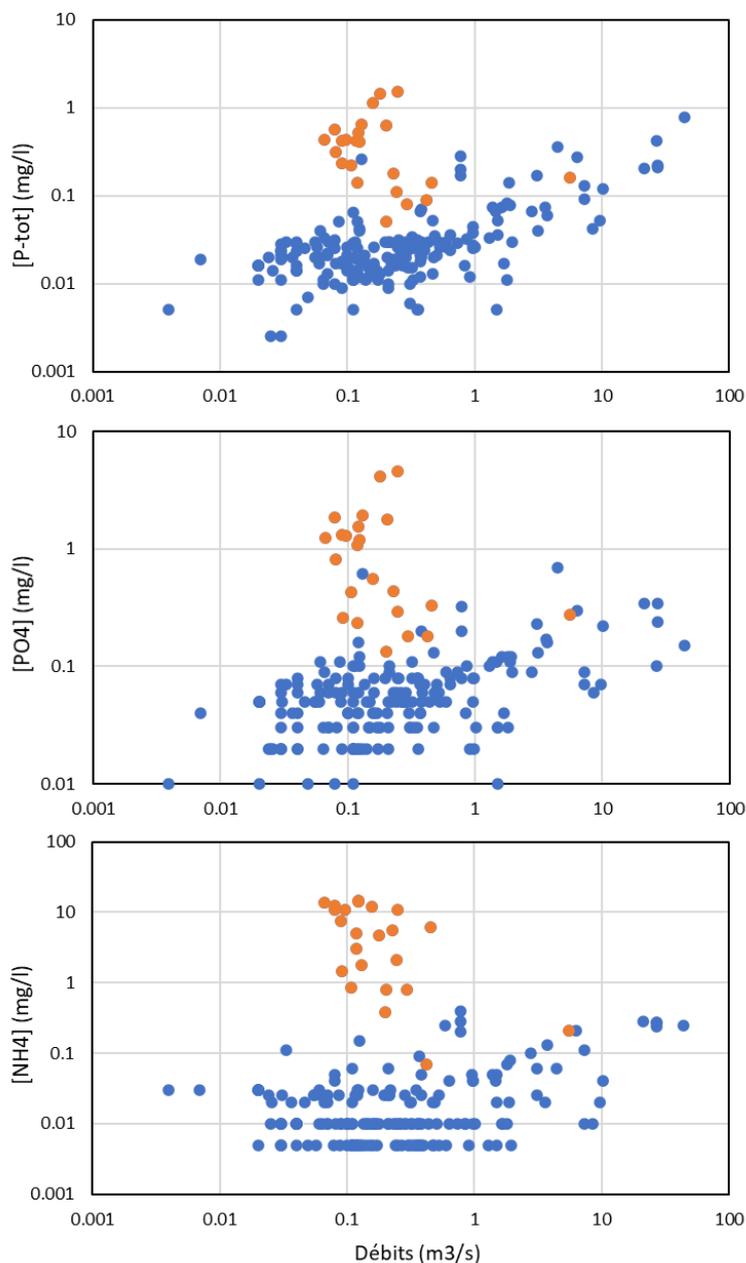


Figure 45 : Concentrations d'ammonium en fonction du débit du Salaison (données 2007-2020 issues des bases de données NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr) montrant deux populations différentes reliées à une modification de la source de pollution en 2009

Les résultats présentés ci-avant pour le Lez et le Saison montrent que la prise en compte de l'historique du territoire est très importante.

→ Pour un calcul représentatif des flux il faut donc prendre en compte les modifications survenues sur le bassin versant. Les antérieures à la date d'une éventuelle modification ne doivent pas être prises en compte pour caractériser la situation actuelle. A cette fin, l'application sur un bassin donné doit pouvoir bénéficier de la connaissance « à dire d'expert » des gestionnaires et acteurs locaux quant aux pressions présentes sur le BV et aux modifications survenues. Il est ainsi nécessaire de bien fixer les objectifs poursuivis dans la démarche pour savoir quelles données doivent être conservées ou écartées.

3.3. Effet de la saison

L'évolution du régime hydrologique des cours d'eau dépendant directement des pluies efficaces, un possible effet des saisons a été recherché dans les données de qualité. Pour ce faire, la moyenne des concentrations de chacun des paramètres a été calculée mois par mois. Les résultats montrent un effet marqué de la saison sur les concentrations de MES (Figure 46), et moins sur celles de phosphore total (Figure 49) et d'azote total Kjeldahl (Figure 48). Pour les autres paramètres, aucun effet n'est observé.

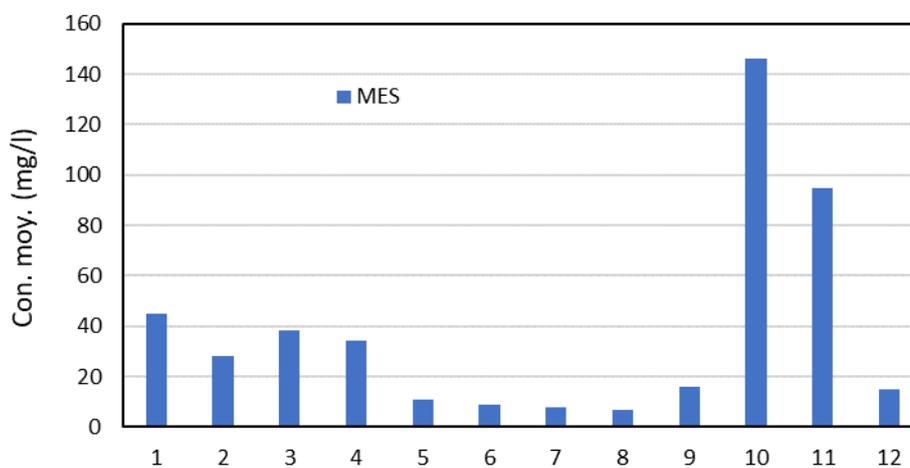


Figure 46 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations de MES (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADÉ – eaufrance.fr)

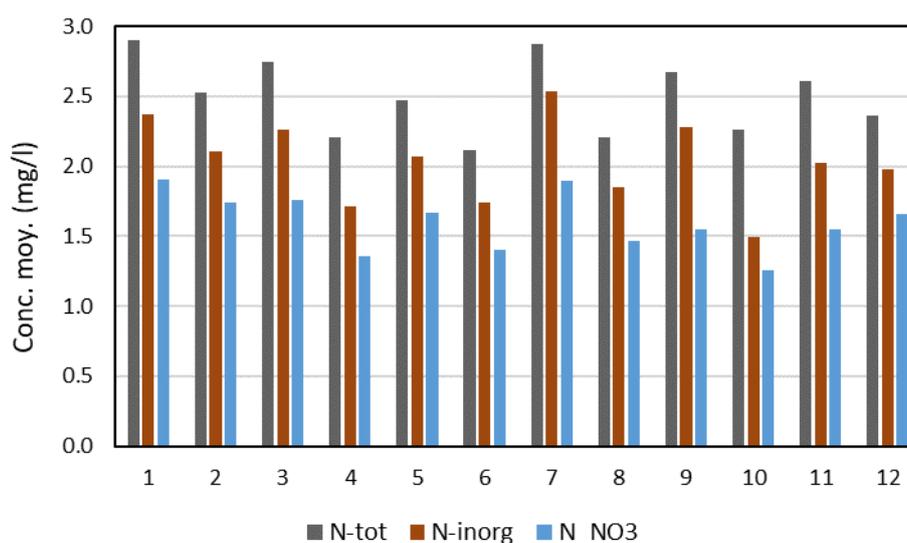


Figure 47 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations d'azote total, azote inorganique et nitrate (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADÉ – eaufrance.fr)

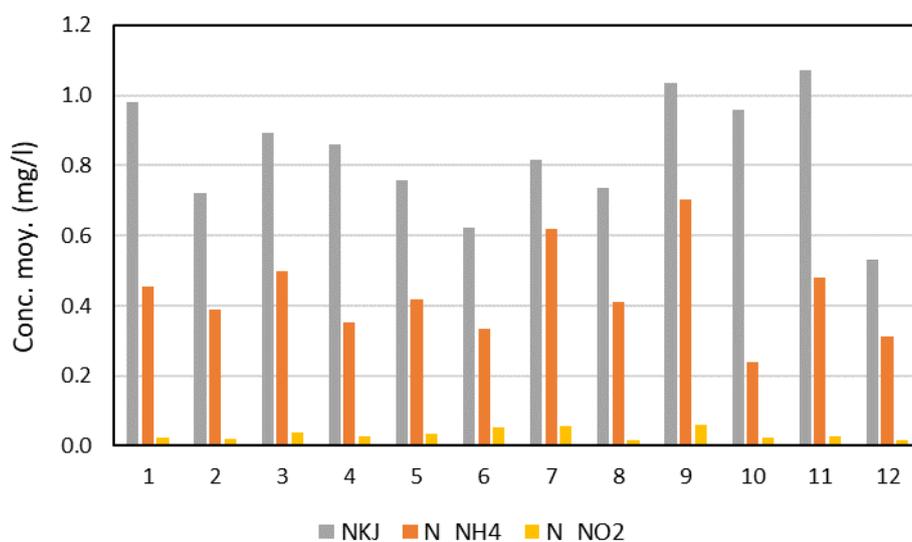


Figure 48 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations d'azote Kjeldahl, ammonium et nitrite (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr)

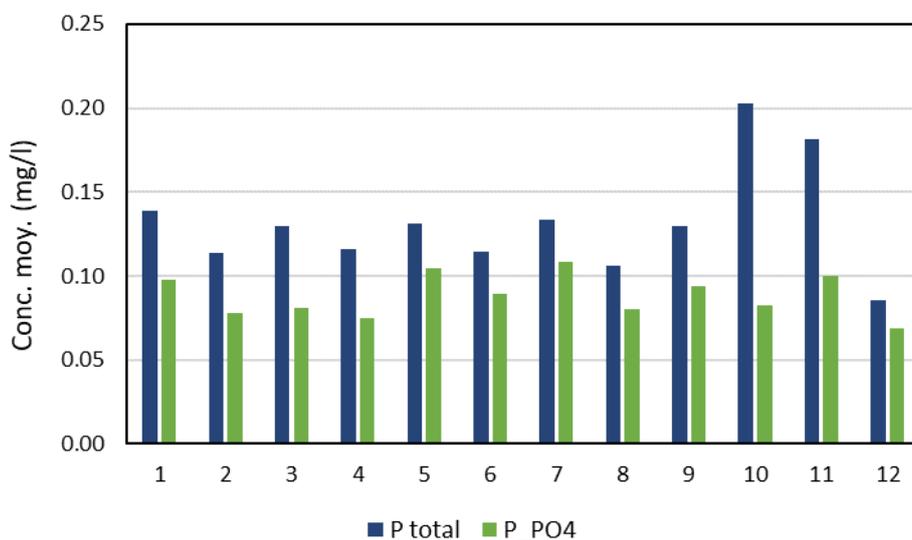


Figure 49 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations de phosphore total et d'ortho-phosphate (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr)

Mentionnons que ceci concerne l'effet de la saison sur les concentrations et non sur les flux de nutriments. Comme les débits sont quant à eux influencés par la saison (débits élevés en automne-hiver et très faibles en été), les flux de nutriment suivent une tendance équivalente. Il n'est cependant pas possible de présenter des figures synthétiques équivalentes aux figures ci-avant (regroupant l'information des différents tributaires), puisque l'ordre de grandeur des débits de ces différents tributaires n'est pas identique.

→ L'effet marqué de la saison observé sur les MES, et moindrement sur le phosphore total et l'azote total Kjeldahl, semble temporellement relié aux crues des épisodes météorologiques méditerranéens. Comme la dépendance de la concentration au débit est prise en compte dans les méthodes de calcul par classes de débits, il ne paraît pas pertinent de chercher à prendre aussi en compte l'effet de la saison.

3.4. Evolution des concentrations durant les crues

Les données de concentrations correspondant à un échantillonnage complet d'une crue (montée de crue, pic et décrue) ont été mises en graphiques. La Figure 50 présente la variation conjointe des MES et du débit durant ces crues. L'évolution des MES ne présente pas toujours (seulement 6 fois sur 11) la même évolution (avec augmentation puis diminution) que le débit. Les variations de qualité différentes de celles du débit sont encadrés en rouge.

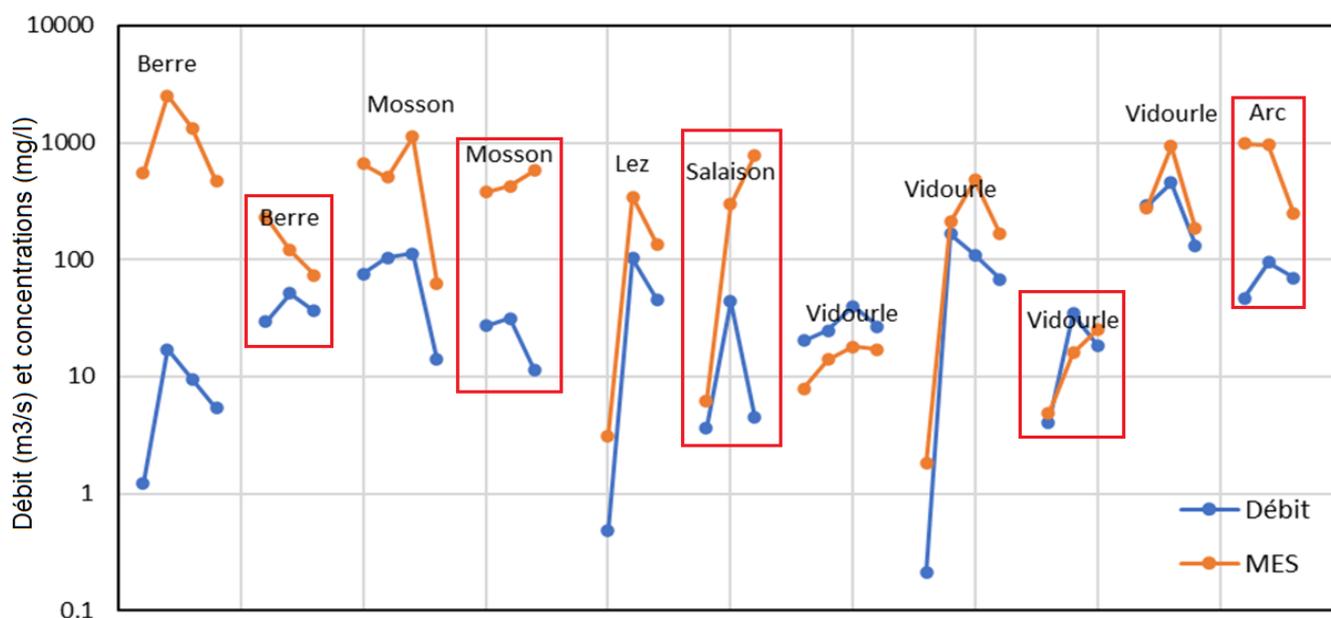


Figure 50 : Variation conjointe des MES et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

La Figure 51 présente l'évolution conjointe de l'azote total avec le débit. Pour ce paramètre, l'évolution montre à peu près la même chose : seules six à huit crues montrent une évolution semblable (augmentation puis diminution).

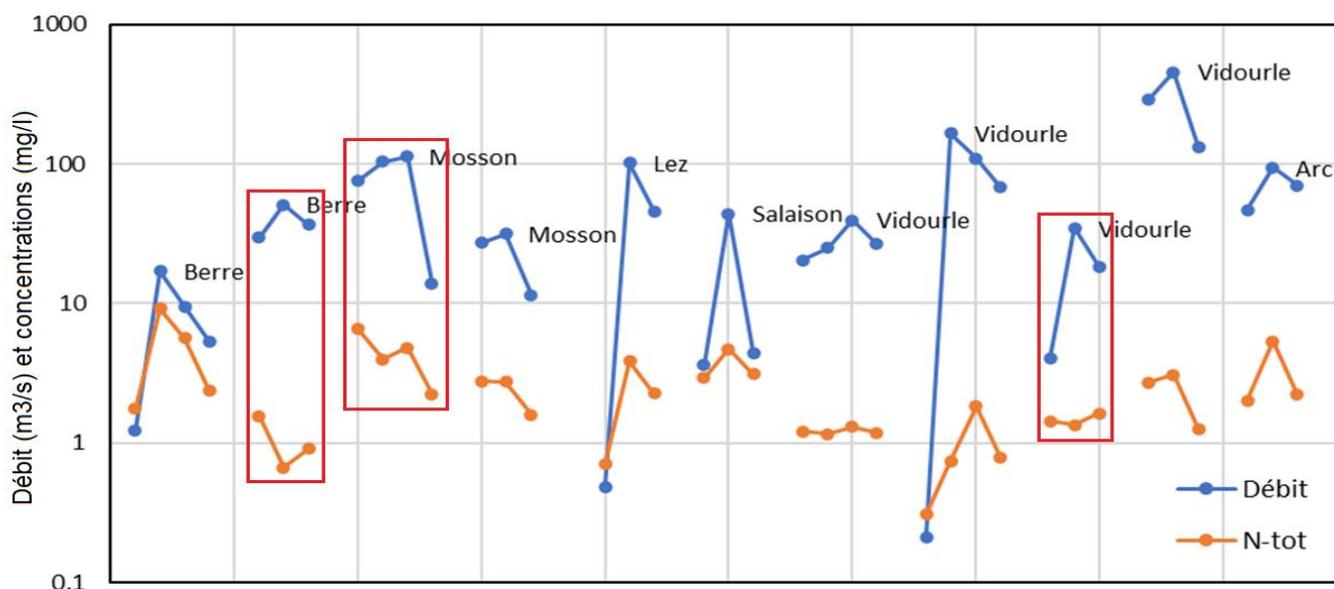


Figure 51 : Variation conjointe de l'azote total et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

Il en est à peu près de même pour l'azote Kjeldahl (Figure 52), avec sept crues présentant l'évolution attendue.

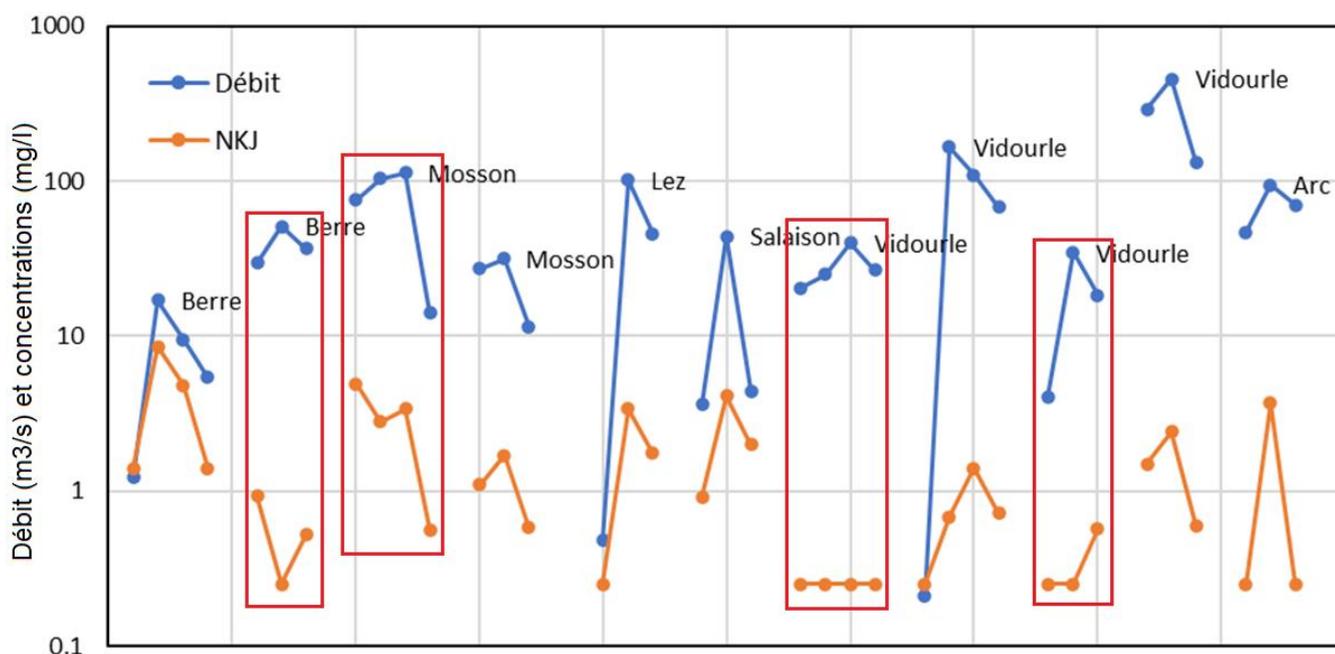


Figure 52 : Variation conjointe de l'azote Kjeldahl et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

Pour l'azote inorganique (Figure 53), l'évolution est par contre presque inexistante, les concentrations montrant très peu de variation durant la crue.

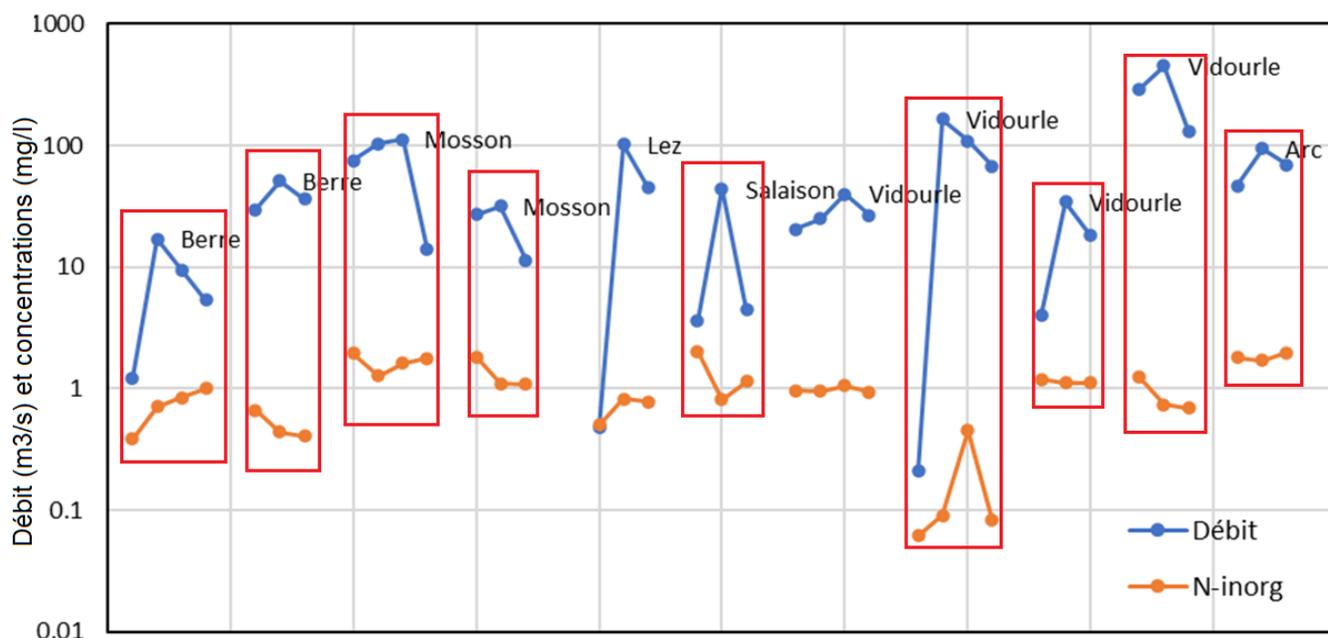


Figure 53 : Variation conjointe de l'azote inorganique et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

Ceci est également le cas pour le nitrate, principal composant de l'azote inorganique (Figure 54).

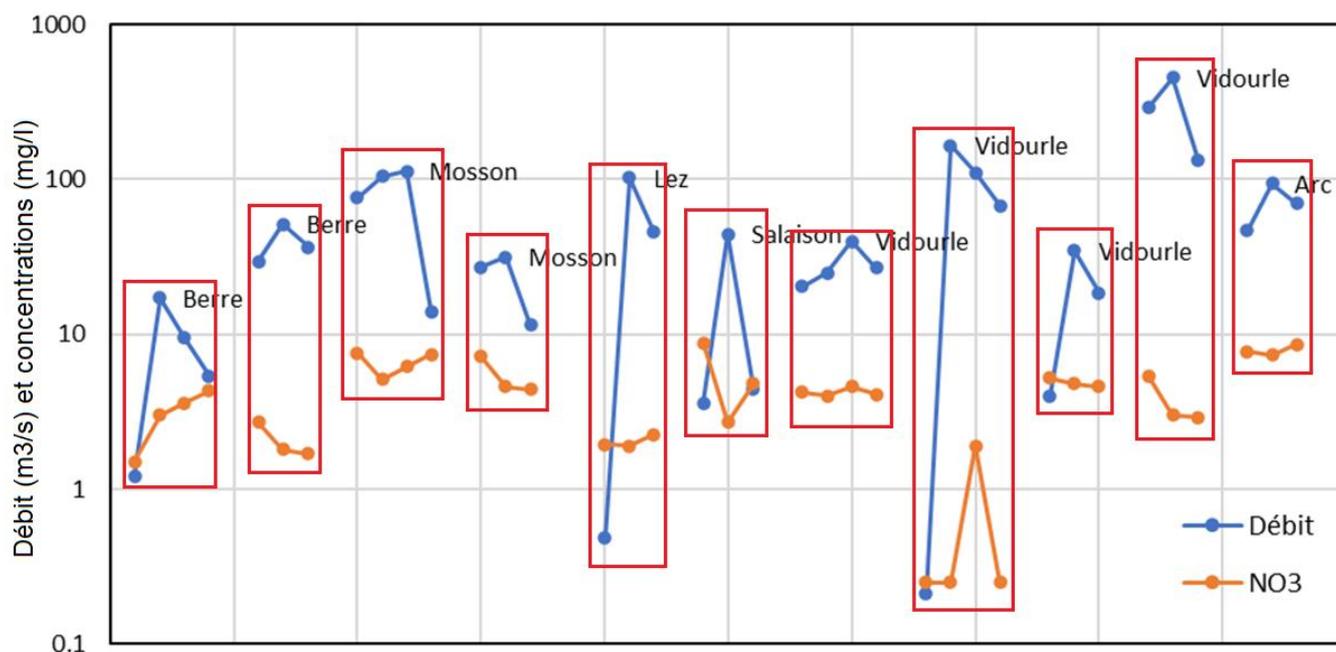


Figure 54 : Variation conjointe des nitrates et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

Le phosphore total (Figure 55) montre une évolution des concentrations assez semblable à celle de l'azote Kjeldahl (avec 5 ou 6 crues montrant l'évolution attendue).

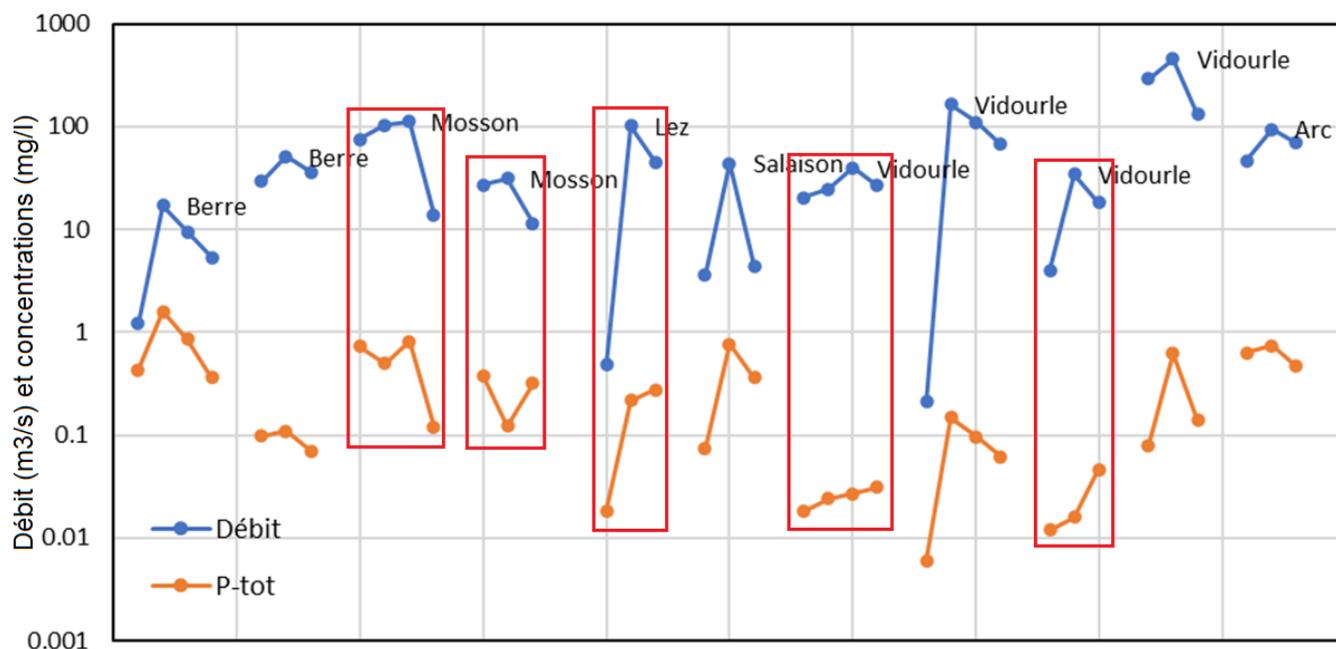


Figure 55 : Variation conjointe du phosphore total et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

L'ortho-phosphate (Figure 56) montre par contre quant à lui une évolution semblable au nitrate.

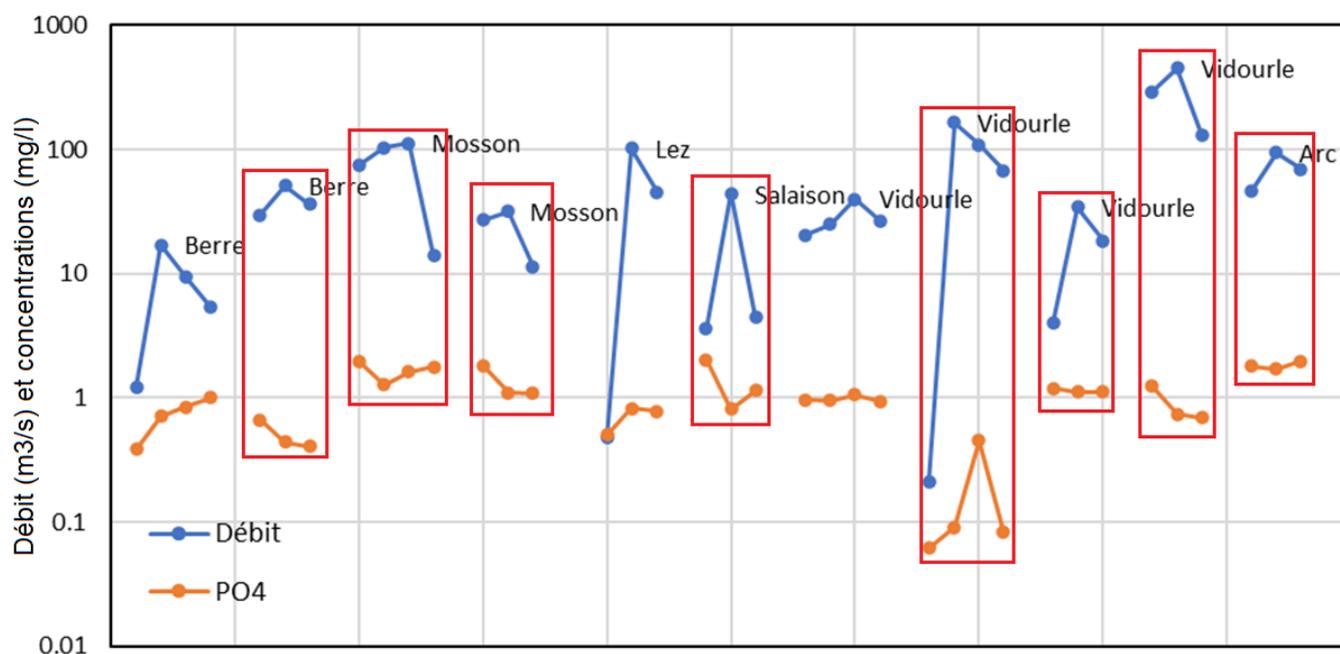


Figure 56 : Variation conjointe de l'ortho-phosphate et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADÉ et HYDRO – eaufrance.fr)

Les différentes crues sélectionnées montrent une évolution des concentrations assez peu comparable à celle du débit. Les MES, l'azote total, l'azote Kjeldahl et le phosphore total ne montrent l'évolution attendue que dans la moitié des cas environ. L'azote inorganique, le nitrate et l'ortho-phosphate montrent peu ou pas d'évolution durant la crue.

Les données de crues ne comportant qu'un échantillonnage de la phase montée + pic ou de la phase pic + décrue ont également été regardées pour vérifier si l'évolution conjointe des concentrations et débits présentait une logique, au moins statistique. Malheureusement, l'ajout de toutes ces données n'a pas permis de dégager de constats pertinents.

Les suivis réalisés ne mettent pas en évidence de relation claire entre les concentrations des différents paramètres et le moment de l'échantillonnage de l'eau à l'intérieur de la crue.

Tributaire	Principaux constats
Berre	Survenance très rapide du pic (résultant fréquemment en une absence d'échantillon durant la montée) ; globalement peu de variation de concentration durant la décrue, inférieur à un ordre de grandeur ;
Mosson	Pas ou peu de variation durant la montée et peu d'effet durant la descente, sauf après plusieurs heures (le lendemain) ; assez peu de variation sur N et P ;
Lez	Pas ou peu de variation durant la montée ; peu de variation durant la descente, sauf le lendemain ; assez peu de variation sur N et P ;
Salaison	Variations plus marquées (moins sur N que sur P) ; parfois une variation nette durant la montée sur MES et P ;
Vidourle	Bassin très réactif ; parfois une variation durant la montée, moins ou pas sur la descente ;
Arc	Bassin assez peu réactif (pas d'effet 'crue') ; peu de variation sur les concentrations ;

Tableau 6 : Principaux constats issus de la comparaison de l'évolution concomitantes des concentrations et des débits

→ L'ensemble des observations et constats de terrain et l'analyse des données reliées aux crues semblent indiquer qu'il n'est pas requis de différencier les phases de la crue sur les tributaires étudiés pour construire les relations concentration / débit. Dans le cas d'un échantillonnage des crues pour l'acquisition d'informations sur les concentrations, il ne s'avère pas nécessaire de chercher à différencier montée – pic – décrue, puisque les variations de concentration à l'intérieur de la crue peuvent être masquées par d'autres facteurs (intensité et localisation de la pluie, état hydrique initial du sol, pratiques agricoles, ...). **Pour des raisons techniques (et de sécurité du personnel en charge des prélèvements), il semble judicieux de privilégier un échantillonnage peu de temps après le passage du pic de crue (début de décrue).**

3.5. Choix de la moyenne ou de la médiane

Que ce soit pour l'étude des relations concentration / débit ou pour le développement et l'application de la méthode de calcul par les intervalles de débits, il est requis d'utiliser une valeur de concentration représentative du débit. Or pour un débit donné d'un cours d'eau, les concentrations montrent une variabilité qu'il n'est pas possible de relier à un effet particulier (saison, intensité de la pluie, état hydrique du sol, etc.). Il est donc requis d'utiliser une concentration 'moyenne', statistiquement représentative des différentes valeurs possibles.

Différentes grandeurs statistiques permettent de caractériser la valeur représentative d'un groupe de valeurs : moyenne arithmétique, moyenne géométrique, moyenne harmonique, médiane, mode. Selon les cas, l'une ou l'autre de ces grandeurs peuvent être utilisées. Comme le montre la Figure 57, l'utilisation de la moyenne géométrique ou de la médiane fournit une relation MES / débits plus régulière et exploitable. Ces deux méthodes présentent l'avantage de limiter l'effet dominant des valeurs les plus fortes, dont certaines peuvent refléter des problèmes d'échantillonnage ou de pollution ponctuelle.

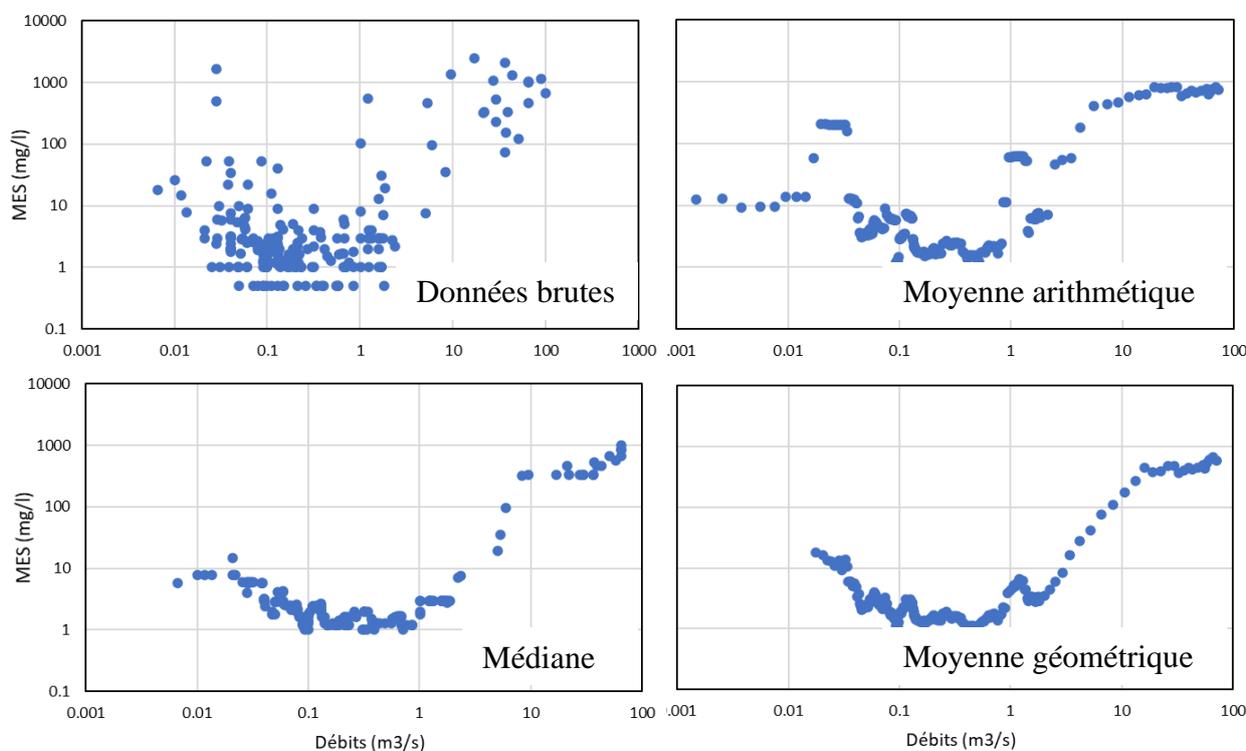


Figure 57 : Comparaison de l'utilisation de la moyenne arithmétique (en haut à droite), de la médiane (en bas à gauche) et de la moyenne géométrique (en bas à droite) pour les concentrations de MES de la Berre

Le recours à la médiane ou à la moyenne géométrique semble pertinent, que ce soit pour l'élaboration d'une relation concentration / débit ou le calcul des concentrations à affecter à chaque classe de débits. L'utilisation de la moyenne géométrique pose cependant le problème des valeurs nulles (pour lesquelles la valeur log est indéfinie).

Les résultats recommandent l'utilisation de la médiane pour l'élaboration des relations concentrations / débits.

3.6. Relation entre concentration et débit

Le Tableau 7 illustre les types de relations qui ont été mises en évidence entre les concentrations de nutriments et les débits pour les différents tributaires étudiés. Précisons qu'il s'agit ici de la relation entre la concentration de nutriment et le débit (et non pas entre le flux de nutriment et le débit). Les flèches représentées dans ce tableau indiquent la tendance de l'évolution observée entre les deux variables (concentration / débit).

	Berre	Mosson	Lez	Salaison	Vidourle	Arc
MES						
N tot						
NKJ						
N inorg						
NO3						
NO2						
NH4						
P tot						
PO4						

Tableau 7 : Types de relations de relations observées entre la concentration des nutriments et les débits (les flèches indiquent les formes d'évolution des courbes – voir Figure 58)

La Figure 58 montre quelques exemples des types de relations observées entre la concentration des nutriments et les débits.

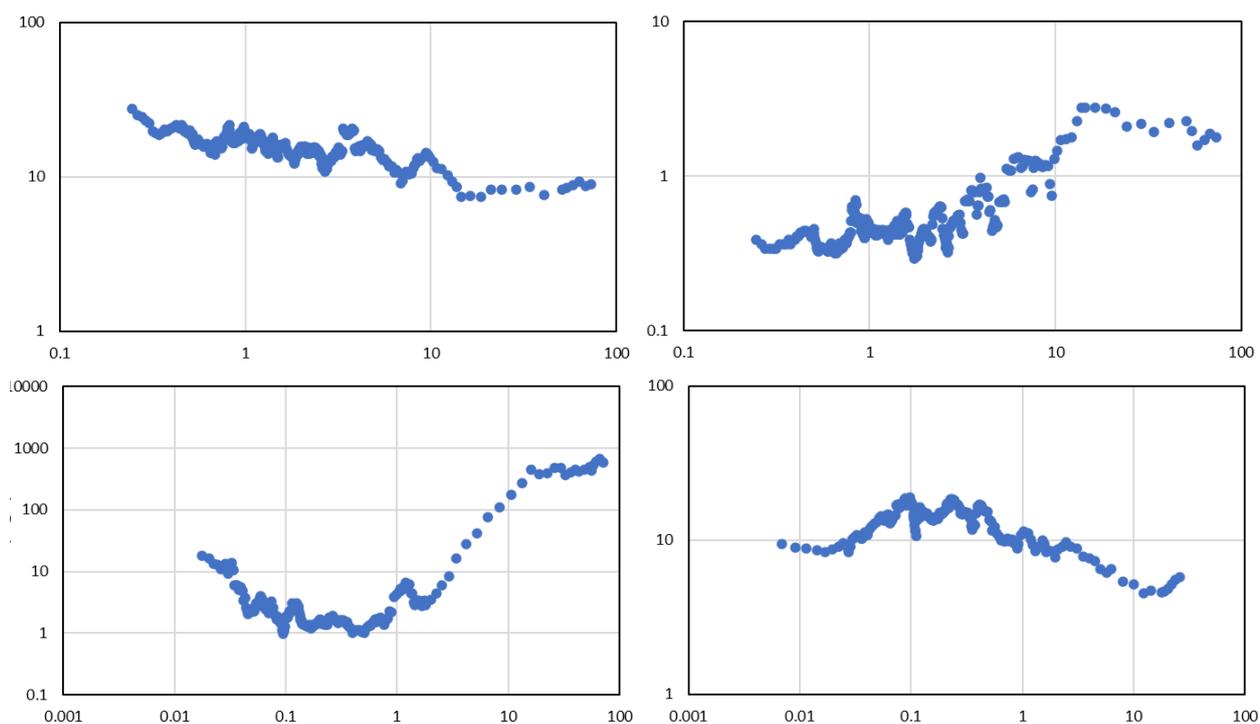


Figure 58 : Exemples de types de relation entre les paramètres et les débits
(exemples de relations globalement décroissante, croissante, en U ou en \cap)

Lorsque les concentrations sont stables, quel que soit le débit, alors les flux augmentent conjointement avec les débits, en relation directe et linéaire avec ces derniers. Lorsque les concentrations augmentent avec le débit, alors les flux ne sont pas linéairement fonction des débits (et les crues exacerbent les flux apportés par rapport à une simple relation linéaire entre débits et flux car le flux augmente bien plus vite que le débit lorsque la relation concentration / débit est croissante). Ceci est en particulier le cas pour les MES, l'azote Kjeldahl et le phosphore, car ces éléments sont présents sous forme particulière et sont donc plus directement contrôlés par l'érosion, et donc par les vitesses d'écoulement et le débit. Dans les deux cas, les crues apportent sur l'année une quantité significative de pollution.

3.7. Relation entre paramètres

Les paramètres ont par la suite été étudiés deux par deux afin de vérifier s'il existe un lien de dépendance entre eux. Ceci pourrait permettre de :

- compléter les séries de données lorsque des paramètres ne sont pas mesurés ;
- transformer les valeurs inférieures aux limites de quantification en valeurs réelles ;
- proposer des relations paramètres – débits ou des valeurs par classes de débits plus robustes ;
- éliminer les valeurs aberrantes ou étonnantes.

Les figures suivantes comparent les valeurs de deux paramètres à la fois, en différenciant les six tributaires étudiés. La présence des données des six tributaires à la fois limite le nombre de graphiques présentés et permet de vérifier également la possible existence d'une corrélation 'universelle', indépendante des spécificités propres d'un bassin versant. Tel que discuté précédemment (Figure 44 et Figure 45), seuls les échantillonnages > 2005 ont été considérés pour le Lez et ceux > 2009 pour le Salaison.

La Figure 59 présente la corrélation entre les MES et l'azote total.

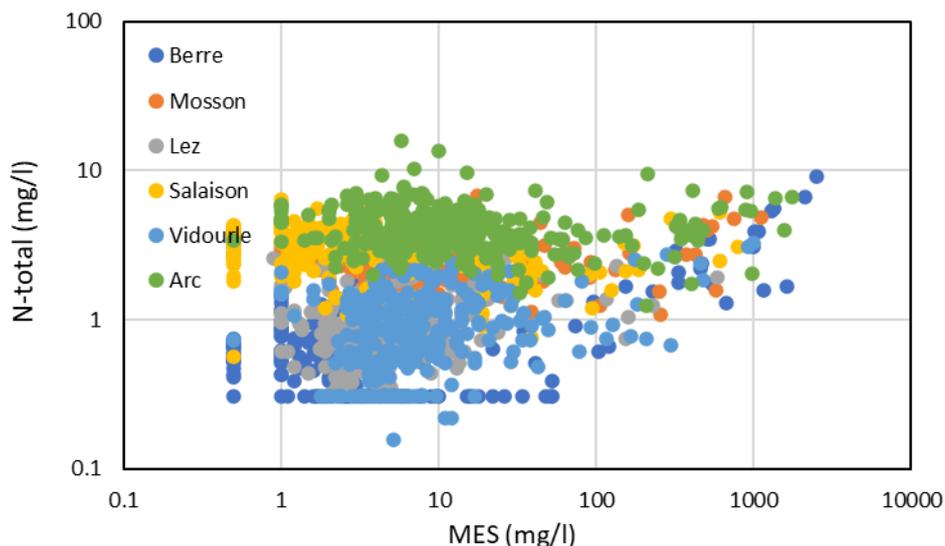


Figure 59 : Comparaison azote total / MES

Bien que les données des six tributaires se superposent, on constate qu'on n'a pas de corrélation nette entre l'azote et les MES. Par exemple, pour l'Arc, l'azote total demeure assez constant, entre 1 et 10 mg/l, alors que les MES varient de (moins de) 1 à (plus de) 1000 mg/l. Il en est de même pour le Salaison et la Mosson. Seule la Berre semblerait présenter une possible relation positive entre les deux paramètres. Les six tributaires présentent une distribution des MES assez semblable, avec des valeurs principalement situées autour de 10 mg/l. par contre, les concentrations en azote total sont très différentes d'un tributaire à l'autre : entre 1 et 10 pour l'Arc, le Salaison et la Mosson, entre 0.2 et 3 pour le Vidourle, le Lez et la Berre. Le rôle de l'occupation anthropique du bassin versant (agriculture, urbanisation) sera discuté au chapitre suivant.

La Figure 60 compare l'azote total Kjeldahl et les MES. Pour rappel, l'azote Kjeldahl concerne la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique (azote oxydable). Une relative relation semble exister entre ces deux paramètres, cependant masquée en partie par les très nombreuses valeurs inférieures à la limite de quantification. Cette relation positive semble observable pour la plupart des tributaires, hormis pour le Lez. Ce problème relatif aux nombreuses valeurs inférieures à la limite de quantification de l'azote Kjeldahl milite pour l'abandon de ce paramètre, tant au niveau du calcul des flux que de la réalisation même des analyses, à moins qu'il soit possible d'en améliorer la technique de mesure pour les faibles valeurs. La figure ne montre pas d'effet 'bassin versant' dans l'importance des concentrations.

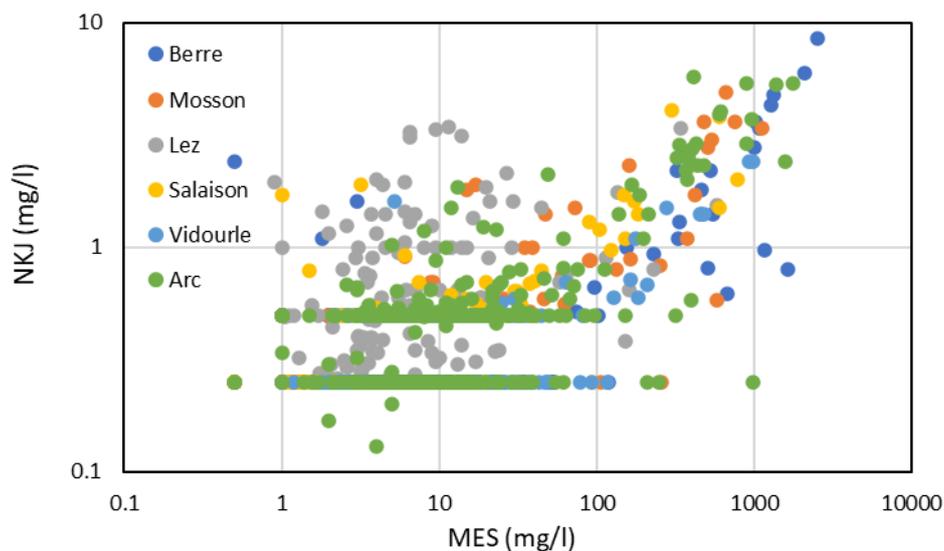


Figure 60 : Comparaison azote Kjeldahl / MES

La Figure 61 compare les concentrations d'azote inorganique (nitrate + nitrite + ammonium) et de MES.

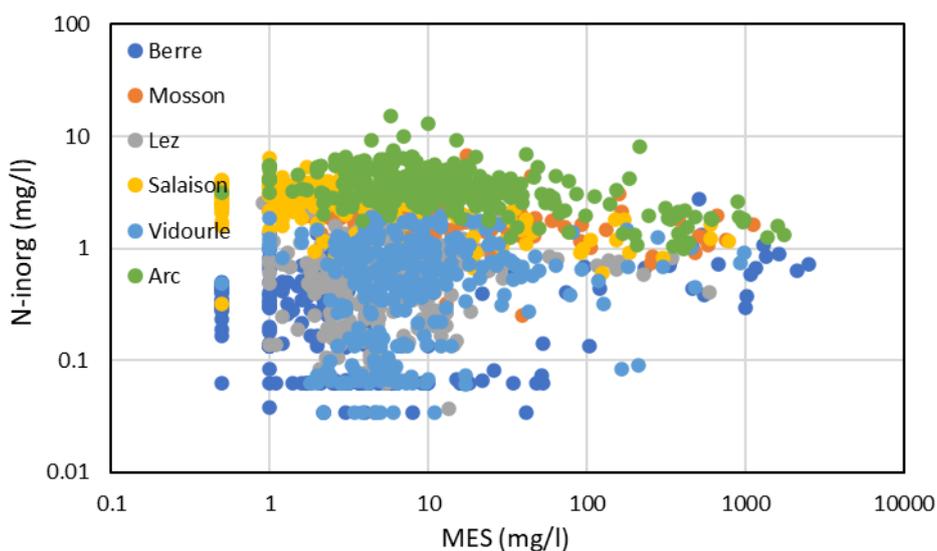


Figure 61 : Comparaison azote inorganique / MES

Le graphique est assez semblable à celui de la comparaison entre l'azote total et les MES (Figure 59), ce qui est logique puisque l'azote inorganique constitue dans la plupart des cas la majeure partie de l'azote total. Ceci est d'ailleurs bien illustré par la relation nette entre azote total et azote inorganique (Figure 62), hormis pour le Lez où les deux paramètres ne semblent pas du tout corrélés. Aucune corrélation n'est mise en évidence entre les MES et l'azote inorganique. La Figure 61 montre (comme pour l'azote total) un effet 'bassin versant' dans l'importance des concentrations d'azote inorganique.

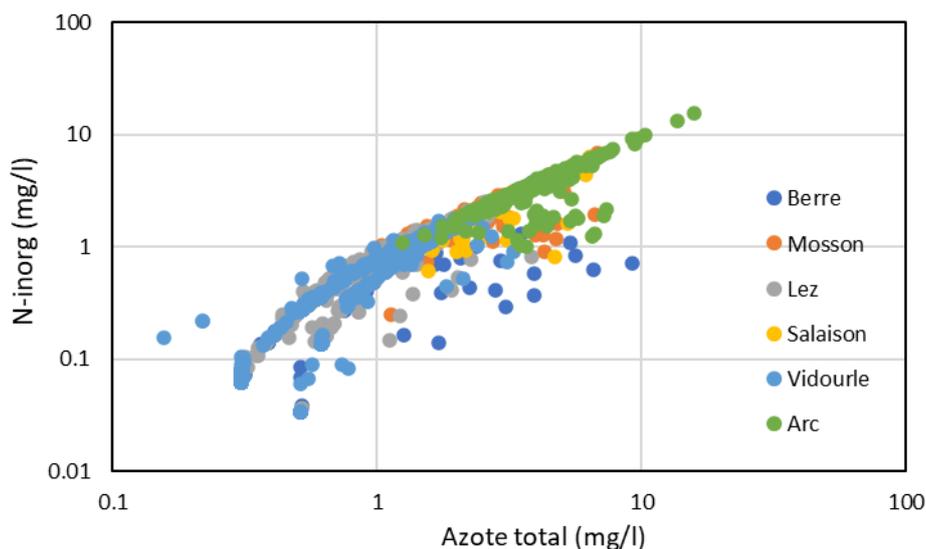


Figure 62 : Comparaison azote inorganique / azote total

La Figure 63 compare les concentrations de nitrate et de MES. Le graphique est assez semblable à celui de la comparaison entre l'azote inorganique et les MES (Figure 61) et entre l'azote total et les MES (Figure 59), ce qui est logique puisque le nitrate constitue la majeure partie de l'azote inorganique (Figure 64) et donc par répercussion de l'azote totale (Figure 65). Aucune corrélation n'est mise en évidence sur la Figure 63. Le graphique montre par contre un effet 'bassin versant' dans l'importance des concentrations de nitrate.

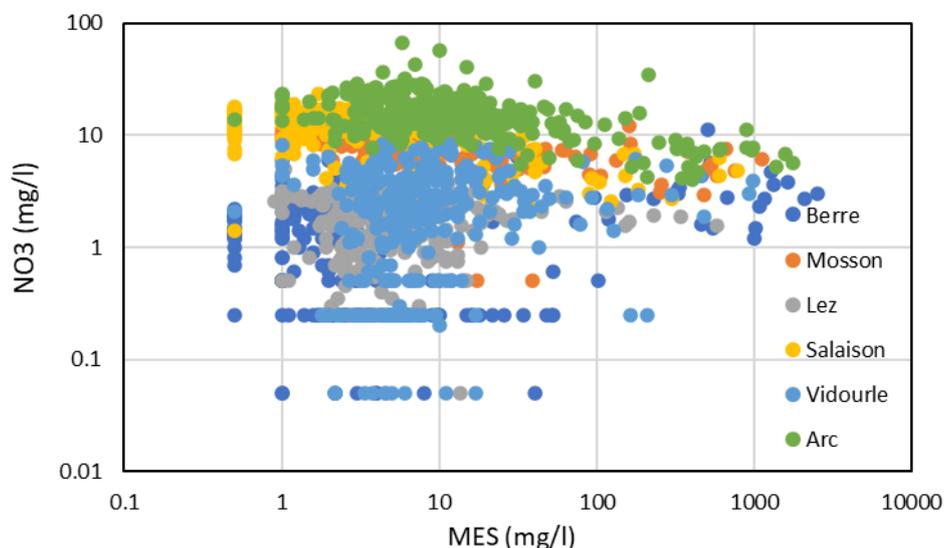


Figure 63 : Comparaison nitrate / MES

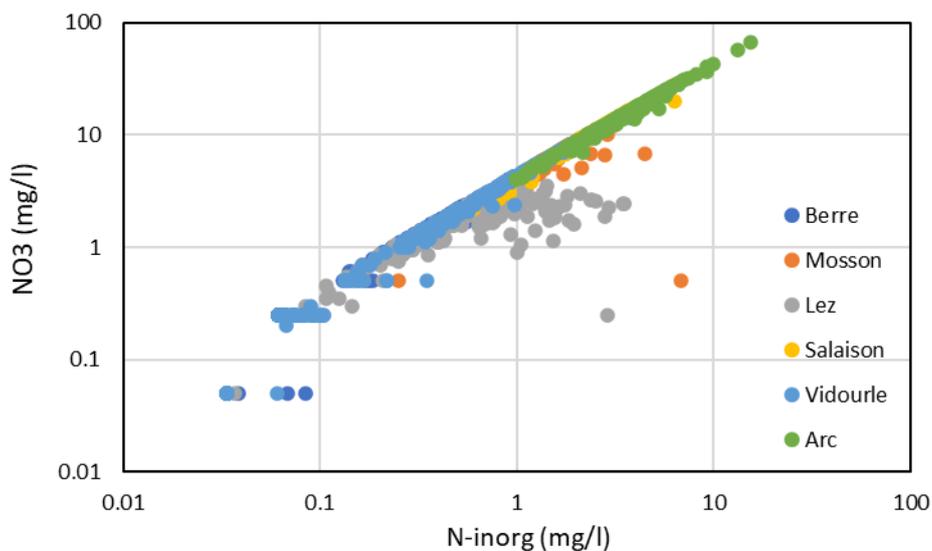


Figure 64 : Comparaison nitrate / azote inorganique

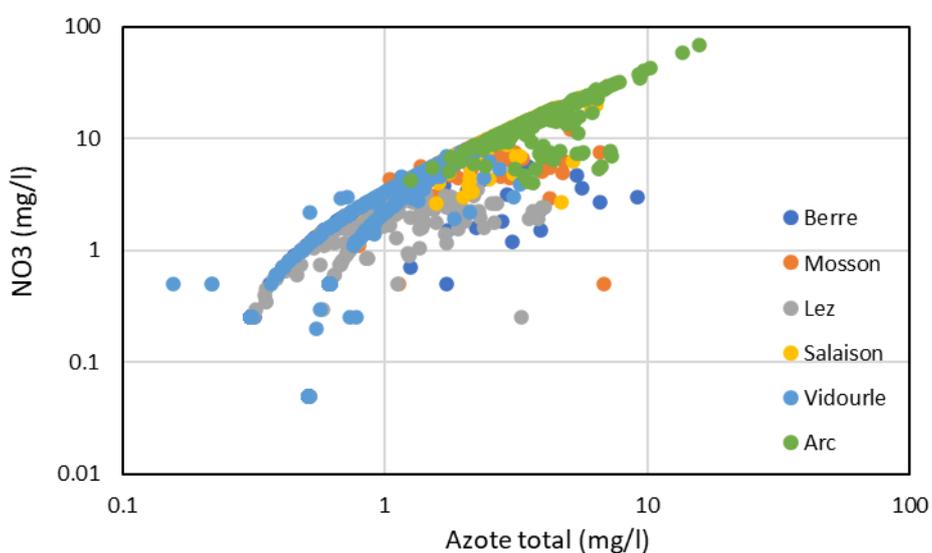


Figure 65 : Comparaison nitrate / azote total

La Figure 66 compare les concentrations de nitrite et de MES et montre l'absence de relation entre ces paramètres. La figure montre cependant toujours un effet 'bassin versant' dans l'importance des concentrations de nitrite, mais moins bien marqué que pour le nitrate et l'azote inorganique du fait de nombreuses valeurs inférieures aux limites de quantification.

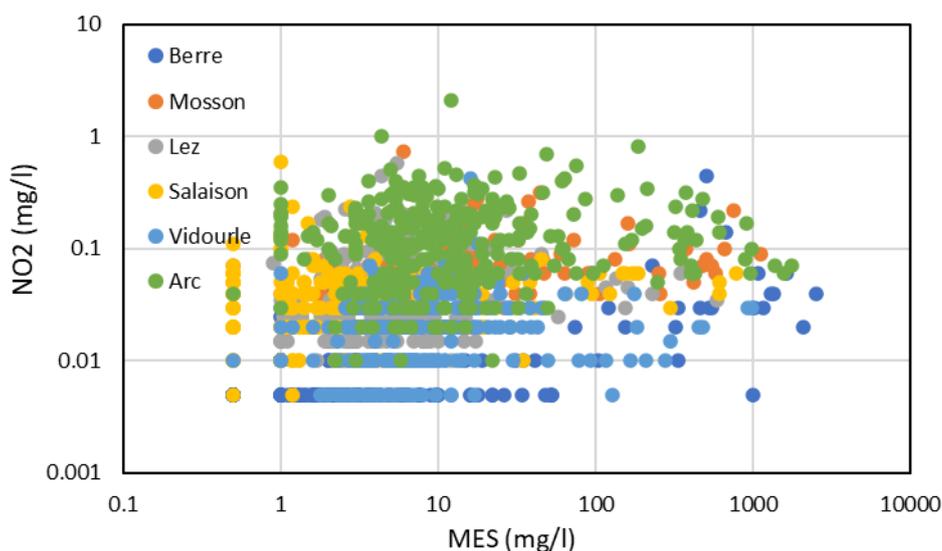


Figure 66 : Comparaison nitrite / MES

Mentionnons par ailleurs que le nitrite montre une faible corrélation avec l'azote inorganique (Figure 67) contrairement au nitrate (Figure 64).

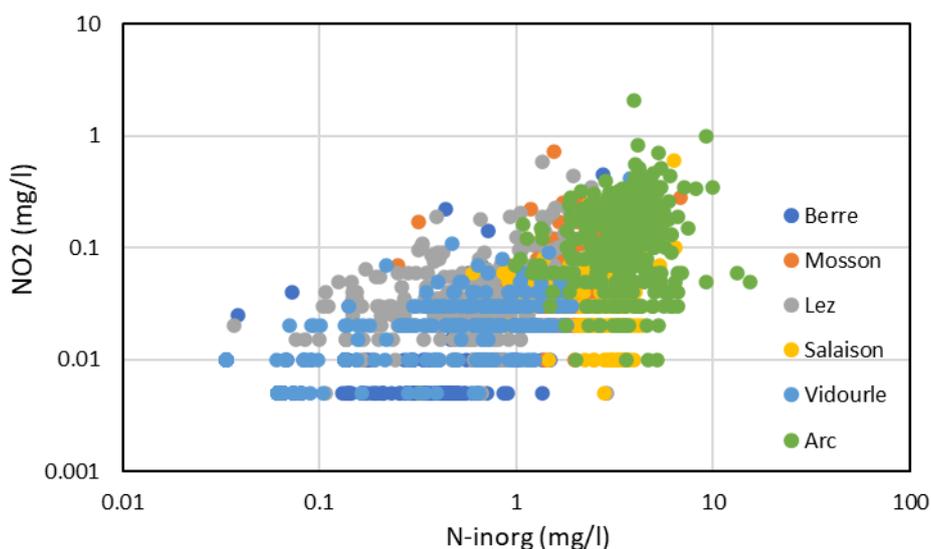


Figure 67 : Comparaison nitrite / azote inorganique

La Figure 68 compare les concentrations d'ammonium et de MES et montre ici encore l'absence de relation entre ces paramètres. La figure ne montre aucun effet 'bassin versant' dans l'importance des concentrations.

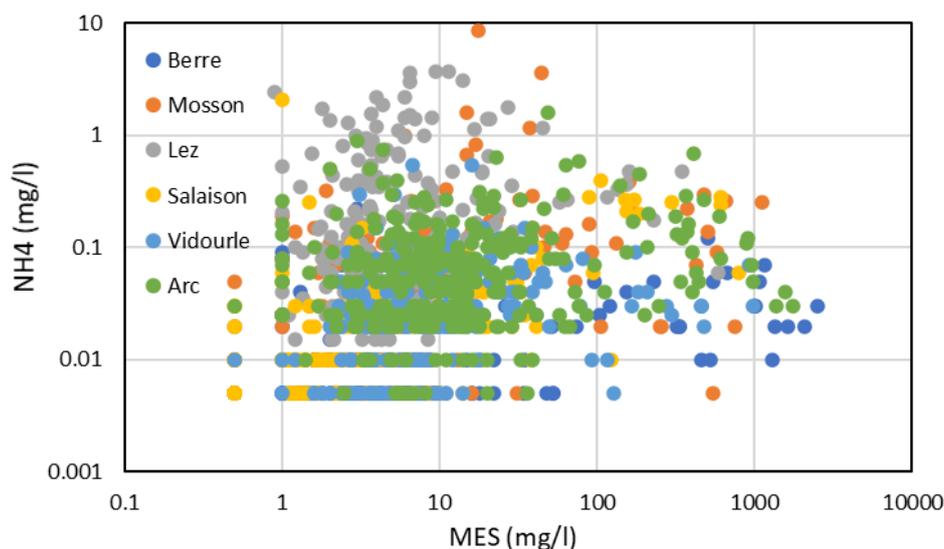


Figure 68 : Comparaison ammonium / MES

Mentionnons par ailleurs que l'ammonium montre une faible corrélation avec l'azote inorganique (Figure 69).

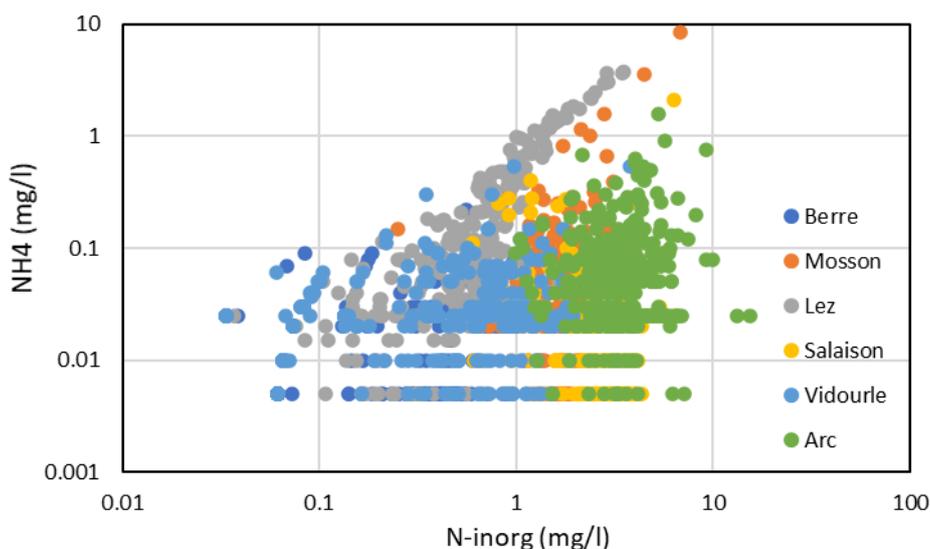


Figure 69 : Comparaison ammonium / azote total

La Figure 70 compare les concentrations de phosphore total et de MES. Le phosphore total comprend des formes dissoutes et particulaires. Le phosphore est généralement adsorbé à la surface des particules constitutives du sol : argiles, matières organiques, oxydes ou hydroxydes de fer ou d'aluminium. L'érosion des sols et la génération de MES est donc une source importante de la présence de phosphore dans les eaux superficielles. Du phosphore, sous différentes formes, est également issu des stations d'épuration auxquelles il est apporté par les eaux usées domestiques et les rejets industriels.

La Figure 70 montre une corrélation plus ou moins marquée entre les concentrations de phosphore total et de MES, plus ou moins bonne selon les BV, et un peu plus nette pour les fortes concentrations de MES (> 50 mg/l). Pour les valeurs de MES plus faibles, la variabilité du phosphore total est très importante. Le phosphore total semble en particulier très dépendant du bassin versant. En premier abord, le phosphore total semble pouvoir être rattaché à la densité urbaine du bassin, selon l'ordre Arc > Lez >

Mosson > Salaison > Vidourle > Berre. La relation plus marquée pour les fortes valeurs semble reliée au phosphore particulaire (adsorbé sur les MES).

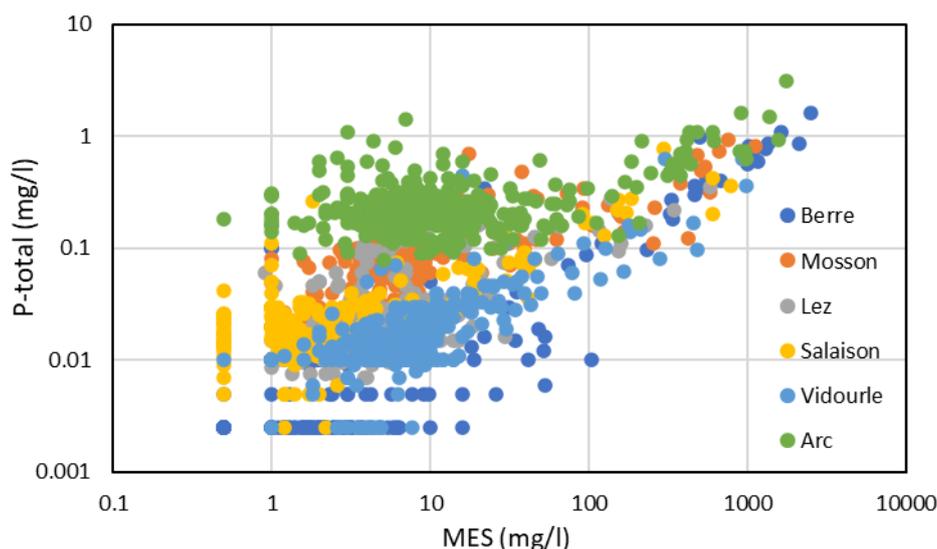


Figure 70 : Comparaison phosphore total / MES

La Figure 71 compare les concentrations d'ortho-phosphate et de MES. Aucune corrélation n'est mise en évidence entre les MES et l'ortho-phosphate (contrairement au phosphore total). Ceci s'explique par le fait que le PO_4 s'adsorbe très peu sur les MES et n'est donc pas relié à leur abondance. On note par contre le même effet 'bassin versant' que pour le phosphore total.

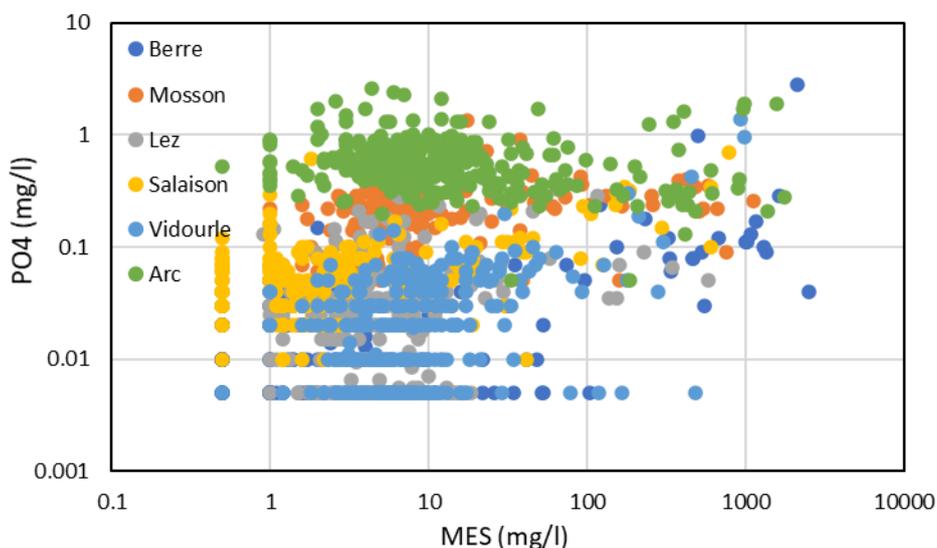


Figure 71 : Comparaison ortho-phosphate / MES

Les concentrations d'ortho-phosphate dans l'eau sont liées à la dégradation de la matière organique d'origine urbaine ou agricole, aux rejets urbains et industriels de polyphosphates et au lessivage des engrais agricoles. Notons la relation plus ou moins bonne existant entre l'ortho-phosphate et le phosphore total (Figure 72).

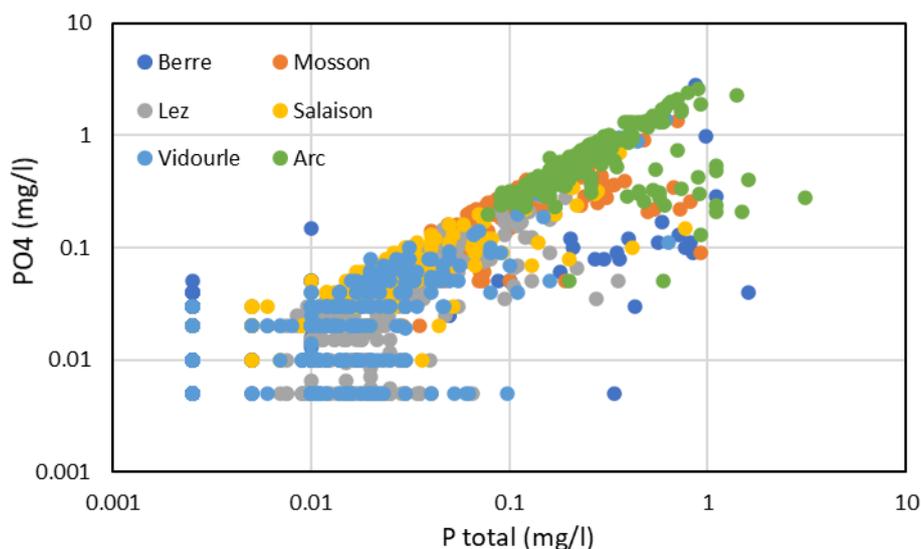


Figure 72 : Comparaison ortho-phosphate / phosphore total

La Figure 73 compare les concentrations d'azote total et de phosphore total. Aucune corrélation ne semble réellement observable à l'échelle d'un tributaire donné, mais une corrélation inter bassin, semble observable, ou du moins un effet 'bassin versant' tant au niveau de l'azote total que du phosphore total. Cet effet 'bassin versant' semble lié à l'influence que peuvent avoir certaines caractéristiques du BV sur les concentrations. Par exemple, des pentes plus fortes sont susceptibles de favoriser l'érosion (concentrations en MES) et l'entraînement des reliquats d'engrais (azote et phosphore). Cet effet BV est développé au Chapitre 7 dans le cadre de différentes analyses multivariées.

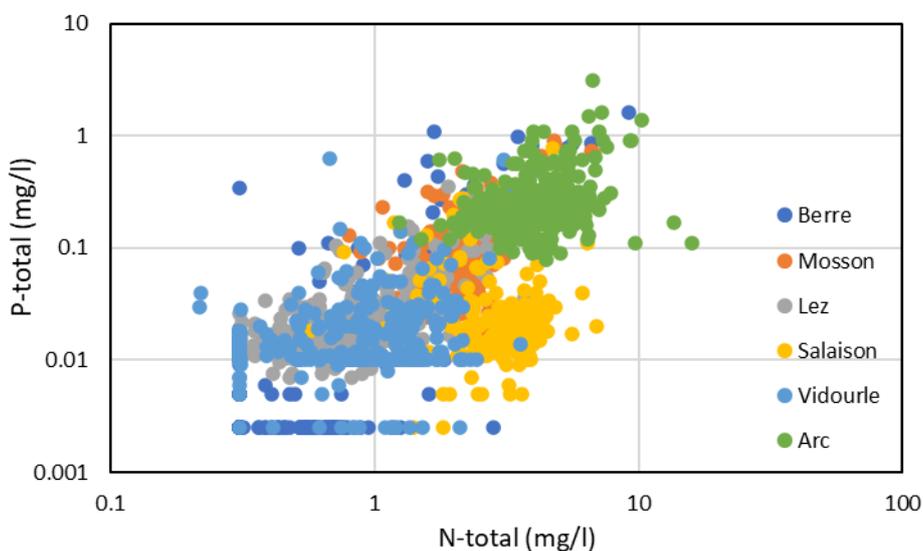


Figure 73 : Comparaison phosphore total / azote total

La Figure 74 compare les concentrations d'azote Kjeldahl et d'ortho-phosphate. Les mêmes constats que pour la relation phosphore total / azote total sont faits : pas de corrélation pour un bassin donné, corrélation inter bassin, effet 'bassin versant'.

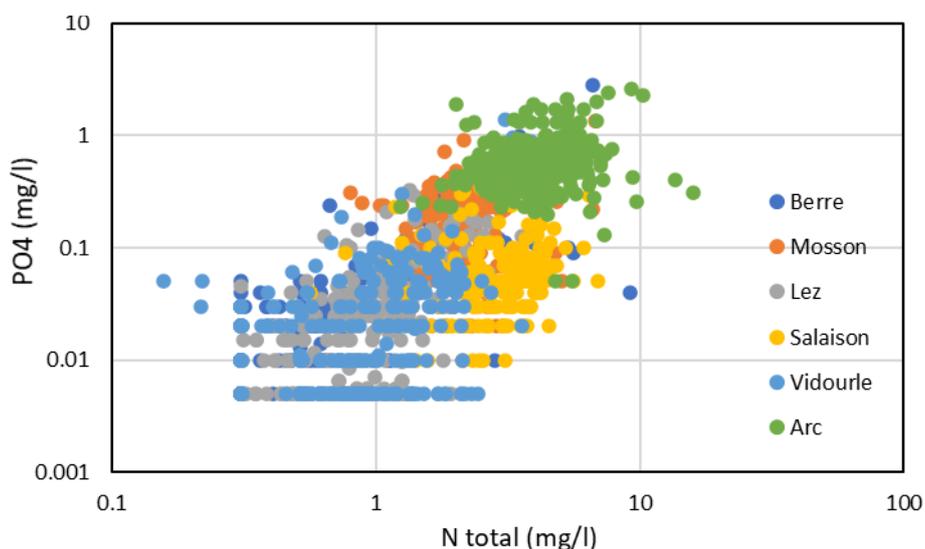


Figure 74 : Comparaison ortho-phosphate / azote total

La Figure 75 compare les concentrations de nitrate et d'ortho-phosphate (les deux principales formes oxydées de l'azote et du phosphore). Les mêmes constats que pour les relations phosphore total / azote total et ortho-phosphate / azote total sont faits : pas de corrélation pour un bassin donné, corrélation inter bassin ou effet 'bassin versant'.

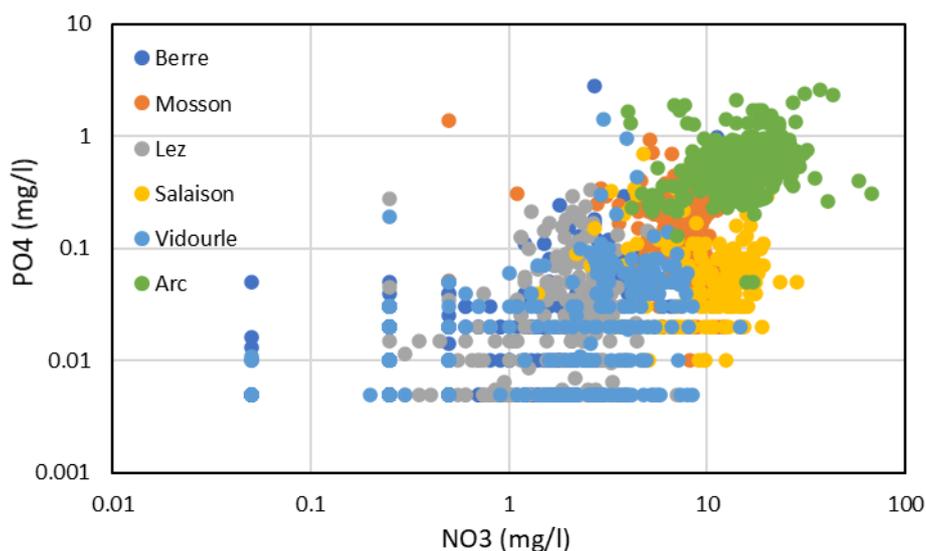


Figure 75 : Comparaison ortho-phosphate / nitrate

La Figure 76 compare les concentrations d'azote Kjeldahl et de phosphore total. Aucune corrélation ne semble réellement observable à l'échelle d'un tributaire donné, mais une corrélation positive inter bassin, semble observable, ou du moins un effet 'bassin versant' tant au niveau de l'azote total que du phosphore total. Rappelons que cette relation est cependant entachée par les très nombreuses valeurs d'azote Kjeldahl inférieures aux limites de quantification.

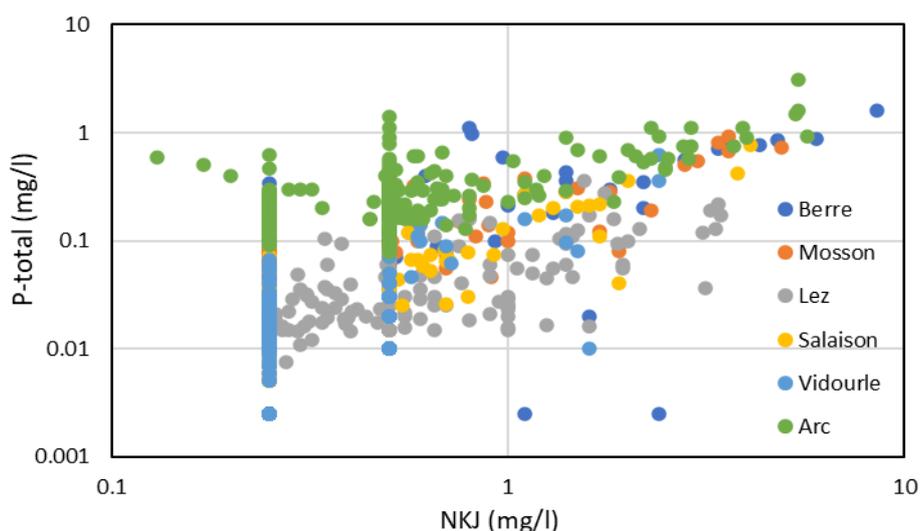


Figure 76 : Comparaison phosphore total / azote Kjeldahl

Le Tableau 8 présente les pourcentages de valeurs inférieures à la limite de quantification (LQ) pour les différents couples 'paramètres / tributaires'. On constate que l'azote Kjeldahl est dans 80% des cas inférieur à la LQ, l'ammonium dans 28% des cas, le nitrite dans 20% des cas et le phosphore total dans 16% des cas. Pour ces échantillons, on ne peut statuer sur le fait que les concentrations sont négligeables. La valeur prise en compte pour ces échantillons dans les calculs (LQ, LQ/2 ou 0) conditionne donc directement les résultats des flux. Pour cette raison, nous recommandons de ne pas tenir compte des paramètres azote Kjeldahl, ammonium et nitrite. À terme, il serait requis de déterminer par des méthodes adaptées et efficaces les paramètres qui s'avèrent pertinents et requis pour l'évaluation des flux.

	MES	NO3	NO2	NH4	NKJ	PO4	Ptot
Berre	23.8%	37.4%	84.6%	65.4%	86.8%	22.5%	71.4%
Mosson	3.3%	0.0%	0.6%	12.7%	84.0%	0.0%	0.0%
Lez	2.3%	7.7%	3.6%	9.0%	54.3%	9.0%	1.4%
Salaison	24.9%	0.0%	3.6%	36.3%	85.0%	0.5%	4.1%
Vidourle	1.7%	24.4%	25.2%	30.8%	93.6%	22.2%	20.5%
Arc	2.8%	0.0%	1.4%	14.0%	73.4%	0.0%	0.0%
Moyenne	9.8%	11.6%	19.8%	28.0%	79.5%	9.1%	16.2%

Tableau 8 : Pourcentage de valeurs inférieures à la limite de quantification

Inès Le Fur (2014) constatait qu'il n'existe pas de distinction entre les valeurs inférieures aux limites de détection et aux limites de quantification dans les fichiers de données. Elle mentionnait ainsi qu'il serait intéressant de pouvoir distinguer les deux pour affiner l'estimation des flux polluants, d'autant plus que la limite de quantification est de 10 à 20 fois supérieure à la limite de détection. Afin d'obtenir les flux les plus justes possible, un effort doit être fait selon l'auteure dans les analyses pour obtenir les limites de détection les plus basses possibles pour les paramètres étudiés et afficher une distinction entre limite de détection et limite de quantification dans les fichiers de données brutes.

L'ensemble des comparaisons menées a montré qu'il existe un nombre limité de corrélations réellement significatives entre les paramètres. Les meilleures corrélations concernent les paramètres 'azote total' – 'azote inorganique' – 'nitrate'. Ce sont les trois paramètres clés des flux d'azote, représentant la très grande part de l'azote présent. Du fait de leur bonne corrélation, l'utilisation de l'un ou l'autre d'entre eux s'avérerait suffisante.

Nitrite et ammonium ne sont corrélés à aucun paramètre et leurs valeurs sont souvent inférieures aux limites de détection / quantification. L'ammonium et le nitrite constituent les premiers stades de la décomposition des matières organiques azotées dans les cours d'eau. Ce sont des substances naturelles qui se forment et disparaissent sans cesse. Leur présence effective dans les eaux n'est que très rarement d'origine naturelle, mais révélatrice d'une saturation en pollution organique des écosystèmes aquatiques. Ces paramètres pourraient donc être écartés du calcul des flux puisque leurs concentrations sont très faibles et qu'au final ils seront ou devraient être oxydés en nitrates.

L'azote total Kjeldahl ne s'avère pas non plus un paramètre d'intérêt du fait que la plupart des valeurs sont inférieures aux limites de détection / quantification. Il pourrait donc être écarté du calcul des flux.

Mentionnons cependant que l'approche GAMELag requiert idéalement la connaissance des apports des différentes formes de nutriments. Eu égard à la faible représentativité de certains paramètres (nitrites, nitrates, azote Kjeldahl), il semblerait pertinent de mener une réflexion commune avec l'Agence de l'Eau et l'IFREMER à ce sujet.

Le phosphore total présente moins de valeurs inférieures aux limites de détection / quantification que le nitrate et que le nitrite. Le constat est à peu près le même pour l'ortho-phosphate. La corrélation entre 'phosphore total' et 'ortho-phosphate' est par ailleurs assez bonne, suggérant que seul le phosphore total pourrait être utilisé pour le calcul des flux.

Les MES s'avèrent être un paramètre clé dans l'évaluation des flux aux lagunes puisque c'est lui qui présente les meilleures relations concentration / débit et qu'il ne présente aucune valeur inférieure aux limites de quantification. Malheureusement, ses corrélations limitées avec les autres paramètres ne permettent pas d'envisager de l'utiliser comme paramètre agrégateur.

4. Etablissement des relations concentration - débit

4.1. Considérations préliminaires

Un ensemble d'analyses a été réalisé sur les données disponibles de débits et de concentrations et présenté dans les chapitres précédents :

- Problèmes des concentrations inférieures aux limites de détection / quantification (section 3.2.1) ;
- Variabilité temporelle des concentrations (section 3.2.2) et des sources de pollution (section 3.2.3) ;
- Importance des concentrations de crue (section 3.4) et de leur évolution durant la crue (section 3.4) ;
- Choix de la moyenne arithmétique, de la moyenne géométrique ou de la médiane (section 3.5).

Ces réflexions ont permis de recommander :

- L'utilisation de la moyenne ou de la médiane mobile (glissante) pour représenter les relations entre concentration et débit (section 3.2.2) afin d'obtenir des relations plus 'lisibles' ;
- L'utilisation de la médiane (section 3.5) plutôt que de la moyenne arithmétique afin de minimiser l'impact des valeurs 'anormales' (a priori 'trop' élevées en l'occurrence) que ce soit pour l'analyse des relations concentration / débit ou pour la méthode de calcul par les intervalles de débit ; rappelons que la moyenne géométrique s'avèrerait également pertinente mais que la présence de valeurs nulles empêche son calcul ;
- L'acquisition de données en temps de crues (section 3.4), mais sans nécessairement chercher à différencier montée, pic et décrue au sein d'une même crue puisque les données disponibles n'ont pas montré d'évolution conjointe logique et exploitable des concentrations et débits au sein d'une crue.

Ces analyses ont également montré que :

- Les paramètres azote total, azote inorganique et nitrate sont très bien caractérisés (très peu de valeurs inférieures aux limites de détection / quantification) et sont fortement corrélés entre eux. Un seul d'entre eux pourrait donc suffire à caractériser la problématique azote.
- L'azote Kjeldahl, le nitrite et l'ammonium présentent des valeurs très souvent inférieures aux limites de détection / quantification, limitant la pertinence de ces paramètres pour les faibles concentrations et la représentativité du calcul de flux qui pourrait en être obtenu.
- L'ortho-phosphate est assez bien corrélé au phosphore total.
- Les différents paramètres ne sont pas très bien corrélés avec les MES, ne permettant pas d'envisager utiliser ce dernier comme paramètre intégrateur de la pollution.

La première étude menée en 2017 sur les données disponibles jusqu'à cette date-là avait testé les méthodes suivantes pour le calcul des flux :

- Méthode de la moyenne pondérée. C'est la méthode historiquement et classiquement la plus utilisée pour le calcul des flux.
- Méthode des classes ou intervalles de débits. Cette méthode peut être automatisée pour le calcul des concentrations moyennes / médianes. Elle requiert de déterminer des classes pertinentes de débits et pour chaque classe des valeurs de concentration représentatives.

- Méthode de la fonction continue (qui peut être considérée comme une méthode par classe avec un nombre infini de classes). Cette méthode requiert l'ajustement d'une fonction continue sur les données de mesures. Cet ajustement est délicat et difficile à réaliser, et impossible à réaliser de façon automatique. Ceci en limite fortement la possibilité d'application opérationnelle et son établissement automatique. Cette méthode n'a donc pas été retenue pour la poursuite de l'étude.
- Méthode de la dernière concentration. C'est la méthode la plus simple à mettre en œuvre puisqu'elle utilise directement la concentration mesurée, considérée constante jusqu'à la mesure suivante. Deux autres méthodes assez semblables existent : la première considère la concentration constante de part et d'autre de la date d'échantillonnage (et non entre deux échantillonnages consécutifs), alors que la seconde considère que la concentration varie linéairement entre deux valeurs consécutives d'échantillonnage. Toutes ces méthodes ne sont valables qu'avec une fréquence élevée de mesures et une variabilité temporelle faible des concentrations.

Sur la base des considérations opérationnelles et de la future application des méthodes retenues, il apparaît que les trois méthodes les plus faciles à mettre en œuvre d'un point de vue opérationnel (applications futures sur les mêmes tributaires ou sur de nouveaux tributaires) et qui peuvent être automatisées sont :

- La méthode de la moyenne pondérée,
- La méthode de la dernière concentration,
- La méthode des classes ou intervalles de débits.

La méthode des moyennes pondérées est basée sur le calcul suivant :

$$F = Q_m \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

où F est le flux (g/s), Q_m le débit moyen (m^3/s) sur la période considérée, Q_i le débit instantané lors de l'échantillonnage (m^3/s) et C_i la concentration (mg/l) observée sur l'échantillon prélevé. Cette méthode procède de la façon suivante :

- On calcule pour chaque période donnée (par ex. pour chaque année) la moyenne des concentrations pondérées par les débits correspondants (en utilisant différents couples $Q_i C_i$) ;
- On calcule le flux massique d'une période donnée (par ex. le flux de l'année) en multipliant la concentration moyenne pondérée par le débit moyen de la période.

La méthode de la dernière concentration consiste à affecter la dernière concentration connue à tous les débits suivants dont les concentrations n'ont pas été mesurées. C'est donc une version simplifiée de la méthode pondérée n'utilisant qu'un seul échantillonnage à la fois. Une méthode un peu différente est parfois utilisée, appliquant la concentration mesurée sur l'intervalle allant de la date équidistante entre l'échantillon considéré et l'échantillon précédent à la date équidistante entre l'échantillon considéré et l'échantillon suivant, autrement dit sur la période temporelle à cheval autour de l'échantillon considéré.

La méthode des intervalles de débit consiste à déterminer des intervalles de débits représentatifs de la gamme possible des débits et d'affecter à chaque intervalle une valeur représentative de concentration. Cette dernière peut être calculée en utilisant la moyenne arithmétique, la médiane ou la moyenne géométrique. Comme la moyenne arithmétique favorise les valeurs fortes et que la moyenne géométrique ne peut être calculée avec des valeurs nulles, la médiane est classiquement préférée.

Les concentrations affectées à chaque intervalle de débits doivent être actualisées de temps à autres, soit parce qu'on dispose de nouvelles données en nombre suffisant pour justifier cette actualisation, soit parce qu'est survenu un changement d'occupation du territoire (par exemple, conversion de

l'agriculture vers des cultures à plus forte utilisation d'azote) ou d'infrastructures (par exemple, nouvelle usine ou suppression d'une station d'épuration).

Différentes approches peuvent être utilisées pour l'établissement des classes de débits :

- Classes de débit spécifiques à chaque cours d'eau : Les intervalles peuvent être
 - réguliers (par exemple tous les 50 m³/s),
 - d'accroissement logarithmique (par exemple 10, 30, 100, 300 m³/s etc.),
 - de même fréquence (les fréquences des débits de la station hydrométrique de référence peuvent être utilisées).

L'accroissement linéaire (intervalles réguliers) favorise les classes de débits les plus élevés. L'approche fréquentielle priorise les débits les plus fréquents, donc généralement les débits faibles. L'accroissement logarithmique répartit les classes de débits sans prioriser les valeurs les plus fréquentes (généralement les plus faibles) ni celles les plus fortes. La courbe de fréquence des valeurs logs des mesures tend à suivre une distribution normale. Les trois méthodes ont leurs avantages et leurs inconvénients. Dans le cadre de cette présente étude, c'est cette dernière méthode qui a été proposée et mis en place.

- Classes de débits communes à tous les tributaires : Les intervalles peuvent être prédéfinis pour tous les cours d'eau de façon régulière (par exemple tous les 50 m³/s), ou logarithmique (ex. limites fixes de 10, 30, 100, 300 m³/s etc.). Ils peuvent aussi être définis de la même façon mais en utilisant les débits spécifiques (m³/s / km²). L'utilisation des débits spécifiques constitue une alternative intéressante car elle permet d'intercomparer entre elles les valeurs déterminées sur différents cours d'eau, voire même peut-être de corriger, compléter ou établir les valeurs pour un cours d'eau mal renseigné en termes de débits et/ou de concentrations. Elle pourrait également simplifier son application dans l'outil de calcul de flux puisque les classes de débits spécifiques seraient 'universelles'.

Inès Le Fur (2014) indiquait dans son étude que les estimations des flux de nitrates pour le Lez, l'Arc et le Vidourle montrent que les flux estimés via la méthode des intervalles de débits et des moyennes pondérées sont assez proches des estimations faites dans les études antérieures (SIEE 2003 ; Gairoard et al. 2012) qui avaient utilisé ces mêmes méthodes. Concernant la méthode des intervalles des débits, Le Fur mentionne qu'elle présente l'avantage de bien prendre en compte la variabilité hydrologique du cours d'eau et de pouvoir s'affranchir des données de concentrations pour estimer les flux (à condition qu'il n'y ait pas d'évolution des apports du bassin versant). Cette méthode étant cependant calculée sur la base de moyennes de concentrations sur plusieurs années, elle ne permet pas de voir l'évolution annuelle des flux. Il conviendrait alors de calculer ces moyennes sur un pas de temps moins important (3-5 ans) à condition d'avoir un nombre de données suffisantes ou de réaliser des moyennes mobiles. Concernant la méthode des moyennes pondérées par les débits, cette dernière est utilisée par de nombreux scientifiques et gestionnaires. Elle est également préconisée par la convention OSPAR (1998). Cette méthode permet de prendre en compte l'évolution des concentrations des paramètres suite à des aménagements sur les bassins versants. Cependant, cette méthode nécessite d'avoir des données annuelles de débits et de concentrations dans les cours d'eau.

Le tableau suivant synthétise les principaux avantages et inconvénients des trois méthodes de calcul des flux présentées ci-avant. Il ressort que ces méthodes permettent des objectifs différents et ne sont donc pas directement comparables. En particulier il est important de noter que la méthode par intervalles de débits ne permet pas d'évaluer l'impact des changements temporelles des sources de pollution et donc des actions mises en place (à moins d'une reprise totale de la détermination des concentrations par classes de débits).

Ce tableau montre qu'il n'y a pas de méthode parfaite mais des méthodes adaptées à chaque situation. Ceci montre également qu'on ne peut mélanger les approches ou faire la moyenne des flux obtenues avec chacune d'elles. Il semble pertinent de continuer à travailler avec les trois méthodes, mais en gardant bien à l'esprit que chaque méthode est en particulier pertinente et spécifique à un enjeu donné : comparaison inter bassin, évaluation purement temporelle, comparaison inter année.

Méthode de calcul des flux	Objectifs du calcul des flux	
	Comparaison inter-bassins	Comparaison inter-années
Moyenne pondérée	Nécessite un nombre d'échantillons suffisant et représentatif.	Pertinent puisque prenant en compte les concentrations au fur et à mesure.
Dernière concentration	Nécessite des suivis (échantillons) homogènes et de même fréquence sur tous les bassins.	Pertinent puisque prenant en compte les concentrations au fur et à mesure.
Classes ou intervalles de débits	Vraisemblablement la meilleure méthode car mettant à profit l'ensemble des données disponibles. S'affranchit des problèmes d'échantillonnages discontinus ou irréguliers. Méthode la plus à même de tenir compte (statistiquement) des données de crues.	Permet de comparer les apports annuels à la lagune et d'évaluer l'impact des changements de régime hydrologique. Ne permet pas d'évaluer l'impact des changements survenant au niveau des sources de pollution et donc des actions mises en place.

Tableau 9 : Principaux avantages et inconvénients des trois méthodes de calcul des flux étudiées

Selon les objectifs visés (comparaison inter-bassins sur les mêmes années ou inter-années sur un même bassin), les méthodes à préconisées ne sont pas les mêmes. Dans le tableau ci-avant, la méthode indiquée en bleu est celle la plus pertinente et adaptée à l'enjeu posé. La méthode indiquée en vert apporte des résultats corrects même s'ils ne sont pas les meilleurs. La méthode indiquée en orange ne paraît pas adaptée à l'enjeu, voire peut conduire à un résultat inadapté.

4.2. Relations MES - Débit

Pour chaque type de nutriments et pour chaque bassin versant, un graphique a été construit entre les concentrations médianes mobiles et les débits correspondants. Dans un premier temps, les débits sont classés de façon croissante (du plus faible au plus fort). Pour un débit donné, la concentration médiane du paramètre étudié est calculée à partir des concentrations des 10 débits voisins.

La Figure 77 présente la relation entre les MES (valeur médiane glissante sur 10 valeurs consécutives de débits classés) et les débits spécifiques mesurés sur les six tributaires étudiés.

Les six courbes présentent des allures assez semblables, avec une moitié gauche relativement constante (voire parfois descendante dans sa toute première partie), puis une seconde partie montrant une forte augmentation des concentrations, avec parfois une stabilisation plus ou moins marquée en fin d'évolution.

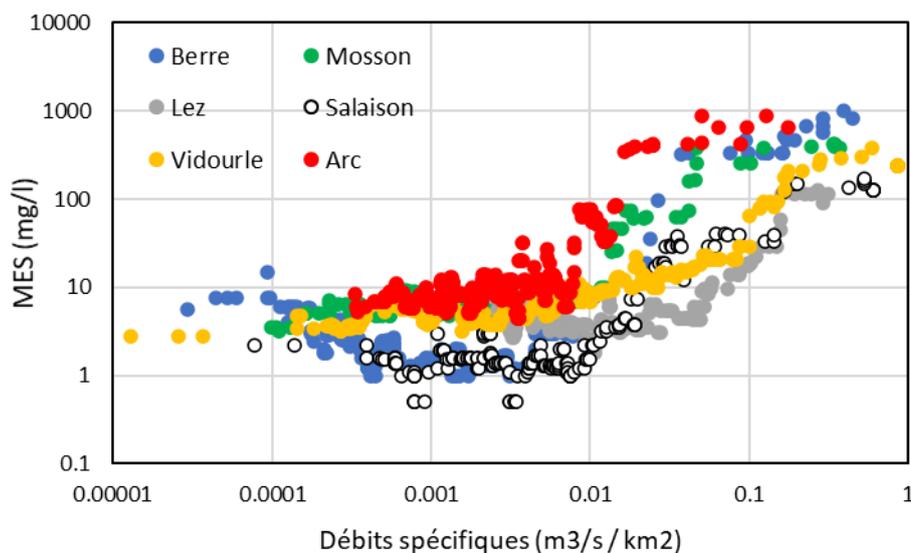


Figure 77 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

Les courbes des trois tributaires de l'Agglomération de Montpellier sont assez semblables (Figure 78), mais avec des différences particulières. Le Lez, du fait de l'apport d'eau par sa source karstique et par le canal BRL pour le soutien d'étiage, ne présente pas de faibles débits spécifiques comme les deux autres bassins. La courbe du Lez s'en trouve conséquemment décalée vers la droite. A l'inverse, la courbe de la Mosson paraît décalée vers la gauche. Ceci rejoint le constat effectué précédemment, à savoir que le cumul des débits de la Mosson est bien plus faible que celui des pluies efficaces tombant sur ce bassin. Finalement, la courbe du Salaison présente pour les débits faibles et moyens des concentrations bien plus faibles que les deux autres bassins versants. Ceci pourrait être dû à la plus forte urbanisation des bassins du Lez et de la Mosson, génératrice de MES.

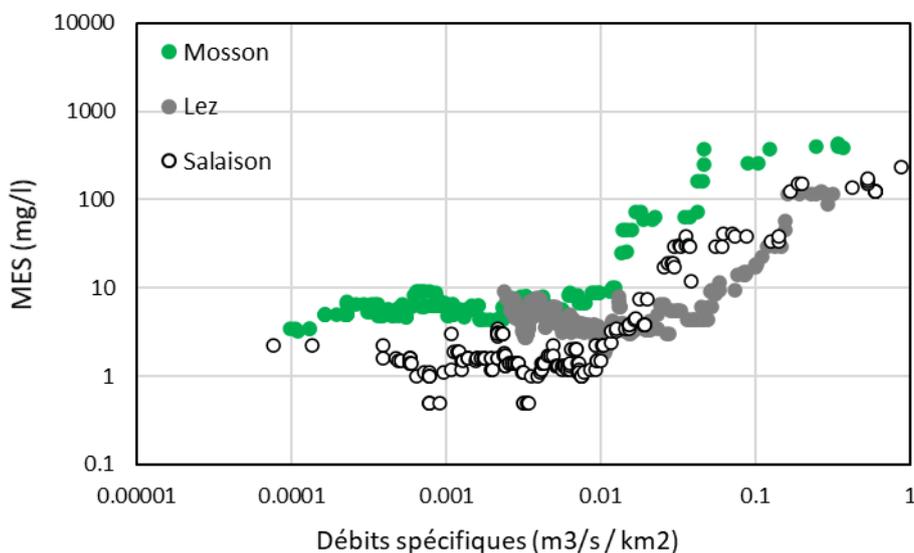


Figure 78 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Lez et du Salaison

Les courbes (Figure 79) de la Berre et de l'Arc sont assez semblables (bien que décalées), alors que celle du Vidourle se différencie plus nettement. La Berre présente pour les débits faibles et moyens des concentrations plus faibles que celles de l'Arc, ce que l'on peut vraisemblablement attribuer au plus faible taux d'anthropisation de ce bassin (la densité de population étant très faible sur la Berre). La courbe du Vidourle croît quant à elle de façon beaucoup plus régulière que les autres, l'inflexion survenant autour de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ étant bien moins marquée que celles observées pour les autres tributaires.

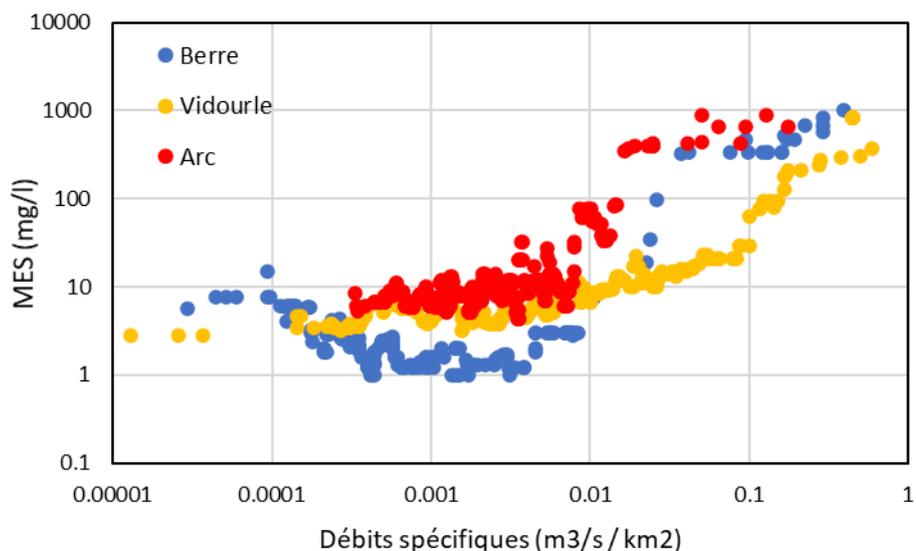


Figure 79 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Vidourle et de l'Arc

Les courbes du Lez, du Salaison et du Vidourle sont assez proches (Figure 80), aux différences évoquées précédemment, dont en particulier les débits légèrement plus importants du Lez du fait des apports de la source du Lez, du canal BRL et d'une exacerbation du ruissellement en contexte urbain.

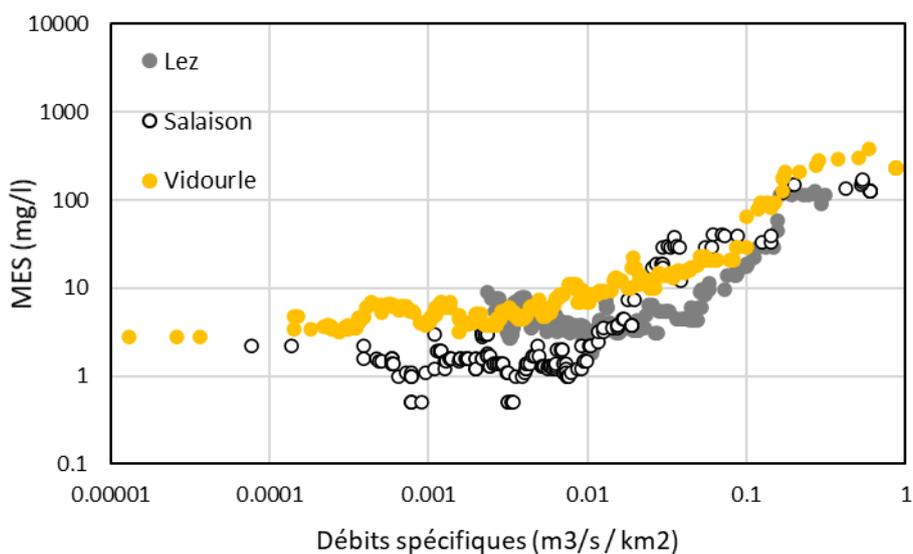


Figure 80 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique du Lez, du Salaison et du Vidourle

Notons que l'Arc et la Mosson présentent des courbes assez semblables (Figure 81), sans qu'une raison n'en soit trouvée.

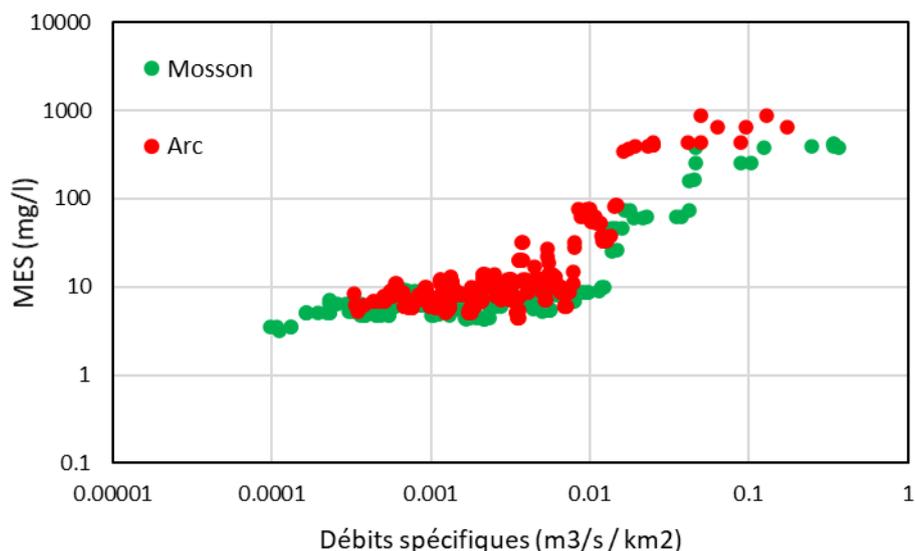


Figure 81 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson et de l'Arc

4.3. Relations Azote - Débit

La Figure 82 présente les relations entre l'azote total et le débit spécifique pour les six tributaires. Les courbes montrent des allures différentes, certaines étant plus ou moins constantes et d'autres plutôt croissantes. Notons que les variations sont cependant bien plus faibles (un ordre de grandeur au maximum) contrairement à celles observées pour les MES (jusqu'à trois ordres de grandeur).

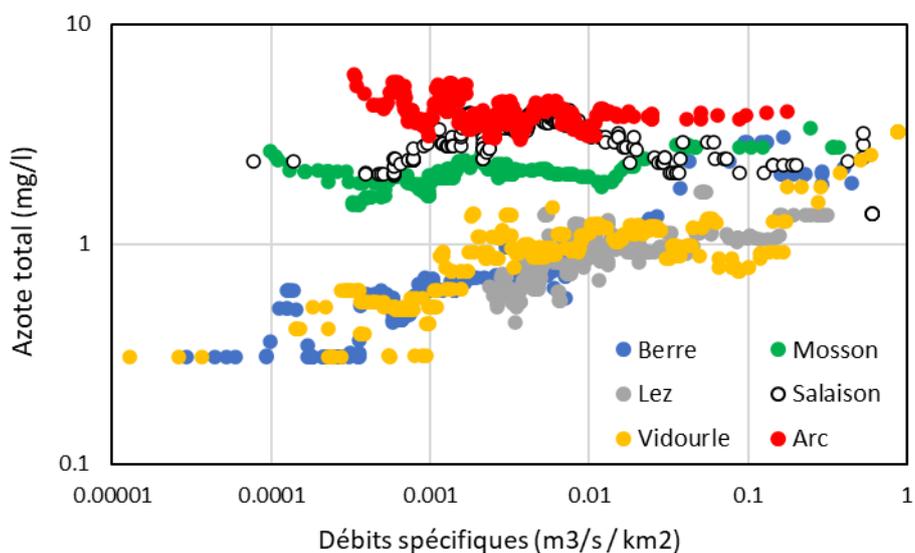


Figure 82 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

Les concentrations de la Mosson, du Salaison et de l'Arc (Figure 83) sont plus ou moins constantes (courbes plus ou moins plates), avec une variation de quelques mg/l au maximum.

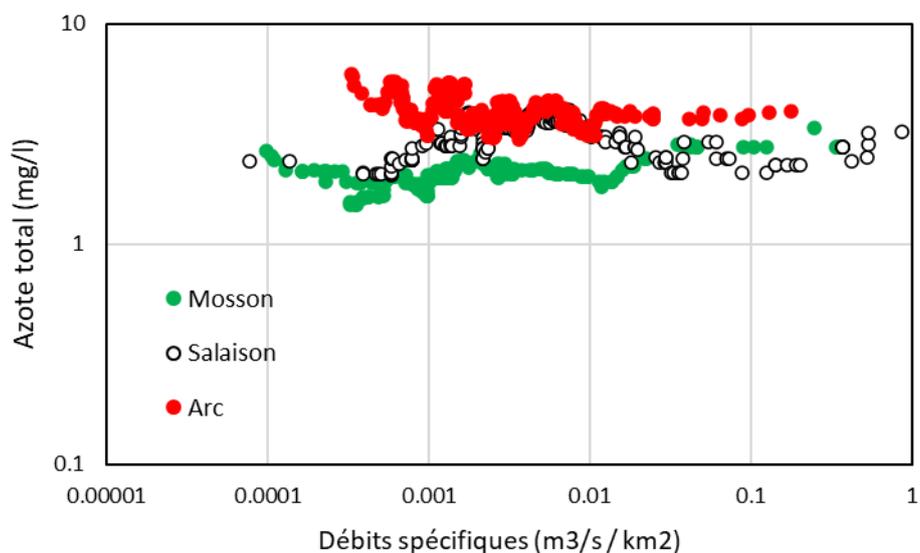


Figure 83 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Salaison et de l'Arc

Les courbes de la Berre, du Lez et du Vidourle (Figure 84) sont quant à elles globalement croissantes et assez semblables.

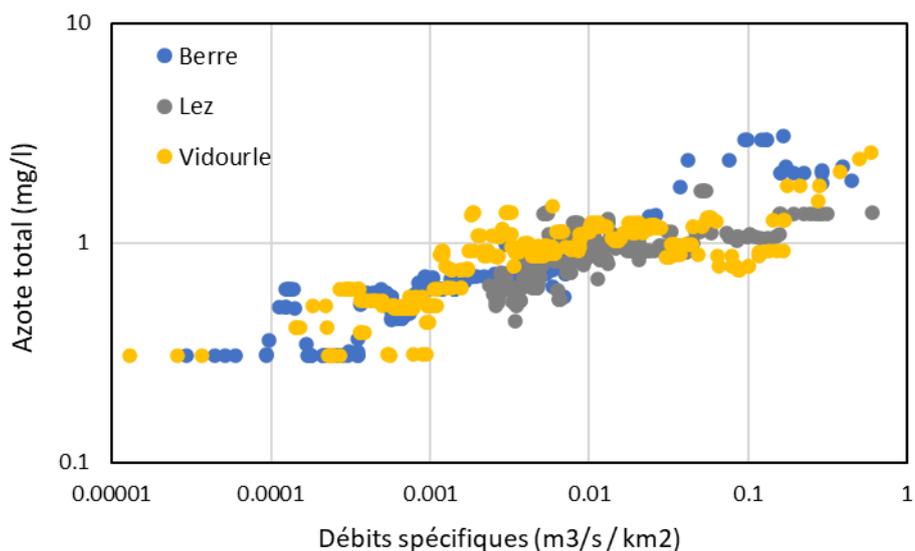


Figure 84 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Lez et du Vidourle

Les mêmes constats s'appliquent pour l'azote inorganique (Figure 85, Figure 86 et Figure 87).

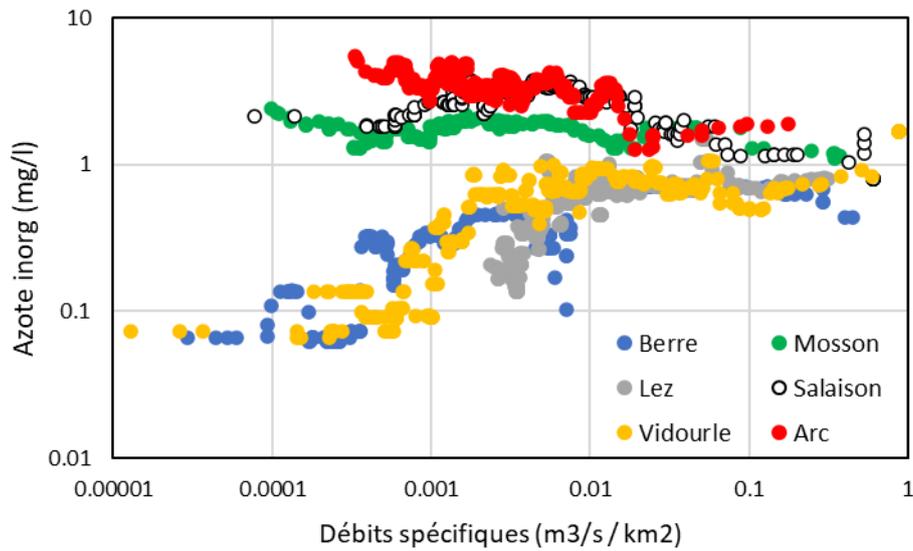


Figure 85 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

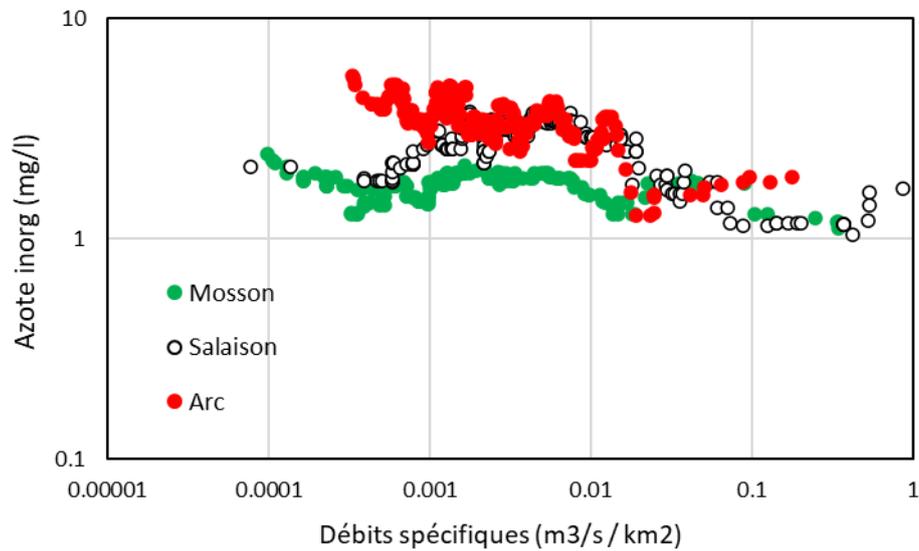


Figure 86 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Salaison et de l'Arc

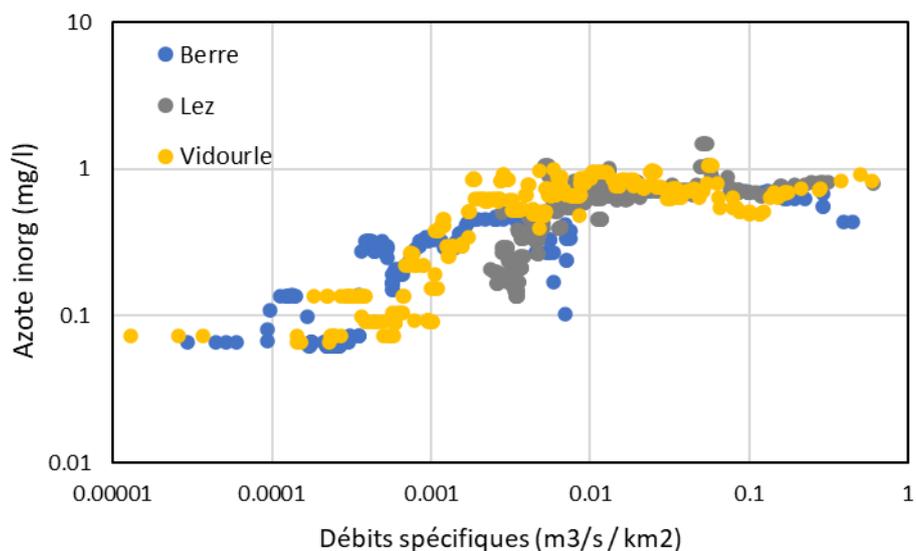


Figure 87 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Lez et du Vidourle

4.4. Relations Phosphore - Débit

La Figure 88 présente les relations entre le phosphore total (en médiane glissante) et le débit spécifique des six tributaires étudiés. On note une relative similitude entre les formes des six courbes. La courbe de la Berre est quant à elle perturbée dans sa partie gauche par ses très faibles concentrations, généralement inférieures à la limite de détection / quantification.

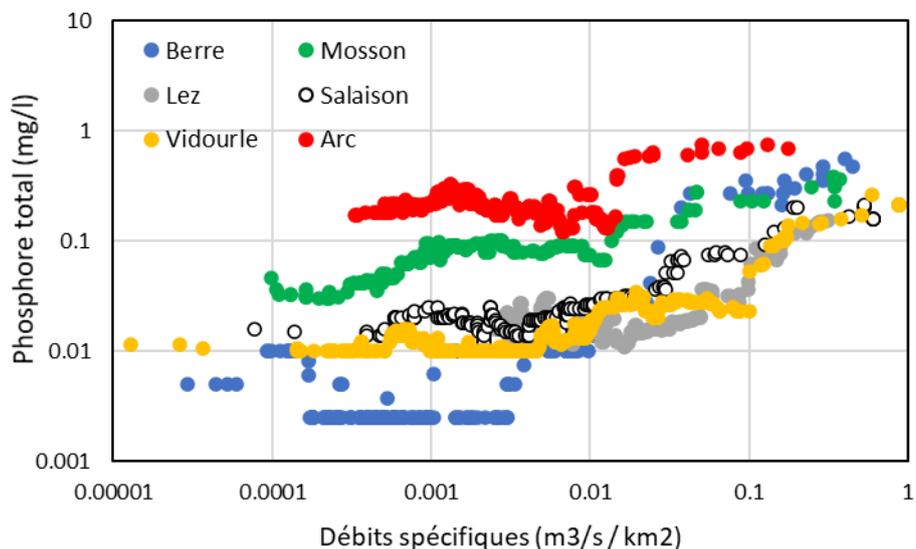


Figure 88 : Relations Phosphore total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

La Figure 89 présente les relations entre l'ortho-phosphate et le débit spécifique des six tributaires étudiés.

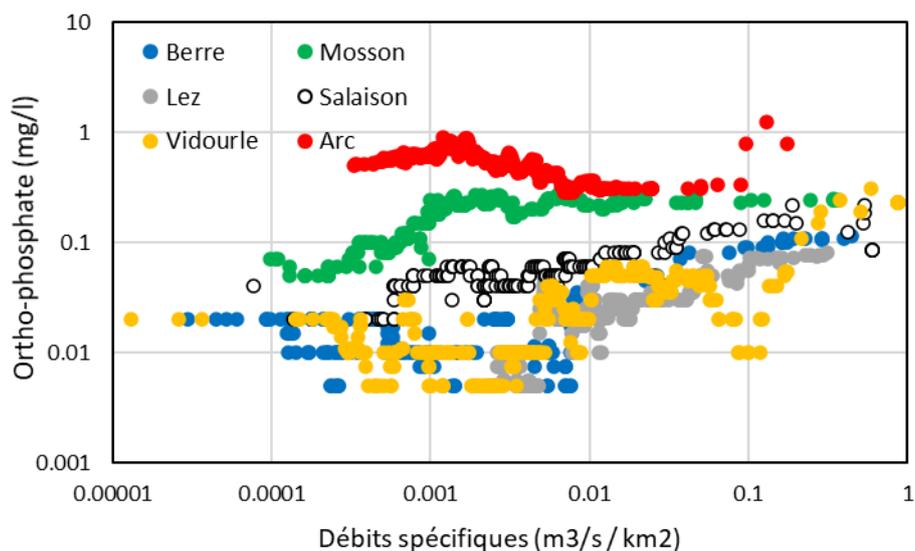


Figure 89 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

On remarque que les courbes de la Berre et du Vidourle (Figure 90) sont perturbées par les nombreuses valeurs inférieures aux limites de détection / quantification. Ces courbes ne sont donc pas exploitables en l'état, sans risque de biaiser fortement les calculs de flux.

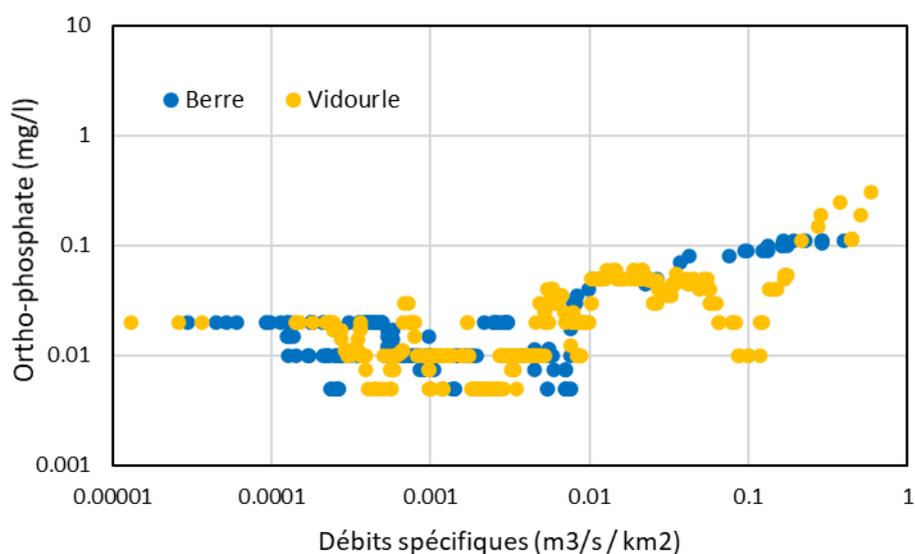


Figure 90 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre et du Vidourle

Les relations obtenues pour la Mosson, le Lez, le Salaison et l'Arc (Figure 91) montrent peu de perturbations. Trois de ces courbes paraissent cohérentes entre elles (Lez, Salaison, et Mosson). Elles montrent une tendance croissante vers une stabilisation. La courbe de l'Arc montre une partie centrale décroissante, puis une ré-augmentation finale pour les rares valeurs de débits les plus élevés.

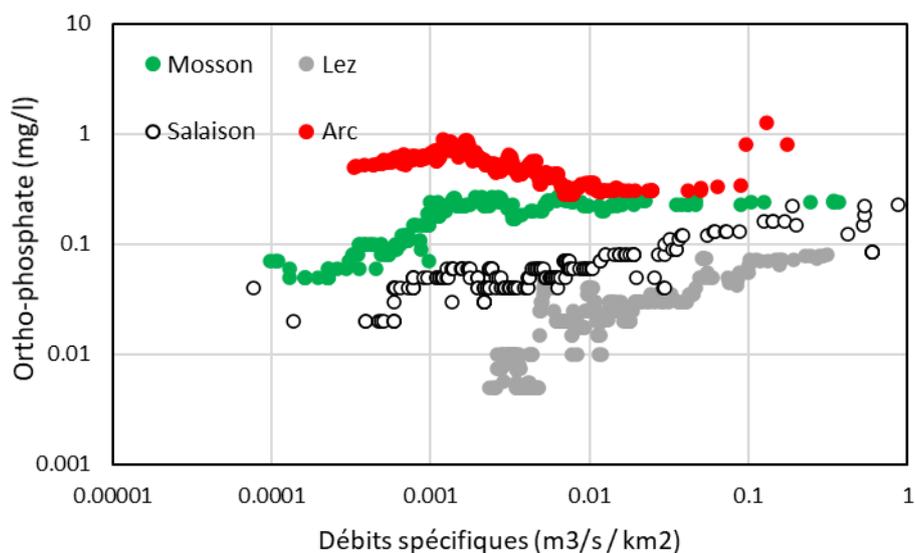


Figure 91 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Lez, du Salaison et de l'Arc

4.5. Concentrations médianes par classes standardisées de débit spécifique

Les figures suivantes représentent, pour fins de comparaison, les concentrations médianes calculées pour les différents tributaires avec les classes standardisées de débit spécifique. Les figures sont toutes présentées avec la même étendue de l'axe des abscisses (Débit spécifique) afin de pouvoir être intercomparées. Rappelons que l'intérêt de l'utilisation des débits spécifiques (débit divisé par la taille du bassin versant) et de classes standardisées (mêmes classes pour tous les bassins versants) est de pouvoir comparer les tributaires entre eux.

De façon globale, les courbes de concentrations médianes par classes reflètent bien les courbes précédemment présentées. Ces courbes ne présentent pas d'oscillations particulières.

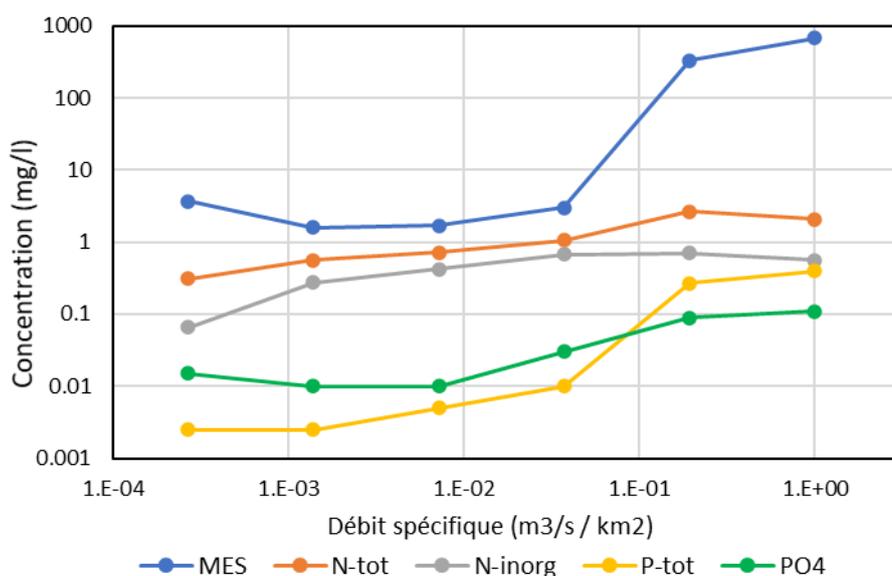


Figure 92 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour la Berre

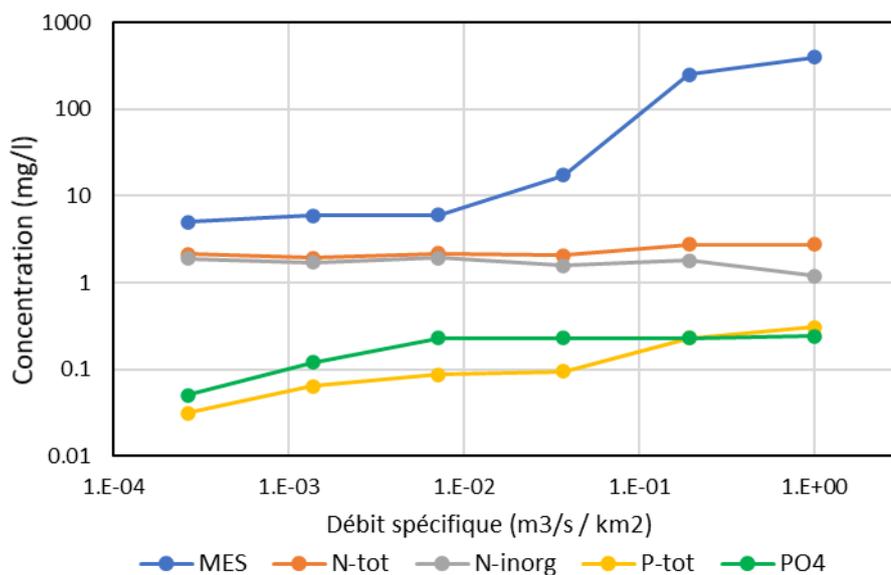


Figure 93 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour la Mosson

Le graphique du Lez (Figure 94) ne présente pas de valeurs pour les deux premières classes du fait de ses débits soutenus par la source du Lez et par les soutiens d'étiage par le canal BRL.

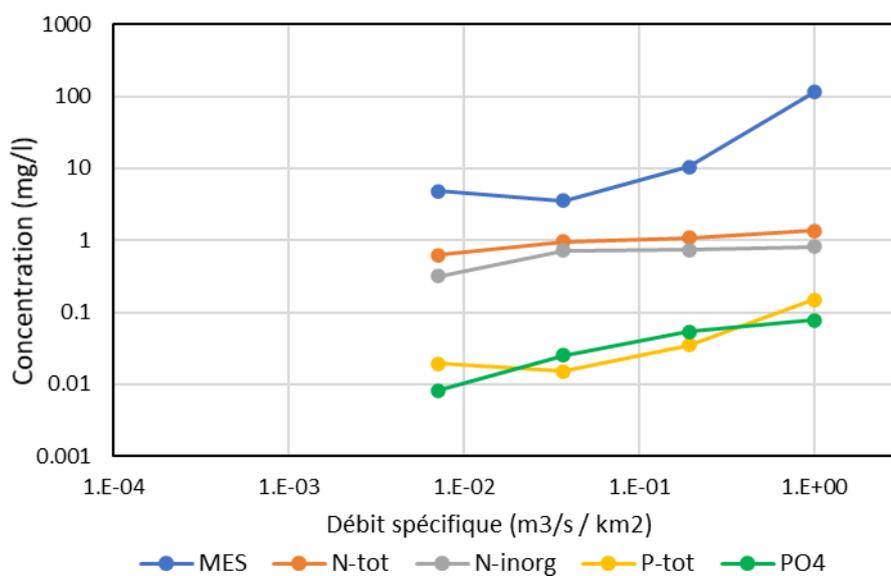


Figure 94 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Lez

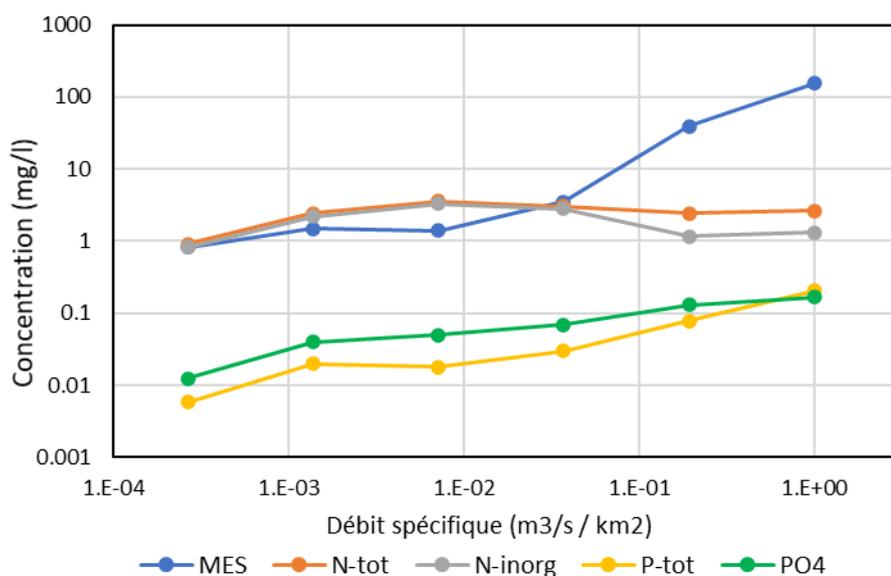


Figure 95 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Salaison

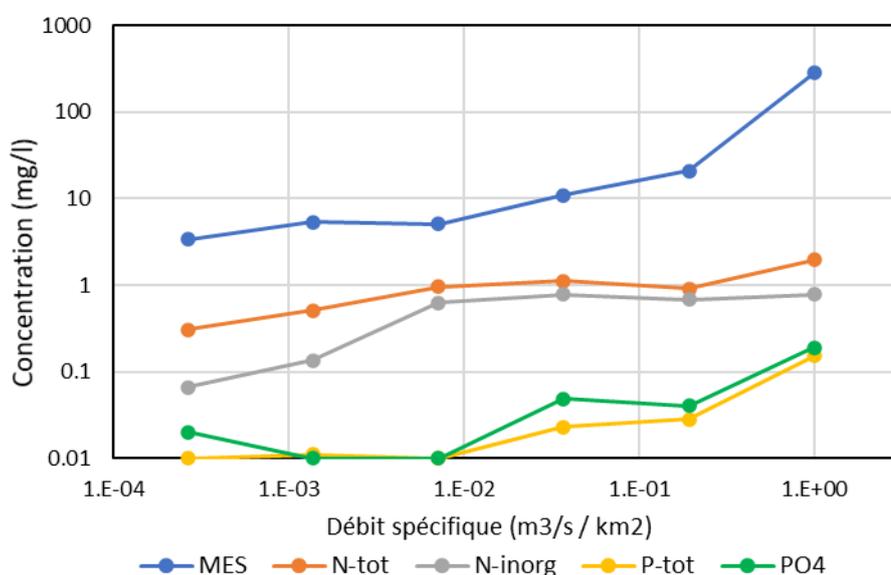


Figure 96 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Vidourle

Le graphique de L'Arc (Figure 97) ne présente pas de valeurs pour la première classe et la dernière classe du fait de son fonctionnement hydrologique plus régulier et peu affecté par les étiages comme par les crues.

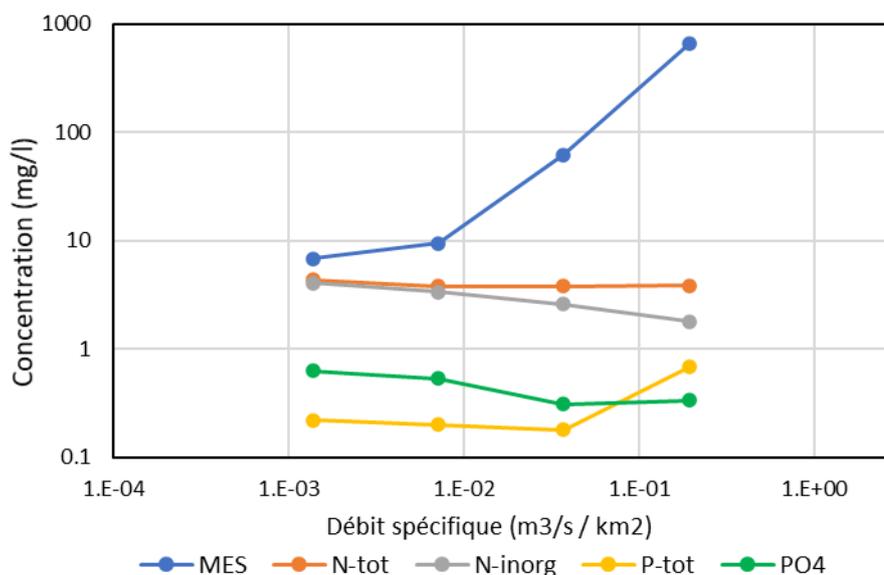


Figure 97 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour l'Arc

4.6. Concentrations médianes par classes de débit propres à chaque cours d'eau

L'utilisation de classes de débits spécifiques identiques pour tous les cours d'eau montre la faiblesse de cette approche, même en utilisant les débits spécifiques plutôt que les débits, puisque le nombre de classes n'est pas identiques selon les cours d'eau. Une approche différente pour la détermination des classes de débits a donc été mise en œuvre.

Cette approche utilise des classes de débit adaptées à chaque cours d'eau. Ces classes de débits sont log-équidistantes, c'est-à-dire qu'elles ont la même longueur en valeur log ou en échelle log. C'est cette représentation qui semble la plus à même de représenter les différentes classes de débits. La limite supérieure de la première classe est définie quant à elle par le centile 0.1 (c'est-à-dire le premier décile). Cette représentation est plus précise et plus représentative de la situation propre à chaque cours d'eau

La méthode de construction de ces courbes est la suivante :

- Transformer les débits en log ;
- Déterminer le centile 0.1 (10% ; premier décile) des valeurs logs ;
- Déterminer la plus forte valeur (max) des valeurs logs ;
- Déterminer la longueur log de chaque classe $\log = (\max - \text{centile } 0.1)/5$;
- En déduire les limites des différentes classes logs (remarque : la dernière classe log n'est pas fermée puisque des débits supérieurs peuvent toujours survenir) ;
- Transposer les valeurs logs en débits.

Le Tableau 10 indique les valeurs limites des six classes de débits ainsi déterminées et utilisées dans la méthode ID. La Figure 98 présente le nombre d'échantillons disponibles (exprimé en fréquence relative) dans les classes ainsi déterminées pour les différents tributaires. Même si les classes de débits les plus forts sont moins bien renseignées, aucune classe n'est dépourvue d'informations (données de concentrations).

Tributaire	Limite 1/2	Limite 2/3	Limite 3/4	Limite 4/5	Limite 5/6
Berre	0.03	0.14	0.71	3.70	19.34
Mosson	0.07	0.31	1.34	5.89	25.79
Lez	0.52	1.50	4.31	12.38	35.53
Salaison	0.03	0.13	0.55	2.39	10.26
Vidourle	0.24	1.09	4.91	22.23	100.57
Arc	0.51	1.53	4.63	14.00	42.33

Tableau 10 : Valeurs limites des six classes de débits utilisées dans la méthode ID

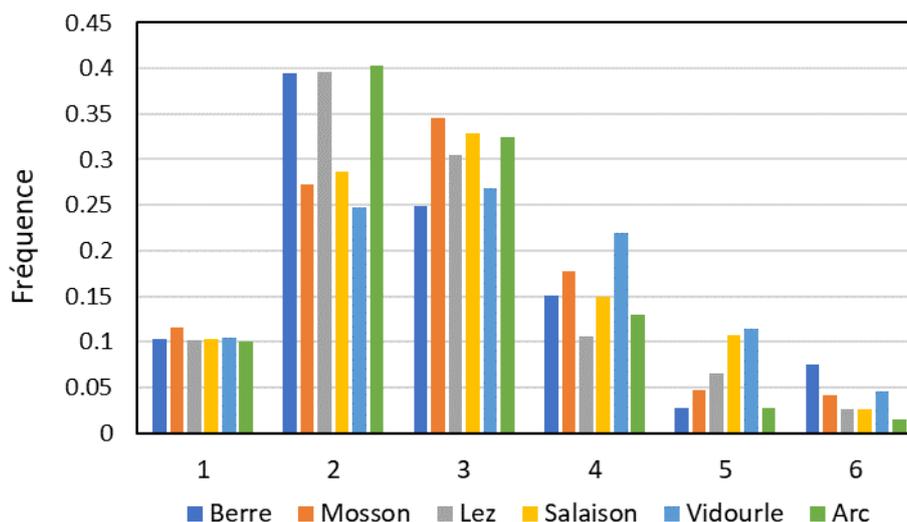


Figure 98 : Nombre d'échantillons disponibles (en fréquence relative) dans chacune des 6 classes déterminées par la méthode d'équidistance logarithmique

Les figures suivantes représentent les concentrations médianes des différents paramètres pour ces classes de débit spécifiques à chaque cours d'eau. Les courbes sont peu différentes de celles présentées à la section précédente, si ce n'est que toutes les courbes ont toutes six classes exprimées.

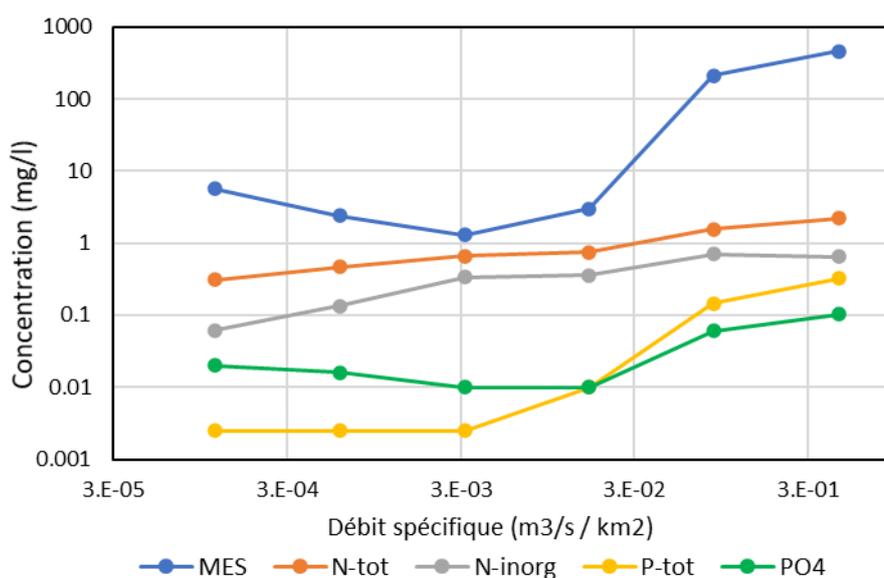


Figure 99 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Berre

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	5.7	2.4	1.3	3	209.5	463.5
N-tot	0.31	0.47	0.66	0.75	1.56	2.19
N-inorg	0.062	0.135	0.339	0.357	0.708	0.651
P-tot	0.003	0.003	0.003	0.010	0.145	0.325
PO4	0.020	0.016	0.010	0.010	0.060	0.103

Tableau 11 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Berre
L'ortho-phosphate est exprimé en mg-PO4/l (et non en mg-P/l), d'où ses valeurs parfois supérieures au phosphore total (le rapport des masses molaires est d'environ 3).

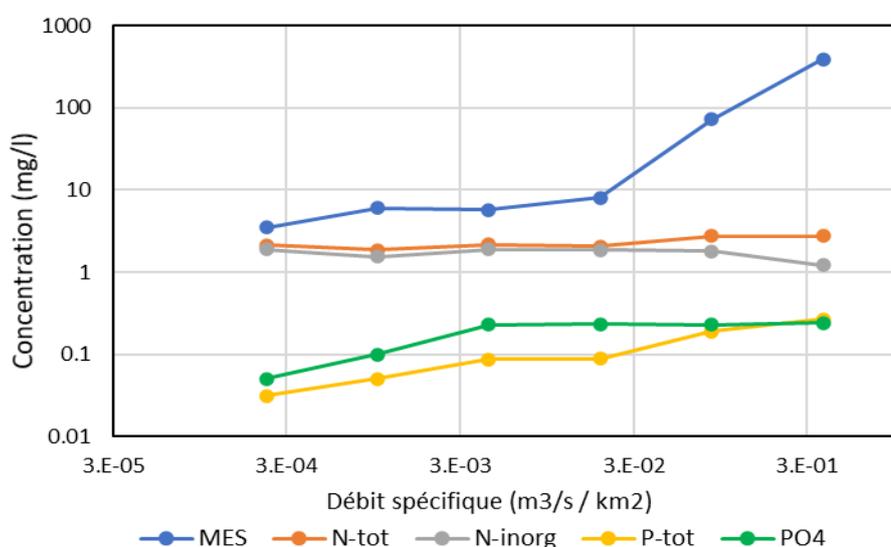


Figure 100 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Mosson

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	5.0	6.0	5.7	8.1	73.0	391.0
N-tot	2.14	1.87	2.18	2.07	2.76	2.76
N-inorg	1.870	1.549	1.889	1.853	1.785	1.218
P-tot	0.031	0.05	0.087	0.0885	0.19	0.2675
PO4	0.050	0.100	0.228	0.235	0.230	0.240

Tableau 12 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Mosson

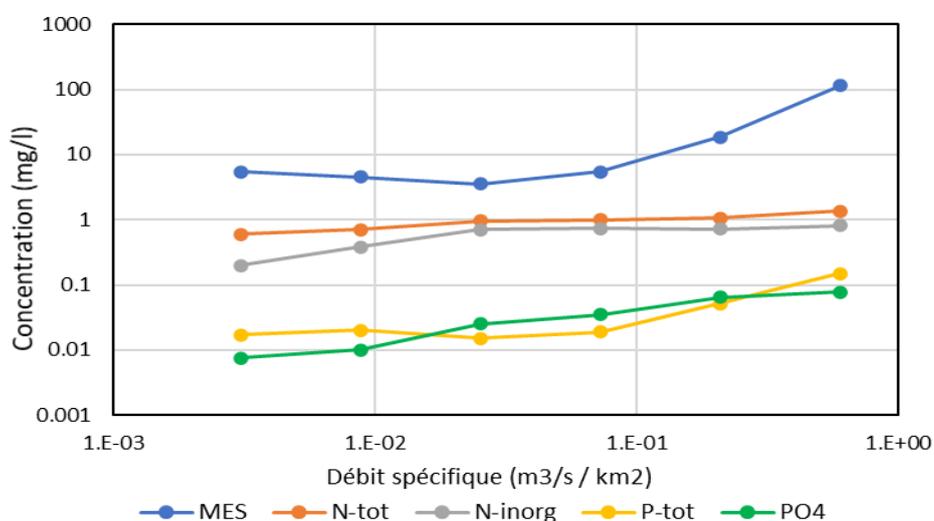


Figure 101 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Lez

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	5.5	4.55	3.55	5.5	18.5	115.5
N-tot	0.60	0.70	0.97	0.99	1.06	1.35
N-inorg	0.201	0.384	0.705	0.730	0.727	0.806
P-tot	0.017	0.020	0.015	0.019	0.052	0.150
PO4	0.008	0.010	0.025	0.035	0.064	0.078

Tableau 13 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Lez

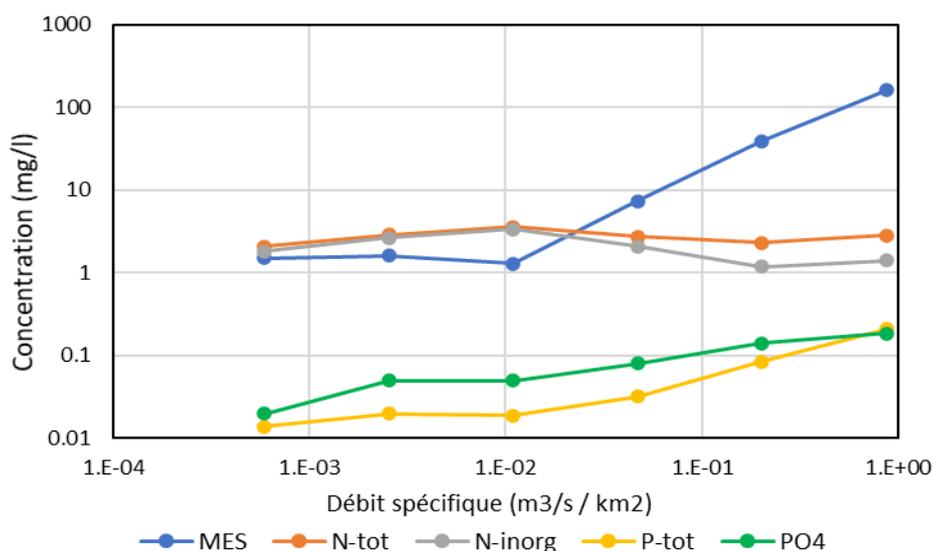


Figure 102 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Salaison

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	1.6	1.6	1.3	7.4	39.0	161.0
N-tot	2.07	2.88	3.61	2.75	2.30	2.83
N-inorg	1.828	2.657	3.364	2.082	1.176	1.414
P-tot	0.016	0.020	0.019	0.032	0.085	0.207
PO4	0.020	0.050	0.050	0.080	0.140	0.185

Tableau 14 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Salaison

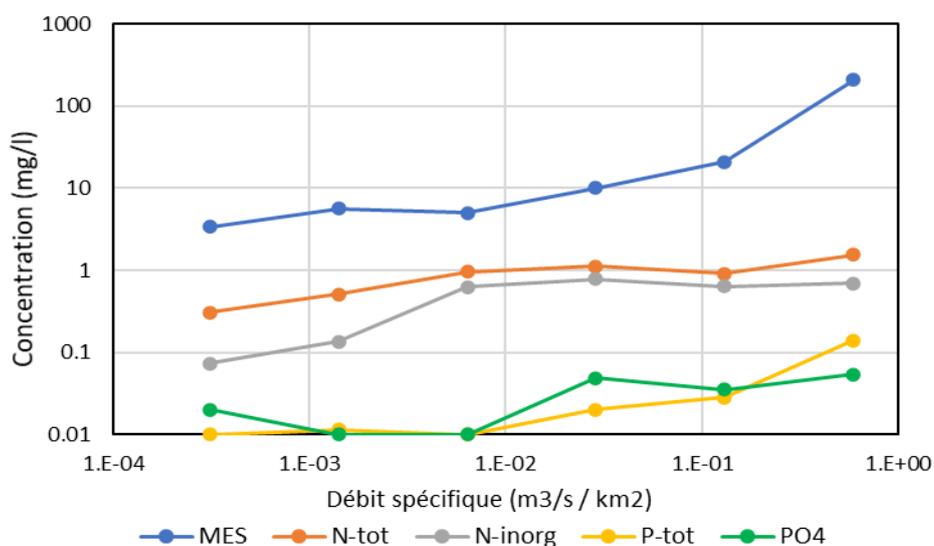


Figure 103 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Vidourle

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	3.4	5.6	5.0	10.0	21.0	210.0
N-tot	0.31	0.51	0.96	1.12	0.91	1.54
N-inorg	0.074	0.135	0.624	0.787	0.642	0.693
P-tot	0.010	0.012	0.010	0.020	0.028	0.140
PO4	0.020	0.010	0.010	0.049	0.035	0.054

Tableau 15 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Vidourle

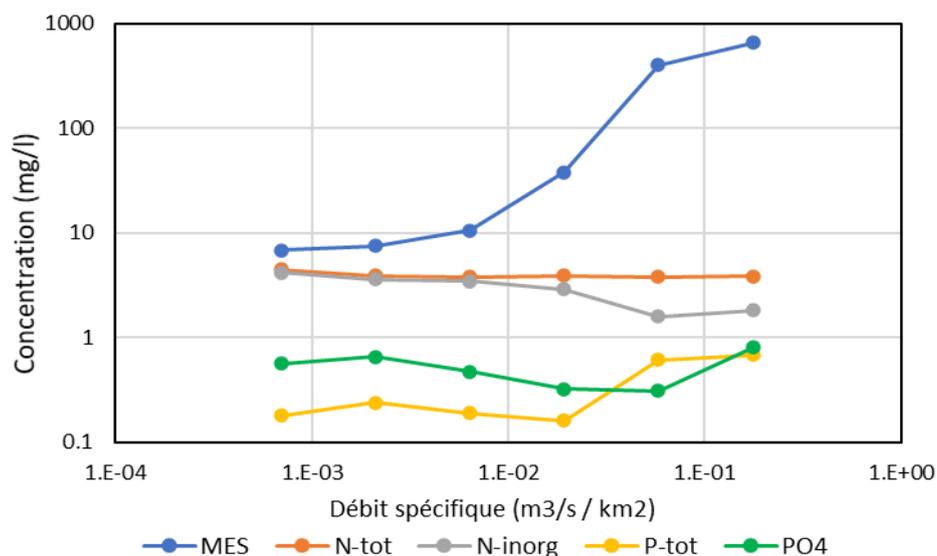


Figure 104 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour l'Arc

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
MES	6.8	7.5	10.5	38.0	404.0	658
N-tot	4.48	3.89	3.80	3.90	3.80	3.84
N-inorg	4.171	3.607	3.431	2.908	1.586	1.810
P-tot	0.180	0.240	0.190	0.160	0.610	0.685
PO4	0.560	0.650	0.470	0.320	0.310	0.799

Tableau 16 : Concentration médiane par classes personnalisées de débit spécifique pour l'Arc

4.7. Conclusion sur les relations nutriments - débit

Les relations entre les nutriments et les débits des cours d'eau ont été étudiées. Cette analyse a fourni un certain nombre de constats et de résultats pertinents :

- Seuls les paramètres MES, azote total, azote organique, phosphore total et ortho-phosphates sont pertinents à prendre en compte car le nombre de valeurs inférieures aux limites de détection / quantification est très important pour les autres paramètres, trop important pour obtenir des courbes exploitables.
- Les concentrations ont été exprimées en valeurs médianes glissantes sur 10 valeurs consécutives de débits classés, afin d'obtenir des courbes plus lisses (presque sans valeurs aberrantes) et plus facilement interprétables.
- Peu de courbes (parmi les nutriments retenus) sont perturbées par les faibles valeurs inférieures aux limites de détection / quantification.

- L'utilisation des débits spécifiques pour l'établissement des courbes (au lieu des débits) permet d'intercomparer les relations obtenues sur les six tributaires.
- Pour l'établissement des concentrations médianes par intervalles de débits, des classes de débits log-équidistantes ont été utilisées, c'est-à-dire de même longueur en valeur log ou en échelle log. Cette représentation semble plus à même de représenter les différentes classes de débits, dont les débits forts responsables d'apports importants.

5. Calcul des flux de nutriments apportés aux lagunes

Le calcul des flux de nutriments apportés aux lagunes par les six tributaires étudiés a été réalisé en partenariat avec l'Agence de l'Eau à l'aide des outils de calcul développés par le Service des données techniques de l'Agence de l'Eau.

Les données utilisées sont celles acquises par le réseau de suivi qualité de l'Agence de l'eau et bancarisées dans la base de données NAIADÉ - eaufrance.fr :

- MES (matières en suspension) ;
- Nitrates (azote nitrique) ;
- Nitrites (azote nitreux) ;
- Ammonium (azote ammoniacal) ;
- Azote total Kjeldahl (ensemble des formes réduites de l'azote = ammonium + azote organique) ;
- Azote total (somme calculée de l'azote Kjeldahl, des nitrates et des nitrites) ;
- Ortho-phosphates ;
- Phosphore total (directement mesuré par l'analyse).

Les flux ont été calculés sur la période d'août 2015 à juillet 2020 avec les trois méthodes proposées lors la précédente étude (HYDRIAD, 2017) :

- Méthode de la moyenne pondérée ;
- Méthode des intervalles de débits ;
- Méthode de la dernière concentration.

Les sections suivantes présentent pour chaque BV, le débit annuel moyen, et le flux annuel de MES, le flux annuel d'azote (dans ces différentes formes exprimées en N) et le flux annuel de phosphore total et d'ortho-phosphate (exprimé en P) calculés avec ces trois méthodes.

5.1. Flux apportés par la Berre

Sur la Berre, le débit moyen a été très élevé en 2016-2017 et très faible en 2015-2016.

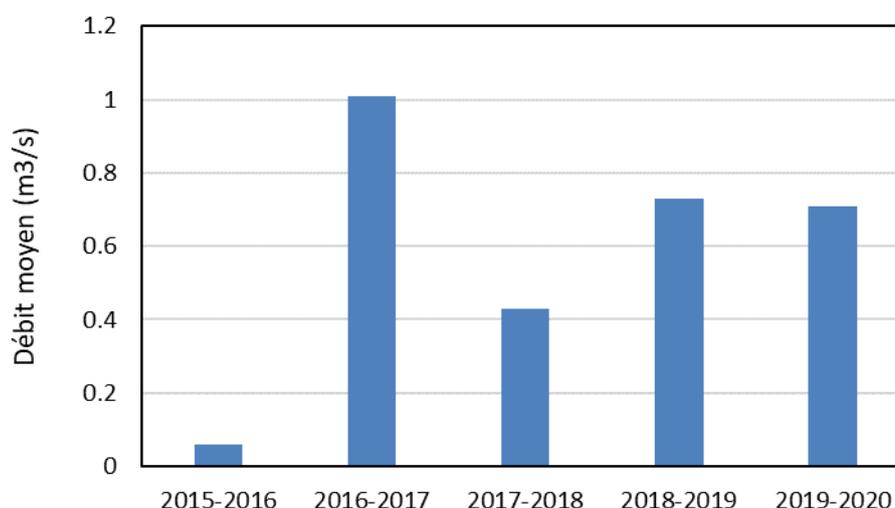


Figure 105 : Débit annuel moyen de la Berre

Les flux de MES suivent la tendance des débits avec des flux très faibles en 2015-2016 et très forts en 2016-2017. On ne constate cependant pas de corrélation directe entre le flux annuel de MES et débit moyen annuel.

Pour la méthode de la dernière concentration, les flux de MES suivent la même tendance interannuelle que ceux obtenus avec la méthode de la moyenne pondérée, mais avec des valeurs de flux cinq fois plus faibles.

Les flux de MES obtenus avec la méthode des intervalles de débits sont moitié moindres que ceux obtenus pour la méthode de la dernière concentration et 10 fois plus faibles que pour la méthode des moyennes pondérées.

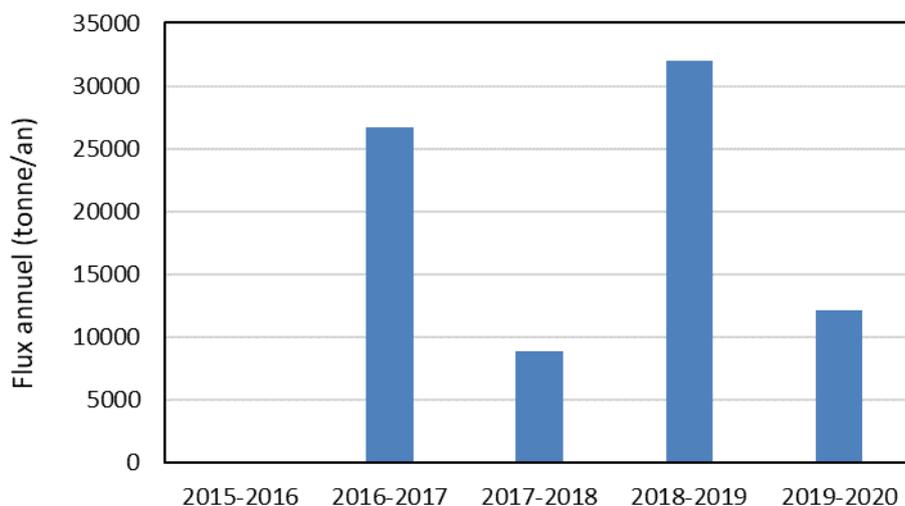


Figure 106 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode de la moyenne pondérée)

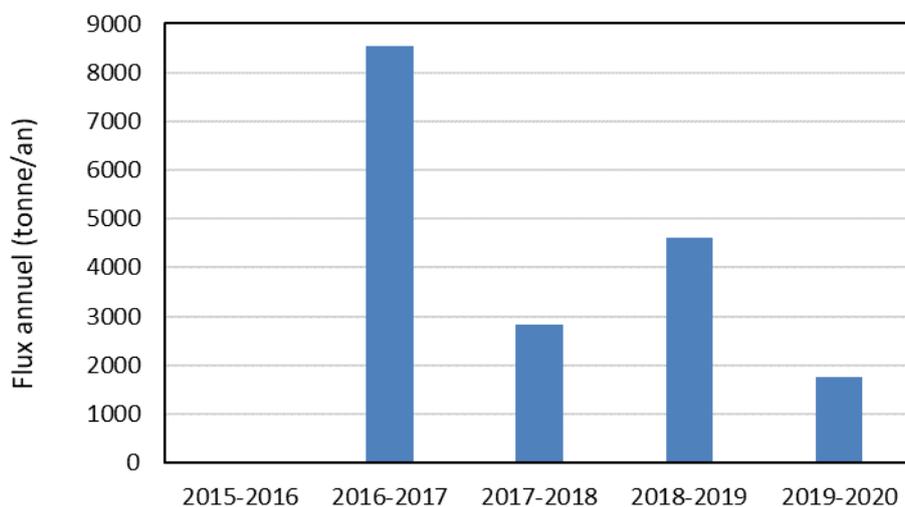


Figure 107 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode de la dernière concentration)

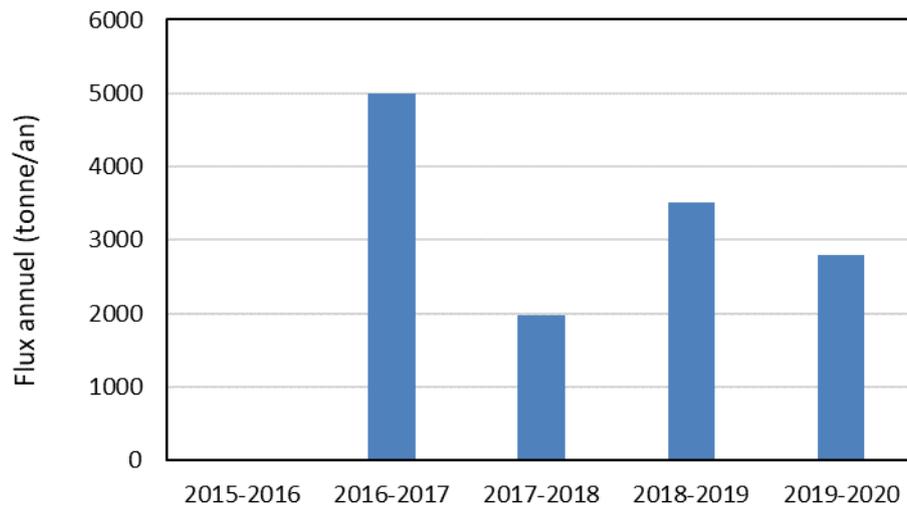


Figure 108 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode des intervalles de débits)

Les flux d'azote suivent la même tendance. Sur la Berre, c'est la forme organique de l'azote qui domine (= azote Kjeldahl – azote ammoniacal).

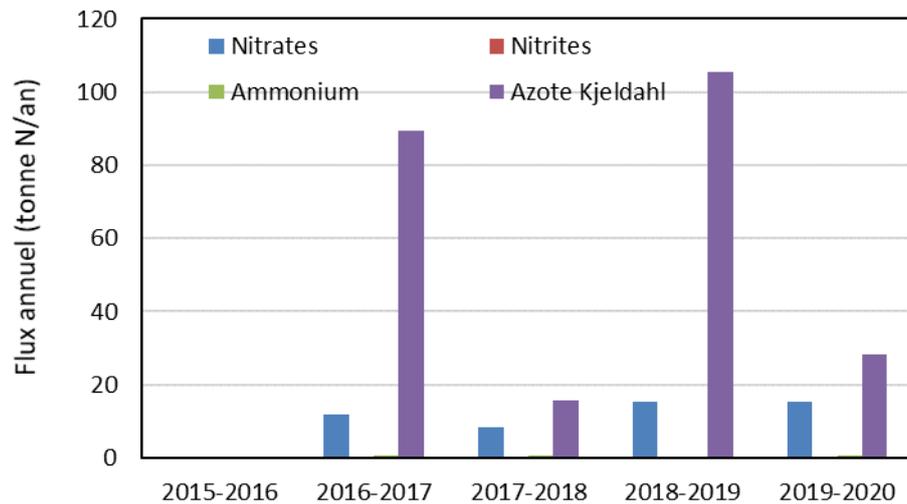


Figure 109 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

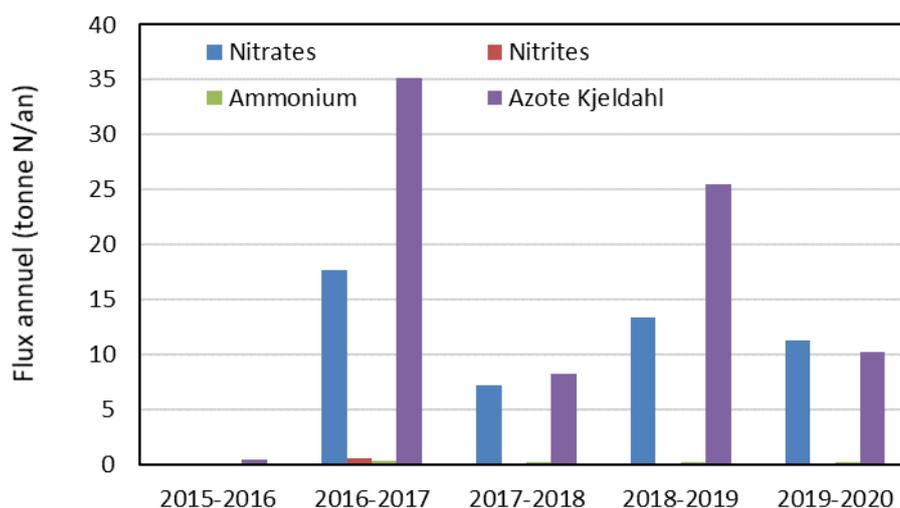


Figure 110 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

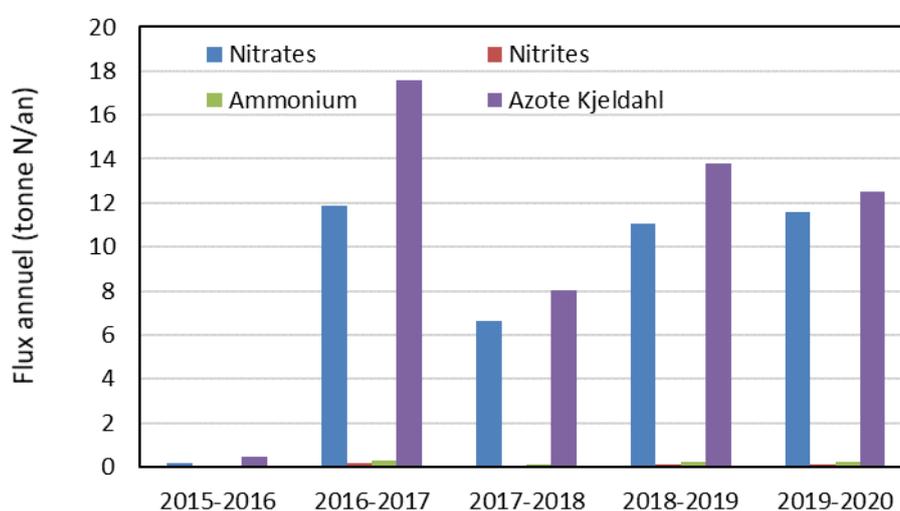


Figure 111 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

Les flux de phosphore suivent la même tendance. Pour le phosphore, c'est la forme particulière (phosphore total – P-PO₄) qui domine.

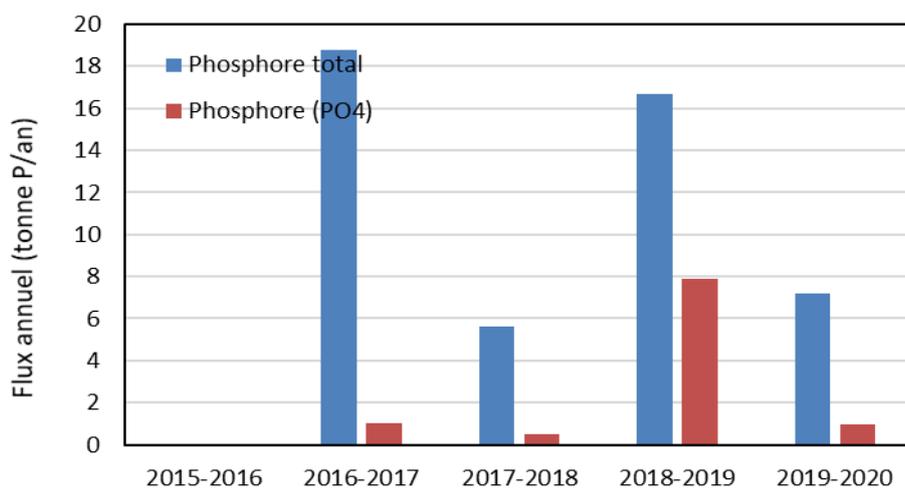


Figure 112 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode de la moyenne pondérée)

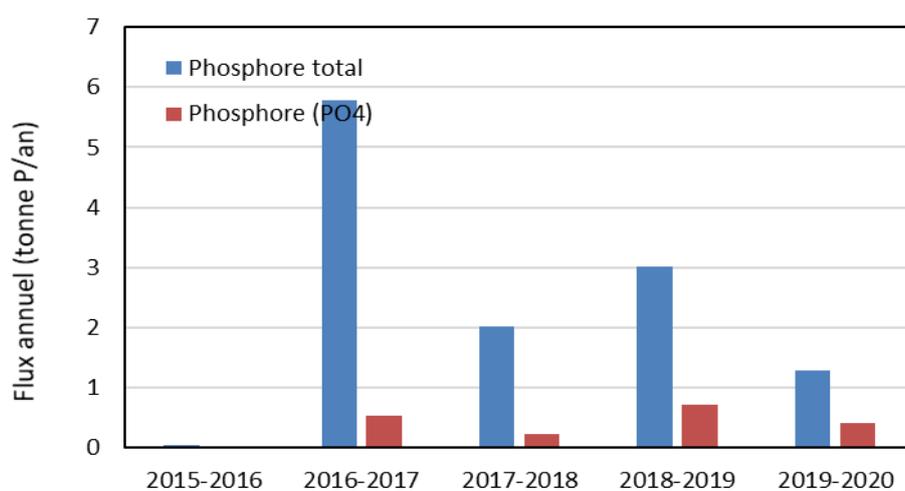


Figure 113 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode de la dernière concentration)

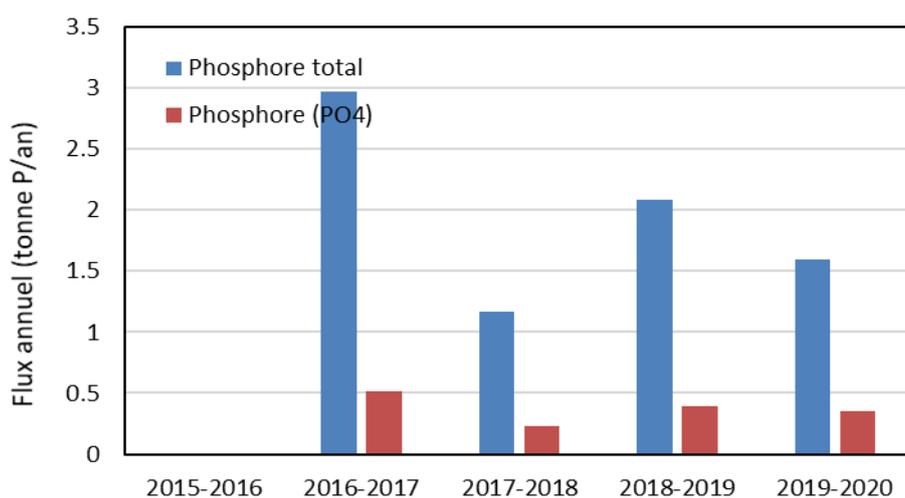


Figure 114 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode des intervalles de débits)

5.2. Flux apportés par la Mosson

Sur la Mosson, le débit moyen a été très élevé en 2017-2018 et bien plus faible en 2018-2020.

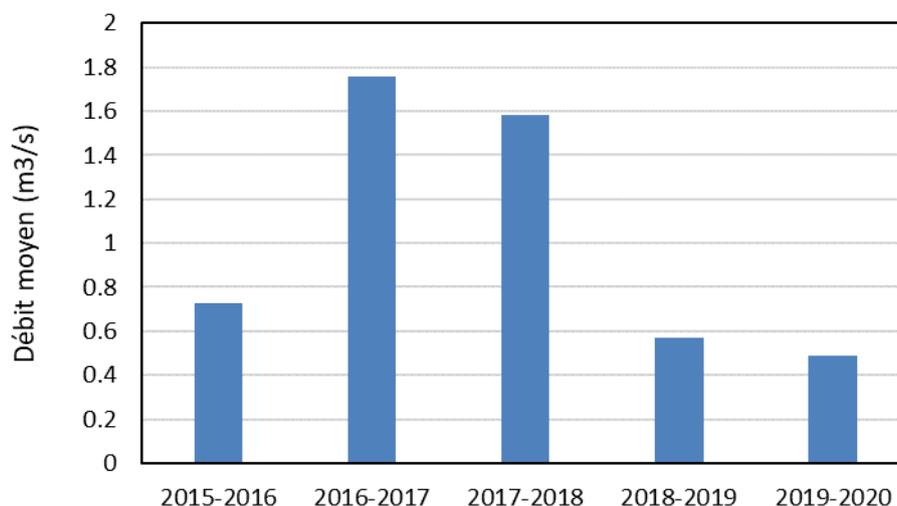


Figure 115 : Débit annuel moyen de la Mosson

Les flux de MES suivent la tendance des débits avec des flux très forts en 2017-2018 et bien plus faibles les autres années. On ne constate cependant pas de corrélation directe entre le flux annuel de MES et débit moyen annuel.

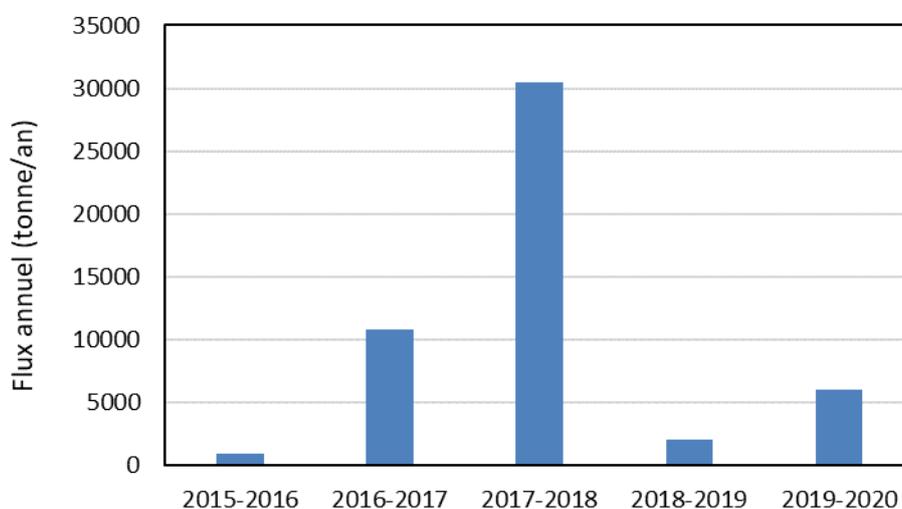


Figure 116 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode de la moyenne pondérée)

Avec la méthode de la dernière concentration, le flux de MES a été très élevé en 2016-2017, ainsi qu'en 2017-2018 et bien plus faible durant les autres années.

Il en est de même avec la méthode des intervalles de débits. Les résultats sont proches de la méthode de la dernière concentration.

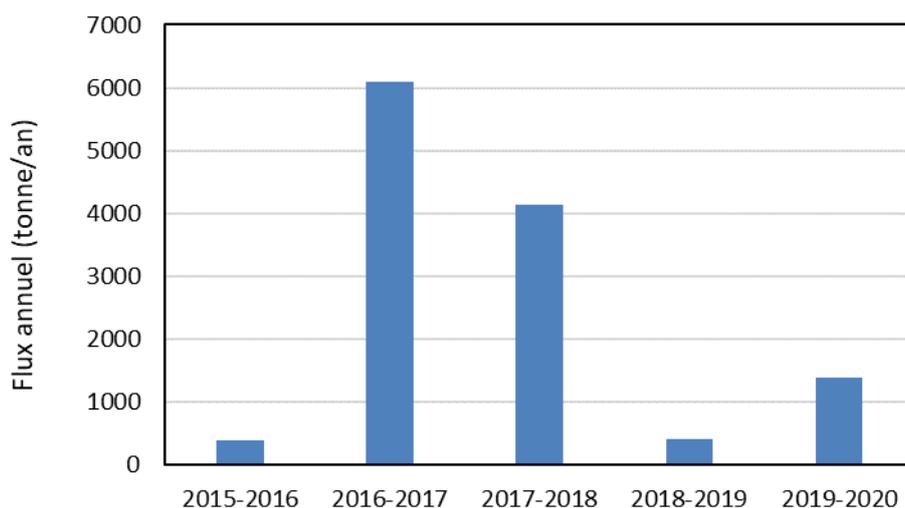


Figure 117 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode de la dernière concentration)

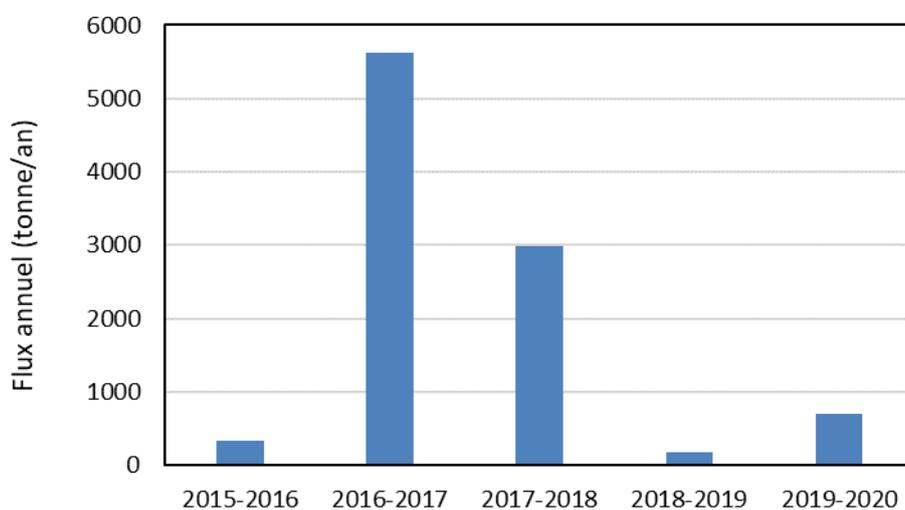


Figure 118 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode des intervalles de débits)

Les flux d'azote suivent la même tendance. C'est généralement la forme inorganique de l'azote qui domine, sauf en 2017-2018 pour la méthode de la moyenne pondérée.

Les méthodes des intervalles de débits et de la dernière concentration donnent des résultats très proches.

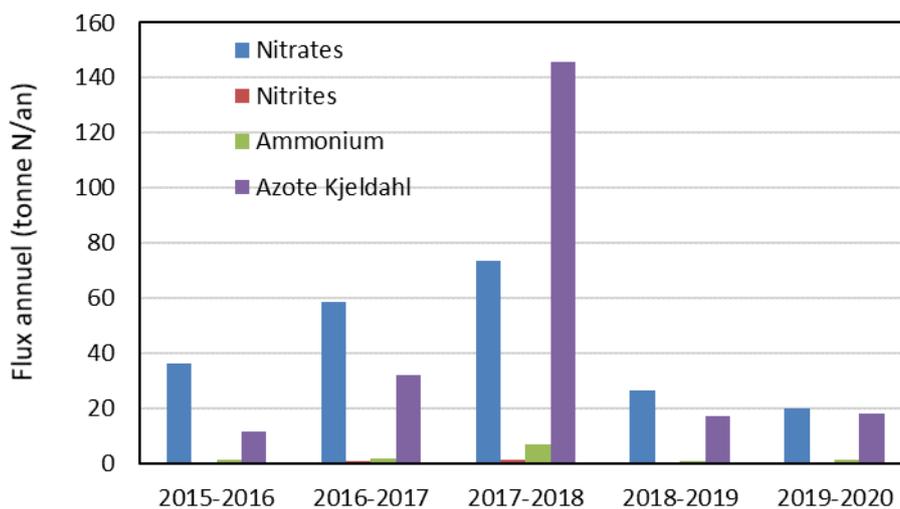


Figure 119 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

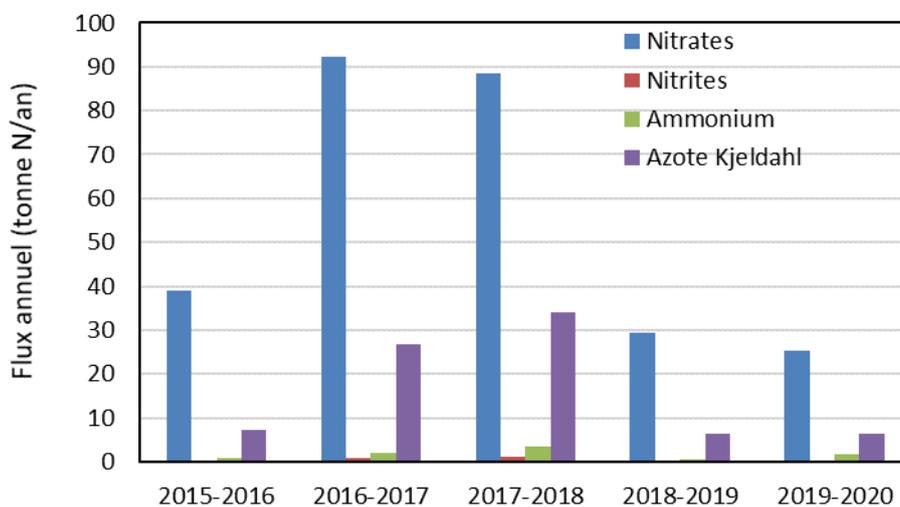


Figure 120 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

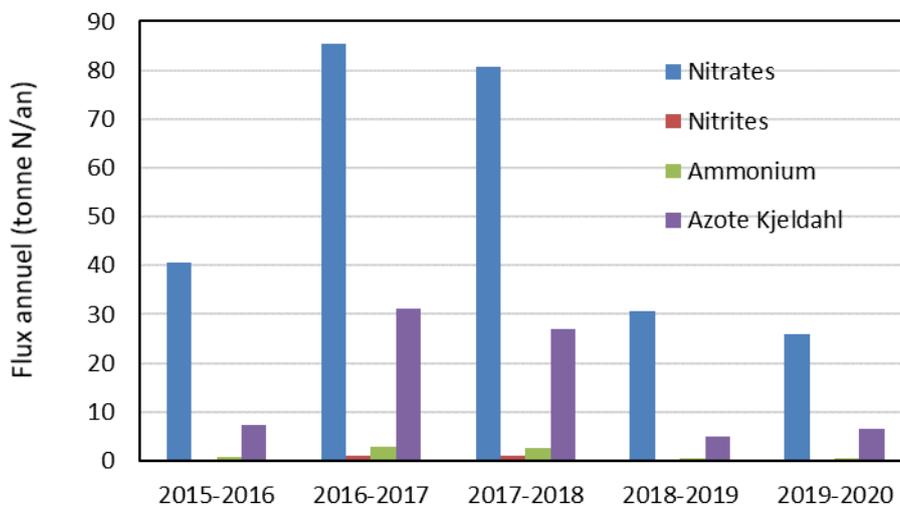


Figure 121 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

Les flux de phosphore suivent la même tendance. Pour le phosphore, les formes particulières et ortho-phosphate sont à peu près équivalentes (sauf en 2017-2018 pour la méthode de la moyenne pondérée). Ici encore, les méthodes des intervalles de débits et de la dernière concentration donnent des résultats très proches.

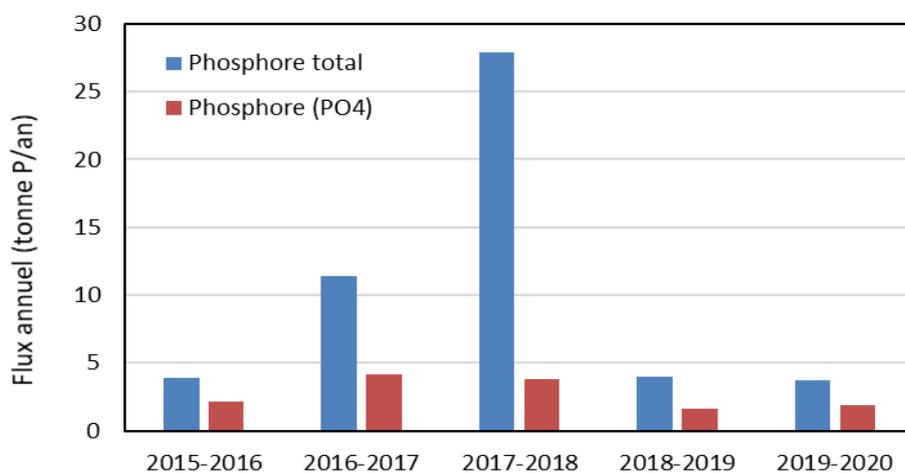


Figure 122 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode de la moyenne pondérée)

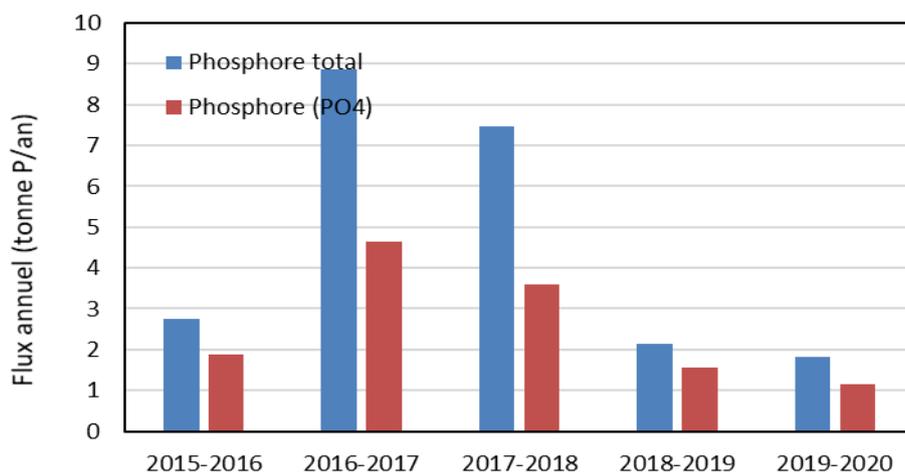


Figure 123 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode de la dernière concentration)

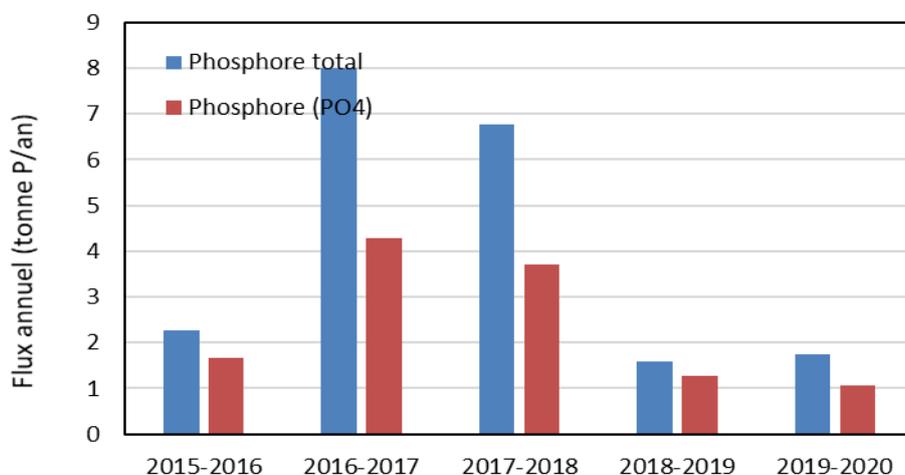


Figure 124 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode des intervalles de débits)

5.3. Flux apportés par le Lez

Sur le Lez, le débit moyen a été élevé en 2016-2018 et plus faible durant les autres années.

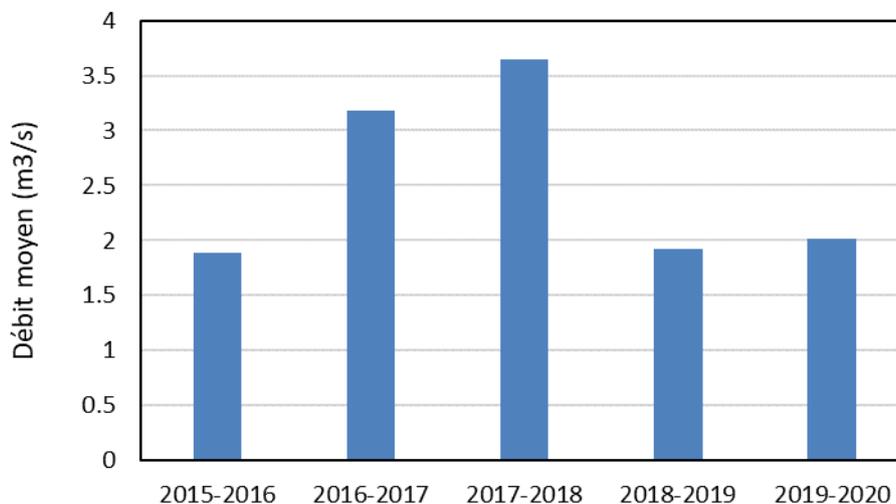


Figure 125 : Débit annuel moyen du Lez

Les flux de MES ne suivent pas du tout la tendance des débits avec les flux les plus forts observés en 2019-2020 et moindrement en 2017-2018. On ne constate donc aucune corrélation entre le flux annuel de MES et débit moyen annuel.

L'évolution interannuelle des MES est assez semblable d'une méthode à l'autre, mais toujours avec de très grandes différences de valeur entre les méthodes.

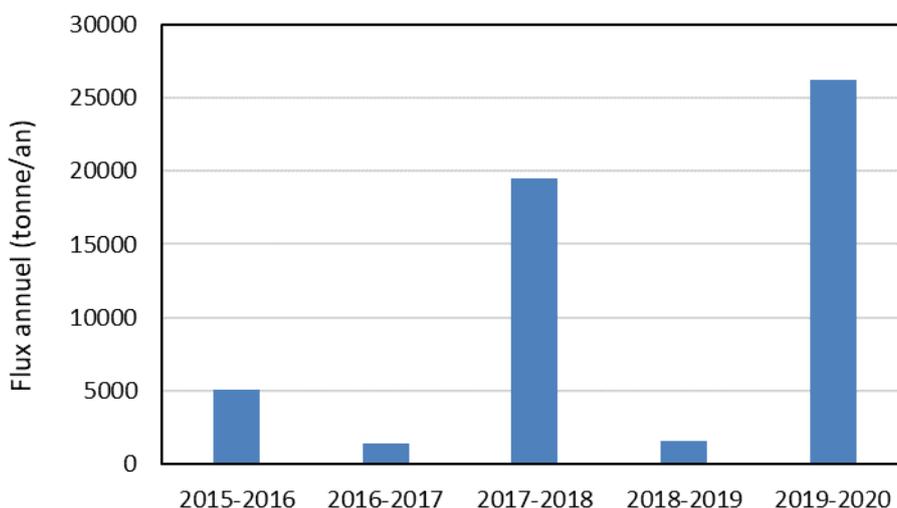


Figure 126 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode de la moyenne pondérée)

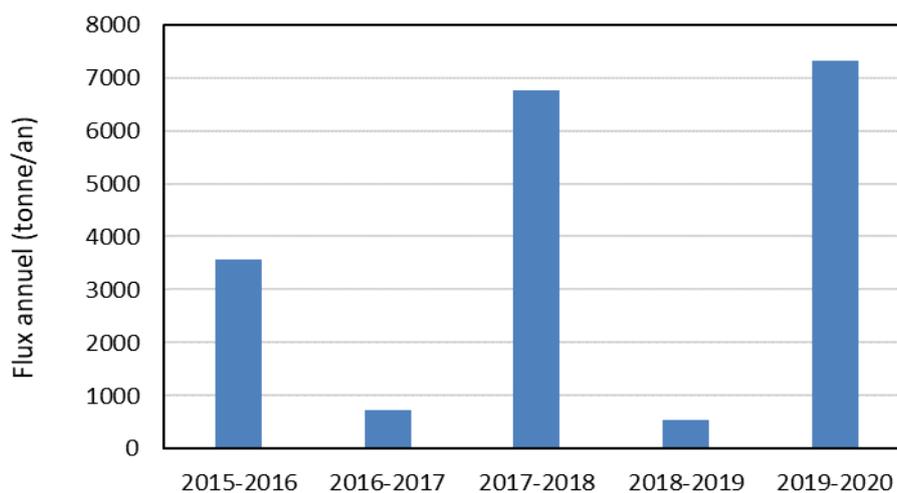


Figure 127 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode de la dernière concentration)

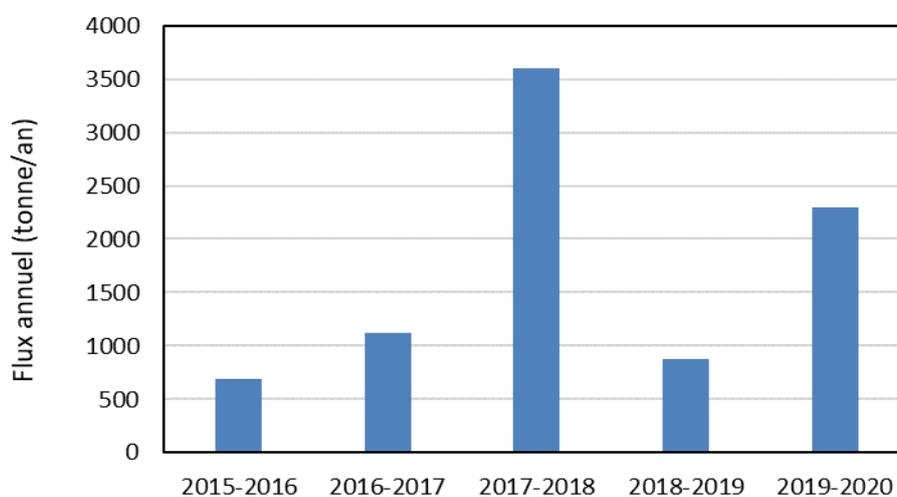


Figure 128 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode des intervalles de débits)

Les flux d'azote suivent plus ou moins la même tendance. Sur le Lez, c'est souvent la forme nitrique⁶ qui domine, mais l'azote Kjeldahl⁷ est également très important, et souvent dominé quant à lui par l'azote ammoniacal⁸, ce qui pourrait signer une pollution d'origine urbaine.

⁶ Azote nitrique = nitrate (NO₃)

⁷ Azote Kjeldahl = ensemble des formes de l'azote quantifiées par la méthode d'analyse Kjeldahl. Regroupe l'azote ammoniacal et l'azote organique.

⁸ Azote ammoniacal = ammonium (NH₄)

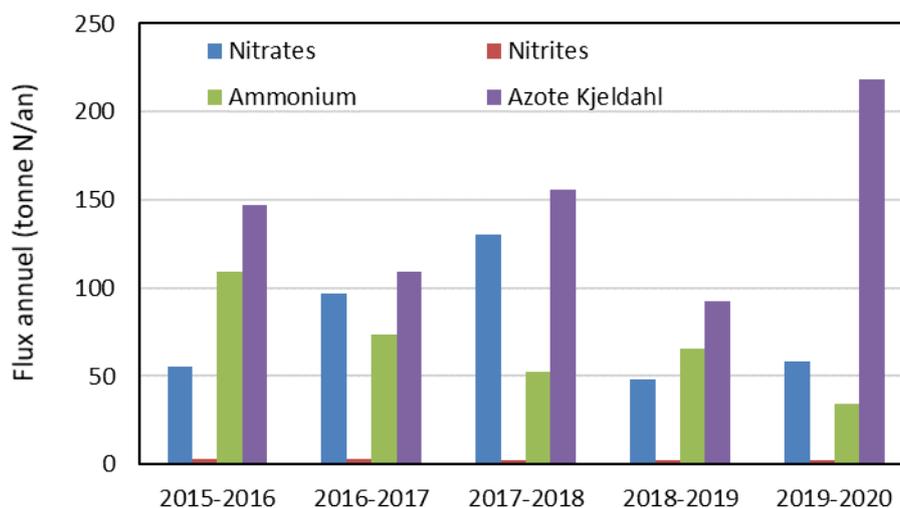


Figure 129 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

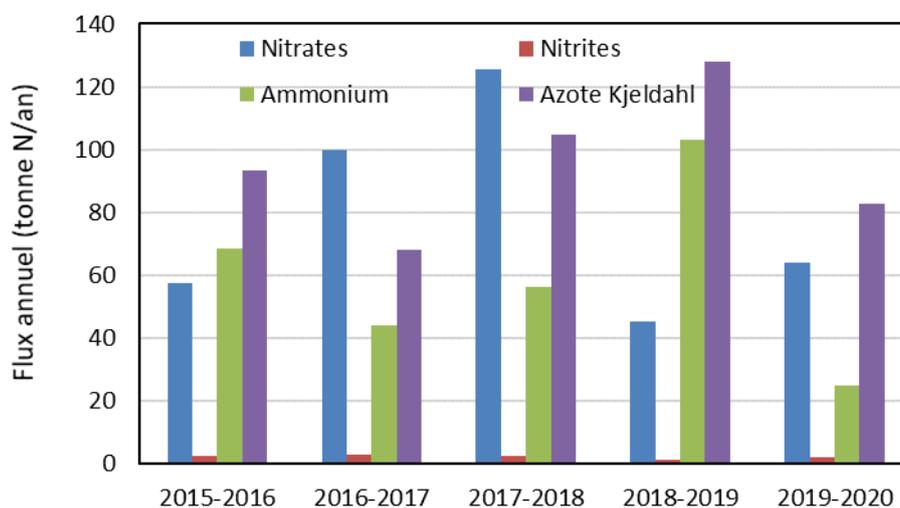


Figure 130 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

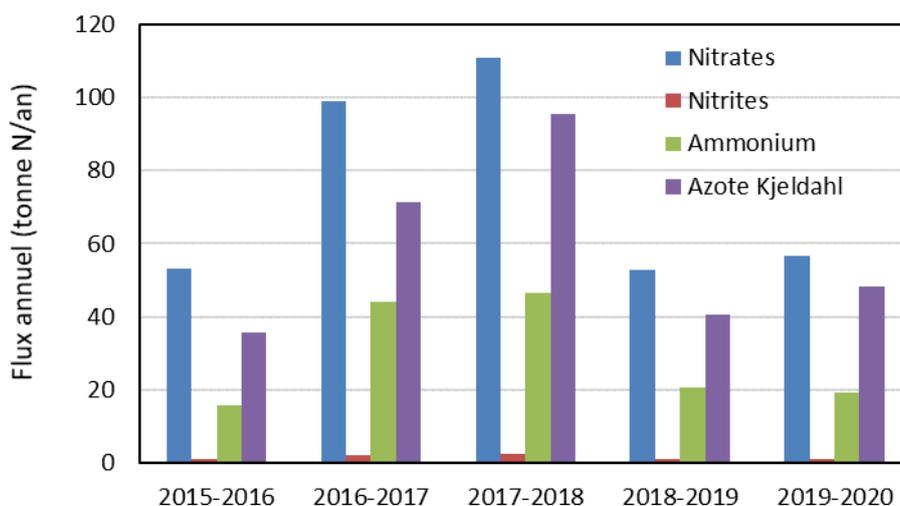


Figure 131 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

Les flux de phosphore suivent plus ou moins la même tendance. Pour le phosphore, c'est la forme particulaire (phosphore total – P-PO₄) qui domine, mais l'ortho-phosphate est souvent aussi important.

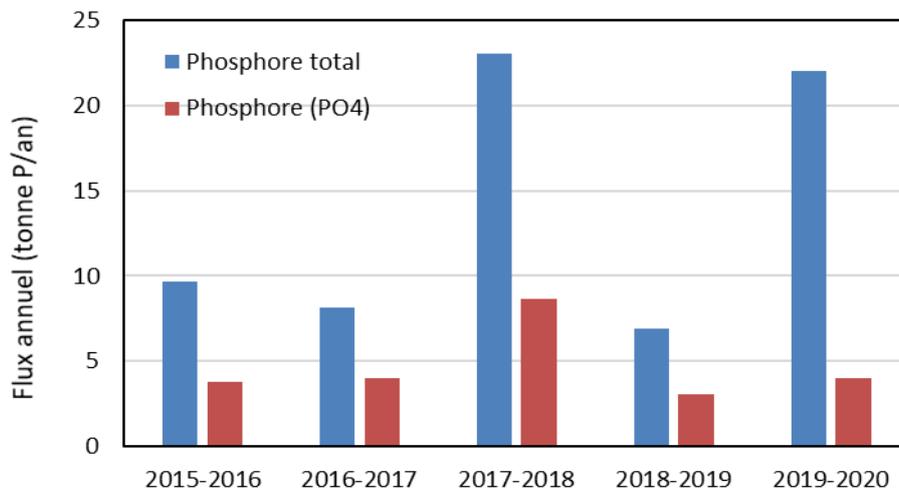


Figure 132 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode de la moyenne pondérée)

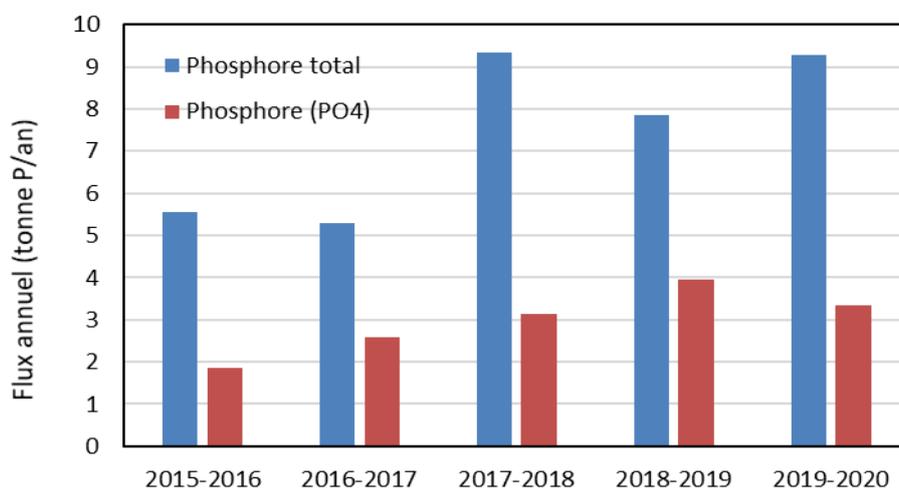


Figure 133 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode de la dernière concentration)

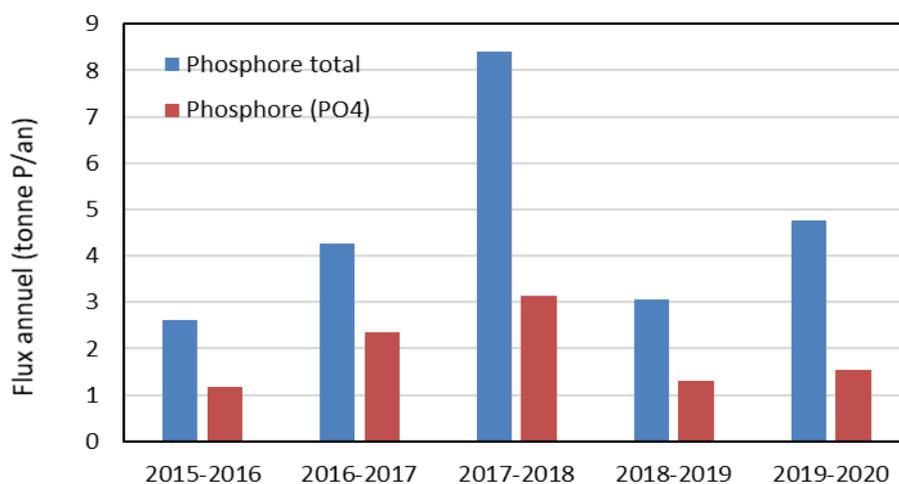


Figure 134 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode des intervalles de débits)

5.4. Flux apportés par le Salaison

Sur le Salaison, le débit moyen est moins contrasté que sur les BV précédents. Les débits les plus élevés l'ont été en 2017-2018 et 2019-2020.

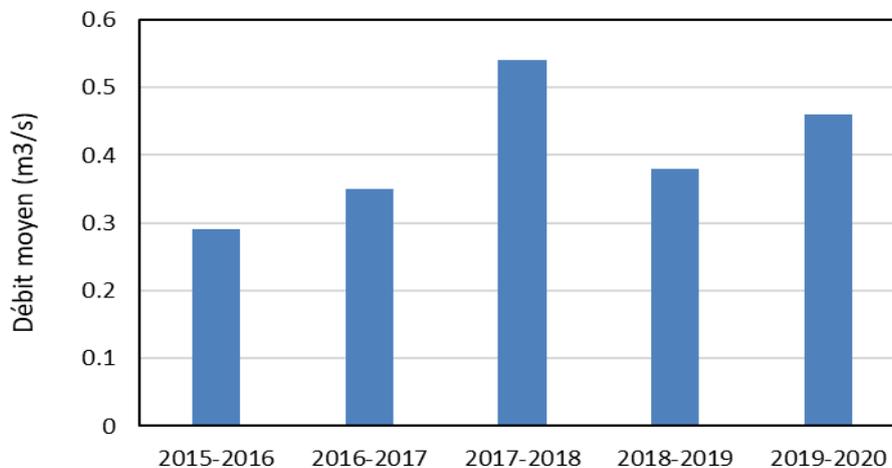


Figure 135 : Débit annuel moyen du Salaison

Les flux de MES suivent la même tendance que les débits avec un fort décrochage des flux de MES entre les années de débits élevés et de débits plus faibles.

Avec la méthode de la dernière concentration, les flux annuels de MES sont moins contrastés qu'avec les moyennes pondérées.

Les intervalles de débits ne donnent pas la même évolution des valeurs annuelles de MES.

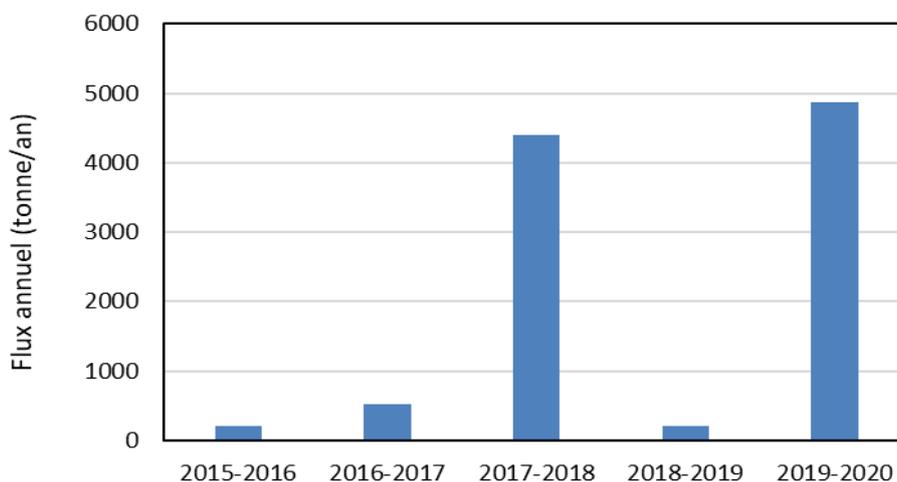


Figure 136 : Flux annuel de MES dans le Salaison (méthode de la moyenne pondérée)

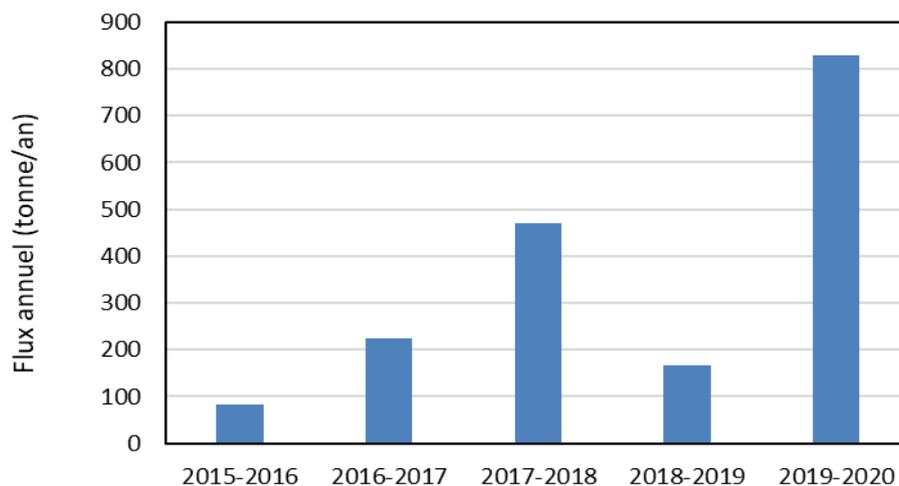


Figure 137 : Flux annuel de MES dans le Salaison (méthode de la dernière concentration)

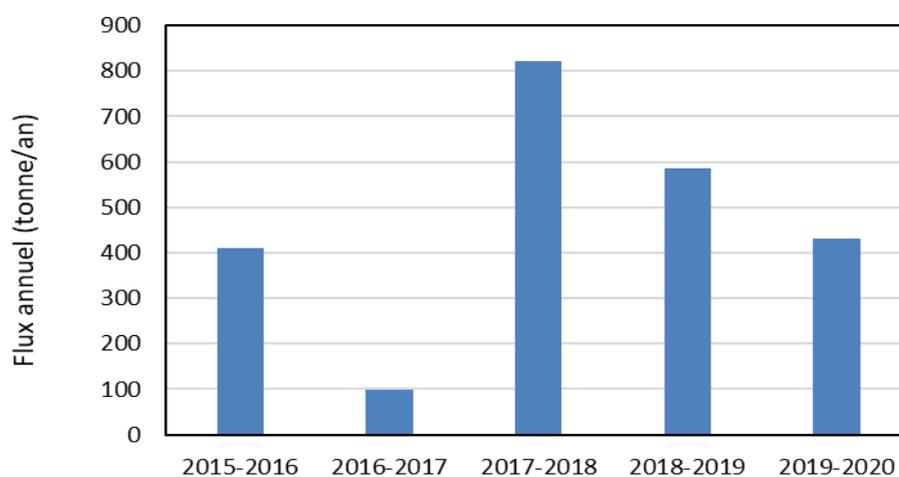


Figure 138 : Flux annuel de MES dans le Salaison (méthode des intervalles de débits)

Les flux d'azote suivent la même tendance. C'est souvent la forme nitrrique (nitrate) de l'azote qui domine, sauf dans le cas de la méthode de la dernière concentration où la forme organique domine parfois.

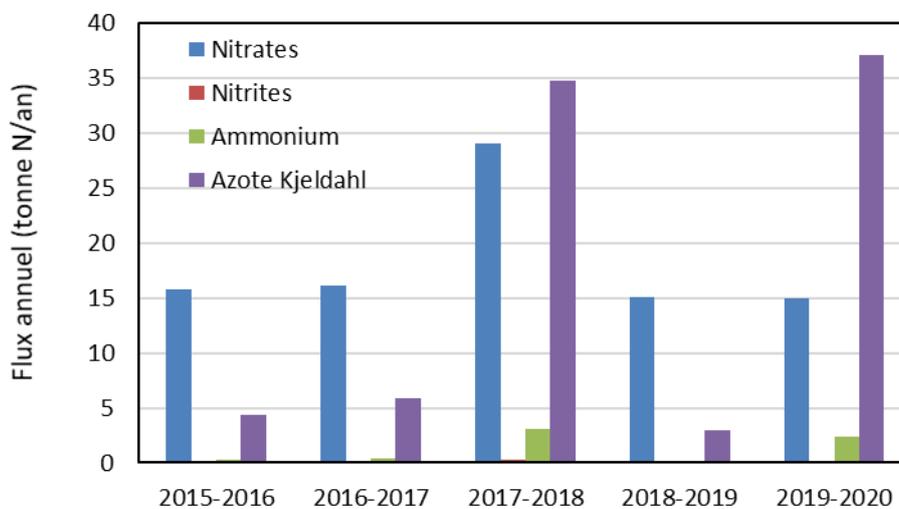


Figure 139 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaison (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

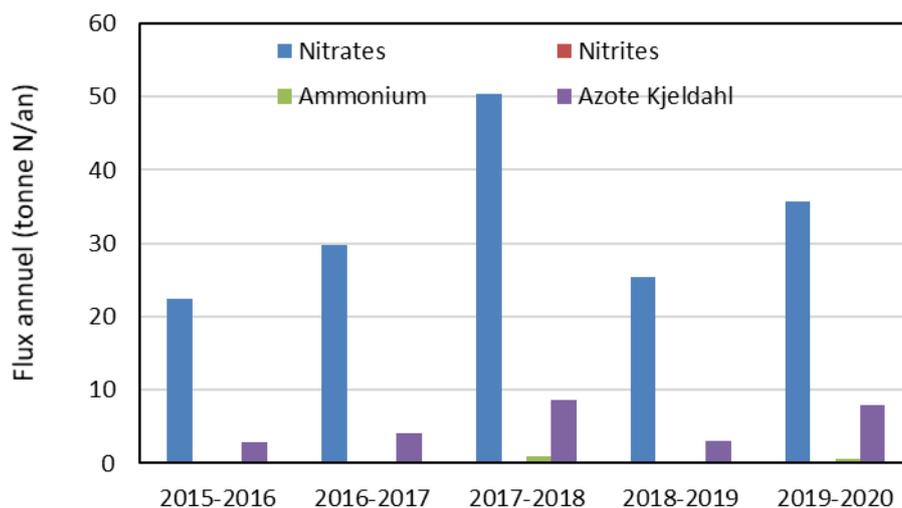


Figure 140 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaison (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

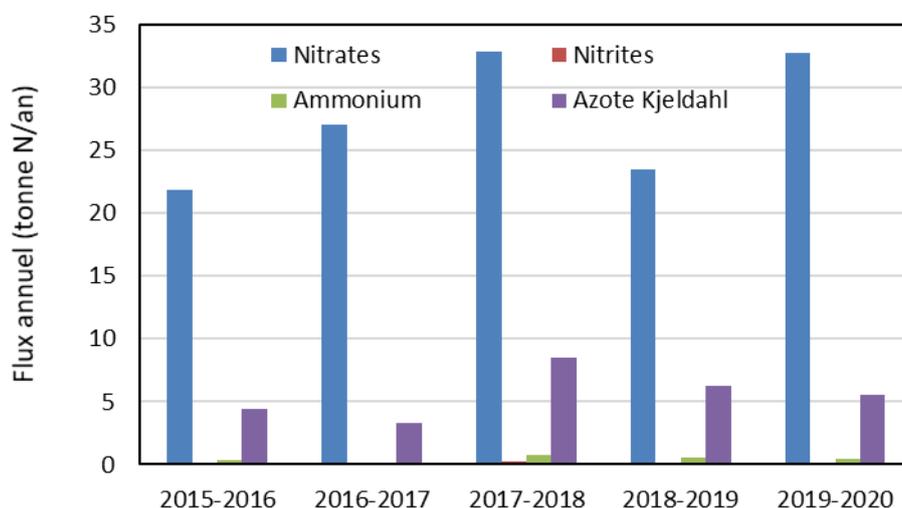


Figure 141 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaison (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

Les flux de phosphore suivent la même tendance avec la forme particulière (phosphore total – PO₄) ou ortho-phosphate en position dominante.

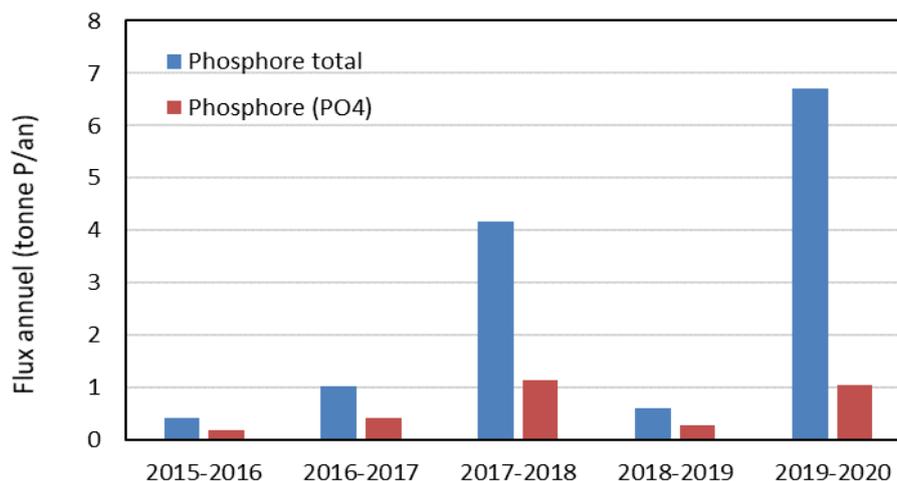


Figure 142 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaison (méthode de la moyenne pondérée)

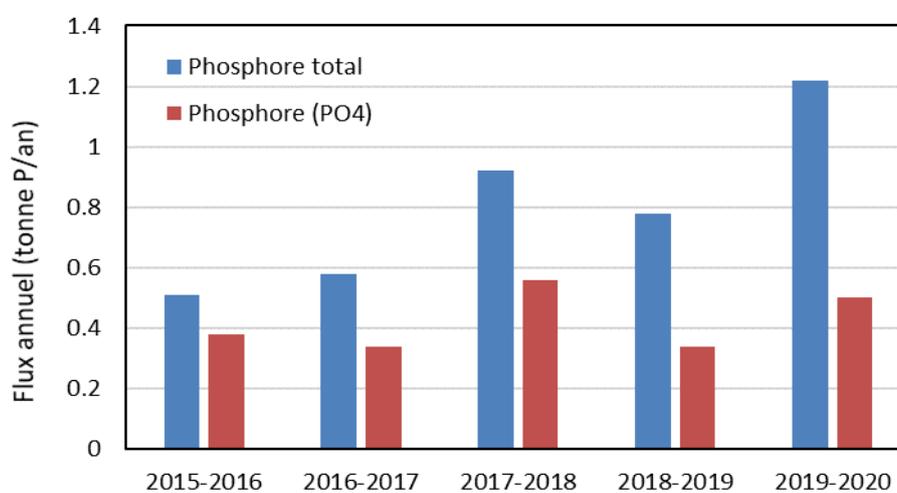


Figure 143 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaison (méthode de la dernière concentration)

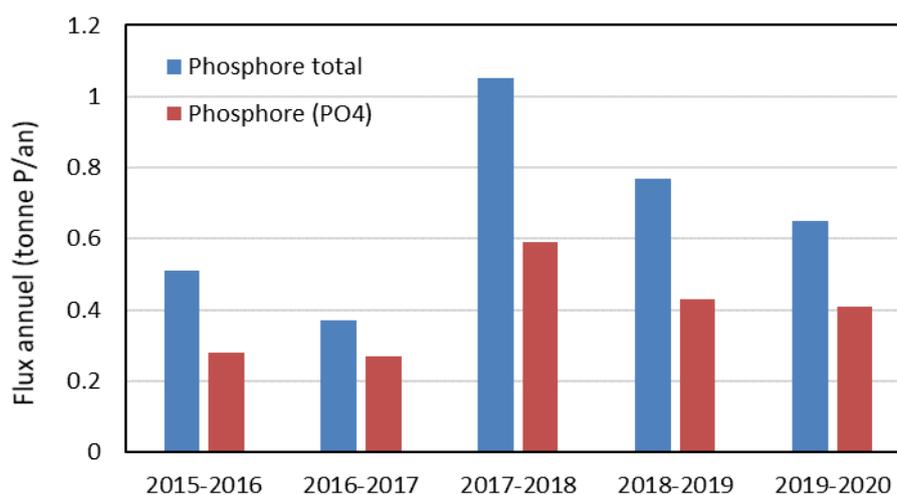


Figure 144 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaison (méthode des intervalles de débits)

5.5. Flux apportés par le Vidourle

Sur le Vidourle, le débit moyen est très important en 2015-2016 et beaucoup plus faible durant les autres années.

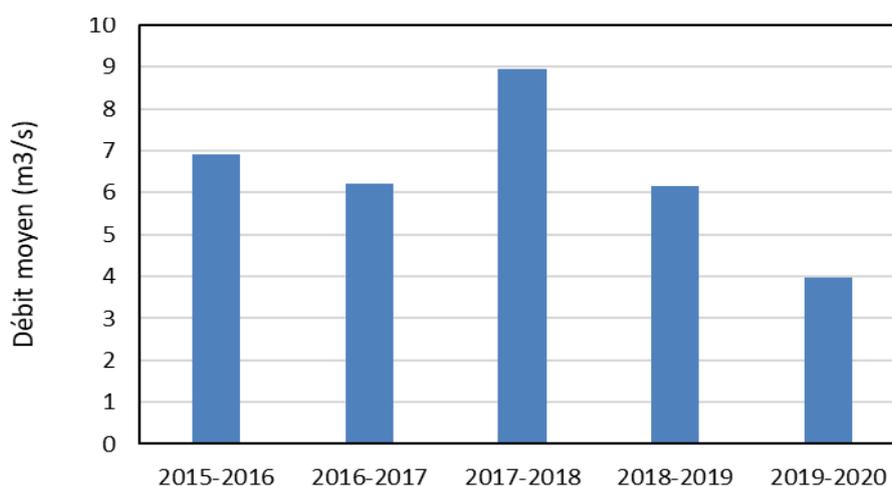


Figure 145 : Débit annuel moyen du Vidourle

Les flux de MES ne suivent pas du tout cette tendance. Il n'y a donc aucune corrélation entre les flux de MES et les débits moyens.

Avec la méthode de la dernière concentration, les flux de MES suivent une évolution différente de celle des débits, et également différente de celle obtenues avec la méthode des moyennes pondérées.

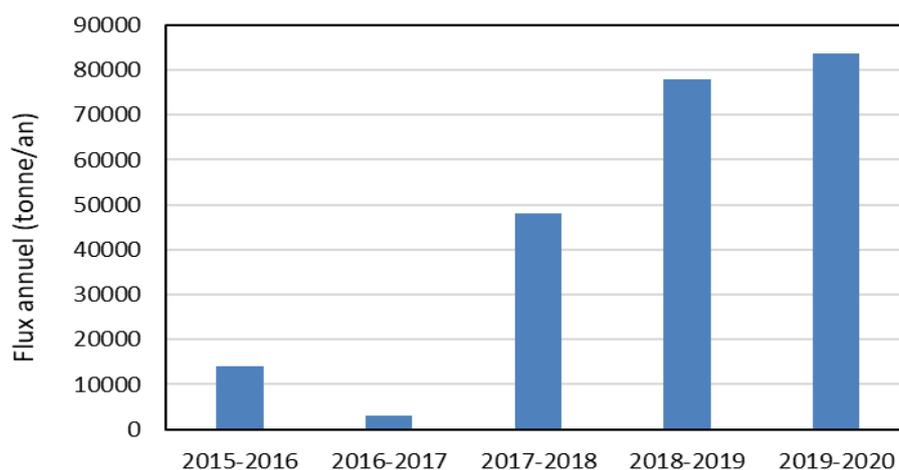


Figure 146 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode de la moyenne pondérée)

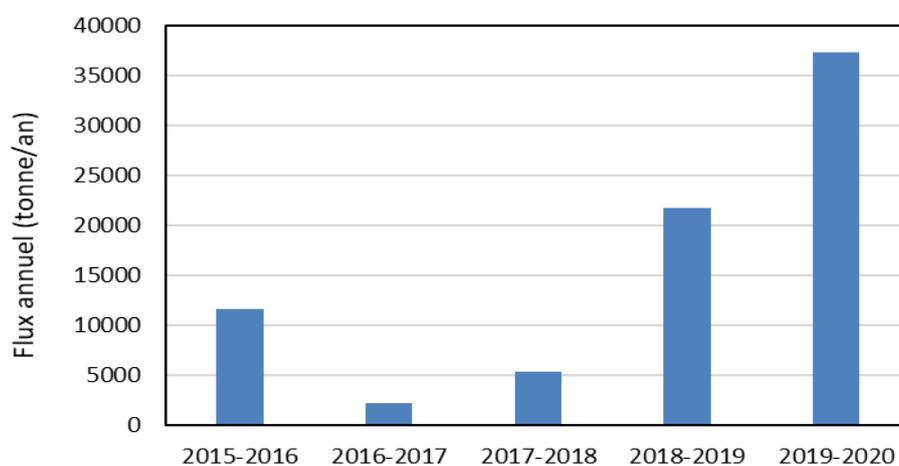


Figure 147 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode de la dernière concentration)

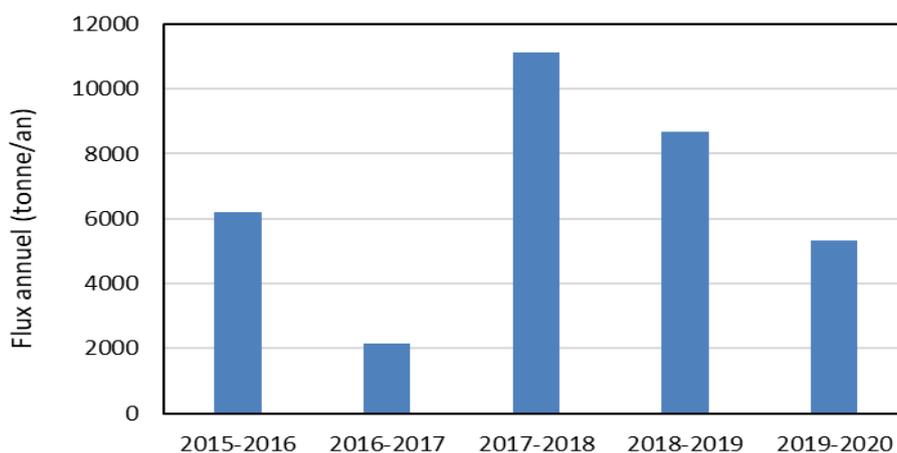


Figure 148 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode des intervalles de débits)

Le flux d'azote suit une tendance plutôt identique au débit. La forme nitrique est globalement aussi importante que l'azote Kjeldahl.

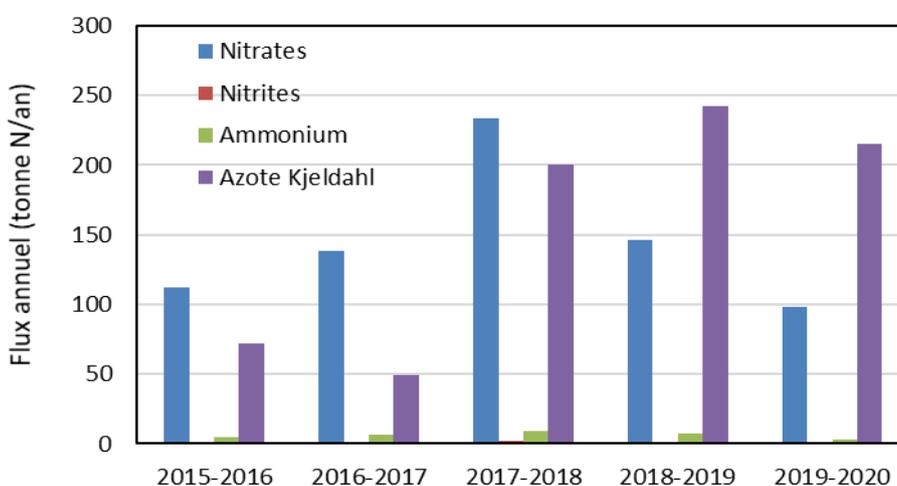


Figure 149 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

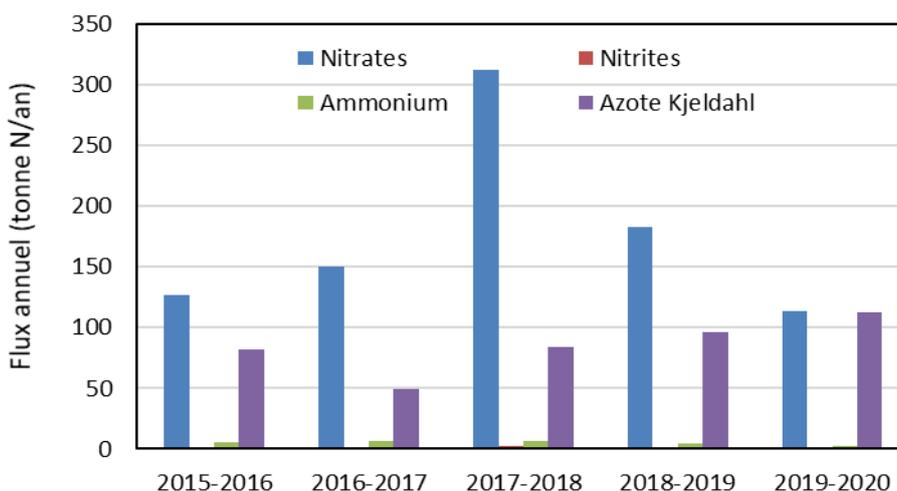


Figure 150 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

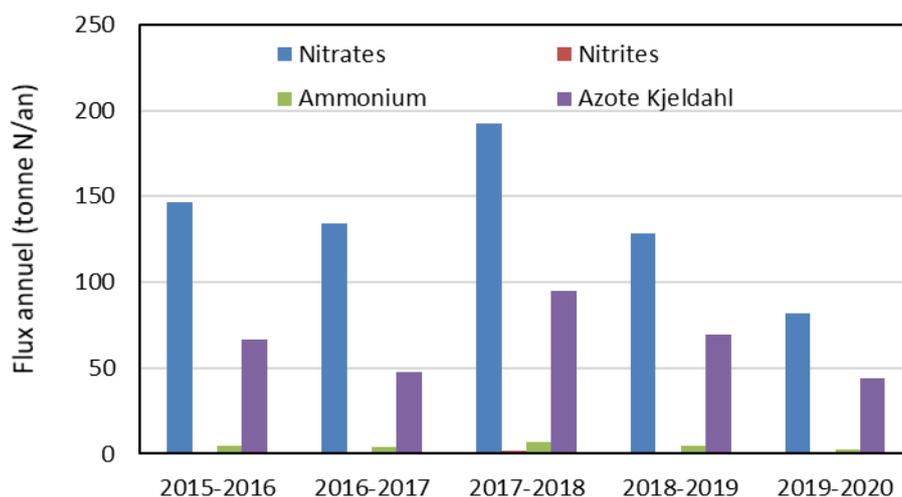


Figure 151 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

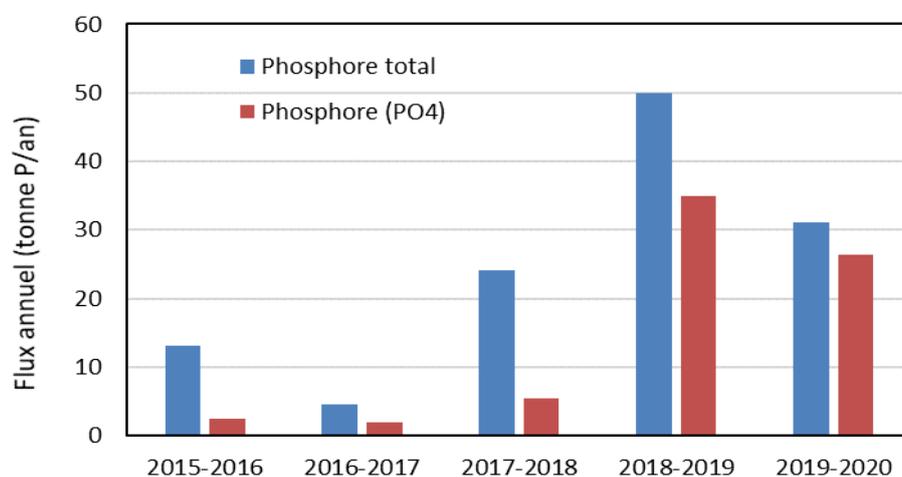


Figure 152 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode de la moyenne pondérée)

Le phosphore suit une tendance intermédiaire à celle des débits et à celle des MES. L'ortho-phosphate domine par rapport aux autres formes du phosphore.

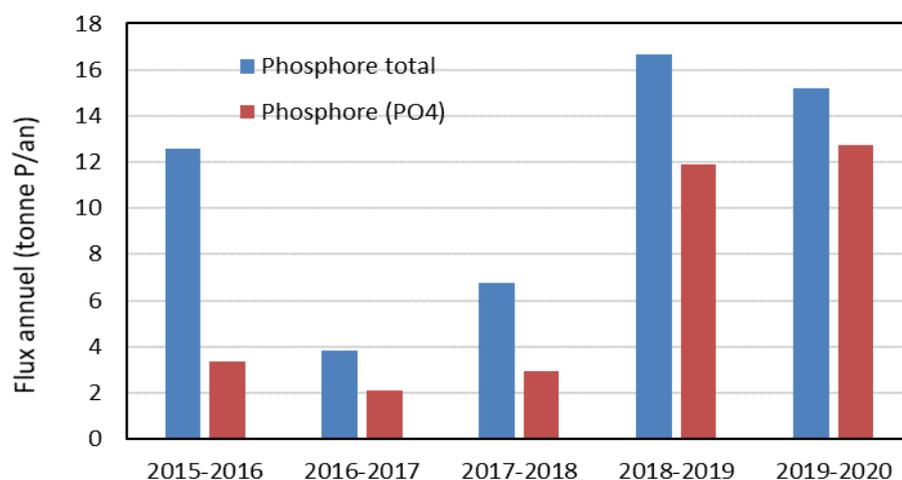


Figure 153 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode de la dernière concentration)

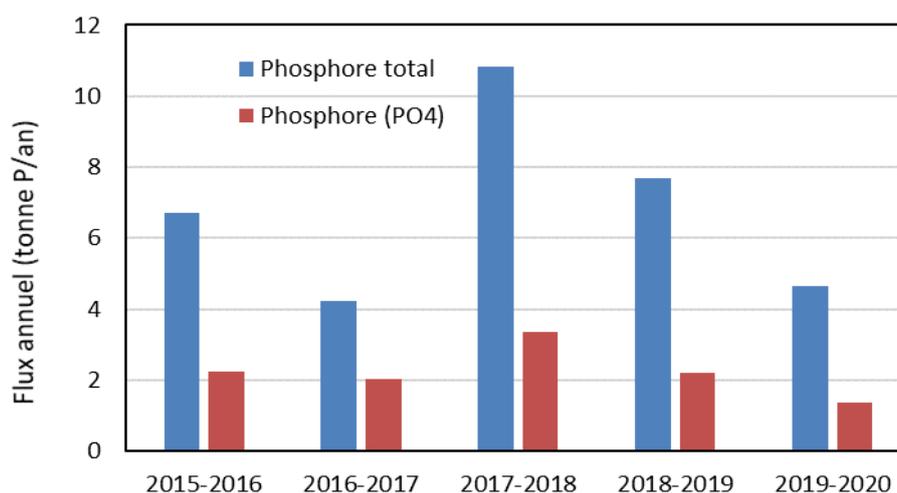


Figure 154 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode des intervalles de débits)

5.6. Flux apportés par l'Arc

Sur l'Arc, le débit moyen est très important en 2019-2020 et beaucoup plus faible durant les années antérieures.

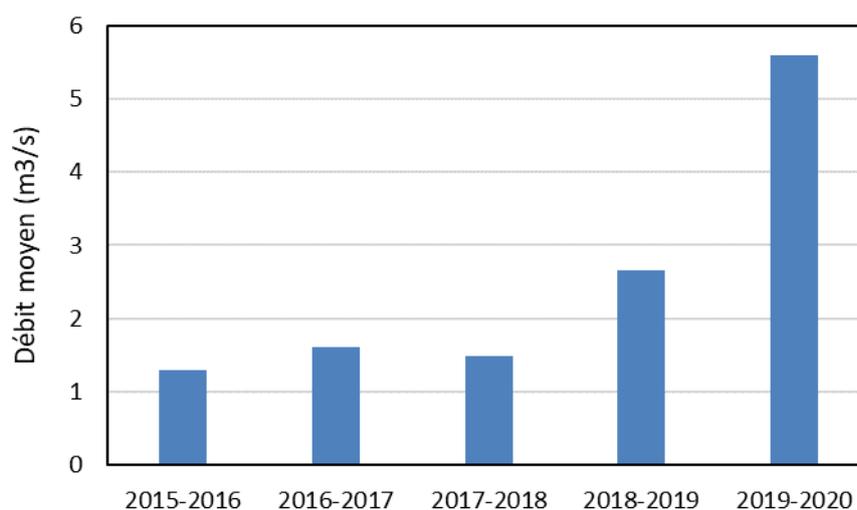


Figure 155 : Débit annuel moyen de l'Arc

Les flux de MES suivent plus ou moins cette tendance, mais sans corrélation directe entre les flux de MES et les débits moyens. Les résultats sont assez semblables entre les différentes méthodes.

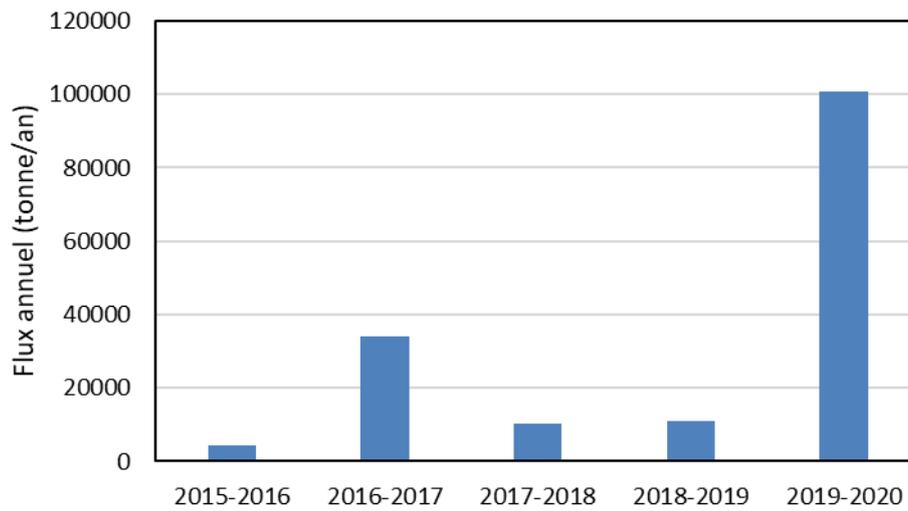


Figure 156 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode de la moyenne pondérée)

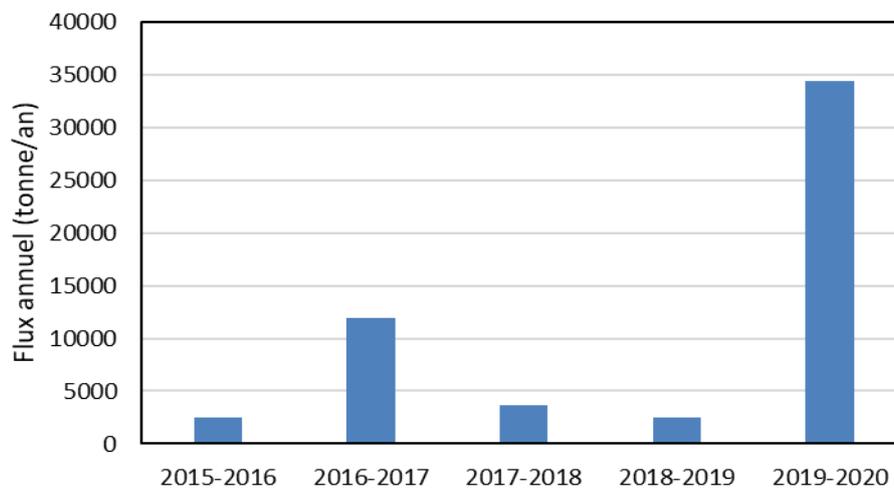


Figure 157 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode de la dernière concentration)

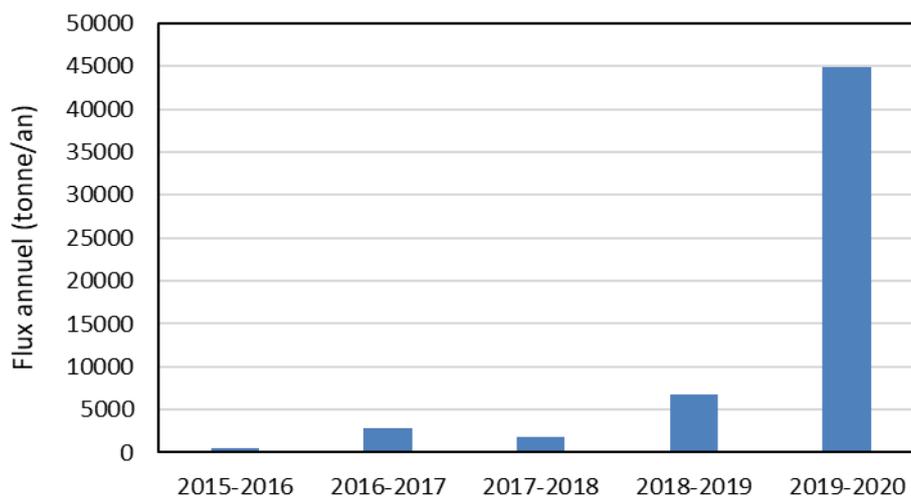


Figure 158 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode des intervalles de débits)

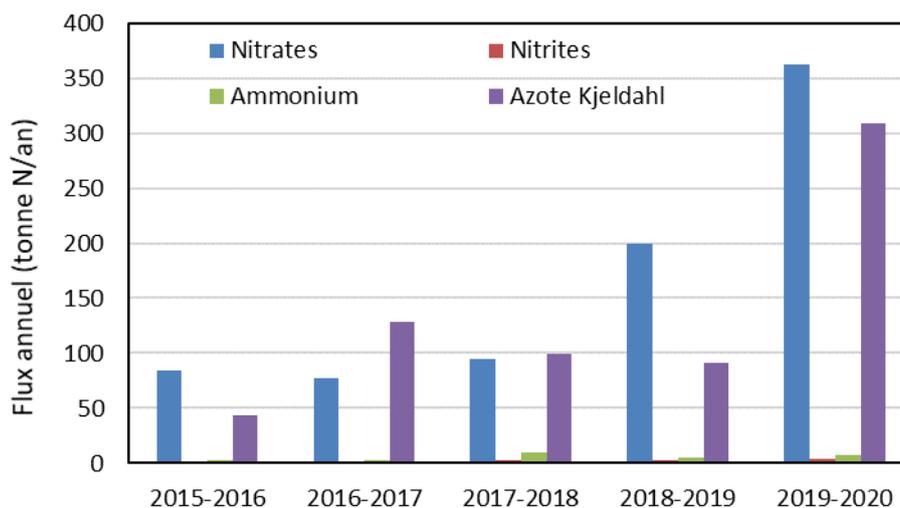


Figure 159 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée)

Le flux d'azote suit globalement la même tendance. Sur l'Arc, les formes nitrique (nitrate) et organique de l'azote sont presque équivalentes avec la première méthode, mais l'azote nitrique domine pour les deux autres.

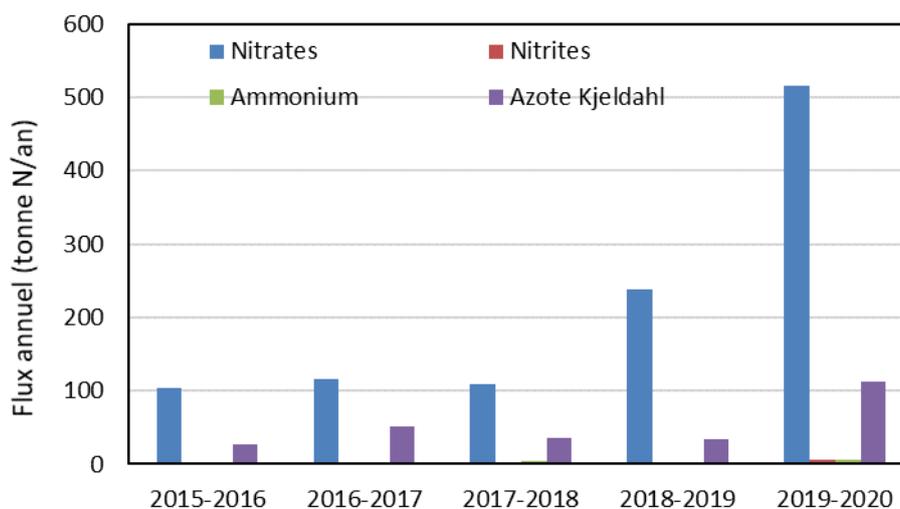


Figure 160 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)

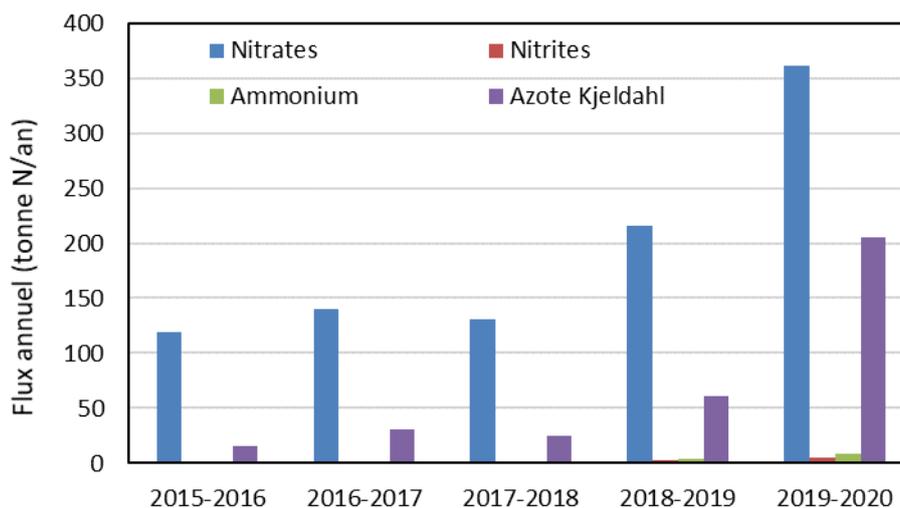


Figure 161 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)

Le flux de phosphore suit la même tendance. Pour le phosphore, la forme ortho-phosphate représente environ la moitié du phosphore total.

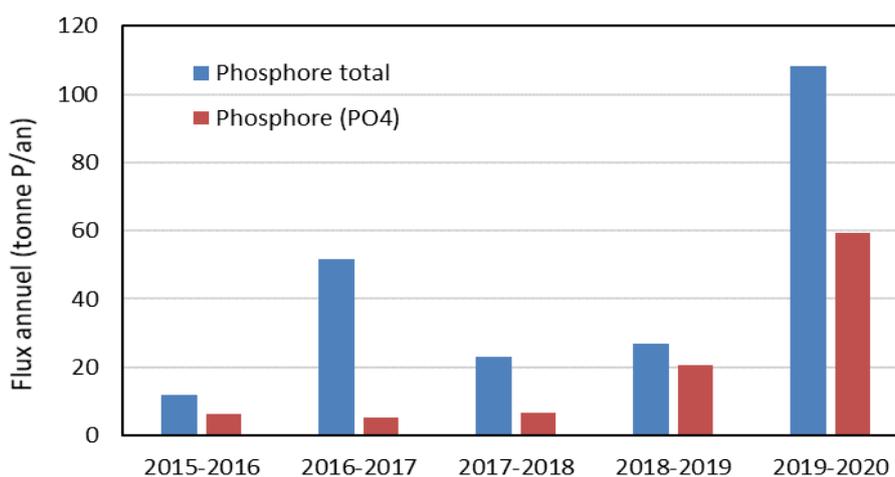


Figure 162 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode de la moyenne pondérée)

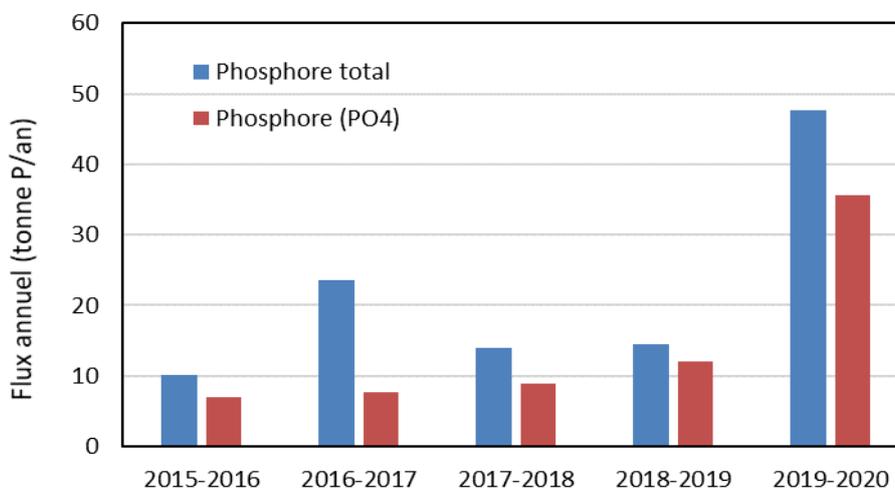


Figure 163 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode de la dernière concentration)

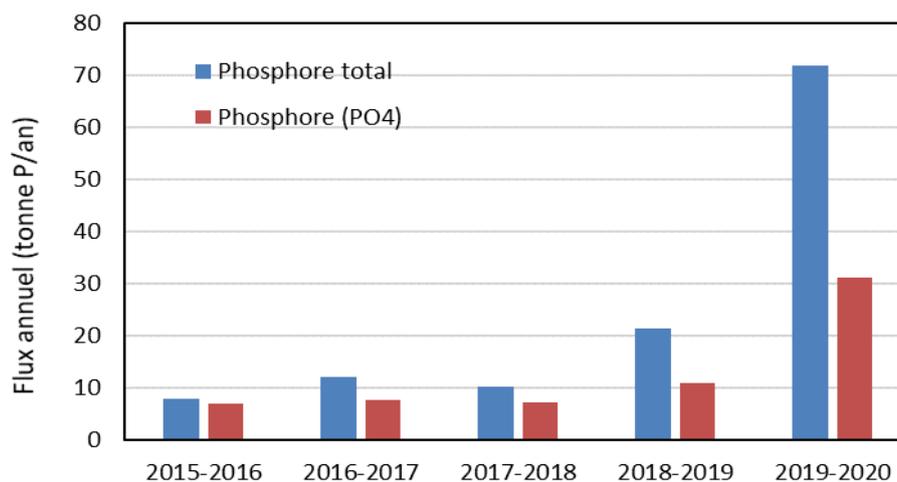


Figure 164 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode des intervalles de débits)

5.7. Comparaison des flux annuels moyens

Le Tableau 17 présente la synthèse des flux annuels moyens de MES, d'azote total et de phosphore total calculés par les trois méthodes pour les six tributaires.

Flux moyens (tonnes/an)	Méthode	Berre	Mosson	Lez	Salaison	Vidourle	Arc
MES	MP	21 340	14 033	11 165	2 444	42 148	52 749
	ID	3 552	2 981	1 924	504	7 158	21 875
	DC	4 918	3 593	3 820	396	13 159	17 907
Azote total	MP	79	115	233	39	311	423
	ID	24	88	148	35	216	365
	DC	36	93	183	41	276	390
Phosphore total	MP	13.1	13.9	14.7	3.0	23.8	63.9
	ID	2.1	5.5	5.1	0.7	7.3	39.8
	DC	3.3	6.1	4.5	0.8	10.4	29.8

Tableau 17 : Synthèse des flux annuels moyens (2015-2020) calculés par les différentes méthodes (MP = moyenne pondérée ; ID = intervalles de débit ; DC = dernière concentration)

La Figure 165 compare les flux annuels moyens obtenus par les trois méthodes sur les six tributaires. Les flux calculés par la méthode des intervalles de débit sont représentés selon l'axe des abscisses et les flux calculés par les autres méthodes selon l'axe des ordonnées et différenciés par les couleurs. La Figure 166 présente la même information mais en échelle log.

Les flux annuels moyens sont assez bien corrélés entre les méthodes des intervalles de débits et de la dernière concentration. Par contre, la méthode de la moyenne pondérée fournit des flux bien plus élevés tel que cela a été noté précédemment, en particulier pour les MES (points situés en haut et à droite sur la Figure 166) et le phosphore total (points situés en bas et à gauche sur la Figure 166). Les points du centre correspondant aux flux d'azote totale sont très proches de la droite de pente 1:1. Ce point sera discuté de façon plus détaillée dans la section suivante.

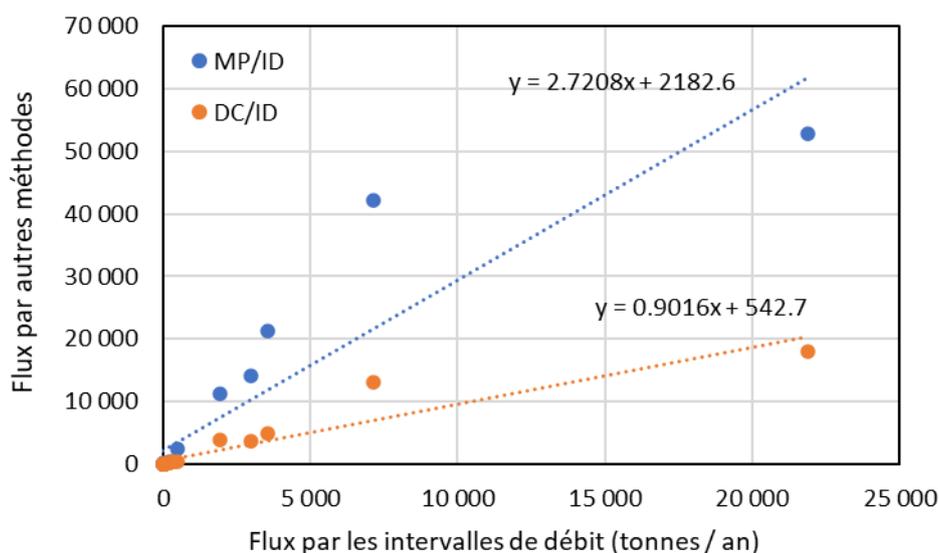


Figure 165 : Comparaison des flux annuels moyens des nutriments (MES, azote total, phosphore total ; voir Tableau 17) calculés par les différentes méthodes (ID = intervalles de débit ; MP = moyenne pondérée ; DC = dernière concentration)

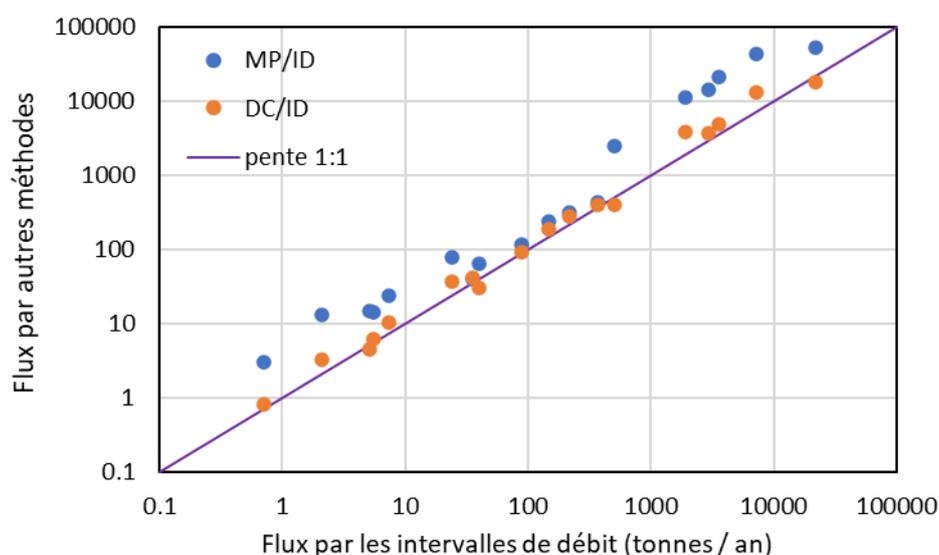


Figure 166 : Comparaison des flux annuels moyens des nutriments (MES, azote total, phosphore total ; voir Tableau 17) calculés par les différentes méthodes (ID = intervalles de débit ; MP = moyenne pondérée ; DC = dernière concentration) (en échelle log)

5.8. Discussion des résultats

Les flux annuels calculés montrent de grandes différences entre les années et entre les bassins versants. Les comparaisons faites entre le débit moyen et les flux de MES, d'azote et de phosphore ne montrent pas de corrélation nette, même si dans la plupart des cas une tendance assez semblable est observée. Le Vidourle et le Lez sont les deux bassins qui montrent le moins de dépendance des flux envers les débits.

Les formes dominantes de l'azote et du phosphore ne sont pas les mêmes selon les bassins, selon la dynamique des flux et selon la méthode de calcul utilisé. Il n'est cependant pas possible d'expliquer sur la base de ces graphiques la cause de la dominance de l'une ou de l'autre des formes.

Les résultats obtenus avec les trois méthodes (moyennes pondérées, dernière concentration et intervalles de débit) sont parfois très différents, atteignant un facteur 10 dans le cas des MES entre la méthode des moyennes pondérées et celle des intervalles de débits. Par exemple, pour le cas de la Berre, les flux de MES pour l'année 2016-2017 sont de 25 900 tonnes avec la méthode des moyennes pondérées, 4 752 tonnes avec celle des intervalles de débits et 8 532 tonnes avec la méthode de la dernière concentration.

De façon globale, la méthode des moyennes pondérées semble surestimer les flux apportés par rapport aux deux autres méthodes.

Ce fait semble à l'encontre de la synthèse effectuée par Inès Le Fur (2014) et des conclusions de SIEE (2003) indiquant que pour la pollution dissoute, la méthode des intervalles de débit conduit de façon générale à des valeurs plus fortes que celles des moyennes pondérées. Comme elle permet cependant de prendre mieux en compte l'hydrologie de chaque année en particulier, elle s'avère donc préférable à la méthode des moyennes pondérées. Pour les MES, la méthode des intervalles de débits est apparue meilleure.

La cause de cette surestimation des flux par la méthode des moyennes pondérées semble provenir de la forte dépendance de cette méthode aux couples concentration/débit disponibles pour le calcul. L'exemple de la Berre et des MES peut être pris.

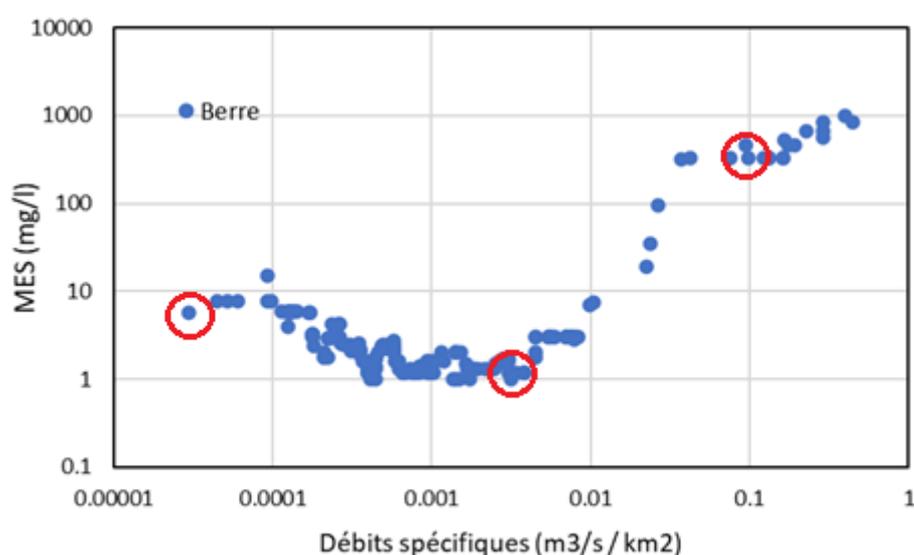


Figure 167 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre

Débit S.	0.00003	0.0001	0.0003	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3
MES	8	9	3	1	1	10	100	300	1000
Cas 1	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.
Cas 2	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	---	éch.	---
Cas 3	éch.	éch.	éch.	éch.	éch.	---	---		---

Tableau 18 : Concentrations de MES correspondant aux divers débits spécifiques de la Figure 167, avec 3 scénarios théoriques d'échantillonnage (éch.) des épisodes de crues

La Figure 167 illustre l'importance des concentrations potentiellement mesurées selon les débits spécifiques observés aux dates d'échantillonnage. Le Tableau 18 indique les valeurs de concentrations de MES correspondant à divers débits spécifiques de la Figure 172. Le tableau présente aussi 3 cas théoriques d'échantillonnage des épisodes de crues. Dans le cas 1, les crues sont bien échantillonnées ; dans le cas 3, aucun échantillonnage n'a lieu durant les crues ; le cas 2 étant intermédiaire.

Les trois concentrations moyennes (correspondant aux trois cas d'échantillonnage) calculées par la méthode des moyennes pondérées pour l'évaluation des flux de MES apportés à la lagune sont les suivants :

- Concentration moyenne (cas théorique 1) = 1218 mg/l
- Concentration moyenne (cas théorique 2) = 750 mg/l
- Concentration moyenne (cas théorique 3) = 70 mg/l

Ceci illustre bien la forte dépendance de la méthode des moyennes pondérées aux couples concentration – débits échantillonnés. La concentration moyenne (et donc le flux) est 17 fois plus important avec une sur-représentation des crues qu'avec leur sous-représentation.

Pour l'année hydrologique 2016-2017, la concentration moyenne pondérée calculée par la méthode MP est de 838 mg/l, alors que la moyenne arithmétique des concentrations mesurées sur cette période est de 189 mg/l, et la médiane de 2.8 mg/l.

Ce calcul de la concentration moyenne pondérée intègre 4 échantillons de crue parmi les 27 échantillons disponibles sur cette année-là, soit une représentativité des crues dans l'échantillonnage de 15%, donc bien supérieure à la fréquence réelle des crues (selon la fiche HYDRO de la station hydrométrique, le débit de 11.25 m³/s retenu comme représentatif des crues n'est dépassé que 1% du temps, soit environ 4 jours par an).

Ceci semble induire une sur-représentation des données de crues dans la méthode des moyennes pondérées (biais que n'a pas la méthode des intervalles de débits et moindrement celle de la dernière concentration. Ceci serait donc une importante faiblesse de la méthode des moyennes pondérées, qui ne s'avère applicable qu'avec un échantillonnage statistiquement représentatif des réelles conditions de débits.

Cet aspect est développé et illustré dans les sections suivantes.

5.9. Comparaison des concentrations prises en compte par les méthodes MP et ID

Dans la comparaison des résultats obtenus par les méthodes de la moyenne pondérée (MP) et des intervalles de débits (ID), les différences observées peuvent provenir d'une surestimation induite par l'une des méthodes (en l'occurrence la MP) ou d'une sous-estimation engendrée dans l'autre méthode (dans l'ID). Dans les deux méthodes, les concentrations utilisées pour les calculs ne sont pas directement les mêmes puisqu'il s'agit des concentrations instantanées pour la méthode MP et des concentrations médianes de chaque intervalle de débits pour la méthode ID. La méthode MP utilise les données réelles des cinq dernières années (période du suivi renforcé) alors que la méthode ID utilise les concentrations médianes établies par intervalle de débits à partir de toutes les données disponibles depuis vingt ans. Il est donc légitime de se demander si l'utilisation de concentrations différentes n'est pas responsable de la différence observée dans les résultats. Une comparaison a donc été menée entre les concentrations réelles des cinq dernières années et les concentrations médianes utilisées par la méthode ID.

Les figures suivantes (Figure 168 à Figure 173) présentent à cette fin les différentes concentrations en fonction des débits instantanés correspondants : concentrations médianes des différents intervalles de débits utilisés par la méthode ID (courbe rouge), concentrations instantanées des cinq dernières années (points verts), médianes mobiles des concentrations instantanées (points noirs). Ces médianes mobiles des concentrations instantanées sont calculées de la façon suivante : 1- les échantillonnages des cinq dernières années sont rangés en fonction du débit auxquels ils sont associés (du débit échantillonné le plus faible au débit le plus fort) ; 2- la médiane des concentrations des neuf premiers échantillons ainsi rangés (de rang 1 à 9) est calculée ; 3- puis celle des concentrations de rang 2 à 10, et ainsi de suite. Les graphiques comparatifs sont réalisés tributaire par tributaire pour les MES, l'azote total et le phosphore total.

Les concentrations instantanées des cinq dernières années (points verts des Figure 168 à Figure 173) présentent une grande variabilité pour les débits élevés, et dans le cas de l'azote total parfois pour tous les débits. La comparaison visuelle est donc plus facile à réaliser en utilisant les concentrations médianes mobiles (points noirs), puisque cela permet de lisser cette variabilité des concentrations. Les concentrations médianes mobiles des débits élevés sont proches des concentrations médianes par intervalle de débit (utilisées dans la méthode ID) ou au maximum environ deux fois plus fortes. Notons que l'utilisation de la moyenne au lieu de la médiane donne à peu près les mêmes constats. Avec ces observations, on peut donc s'attendre à des flux calculés avec la méthode MP au maximum deux fois supérieurs à ceux obtenus par la méthode ID. Ceci ne peut donc expliquer les flux jusqu'à 10 fois supérieurs obtenus par la méthode MP par rapport à la méthode ID.

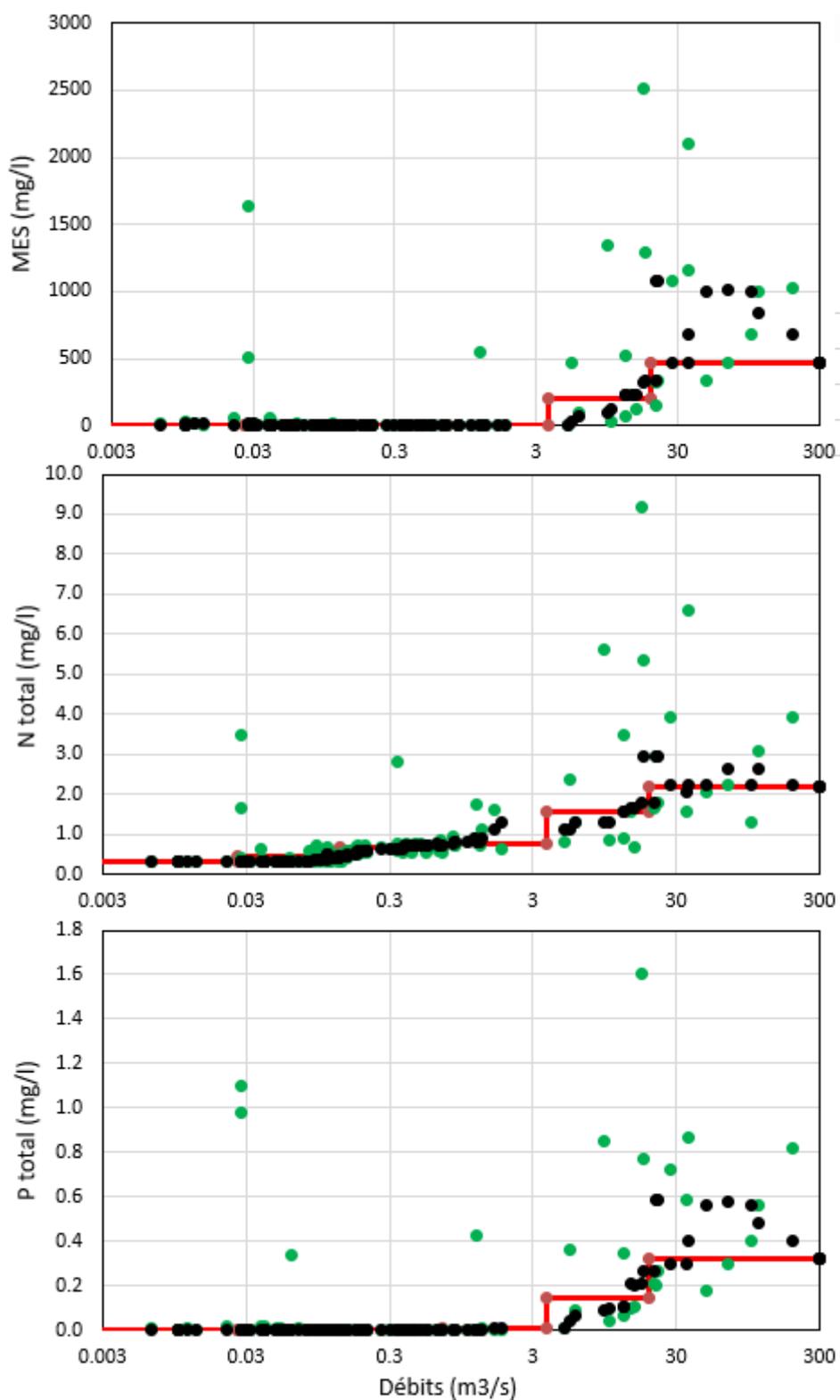


Figure 168 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de la Berre

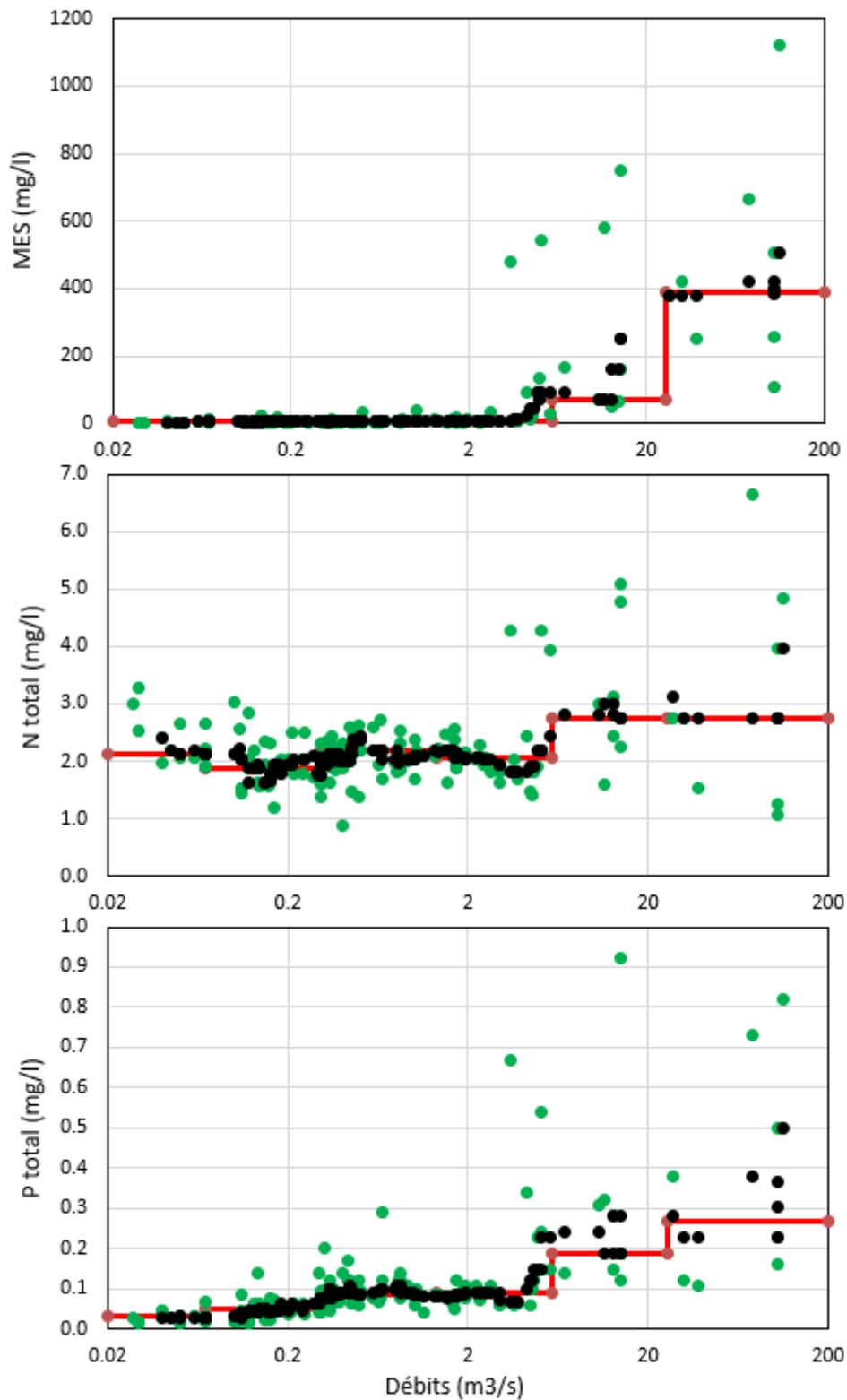


Figure 169 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de la Mosson

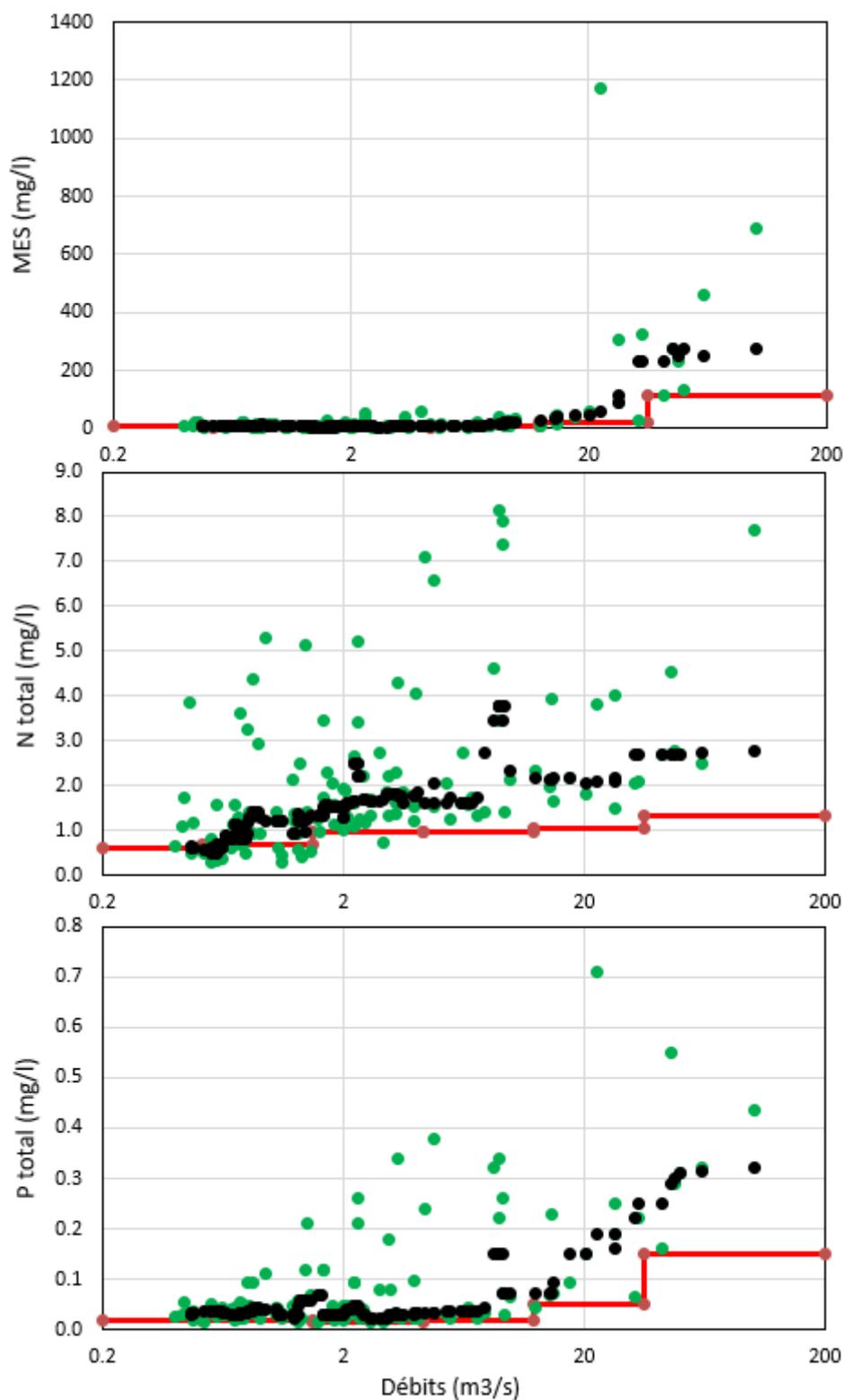


Figure 170 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Lez.

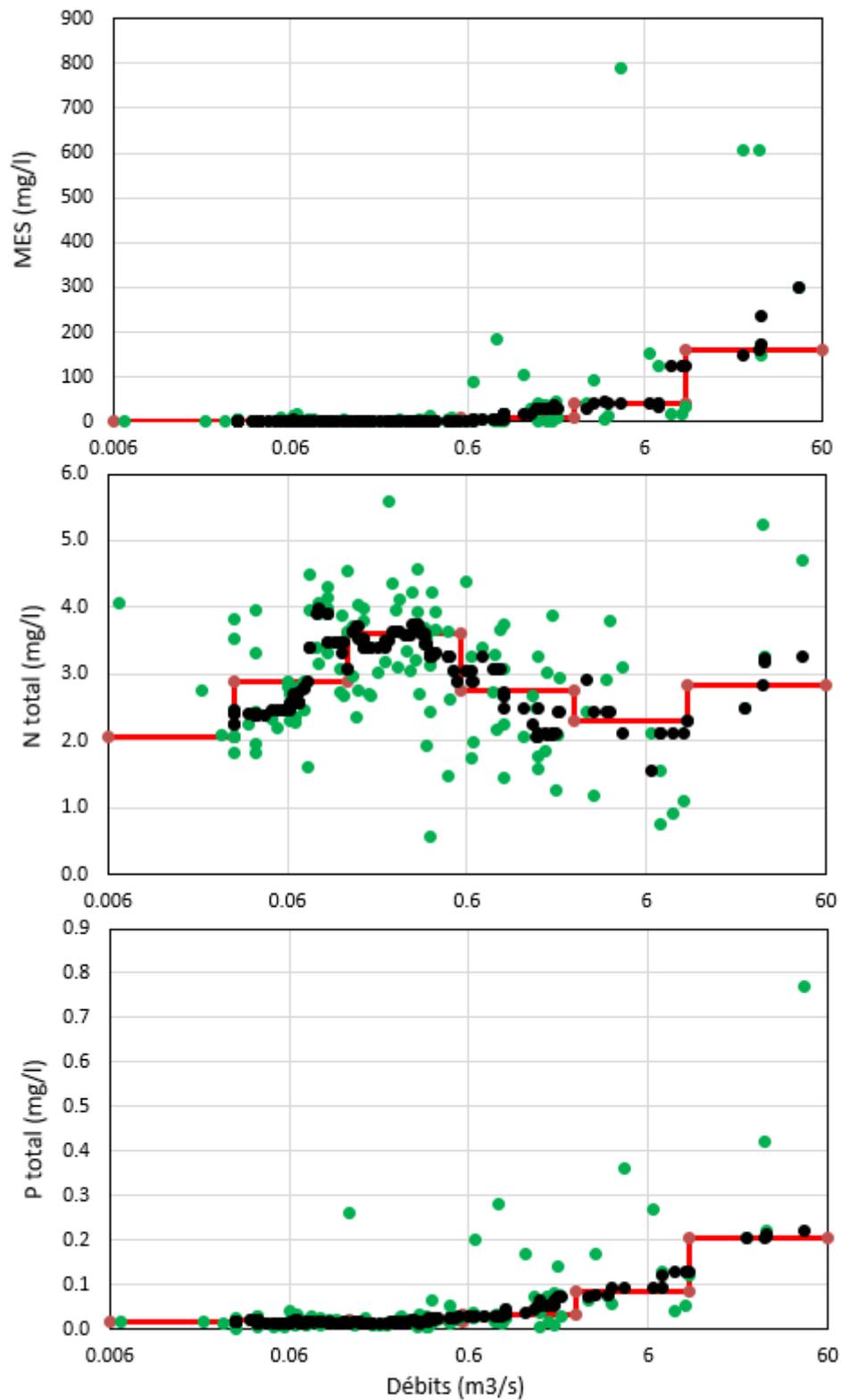


Figure 171 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Salaison

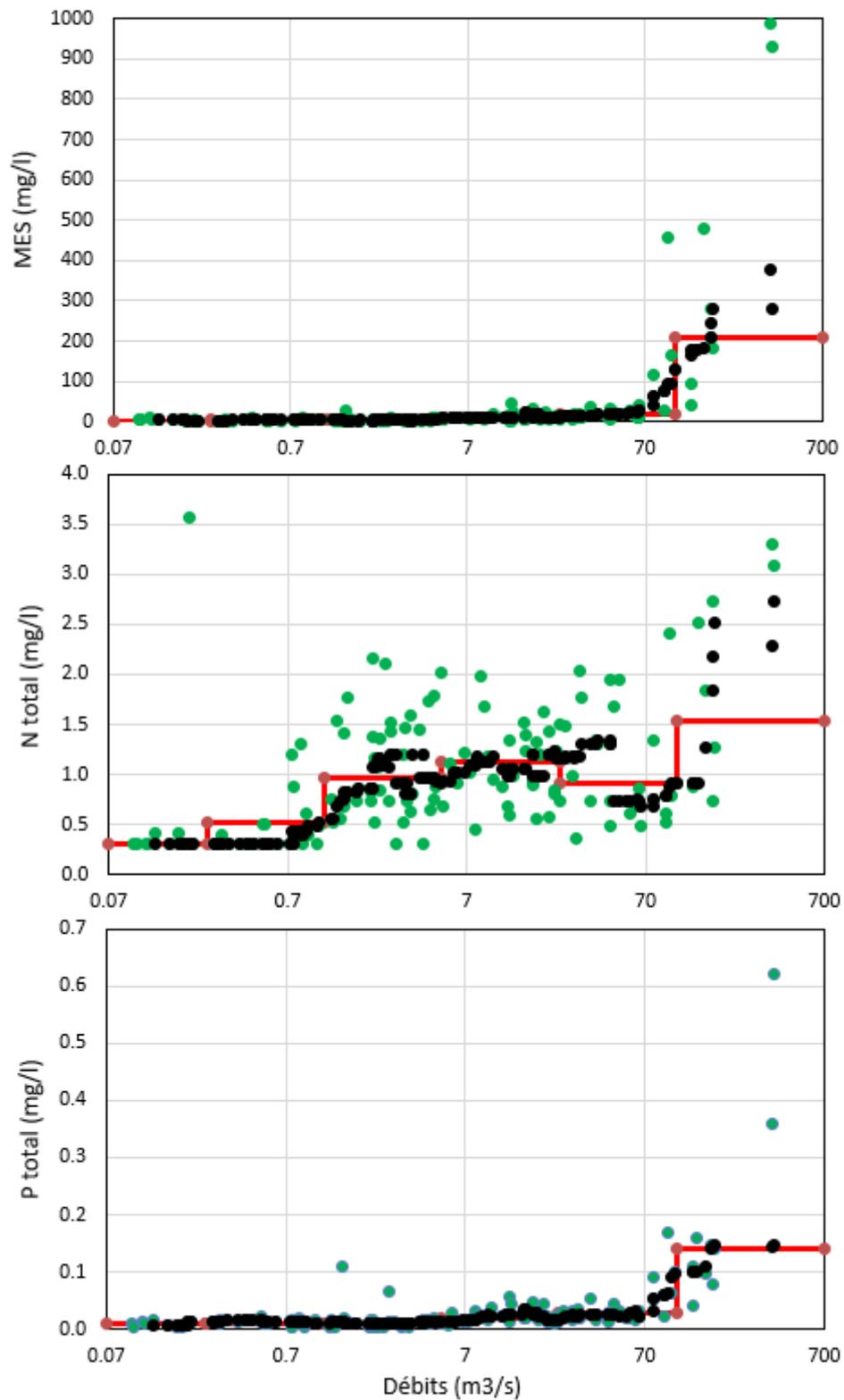


Figure 172 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Vidourle

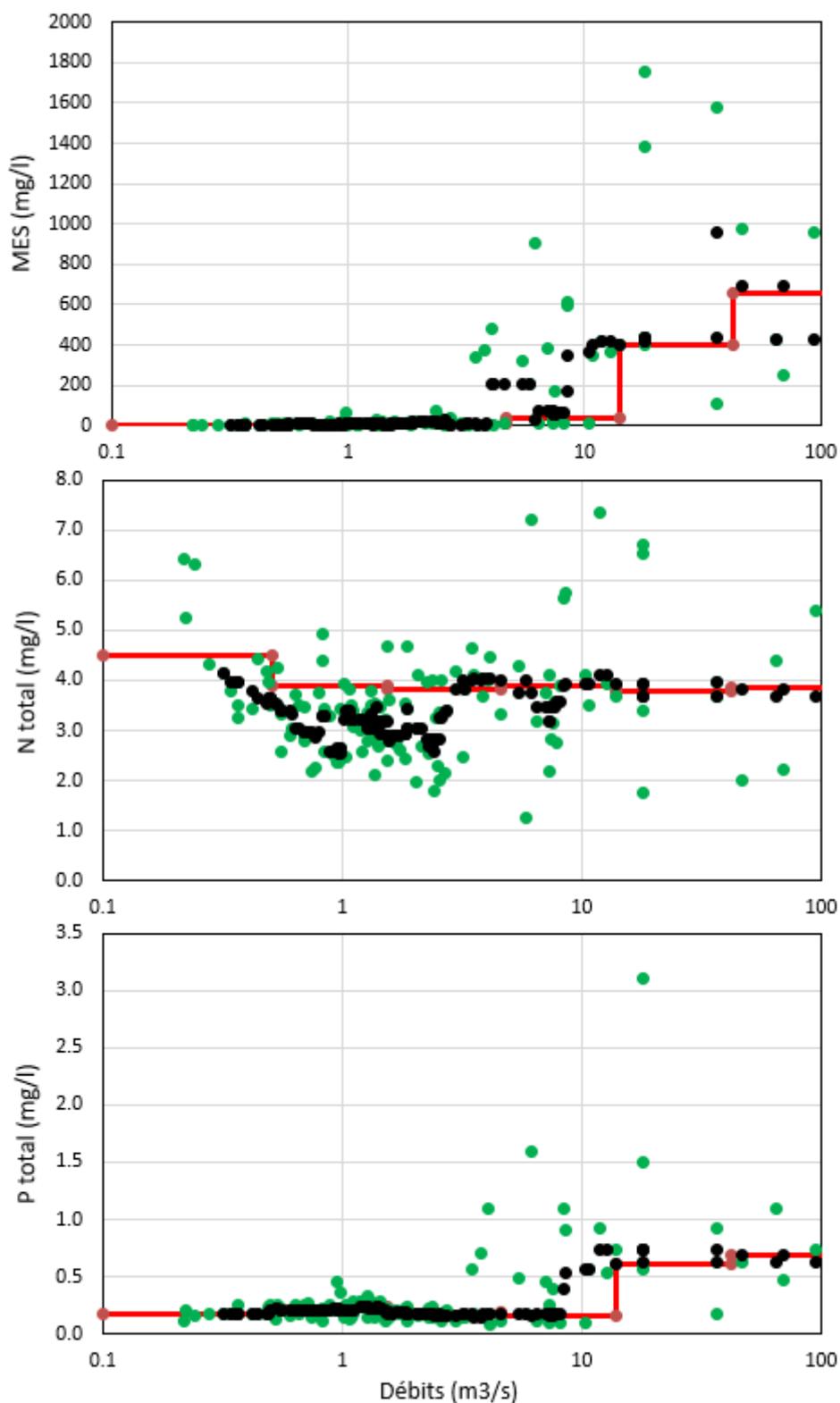


Figure 173 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de l'Arc

La Figure 174 compare les concentrations médianes de la dernière classe de débit de la méthode ID avec la médiane des concentrations utilisées par la méthode MP pour les plus forts débits (compris

dans cette classe). La comparaison montre des différences généralement faibles entre les deux types de données.

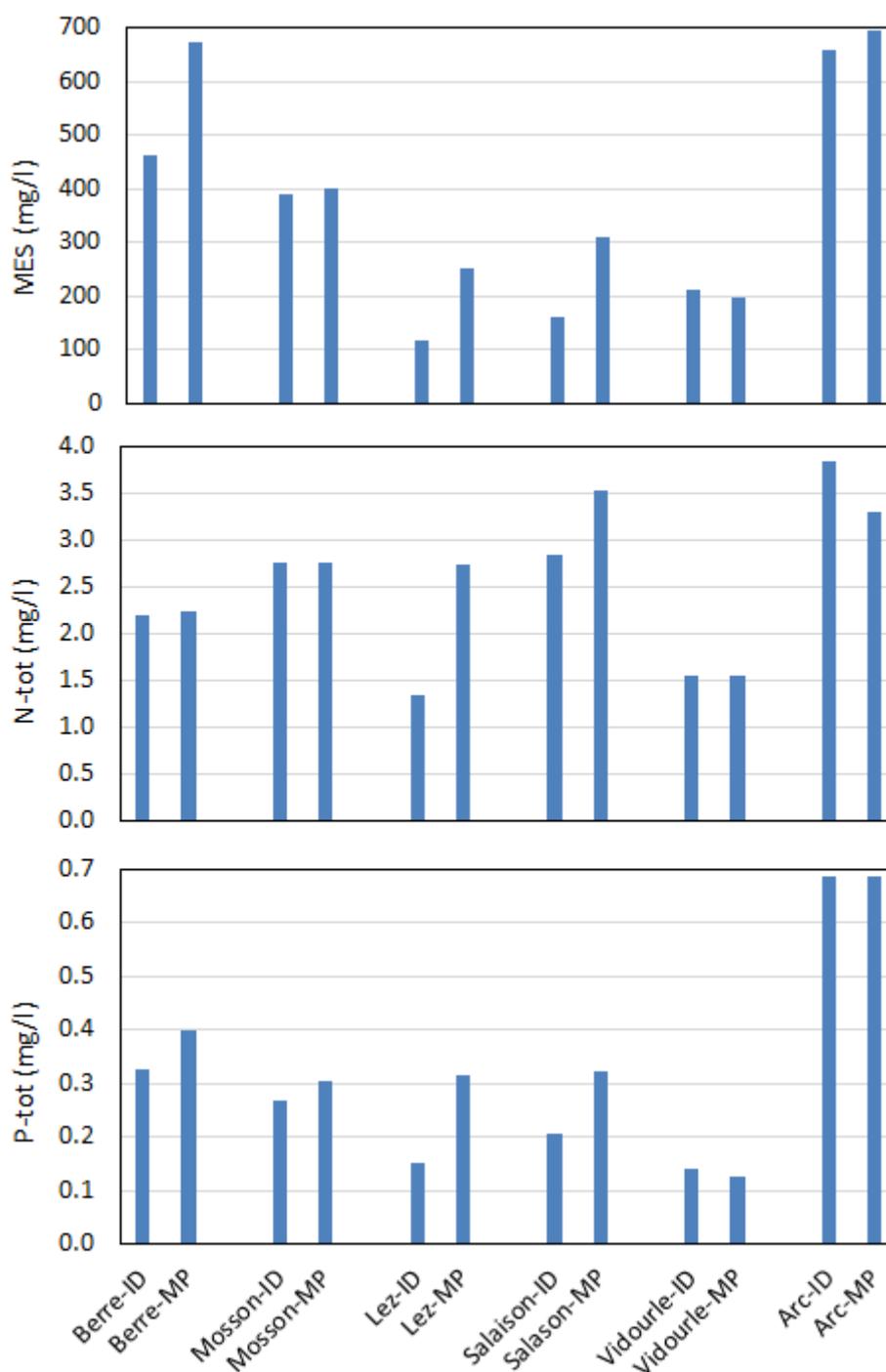


Figure 174 : Comparaison des concentrations utilisées pour les plus forts débits : médiane de la dernière classe de la méthode ID et valeur médiane des données instantanées utilisées par la méthode MP pour les débits entrant dans cette classe

Le Tableau 17 présente les rapports entre les flux annuels moyens calculés par les méthodes ID et MP. Ces flux sont de l'ordre de 4.7 à 6.0 pour les MES (de 2.4 seulement pour l'Arc) et de 2.5 à 6.2 pour le phosphore totale (de 1.6 seulement pour l'Arc). Pour l'azote, les rapports sont faibles, de 1.1 à 1.6, hormis pour la Berre avec un rapport de 3.3. Dans tous les cas, ces rapports sont bien plus élevés que les rapports entre les concentrations utilisées par les méthodes ID et MP présentées à la Figure 174. **Nous pouvons**

donc en conclure que les importantes différences observées dans les flux calculés ne peuvent être expliquées par les concentrations différentes prises en compte par les deux méthodes.

Flux moyens (tonnes/an)	Méthode	Berre	Mosson	Lez	Salaison	Vidourle	Arc
MES	MP	21 335	14 038	11 174	2 446	42 083	53 036
	ID	3 552	2 981	1 924	504	7 158	21 875
	Rapport	6.0	4.7	5.8	4.9	5.9	2.4
Azote total	MP	79	115	233	39	310	422
	ID	24	88	148	35	216	365
	Rapport	3.3	1.3	1.6	1.1	1.4	1.2
Phosphore total	MP	13.1	13.9	14.7	3.0	23.7	64.2
	ID	2.1	5.5	5.1	0.7	7.3	39.8
	Rapport	6.2	2.5	2.9	4.3	3.3	1.6

Tableau 19 : Rapports entre les flux annuels moyens calculés par les méthodes ID et MP

5.10. Importance des données de crues dans la méthode ID

L'examen des données (exemple de la Figure 175) montre une exacerbation des concentrations de certains éléments durant les crues. Ceci concerne en particulier les formes particulières : MES, azote Kjeldahl correspondant principalement à de l'azote organique, phosphore principalement adsorbé sur les particules d'argile et de matières organique. Les formes dissoutes (azote inorganique et ortho-phosphate) sont moins corrélées au débit.

Une illustration peut être faite avec les données de MES et de phosphore total du Vidourle (Figure 175). On peut globalement identifier trois parties dans les relations concentration – débit de ces deux paramètres :

- $Q < 5 \text{ m}^3/\text{s}$: les deux paramètres sont presque constants, avec MES $\sim 7 \text{ mg/l}$ et P-tot $\sim 0.02 \text{ mg/l}$;
- $5 < Q < 50 \text{ m}^3/\text{s}$: les MES varient de 7 à 20 mg/l et le P-tot de 0.02 à 0.05 mg/l ;
- $50 < Q < 800 \text{ m}^3/\text{s}$: les MES varient de 20 à 800 mg/l et le P-tot de 0.05 à 0.34 mg/l.

Les flux moyens probables peuvent être calculés en utilisant ces relations concentration – débit et les fréquences correspondantes des débits. Les flux annuels moyens sont de :

- 30 600 T/an pour les MES
- 22.4 T/an pour le phosphore total

En omettant les données issues des échantillonnages des crues, les flux annuels correspondants seraient de :

- 2 040 T/an pour les MES
- 5.1 T/an pour le phosphore total

Ces flux 'sans crue' sont considérablement plus faibles que ceux utilisant la totalité de l'information (avec les crues), respectivement 15 fois plus faibles pour les MES et 4.4 fois plus faibles pour le phosphore total.

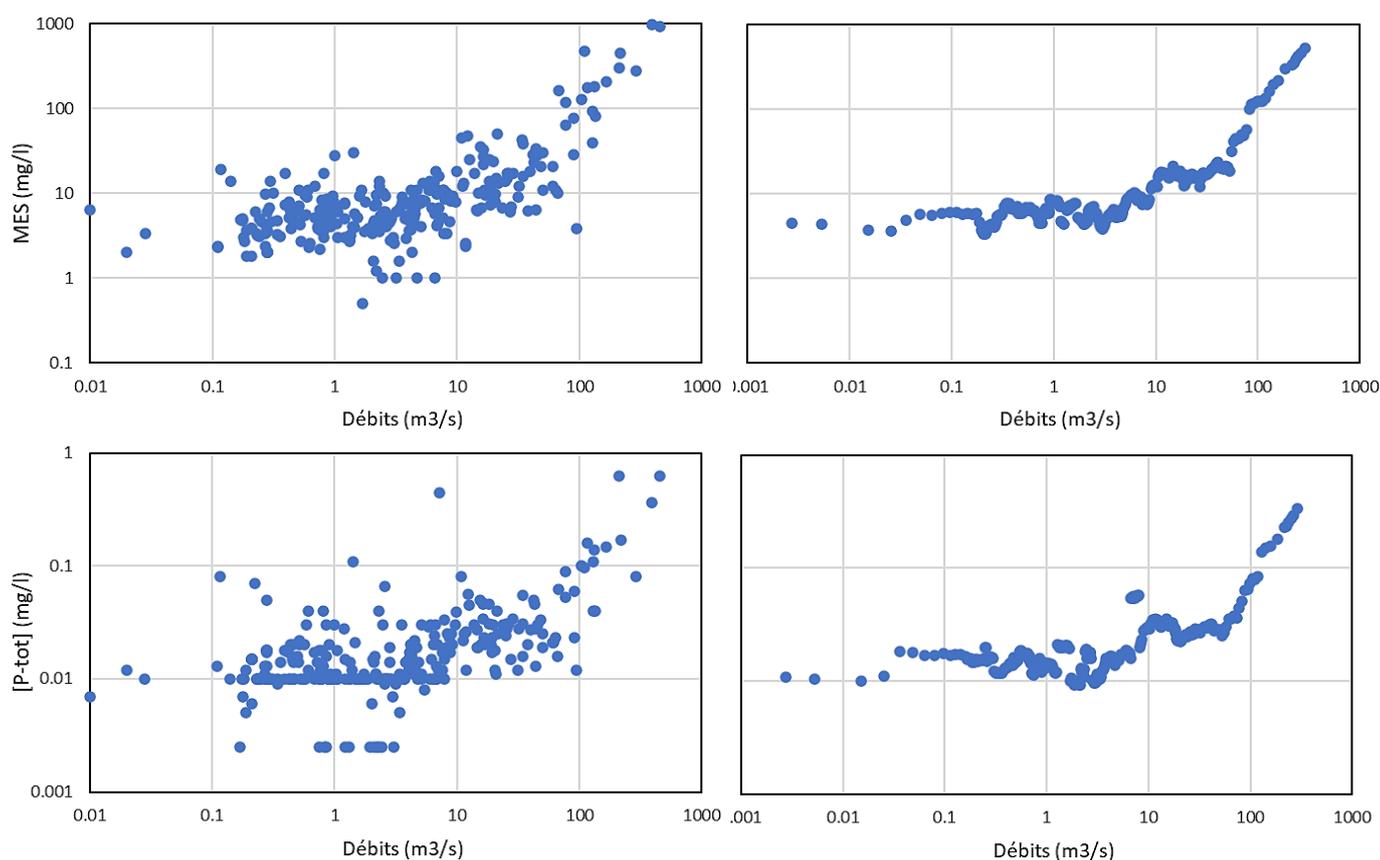


Figure 175 : Relation entre concentrations de MES (en haut) et Phosphore total (en bas) et débits du Vidourle – données brutes à gauche, moyennes mobiles sur 10 valeurs à droite

→ La prise en compte des débits de crues et de la relation concentration / débit est donc très importante pour l'établissement de flux représentatifs de la réalité. Ces relations concentration / débit permettent d'établir les valeurs de concentrations des intervalles de débit de la méthode éponyme. L'avantage de cette méthode est de pouvoir constituer une relation concentration / débit avec les données de plusieurs années dans la mesure où l'occupation et l'utilisation du territoire ne varient pas de façon majeure. Il n'est donc pas nécessaire avec cette méthode d'échantillonner systématiquement et régulièrement les crues. Une vérification - actualisation de la relation concentration / débit peut être réalisée de temps à autre, par exemple tous les 5, 10 ou 15 ans. En cas de modification drastique de l'occupation et de l'utilisation du territoire, une nouvelle caractérisation est alors requise.

5.11. Importance des données de crues dans la méthode MP

Les résultats présentés précédemment (section 5.7) ont montré que les flux calculés par les trois méthodes sont très différents. Il n'est cependant pas possible d'en déduire objectivement si c'est l'une des méthodes qui surestime les flux ou une autre qui les sous-estime, même si la comparaison illustrée à la Figure 166 montre que les méthodes ID et DC donnent des résultats très proches, que la méthode MP donne des flux d'azote total également très proches des flux des deux autres méthodes, et que seuls les flux de MES et phosphore total diffèrent entre la MP d'un côté et les ID et DC de l'autre. La dépendance de la méthode MP aux échantillonnages de crues a donc été testée afin de vérifier si cela pouvait expliquer une surestimation de la MP pour les flux de MES et de phosphore total. Ce test a été réalisé en faisant varier le nombre d'échantillons de crues pris en compte dans le calcul des flux avec la MP. Les paragraphes suivants en présentent les résultats.

Six jeux de données ont été utilisés pour le calcul des différents flux à l'aide de la méthode MP. Ces six jeux de données ont trait au nombre d'échantillons de crues pris en compte. Au préalable, nous avons standardisé la définition de l'état de crue d'un échantillonnage de façon statistique sur la base des débits disponibles sur la période 2010-2020. Un échantillon sera considéré représentatif d'un état de crue si le débit associé fait partie des 5% supérieurs de la courbe classée des débits mesurés. Le Tableau 20 présente les valeurs seuils de débits définissant l'état de crue (5% supérieurs des débits classés 2020-2020) et la fraction d'échantillonnages répondant à ce critère.

Tributaire	Débit seuil considéré comme un état de crue (m ³ /s)	Pourcentage d'échantillonnages répondant au critère
Berre	1.96	16.7
Mosson	2.83	20.6
Lez	8.83	16.8
Salaison	1.6	16.4
Vidourle	25.3	22.6
Arc	8.91	11.2

Tableau 20 : Valeurs seuils des débits considérés représentatifs d'un état de crue (5% supérieurs des débits classés 2020-2020) et fraction d'échantillonnages correspondant à ce critère

On constate que les échantillonnages en période de crue représentent entre 11.2 et 22.6% du nombre total d'échantillons, alors que les crues représentent statistiquement 5% des débits (par définition). Du fait d'un échantillonnage spécifiquement dédié à cet objectif, les échantillons de crues sont donc sur-représentés par rapport à l'occurrence réelle des crues.

Les six jeux d'échantillonnage de crue testés sont les suivants :

- Scénario 1 : prise en compte de toutes les données disponibles (en moyenne 18% des échantillons sont considérés en crue) ;
- Scénario 2 : utilisation d'un nombre d'échantillons de crue représentant 5% du nombre total d'échantillons ; les échantillons sont tirés au hasard parmi les échantillons disponibles ;
- Scénario 3 : utilisation d'un nombre d'échantillons de crue représentant environ 2.5% (2.2 % en moyenne) du nombre total d'échantillons (échantillons tirés au hasard) ;
- Scénario 5 : utilisation d'un nombre d'échantillons de crue représentant environ 1.25% (1.4 % en moyenne) du nombre total d'échantillons (échantillons tirés au hasard) ;
- Scénario 5 : utilisation d'un nombre d'échantillons de crue représentant environ 0.625% (0.7 % en moyenne) du nombre total d'échantillons (échantillons tirés au hasard) ;
- Scénario 6 : aucun échantillon de crue.

La Figure 176 présente les flux annuels moyens calculés par la méthode MP avec différents nombres d'échantillons de crue. Rappelons que les échantillons de crues sont tirés au hasard, ce qui explique certaines différences entre les flux calculés sur un même tributaire. De façon globale, le flux calculé diminue avec le nombre d'échantillons de crue pris en compte.

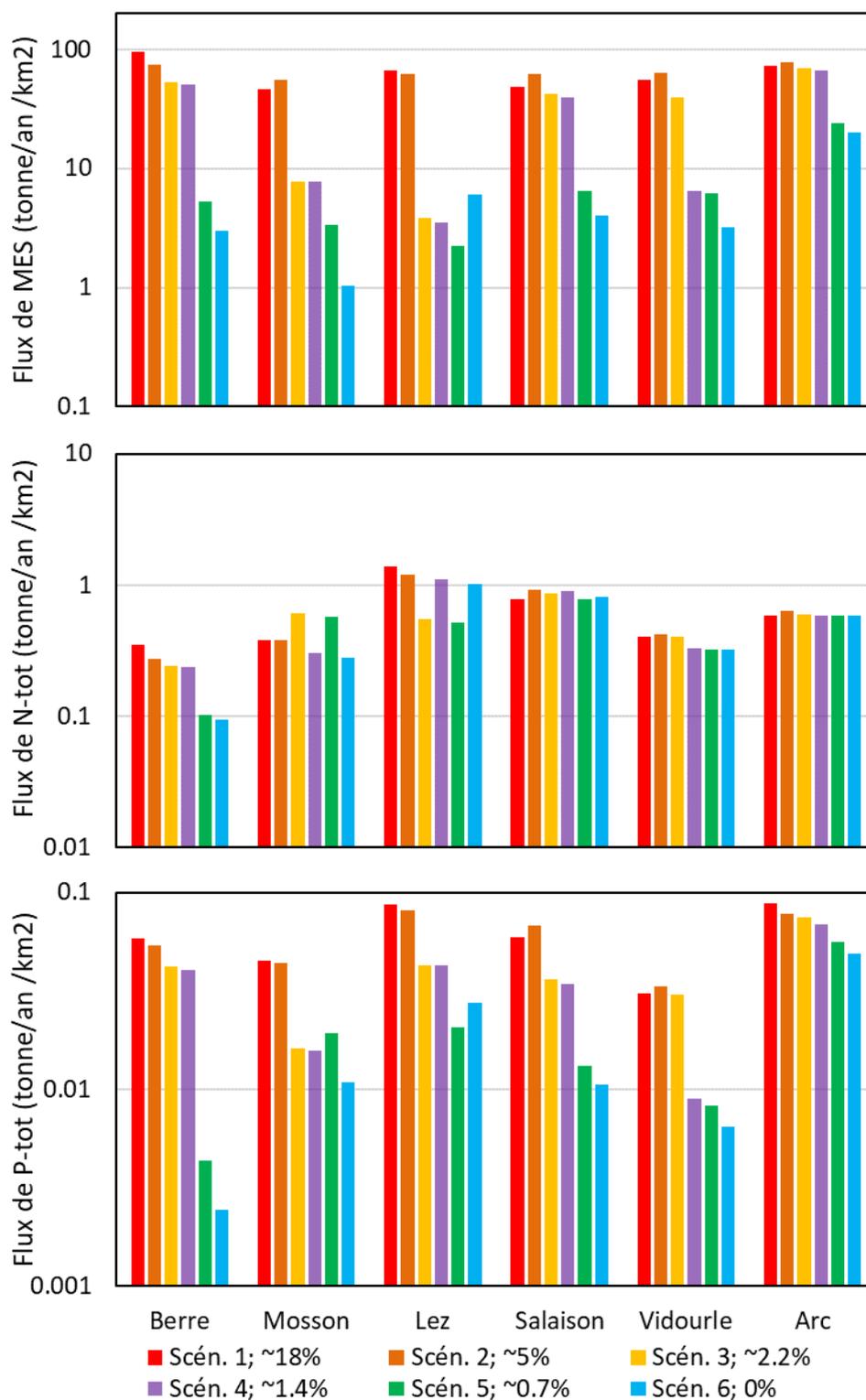


Figure 176 : Flux annuels moyens calculés par la méthode MP avec différents nombres d'échantillons de crue

Les différences sont très marquées pour les MES, un peu moins pour le phosphore total et assez peu pour l'azote total. Pour les MES et le phosphore total, les flux ne montrent pas une progression régulière, mais une chute brutale ne survenant pas, d'un tributaire à l'autre, au même pourcentage d'échantillons de crue. La chute intervient autour des pourcentages 2.2% à 0.7%. On constate aussi qu'avec un pourcentage d'échantillons de crue de 5% (identique à l'occurrence statistique des crues) les

flux sont presque aussi forts qu'avec tous les échantillons de crue (18% en moyenne de tous les échantillons).

Le respect d'une proportion de 5% ne permet donc pas d'obtenir des flux calculés du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec les méthodes ID et DC pour les MES et le phosphore total. Ceci est très vraisemblablement relié au fait que les concentrations de MES et de phosphore total sont exacerbées par une augmentation du débit, ce qui n'est pas le cas pour l'azote total. La méthode MP semble donc induire une surestimation des flux calculés du fait de la prise en compte d'un trop grand nombre d'échantillons de crue, mais également du fait que les concentrations sont très importantes durant ces épisodes. Peut-être une pondération de l'information résultant de ces échantillons de crue pourrait être réalisée afin de corriger ce biais en tenant compte des statistiques des flux instantanés plutôt que de celles des seuls débits.

Les résultats montrent que la méthode des moyennes pondérées est très influencée par la densité d'échantillonnage des périodes de crue, en particulier en ce qui a trait aux flux des formes particulières. Ceci est bien entendu fortement exacerbé par le fonctionnement des bassins versants méditerranéens qui sont soumis à des épisodes pluvieux très violents et très localisés. Pour les formes particulières (MES, phosphore total, azote Kjeldhal), cette méthode de calcul des flux semble trop sensible à la présence des plus fortes concentrations et parait y donner une trop forte prépondérance. Pour les bassins méditerranéens et pour les formes particulières, la méthode des moyennes pondérées (MP) ne semble donc pas adaptée et la méthode des intervalles de débits (ID), ou celle de la dernière concentration (DC) qui donne des résultats très voisins, semblent préférables.

5.12. Comparaison des résultats des méthodes MP et ID selon les données de crues disponibles

Une synthèse de certains flux annuels moyens issus des précédents résultats est compilée dans le Tableau 21 et sur les figures suivantes (Figure 177 à Figure 179).

Flux moyens (tonnes/an)	Méthode	Berre	Mosson	Lez	Salaison	Vidourle	Arc
MES	ID	3 552	2 981	1 924	504	7 158	21 875
	MP tous	21 335	14 038	11 174	2 446	42 083	53 036
	MP aucun	667	314	1 023	205	2 472	14 689
Azote total	ID	24	88	148	35	216	365
	MP tous	79	115	233	39	310	422
	MP aucun	21	86	174	41	247	423
Phosphore total	ID	2.1	5.5	5.1	0.7	7.3	39.8
	MP tous	13.1	13.9	14.7	3.0	23.7	64.2
	MP aucun	0.5	3.3	4.7	0.5	5.0	35.5

Tableau 21 : Flux annuels moyens calculés pour la période 2015-2020 par les méthodes des intervalles de débit (ID) et des moyennes pondérées (MP), avec tous les échantillons de crue ou aucun

La Figure 177 présente les flux annuels spécifiques de MES, azote total et phosphore total calculés pour les six scénarios avec la méthode ID et la méthode MP avec tous les échantillons de crue ou aucun. Les flux annuels spécifiques sont obtenus en divisant les valeurs de flux annuels par la surface des bassins versants. Ceci permet de comparer les bassins versants entre eux.

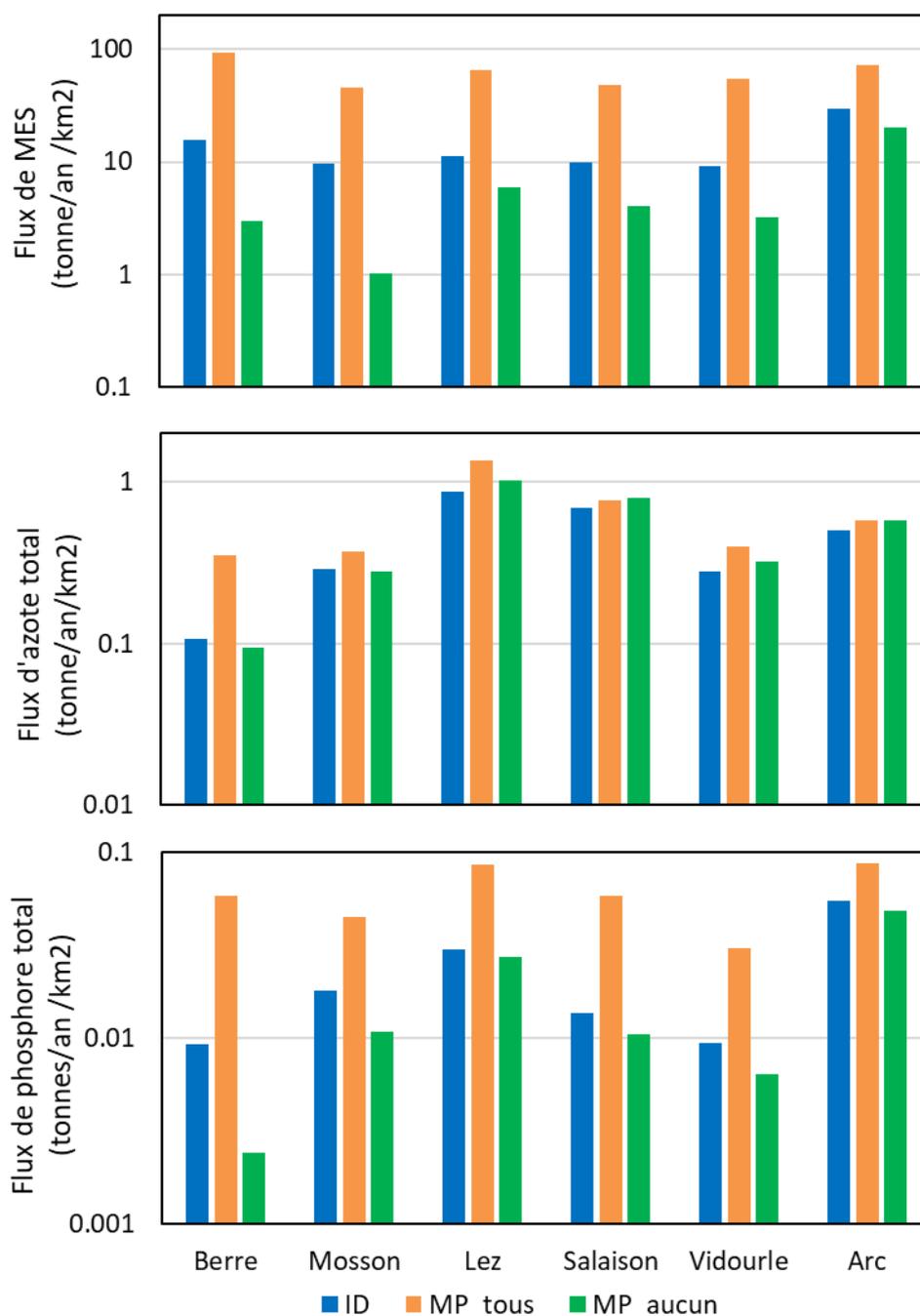


Figure 177 : Flux annuels spécifiques de MES, azote total et phosphore total calculés pour les six scénarios avec la méthode ID et la méthode MP avec tous les échantillons de crue ou aucun

On constate que les flux de MES calculés par la méthode MP avec tous les échantillons de crue sont systématiquement plus forts que ceux calculés avec la méthode ID, et parfois près d'un ordre de grandeur plus forts. A l'inverse, les flux de MES calculés par la méthode MP sans aucun échantillon de crues sont systématiquement plus faibles que ceux calculés avec la méthode ID, et parfois près d'un ordre de grandeur plus faibles. Un constat assez similaire peut être fait pour le phosphore total, puisqu'il est principalement constitué d'ortho-phosphate adsorbé sur les argiles. Pour l'azote total, les différences sont moins marquées.

Les différences sont très bien mises en évidence sur la Figure 178 et la Figure 179. Pour l'azote total, on constate assez peu de différence entre les flux calculés par les différentes méthodes, alors que

pour les ME et le phosphore total, les flux calculés par la méthode MP sans échantillon de crue sont systématiquement plus faibles. Dans le cas des MES, les flux calculés avec la méthode MP avec ou sans échantillons de crues diffèrent de plus d'un ordre de grandeur.

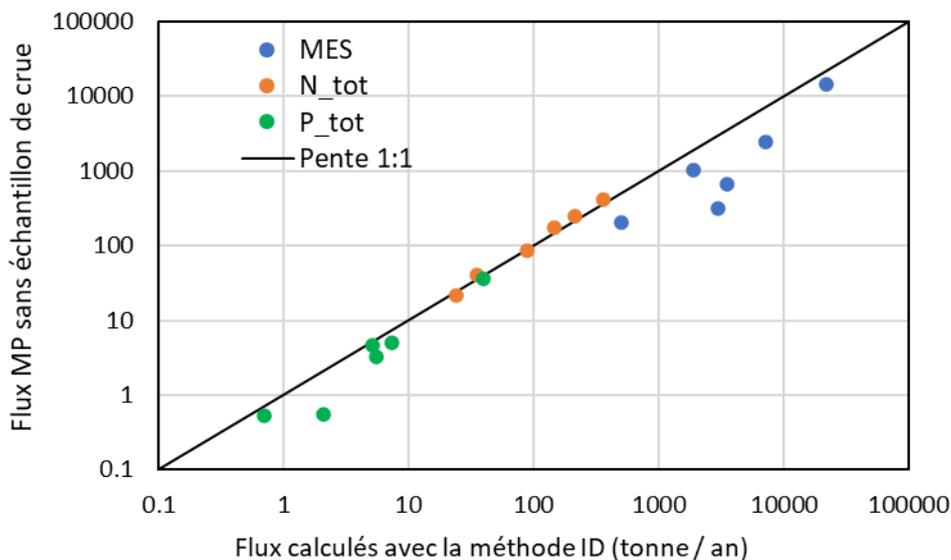


Figure 178 : Flux annuels moyens calculés par la méthode ID et la méthode MP sans échantillons de crue

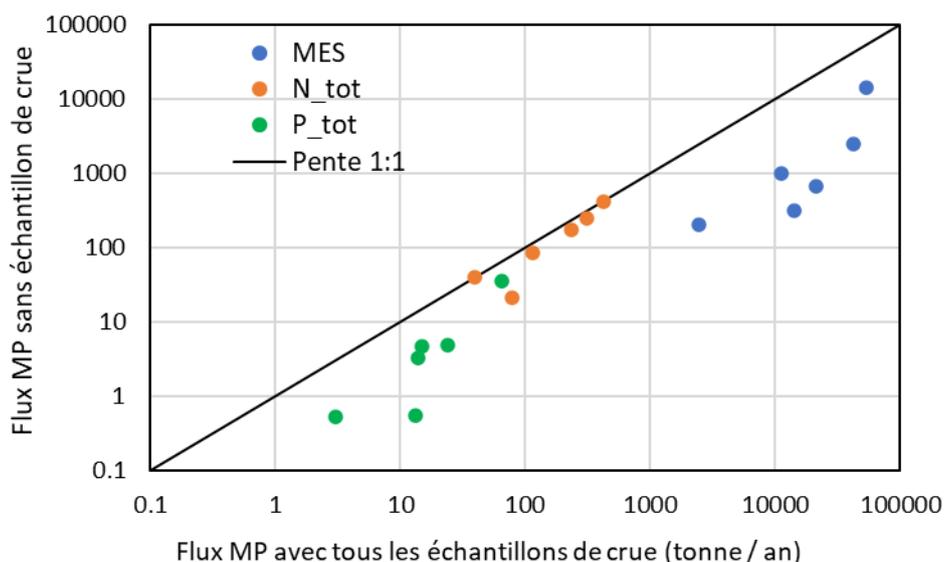


Figure 179 : Flux annuels moyens calculés par la méthode MP avec ou sans échantillons de crue

5.13. Recommandations en matière d'acquisition de données en temps de crue

Les résultats précédents apportent deux principaux enseignements :

- La méthode des intervalles de débits devrait être préférée dans tous les cas pour le calcul des flux de nutriments apportés aux lagunes. Cette méthode semble la plus adaptée et celle présentant le moins de biais. L'un de ses avantages est également de pouvoir constituer

une relation concentration / débit avec les données de plusieurs années dans la mesure où l'occupation et l'utilisation du territoire ne varient pas de façon majeure. Il n'est donc pas nécessaire avec cette méthode d'échantillonner systématiquement et régulièrement les crues. Une relation peut être établie et consolidée 'au fil de l'eau', c'est-à-dire avec des données de crues acquises de temps en temps. En l'absence de telles données 'au fil de l'eau', une vérification - actualisation de la relation concentration / débit est recommandée de temps à autre, par exemple tous les 5, 10 ou 15 ans. En cas de modification drastique de l'occupation et de l'utilisation du territoire (changement d'agriculture, changement de climat, modification des écoulements ...), une nouvelle caractérisation est alors requise. Une telle modification peut être mise en évidence par une étude statistique pluriannuelle des données obtenues. Notons que la méthode des intervalles de débits requiert l'existence d'une station hydrométrique de mesure de débits. En l'absence d'une telle information, cette méthode n'est pas applicable.

- La méthode des moyennes pondérées ne semble applicable qu'aux formes dissoutes des nutriments (et à l'azote total puisque dominé par le nitrate) car leurs concentrations sont peu exacerbées par les débits de crues. Les nitrites et l'ammonium sont en concentrations très faibles, souvent inférieures à la limite de quantification, et s'avèrent donc peu pertinents pour le calcul des flux apportés aux lagunes. La méthode des moyennes pondérées n'est pas applicable en l'état des connaissances pour le calcul des flux des formes 'particulaires'
- En l'absence d'une station hydrométrique, la méthode des intervalles de débit n'est pas applicable, ou à tout le moins pas justifiée. La méthode de la dernière concentration, voire celle des moyennes pondérées, pourrait donc être appliquée pour le calcul des flux des nutriments particuliers.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une publication scientifique : Banton, O.; St-Pierre, S.; Giot, H.; Giraud, A. Importance of Flood Samples for Estimating Sediment and Nutrient Loads in Mediterranean Rivers. *Hydrology*. 2022, 9, 110. <https://doi.org/10.3390/hydrology9060110>. Cette revue étant 'open access', cet article peut être librement téléchargé.

6. Bilan des études menées sur l'Etang de l'Or sur les apports de polluants

Différentes études d'acquisition des connaissances en matière d'apport à la lagune ont été menées sur l'Etang de l'Or.

Auteur / année	Titre	Maître d'Ouvrage
SupAgro, 2017	Apports d'eau aux lagunes côtières méditerranéennes – Propositions méthodologiques pour la quantification des écoulements basées sur des mesures légères et des modèles synthétiques	AE RMC
SupAgro, 2018	Apports de nutriments aux lagunes côtières méditerranéennes – Analyse comparée des flux à l'exutoire de quatre affluents de l'étang de l'Or (Projet Ingénieur)	SYMBO
HYDRIAD, 2018	Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'Etang de l'Or. Bilan import/export et hiérarchisation des sources de pollution. Campagnes de mesures de qualité de l'eau, de débits, analyse et interprétation des résultats.	SYMBO
SYMBO, 2019	Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'étang de l'Or - Bilan imports/exports et hiérarchisation des sources de matière	
David M. 2019	Influence des apports d'eaux souterraines sur le fonctionnement hydrologique et biochimique des lagunes – Cas de la lagune de l'Or (Thèse Université de Montpellier)	IFREMER – BRGM – CEREGE
HYDRIAD, 2021	Etude du devenir des nutriments dans l'étang de l'Or. Identification des sources d'apports en nutriments. Campagnes de mesures de qualité de l'eau, de débits, analyse et interprétation – Focus sur le BV Est.	SYMBO

6.1. Principaux résultats des études menées sur les apports de polluants

Les paragraphes suivants résument les principaux résultats des études ayant porté sur les apports de nutriments à la lagune de l'Etang de l'Or et les constats et recommandations qui en ont résulté.

6.1.1. Quantification des écoulements – SupAgro 2017

Référence du document : Apports d'eau aux lagunes côtières méditerranéennes. Propositions méthodologiques pour la quantification des écoulements basées sur des mesures légères et des modèles synthétiques. Colin F., Crabit A., Augas J., Garnier F., Favre L., Lilti V. et Verlingue U. Novembre 2017. SupAgro.

Le Salaison, seul affluent jaugé du BV de l'Or, et cinq autres affluents non jaugés (Aigues-Vives, Bérange, Cadoule, Jasse et Viredonne) ont été étudiés pour tester différentes méthodes de quantification des apports d'eau à la lagune. L'étude a combiné l'utilisation de dispositifs légers de mesures limnimétriques et de modèles synthétiques de simulation des débits.

Cette étude a montré le potentiel des données de pluie radar en contexte méditerranéen pour capter l'hétérogénéité spatiale sur des bassins de petite à moyenne surface, en particulier aux échelles de temps de l'événement, mais aussi aux échelles plus intégrées. Ces données nécessitent cependant d'être appréhendées à l'aide d'une chaîne de traitement adaptée. A cette condition, ces données sont

HYDRIAD	Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse	Juin 2022
---------	--	-----------

recommandées pour caractériser l'entrée pluviométrique permettant de comprendre le fonctionnement hydrologique de bassins de lagunes côtières.

L'utilisation des données radar requiert un investissement financier pour leur acquisition de quelques centaines à quelques milliers d'euros par année hydrologique. Si ces coûts sont comparables à la récolte de données 'conventionnelles', ils sont à l'avantage des données radar dès lors que la surface devient grande. L'utilisation des données radar représente par contre un coût technique plus important dès lors qu'il est nécessaire de vérifier la qualité des données par rapport à des postes de référence et d'être en mesure de traiter un grand volume de données. L'étude a montré qu'il est possible d'établir des chaînes de traitement automatisées qu'il conviendrait de rendre transférables aux gestionnaires de bassin.

L'étude a également montré que les mesures directes d'écoulement à l'aide de capteurs légers, de pression ou capacitifs est une étape cruciale pour l'estimation des apports d'eau aux lagunes. Elle nécessite d'assumer une ambition météorologique et peut être facilitée avec le concours de capteurs connectés. Les incertitudes associées au passage des hauteurs d'eau mesurées aux débits peuvent être maîtrisées en effectuant des jaugeages dans des conditions d'écoulement variable.

Du point de vue financier, l'investissement pour l'installation de mesures de hauteurs d'eau sur une section est de l'ordre de quelques centaines d'euros (pour un capteur de pression ou une canne limnimétrique) à laquelle il faut ajouter le temps de repérage des sections et leur caractérisation. L'étape cruciale est celle des jaugeages. Le contrôle de cohérence, les corrections et la mise en forme des données peut être en grande partie automatisée. Chacune de ces étapes requiert cependant une technicité en hydrométrie et topométrie. La phase de collecte des hauteurs d'eau implique une visite régulière qui peut être limitée par le recours à des capteurs connectés.

Le travail a montré l'importance de pouvoir disposer de jaugeages en conditions de hauteurs variables pour limiter les incertitudes dans l'estimation des débits dues aux courbes de tarage. Enfin, il existe une limite à ne suivre qu'une année hydrologique : en cas d'année exceptionnelle, le risque est de ne pas disposer de toutes les informations pour caractériser les réponses hydrologiques des bassins. Face à cette limite, il est possible de compléter le suivi de base initial par des mesures plus ponctuelles (jaugeages hors crues, suivi mensuels, ...).

Cette étude a également montré qu'à partir de données de pluie et de débits, il a été possible d'établir des modèles globaux permettant de reproduire les apports totaux sur une année hydrologique à une lagune. Les modèles « sur-mesure » permettent d'enrichir cette quantification globale avec la part des écoulements en crue et hors-crue. Ils permettent de plus une interprétation du fonctionnement hydrologique des bassins étudiés au travers des étapes de construction des modèles conceptuels et de choix des paramètres. Cette étape de modélisation est celle qui requiert le plus de technicité, notamment dans la phase de paramétrisation et de calibration des modèles « sur-mesure ».

Dans l'idéal, les dispositifs devraient rester en place jusqu'à ce que l'essentiel du comportement hydrologique des bassins soit compris. Dans une deuxième phase, des suivis plus ponctuels, allant du jaugeage unique à des suivis de crue ou mensuels, pourraient être mis en place. Ces suivis permettraient d'éprouver la qualité des simulations des écoulements à partir des seules données pluviométriques. Ils permettraient en outre de suivre si les modifications dans le temps des bassins induisent des changements de leurs comportements hydrologiques.

Rappelons à ce propos que Le Fur (2014) indiquait dans son rapport que pour l'utilisation de modèles pluie/débit, des données de débits sur le terrain sont indispensables pour une bonne évaluation des flux et pour caler le modèle. Les modèles pluies/débits permettent à moindre coûts d'estimer les débits dans les cours d'eau à partir des données de pluviométrie et en connaissant les caractéristiques des bassins

versants. Ces modèles peuvent être réalisés par des bureaux d'études. Néanmoins pour que ces modèles soient valides, il est nécessaire d'acquérir des données de débits sur le terrain pour caler le modèle et s'assurer de la bonne estimation des débits. Les résultats des modèles auront une incertitude qui pourra créer une erreur dans l'estimation des flux.

6.1.2. Apports de nutriments – SupAgro 2018

Référence du document : Apports de nutriments aux lagunes côtières méditerranéennes. Analyse comparée des flux à l'exutoire de quatre affluents de l'étang de l'Or. Felix Pinheiro Nolasco H., De Paula Lemos C., Manteaux S., Mejri O., De Dieu Ndayizeye J. Projet d'ingénieur. SupAgro. Mars 2018.

Le projet visait à estimer les flux de nutriments (phosphore et azote) apportés aux lagunes par les bassins versants, au moyen de différentes méthodes. Le projet a porté sur les principaux affluents de l'étang de l'Or (Salaison, Cadoule, Bérange, Viredonne), mais avait pour objectif d'être reproductible aux autres lagunes.

Les méthodes des Moyenne Pondérées (MP) et des Intervalles des Débits (MID) ont été retenues (une troisième méthode de régression logarithmique jugée prometteuse également a été abandonnée du fait de la non-linéarité de la relation entre les débits et les concentrations de quelques nutriments). Les deux méthodes MP et MID n'ont pas donné de résultats significativement différents (selon le test statistique de Wilcoxon), ce qui a été conforté par une réflexion sur les incertitudes liées aux mesures, aux données, aux méthodes et à l'environnement de ces apports.

Les flux obtenus par la méthode MID ont permis une hiérarchisation des apports par affluent. Il en ressort que le Salaison est le principal contributeur (pour les $\frac{2}{3}$) en azote global (somme de l'azote Kjeldahl, Nitrites et Nitrates). Les trois autres affluents se partagent à parts comparables le tiers restant. Pour le reste des nutriments (phosphates, phosphore et ammonium), c'est la Viredonne qui contribue le plus à ces apports, suivi de peu par le Bérange.

Une explication des résultats a été tentée par l'estimation des flux par les sources de pollution ponctuelle et diffuse recensées sur les bassins versants. A défaut de données sur les rejets industriels, seuls les flux des stations d'épuration ont été considérés pour les apports ponctuels. Pour les apports diffus, les estimations des flux se sont basées sur des ratios d'exportation par culture des nutriments issus de la littérature. Ceci a montré une prédominance nette des apports agricoles.

Ces résultats positionnent le Salaison en tête des apports à la fois pour les apports agricoles et les apports totaux par les sources. Il est suivi de près par la Cadoule. Une faiblesse de cette méthode est sa non prise en considération de l'hydrologie des cours d'eau. Cette limite de la méthode par ratios d'exports expliquerait les écarts des valeurs entre cette méthode et les méthodes MP et MID.

[Rappelons que cette étude n'a porté que sur les apports des quatre affluents suivants : Salaison, Cadoule, Bérange et Viredonne.]

6.1.3. Estimation des flux – HYDRIAD 2018

Référence du document : Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'Etang de l'Or. Bilan import/export et hiérarchisation des sources de pollution. Campagnes de mesures de qualité de l'eau, de débits, analyse et interprétation des résultats. HYDRIAD. Novembre 20218.

L'étude commanditée par le SYMBO visait à caractériser les flux hydriques (eaux douces, eaux saumâtres et salées) et de nutriments (azote et phosphore) échangés entre l'étang de l'Or et les masses d'eau voisines (canal du Rhône à Sète, mer, étang de Méjean-Pérols et canal de Lunel), par l'intermédiaire des connexions hydrauliques du secteur Sud et du secteur Est de l'étang. Ce travail devait conduire à proposer un premier bilan des flux d'eau et de matière à l'échelle d'une année hydrologique.

Des mesures de débits ponctuelles et à haute fréquence ont été réalisées sur les principaux points d'échange : Grau de Carnon, Passe de la Nive, Passe de Grand-Travers, Passe de Moutas, Passe des Cabanes du Roc (échanges avec le canal du Rhône à Sète), Passe Méjean (échange entre le Grau de Carnon et l'Étang du Méjean), Canalette du Languedoc (échange avec le Canal de Lunel). Les mesures réalisées ont toutes montré un fonctionnement bidirectionnel (en effet yoyo) des différentes passes. Cet effet yoyo peut être corrélé à la marée, mais également au vent (direction et intensité) et à la pluie (apport par les bassins versants). Dans certains cas (ex. la Canalette) et pour certaines périodes (période sans apport d'eau depuis l'amont), les flux hydriques échangés sont nuls à l'échelle de la journée.

L'étude a montré que le calcul des flux échangés doit tenir compte de ce fonctionnement en yoyo des différentes passes. Par exemple, du 5 janvier au 16 février 2018, l'étang de l'Or a reçu 18.8 Mm^3 d'eau par Canalette, et perdu 12.9 Mm^3 d'eau par les passes Sud et 6.1 Mm^3 par le Grau. Le bilan net entrée – sortie s'établit donc à un flux net sortant de 0.2 Mm^3 seulement et serait donc presque équilibré. Les volumes totaux d'eau échangés (entrant et sortant) ont cependant été durant cette période de 80.5 Mm^3 . Ce volume total d'échange (entrant et sortant) représente 2.5 fois le volume de l'étang (32.6 Mm^3). Ainsi, les échanges hydriques seraient sur cette période (de 42 jours) faibles en bilan net mais forts en volumes bruts.

Le fonctionnement individuel de chaque passe étant bien corrélé à celui des passes voisines, le besoin en instrumentation et suivi peut par contre se restreindre au suivi de quelques passes seulement.

Des suivis qualité ont été réalisés sur le Grau de Carnon, la passe Méjean, la Passe du Moutas, (principale passe Sud), la Canalette, le Canal de Lunel 1 (en plusieurs points amont et aval) et le canal du Rhône à Sète (face aux Cabanes du Roc). Dix campagnes d'échantillonnage ont été effectuées.

La Figure 180 illustre l'importance des trois paramètres azote, phosphore et salinité sur les sites échantillonnés, les deux premiers étant en abscisse et en ordonnée, le troisième étant représenté par la taille du point sur le graphique. Les quatre points encadrés en vert sont les échantillons du Canal de Lunel 1 et 2 (en amont de la Canalette du Languedoc), caractérisés par des concentrations très élevées en azote et phosphore et une très faible salinité.

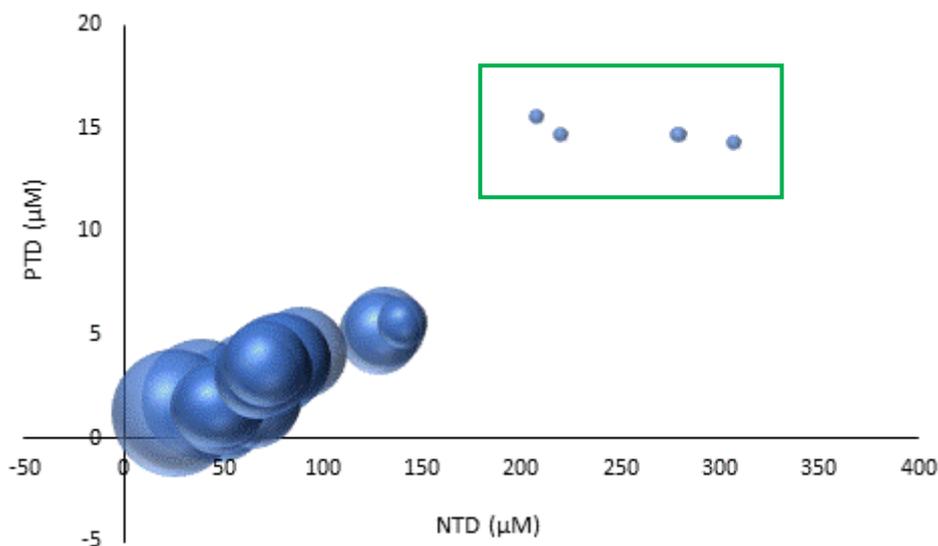


Figure 180 : Concentrations (μM) d'azote total dissous (NTD) et de phosphore total dissous (PTD) avec la taille des points proportionnelle à la salinité

La Figure 181 (identique à la précédente sans les échantillons du Canal de Lunel 1 et 2) montre que la salinité est généralement plus élevée sur les échantillons présentant des concentrations faibles en azote et phosphore. Les trois échantillons encadrés en vert sont les deux échantillons du Canal de Lunel 3 (en aval de la Canalette du Languedoc) et un échantillon du canal du Rhône à Sète (CRAS). Notons qu'à proximité du point CRAS se trouve le rejet de la station d'épuration de la Grande Motte. Le débit entrant moyen de cette station était en 2016 de $3031 \text{ m}^3/\text{j}$ ($0.035 \text{ m}^3/\text{s}$) avec un rejet de l'ordre de 20 kg/j d'azote global, soit une concentration de l'ordre de 6.6 mg-N/l . Le rejet en phosphore n'est pas connu.

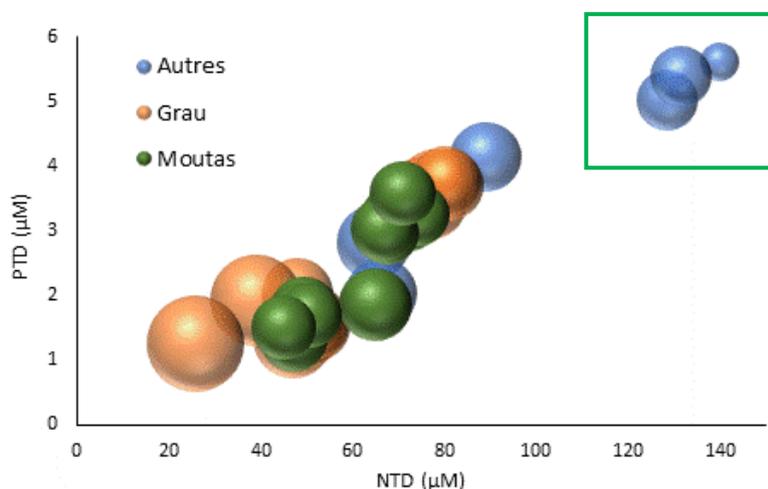


Figure 181 : Concentrations (μM) d'azote total dissous (NTD) et de phosphore total dissous (PTD) avec la taille des points proportionnelle à la salinité (excluant le Canal de Lunel 1 et 2)

L'interprétation des résultats a permis de proposer une signature type des différentes masses d'eau. Un bilan entrée-sortie de l'azote et du phosphore a également pu être établi sur la base des flux hydriques et des concentrations types. Les figures suivantes présentent l'exemple de la période avril-mai 2017.

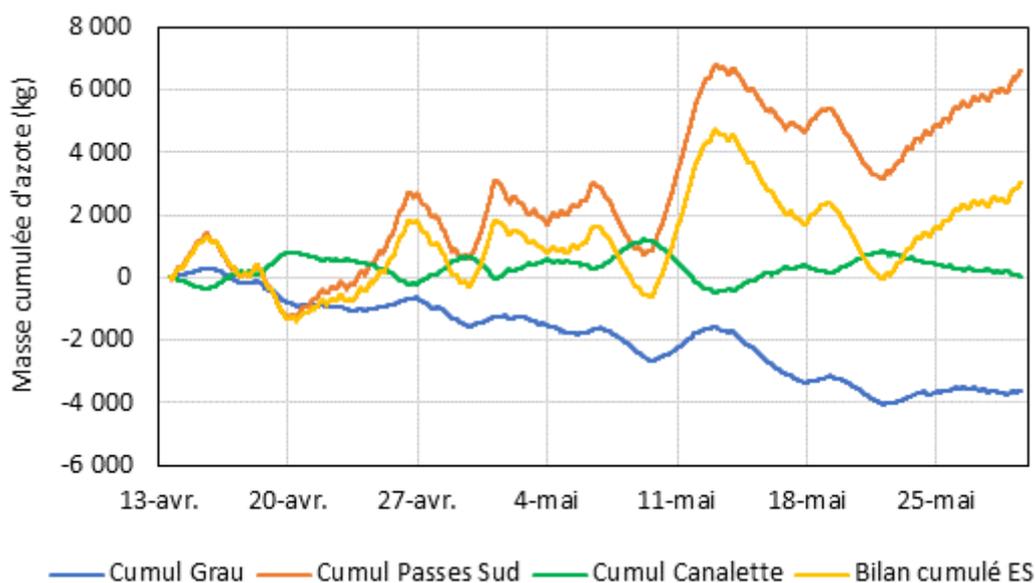


Figure 182 : Flux massiques d'azote dissous échangés tenant compte de l'effet yoyo

Les courbes, en particulier celle des passes Sud, montrent de grandes oscillations pluri-journalières, considérablement plus importantes en amplitude que celles résultant de l'effet quotidien de la marée. Sur cette période, la courbe cumulée de Canalette indique un flux nul, alors que le flux est globalement entrant par les passes Sud (depuis le CRAS) et globalement sortant le Grau.

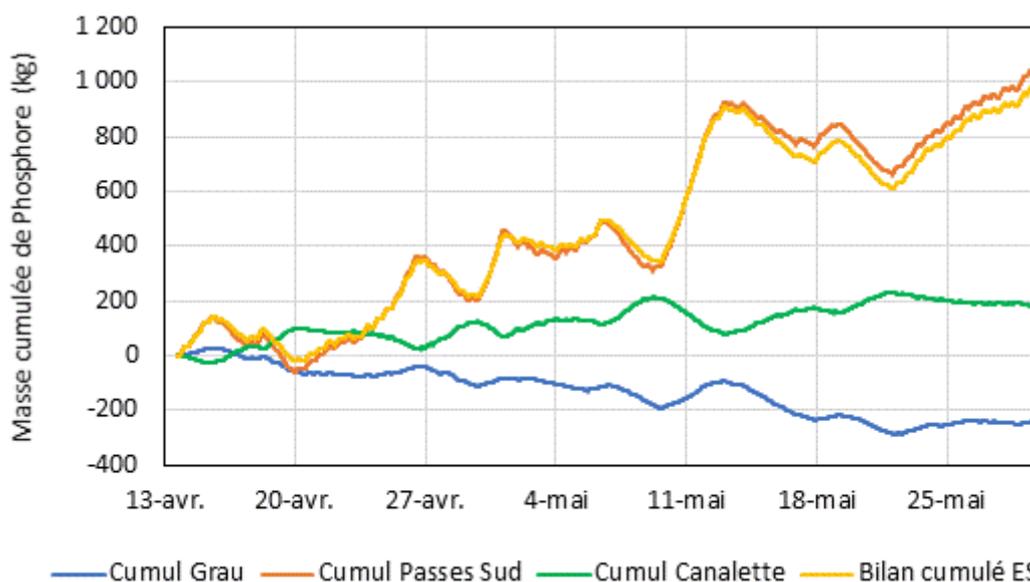


Figure 183 : Flux massiques de phosphore dissous échangés tenant compte de l'effet yoyo

Durant les périodes pluvieuses (automne et hiver), les flux sont principalement, voire systématiquement, entrants du côté Nord et Est de l'étang, et sortants en moyenne sur les passes Sud et le Grau. Durant les autres périodes de l'année où les pluies sont absentes, les échanges sont principalement, voire exclusivement, gérés par la dynamique des marées et des conditions de vent. En absence de vents importants, les flux sont corrélés en direction et en importance avec la marée. Lorsque le vent est important et durable, les flux peuvent être entrants ou sortants durant plusieurs cycles de marée, indépendamment de celle-ci.

Durant les périodes pluvieuses (flux globalement entrants au Nord et à l'Est de l'étang), l'eau apportée a la signature chimique de la masse d'eau entrante (Canal de Lunel). Durant les périodes de vent intense (Mistral ou Tramontane du côté Nord et Marin du côté Sud), il en est de même pour les échanges par les passes Sud et le Grau.

Durant les périodes où les pluies sont absentes et le vent modéré, les échanges sont gérés par la marée. Il semble alors que les échanges pourraient impliquer principalement, voire exclusivement, toujours le même volume d'eau qui entrerait et sortirait alors selon un effet piston de type yoyo. Il y aurait durant ces périodes-là peu d'échanges réels entre l'étang et les masses d'eau voisines. Ce phénomène semble important au niveau de Canalette du fait de son volume important, mais moindrement au niveau des passes Sud et du Grau du fait de leurs faibles dimensions.

Tous ces éléments montrent l'importance d'une caractérisation de la signature chimique des eaux réellement échangées entre l'étang et les masses d'eau voisines et des flux échangés.

6.1.4. Apports des eaux souterraines – Thèse de Marine DAVID 2019

Référence du document : DAVID Marine. 2019. Influence des apports d'eaux souterraines sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique des lagunes côtières méditerranéennes. Cas de la lagune de l'Or. Thèse de l'Université de Montpellier - IFREMER – BRGM – CEREGE. Travaux de thèse financés par l'IFREMER (projet ORIGINS), le BRGM (projet D3ENRE) et l'ANR (projet @RAction, chaire d'excellence ANR-14-ACHN-0007-01 medLOC, du CEREGE).

La lagune de l'Or repose sur une couche peu perméable, limitant les apports d'eau souterraine par le fond de la lagune. L'étude n'a pas permis de quantifier les flux d'eau issus de l'advection verticale au travers des sédiments. Cependant, les mesures des propriétés physiques des sédiments vaseux (porosité totale, porosité efficace et perméabilité), associées aux temps importants de propagation de la température dans les sédiments permettent de conclure que ces flux de recirculation sont faibles dans cette lagune, s'ils existent.

Les travaux réalisés sur le bassin versant nord de la lagune se sont focalisés sur la partie aval du Salaison qui n'est pas suivie par la station de jaugeage. Cette station est en effet située à 3 km de l'exutoire du cours d'eau afin d'éviter l'influence des remontées d'eaux saumâtres dans le cours d'eau. Des flux peuvent ainsi survenir de l'aval vers l'amont, dans la zone humide périphérique à la lagune. De même, la Canalette fonctionne comme une passe entre la lagune et le bassin versant Est.

Les résultats ont montré que 1) à l'heure actuelle, en l'absence de rejets directs de STEU, les eaux souterraines sont le contributeur majoritaire en azote dans ce cours d'eau ; 2) une part importante de l'azote issue de l'aquifère est apportée dans la partie aval du cours d'eau, quelques centaines de mètres avant l'arrivée dans la lagune. La contribution annuelle des eaux souterraines dans l'apport d'azote inorganique par le Salaison aurait été de l'ordre de 87% en 2013–2014, 81% en 2014–2015 et 85% en 2017–2018. Les contributions ont été plus faibles lors des années humides, lorsque le ruissellement de surface est plus important, mais quand même importantes, car les eaux souterraines constituent la source majeure d'azote inorganique dans le cours d'eau.

Les arrivées d'eau souterraine ont été quantifiées dans les multiples cours d'eau du bassin versant nord, en utilisant le Salaison comme proxy. Considérant que les cours d'eau tributaires de la lagune lui fournissent 40 % de l'eau douce et que 90 % de cette eau provient des eaux souterraines, les apports d'azote par les eaux souterraines seraient compris entre 16 et 160 tonnes par an en fonction des conditions hydrologiques.

De nombreuses sources contribuent à apporter de l'azote à la lagune en condition d'année moyenne. La Canalette constitue la source majoritaire de l'azote en hiver (42%) et cette contribution diminue sur les deux saisons suivantes pour atteindre 8 % en été. Le canal du Rhône à Sète (CRAS) constitue une source importante de nutriments tout au long de l'année. CRAS_E (resp. CRAS_W) contribue à 28% des apports en hiver (resp. 6%), 25% au printemps (resp. 17%) et 32 % en été (resp. 28%). Sur les trois saisons étudiées, les apports issus des eaux souterraines constituent une faible part des flux entrants totaux (de 3 à 7 %).

Les sources de phosphore sont moins nombreuses que pour l'azote. Il est apporté principalement par la Canalette et le CRAS_E avec 60% à 88% des apports totaux de phosphore. Les apports du CRAS_W constituent également une part importante de ces apports en été (35 %). Les apports issus des eaux souterraines et des eaux de surface (BV Nord) sont négligeables en comparaison aux autres sources.

Malgré les apports importants d'eau souterraine continentale, la contribution des autres sources dans la lagune de l'Or est telle que les eaux souterraines constituent une faible part du bilan de matière. Les eaux souterraines ont majoritairement un impact qualitatif, par la spécificité de leurs apports limités en phosphore.

La fiabilité de l'extrapolation des résultats du Salaison au bassin versant nord est limitée par le manque de données régulières sur les flux d'eau des autres cours d'eau. La forte variabilité saisonnière des caractéristiques chimiques induit également une forte incertitude sur les flux de nutriments estimés. Ainsi, l'amélioration des connaissances sur les caractéristiques des autres cours d'eau permettrait d'estimer plus précisément 1) les flux de nutriments totaux issus du bassin versant nord à la lagune de l'Or et 2) la contribution des eaux souterraines dans ces apports.

Concernant l'extrapolation des résultats aux lagunes méditerranéennes françaises : Les couches peu perméables (limitant les apports d'eau souterraine par le fond de la lagune) sont présentes sur une part importante du littoral méditerranéen français, particulièrement en Occitanie, car elles sont issues de la formation des lagunes en plaine alluviale. En hautes eaux, le contraste de perméabilité entre la couche aquifère et cette couche peu perméable de limons peut induire des débordements de la nappe sur la bordure nord des zones humides. Dans ce contexte sédimentaire alluvial, les apports directs d'eau souterraine semblent faibles.

Les études réalisées sur la bordure méditerranéenne se sont principalement intéressées aux arrivées karstiques d'eau souterraines sous les lagunes. Certaines résurgences connues apportent des volumes très importants : Font Estramar à la lagune de Salses Leucate, la Vise à la lagune de Thau par exemple. Ces arrivées sont ponctuelles et s'effectuent dans la plupart des cas en bordure de lagune, à la limite entre les couches calcaires et alluviales (Font Estramar à Salses Leucate, le lavoir à La Palme). Ces résurgences n'ont pas lieu sous le niveau de la mer et peuvent être conceptualisées comme des eaux de surface. Exceptée la source de la Vise pour laquelle la résurgence se situe dans la lagune de Thau, les arrivées karstiques directes sous le niveau de la lagune semblent peu présentes.

Dans les deux contextes sédimentaires principaux de la bordure méditerranéenne française, la majorité des apports d'eau souterraine continentale s'effectue ainsi en amont de la lagune, via les cours d'eau ou les résurgences. Le débit des cours d'eau permanents est soutenu par les eaux souterraines notamment en été. La contribution des eaux souterraines aux flux de nutriments dans les cours d'eau peut être importante.

L'importance des flux de nutriments issus des aquifères dépend toutefois de leurs teneurs en nutriments. Les aquifères alluviaux de la bordure méditerranéenne ont des teneurs moyennes à élevées en azote, en lien avec l'occupation du sol des plaines souvent très anthropisées, en comparaison aux aquifères

karstiques. Les apports d'eaux souterraines continentales sont donc potentiellement plus importants pour les lagunes situées en contexte alluvial.

Dans la lagune de la Palme, les apports issus des eaux souterraines (apports karstiques et recirculation) constituent une part relative importante du bilan de nutriment. Dans cette lagune en bon état, les autres sources exogènes de nutriments, excepté la déposition atmosphérique, sont peu nombreuses sur ce bassin versant peu anthropisé. Les eaux souterraines constituent un apport naturel à la lagune en l'absence de sources artificielles. Ainsi, même si les eaux souterraines ne constituent pas à l'heure actuelle les principales sources exogènes (eau souterraine) ou endogènes (recirculation) de nutriments dans les lagunes eutrophisées, la prise en compte de ces flux dans les bilans de matière est importante à long terme.

6.1.5. Estimation des flux du BV Est – HYDRIAD 2021

Référence du document : Etude du devenir des nutriments dans l'étang de l'Or. Identification des sources d'apports en nutriments. Campagnes de mesures de qualité de l'eau, de débits, analyse et interprétation – Focus sur le BV Est. HYDRIAD. Septembre 2021.

Cette seconde étude menée pour le SYMBO par HYDRIAD visait à caractériser plus précisément le BV Est, en particulier les échanges au travers de Canalette, et la signature 'qualité' des apports du Dardaillon, du Canal de Lunel (de l'amont à l'aval) et des canaux de drainage agricole des ASA. Un suivi haute fréquence (en quasi continu) des débits a été réalisé sur Canalette, ainsi que des mesures ponctuelles et un suivi mensuel haute fréquence sur le canal de Lunel amont et aval. Douze campagnes de prélèvements pour analyses ont été réalisées. Ces prélèvements ont concerné les BV Est mais également l'étang de l'Or (deux points) et le Canal du Rhône à Sète (quatre points).

Concernant les directions d'écoulement sur le BV Est, les points de mesures de Dardaillon, Lunel Nord et les deux canaux des ASA sont unidirectionnels, alors que Lunel Centre, Lunel Sud et Canalette ont des écoulements bidirectionnels (en yoyo selon les conditions de marée ou la direction du vent).

Durant les 16 mois de suivi haute fréquence effectué sur Canalette, les débits cumulés ont été de 25 millions de m³ au profil de l'étang, soit en moyenne près de 1.5 Mm³/mois.

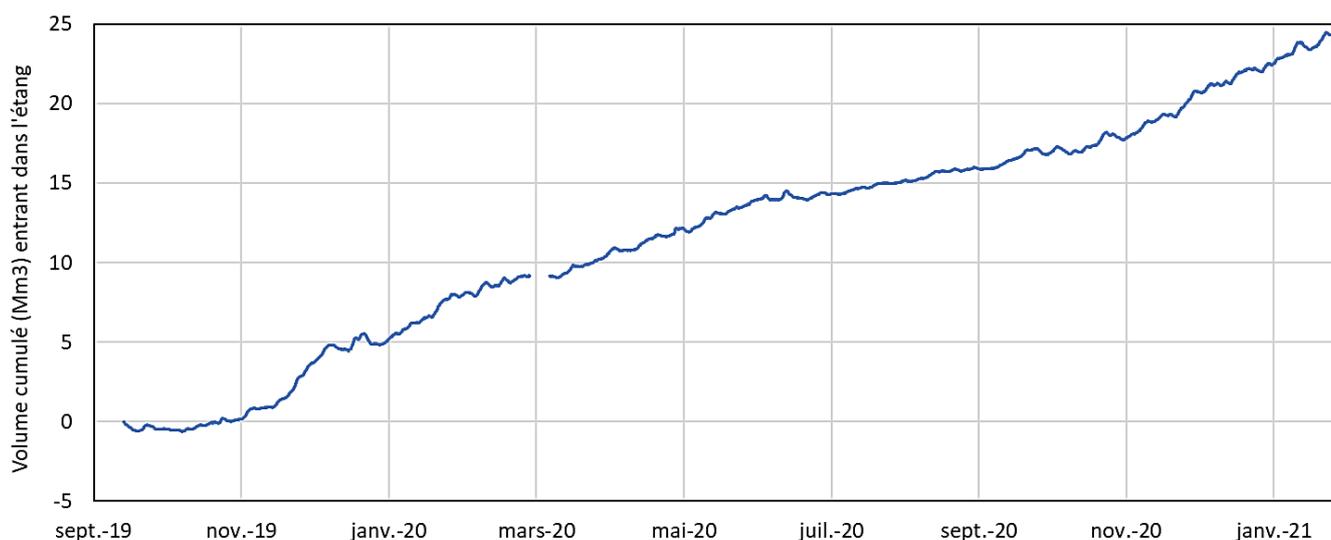


Figure 184 : Volume cumulé entrant dans l'Etang de l'Or via Canalette (millions de m³)

Le suivi haute fréquence complémentaire effectué sur le Canal de Lunel a montré la complexité des échanges.

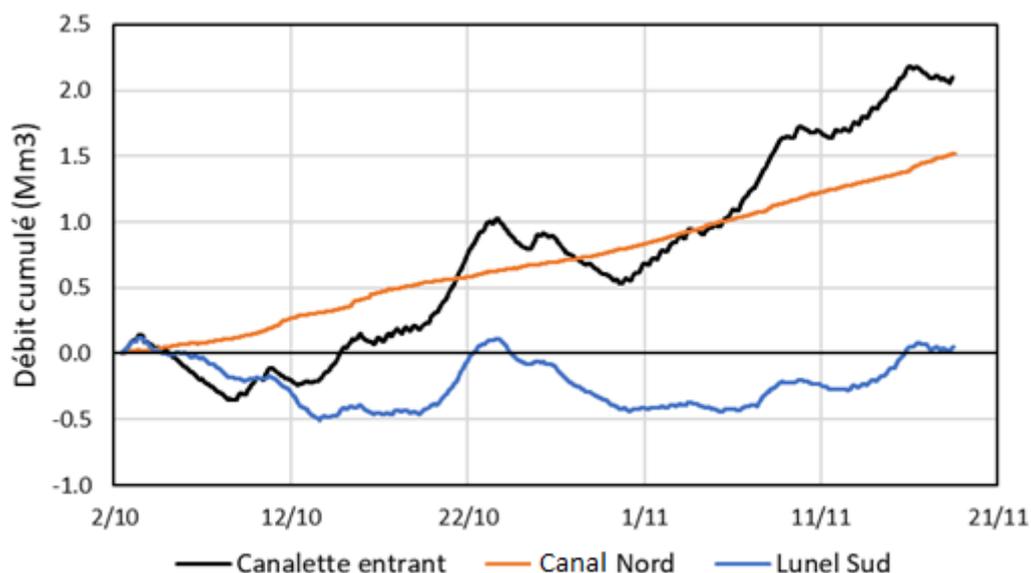


Figure 185 : Débits cumulés en amont et en aval de Canalette (millions de m^3)

Le débit du Canal de Lunel amont (Canal Nord) est toujours positif et presque constant (courbe croissante très linéaire), avec un écoulement systématiquement dirigé vers le Sud (pas de baisse temporaire de la courbe). Le débit du Canal de Lunel Sud (en aval de Canalette) est quant à lui en moyenne nul, ce qui signifie que l'écoulement du canal en ce point est autant dirigé vers le Nord que vers le Sud. Lorsque la courbe bleue baisse, c'est que Lunel Sud s'écoule vers le Canal du Rhône à Sète (et vice versa).

Le débit de Canalette est en moyenne positif (courbe noire croissante), mais l'écoulement n'est pas toujours entrant vers Canalette (courbe noire parfois décroissante). Durant de longues périodes, l'écoulement donc en moyenne sortant de Canalette. Durant ces périodes, Canalette alimente Lunel Sud, qui s'écoule quant à lui vers le CRAS.

Sur la période, le débit arrivant du Canal de Lunel amont représente environ 75% du débit de Canalette. Le débit cumulé de Lunel Sud étant nul sur la période, 25% seraient donc contribués par d'autres apports situés entre Lunel Nord et Canalette. Il pourrait s'agir des apports de l'ASA Nord où des zones humides situées à l'Ouest du Canal de Lunel.

La Figure 186 présente les Volumes mensuels apportés par les ASA entre septembre 2019 et décembre 2020. Le volume mensuel moyen est de 0.4 Mm^3 pour l'ASA Nord et 0.3 Mm^3 pour l'ASA Sud.

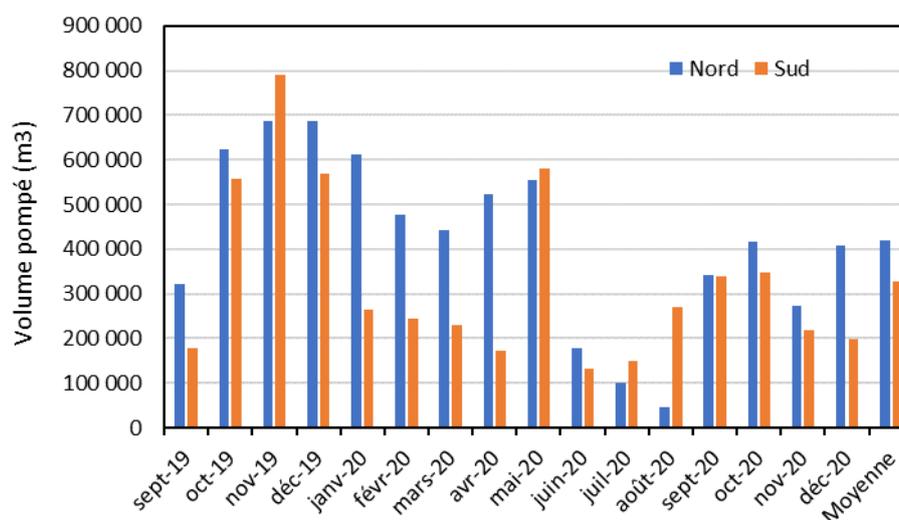


Figure 186 : Volumes mensuels apportés par les ASA entre septembre 2019 et décembre 2020

Durant la période de suivi haute fréquence sur le canal de Lunel, les apports ont été de :

- 1.50 Mm³ par le Canal de Lunel Nord,
- 0.00 Mm³ par le Canal de Lunel Sud,
- 0.55 Mm³ par l'ASA Nord,
- 0.46 Mm³ par l'ASA Sud.

Du bilan réalisé quant aux apports des nutriments, ressortent les constats suivants :

- L'azote total provient pour 40% du Dardaillon suivi de Lunel Nord pour 36% ;
- Le Dardaillon et Lunel Nord contribuent à parts égales (40%) aux apports en nitrates ;
- Lunel Nord contribuant à 47% des apports en ammonium et le Dardaillon 43% en azote organique.
- Les ASA contribuent pour 24% de l'azote total et 19% des nitrates ;
- Le phosphore total et les phosphates proviennent en grande partie du Dardaillon ;
- Le phosphore particulaire provient quasi à part égale de Lunel Nord (35%), du Dardaillon (35%) et de la Plaine de Marsillargues (30%).
- Les apports en provenance de la plaine de Marsillargues sont beaucoup moins importants, mais non négligeables en termes de phosphore total et de phosphates.

6.1.6. Illustration du coût d'acquisition de connaissances sur l'étang de l'Or

La Figure 187 illustre l'ordre de grandeur des coûts impliqués dans les études réalisées sur l'étang de l'Or. On y distingue :

- Les coûts des mesures de débits et concentrations des flux superficiels entrant par les passes et le BV Est, ainsi que le Salaison ;
- Les coûts d'évaluation des flux contribués par les autres tributaires (pris en compte à hauteur de 50% pour ce qui a trait à la caractérisation des flux apportés à l'étang de l'Or sensu stricto) ;
- Les modélisations portant sur les flux internes dans la lagune et utilisant les différentes données acquises (MARS3D et GAMELag).

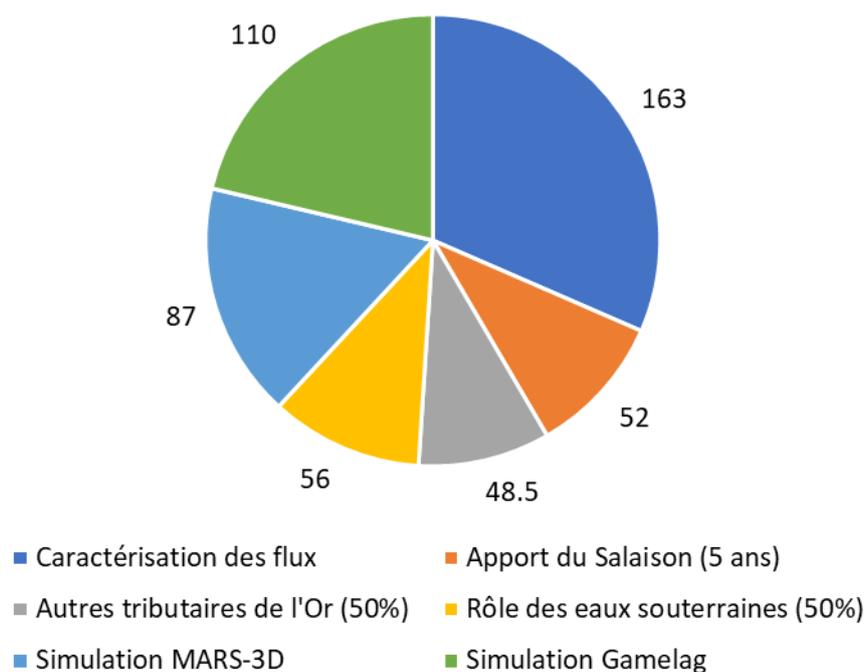


Figure 187 : Illustration des coûts (en k€) des acquisitions de connaissances sur l'étang de l'Or

Notons que plusieurs de ces études ont été réalisées à titre méthodologique et n'auraient vraisemblablement pas été réalisées pour une caractérisation 'classique' des flux contribués à une lagune.

Précision également que l'étang de l'Or est une lagune relativement complexe au niveau des apports et de ses échanges avec les masses d'eau voisines.

Les modélisations ne sont pas des études d'acquisition d'informations sensu stricto mais de simulation du devenir des nutriments à l'intérieur de la lagune.

6.2. Principaux acquis génériques (transposables) des études menées sur l'Etang de l'Or

Les différentes études menées sur les apports de nutriments à la lagune de l'étang de l'Or ont mis en évidence que :

- certains résultats sont vraisemblablement communs et donc transposables aux différentes lagunes,
- certains besoins méthodologiques sont requis pour l'acquisition de connaissances pertinentes sur une lagune,
- ces méthodes ou les résultats ainsi acquis présentent certaines limites.

Ces différents éléments sont discutés dans les paragraphes suivants.

6.2.1. Problématique littorale des lagunes

Les lagunes méditerranéennes sont caractérisées par la présence :

- d'un bassin versant comportant un ou plusieurs tributaires,
- d'un ou plusieurs graus permettant l'échange entre la lagune et la mer,
- de zones humides limitrophes jouant le rôle de plaine de débordement et de zones tampons,
- parfois de canaux de drainage des zones humides environnantes,

- parfois de canaux d'irrigation pour l'irrigation des terres, le maintien en eau de certains plans d'eau ou la gestion hydrique de rizières,
- parfois d'un canal de navigation (tel celui du Rhône à Sète ou celui de Lunel).

Du fait d'une altitude généralement équivalente à celle de la mer, les échanges prenant place par les graus sont directement contraints par la marée. Les graus fonctionnent alors de façon bidirectionnelle (effet yoyo). Durant les périodes de 'basses eaux' (c'est-à-dire sans apport important depuis les bassins versants), les parties aval des tributaires, les passes avec les zones humides environnantes et les canaux drainant la plaine littorale amont fonctionnent de la même façon (effet yoyo).

La marée n'est cependant pas la seule condition de forçage des échanges. Outre les apports importants depuis le bassin versant prenant place en période de pluies événementielles, le vent joue un rôle très important dans la dynamique des échanges. De façon schématique (à adapter selon l'orientation de la lagune et du littoral), un vent de terre (Mistral ou Tramontane) va favoriser une 'vidange' de la lagune, dont le niveau pourra devenir inférieur à celui de la mer. Dans cette situation, les zones humides limitrophe verront également leur niveau s'abaisser, jusqu'à être hors d'eau.

A l'inverse, un vent de mer (Marin) va favoriser l'entrée d'eau dans la lagune et l'inondation de toutes les zones limitrophes. Un vent parallèle à la ligne de côte va favoriser l'entrée d'eau d'un côté de la lagune et sa sortie du côté opposé. Dans le cas de l'étang de l'Or par exemple, un vent d'Ouest favorise l'entrée par le Grau de Carnon et la Passe Méjean et sa sortie par Canalette et les passes de CRAS Est. Et inversement pour un vent d'Est.

Selon la nature du cordon (lido) séparant la lagune et la mer un débit important (toujours inconnu) peut être échangé au travers de ce dernier.

Dans certains cas, la présence d'un canal de navigation complexifie les relations et échanges lagune / mer, tel que dans le cas de l'étang de l'Or où ces échanges ne peuvent se faire que par l'intermédiaire du canal du Rhône à Sète.

La mesure d'un débit d'échange ou d'une concentration ne reflète que l'instant de la mesure et ne fournit aucune estimation du débit moyen ni de la concentration moyenne des échanges. Également, l'intégration des volumes échangés (qui tend vers 0 en régime stationnaire) ne renseigne pas sur l'importance des volumes échangés (évaluable quant à elle par l'intégration des valeurs absolues des débits instantanés).

6.2.2. Problématique hydrologique des lagunes

Si les principaux tributaires des lagunes bénéficient généralement de stations hydrométriques de jaugeage (mesure du débit en quasi continu), il existe très peu de connaissances sur les débits et le fonctionnement des petits tributaires. De plus, les connaissances disponibles sur les plus grands tributaires ne peuvent pas être systématiquement transposées sur les petits (par exemple au prorata de leurs surfaces respectives) sans commettre des surestimations ou sous-estimations potentiellement importantes. La mise en œuvre d'une modélisation pour la reconstitution de séries chronologiques de débits ne paraît pas être quant à elle une réelle solution d'intérêt puisqu'elle requiert des données de pluie et de débits pour la mise en œuvre et le calage d'un modèle de type pluie-débit. Le calage d'un tel modèle ne sera représentatif que si les chroniques de pluie et de débit sont longues. Il est donc requis de disposer de chroniques suffisamment longues, ce qui va en quelque sorte à l'encontre de la problématique des bassins versants non jaugés.

Le rôle de l'importance des crues dans les apports hydriques (et de nutriments) aux lagunes n'était pas très bien documenté jusqu'à ce jour (jusqu'à ce présent suivi renforcé sur six tributaires durant cinq années). De surcroît, les débits de crues ne sont souvent pas toujours bien connus car généralement situés au-delà de la courbe de tarage de la station hydrométrique et correspondent généralement à une inondation de la plaine autour de la station (donc avec des écoulements contournant la station). Cette méconnaissance (ou mauvaise connaissance) des forts débits est renforcée par l'impact méconnu des zones humides entourant la lagune. Celles-ci jouent un rôle tampon significatif par la prise en charge d'un grand volume d'eau d'inondation. La restitution de ce volume n'est cependant pas toujours connue car effectuée par le biais de canaux de drainage, donc par des écoulements ne passant pas par la station hydrométrique.

Finalement, il est important de noter que les pluies constituent aussi une source notable d'incertitude et de variabilité. Sur la bordure méditerranéenne, les pluies reliées aux épisodes méditerranéens (cévenoles dans le Gard et l'Hérault) sont souvent très violentes et très localisées. Il peut par exemple pleuvoir 200 mm sur une commune et rien sur la commune voisine. Conséquemment, une crue observée à l'exutoire d'un BV dépendra directement de l'épisode méditerranéen qui l'a générée. Autrement dit, deux crues de même débit n'induiront pas les mêmes flux de nutriments puisque les pluies événementielles ne seront vraisemblablement pas tombées au même endroit.

La prise en compte de cette variabilité temporelle et spatiale des précipitations peut être abordée au travers des données radar. Ceci nécessite cependant de calibrer et vérifier les images radar utilisées avec les données de stations pluviométriques classiques et de disposer d'une chaîne de traitement numérique actuellement inexistante sur le marché. Ceci implique donc une technicité plus importante.

6.2.3. Rôle des eaux souterraines

L'étude menée dans le cadre de la thèse de Marine DAVID sur l'étang de l'Or a montré que les apports souterrains demeurent faibles (de l'ordre de quelques pour cents) devant l'importance des autres apports, qu'il s'agisse des flux hydriques ou de nutriments. L'interprétation et les perspectives qu'elle en a tirées suggèrent que ce constat s'applique vraisemblablement à toutes les lagunes d'Occitanie. Il semble donc que la prise en compte des flux souterrains peut être négligée dans un tel contexte sans induire de biais important dans l'évaluation globale des apports et le bilan des entrées-sorties.

Ce constat doit cependant être tempéré dans le cas des lagunes alimenté par des flux karstiques, localisés ou diffus. Des tels apports karstiques sont par exemple connus dans les étangs de Thau, de la Palme et de Salses-Leucate. Les bilans hydriques déficitaires observés dans le cadre de ce présent projet sur la Mosson et sur la Berre ont également conduit à évoquer la possibilité d'un fonctionnement karstique comme cause potentielle de ce déficit.

6.2.4. Caractérisation des apports

L'évaluation des apports de nutriments requiert une connaissance des flux hydriques et des concentrations associées. Les études menées par le SYMBO sur l'Etang de l'Or (en particulier celles d'HYDRIAD 2018 et 2021) ont montré que les masses eaux impliquées autour d'une lagune présentent des signatures 'qualité' contrastées, parfois affectées d'une importante variabilité temporelle. Il paraît donc important de caractériser de façon adéquate ces signatures et leur variabilité temporelle (y compris idéalement les causes de cette variabilité).

S'il est vraisemblable que les apports par les tributaires peuvent représenter une partie importante des flux apportées, ceci ne concerne principalement que les lagunes bénéficiant d'un principal tributaire. Dans le cas de l'étang de l'Or, le Salaison ne représente qu'une faible partie des apports à la lagune,

Canalette et les passes Sud constituant les principaux échanges. Les travaux de David (2019) ont par ailleurs montré que dans le cas de tributaires tels le Salaison, la contribution du tributaire pouvait prendre place dans la partie la plus aval de celui-ci, où le cours d'eau bénéficie en particulier d'apports souterrains. Il est donc important que les prélèvements pour analyses soient réalisés le plus en aval possible, mais hors de la zone de mélange ou des périodes de mélange avec les eaux de la lagune.

Les résultats des suivis sur l'Etang de l'Or ont par ailleurs montré une corrélation globalement inverse entre les concentrations en nutriments et la salinité. Les concentrations provenant du bassin versant et associées à des eaux douces sont suffisamment élevées pour pouvoir être réalisées par les techniques analytiques classiques. Les pôles d'échange correspondant à des eaux saumâtres sont par contre bien moins chargées en nutriments. Dans ce cas, le recours à une méthode analytique telle la méthode Aminot-Kérouel pourrait être requis. Cette méthode analytique est en effet spécifiquement adaptée aux eaux chargées en ions et permet la mesure de faibles concentrations.

Ces différents constats pourraient militer pour une stratégie d'échantillonnage de toutes les masses d'eau voisines d'une lagune, dont les canaux artificiels souvent aménagés pour drainer les eaux (et pas seulement de son principal tributaire). Elle devrait viser chacune des principales masses d'eau voisine et non la lagune, c'est-à-dire se faire en fin de flux entrant dans la lagune. Dans le cas des nutriments, un échantillonnage à haute fréquence ne semble pas forcément requis. Par contre, un échantillonnage représentatif des différentes conditions hydrologiques paraît nécessaire. Ces diverses conditions recourent des événements naturels (crues, tempête de mer, submersion) ou anthropiques (réseau de canaux de drainage, ouverture/fermeture des martelières sur les canaux principaux, irrigation des rizières ou autres cultures, etc.).

Mentionnons que ce type d'évaluation des flux apportés ne peut vouloir ni ne doit prétendre évaluer ces flux de façon exacte et précise. Il s'agit avant tout de disposer d'un socle minimal d'informations en utilisant au maximum des données et connaissances existantes, complétées en fonction des besoins ou lacunes importantes.

7. Estimation de la qualité des eaux dans les bassins versants non renseignés

Dans de nombreux cas, des données de qualité ne seront pas disponibles pour réaliser une estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes. Une analyse statistique a donc été menée sur les six bassins versants des tributaires étudiés afin de vérifier s'il est possible d'estimer l'ordre de grandeur des concentrations de nutriments des eaux apportées aux lagunes à partir d'un certain nombre de facteurs propres aux bassins versants.

Cette analyse vise à mieux comprendre en quoi les caractéristiques propres à chaque bassin versant peuvent conditionner les flux de nutriments. Une caractérisation des bassins versants a donc été réalisée en premier lieu sur la base de données facilement disponibles comme par exemple la couche d'information SIG Corine Land Cover pour l'occupation du territoire, ou les bases de données concernant les rejets des STEP.

L'objectif de l'analyse était de dégager les relations entre les concentrations observées et les différentes variables explicatives sélectionnées. Les paramètres de qualité pris en compte sont les MES, l'azote inorganique et le phosphore total. Les relations ont été étudiées et établies à l'aide des méthodes statistiques classiques, mais également à l'aide d'autres approches comme les analyses ACP. Ceci vise à proposer une méthode permettant de fournir des valeurs potentielles / probables de concentrations en fonction des caractéristiques d'un bassin versant quelconque, lorsque des données de qualité ne sont pas disponibles.

Le lecteur non familier avec les approches statistiques est invité à sauter les sections suivantes et à se rendre directement à l'application des résultats à la section 7.6.3 en page 166.

7.1. Echelle spatiale d'analyse

Toutes les données existantes de qualité des eaux superficielles ont été récupérées sur Naïades (site internet eaufrance.fr) pour la période 2008-2019. Au total, 74 stations 'qualité' sont répertoriées sur les six bassins versants étudiés. Il convient de mentionner que la distribution spatiale des stations n'est pas homogène sur chaque bassin versant. Par ailleurs, la fréquence des prélèvements est très différente d'une station à l'autre. Certaines stations n'ont pas été prélevées durant plusieurs années, ou ne l'ont été que durant quelques années. La richesse des jeux de données est donc très variable. Au final, 66 stations ont été retenues pour l'analyse.

Les six bassins versants étudiés ont ainsi été découpés en sous-bassins versants, correspondant à chacune des stations 'qualité', allant de sous-bassins plus homogènes et de tailles plus petites et à des sous-bassins plus hétérogènes et de tailles plus grandes. Ont ainsi été obtenus :

- 13 sous-bassins pour la Berre ;
- 7 sous-bassins pour la Mosson ;
- 6 sous-bassins pour le Lez ;
- 4 sous-bassins pour le Salaison ;
- 14 sous-bassins pour le Vidourle ;
- 22 sous-bassins pour l'Arc.

Les bassins versants des différentes stations ont été délimités sur SIG à partir du modèle numérique de terrain de l'IGN aux 75 m. Le bassin versant topographique peut être différent du bassin versant réel

de chaque point de prélèvement en particulier dans des contextes karstiques. L'étude n'avait pas vocation à déterminer le bassin d'alimentation précis de la station qualité, mais d'approcher celui-ci dans un contexte d'évaluation des caractéristiques moyennes de chaque sous-bassin.

La Figure 188 présente les stations de suivi de qualité de la Berre et les sous-bassins versants correspondants. Les tailles des sous-bassins des 13 stations retenues de suivi de la qualité vont de 3.8 à 207.3 km².

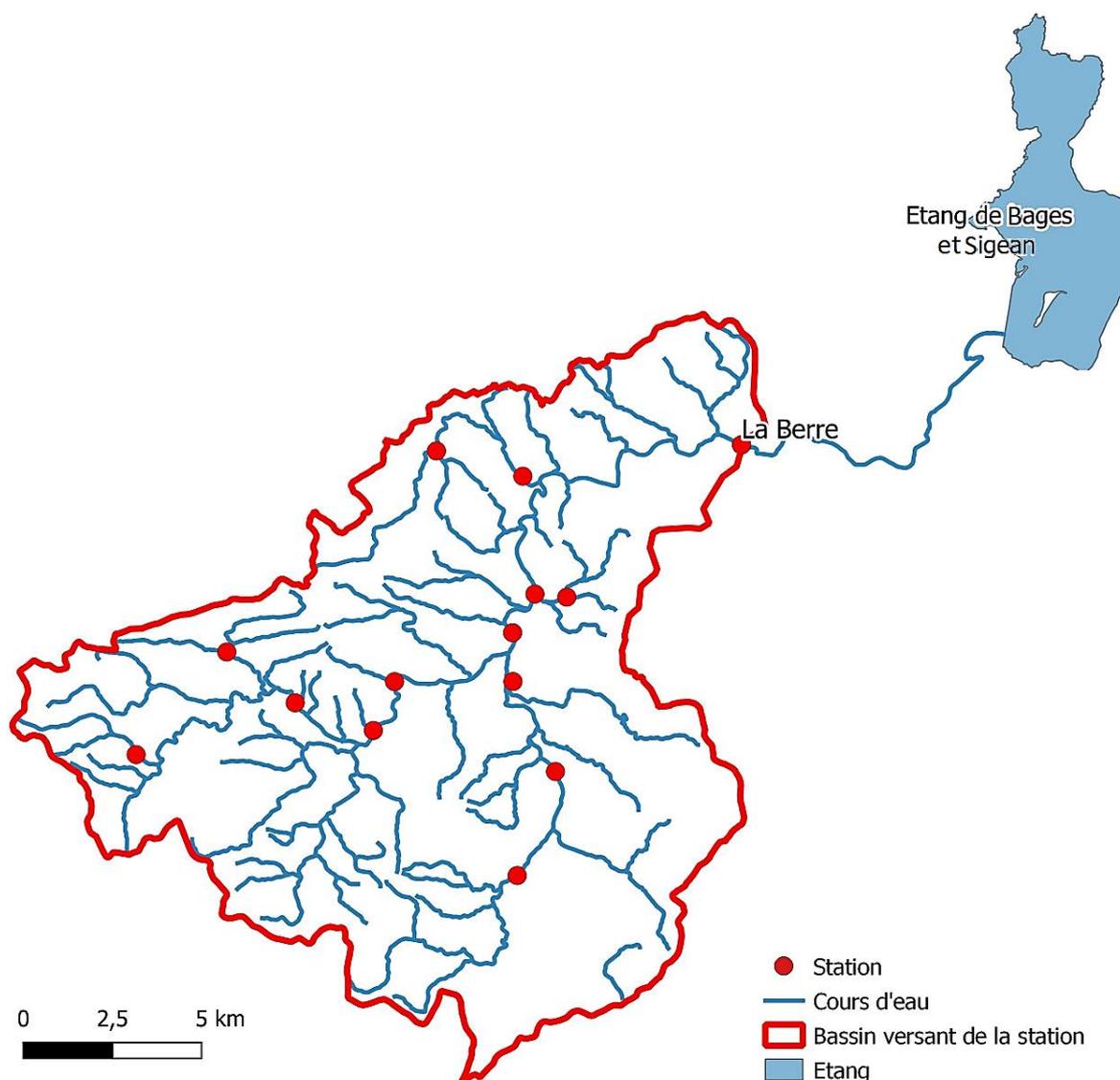


Figure 188 : Stations de suivi qualité de la Berre

La Figure 189 présente les stations de qualité et sous-bassins versants associés de la Mosson, du Lez, du Salaision et du Vidourle. Les tailles des sous-bassins des 7 stations retenues de suivi de la qualité de la Mosson vont de 1.4 à 359.5 km². Les tailles des sous-bassins des 6 stations retenues de suivi de la qualité du Lez vont de 97.7 à 165.8 km². Les tailles des sous-bassins des 4 stations retenues de suivi de la qualité du Salaision vont de 11.42 à 63.8 km². Les tailles des sous-bassins des 14 stations retenues de suivi de la qualité de la Mosson vont de 19.6 à 773.6 km².

La Figure 190 présente les stations et sous-bassins versants de l'Arc. Les tailles des sous-bassins des 22 stations retenues de suivi de la qualité de la Mosson vont de 8.2 à 711.1 km².

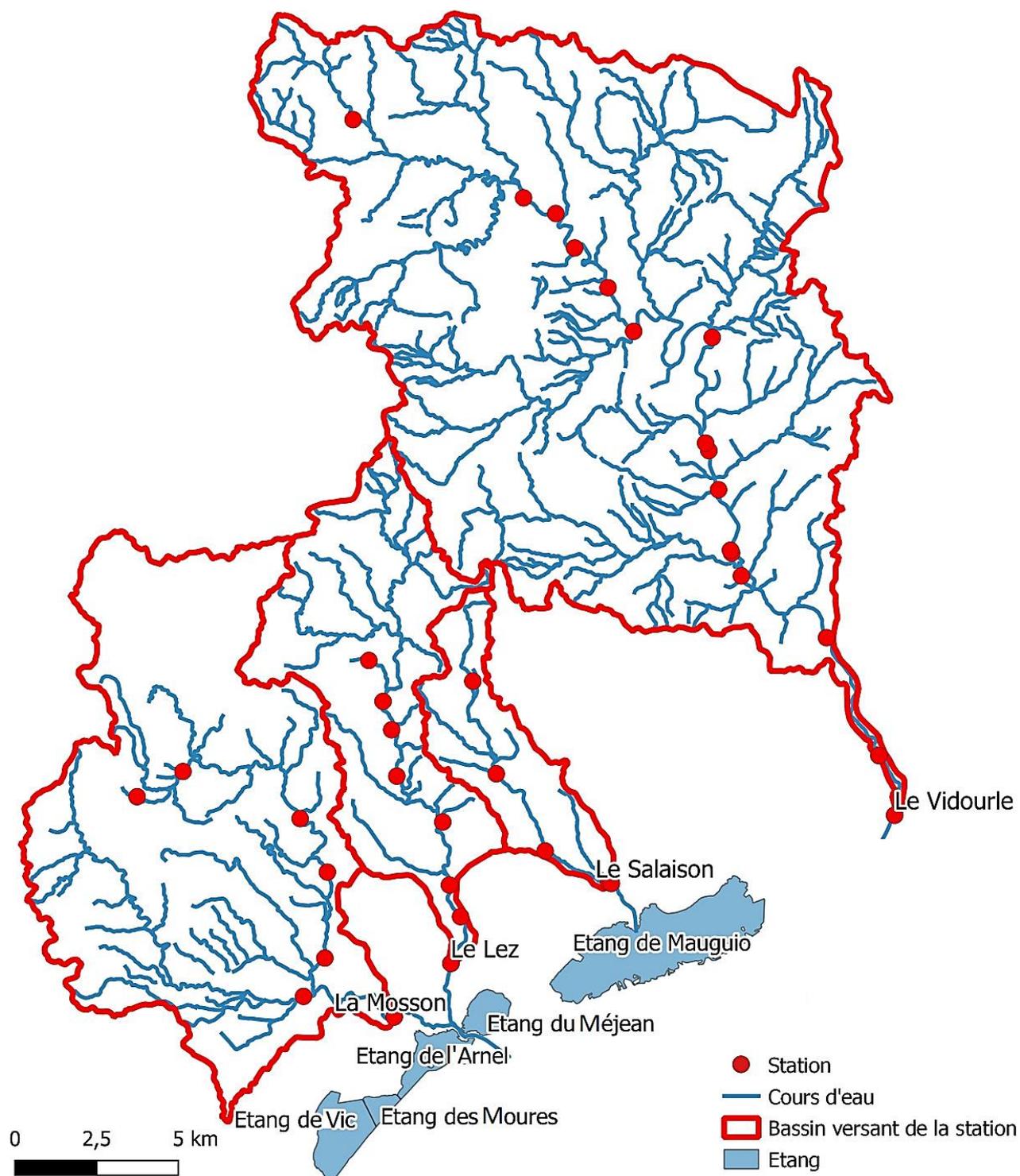


Figure 189 : Stations de suivi qualité de la Mosson, du Lez, du Salaison et du Vidourle

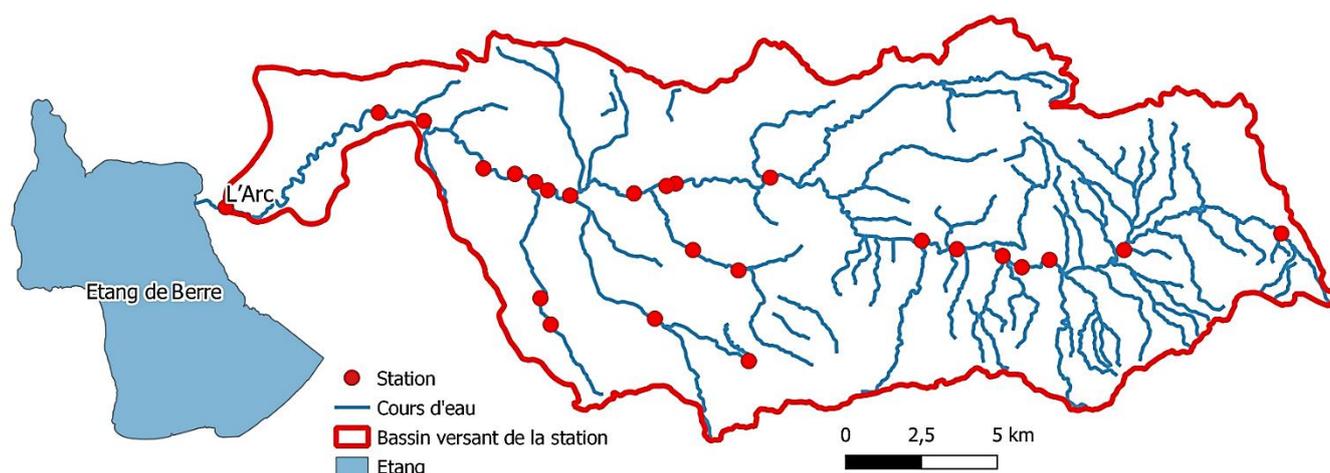


Figure 190 : Stations de suivi de la qualité de l'Arc

7.2. Choix des facteurs 'explicatifs'

Une multitude de facteurs peuvent contrôler la contamination des cours d'eau. L'analyse doit être menée sur les paramètres les plus contributeurs et disponibles à l'échelle de chaque sous-bassin. Les diverses origines des trois paramètres étudiés (MES, azote et phosphore) sont généralement les suivantes :

- MES : érosion naturelle, activités agricoles, activités forestières, rejets industriels, rejets municipaux, ruissellement urbain ;
- Azote : épandage d'engrais, rejets municipaux, fosses septiques ;
- Phosphore : rejets municipaux, activités agricoles, fosses septiques, ruissellement urbain.

Les quantités qui peuvent atteindre un cours d'eau dépendent de la topographie du terrain, du climat, de la géologie, du régime hydrique et de la végétation présente. Les pratiques agricoles de travail du sol ont également un impact sur le transfert des nutriments.

Il y a donc lieu de distinguer deux grands types de paramètres qui régissent les concentrations en MES, azote et phosphore des eaux superficielles :

- Les pressions exercées sur le territoire constituant la source des flux,
- Les paramètres physiques propres au bassin et qui influencent le ruissellement et l'érosion.

Les facteurs retenus pour l'analyse ont donc été les suivants :

- Pressions
 - Densité de population. La densité de population est par exemple très importante sur le bassin versant de l'Arc, alors qu'elle est très faible sur celui de la Berre. Au sein d'un même bassin versant les densités de populations peuvent être très différentes. Les parties amont des bassins versants de la région montpelliéraine sont par exemple très peu urbanisées contrairement aux zones aval. Les données de population de l'INSEE ont été exploitées pour calculer la densité de population de chaque sous bassin.
 - Apports des stations d'épuration (STEP) exprimés en densité de pression (kg/an / km²). Ces apports des STEP seront les principaux responsables des apports de phosphore, mais contribuent aussi aux apports d'azote et de MES. Les données des rejets des stations d'épuration proviennent de la base de données de l'Agence de l'eau. Ces données renseignent les rejets de chaque STEP, année après année. Elles

sont exprimées en quantité journalière de polluant rejetée au milieu naturel (flux journaliers de MES, phosphore total et azote réduit).

- Pourcentage du territoire en grandes cultures. Le pourcentage d'occupation agricole de chaque sous-bassin a été calculé à l'aide de la couche d'occupation de sols Corine land Cover 2018. Nous avons distingué les surfaces en grandes cultures de celles en viticulture et arboriculture car ces deux types d'agriculture ont des pratiques différentes en termes d'intrants et de travail des sols.
- Pourcentage du territoire en viticulture et arboriculture.
- Superficie du bassin versant (prise en compte pour le calcul de certains facteurs, comme la densité de population ou la pression de pollution rejetée par les STEP) ;
- Pente moyenne du bassin versant. Plus les pentes sont importantes, plus les risques d'érosion sont grands. L'érosion hydrique augmente aussi avec la longueur de la pente à cause de l'augmentation du ruissellement. La vitesse du ruissellement étant plus rapide, le transport des sédiments augmente, ce qui peut donner lieu à un apport accru de matière en suspension et de nutriments associés. La pente moyenne de chaque sous-bassin a été calculée sur SIG à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de l'IGN aux 75 m.
- Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR). Cet indice permet de rendre compte de façon indirecte de la capacité des formations à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de pluie. Développé par le BRGM, il est fondé sur l'analyse de la topographie (par le modèle numérique de terrain) et des réseaux hydrographiques naturels, conditionnés par la géologie. Un bassin formé de matériaux très perméables aura en général une densité de drainage faible. A l'inverse, un bassin formé de roches imperméables, mais meubles et érodables, comme des marnes ou des argiles, va souvent présenter une densité de drainage élevée. L'IDPR quantifie ce rôle en comparant le réseau naturel observé à un réseau théorique.
- Type de sols ; ce facteur ne s'est au final pas avéré très pertinent à cette échelle de travail, entre autres car il n'est pas possible de déterminer un type moyen ou médian de sols pour un sous-bassin versant donné.
- Pluie totale et pluie efficace ; ce facteur ne s'est également pas avéré pertinent à cette échelle de travail car la densité de stations météorologiques disponibles n'était pas adaptée à l'échelle d'analyse.

Notons que le couvert végétal est indirectement pris en compte avec l'occupation des sols du territoire. Les surfaces cultivées sont en effet plus susceptibles d'être érodées qu'un sol couvert de végétation naturelle.

7.3. Analyse factorielle discriminante (regroupement)

Différentes analyses multivariées ont été réalisées :

- Analyse factorielle discriminante (regroupement),
- Regroupement hiérarchique (proximité),
- Analyse en composantes principales,
- Régressions multi-paramètres.

Cette section présente les résultats de l'analyse factorielle discriminante menée sur les 66 stations retenues (incluant les six principales stations situées aux exutoires des 6 bassins versants étudiés). L'analyse factorielle discriminante (AFD, ou analyse discriminante) est une technique statistique visant à

décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis (classes, modalités de la variable à prédire...) d'un ensemble d'observations (individus) à l'aide d'une série de variables prédictives (descripteurs, variables exogènes ...). Dans notre étude, les individus sont les sous-bassins, les variables descriptives sont la pente, l'IDPR, le % de grande culture etc. L'analyse vise donc à vérifier s'il existe des classes d'objets a priori différentes et à maximiser la séparation entre ces classes.

La Figure 191 présente l'analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec les variables prédictives suivantes : IDPR moyen, pente moyenne, densité de population (hab./km²), % de grande culture, % de viticulture + arboriculture, rejet de MES des STEP (par km² de BV), concentration médiane de MES mesurée à la station du suivi qualité.

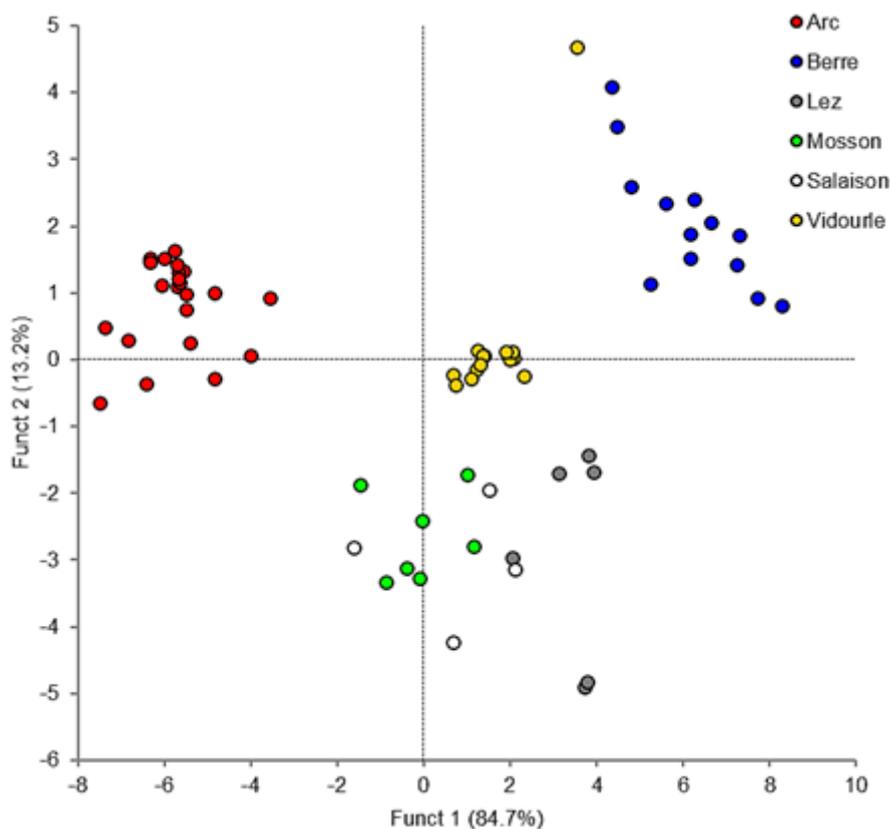


Figure 191 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec les MES

La Figure 192 présente l'analyse discriminante menée en tenant compte des facteurs propres aux sous-bassins et de l'azote inorganique rejeté par les STEP et observé à la station de suivi qualité.

La Figure 193 présente l'analyse discriminante menée en tenant compte des facteurs propres aux sous-bassins et du phosphore total rejeté par les STEP et observé à la station de suivi qualité.

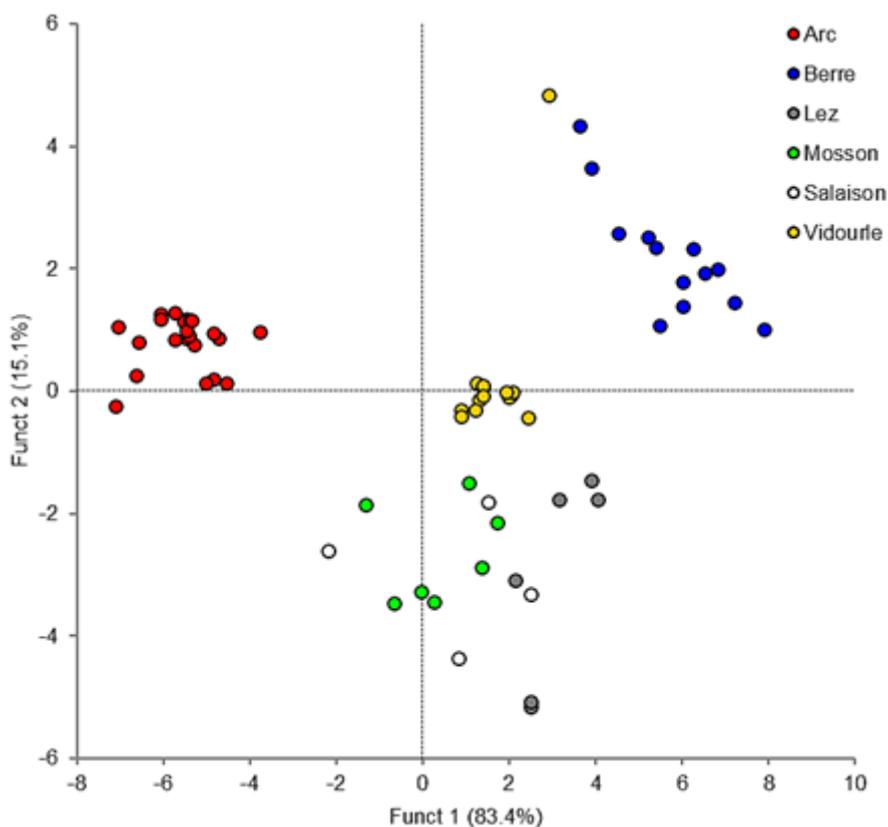


Figure 192 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec l'azote inorganique

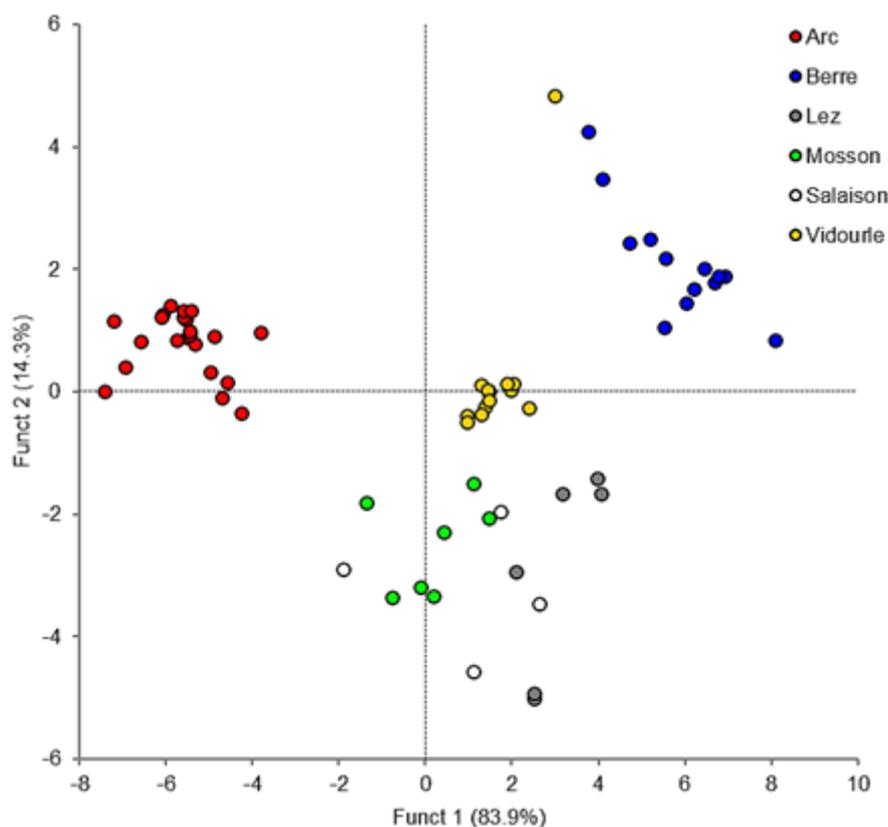


Figure 193 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec le phosphore total

Les trois analyses discriminantes menées montrent que les 66 sous-bassins versants s'organisent très nettement en quatre groupes : Arc (en rouge), Vidourle (en jaune), Berre (en bleu) et le groupe 'Mosson (en vert) + Lez (en gris) + Salaison (en blanc)'. Seul un point du Vidourle ne suit pas cette organisation. On constate également que le premier axe différencie totalement entre eux l'Arc, le Vidourle et la Berre, le second axe différenciant quant à lui le groupe 'Mosson + Lez + Salaison'. Le premier axe explique le jeu de données à plus de 80%, le second à plus de 12%.

Dans l'analyse avec les MES (mesurées à la station et en sortie de STEP), le premier axe est principalement constitué de l'IDPR (coefficient standardisé de 1.4), du % de grandes cultures (coefficient standardisé de -1.2) et du % de viti-arboriculture (coefficient standardisé de -1.2). Les MES mesurées contribuent peu (coefficients de -0.5 et -0.7). Le second axe est principalement constitué de la pente moyenne (coefficient standardisé de 1.2). Les MES mesurées contribuent peu (coefficients de 0.6 et 0.1).

Dans l'analyse avec l'azote (mesuré à la station et en sortie de STEP), le premier axe est principalement constitué du % de grandes cultures (coefficient standardisé de -1.4), de l'IDPR (coefficient standardisé de 1.4) et du % de viti-arboriculture (coefficient standardisé de -1.1). L'azote mesuré contribue peu (coefficients de -0.2 et -0.5). Le second axe est principalement constitué de la pente moyenne (coefficient standardisé de 1.2). L'azote mesuré contribue peu (coefficients de 0.6 et 0.3).

Dans l'analyse avec le phosphore (mesuré à la station et en sortie de STEP), le premier axe est principalement constitué de l'IDPR (coefficient standardisé de 1.4), du % de grandes cultures (coefficient standardisé de -1.4) et du % de viti-arboriculture (coefficient standardisé de -1.0). Le phosphore mesuré contribue peu (coefficients de -0.2 et -0.5). Le second axe est principalement constitué de la pente moyenne (coefficient standardisé de 1.3). Le phosphore mesuré contribue peu (coefficients de 0.5 et 0.3).

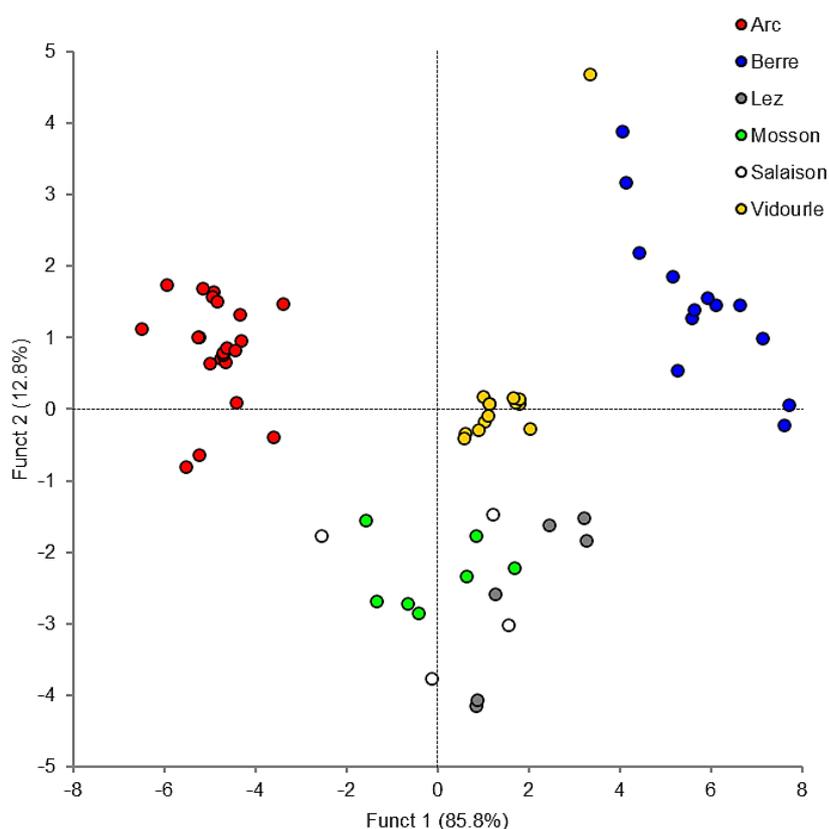


Figure 194 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte des seules caractéristiques propres aux sous-bassins

Une quatrième analyse a été menée en ne prenant en compte que les facteurs propres aux sous-bassins versants. Les regroupements obtenus sont les mêmes, ce qui indique que les bassins versants ont des caractéristiques propres permettant de les individualiser (hormis le groupe Mosson + Lez + Salaison dont les caractéristiques sont proches).

Dans cette analyse sans prise en compte des nutriments eux-mêmes, le premier axe est principalement constitué de l'IDPR (coefficient standardisé de 1.3), du % de grandes cultures (coefficient standardisé de -1.1) et du % de viti-arboriculture (coefficient standardisé de -1.0). Le second axe est principalement constitué de la pente moyenne (coefficient standardisé de 1.2) et du % de grande culture (coefficient standardisé de 1.0).

L'analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants a montré que les 66 sous-bassins versants s'organisent très nettement en quatre groupes : Arc, Vidourle, Berre et BV du secteur montpelliérain. Ceci montre aussi que les variables explicatives utilisées (IDPR moyen, pente moyenne, densité de population (hab./km²), % de grande culture, % de viticulture + arboriculture, rejet de MES des STEP (par km² de BV), concentration médiane de MES mesurée à la station du suivi qualité) permettent de différencier les cinq BV entre eux.

Les résultats obtenus avec l'analyse discriminante peuvent être comparés et discutés par rapport aux courbes 'Concentrations / Débits' présentées au Chapitre 4. La Figure 195 présente les résultats de l'analyse discriminante et fait ressortir les points qui correspondent aux stations de suivi à l'exutoire des bassins versants.

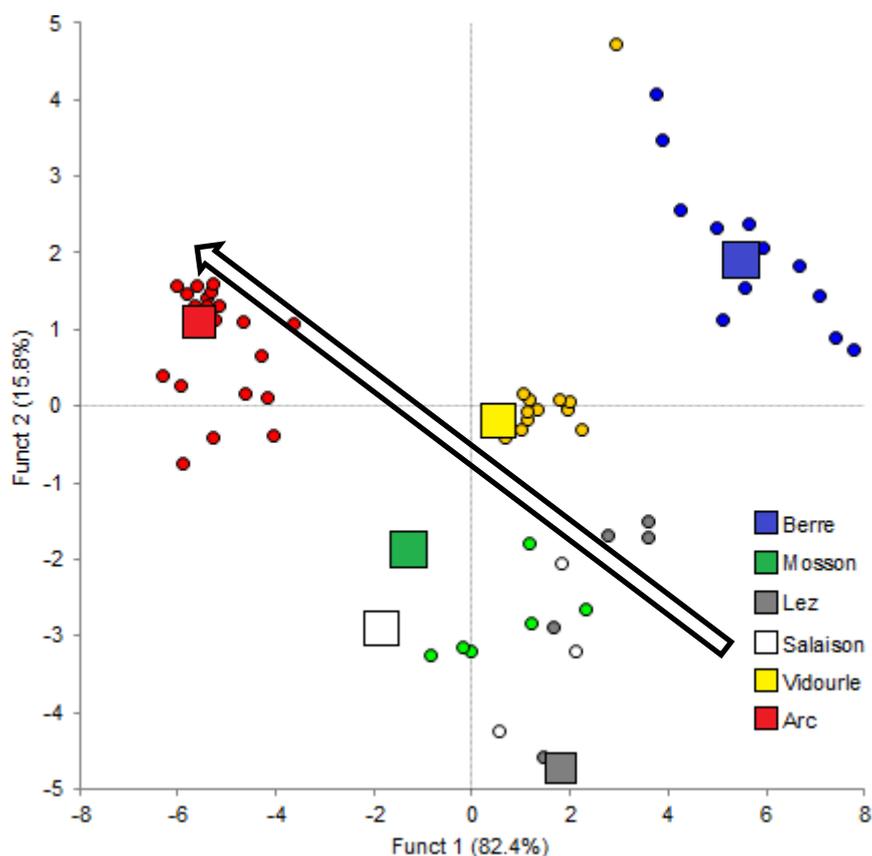


Figure 195 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte des MES (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins)

La Figure 196 présente les courbes 'Concentrations / Débits' des six tributaires.

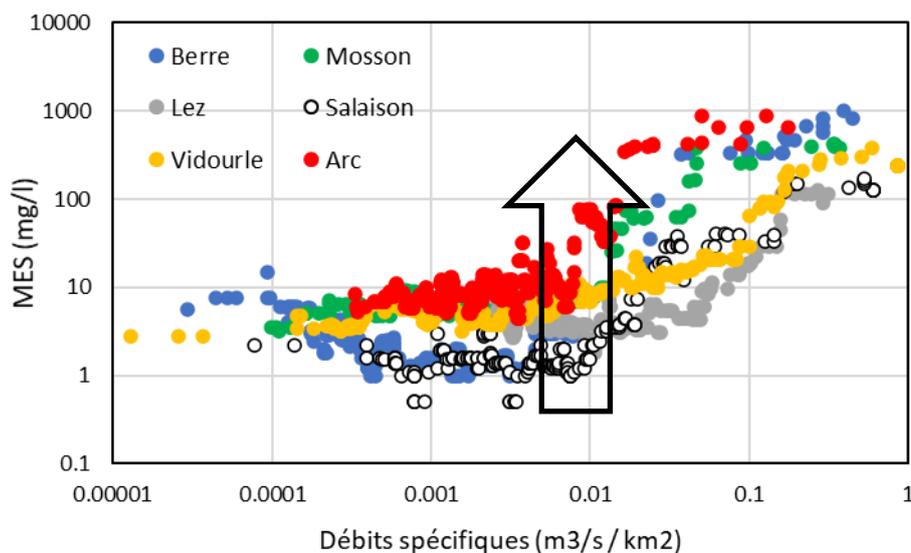


Figure 196 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

L'organisation relative des courbes 'Concentrations / Débits' de la Figure 196 suit globalement celle des stations de mesure dans l'analyse discriminante (Figure 195). L'ordre de grandeur des concentrations des différents tributaires semblerait donc pouvoir être expliqué par les variables prises en compte dans l'analyse discriminante.

La courbe du Vidourle croît de façon beaucoup plus régulière que les autres (Figure 196 ou Figure 197). Les points (sous-bassins) du Vidourle sont également ceux qui montrent le moins de dispersion dans l'analyse discriminante (à l'exception d'un sous-bassin). A l'inverse, la Berre montre la courbe 'Concentrations / Débits' ayant la plus grande variabilité ainsi que la plus grande dispersion des points dans l'analyse discriminante. L'exacerbation des flux de MES avec le débit pourrait ainsi être possiblement reliée à l'hétérogénéité du bassin.

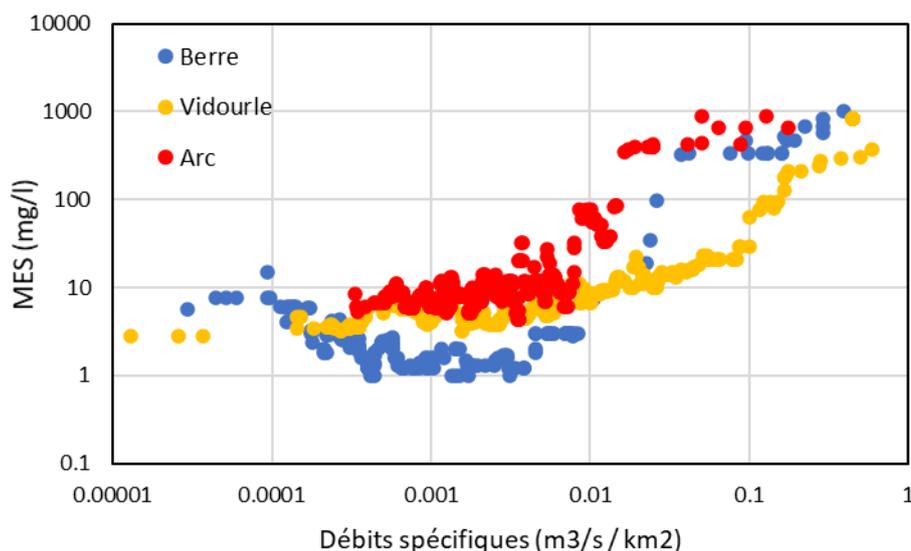


Figure 197 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Vidourle et de l'Arc

Une comparaison semblable peut être tentée pour l'azote inorganique. La répartition relative des bassins versants est assez semblable sur les deux figures (Figure 198 et Figure 199). La relation entre l'évolution des courbes 'Concentrations / Débits' et la dispersion des points dans l'analyse discriminante n'est par contre pas très évidente.

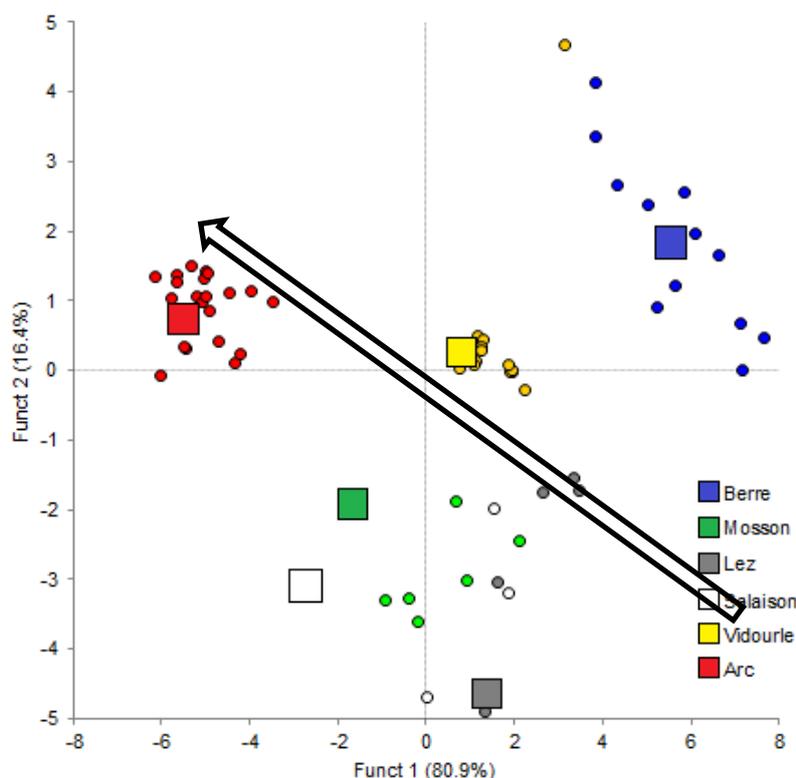


Figure 198 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte de l'azote inorganique (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins)

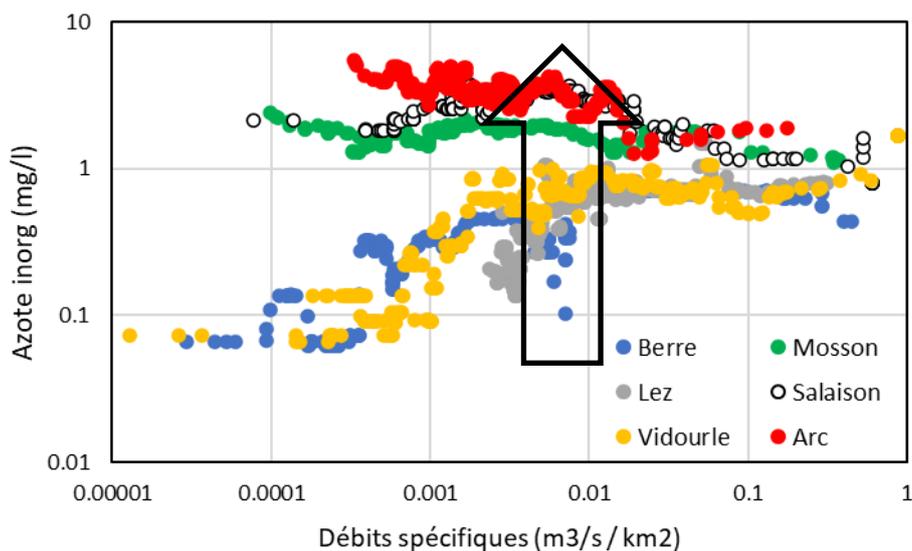


Figure 199 : Relations Azote inorganique (médiante glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

La comparaison menée sur le phosphore total (Figure 200 et Figure 201). Les courbes 'Concentrations / Débits' s'organisent ici encore de façon cohérente vis-à-vis des regroupements de l'analyse discriminante. La relation entre l'évolution des courbes 'Concentrations / Débits' et la dispersion des points dans l'analyse discriminante semble un peu plus visible.

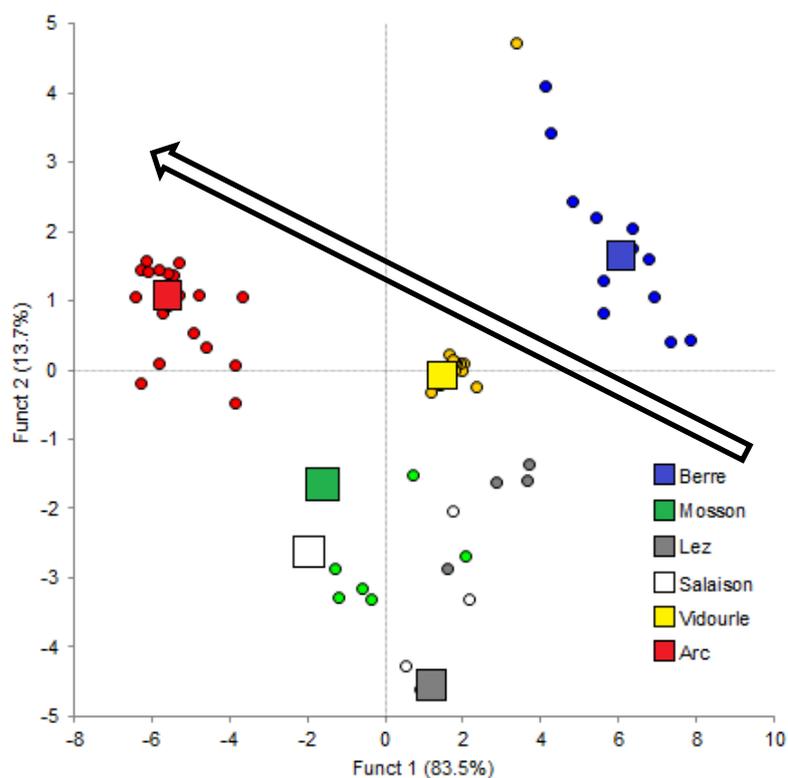


Figure 200 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte du phosphore total (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins)

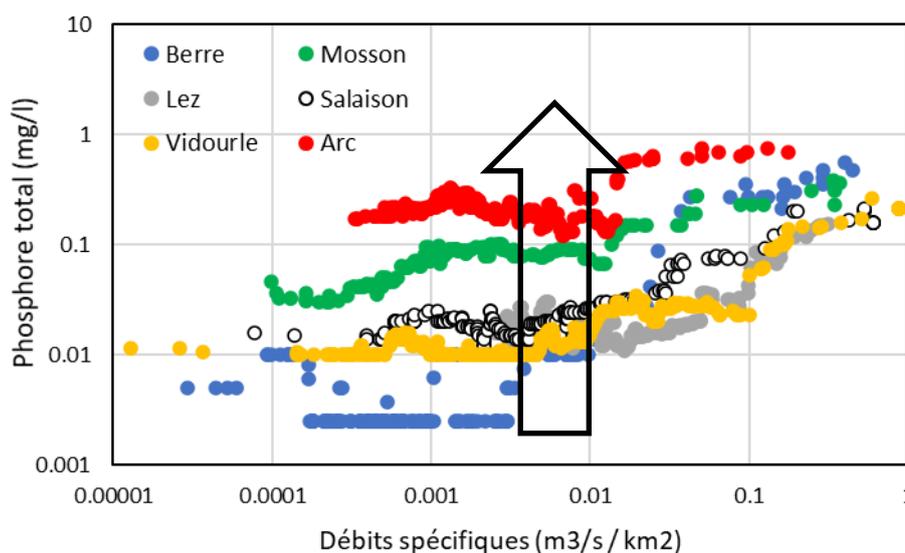


Figure 201 : Relations Phosphore total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés

7.4. Regroupement hiérarchique (clusters)

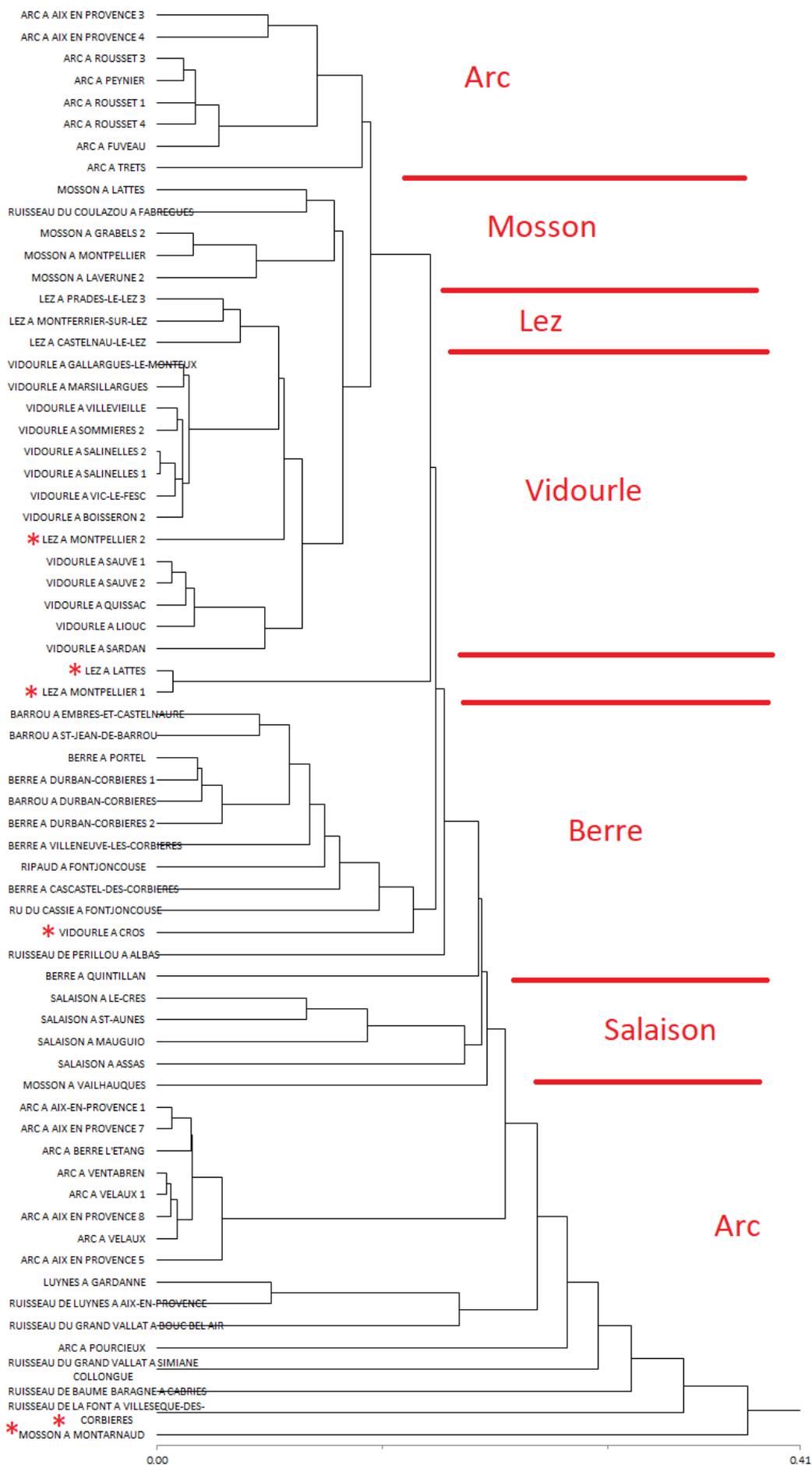
Dans le domaine de l'analyse et de la classification automatique de données, le regroupement hiérarchique recouvre différentes méthodes de clustering : les méthodes 'ascendantes' et les méthodes 'descendantes'. La classification ascendante hiérarchique est dite "ascendante" car elle part d'une situation où tous les individus sont seuls dans une classe, puis sont rassemblés en classes de plus en plus grandes. Son but est de répartir ces individus dans un certain nombre de classes. La représentation graphique par dendrogramme se présente comme les racines d'un arbre binaire dont les extrémités des racines sont les individus alignés sur l'axe des abscisses.

La Figure 202 présente le résultat (dendrogramme) de la classification ascendante hiérarchique menée sur les 66 sous-bassins versants à l'aide des variables explicatives spécifiques aux sous-bassins (IDPR moyen, pente moyenne, densité de population [hab./km²], % de grande culture, % de viticulture + arboriculture) ou à la qualité (MES, N et P rejetés par les STEP et observés sur la station de suivi qualité).

Dans ce dendrogramme, les stations sont bien regroupées en fonction de leur bassin versant d'appartenance. Seules quelques cinq stations (indiquées par des *) ne sont pas regroupées (trois du Lez, une du Vidourle, une de la Berre et une de la Mosson). Les variables explicatives retenues sont donc à même de pouvoir différencier de façon assez exhaustive les bassins versants et leurs sous-bassins.

Le regroupement mis en évidence avec l'analyse factorielle discriminante (section 7.3) a été confirmé par la méthode du regroupement hiérarchique (clusters). Dans le dendrogramme obtenu, les stations sont bien regroupées en fonction de leur bassin versant d'appartenance. Seules les cinq stations situées en bas du dendrogramme ne sont pas regroupées (deux de la Mosson, deux de l'Arc et une de la Berre). Les variables explicatives retenues sont donc à même de pouvoir différencier de façon assez exhaustive les sous-bassins.

Figure 202 (page suivante) : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique menée sur les 66 sous-bassins versants



7.5. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse factorielle discriminante (AFD) présentée précédemment est une technique statistique visant à mettre en évidence des groupes différents au sein d'un ensemble d'individus.

L'analyse en composantes principales (ACP) permet de la même façon d'analyser et de visualiser un jeu de données contenant des individus décrits par plusieurs variables quantitatives. Chaque variable est considérée comme une dimension différente et indépendante. L'ACP synthétise cette information en seulement quelques nouvelles variables, appelées composantes principales, qui correspondent à une combinaison linéaire des variables initiales. L'ACP identifie les directions (axes principaux ou composantes principales) le long desquelles la variation des données est maximale.

Pour cet aspect du problème de différenciation de groupes différents, l'AFD est plus puissante (plus 'discriminante') que l'ACP. Il peut être montré que l'AFD est un cas particulier optimal d'ACP permettant d'atteindre l'objectif de meilleure représentation des classes.

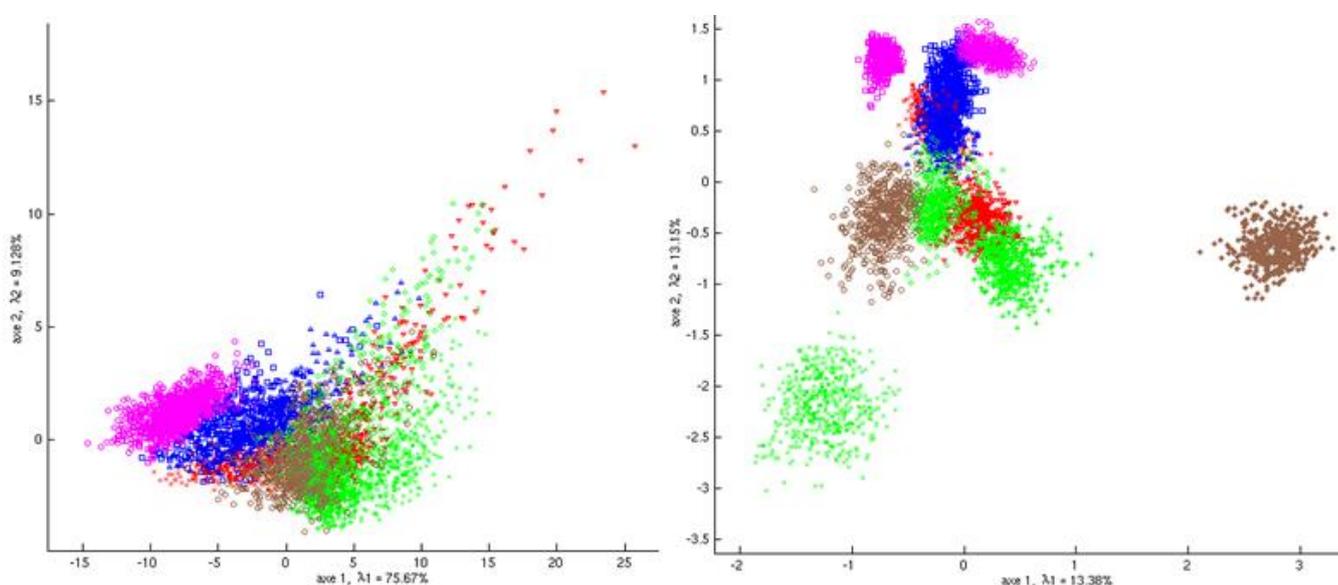


Figure 203 : Exemple de la projection d'individus sur les deux axes principaux de l'ACP (à gauche) et les deux axes discriminants de l'AFD (à droite) (tiré des notes du Cours Cnam RCP208)

L'ACP est utilisé dans la présente étude pour représenter les variables explicatives et leur structure de corrélation, au moyen du cercle des corrélations. Le cercle des corrélations permet de visualiser l'importance de chaque variable explicative pour chaque axe de représentation. La direction de chaque flèche (une flèche par variable explicative) indique l'axe expliqué par la variable et le sens indique si la corrélation est positive ou négative.

La Figure 204 présente l'ACP menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins (IDPR moyen, pente moyenne, densité de population [hab./km²], % de grande culture, % de viticulture + arboriculture).

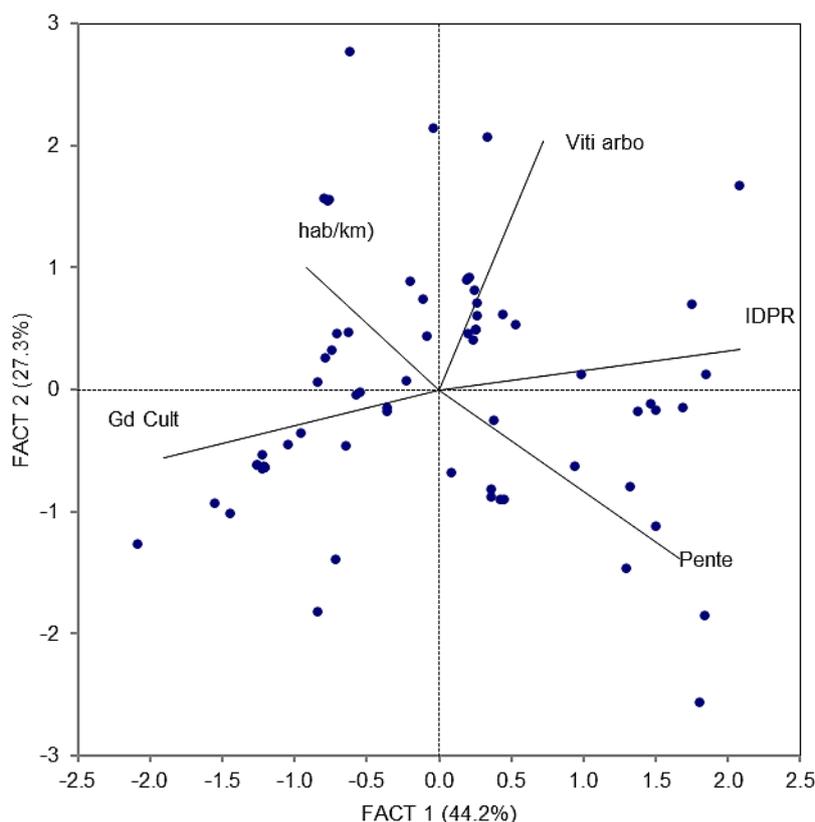


Figure 204 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les seules caractéristiques propres aux sous-bassins

Les dimensions 1 et 2 représentent 71.5 % de l'information du jeu de données. Ces cinq variables explicatives sont assez distantes les unes des autres, donc assez indépendantes et non redondantes. Pente, IDPR, Grande culture et Viti-arboriculture sont les variables les plus représentatives, la densité de population l'étant moindrement.

La Figure 205 présente l'ACP menée sur les 66 sous-bassins versants avec leurs caractéristiques propres ainsi qu'avec les données des MES rejetées des STEP et des MES mesurées à la station de suivi.

MES_station serait plutôt corrélé positivement à la pente et inversement à MES_STEP et à Grande Culture. IDPR et densité de population seraient moins explicatives et viti-arboriculture a priori pas du tout.

La Figure 206 présente l'ACP menée avec les caractéristiques propres des sous-bassins versants ainsi qu'avec les données de l'azote inorganique rejeté des STEP et celui mesuré à la station de suivi.

L'azote mesuré à la station serait très bien corrélé avec l'importance viti-arboriculture, un peu moins avec IDPR et avec l'azote rejeté par les STEP et bien moindrement avec les autres.

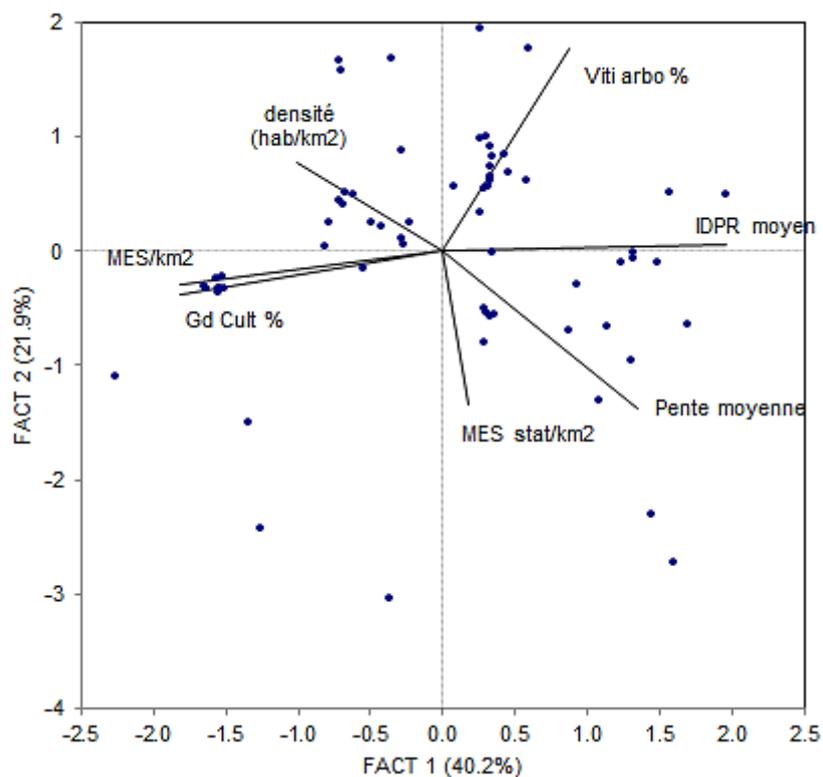


Figure 205 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données MES des STEP et de la station de suivi

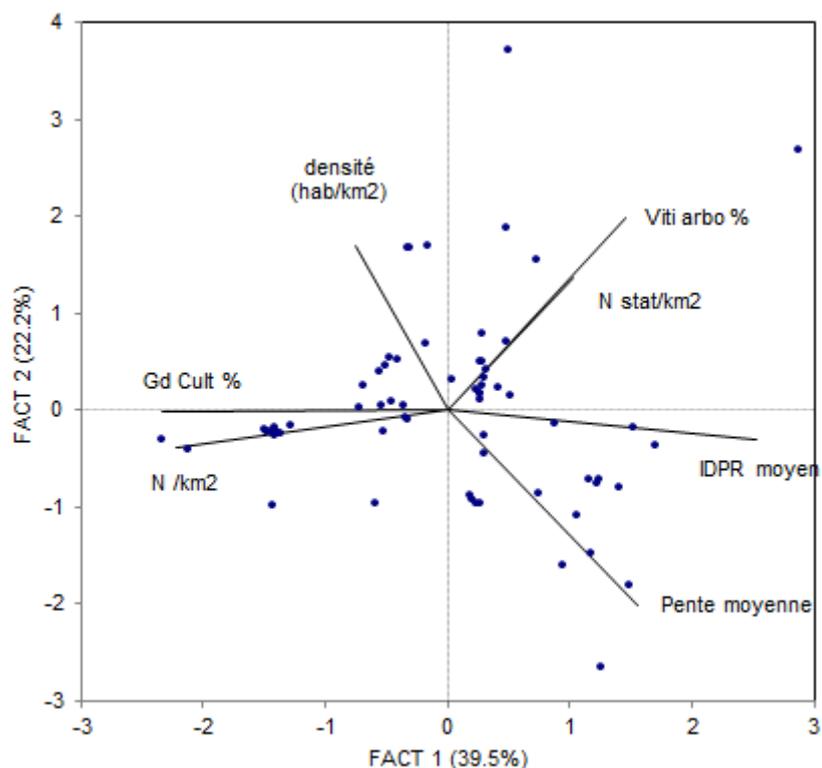


Figure 206 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données Azote inorganique des STEP et de la station de suivi

La Figure 207 présente l'ACP menée avec les caractéristiques des sous-bassins et les données de phosphore total (rejet des STEP et médiane des mesures de la station de suivi qualité).

Le même constat est fait que pour l'azote inorganique total : une corrélation avec la viti-arboriculture, moins avec l'IDPR, le phosphore rejeté par les STEP et les grandes cultures.

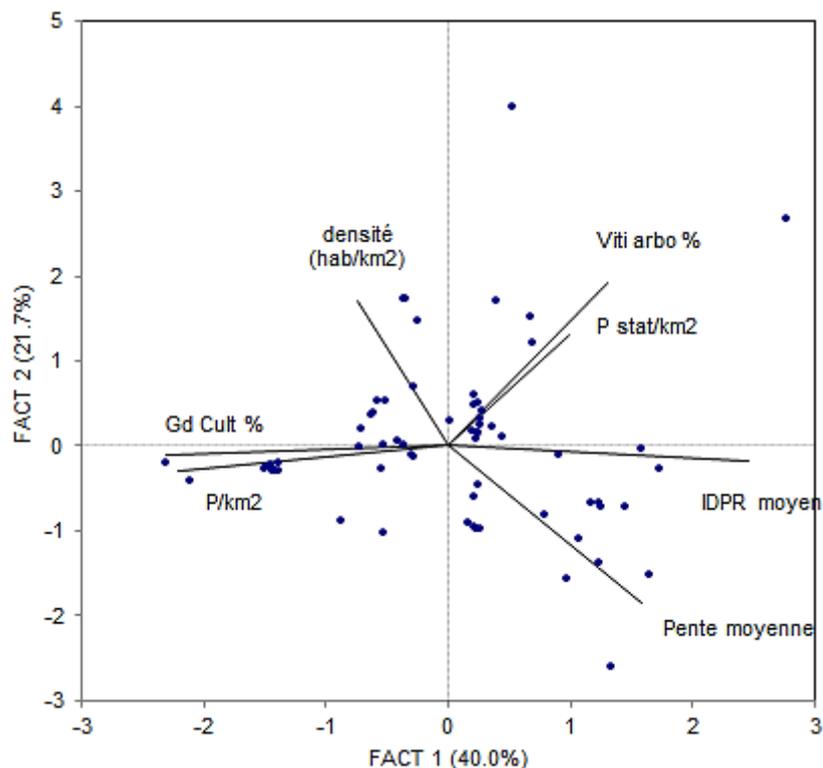


Figure 207 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données Phosphore total

L'analyse en composantes principales (ACP) a montré que les cinq variables explicatives utilisées sont distantes les unes des autres, donc assez indépendantes et non redondantes. Aucune variable n'est totalement suffisante pour expliquer les concentrations et aucune n'en paraît totalement indépendante. La pente, l'IDPR, le % de grande culture et celui de la viti-arboriculture sont les variables les plus représentatives, la densité de population l'étant moins. La prise en compte des concentrations rejetées par les STEP améliore peu les résultats.

7.6. Régressions linéaires multi-paramètres

Une analyse multivariée explicative a été par la suite mise en œuvre par le biais de régressions linéaires multiples ou multi-paramètres, en utilisant les mêmes variables explicatives. La régression linéaire multiple est une méthode de régression mathématique étendant la régression linéaire simple pour décrire les variations d'une variable endogène Y associée aux variations de plusieurs variables exogènes (X_1, X_2, \dots).

$$Y = a + b X_1 + c X_2 + \dots$$

Pour augmenter la précision des calculs et du fait de la présence de très fortes valeurs de concentrations, les calculs ont considéré les valeurs log des concentrations. Les concentrations suivent en effet classiquement des distributions de type log-normale, pour lesquelles les règles statistiques

recommandent de travailler sur les valeurs logs. Ceci permet par ailleurs d'éviter de générer des valeurs de concentrations négatives.

Pour cette analyse, les valeurs annuelles de précipitations efficaces ont été prises en compte.

Les très petits bassins versants (< 45 km²) ont été exclus de l'analyse.

Précisons que les concentrations moyennes observées (servant à l'établissement des régressions multiples) sont celles mesurées avant 2015 afin de ne pas biaiser les calculs avec les données des suivis renforcés et des échantillonnages de crues.

7.6.1. Etablissement des régressions linaires multi-paramètres

Les figures suivantes présentent les résultats obtenus.

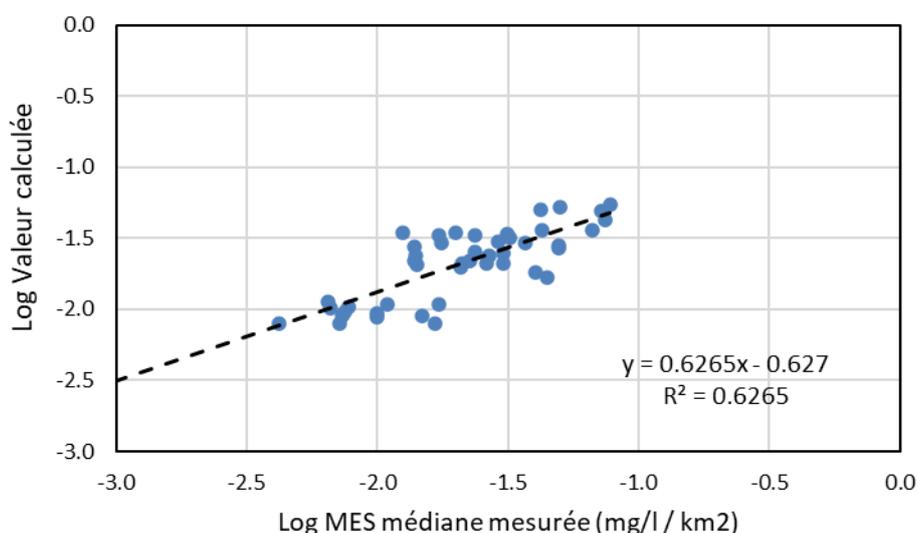


Figure 208 : Comparaison des log-concentrations de MES calculées avec les paramètres issus de la régression multiple et des log-médianes des concentrations mesurées aux stations de suivi qualité

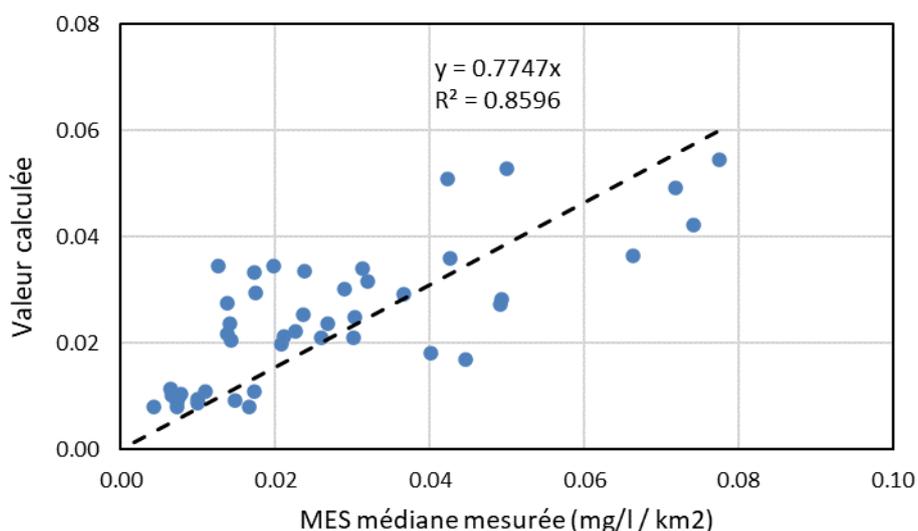


Figure 209 : Comparaison des concentrations de MES calculées avec les paramètres issus de la régression multiple et des médianes des concentrations mesurées aux stations de suivi qualité

De façon globale, les concentrations estimées sont inférieures aux concentrations observées. Les variables utilisées semblent permettre une estimation des MES, même si les informations disponibles ne semblent pas assez nombreuses pour fournir une relation très étroite.

Les coefficients de corrélation croisée de Pearson sont présentés ci-après. Les valeurs varient entre -1 à 1. Une valeur de -1 indique une corrélation linéaire négative parfaite (c.-à-d. qu'une variable augmente les autres diminutions de manière linéaire cohérente). Une valeur de +1 indique une corrélation linéaire positive parfaite (c.-à-d. qu'une variable augmente les autres de façon linéaire constante). Notons que ces valeurs sont extrêmement sensibles à la présence de valeurs aberrantes ou extrêmes.

- Précipitations efficaces : -0.588
- IDPR : -0.288
- Densité de population : 0.253
- Grande culture : 0.150
- Pente : -0.144
- Viticulture-arboriculture : -0.057
- MES rejeté des STEP : 0.018

Les concentrations de MES observées semblent plutôt corrélées (de façon directe ou inverse) aux précipitations efficaces, à l'IDPR et à la densité de population.

Pour l'azote, les concentrations d'azote inorganique calculées sont également inférieures aux médianes des valeurs observées.

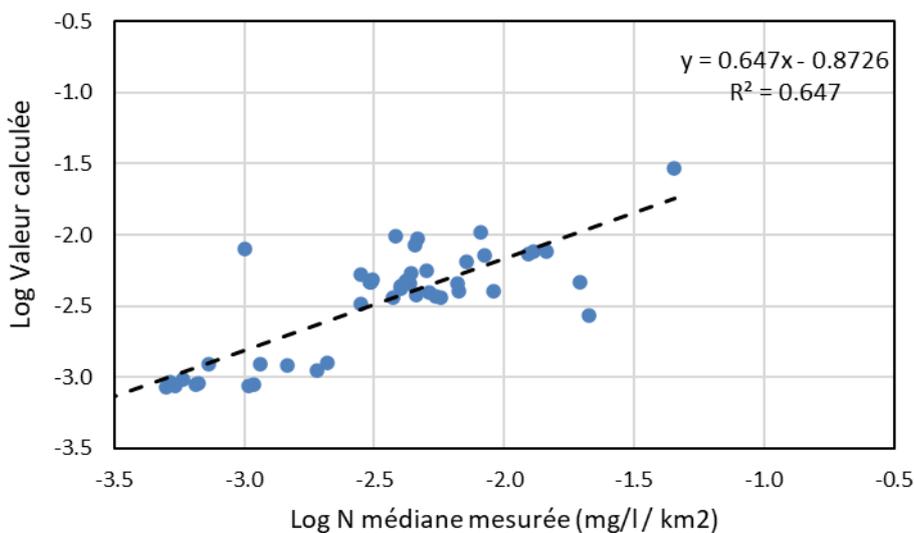


Figure 210 : Comparaison des log-concentrations calculées d'azote et des log-médianes des concentrations mesurées

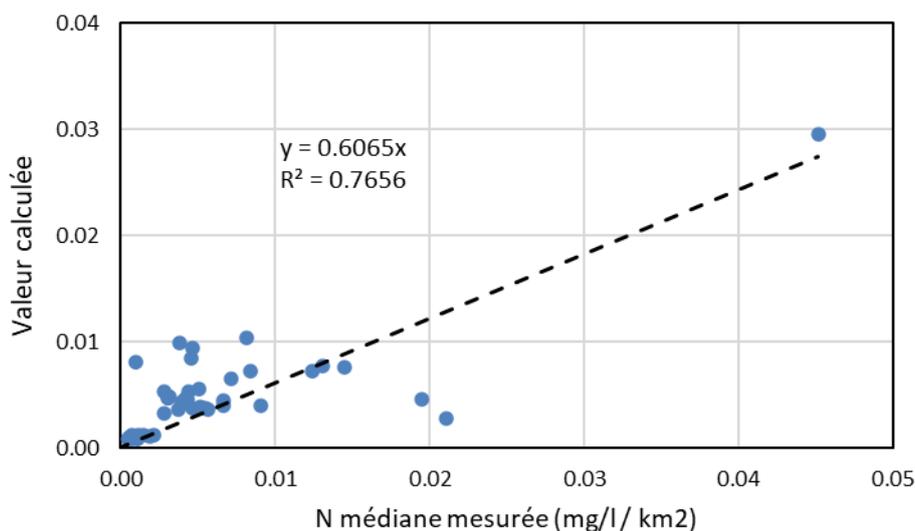


Figure 211 : Comparaison des concentrations calculées d'azote et des médianes des concentrations mesurées

Les coefficients de corrélation croisée sont les suivants :

- Précipitations efficaces : -0.663
- IDPR : -0.340
- Grande culture : 0.258
- Densité de population : 0.192
- Pente : -0.191
- Azote rejeté des STEP : -0.118
- Viticulture-arboriculture : -0.112

Les meilleurs coefficients de corrélation sont avec les précipitations efficaces, l'IDPR et le pourcentage de grande culture.

Pour le phosphore, les concentrations de phosphore total calculées sont ici encore globalement inférieures aux médianes des valeurs observées.

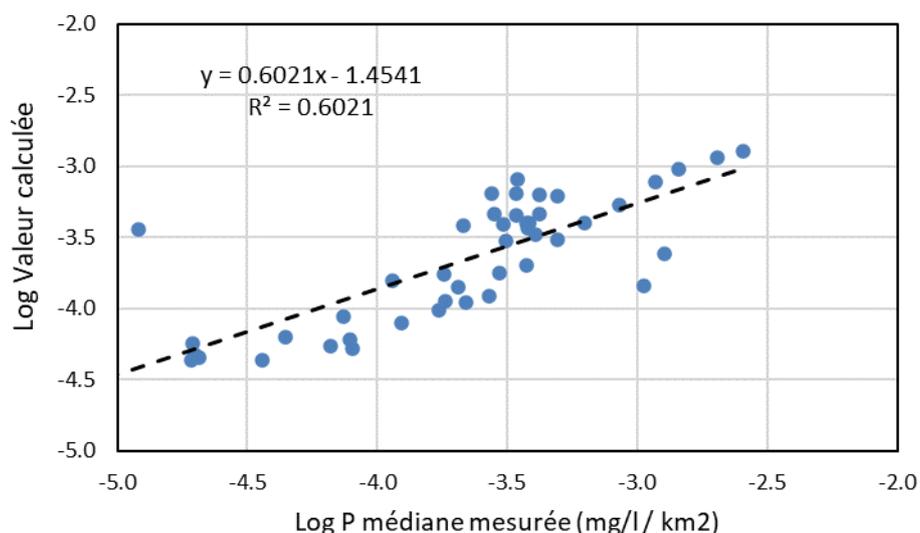


Figure 212 : Comparaison des log-concentrations calculées de phosphore et des log-médianes des concentrations mesurées

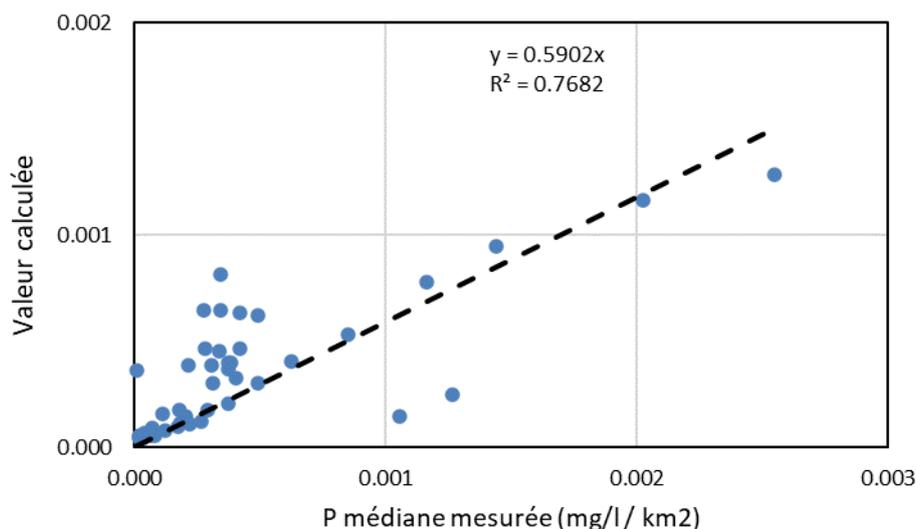


Figure 213 : Comparaison des concentrations calculées de phosphore et des médianes des concentrations mesurées (régression multiple avec toutes les variables explicatives)

Les coefficients de corrélation croisée sont les suivants :

- Précipitations efficaces : -0.697
- Grande culture : 0.412
- IDPR : -0.383
- Viticulture-arboriculture : -0.215
- Phosphore rejeté des STEP : 0.160
- Densité de population : 0.099
- Pente : -0.028

Les meilleurs coefficients de corrélation sont avec les précipitations efficaces, le pourcentage de grande culture, l'IDPR et le pourcentage de viti-arboriculture.

Les variables 'explicatives' utilisées semblent permettre une estimation (même si imparfaite) des paramètres MES, Azote inorganique total et Phosphore total sur des BV non renseignés. Les variables les plus 'explicatives' semblent être les précipitations efficaces, et par ailleurs les pourcentages de cultures et la densité de population. Notons que les rejets des STEP et la pente montrent peu de corrélation avec les paramètres observés.

7.6.2. Calcul d'estimation des concentrations probables

Cette section présente le calcul qui peut être mené à partir des caractéristiques d'un bassin versant pour estimer les concentrations probables de nutriments qui pourraient en être issues.

Les caractéristiques du bassin versant utilisées sont les suivantes :

- Pente moyenne (en %, d'après le MNT de l'IGN)
- IDPR moyen (d'après la couche d'information du BRGM)
- Précipitations efficaces – prélèvements ($M.m^3/an / km^2$; données météo + données de prélèvements de la BNPE)
- % de grandes cultures (en % d'après la couche Corine Land Cover)
- % de viticulture + arboriculture (en % d'après la couche Corine Land Cover)
- Densité de population (hab. / km^2 d'après les données INSEE)

- MES rejeté par les STEP (kg/an / km²)
- Azote total NGL rejeté par les STEP (kg/an / km²)
- Phosphore rejeté par les STEP (kg/an / km²)

Caractéristiques	Facteurs des équations de calcul		
	MES	Azote total	Phosphore total
Pente moyenne	0.050215193	-0.011462602	0.110753066
IDPR moyen	-0.002250986	-0.000644648	-0.004009656
Pe _{eff} – prélèv.	-2.931605522	-4.330478376	-4.034779694
Densité population	6.60068E-05	-9.52457E-05	-5.92148E-06
Grandes cultures	-0.042765693	-0.028009476	-0.037884969
Viti-arboriculture	0.024387946	-0.004689545	0.033752731
Log (MES + 0.001)	-0.086504574		
Log (N + 0.001)		-0.541815848	
Log (P + 0.001)			-0.18340738
Constante	1.478228229	-0.46585148	0.873743735

Tableau 22 : Facteurs des équations de calcul des flux de nutriments à partir des caractéristiques des bassins versants

Les flux rejetés par les STEP sont convertis en log (une petite valeur de 0.001 est rajoutée pour éviter les valeurs nulles).

La chaîne de calcul suivante est réalisée pour chaque paramètre (MES, N total et P total) :

- Calcul 1 = Somme des produits [valeur de chaque caractéristique x facteur] + constante
- Calcul 2 = 10 ^ Calcul 1 (= anti log de Calcul 1) → concentration relative (mg/l / km²)
- Calcul 3 = Calcul 2 x surface du BV (km²) → concentration (mg/l)
- Calcul 4 = Calcul 3 x [Pe_{eff} – prélèv.] → flux relatif (tonne/an / km²)
- Flux issu du BV (tonne/an) = Calcul 4 x surface du BV

7.6.3. Vérification sur les six tributaires étudiés

Les régressions statistiques multiples réalisées ont montré qu'il est possible d'obtenir une estimation plus ou moins satisfaisante des concentrations de MES, N et P à l'aide des variables explicatives utilisées (caractéristiques des bassins versants auxquelles ont été rajoutées les précipitations efficaces).

Les résultats obtenus ont été appliqués à l'estimation des flux annuels de nutriments pour les six tributaires étudiés.

Dans un premier temps, les résultats des flux annuels calculés par la méthode des intervalles de débits ont été comparés à une estimation basée sur le produit de la concentration moyenne des observations et du cumul des précipitations efficaces (réduites des prélèvements exercés sur le BV).

La Figure 214 présente les résultats obtenus. On constate une comparaison très favorable entre la méthode précise des intervalles de débits et la méthode du simple produit des données moyennes.

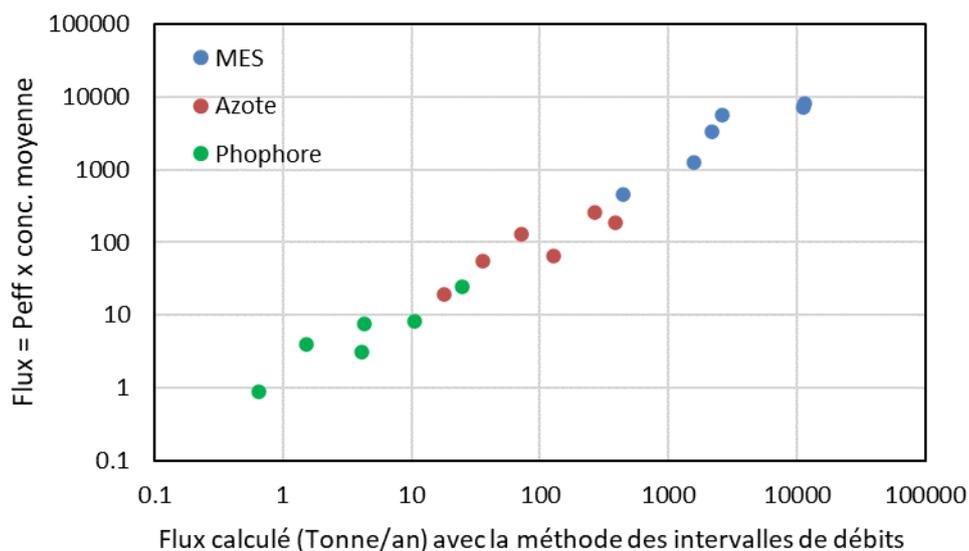


Figure 214 : Flux annuels de nutriment calculés par la méthode des intervalles de débits et par le produit simple des concentrations moyennes et des précipitations efficaces

La Figure 215 présente la Corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 214 précédente.

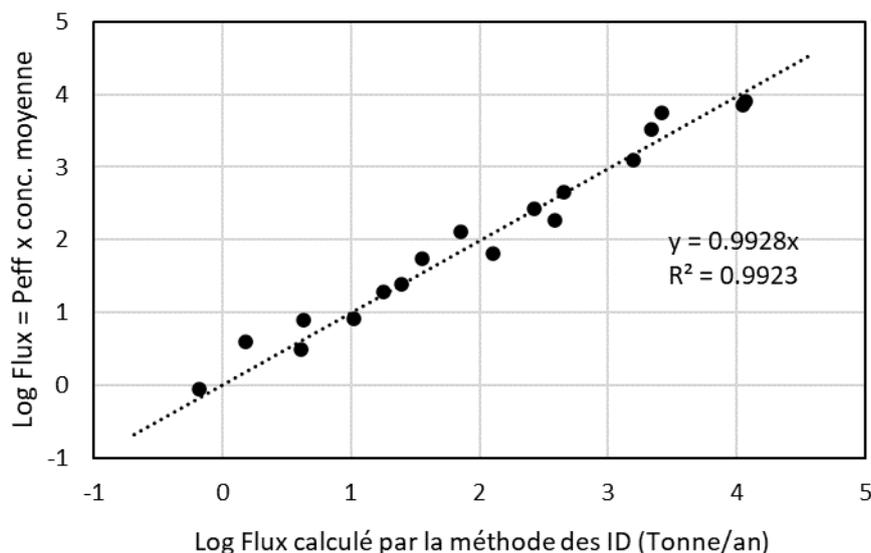


Figure 215 : Corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 214

La comparaison a ensuite porté sur l'estimation des concentrations moyennes de nutriments à partir des caractéristiques des bassins versants et des résultats des régressions multiples. La Figure 216 compare les concentrations ainsi simulées à l'aide des régressions multiples avec les concentrations moyennes observées. On observe une corrélation assez bonne entre ces deux types de concentrations.

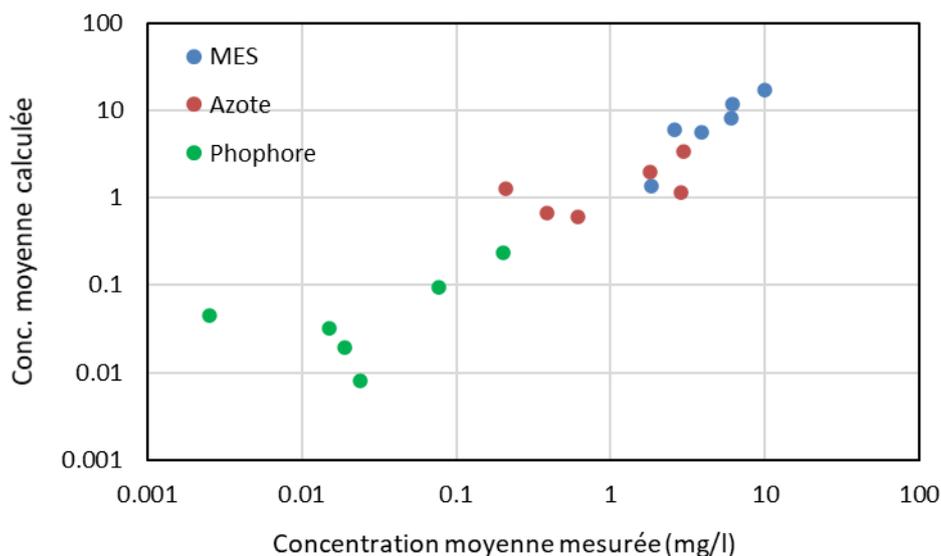


Figure 216 : Comparaison des concentrations simulées à l'aide des régressions multiples et des concentrations moyennes observées

La Figure 217 présente la Corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 216 précédente.

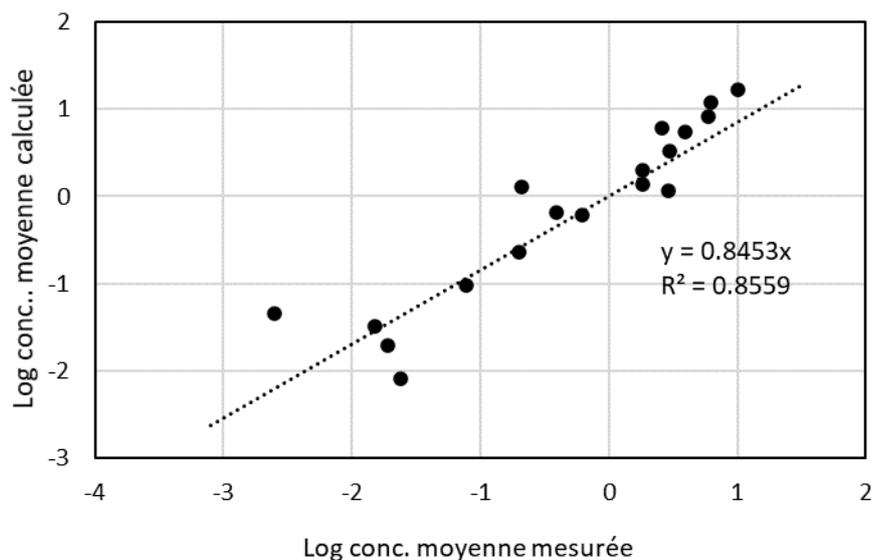


Figure 217 : Corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 216

Finalement, la Figure 218 compare les flux annuels de nutriment calculés par la méthode des intervalles de débits et à partir des précipitations efficaces et des concentrations simulées à l'aide des régressions multiples. On constate ici encore une bonne concordance avec les ordres de grandeur des flux annuels de nutriment.

La Figure 219 présente la corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 218.

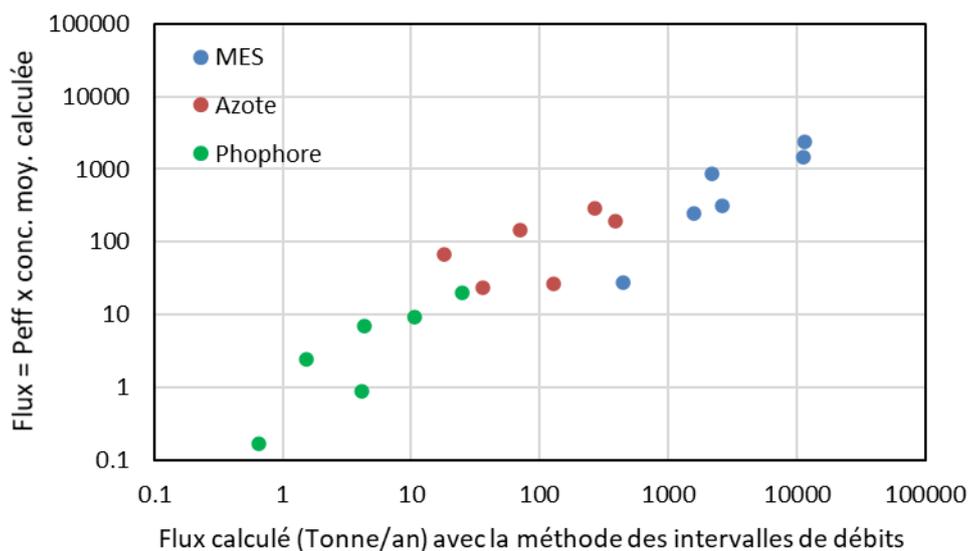


Figure 218 : Flux annuels de nutriment calculés par la méthode des intervalles de débits et à partir des précipitations efficaces et des concentrations simulées à l'aide des régressions multiples

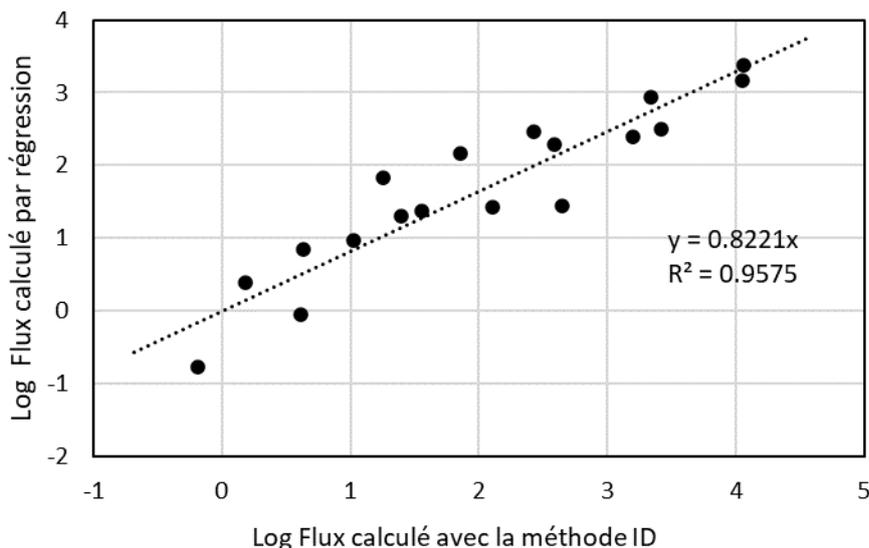


Figure 219 : Corrélation effectuée sur les valeurs logs de la Figure 218

Les flux calculés avec la méthode d'estimation sont légèrement plus faibles que ceux obtenus par la méthode des intervalles de débits. Rappelons que les concentrations moyennes observées (servant à l'établissement des régressions multiples) ont été celles mesurées avant 2015 afin de ne pas biaiser les calculs avec les données des suivis renforcés et des échantillonnages de crues. Ces moyennes sont donc a priori plus faibles que celles obtenues depuis 2015, du fait de la prise en compte des crues. Il est donc normal que les flux estimés soient plus faibles que ceux calculés avec la méthode des intervalles de débit.

L'utilisation des précipitations efficaces et des concentrations estimées à l'aide des caractéristiques des bassins versant semble donc permettre d'estimer de façon réaliste l'ordre de grandeur des flux annuels de nutriments. Rappelons qu'il s'agit dans les deux cas (estimation des flux hydriques et estimation des concentrations moyennes probables) de paramètres existants, disponibles et facilement accessibles.

7.6.4. Application aux principales lagunes méditerranéennes

Une application illustrative des résultats présentés ci-avant a été réalisée sur les principales lagunes de la bordure méditerranéenne (Figure 220) dont les caractéristiques sont présentées aux tableaux suivants.

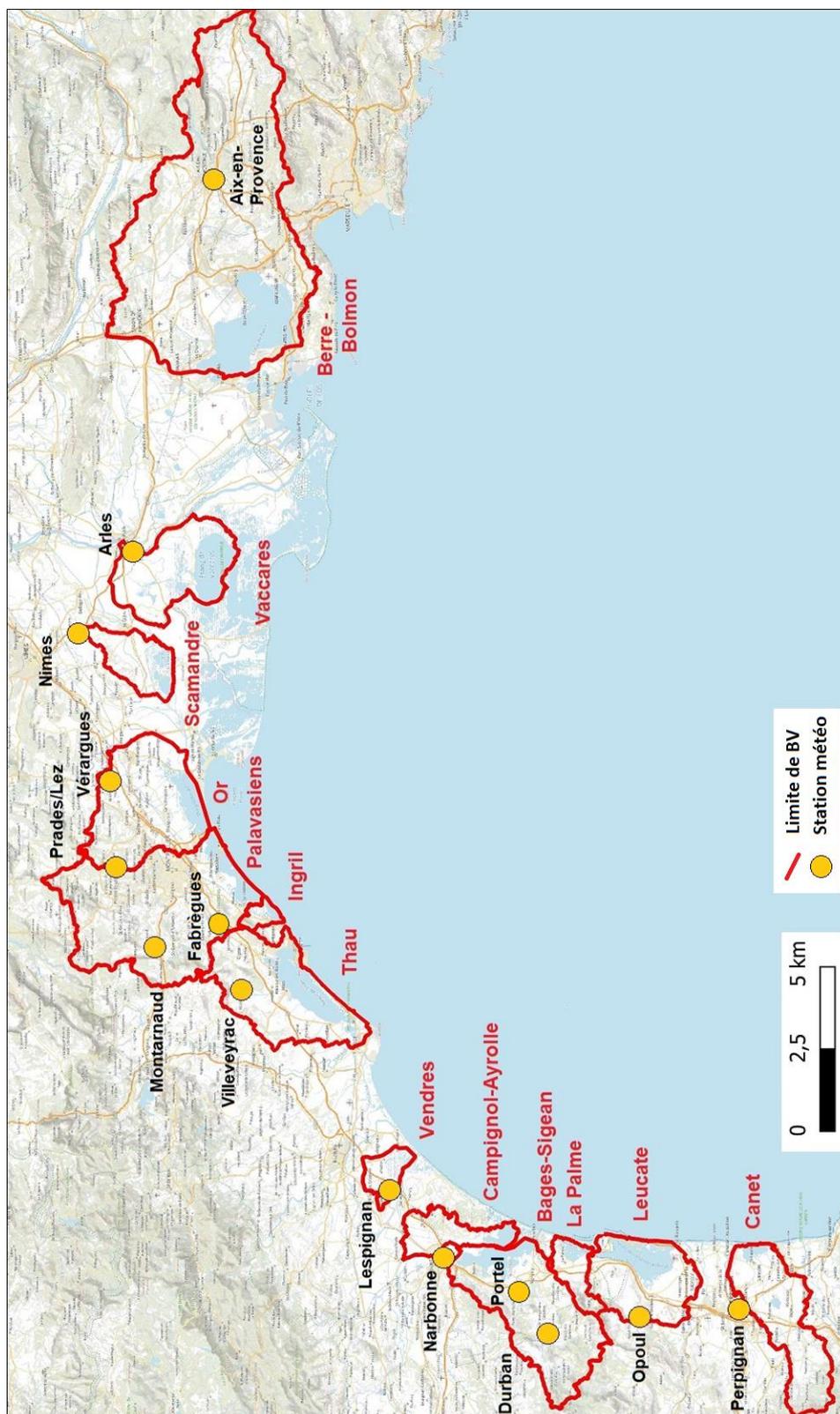


Figure 220 : Principales lagunes méditerranéennes et stations météorologiques associées

Cette application considère que tous ces bassins versants de lagune fonctionnent comme des bassins versants de tributaires, en particulier comme ceux étudiés.

Lagune	Surface lagune (km ²)	Surface BV (km ²)	Pluies efficaces (mm/an)	Prélèvements (Mm ³ /an)	IDPR moyen	Pente moyenne (%)
Canet	8.8	269	0.135	0.042	1389	9.4
Leucate	50.8	206	0.176	0.032	1106	7.1
La Palme	5.8	65	0.176	0.000	1464	14.3
Bages - Sigean	33.4	381	0.255	0.012	1550	19.2
Campagnol - Ayrolle	14.9	93	0.144	0.086	1362	6.6
Vendres	68.6	301	0.164	0.020	1216	6.1
Thau	6.4	21	0.164	0.000	1228	7.2
Ingril	34.0	618	0.280	0.067	1211	9.9
Etangs Palavasiens	33.4	353	0.277	0.021	1141	3.3
Or - Mauguio	12.4	112	0.140	0.012	1162	3.1
Scamandre	63.4	219	0.163	0.027	1621	0.7
Vaccarès	131.8	1390	0.162	0.066	1029	11.2
Berre - Bolmon	8.8	269	0.135	0.042	1389	9.4

Tableau 23 : Caractéristiques des principales lagunes du Golfe du Lion

Lagune	Densité de population (hab/km ²)	% grandes cultures	% viti-arboriculture	MES rejet STEP (kg/an)	N rejet STEP (kg/an)	P rejet STEP (kg/an)
Canet	194.7	14.0	47.0	102.5	13.5	85.3
Leucate	139.8	12.8	31.5	79.6	29.1	177.8
La Palme	27.5	7.3	18.3	4.4	0.7	1.1
Bages - Sigean	31.9	7.1	26.6	21.7	3.5	21.5
Campagnol - Ayrolle	44.9	15.5	35.2	5.2	0.9	9.7
Vendres	339.8	10.1	42.7	552.2	65.9	518.2
Thau	0.0	8.8	18.6			
Ingril	738.6	13.3	13.5	103.1	12.7	90.2
Etangs Palavasiens	392.7	28.3	24.8	79.4	9.8	74.0
Or - Mauguio	0.0	9.1	52.3	1.6	1.5	0.4
Scamandre	0.0	7.9	1.6	0.6	0.1	0.5
Vaccarès	388.3	15.7	8.6	102.5	13.5	85.3
Berre - Bolmon	194.7	14.0	47.0	79.6	29.1	177.8

Tableau 24 : Caractéristiques des principales lagunes du Golfe du Lion (Suite)

Le Tableau 25 présente les concentrations moyennes et les flux annuels moyens estimés au moyen des régressions multiples. Il ne s'agit pas de flux mesurés, ni de flux calculés à l'aide des méthodes de calcul par les moyennes pondérées, les intervalles de débits ou les dernières concentrations. Il s'agit d'une application des coefficients de régression obtenus à la section 7.6 précédente. Précisons par ailleurs que ces bassins versant de lagune peuvent présenter des apports 'artificiels' par des canaux amenant des eaux 'extérieures' au bassin versant de lagune. Ceci illustre la difficulté qui en découle de définir précisément les BV de certaines lagunes.

Lagune	MES (mg/l)	Flux MES (tonne/an)	N (mg/l)	Flux N (tonne/an)	P (mg/l)	Flux P (tonne/an)
Canet	37.5	939	1.57	39	0.485	12.2
Salses-Leucate	31.9	946	0.88	26	0.493	14.6
La Palme	2.7	31	1.33	15	0.024	0.3
Bages - Sigean	19.0	1 753	1.55	144	0.240	22.2
Campagnol - Ayrolle	7.0	38	1.66	9	0.068	0.4
Vendres	0.6	4	0.06	0	0.005	0.0
Thau	51.4	2 227	0.78	34	0.558	24.2
Ingril	1.8	6	3.60	12	0.018	0.1
Etangs Palavasiens	19.9	2 609	2.86	375	0.204	26.7
Or - Mauguio	2.3	203	0.42	38	0.017	1.5
Scamandre	54.7	786	10.17	146	0.715	10.3
Vaccarès	0.5	16	21.63	642	0.000	0.0
Berre - Bolmon	83.50	11 178	13.55	1 814	1.680	225.0

Tableau 25 : Concentrations moyennes et flux annuels moyens estimés au moyen des régressions multiples

Le Tableau 26 compare les flux annuels moyens de nutriment estimés au moyen des régressions multiples aux données de bilan fournies par les études antérieures.

Lagune	Flux N (tonne/an)	Bilan N (tonne/an)	Flux P (tonne/an)	Bilan P (tonne/an)
Bages - Sigean	144	80 - 350	22.2	2 - 20
Thau	34	30 - 120	24.2	7.3 – 39.5
Or - Mauguio	38	97 - 112	1.5	3.8 – 4.05
Berre - Bolmon	1 814	1 859	225.0	79.9

Tableau 26 : Comparaison des flux annuels moyens estimés au moyen des régressions multiples avec les bilans réalisés par les études antérieures

Les données de bilans cités dans ce tableau proviennent des rapports suivants :

- Fiandrino A., Giraud A., Saguet C. et R. Pete. 2019. L’Outil GAMELag : synthèse des caractéristiques techniques et utilisation de l’outil. IFREMER. Rapport final du contrat n° 2018 0158 000– Axe 4. Novembre 2019. Une application sur **Bages-Sigean** est présentée. Les données présentées sont celles de 2002 à 2015. Les auteurs notent que depuis 2002, les apports annuels en azote sont passés d’environ 200 tonnes en 2002 à moins de 80 tonnes en 2015. De même, les apports de phosphore, qui étaient d’environ 20 tonnes en 2002, ont été considérablement réduits pour atteindre environ 2 tonnes en 2015.
- Bec B., Dérolez V., Cesmat L., Pete R. et M. Richard. 2018. Projet CAPATHAU : CAPAcité trophique de la lagune de THAU. Livrable 1. Evolution temporelle de l’état écologique de la **lagune de Thau** et des performances des coquillages en élevage au regard de la réduction des apports issus du bassin versant et des changements climatiques. Université de Montpellier – IFREMER. Mai 2018. Les données présentées sont celles de 2009 à 2016. Les flux de nutriments prennent en compte les apports trophiques naturels et ceux des STEP. Les auteurs notent la baisse des apports par les STEP passant de 89,6 tonnes d’azote en 2009 à 23,9 tonnes en 2016, et respectives 38,7 tonnes à 6,7 tonnes pour le phosphore.

- SYMBO. 2019. Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'**Etang de l'Or**. Bilan imports/exports et hiérarchisation des sources de matière. Rapport d'étude final. Apport des BV Nord autres que le Salaison d'après l'Etude SupAgro, 2017 (données 2015-2016).
- HYDRIAD. 2021. Etude du devenir des nutriments dans l'**Etang de l'Or**. Identification des sources d'apports en nutriments. Campagnes de mesures de qualité de l'eau, de débits, analyse et interprétation. Focus sur le Bassin Versant Est. Données 2019-2020.
- GIPREB – Syndicat mixte de l'**Etang de Berre**. Bilan des apports à l'Etang de Berre. Février 2021. Les données présentées sont celles de 2015 à 2019. Les apports naturels d'eau à l'étang varient entre 173 et 451 M.m³/an alors que les apports EDF varient de 534 à 1200 M.m³/an. Précisons que les flux calculés dans notre étude à partir des régressions ne prennent pas en compte les flux EDF. Par ailleurs, l'effet des crues ne semble pas réellement pris en compte dans le bilan du GIPREB.

La Figure 223 compare les flux calculés par l'approche développée dans ce Chapitre avec les flux estimés dans les rapports antérieurs indiqués ci-avant. Les barres verticales reflètent les fourchettes de valeurs mentionnées au Tableau 26, résultant de différentes hypothèses ou années prises en compte. De façon globale, les points sont assez bien alignés de part et d'autres de la droite de pente 1:1 qui représente un ajustement parfait entre les deux types d'estimation. Les ordres de grandeur sont donc semblables, en particulier pour l'azote total, mais également pour le phosphore, même si ce dernier semble montrer une variabilité plus marquée.

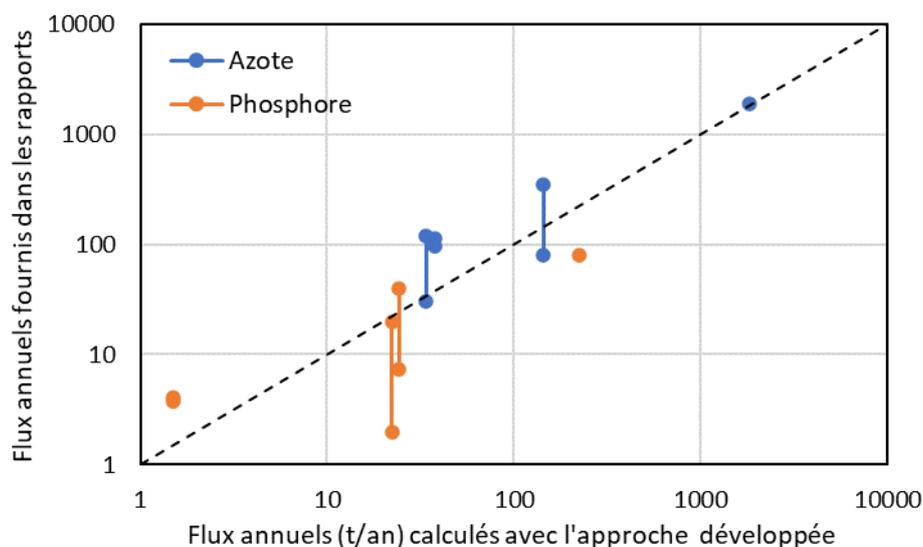


Figure 221 : Comparaison graphique des flux calculés par l'approche développée avec ceux indiqués dans les rapports antérieurs

8. Transposition des connaissances et des acquis

Les chapitres précédents ont permis de faire le point sur la dynamique des apports de nutriments aux lagunes des six tributaires étudiés dans le cadre du suivi renforcé (bimensuel + crues) de l'Agence de l'Eau et d'élargir la réflexion avec le cas de la lagune de l'étang de l'Or qui a bénéficié quant à elle de plusieurs études d'importance.

8.1. Principaux constats et préconisations

Il ressort de cette analyse des connaissances plusieurs constats permettant d'aborder la transposition possible des résultats acquis dans le cadre de ces différentes études :

- La connaissance des concentrations de nutriments durant les périodes de crues est très importante car les flux apportés durant ces événements peuvent représenter une part importante des flux, en particulier pour les MES, l'azote Kjeldahl (comportant l'azote organique) et le phosphore particulaire (différence entre le phosphore total et l'orthophosphate) ; **la connaissance des concentrations durant les crues est donc importante, si ce n'est cruciale pour l'évaluation des flux de nutriments apportés aux lagunes ;**
- Les concentrations observées durant un événement de crue ne montrent pas d'évolution synchrone systématique avec celle du débit ; les concentrations les plus fortes peuvent être observées en montée de crue, lors du pic ou après celui-ci ; à moins de consentir un effort important à la caractérisation de la relation concentration – débit durant chaque événement de crue, il n'est pas possible de préconiser le moment d'échantillonnage optimal de la crue ; **pour des raisons de programmation de l'échantillonnage et de sécurité de l'équipe de prélèvement, la réalisation de l'échantillonnage après la survenance du pic de crue paraîtrait pertinente ;**
- Les méthodes de calcul des flux de nutriments basées sur **la moyenne pondérée et la dernière concentration nécessitent de connaître de façon régulière / continue les concentrations de crues** (caractérisation de tous les événements) puisque la non prise en compte des concentrations d'une crue quelconque sous-estime le bilan réalisé ; en particulier, la méthode des moyennes pondérées nécessite que les différentes conditions soient échantillonnées au prorata de leur survenance (en fonction de leur fréquence) ; dans la plupart des cas, un sous-échantillonnage des crues entraîne avec cette méthode une sous-évaluation des flux, et inversement avec un sur-échantillonnage des crues ; les deux autres méthodes sont moins sujettes à ce problème ;
- La méthode des intervalles de débit utilise une relation concentration – débit établie sur la base des connaissances acquises pour tous les régimes d'écoulement (étiage, moyennes eaux, hautes eaux, crues) ; **la relation concentration – débit ne requiert pas l'échantillonnage de toutes les crues, mais d'un nombre suffisant de crues représentatives ;**
- Tant que les caractéristiques du bassin versant (occupation des sols, type d'agriculture, urbanisation, rejet des STEP, etc.) ne sont pas modifiées de façon significative, la relation concentration – débit établie demeure valable ; ceci fait de la méthode des intervalles de débits une méthode (relativement) pérenne dans le temps, plus représentative et fiable que les deux autres méthodes ;
- La relation concentration / débit utilisé pour la méthode des intervalles de débit est pérenne tant et aussi longtemps que le bassin versant ne subit pas de modifications majeures

susceptibles d'altérer cette relation. En cas de doute sur de tels changements, un suivi sporadique peut être mené permettant de vérifier et d'actualiser la relation établie. Quand une modification importante intervient ou est suspectée sur un bassin versant, un échantillonnage statistiquement représentatif des différents régimes d'écoulement (dont les crues) permet de vérifier et si besoin de recalibrer la relation concentration – débit. Notons que la méthode des intervalles de débits requiert l'existence d'une station hydrométrique de mesure de débits ;

- Si le principal tributaire d'une lagune dispose d'une **station hydrométrique de mesure** des débits, la méthode des intervalles de débits est préférée, a minima pour le calcul des flux des éléments particuliers. Pour les éléments dissous (nitrates et ortho-phosphates en particulier), la méthode des moyennes pondérées peut être utilisée. Si le tributaire ne dispose pas d'une station hydrométrique la méthode des intervalles de débit ne peut être utilisée. La méthode des moyennes pondérées peut être utilisée mais requiert idéalement l'utilisation d'un facteur correctif pour le calcul des flux des éléments particuliers. En dernier recours, un simple calcul peut être fait en considérant la concentration moyenne et le volume annuel d'écoulement, tous deux estimés à partir des informations disponibles ;
- Les études spécifiques réalisées sur quelques lagunes avec une période de suivi courte (sur une ou deux années hydrologiques) ont montré qu'il est possible de caractériser le fonctionnement du système « lagune + bassin versant + masses d'eau voisines » avec un minimum d'instrumentation. Ceci requiert cependant un suivi **sur au moins un cycle hydrologique** pour balayer les différentes conditions susceptibles de se présenter. Une période d'étude **un peu plus longue, incluant deux automnes, semble recommandée** afin d'augmenter les chances d'observer un épisode méditerranéen automnal.
- Précisons que l'évaluation des flux apportés à une lagune ne doit pas uniquement tenir compte du principal tributaire, mais de l'intégralité du bassin versant de la lagune, incluant les petits affluents et les drains des zones humides environnantes ;
- Plusieurs lagunes sont en connexion avec des réseaux de **canaux de drainage, d'irrigation ou de navigation** qui complexifient la dynamique des écoulements et les échanges entre des masses d'eau voisines. Les canaux de drainage ne font que modifier la dynamique interne de fonctionnement du bassin versant de la lagune. Ils sont souvent l'héritage d'une pratique historique d'assainissement des zones humides. Les canaux d'irrigation sont responsables d'un apport d'eau extérieure dont la quantité et la qualité sont souvent difficiles à caractériser, car elles relèvent de pratiques et de décisions anthropiques. Les canaux de navigation mettent en œuvre des échanges complexes, fortement contraints par la marée, et par les conditions de pluie et de vent. Elles peuvent mettre en commun les eaux de la lagune, des fleuves limitrophes et de la mer, avec un fonctionnement complexe en 'yoyo' des entrées et sorties ;
- Pour les lagunes présentant des échanges avec les masses d'eau voisines fonctionnant en 'yoyo', un suivi des échanges en termes de directions et d'importance est recommandé. Une telle caractérisation peut être cependant être lourde et coûteuse à mettre en œuvre sur un cycle hydrologique complet, a fortiori lorsque plusieurs points d'échange existent. Ce suivi pourrait être réalisé à différentes périodes clés du cycle hydrologique puis extrapolé à l'échelle de l'année.
- Indépendamment de la dynamique des crues discutées précédemment, il est donc nécessaire pour des **lagunes contraintes par de tels échanges avec des canaux de caractériser les différentes situations d'entrées et de sorties** : temps calme, vent fort de beau temps (mistral, tramontane), vent de mer lié aux épisodes méditerranéens, très hautes

marées et fortes houles également reliées à ces épisodes méditerranéens, période d'irrigation, vidange des rizières, lâchers d'eau pour le contrôle des inondations, etc.

- Les résultats obtenus sur l'étang de l'Or (David, 2019) ont montré que **les apports par les eaux souterraines sont négligeables devant les autres apports** et que ce constant paraît transposables aux autres lagunes du littoral sud (Golfe du Lion), sauf dans le cas des lagunes présentant des apports karstiques, généralement importants et localisés ;
- La transposition des connaissances acquises (sur le tributaire principal d'une lagune) aux autres tributaires ne semble pas directement possible, que ce soit en termes de débit et de concentrations, car ces grandeurs dépendent des caractéristiques de leurs bassins versants respectifs ; la transposition selon l'étude menée sur l'étang de l'Or nécessiterait la mesure de débits et la mise en œuvre de modèles pluie-débit ; pour la pluie, les informations radar Météo-France pourraient être utilisées avec un algorithme de calcul spécialisé ;
- La présente étude (section 2.2) a montré que **le cumul des précipitations efficaces (auquel doit être soustrait les prélèvements exercés sur les ressources) permet de fournir une estimation valable des volumes d'écoulement** à l'exutoire du bassin versant ;
- Les analyses statistiques réalisées ont montré que **certaines caractéristiques des bassins versant semblent pouvoir jouer le rôle de variables explicatives des concentrations** de nutriments observées ;
- Tous ces constats montrent qu'il est nécessaire de bien **anticiper le fonctionnement d'une lagune avant d'en planifier la caractérisation et les campagnes d'échantillonnage**. Toutes les contributions et tous les échanges sont importants et ne peuvent être écartés. S'ils sont négligés, cela doit relever d'une décision réfléchie et non d'un oubli par méconnaissance. Il est malheureusement impossible ou difficilement concevable de mettre en place de façon pérenne un réseau de suivi de tous les affluents, canaux et passes échangeant avec une lagune. Il est donc nécessaire d'approcher les apports de façon exhaustive sur une période de temps raisonnable (un cycle hydrologique par exemple) avant de mettre en place un suivi plus long sur les principaux contributeurs.
- Rappelons en conclusion que l'attente envers ces études est de caractériser les principaux apports à la lagune, tant en termes d'eau que de nutriments, de les quantifier pour les différentes conditions de fonctionnement du système lagunaire (saisons, conditions de vent, intensités de pluies, conditions de marées, etc.) et de les hiérarchiser. Les études ne peuvent être exhaustives, mais elles se doivent d'être les plus représentatives possible du fonctionnement du système pour pouvoir estimer des flux de nutriments réalistes.

8.2. Cheminement méthodologique proposée pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes

Un cheminement méthodologique est proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes. Ce cheminement est illustré sous la forme d'un arbre de décision (Figure 222). Les différentes étapes sont expliquées et détaillées à sa suite.

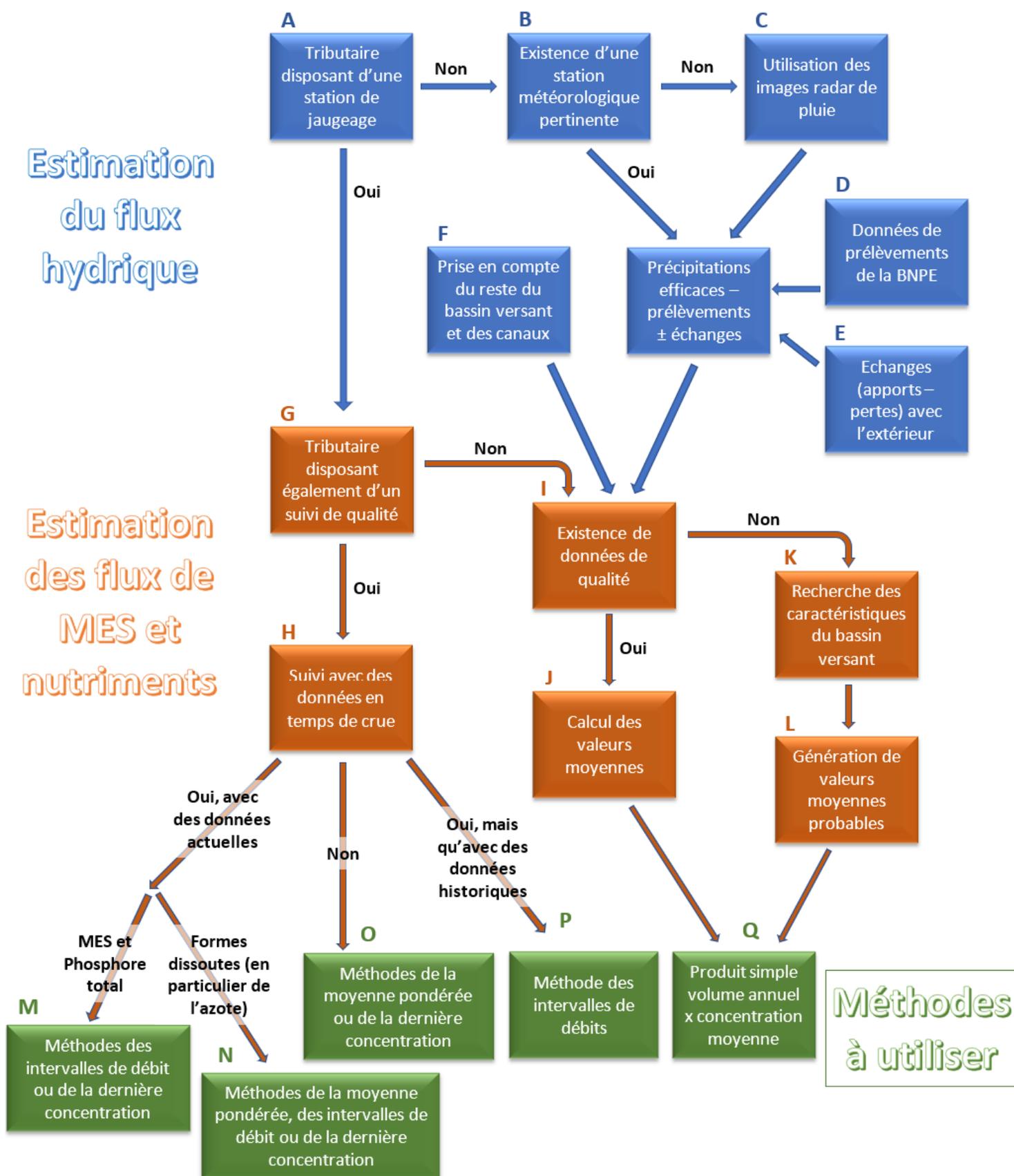


Figure 222 : Cheminement méthodologique proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes (une version A3 de cette figure est fournie à l'Annexe 4)

Ce canevas méthodologique illustre les principaux éléments de la démarche. Il ne peut être exhaustif et détailler tous les aspects de la méthodologie. Il peut cependant être utilisé pour évaluer et planifier les grandes phases de l'étude requise pour l'acquisition des connaissances nécessaires à l'estimation des flux. Le lecteur pourra se référer aux différentes sections du présent rapport pour disposer de tout le détail méthodologique de chacune des étapes. Les principales étapes sont décrites et commentées ci-dessous (les lettres réfèrent aux encadrés du logigramme).

A : La lagune est alimentée par un tributaire principal dont le bassin versant représente la majeure partie du bassin versant de la lagune. Ce tributaire est donc responsable de la majeure partie des apports de nutriments à la lagune. Ce tributaire peut ou non disposer d'une station hydrométrique de mesure du débit à son exutoire. Si cela est le cas, différentes méthodes reposant sur la connaissance des débits pourront être utilisées. S'il n'existe pas de station hydrométrique permettant la connaissance du flux hydrique parvenant à la lagune, une autre approche doit être mise en place.

B : Si le tributaire ne dispose pas d'une station hydrométrique, le flux hydrique peut être évalué, entre autres, à l'aide des connaissances météorologiques disponibles (données de pluie et d'évapotranspiration potentielle) et des prélèvements s'exerçant sur le bassin versant (*pour en savoir plus, voir section 2.2 ci-avant*). Ces données météorologiques permettent de calculer les précipitations efficaces à l'aide d'outils tel le logiciel ESPERE du BRGM.

C : S'il n'existe pas de station météorologique pertinente, les données des images radar de pluie peuvent être utilisées pour évaluer la pluie tombée. Ces données radar sont assez facilement disponibles, mais leur traitement est complexe et requiert des routines de calcul qui ne sont pas encore disponibles pour les acteurs de terrain (*pour en savoir plus, voir section 6.1.1 ci-avant*).

D : Les prélèvements exercés sur le bassin versant doivent également être pris en compte dans l'estimation des flux hydriques (*pour en savoir plus, voir section 2.2 ci-avant*). Les données annuelles des prélèvements déclarés sont disponibles dans la base de données BNPE : www.bnpe.eaufrance.fr.

E : Des connaissances "à dire d'expert" sont également requises quant aux apports et pertes d'eau échangée avec l'extérieur du bassin versant. Ces apports peuvent correspondre à un apport d'eau d'irrigation ou à l'émergence de sources alimentées par un autre bassin versant. Des pertes peuvent également survenir et alimenter des sources ou émergences situées à l'extérieur du bassin versant, voire même en mer (*pour en savoir plus, voir section 2.2 ci-avant, ainsi que l'article mentionné en fin de section 2.2*).

F : Le principal tributaire ou les principaux tributaires ne représentent pas la totalité des apports d'eau et de nutriments à une lagune. Le reste du bassin versant peut également contribuer par le biais d'affluents mineurs, du drainage des zones bordières de la lagune ou de zone humides. Des échanges peuvent également avoir lieu avec des masses d'eau voisines par le biais de canaux de drainage, d'irrigation ou de navigation. Ces échanges doivent faire l'objet d'une attention particulière et d'une caractérisation car ils peuvent représenter des volumes d'échanges importants et être difficiles à quantifier.

G : Si le principal tributaire fait l'objet d'un suivi Qualité, différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour le calcul des flux de nutriments apportés à la lagune.

H : Le calcul des flux sur les données des suivis 2015-2022 a montré que la prise en compte des apports par les épisodes de crues était importante (*pour en savoir plus, voir sections 5.10 et 5.11 ci-avant*). Il est dès lors nécessaire de disposer d'une information sur la qualité de eaux en temps de crue. Selon l'information disponible et les nutriments considérés, la méthode à prendre en compte pour le calcul des flux ne sera pas la même.

I : Si le bassin versant dispose de données de qualité, même sporadiques, il est possible d'utiliser cette information.

J : Il est recommandé d'en calculer la moyenne arithmétique plutôt que la médiane car cette dernière reviendrait très vraisemblablement à diminuer la valeur du flux calculé.

K : Si le bassin versant ne dispose pas de données de qualité ou de données trop éparées, une évaluation de la concentration moyenne probable peut être réalisée à l'aide des caractéristiques du bassin versant. Les données requises sont disponibles dans diverses bases de données existantes et faciles à traiter sous SIG.

L : Le calcul des concentrations probables peut être effectué avec la méthodologie développée dans cette présente étude (*pour en savoir plus, voir section 7.6 ci-avant*). Il faut cependant garder à l'esprit qu'il ne s'agit ici que d'une estimation des concentrations probables et que les valeurs fournies peuvent être entachées d'erreurs, surtout pour des valeurs extrêmes des caractéristiques utilisées (c'est-à-dire pour des valeurs de caractéristiques situées à l'extérieur des gammes utilisées pour l'établissement des coefficients de calcul). Une validation des concentrations probables ainsi calculées doit donc être réalisée, au moins "à dire d'expert", et les valeurs aberrantes doivent être écartées.

M : Lorsqu'on dispose d'un suivi des débits et de la qualité des eaux, et de données en temps de crue, les méthodes applicables pour le calcul des flux dépendront de la forme dissoute ou particulière des nutriments. Pour les formes particulières, MES et phosphore total (le phosphore total est principalement sous forme d'ortho-phosphate et ce dernier principalement adsorbé sur les argiles), la méthode de la moyenne pondérée n'est pas adaptée et induit des résultats pouvant être largement surestimés à cause des données obtenues en temps de crue (*pour en savoir plus, voir section 5.11 ci-avant*). Les méthodes préconisées sont celles des intervalles de débits et de la dernière concentration.

N : Pour les formes dissoutes (concernant principalement celles de l'azote), les trois méthodes sont applicables et donnent des résultats très voisins.

O : Si l'on ne dispose pas de données de qualité en période de crue, la méthode des intervalles de débit perd de son intérêt (*pour en savoir plus, voir section 5.10 ci-avant*), même si elle demeure aussi valable et applicable que les autres. Les méthodes de la moyenne pondérée ou de la dernière concentration peuvent être utilisées. Il est cependant vraisemblable que la méthode de la moyenne pondérée sous-estime le flux calculé pour les formes particulières.

P : Si l'on ne dispose que de données historiques de qualité en temps de crue, seule la méthode des intervalles de débit peut être mise en œuvre pour bénéficier de ces données, sous réserve de l'absence de modifications majeures affectant le territoire et les écoulements (comme par exemple un changement d'occupation des sols, un changement d'agriculture, une augmentation de l'urbanisation, la suppression de stations d'épuration, un épandage de boues de STEP, etc.) (*pour en savoir plus, voir section 3.2.3 ci-avant*).

Q : Si l'on ne dispose pas d'un suivi hydrométrique des débits, aucune des trois méthodes ne peut réellement être appliquée. Les méthodes de la moyenne pondérée et de la dernière concentration peuvent être utilisées si l'on dispose du débit correspondant à chaque échantillonnage. Dans les autres cas, le flux peut être évalué par le simple produit du volume annuel d'écoulement (indépendamment de la façon dont il a été estimé) et de la concentration moyenne calculée ou estimée. Notons que le terme moyenne est utilisé ici au sens large, et peut correspondre à la moyenne arithmétique ou à la médiane. Dans tous les cas, il s'agit ici d'une estimation très sommaire des flux.

Nonobstant le choix de la méthode en fonction des données disponibles, il est requis de tenir compte des objectifs du calcul des flux. Le Tableau 27 discute la pertinence des différentes méthodes en fonction des objectifs du calcul des flux (indépendamment de la disponibilité et de la qualité intrinsèque des données requises discutés dans le cheminement méthodologique de la Figure 222).

Objectif du calcul des flux	Méthodes pertinentes
Estimation de l'ordre de grandeur des flux	Toutes les méthodes, si applicables, en commençant par le simple produit : débit moyen x concentration moyenne.
Estimation des flux d'azote	Toutes les méthodes sont applicables et donnent a priori des résultats proches. Il peut être pertinent d'utiliser les trois méthodes MP, ID et DC et d'en traiter statistiquement les résultats.
Estimation des flux de phosphore et/ou de MES	Il est recommandé d'utiliser les méthodes ID et DC si les données existent, car la méthode MP sur ou sous-estime considérablement les flux selon le nombre d'échantillons de crue disponibles.
Comparaison entre bassins versants	A priori n'importe quelle méthode, si les données requises sont disponibles, et dans la mesure où la même méthode est appliquée sur tous les bassins. Dans le cas contraire (méthodes différentes), la comparaison des bassins versants pourrait être erronée à cause des résultats différents obtenus de différentes méthodes.
Comparaison interannuelle des flux vis-à-vis de la variabilité hydro-climatique	Les méthodes de la moyenne pondérée et de la dernière concentration sont préférables si les données disponibles sont suffisantes. La méthode des intervalles de débits est applicable si la stationnarité de la relation concentration – débit est admise.
Comparaison interannuelle des flux vis-à-vis de la variabilité des sources de pollution (ex. changement d'agriculture ou modification des rejets de STEP)	Les méthodes de la moyenne pondérée et de la dernière concentration sont préférables si les données disponibles sont suffisantes. La méthode des intervalles de débits n'est pas applicable puisqu'il n'y a pas stationnarité de la relation concentration – débit.

Tableau 27 : Pertinence des différentes méthodes en fonction des objectifs du calcul des flux (indépendamment de la disponibilité et qualité des données requises)

9. Cas des micropolluants pesticides

Un rapport IFREMER (Munaron et al., mars 2017) a constaté que les substances les plus souvent retrouvées dans les lagunes (pour les années d'échantillonnage considéré par cette étude) sont des herbicides appartenant plus particulièrement aux deux familles chimiques suivantes :

- La famille des phényl-urées avec trois substances : diuron, isoproturon et chlortoluron. Le diuron est interdit pour tous usages depuis avril 2010. L'isoproturon et chlortoluron sont interdits d'usage phytosanitaire en zone non-agricole, et d'usage en tant que biocides, mais sont encore utilisés à l'heure actuelle pour leur usage phytosanitaire en zone agricole malgré des mesures de restriction d'utilisation.
- La famille des triazines avec sept substances actives (atrazine, simazine, terbuthylazine, amétryne, terbutryne, terbutryne, terbuméton) et trois métabolites. Toutes ces substances ont fait l'objet de mesures d'interdiction totales d'utilisation entre 2003 et 2010.

Dans les analyses menées sur les six tributaires, les molécules les plus retrouvées en termes de nombre de quantification et de concentration sont le Glyphosate et son métabolite AMPA. Ces deux molécules ont été systématiquement mises en graphiques pour les six tributaires, sur la période 2010-2021 ainsi que sur la période janvier-décembre afin de faire ressortir l'éventuel effet de la saison d'application. Seules les concentrations supérieures au seuil de quantification sont représentées.

9.1. Concentrations en Glyphosate et AMPA

9.1.1. Période 2010-2021

Comme le montrent les graphiques suivants, les concentrations en Glyphosate et AMPA sont parfois très importantes. L'occurrence apparente de ces molécules est pour partie conditionnée par la fréquence des analyses faites. Le nombre important d'analyses faites depuis 2016 donne en effet l'apparence d'une augmentation de l'apparition de ces molécules. Il est donc normal de retrouver ces molécules plus souvent à partir de 2016 et statistiquement avec des concentrations plus élevées. La tendance à l'augmentation ou à la baisse ne peut donc pas être caractérisée à l'aide de ces graphiques.

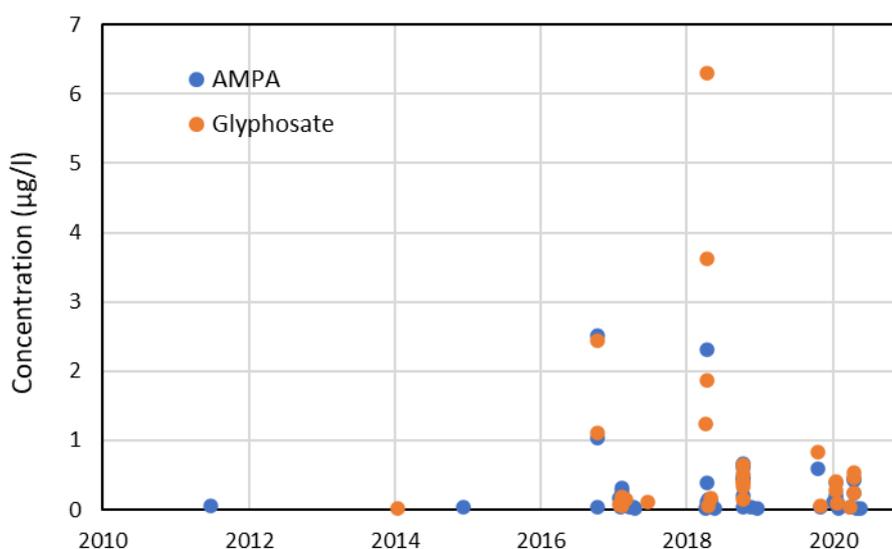


Figure 223 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur la Berre

La Figure 223 concernant la Berre montre des concentrations atteignant 6.3 $\mu\text{g/l}$. La molécule dominante est le métabolite AMPA. Sur la Mosson (Figure 224) et sur le Lez (Figure 225), les concentrations maximales sont moindres, reflétant peut-être la plus forte urbanisation de ces bassins versants (moins d'activités agricoles). Sur ces deux bassins, les deux molécules (mère et fille) sont présentes à ces concentrations aussi importantes. La dominance de l'une ou l'autre des molécules peut refléter le temps de transfert jusqu'au cours d'eau. Si le Glyphosate est plutôt retrouvé, c'est que l'épandage a eu lieu près du cours d'eau et/ou que la pluie l'a rapidement entraîné vers celui-ci. Si c'est le métabolite qui domine, c'est que la transformation a eu le temps de prendre place avant que la molécule ne se retrouve dans le cours d'eau.

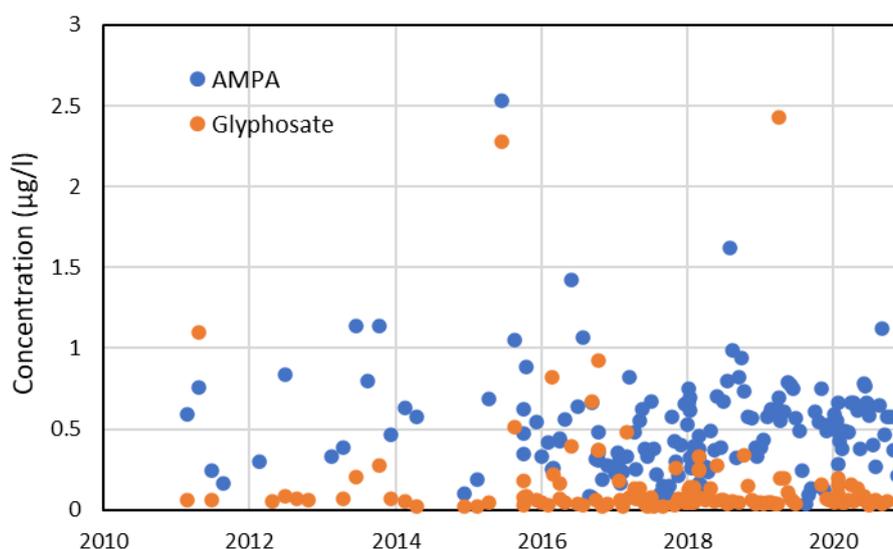


Figure 224 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur la Mosson

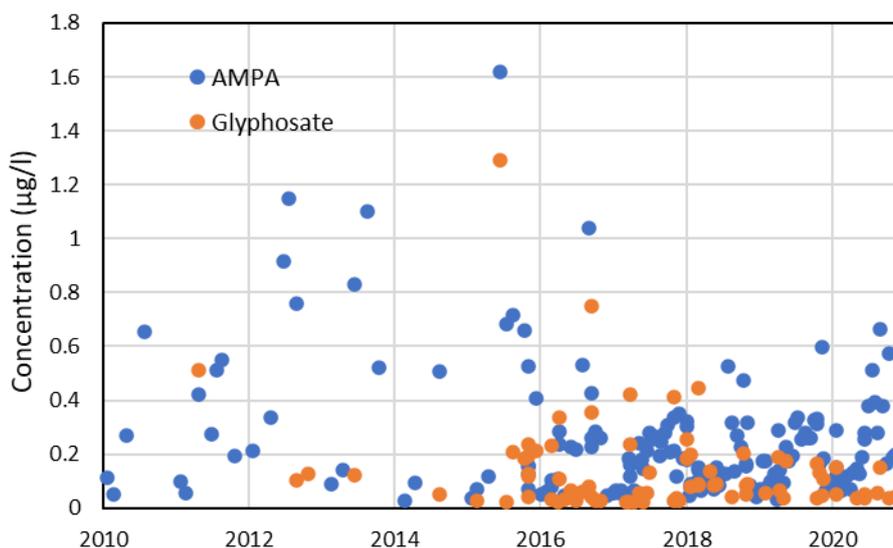


Figure 225 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Lez

Sur le Salaison (Figure 226) les concentrations maximales sont plus élevées (maximum 6.9 $\mu\text{g/l}$ de glyphosate), mais peu fréquentes. C'est le Glyphosate qui domine, indiquant une application de l'herbicide à proximité du cours d'eau. Sur le Vidourle (Figure 227), les concentrations sont plus faibles. Sur l'Arc (Figure 228), l'AMPA domine très largement, attestant un temps de transport jusqu'au cours d'eau plus long.

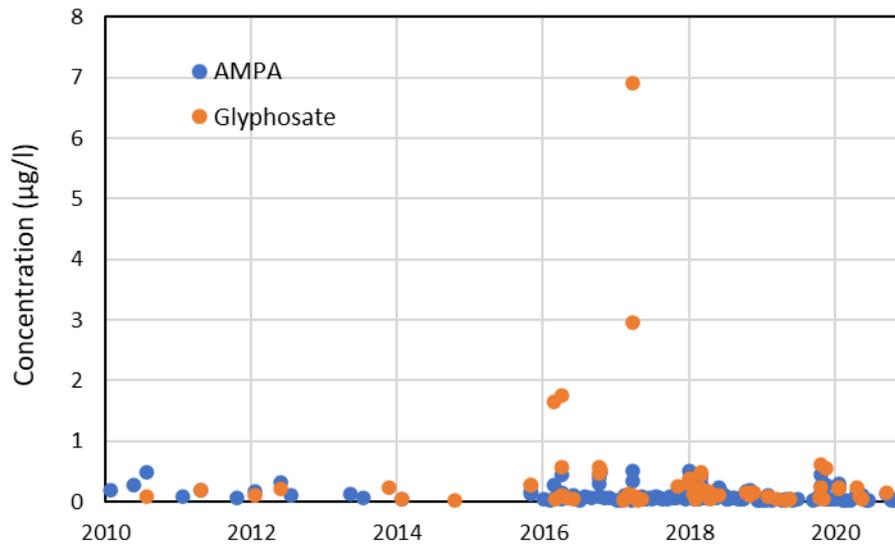


Figure 226 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Salaison

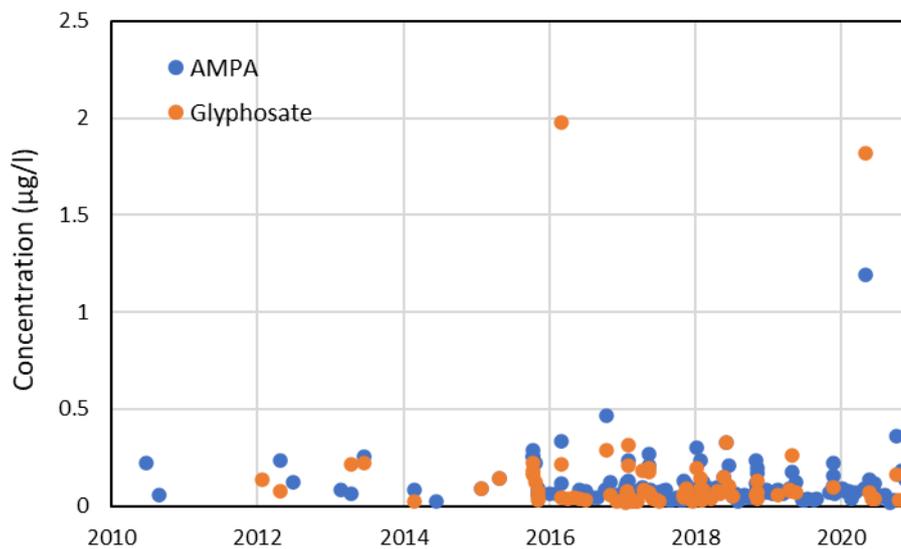


Figure 227 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Vidourle

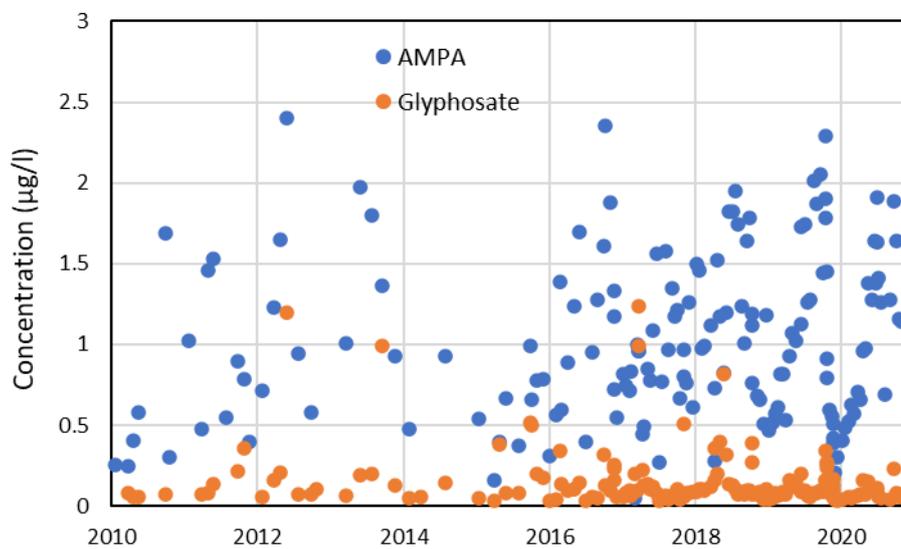


Figure 228 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur l'Arc

9.1.2. Effet de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA

La Figure 229 montre clairement l'effet de la saison sur l'apparition des molécules. Durant l'été, les molécules ne sont presque pas détectées, illustrant la contribution dominante des eaux souterraines à l'écoulement du cours d'eau. Les concentrations les plus importantes sont observées au printemps, lors des traitements herbicides. Le Glyphosate domine. A l'automne, à l'occasion de la reprise des pluies efficaces, les deux molécules apparaissent en concentrations notables, mais l'AMPA est également fortement présent.

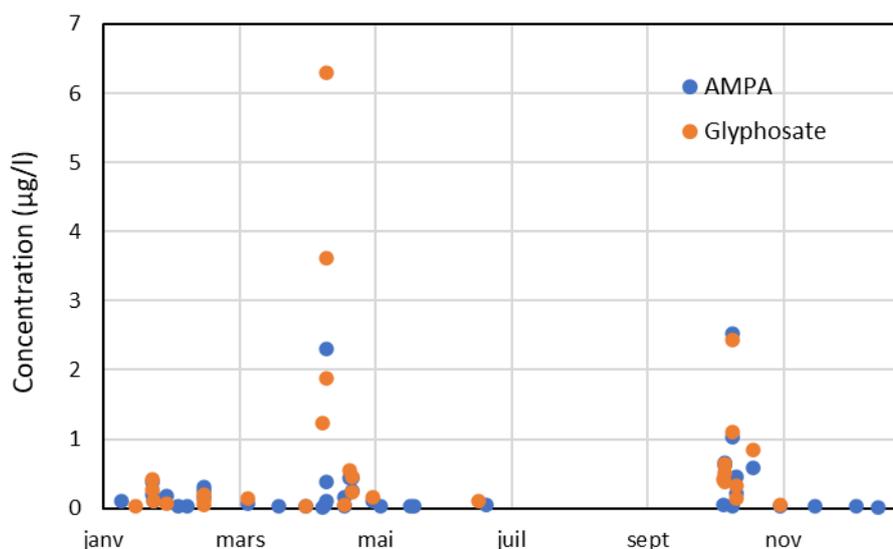


Figure 229 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur la Berre

Sur la Mosson (Figure 230), l'effet de la saison est peu, voire pas marqué. Les concentrations les plus fortes sont cependant toujours détectées à l'issue des traitements herbicides.

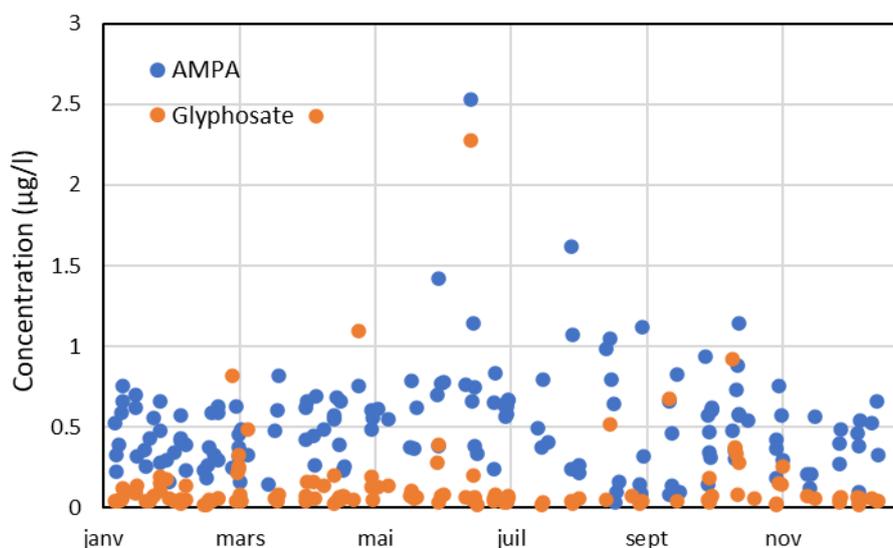


Figure 230 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur la Mosson

Sur le Lez (Figure 231), outre une concentration importante de Glyphosate en juin, c'est l'AMPA qui domine, confirmant un temps de transport plus long entre les parcelles d'application et le cours d'eau et une origine vraisemblablement plus lointaine.

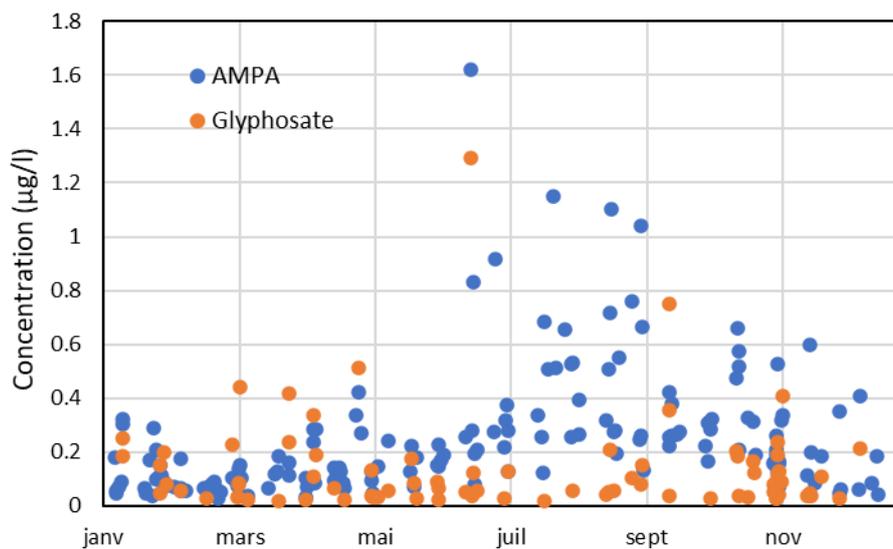


Figure 231 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Lez

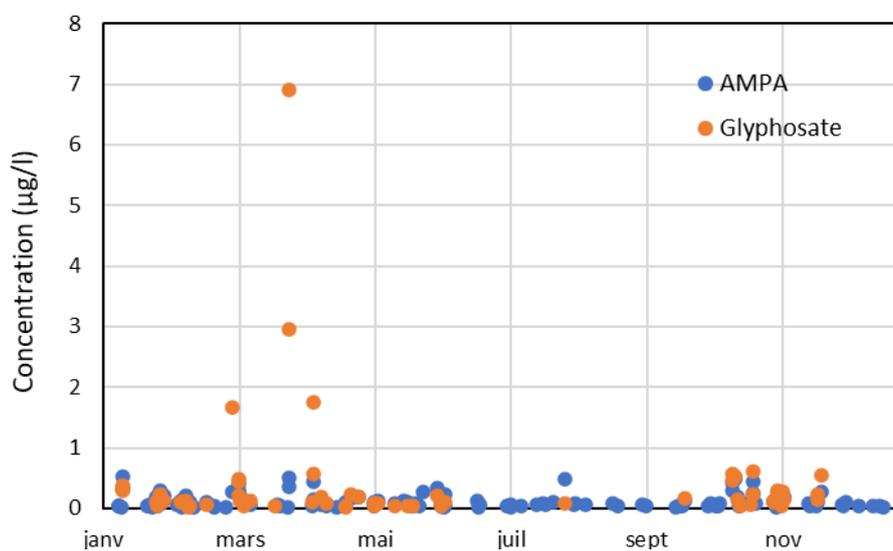


Figure 232 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Salaison

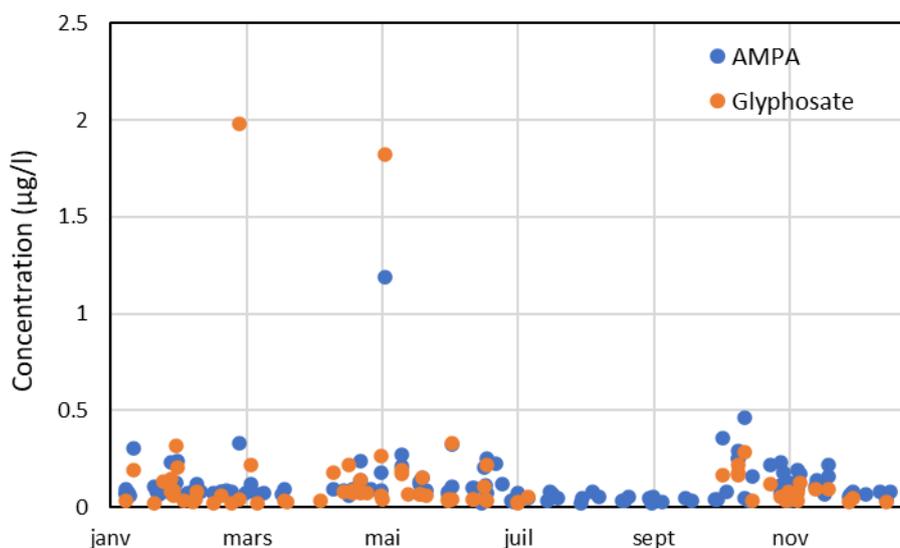


Figure 233 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Vidourle

Sur le Salaision (Figure 232) et le Vidourle (Figure 233), les concentrations les plus fortes sont observées au printemps et la molécule mère domine. Sur la Mosson au contraire (Figure 234), c'est l'AMPA qui domine, attestant ici encore un temps de transport plus long entre les parcelles d'application et le cours d'eau et une origine vraisemblablement plus lointaine.

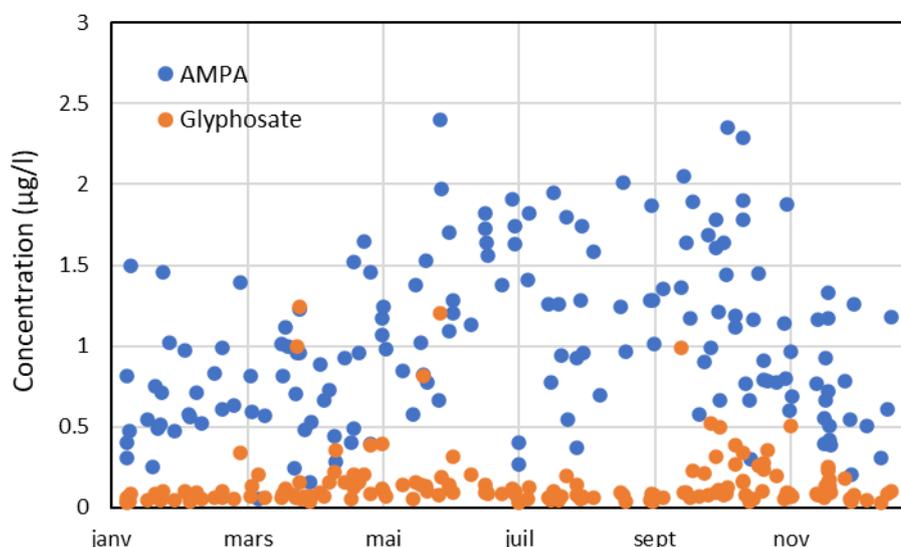


Figure 234 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur l'Arc

9.2. Autres molécules détectées

Les autres molécules détectées avec des concentrations importante sont indiquées ci-après. Les molécules soulignées sont celles qui ont été détectées dans les lagunes lors de l'étude OBSLAG 2017-2019 de l'IFREMER (voir Tableau 28).

- Sur la Berre
 - Propyzamide à 0.42 µg/l
 - Tébuconazole à 0.251 µg/l
 - Métribuzine à 0.234 µg/l
 - Métolachlore ESA à 0.224 µg/l
 - Diméthomorphe à 0.196 µg/l
 - Déséthyl déisopropyl atrazine à 0.195 µg/l
 - Dinitrocrésol à 0.187 µg/l
 - Oxyfluorène à 0.15 µg/l
 - Boscalid à 0.137 µg/l
 - Propyzamide à 0.13 µg/l
 - Simazine à 0.121 µg/l
- Sur la Mosson
 - Fosetyl-al à 6.84 µg/l
 - Chlortoluron à 0.565 µg/l
 - Oryzalin à 0.457 µg/l
 - 2.4-MCPA à 0.385 µg/l
 - Métolachlore ESA à 0.337 µg/l
 - Dinitrocrésol à 0.32 µg/l
 - Tébuconazole à 0.248 µg/l
 - Ethyl Urée à 0.245 µg/l

- Iprovalicarbe à 0.234 µg/l
- Fludioxonil à 0.233 µg/l
- S-Métolachlore à 0.21 µg/l
- Aminotriazole à 0.19 µg/l
- Clopyralid à 0.132 µg/l
- Boscalid à 0.126 µg/l
- Sur le Lez
 - Fosétyl-al à 0.957 µg/l
 - Fosétyl à 0.434 µg/l
 - Diuron à 0.304 µg/l
 - Dicamba à 0.299 µg/l
 - Mécoprop à 0.296 µg/l
 - Dinitrocrésol à 0.29 µg/l
 - Aminotriazole à 0.285 µg/l
 - Fludioxonil à 0.223 µg/l
 - Ethyl Urée à 0.107 µg/l
- Sur le Salaison
 - Fosétyl-al à 5.66 µg/l
 - Fosétyl à 5.275 µg/l
 - Chlortoluron à 1.061 µg/l
 - Boscalid à 0.396 µg/l
 - Oryzalin à 0.378 µg/l
 - Dinitrocrésol à 0.362 µg/l
 - 2-4D à 0.338 µg/l
 - Napropamide à 0.25 µg/l
 - 2.4-MCPA à 0.199 µg/l
 - Oryzalin à 0.186 µg/l
 - Aminotriazole à 0.185 µg/l
 - Dicamba à 0.183 µg/l
 - Propyzamide à 0.18 µg/l
 - Diuron à 0.14 µg/l
 - Fenhexamid à 0.14 µg/l
 - Flzasulfuron à 0.139 µg/l
 - Isoxaben à 0.138 µg/l
 - Aclonifen à 0.1093 µg/l
- Sur le Vidourle
 - Fosétyl-al à 1.631 µg/l
 - Fosétyl à 1.52 µg/l
 - Aminotriazole à 0.583 µg/l
 - Dicamba à 0.291 µg/l
 - Diméthomorphe à 0.269 µg/l
 - Chlortoluron à 0.179 µg/l
 - HCH gamma à 0.17 µg/l
 - Propyzamide à 0.17 µg/l
 - Ethyl Urée à 0.158 µg/l
 - Terbuthylazine à 0.129 µg/l
 - Tébuconazole à 0.128 µg/l
 - Mécoprop à 0.118 µg/l
 - Carbendazime à 0.115 µg/l
 - Boscalid à 0.104 µg/l

- Sur l'Arc
 - Fosétyl-al à 2.919 µg/l
 - Fosétyl à 2.72 µg/l
 - Aminotriazole à 0.561 µg/l
 - Dichlorprop à 0.398 µg/l
 - Diméthomorphe à 0.391 µg/l
 - Dinitrocrésol à 0.324 µg/l
 - Napropamide à 0.27 µg/l
 - 2-4D à 0.244 µg/l
 - Flonicamide à 0.24 µg/l
 - Dicamba à 0.158 µg/l
 - Isoxaben à 0.15 µg/l
 - Diuron à 0.139 µg/l
 - Mécoprop à 0.133 µg/l
 - Chlortoluron à 0.112 µg/l

Les molécules retrouvées à des concentrations > 0.1 µg/l sont donc très nombreuses et ne sont pas toujours celles précédemment mentionnées dans le rapport de l'IFREMER, à savoir les phényl-urées et les triazines.

Pesticide	Nombre de dépassement du seuil d'effet ($QR_{indiv} > 1$)	ΣQR_{indiv} tous legs, toutes lagunes
Métolachlore OA	42	211.1
Métolachlore	33	286.6
Chlortoluron	7	29.7
Métolachlore ESA	7	28.6
Imidaclopride	5	13.6
Propiconazole	4	46.4
Azoxystrobine	4	11.3
Carbendazime	3	20.8
Amétryne	1	20.8
Tébuconazole	1	15.1
Terbuthylazine-déséthyl	0	10
Terbuthylazine	0	6.9
Terbutryne	0	5.7
28 autres substances quantifiées	0	5.6
Prométryne	0	5
Rivarol	0	4.8
Linuron	0	4.3
Métazachlore	0	1.9
Hexazinone	0	1.1
Glyphosate	0	1
Flazasulfuron	0	0.8
Diflufénicanil	0	0.3

Tableau 28 : Nombre de dépassements du seuil d'effet individuel ($QR_{indiv} > 1$) pour les pesticides quantifiés dans l'étude OBSLAG de l'IFREMER (2017-2019) et leur contribution au risque pesticide global (ΣQR_{ind} tous legs et toutes lagunes)

9.3. Relation entre concentrations de pesticides et débits

Les figures suivantes comparent les concentrations de pesticides mesurés aux débits correspondants aux dates d'échantillonnage. Les concentrations et les débits y sont représentés en échelle logarithmique. Comme le montrent ces différentes figures, aucune corrélation n'est observable, les concentrations observées semblant statistiquement indépendantes du débit.

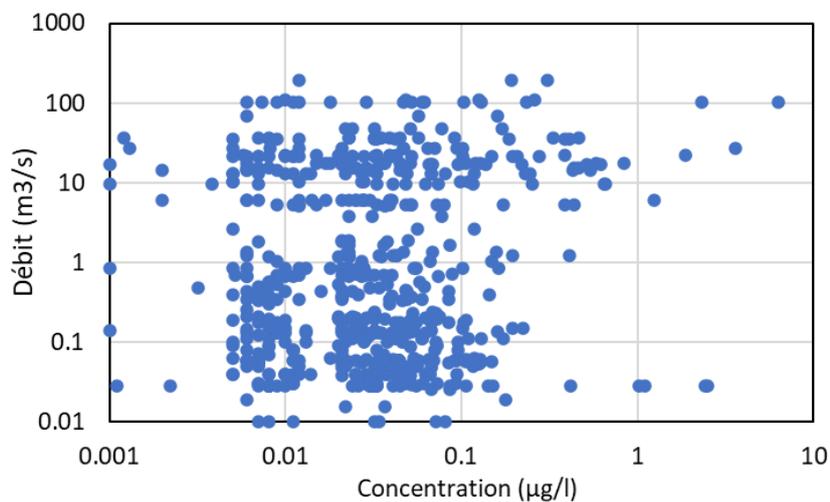


Figure 235 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur la Berre

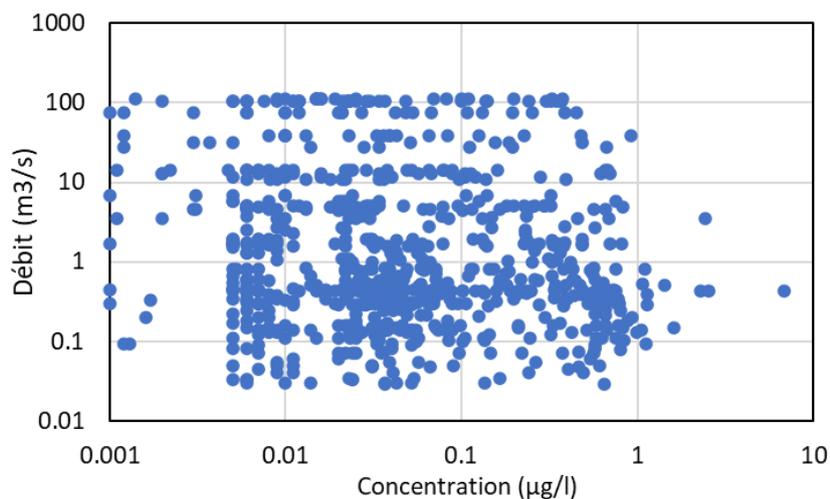


Figure 236 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur la Mosson

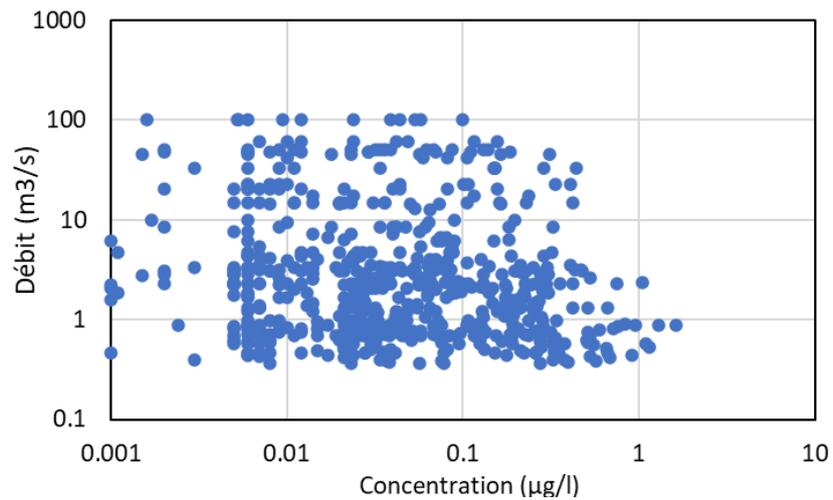


Figure 237 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Lez

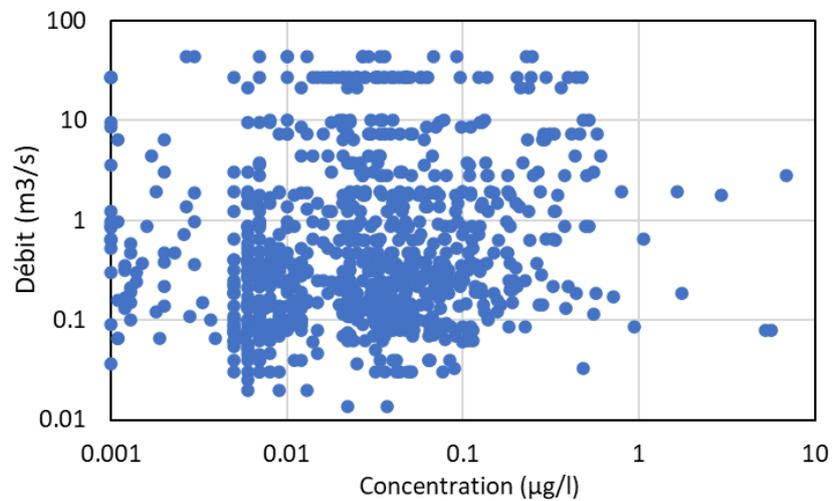


Figure 238 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Salaison

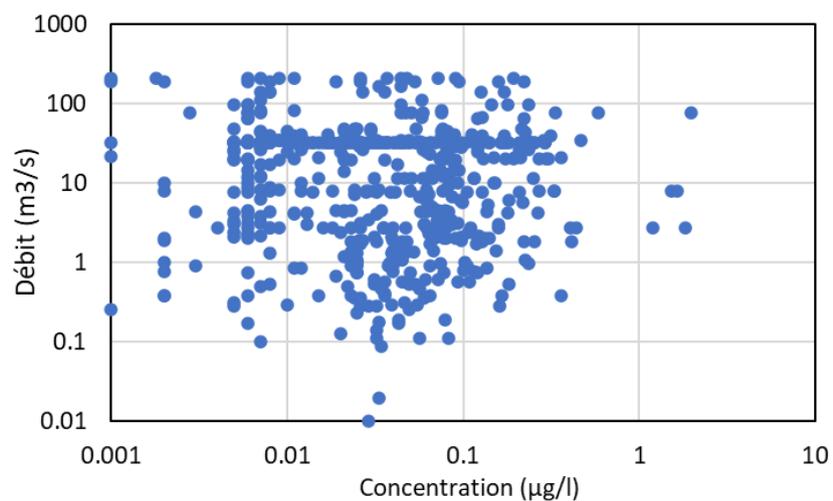


Figure 239 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Vidourle

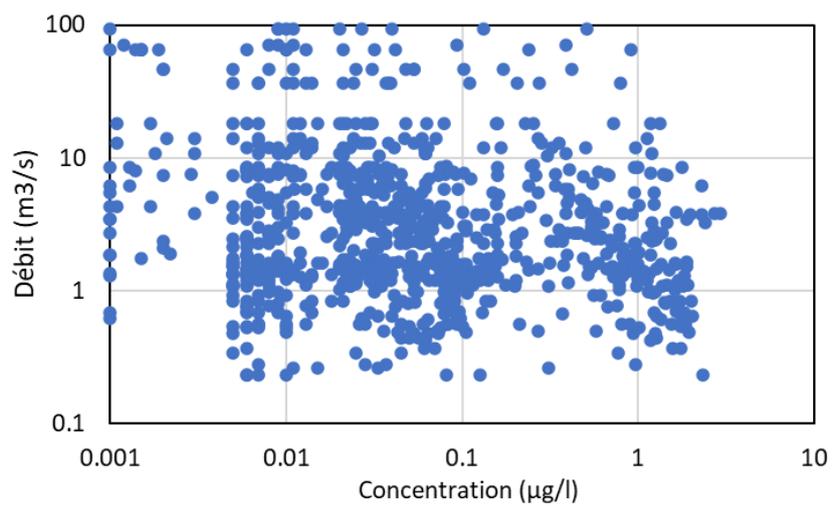


Figure 240 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur l'Arc

10. Annexe 1 : Dates d'échantillonnage du suivi régulier renforcé

Prélèvements et analyses par le laboratoire Carso

Arc	Berre	Lez	Mosson	Salaison	Vidourle
31/08/2015 13:00	05/08/2015 08:30	19/08/2015 10:30	19/08/2015 09:20	19/08/2015 11:50	28/08/2015 11:40
30/09/2015 12:00	10/09/2015 09:20	15/09/2015 16:20	15/09/2015 16:10	16/09/2015 11:50	16/09/2015 10:10
30/10/2015 12:30	07/10/2015 09:10	16/10/2015 09:50	16/10/2015 09:20	16/10/2015 11:40	28/10/2015 10:40
30/11/2015 11:40	09/11/2015 10:00	16/11/2015 15:30	16/11/2015 14:50	18/11/2015 12:20	18/11/2015 10:50
22/12/2015 12:20	03/12/2015 12:50	11/12/2015 15:50	11/12/2015 15:20	23/12/2015 13:20	23/12/2015 11:20
07/01/2016 10:00	06/01/2016 10:10	06/01/2016 15:30	06/01/2016 15:00	07/01/2016 13:30	07/01/2016 11:40
20/01/2016 09:30	19/01/2016 09:50	19/01/2016 13:50	19/01/2016 13:40	20/01/2016 14:00	20/01/2016 12:50
05/02/2016 09:20	04/02/2016 09:50	04/02/2016 14:00	04/02/2016 13:30	05/02/2016 13:00	05/02/2016 11:40
16/02/2016 10:00	15/02/2016 09:40	15/02/2016 13:30	15/02/2016 13:10	16/02/2016 13:30	16/02/2016 12:00
04/03/2016 09:20	01/03/2016 09:50	01/03/2016 14:10	01/03/2016 13:40	04/03/2016 13:20	04/03/2016 11:30
21/03/2016 09:40	18/03/2016 09:40	18/03/2016 13:20	18/03/2016 13:10	21/03/2016 13:30	21/03/2016 12:10
04/04/2016 09:20	01/04/2016 09:40	01/04/2016 13:50	01/04/2016 13:30	04/04/2016 12:40	04/04/2016 11:20
18/04/2016 10:00	15/04/2016 09:50	15/04/2016 13:40	15/04/2016 13:10	18/04/2016 14:00	18/04/2016 12:20
03/05/2016 09:20	02/05/2016 10:00	02/05/2016 15:20	02/05/2016 14:50	03/05/2016 14:10	03/05/2016 11:50
18/05/2016 10:20	17/05/2016 09:50	17/05/2016 14:40	17/05/2016 14:10	18/05/2016 15:10	18/05/2016 12:50
02/06/2016 09:20	01/06/2016 09:30	01/06/2016 15:00	01/06/2016 14:30	02/06/2016 13:00	02/06/2016 11:30
16/06/2016 10:10	15/06/2016 09:30	15/06/2016 13:10	15/06/2016 12:50	16/06/2016 13:50	16/06/2016 12:20
04/07/2016 09:20	01/07/2016 09:40	01/07/2016 13:30	01/07/2016 13:10	04/07/2016 13:00	04/07/2016 11:20
19/07/2016 09:40	18/07/2016 09:30	18/07/2016 13:20	18/07/2016 13:10	19/07/2016 13:30	19/07/2016 12:10
02/08/2016 09:40	01/08/2016 10:10	01/08/2016 15:20	01/08/2016 14:50	02/08/2016 14:10	02/08/2016 12:10
17/08/2016 09:50	16/08/2016 09:30	16/08/2016 13:40	16/08/2016 13:20	17/08/2016 14:00	17/08/2016 12:20
02/09/2016 09:20	01/09/2016 10:00	01/09/2016 14:10	01/09/2016 14:00	02/09/2016 13:00	02/09/2016 11:40
19/09/2016 09:30	18/10/2016 09:50	16/09/2016 13:30	16/09/2016 13:10	19/09/2016 13:10	19/09/2016 11:50
07/10/2016 09:20	02/11/2016 10:00	03/10/2016 13:50	03/10/2016 13:20	07/10/2016 13:00	07/10/2016 11:50
17/10/2016 10:10	21/11/2016 09:40	18/10/2016 13:30	18/10/2016 13:10	17/10/2016 14:00	17/10/2016 12:20
03/11/2016 09:10	01/12/2016 09:30	02/11/2016 14:20	02/11/2016 13:50	03/11/2016 12:50	03/11/2016 11:40
22/11/2016 09:40	19/12/2016 09:10	21/11/2016 13:10	21/11/2016 12:50	22/11/2016 13:30	22/11/2016 11:00
02/12/2016 09:10	18/01/2017 09:50	01/12/2016 13:20	01/12/2016 13:00	02/12/2016 13:00	02/12/2016 11:20
20/12/2016 09:50	06/02/2017 09:40	19/12/2016 13:10	19/12/2016 12:50	20/12/2016 14:10	20/12/2016 12:20
06/01/2017 09:10	06/03/2017 10:30	05/01/2017 14:10	05/01/2017 13:40	06/01/2017 13:10	06/01/2017 11:40
19/01/2017 10:00	20/03/2017 10:30	18/01/2017 14:20	18/01/2017 13:50	19/01/2017 14:10	19/01/2017 12:30
07/02/2017 09:10	10/04/2017 09:50	06/02/2017 13:50	06/02/2017 13:30	07/02/2017 12:50	07/02/2017 11:20
15/02/2017 09:50	19/04/2017 09:40	14/02/2017 14:00	14/02/2017 13:40	15/02/2017 13:40	15/02/2017 12:00
07/03/2017 09:20	09/05/2017 09:30	06/03/2017 15:00	06/03/2017 14:40	07/03/2017 13:20	07/03/2017 11:40
21/03/2017 10:30	22/05/2017 09:30	20/03/2017 14:40	20/03/2017 14:20	21/03/2017 14:40	21/03/2017 13:10
11/04/2017 09:10	01/06/2017 09:40	10/04/2017 14:10	10/04/2017 13:50	11/04/2017 12:50	11/04/2017 11:30
20/04/2017 10:00	19/06/2017 09:30	19/04/2017 14:20	19/04/2017 14:00	20/04/2017 14:20	20/04/2017 12:20
12/05/2017 09:20	03/07/2017 09:40	09/05/2017 14:10	09/05/2017 13:40	12/05/2017 13:20	12/05/2017 12:00
23/05/2017 10:10	18/07/2017 09:30	22/05/2017 14:50	22/05/2017 14:10	23/05/2017 14:10	23/05/2017 12:40
02/06/2017 09:10	04/08/2017 09:30	01/06/2017 14:10	01/06/2017 13:50	02/06/2017 12:50	02/06/2017 11:30
20/06/2017 09:50	21/08/2017 09:30	19/06/2017 13:30	19/06/2017 13:00	20/06/2017 13:30	20/06/2017 12:00
04/07/2017 09:20	01/09/2017 10:00	03/07/2017 13:30	03/07/2017 13:10	04/07/2017 13:00	04/07/2017 11:50
19/07/2017 10:00	19/09/2017 09:40	18/07/2017 13:40	18/07/2017 13:20	19/07/2017 13:50	19/07/2017 12:30
07/08/2017 09:10	02/10/2017 10:10	04/08/2017 14:30	04/08/2017 13:40	07/08/2017 13:30	07/08/2017 12:00
22/08/2017 10:20	16/10/2017 09:30	21/08/2017 14:30	21/08/2017 13:40	22/08/2017 15:00	22/08/2017 13:30
08/09/2017 09:20	02/11/2017 09:40	01/09/2017 14:00	01/09/2017 13:40	08/09/2017 12:40	08/09/2017 11:30
20/09/2017 10:10	16/11/2017 09:40	19/09/2017 14:20	19/09/2017 13:40	20/09/2017 14:00	03/10/2017 11:50
03/10/2017 09:30	01/12/2017 09:50	02/10/2017 14:20	02/10/2017 13:50	03/10/2017 13:10	17/10/2017 12:40
17/10/2017 10:30	18/12/2017 09:40	16/10/2017 13:30	16/10/2017 13:00	17/10/2017 14:10	03/11/2017 11:30

03/11/2017 09:20	05/01/2018 09:50	02/11/2017 13:40	02/11/2017 13:20	03/11/2017 12:40	17/11/2017 12:30
17/11/2017 10:10	22/01/2018 08:20	16/11/2017 13:40	16/11/2017 13:20	17/11/2017 14:20	04/12/2017 12:10
04/12/2017 09:20	01/02/2018 09:50	01/12/2017 14:00	01/12/2017 13:30	04/12/2017 13:50	19/12/2017 12:30
19/12/2017 10:00	16/02/2018 09:50	18/12/2017 13:30	18/12/2017 13:00	19/12/2017 14:30	08/01/2018 12:20
08/01/2018 09:40	05/03/2018 10:00	05/01/2018 13:40	05/01/2018 13:10	08/01/2018 13:50	23/01/2018 12:20
23/01/2018 09:50	16/03/2018 09:40	19/01/2018 12:50	19/01/2018 12:20	23/01/2018 14:00	02/02/2018 12:10
02/02/2018 09:40	06/04/2018 10:00	01/02/2018 14:00	01/02/2018 13:40	02/02/2018 13:40	19/02/2018 12:30
19/02/2018 10:00	19/04/2018 09:40	16/02/2018 13:50	16/02/2018 13:20	19/02/2018 14:00	02/03/2018 11:50
20/03/2018 09:50	02/05/2018 09:30	02/03/2018 10:30	02/03/2018 10:50	02/03/2018 13:40	20/03/2018 12:20
09/04/2018 09:40	21/05/2018 09:20	16/03/2018 13:50	16/03/2018 13:20	20/03/2018 14:00	09/04/2018 12:20
20/04/2018 10:00	01/06/2018 09:30	06/04/2018 14:40	06/04/2018 14:20	09/04/2018 14:00	20/04/2018 12:20
03/05/2018 09:10	18/06/2018 09:40	19/04/2018 14:00	19/04/2018 13:40	20/04/2018 14:30	03/05/2018 11:30
22/05/2018 09:00	03/07/2018 09:10	02/05/2018 14:20	02/05/2018 13:50	03/05/2018 13:20	22/05/2018 12:40
04/06/2018 09:30	19/07/2018 09:40	21/05/2018 13:50	21/05/2018 13:30	22/05/2018 14:20	04/06/2018 11:40
19/06/2018 09:50	01/08/2018 10:20	01/06/2018 13:40	01/06/2018 13:20	04/06/2018 13:20	19/06/2018 12:20
09/07/2018 09:20	17/08/2018 09:20	18/06/2018 13:40	18/06/2018 13:10	19/06/2018 14:00	09/07/2018 12:40
20/07/2018 09:40	03/09/2018 09:20	03/07/2018 13:20	03/07/2018 12:50	09/07/2018 14:30	20/07/2018 12:20
02/08/2018 09:10	18/09/2018 09:40	19/07/2018 14:30	19/07/2018 14:00	20/07/2018 14:20	02/08/2018 11:40
20/08/2018 10:10	01/10/2018 09:50	01/08/2018 08:10	01/08/2018 08:40	02/08/2018 13:20	20/08/2018 13:00
04/09/2018 09:20	05/11/2018 09:50	17/08/2018 14:20	17/08/2018 13:50	20/08/2018 14:40	04/09/2018 11:37
19/09/2018 09:40	20/11/2018 09:30	03/09/2018 13:36	03/09/2018 13:13	04/09/2018 13:00	19/09/2018 12:20
02/10/2018 09:20	03/12/2018 10:00	18/09/2018 13:50	18/09/2018 13:30	19/09/2018 14:00	02/10/2018 11:40
16/10/2018 10:10	19/12/2018 09:40	01/10/2018 14:30	01/10/2018 14:00	02/10/2018 13:10	16/10/2018 12:40
06/11/2018 09:20	07/01/2019 09:30	15/10/2018 13:50	15/10/2018 13:20	16/10/2018 14:10	06/11/2018 12:00
21/11/2018 10:10	21/01/2019 09:40	05/11/2018 14:00	05/11/2018 13:40	06/11/2018 13:30	21/11/2018 13:00
10/12/2018 09:30	07/02/2019 08:37	20/11/2018 15:10	20/11/2018 14:40	21/11/2018 14:40	10/12/2018 12:20
21/12/2018 10:10	18/02/2019 09:50	10/12/2018 14:30	10/12/2018 15:00	10/12/2018 14:00	21/12/2018 12:50
08/01/2019 09:20	01/03/2019 10:10	19/12/2018 14:10	19/12/2018 13:40	21/12/2018 14:40	08/01/2019 11:40
22/01/2019 09:40	20/03/2019 09:26	07/01/2019 14:20	07/01/2019 14:00	08/01/2019 13:30	22/01/2019 12:10
04/02/2019 11:40	02/04/2019 09:08	21/01/2019 14:30	21/01/2019 14:10	22/01/2019 14:20	04/02/2019 14:30
19/02/2019 09:50	15/04/2019 09:24	04/02/2019 18:20	04/02/2019 18:00	04/02/2019 16:10	19/02/2019 12:10
04/03/2019 09:30	02/05/2019 16:00	18/02/2019 14:50	18/02/2019 14:30	19/02/2019 14:30	04/03/2019 11:00
19/03/2019 09:30	20/05/2019 09:17	01/03/2019 15:40	01/03/2019 15:10	04/03/2019 14:30	19/03/2019 12:09
01/04/2019 09:11	03/06/2019 10:09	20/03/2019 14:42	20/03/2019 14:18	19/03/2019 15:21	01/04/2019 11:53
16/04/2019 09:53	18/06/2019 10:20	02/04/2019 14:27	02/04/2019 14:05	01/04/2019 14:30	16/04/2019 12:21
03/05/2019 09:48	02/07/2019 09:33	15/04/2019 14:28	15/04/2019 14:07	16/04/2019 14:53	03/05/2019 12:46
21/05/2019 10:22	17/07/2019 09:15	02/05/2019 15:58	02/05/2019 15:27	03/05/2019 15:33	21/05/2019 13:31
13/06/2019 11:47	01/08/2019 10:16	20/05/2019 15:03	20/05/2019 14:40	21/05/2019 17:21	19/06/2019 14:37
19/06/2019 10:50	02/09/2019 09:32	03/06/2019 16:36	03/06/2019 16:10	04/06/2019 15:36	03/07/2019 11:43
03/07/2019 09:03	16/09/2019 10:39	18/06/2019 16:22	18/06/2019 15:43	03/07/2019 13:53	18/07/2019 12:16
18/07/2019 09:29	04/10/2019 09:21	02/07/2019 14:38	02/07/2019 14:16	18/07/2019 14:20	02/08/2019 11:46
02/08/2019 09:08	21/10/2019 09:26	17/07/2019 14:25	17/07/2019 14:05	02/08/2019 13:35	21/08/2019 14:25
21/08/2019 11:56	04/11/2019 09:58	01/08/2019 14:39	01/08/2019 14:19	21/08/2019 16:12	03/09/2019 11:44
03/09/2019 09:06	18/11/2019 09:47	21/08/2019 17:04	21/08/2019 16:46	03/09/2019 13:51	18/09/2019 12:16
18/09/2019 09:32	02/12/2019 10:09	02/09/2019 14:34	02/09/2019 14:11	18/09/2019 14:19	07/10/2019 15:06
07/10/2019 11:47	16/12/2019 10:03	16/09/2019 14:55	16/09/2019 14:35	07/10/2019 16:25	22/10/2019 12:53
22/10/2019 10:01	08/01/2020 09:30	04/10/2019 14:45	04/10/2019 14:23	22/10/2019 14:39	05/11/2019 12:14
05/11/2019 09:33	23/01/2020 09:58	21/10/2019 14:27	21/10/2019 14:06	05/11/2019 14:19	21/11/2019 13:55
21/11/2019 10:11	03/02/2020 10:16	04/11/2019 15:22	04/11/2019 15:00	21/11/2019 15:25	03/12/2019 13:25
03/12/2019 08:55	17/02/2020 09:41	18/11/2019 14:44	18/11/2019 15:07	03/12/2019 14:57	17/12/2019 13:42
17/12/2019 10:12	02/03/2020 09:53	02/12/2019 15:56	02/12/2019 15:29	17/12/2019 15:14	07/01/2020 11:57
07/01/2020 09:30	17/03/2020 10:10	16/12/2019 15:18	16/12/2019 14:53	07/01/2020 14:11	21/01/2020 13:17
21/01/2020 10:27	01/04/2020 09:38	08/01/2020 15:21	08/01/2020 14:56	21/01/2020 15:13	10/02/2020 11:58
10/02/2020 09:29	17/04/2020 09:26	23/01/2020 14:58	23/01/2020 14:44	10/02/2020 14:53	25/02/2020 12:23
25/02/2020 09:52	05/05/2020 10:06	04/02/2020 14:58	04/02/2020 14:06	25/02/2020 14:35	10/03/2020 11:50
10/03/2020 09:21	19/05/2020 09:42	17/02/2020 14:10	17/02/2020 13:45	10/03/2020 14:03	24/03/2020 12:08
24/03/2020 09:37	02/06/2020 09:44	03/03/2020 14:08	03/03/2020 13:41	24/03/2020 14:08	06/04/2020 11:34
06/04/2020 09:18	16/06/2020 09:38	18/03/2020 11:43	18/03/2020 11:23	06/04/2020 13:47	22/04/2020 11:39

22/04/2020 09:10	02/07/2020 09:23	02/04/2020 14:22	02/04/2020 13:59	22/04/2020 13:54	04/05/2020 13:08
04/05/2020 09:23	21/07/2020 09:30	17/04/2020 14:45	17/04/2020 14:23	04/05/2020 15:02	20/05/2020 07:25
18/05/2020 10:53		04/05/2020 16:10	04/05/2020 15:49	18/05/2020 16:06	04/06/2020 12:09
04/06/2020 09:26		19/05/2020 16:18	19/05/2020 15:46	04/06/2020 14:31	19/06/2020 12:02
19/06/2020 09:33		03/06/2020 15:00	03/06/2020 14:40	19/06/2020 13:45	01/07/2020 12:04
01/07/2020 09:33		16/06/2020 15:19	16/06/2020 14:51	01/07/2020 14:04	22/07/2020 13:26
22/07/2020 10:16		02/07/2020 15:03	02/07/2020 14:46	22/07/2020 15:35	
		21/07/2020 15:15	21/07/2020 14:55		

Prélèvements hors crue (fin de projet) par Hydriad et analyses par le laboratoire Carso

Arc	Berre	Lez	Mosson	Salaison	Vidourle
26/06/2020 16:30	25/06/2020 15:15	13/06/2020 15:30	13/06/2020 14:30	26/06/2020 13:30	13/06/2020 18:00
02/07/2020 11:15			26/06/2020 12:15	02/07/2020 14:30	14/06/2020 15:00
08/07/2020 09:15			02/07/2020 13:20	08/07/2020 14:30	

11. Annexe 2 : Dates d'échantillonnage du suivi spécifique de l'étude 'crues'

Prélèvements par Hydriad et analyses par le laboratoire Carso

Arc	Berre	Lez	Mosson	Salaison	Vidourle
04/10/2015 09:30	13/10/2016 09:00	03/11/2015 10:00	03/10/2015 12:25	03/11/2015 12:30	13/10/2015 08:00
28/02/2016 16:30	13/10/2016 09:45	03/11/2015 14:00	03/10/2015 17:00	03/11/2015 15:40	13/10/2015 11:00
02/10/2016 08:30	13/10/2016 11:00	03/11/2015 16:50	04/10/2015 12:00	28/02/2016 09:30	13/10/2015 17:00
22/11/2016 11:00	28/01/2017 10:20	04/11/2015 10:00	28/02/2016 11:00	05/04/2016 08:15	04/11/2015 08:15
22/11/2016 13:15	14/02/2017 10:38	04/11/2015 16:40	05/04/2016 13:00	05/04/2016 17:00	04/11/2015 17:45
22/11/2016 17:30	14/02/2017 14:00	28/02/2016 11:45	14/09/2016 13:30	13/10/2016 08:50	05/11/2015 09:00
25/03/2017 19:00	14/02/2017 16:30	05/04/2016 11:30	14/09/2016 18:15	13/10/2016 10:00	28/02/2016 08:00
26/03/2017 09:00	09/04/2018 08:00	05/04/2016 17:45	13/10/2016 11:45	14/10/2016 09:00	28/02/2016 18:30
05/11/2017 11:50	11/04/2018 10:45	14/09/2016 12:45	14/10/2016 08:15	25/03/2017 12:45	05/04/2016 14:30
12/04/2018 10:30	11/04/2018 16:00	14/09/2016 17:05	14/10/2016 13:30	25/03/2017 17:00	05/04/2016 20:00
11/10/2018 08:15	11/04/2018 18:15	14/09/2016 18:45	28/01/2017 11:50	05/11/2017 08:10	14/10/2016 12:30
11/10/2018 10:10	09/10/2018 13:15	25/03/2017 10:00	29/01/2017 15:15	08/01/2018 12:00	14/10/2016 19:00
15/10/2019 14:05	10/10/2018 14:00	25/03/2017 15:00	05/11/2017 07:30	08/01/2018 17:55	15/10/2016 09:00
15/10/2019 15:05	15/10/2018 11:45	05/11/2017 07:05	08/01/2018 11:15	27/01/2018 09:45	27/01/2017 14:30
15/10/2019 18:05	15/10/2018 14:00	08/01/2018 10:50	08/01/2018 16:50	06/02/2018 09:42	28/01/2017 12:30
24/10/2019 10:30	23/10/2019 09:10	08/01/2018 17:15	14/01/2018 12:15	08/02/2018 09:40	29/01/2017 13:45
24/10/2019 17:45	23/10/2019 11:45	27/01/2018 10:15	14/01/2018 14:15	02/03/2018 10:00	30/01/2017 15:50
23/11/2019 10:15	22/01/2020 11:40	28/01/2018 09:20	15/01/2018 07:56	02/03/2018 13:15	12/05/2017 10:00
23/11/2019 18:10	22/01/2020 14:38	02/03/2018 09:25	06/02/2018 11:15	03/03/2018 10:00	14/05/2017 10:00
24/11/2019 10:10	21/04/2020 15:30	03/03/2018 09:15	02/03/2018 08:30	01/11/2018 08:04	05/11/2017 10:45
	22/04/2020 08:15	01/11/2018 07:15	02/03/2018 12:00	01/11/2018 15:10	05/11/2017 12:45
	22/04/2020 14:00	01/11/2018 14:40	03/03/2018 08:30	23/10/2019 15:35	05/11/2017 14:50
		07/04/2019 10:00	07/04/2019 09:05	23/10/2019 19:05	09/01/2018 09:05
		23/10/2019 14:10	26/01/2020 07:55	23/11/2019 12:15	10/01/2018 17:40
		23/10/2019 18:45	26/01/2020 10:20	26/01/2020 08:40	27/01/2018 08:10
		23/11/2019 13:05	26/01/2020 14:10	26/01/2020 10:55	28/01/2018 08:40
		26/01/2020 08:20			06/02/2018 08:43
		26/01/2020 13:40			06/02/2018 13:05
					08/02/2018 10:30
					01/11/2018 08:53
					01/11/2018 15:55
					02/11/2018 07:55
					09/11/2018 15:15
					09/11/2018 21:45
					10/11/2018 08:40
					26/04/2019 10:00
					26/04/2019 12:25
					27/04/2019 09:30
					23/11/2019 09:50
					23/11/2019 16:45
					28/04/2020 09:15
					28/04/2020 13:15

12. Annexe 3 : Application de la méthode d'estimation des flux hydriques sur vingt bassins versants méditerranéens

La section 2.2 a proposé une approche hydro-météorologique simplifiée pour estimer les flux hydriques prenant place sur un bassin versant. Cette approche a été appliquée aux six tributaires étudiés. La section 2.2 a présenté la méthode et la comparaison des cumuls des flux mesurés sur les stations hydrométriques avec les cumuls des pluies efficaces calculées sur chaque bassin versant et déduction faite des prélèvements (connus) exercés sur le bassin versant.

Cette approche a été appliquée aux principaux fleuves et tributaires de lagunes de la façade méditerranéenne métropolitaine (hors Aude et Rhône en raison de leurs tailles et de leurs fonctionnements hydro-climatiques différents) afin d'en tester la pertinence. Le Tableau 29 présente les 20 cours d'eau (fleuves et tributaires de lagunes) traités, incluant les six tributaires faisant l'objet du présent rapport.

Cours d'eau	Départements	Superficie (km ²)	Station hydrométrique	Stations météorologiques
Tech	Pyrénées orientales	729	Argelès	Cap Bear, Tech SPC
Têt	Pyrénées orientales	1338	Perpignan	Vinça, Perpignan, Formiguères, Tech SPC
Agly	Aude, Pyr. Or.	1100	Rivesaltes	Vinça, Perpignan
Berre	Aude	225	Portel des C.	Durban, Portel
Orb	Aveyron, Hérault	1330	Béziers	Les Plans, Olargues, Béziers
Hérault	Gard, Hérault	2550	Agde	Le Vigan, St-Jean-Buèges, Clermont l'Hérault, Servian
Mosson	Hérault	306	St-Jean-de-Védas	Montarnaud, Fabrègues
Lez	Hérault	170	Lattes	Prades le Lez
Salaison	Hérault	50.8	Mauguio	Prades le Lez
Vidourle	Gard	770	Gallargues	St-Hippolyte du Fort, Saint-Nazaire-Canaules, Villevieille
Vistre	Gard	490	Le Caïlar	Nîmes
Touloubre	Bouches du Rhône	400	Cornillon / La Barben	Salon de Provence
Arc	Bouches du Rhône	728	Berre l'Etang	Aix en Provence
Huveaune	Bouche du Rhône	245	Aubagne	Aubagne
Gapeau	Var	517	Hyères	Cuers, Hyères
Gisclé	Var	65.8	Cogolin	Cogolin
Argens	Var	2530	Roquebrune	La Celle, Le Luc
Siagne	Var, Alpes maritimes	515	Pégomas	St-Cézaire sur Siagne
Loup	Alpes maritimes	279	Villeneuve-Loubet	Caussols
Var	Alpes H. Provence Alpes maritimes	2820	Nice (Carros)	St-Etienne de Tinée, Isola, Rimplas, St-Martin-Vésubie, Levens, Puget-Théniers, St-Martin d'Entraunes

Tableau 29 : Bassins versants étudiés de la façade méditerranéenne métropolitaine

La taille des 20 bassins versants varie de 20.8 km² à 2820 km². Les géologies concernées sont également très variées : bassin sédimentaire du Roussillon, formations calcaires du Languedoc, formations cristallines de la bordure PACA, formations schisteuses du Var.

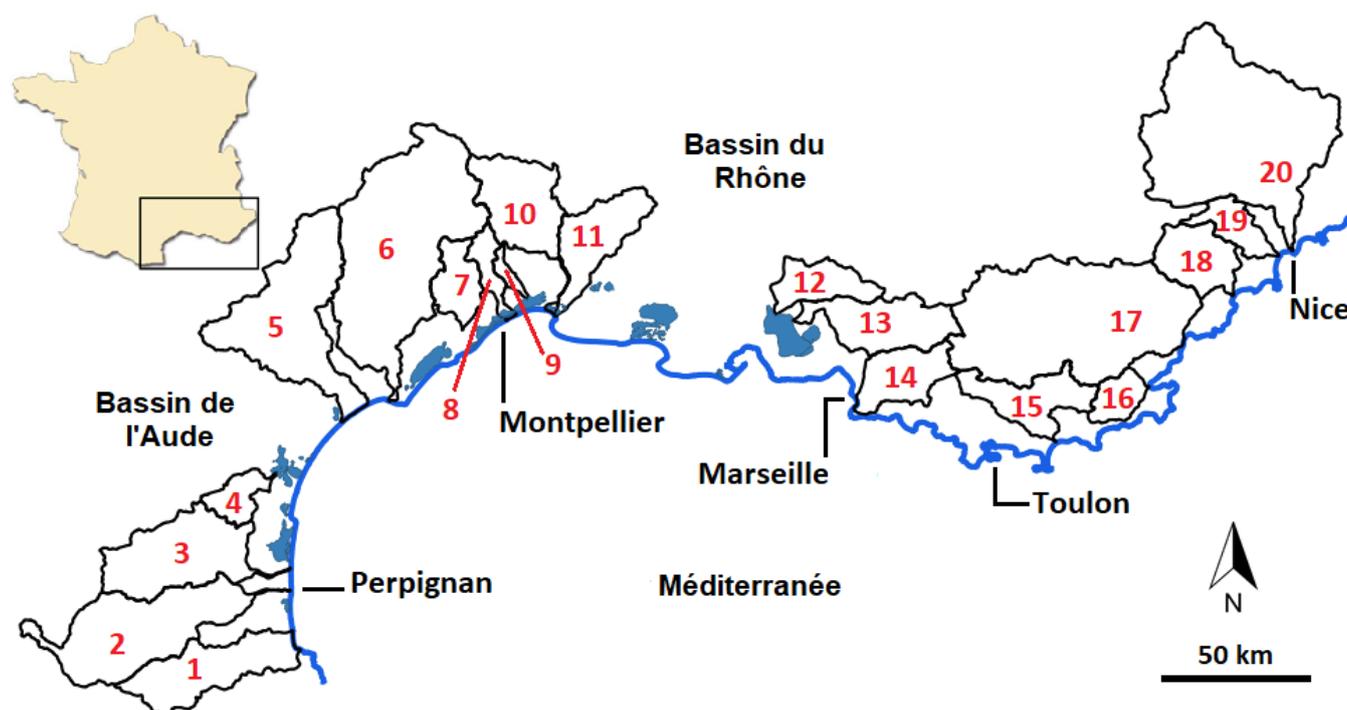


Figure 241 : Bassins versants utilisés pour le test de la méthode d'estimation des flux hydriques

Sur toutes les figures suivantes, la courbe noire représente le cumul des débits mesurés à la station hydrométrique implanté à (ou proche de) l'exutoire du bassin versant. La courbe bleue correspond au cumul des précipitations efficaces calculées en tenant compte des précipitations décadaires, des valeurs d'évapotranspiration potentielle et des réserves utiles des sols représentatives des bassins versants. La courbe rouge représente la différence cumulée des précipitations efficaces et des volumes de prélèvements déclarés (disponibles sur la banque nationale BNPE). Les années considérées vont d'août 2011 à juillet 2020 (en fonction de la disponibilité des données des volumes prélevés).

Ces graphiques permettent d'analyser plusieurs informations :

- Réactivité du bassin versant aux épisodes intenses de pluies ; une courbe en « marches d'escalier » indique un BV très réactif où les écoulements sont dominés par le ruissellement ; à l'inverse une courbe très régulière est caractéristique d'un bassin versant dominé par les écoulements souterrains (écoulement de base selon la terminologie hydrologique) ;
- Importance relative des prélèvements par rapport aux volumes des précipitations efficaces ; cette importance est appréciée par les hauteurs respectives des courbes rouge et bleue ; si ces deux courbes sont proches, voire confondues, c'est que les prélèvements sont proportionnellement faibles ;
- Représentativité de la station hydrométrique ; si les courbes rouge et noire sont proches, c'est que le fonctionnement hydrologique du bassin versant est conforme à l'extension du BV et que la station hydrométrique représente bien l'intégralité des écoulements y prenant place à l'exutoire du BV ;
- Importance relative des échanges extérieurs au profit ou au détriment du BV ; les limites du BV considérées (ligne de crêtes) peuvent ne pas représenter de façon adéquate le bassin de fonctionnement hydrologique, à cause de la composante souterraine des écoulements ; des apports amont ou latéraux peuvent être contribués par les aquifères ; de même, une partie des écoulements aval peut se faire de manière souterraine et donc ne pas être observée à la station hydrométrique.

Ces différentes composantes seront analysées de façon synthétique pour les 20 cours d'eau.

La Figure 242 compare, pour le bassin versant du Tech, les courbes cumulées des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés. Les constats suivants sont faits :

- Le bassin versant présente une réactivité modérée aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est un peu moins marquée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont proches, indiquant une importance relative assez faible des prélèvements.
- Les débits mesurés cumulés sont plus importants que les pluies efficaces nettes cumulées. Cette différence provient principalement d'une mauvaise connaissance de la pluviométrie tombant sur les reliefs pyrénéens (peu ou pas de station météorologique sur les reliefs).

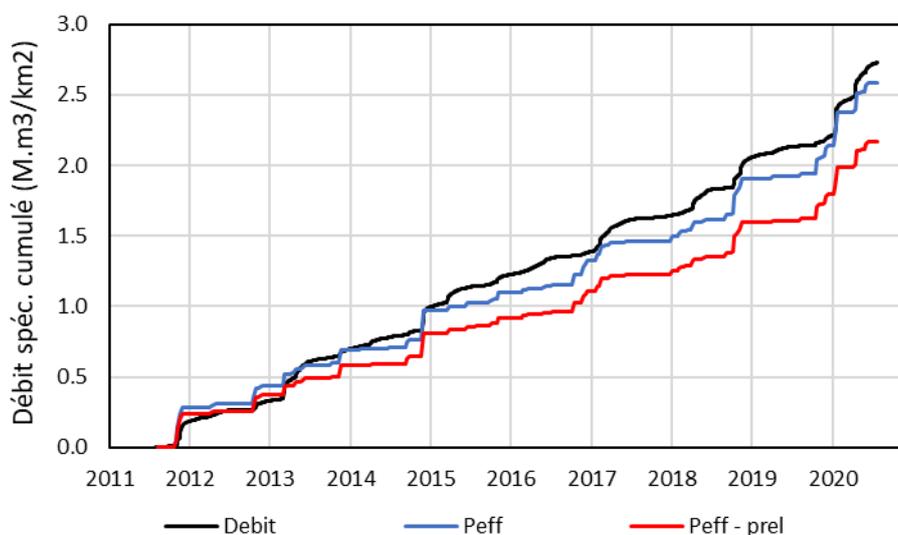


Figure 242 : Comparaison sur le Tech des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 243 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de la Têt :

- Le bassin versant présente une réactivité très modérée aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est bien moins marquée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une importance relative modérée des prélèvements.
- Les débits mesurés cumulés sont plus importants que les pluies efficaces nettes cumulées. Cette différence provient principalement d'une mauvaise connaissance de la pluviométrie tombant sur les reliefs pyrénéens (peu ou pas de station météorologique sur les reliefs).

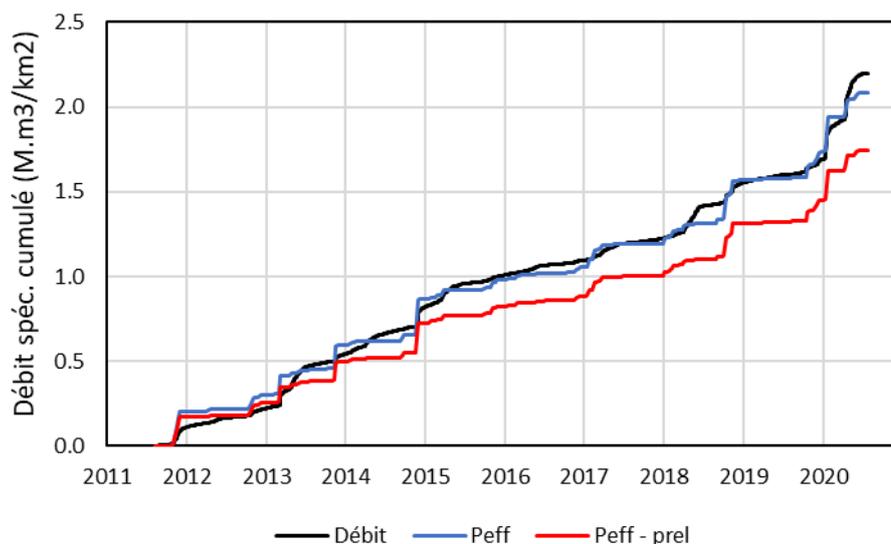


Figure 243 : Comparaison sur la Têt des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 244 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Agly :

- Le bassin versant présente une réactivité assez marquée aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est presque aussi marquée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont très proches, indiquant une importance relative faible des prélèvements.
- Les débits mesurés cumulés sont quasi identiques aux pluies efficaces nettes cumulées. Ceci indique que les écoulements observés sur le BV correspondent bien aux précipitations tombant sur celui-ci.

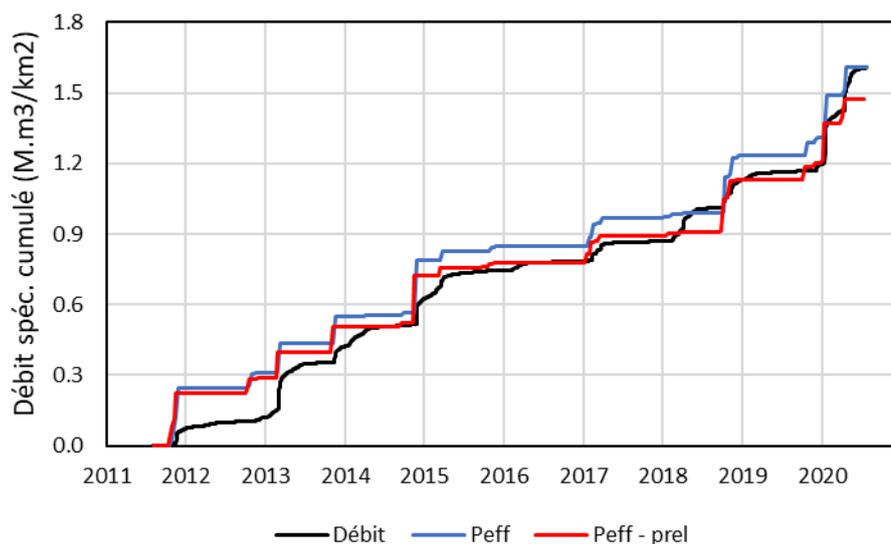


Figure 244 : Comparaison sur l'Agly des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 245 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de la Berre :

- Le bassin versant présente une réactivité assez marquée aux épisodes intenses de pluie, mais avec des augmentations moins marquées sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont confondues, indiquant de très faibles prélèvements.
- Les débits mesurés cumulés sont 2.5 fois plus faibles que le cumul des pluies efficaces nettes. Ceci indique que les écoulements observés sur le BV ne correspondent pas aux précipitations tombant sur le BV. Ce déficit d'écoulement pourrait correspondre à des écoulements souterrains de type karstique. De nombreuses résurgences karstiques d'importance sont observées sur le littoral (telles celles localisées en bordure de l'Etang de La Palme, cumulant 19 M.m³/an), sans que leur provenance (lieux des pertes amont) n'ait été précisée à ce jour.

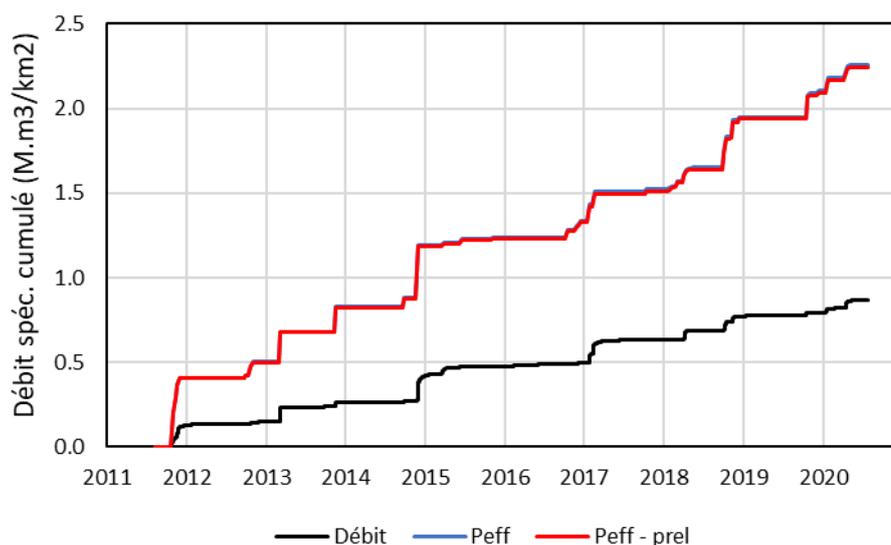


Figure 245 : Comparaison sur la Berre des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 246 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Orb :

- Le bassin versant présente une réactivité plus ou moins marquée aux épisodes intenses de pluie, malgré l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité est assez semblable sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire et sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont très proches, indiquant une importance relative faible des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est quasi identique aux courbes des pluies efficaces brutes ou nettes cumulées, indiquant que les écoulements observés sur le BV correspondent bien aux précipitations tombant sur celui-ci.

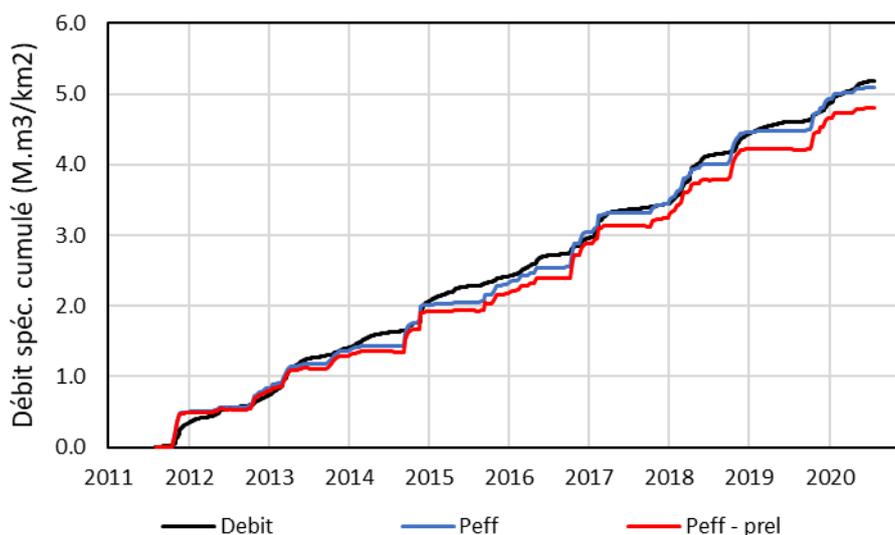


Figure 246 : Comparaison sur l'Orb des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 247 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Hérault :

- Le bassin versant présente une réactivité plus ou moins marquée aux épisodes intenses de pluie, malgré l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité est assez semblable sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire et sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont proches, indiquant une importance relative faible des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est plus faible que celles calculées à partir des pluies efficaces nettes. Une partie des écoulements ne transite donc pas par la station hydrométrique. Cette différence est expliquée d'une part par la contribution du BV amont à l'alimentation de la source du Lez (57 M.m³/an) et pertes aval au profit de la nappe de la plaine alluviale (97 M.m³/an selon le Schéma Directeur de la ressource en eau du bassin de l'Hérault de CEREG, 2015).

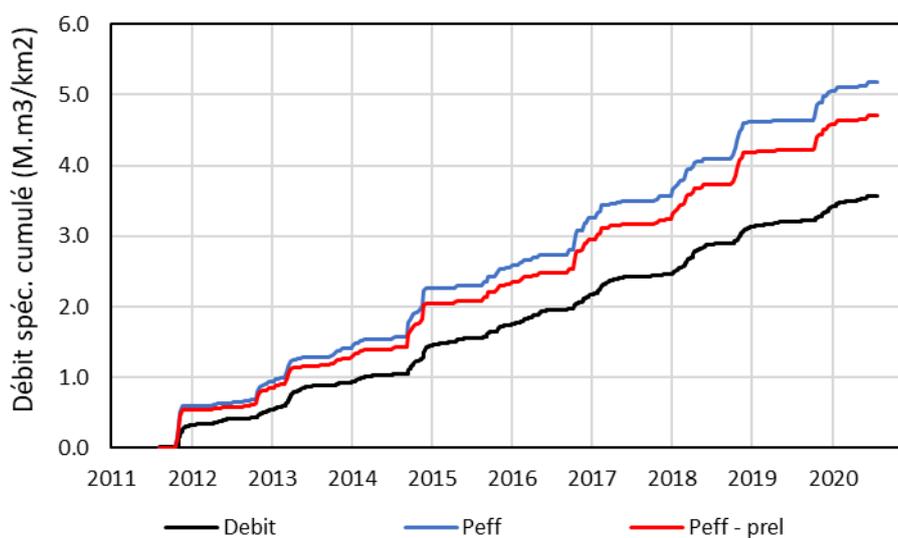


Figure 247 : Comparaison sur l'Hérault des cumuls des débits mesurés (station d'Agde), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La prise en compte des débits de la station hydrométrique de Montagnac (Figure 248) montre (par comparaison à la Figure 247) l'effet des pertes alimentant la plaine alluviale aval (entre Montagnac et Agde).

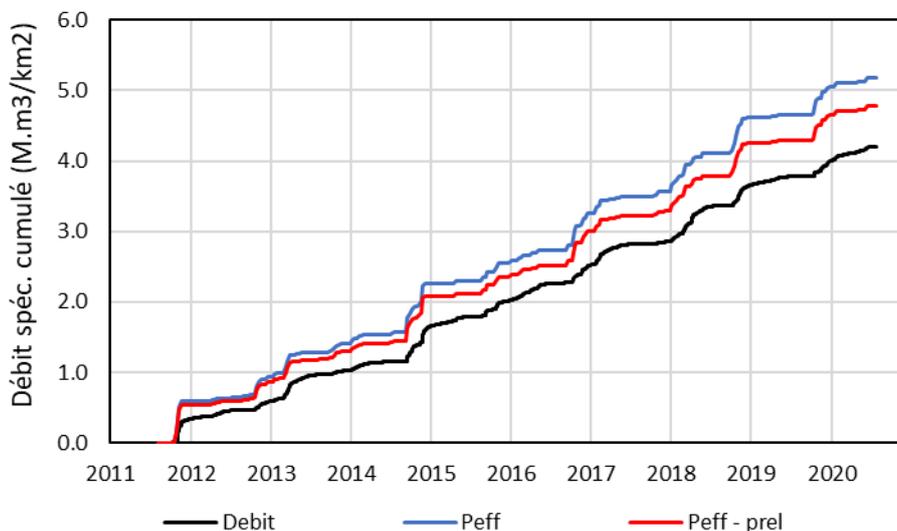


Figure 248 : Comparaison sur l'Hérault des cumuls des débits mesurés (station de Montagnac), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 249 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de la Mosson :

- Le bassin versant présente une réactivité assez peu marquée aux épisodes intenses de pluie, malgré l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité est beaucoup plus amortie sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont très différentes, indiquant une importance relative des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est beaucoup plus faible que celles des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci indique qu'une part importante des écoulements prenant place dans le BV ne sont pas observés à son exutoire.

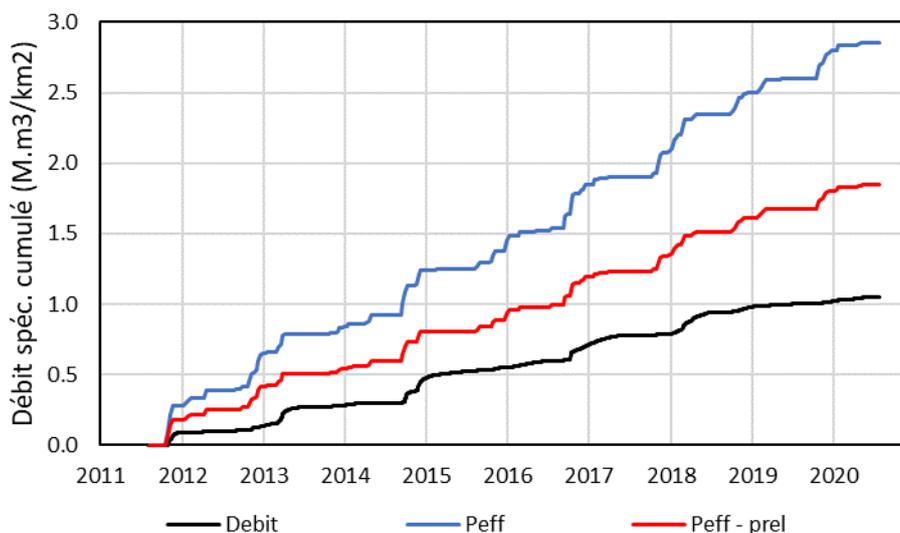


Figure 249 : Comparaison sur la Mosson des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

Ceci peut correspondre à des écoulements souterrains, soit de type karstique, soit de type paléo-vallée profonde. Des traçages ont démontré le transfert d'eau depuis le bassin versant de la Mosson vers celui de l'étang de Thau. L'ensemble des émergences karstiques correspondantes totaliserait entre 95 et 125 M.m³/an.

La Figure 250 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Lez :

- Le bassin versant présente une réactivité assez amortie aux épisodes intenses de pluie, malgré l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité est en effet plus amortie sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une importance relative des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est beaucoup plus forte que celles des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci indique qu'une part importante des écoulements provient de l'extérieur du BV ou que le fonctionnement hydrologique favorise les ruissellements. Les raisons qui peuvent être évoquées pour expliquer ces différences sont les suivantes : (1) contribution de la Source du Lez alimentée par un bassin situé pour partie en amont du BV du Lez, (2) soutien d'étiage au Lez effectué à partir des eaux du canal du Bas-Rhône-Languedoc, (3) exacerbation du ruissellement en temps de pluie intense du fait de l'imperméabilisation urbaine des surfaces.

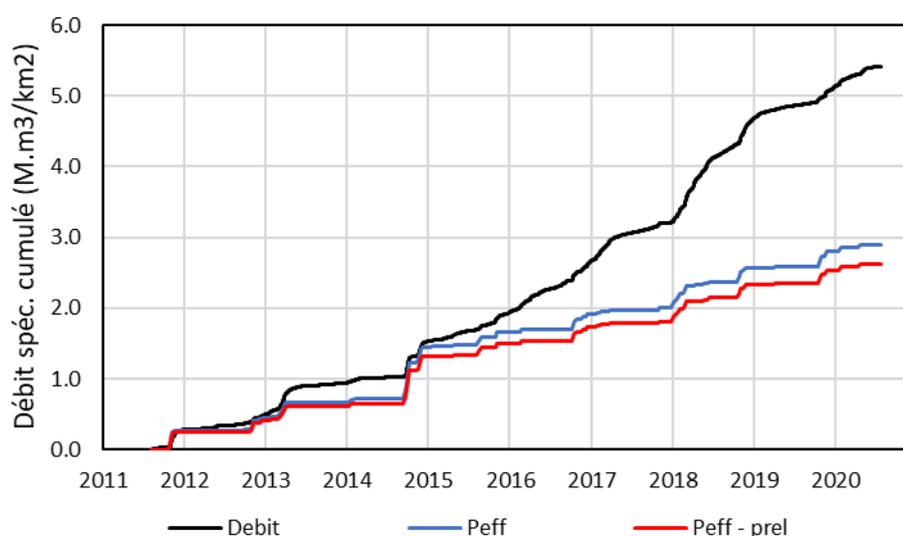


Figure 250 : Comparaison sur le Lez des cumuls des débits mesurés (station de Lattes), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 251 présente les courbes cumulées utilisant la station de Montpellier – Garigliano. On remarque que la courbe cumulée des débits mesurés est moins élevée et 'déformée' que sur la figure précédente. La courbe noire ressemble beaucoup aux courbes bleue et rouge calculées à partir de la pluie. Cette courbe noire semble appuyer une exacerbation du ruissellement en contexte urbain (surfaces imperméabilisées).

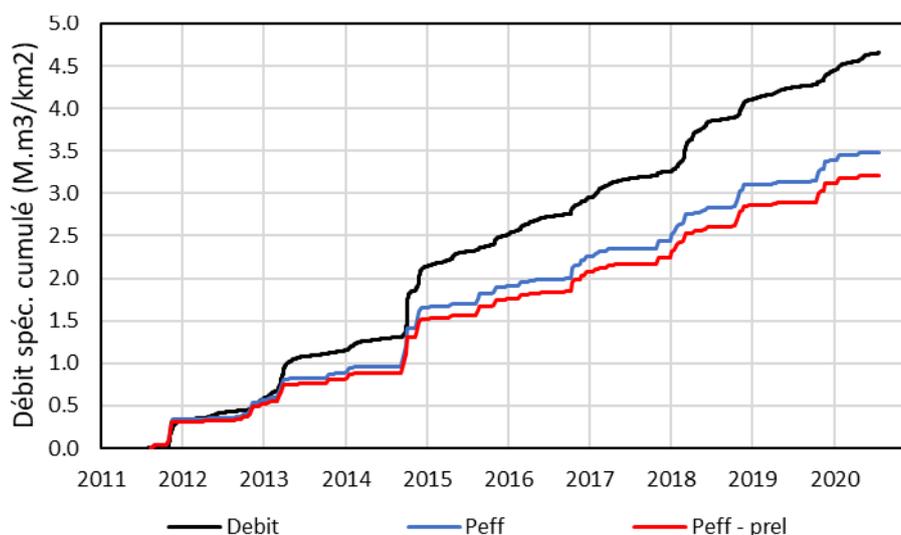


Figure 251 : Comparaison sur le Lez des cumuls des débits mesurés (station de Montpellier - Garigliano), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 252 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Salaison :

- Le bassin versant présente une réactivité assez marquée aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est presque aussi marquée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une faible importance relative des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est légèrement plus faible que celle des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci pourrait correspondre à des écoulements souterrains de subsurface arrivant de façon diffuse à l'étang. Les travaux de Marine DAVID (2019) ont montré qu'une part significative des apports du Salaison à la lagune de l'étang de l'Or se fait en effet au contact immédiat avec la lagune, donc en aval de la station hydrométrique. La différence entre les courbes noire et rouge permet d'évaluer ces apports aval.

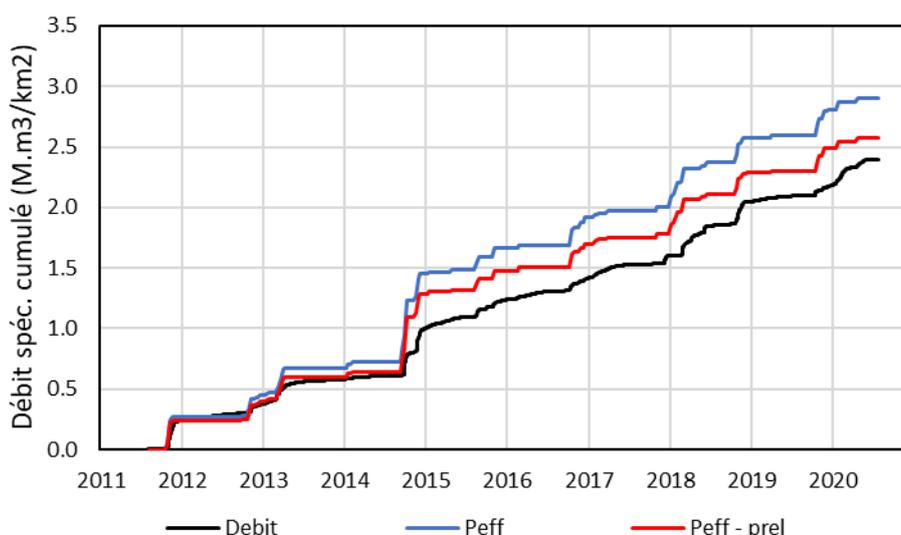


Figure 252 : Comparaison sur le Salaison des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 253 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Vidourle :

- Le bassin versant présente une réactivité marquée aux épisodes intenses de pluie, reflétant bien l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité est semblable sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire et sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont très proches, indiquant une importance relative faible des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est quasi identique à la courbe des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci indique que les écoulements observés sur le BV correspondent bien aux précipitations tombant sur celui-ci.

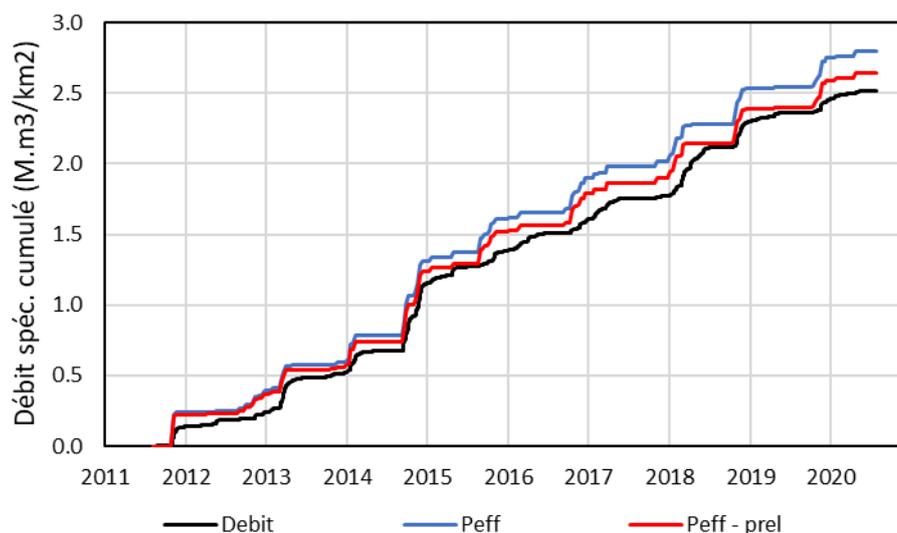


Figure 253 : Comparaison sur le Vidourle des cumuls des débits mesurés (station de Gallargues), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 254 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Vistre :

- Le bassin versant montre très peu de réactivité aux épisodes intenses de pluie, malgré l'importance exceptionnelle de certains de ces épisodes. Cette réactivité très différente de cette observable sur la courbe des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une importance relative modérée des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est plus élevée que celle des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci correspond à la contribution souterraine des reliefs calcaires présents au Nord du BV du Vistre. Cette contribution est connue mais n'a jamais été quantifiée. Elle peut s'exercer de façon diffuse (écoulement de type fissural dans les calcaires) ou localisée (écoulement karstique comme à la Fontaine de Nîmes). Elle est estimée entre 10 et 17 M.m³/s selon le Plan d'Aménagement et de Gestion Durable (PAGD) 2020 du SAGE Vistre, Nappes Vistrenque et Costières rédigé par l'EPTB Vistre Vistrenque.

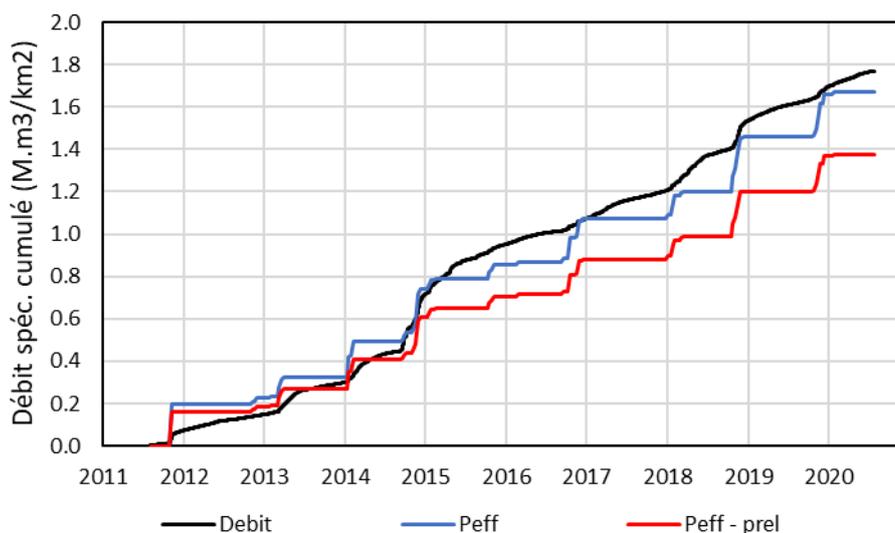


Figure 254 : Comparaison sur le Vistre des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 255 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de la Touloubre :

- Le bassin versant ne présente aucune réactivité aux épisodes intenses de pluie. La courbe cumulée des débits est très régulière, sans comparaison avec la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont assez distantes, indiquant une certaine importance des prélèvements (environ 25% des pluies efficaces).
- Les débits mesurés cumulés sont deux fois plus importants que les pluies efficaces nettes cumulées, indiquant un apport d'eau depuis l'extérieur du BV. De fait, un apport d'eau de 86 M-m³/an est attribué aux excès d'irrigation prenant place dans la plaine de Salon-de-Provence selon le Diagnostic 2008 de la Gestion quantitative de la ressource en eau de la Région PACA (DREAL PACA et Agence de l'eau RMC).

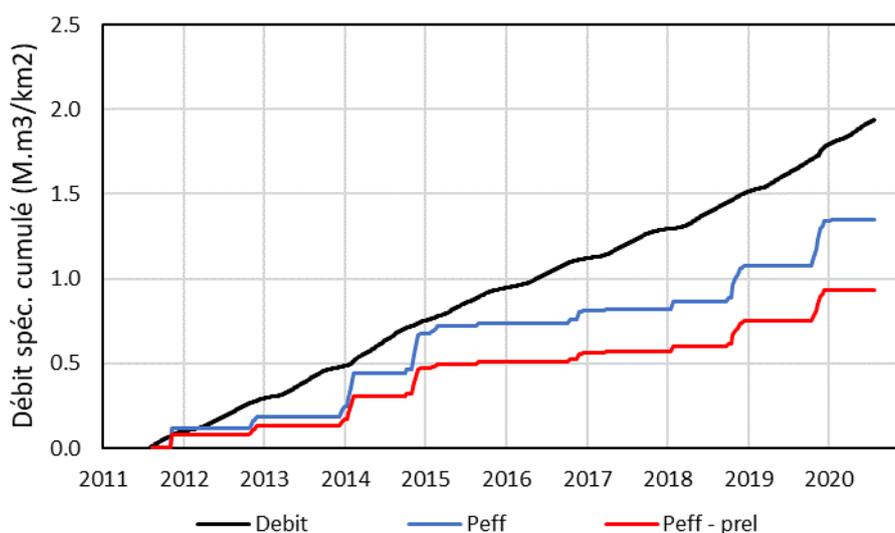


Figure 255 : Comparaison sur la Touloubre des cumuls des débits mesurés à Cornillon, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 256 présente les courbes cumulées utilisant la station de La Barben. On remarque que la courbe cumulée des débits mesurés est très différente de celle de la figure précédente et plus faible que celle calculées à partir des pluies. Ceci peut être attribué aux pertes karstiques alimentant les diverses

sources (dont certains sous-marines) situées en aval. Le débit cumulé de ces émergences est estimé à 17 M.m³/an selon l'Etude préalable sur le drainage des karsts littoraux de Gilli (2002).

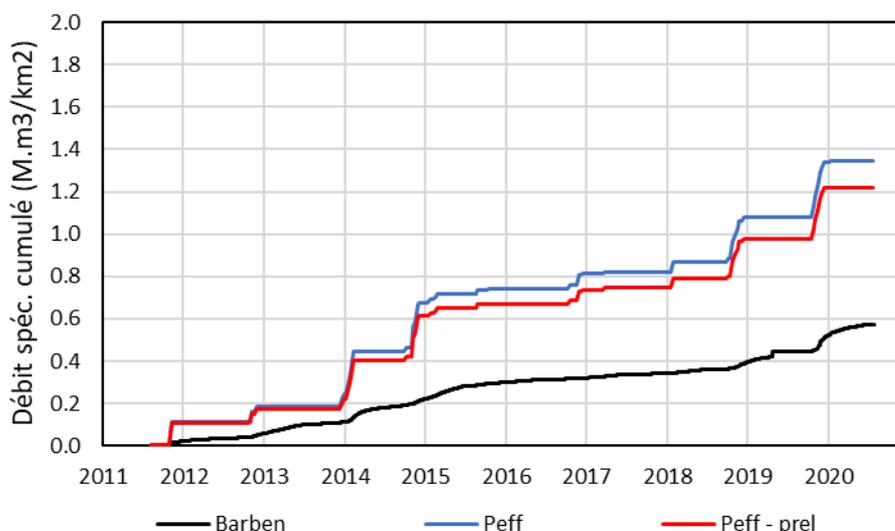


Figure 256 : Comparaison sur la Touloubre des cumuls des débits mesurés à La Barben, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 257 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Arc :

- Le bassin versant présente une faible réactivité aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est beaucoup plus lissée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces. Ceci semble souligner le rôle des écoulements souterrains.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une importance relative des prélèvements (de 15 %).
- La courbe des débits mesurés cumulés est très semblable à celle des pluies efficaces nettes cumulées.

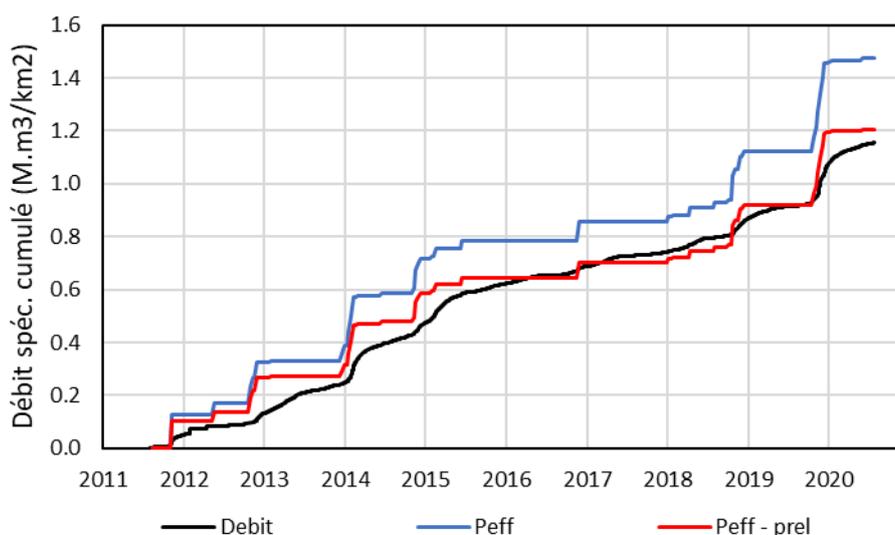


Figure 257 : Comparaison sur l'Arc des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 258 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Huveaune :

- Le bassin versant présente une faible réactivité aux épisodes intenses de pluie. Cette réactivité est beaucoup plus lissée sur la courbe cumulée des débits mesurés à l'exutoire que sur la courbe cumulée des pluies efficaces. Ceci semble souligner le rôle des écoulements souterrains.
- Les courbes bleue et rouge sont assez proches, indiquant une importance relative des prélèvements (de 15 %).
- La courbe des débits mesurés cumulés est plus faible que celle des pluies efficaces nettes cumulées. Ceci correspond pour partie aux débits des sources karstique sous-marine de Port-Miou. Les pertes correspondantes estimées sur le bassin versant de l'Huveaune serait de 16 à 32 M.m³/an selon le rapport BRGM/68-SGL-166-PRC (Glantzboeckel et al. 1968).

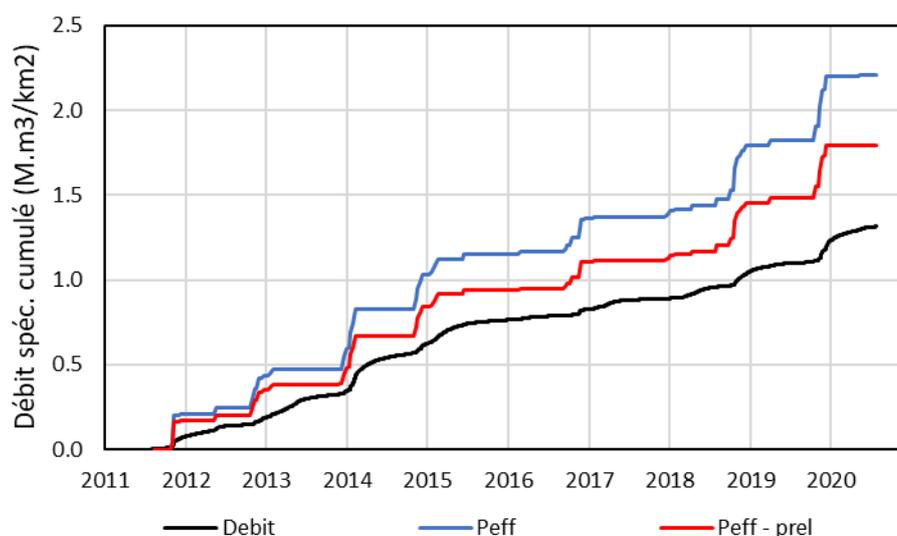


Figure 258 : Comparaison sur l'Huveaune des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 259 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Gapeau :

- Le bassin versant présente une réactivité assez marquée aux épisodes intenses de pluie, mais légèrement plus lissée que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont très proches, indiquant une importance relative très faible des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est quasi identique aux courbes des pluies efficaces brutes ou nettes cumulées. Ceci indique que les écoulements observés sur le BV correspondent bien aux précipitations tombant sur celui-ci.

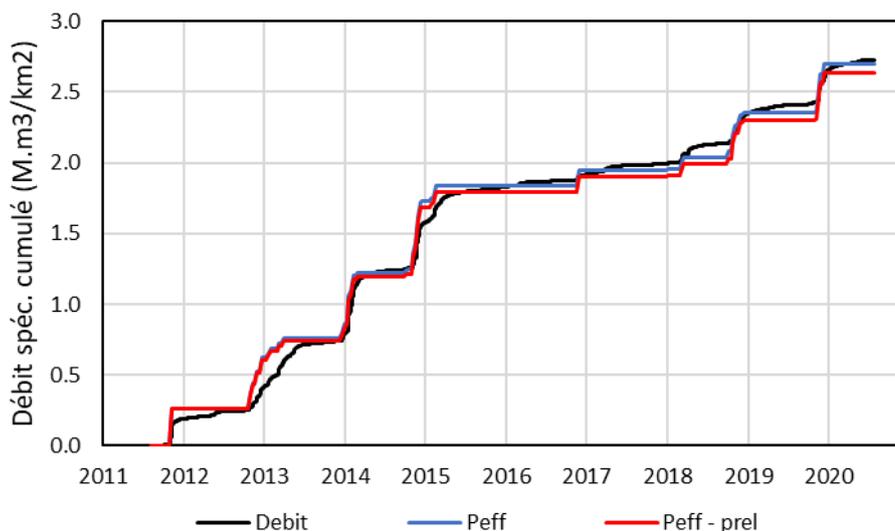


Figure 259 : Comparaison sur le Gapeau des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 260 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Gisclé :

- Le bassin versant présente une réactivité assez marquée aux épisodes intenses de pluie, même si légèrement plus lissée que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont distinctes, indiquant une importance relative des prélèvements (d'environ 20%).
- La courbe des débits mesurés cumulés est quasi identique à la courbe des pluies efficaces nettes cumulées.

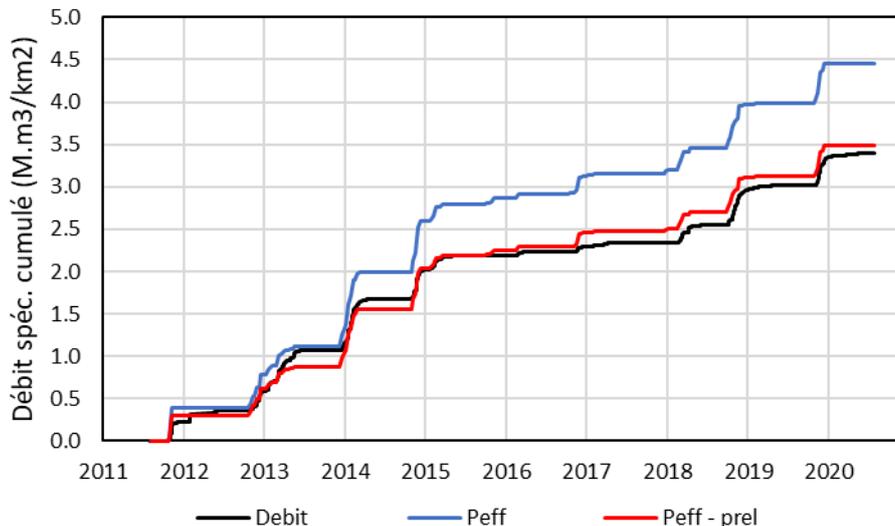


Figure 260 : Comparaison sur le Gisclé des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 261 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de l'Argens :

- Le bassin versant présente une réactivité assez faible aux épisodes intenses de pluie, bien plus faible qu'exprimée sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont peu différentes, indiquant une faible importance relative des prélèvements (d'environ 10%).
- La courbe des débits mesurés cumulés est proche de la courbe des pluies efficaces nettes cumulées.

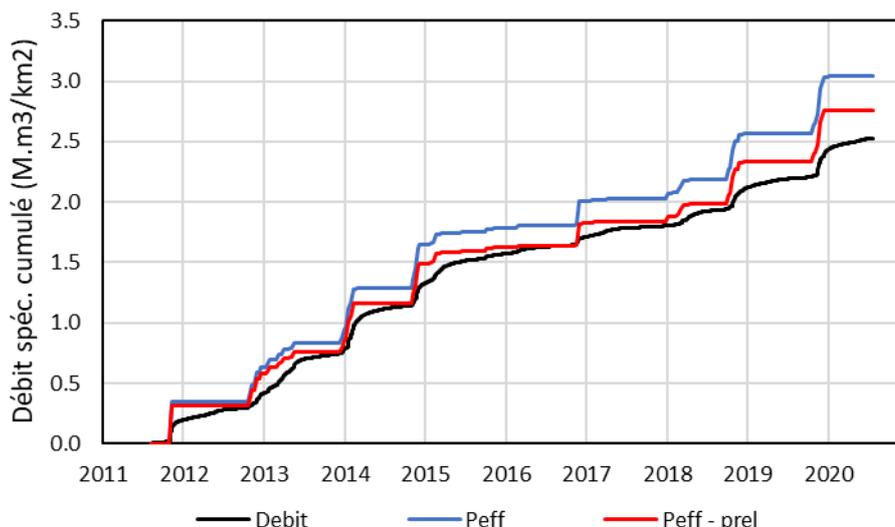


Figure 261 : Comparaison sur l'Argens des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 262 présente les courbes cumulées pour le bassin versant de la Siagne :

- Le bassin versant présente une assez bonne réactivité aux épisodes intenses de pluie, un peu plus lissée que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont un peu différentes, indiquant une importance relative plutôt faible des prélèvements (d'environ 15%).
- La courbe des débits mesurés cumulés est plus forte que la courbe des pluies efficaces nettes cumulées. Cette différence correspond aux sources karstiques situées à l'amont du bassin versant dont les apports proviennent de l'extérieur du BV. Le débit cumulé de ces sources est estimé à 117 M.m³/s selon le dossier préliminaire 2011 du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin versant de la Siagne élaboré par le SIIVU Haute Siagne.

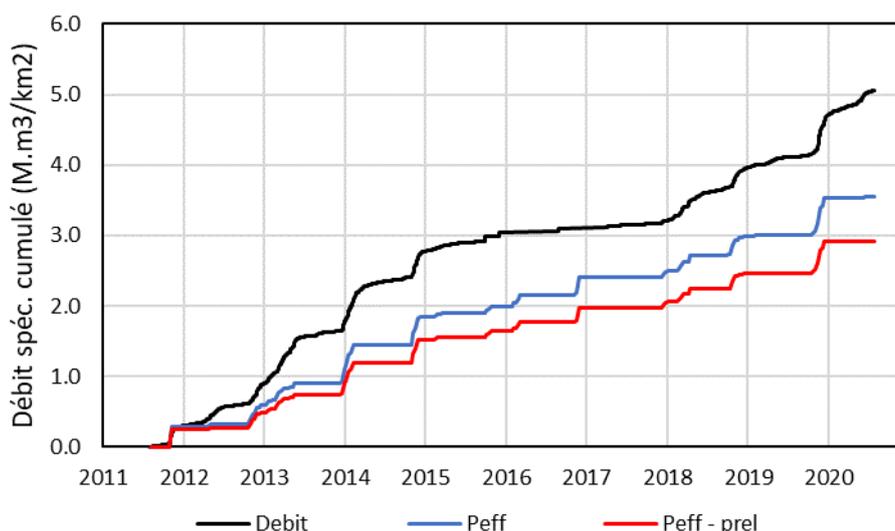


Figure 262 : Comparaison sur la Siagne des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 263 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Loup :

- Le bassin versant présente une assez bonne réactivité aux épisodes intenses de pluie, même si un peu plus lissée que sur la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont un différentes, indiquant une importance relative modérée des prélèvements (d'environ 20%).
- La courbe des débits mesurés cumulés se situe entre les courbes cumulées des pluies efficaces brutes et nettes. Les informations de la station hydrométrique et de l'approche hydro-météorologique sont donc compatibles.

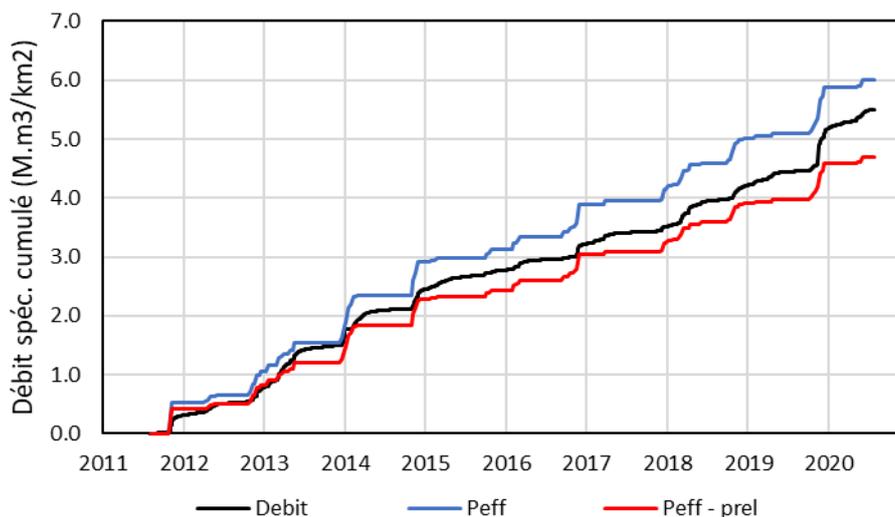


Figure 263 : Comparaison sur le Loup des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

La Figure 264 présente les courbes cumulées pour le bassin versant du Var :

- Le bassin versant présente une faible réactivité aux épisodes intenses de pluie, plus lissée que la courbe cumulée des pluies efficaces.
- Les courbes bleue et rouge sont presque identiques, indiquant une faible importance des prélèvements.
- La courbe des débits mesurés cumulés est très semblable à celle des pluies efficaces nettes.

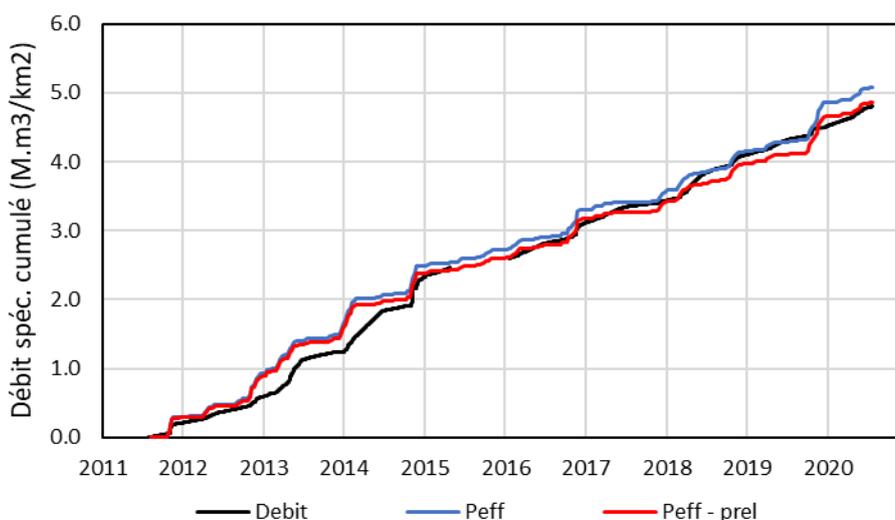


Figure 264 : Comparaison sur le Var des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés

L'application de la méthode hydro-climatique simplifiée sur 20 fleuves et tributaires de lagunes de la façade méditerranéenne métropolitaine a montré que cette approche rapide réalisée à partir de données existantes et facilement disponibles permet d'évaluer :

- La représentativité de la station hydrométrique située à l'exutoire du bassin versant ;
- La réactivité du bassin aux épisodes méditerranéens de pluie intense (courbe en marches d'escalier) ;
- La contribution des eaux souterraines aux écoulements (plus la courbe 'mesurée' est lisse, plus la part des écoulements souterrains dans l'hydrodynamisme du BV est importante) ;
- L'importance des apports extérieurs potentiels ;
- L'importance des sorties occultes (souterraines) potentielles.

Cette approche ne peut se suffire en elle-même, sauf lorsqu'on ne dispose d'aucune information hydrométrique et peut nécessiter une connaissance à « dire d'expert ». L'information fournie par cette méthode est cependant aussi importante que celle acquise par les stations hydrométriques, puisque ces dernières ne semblent pas toujours refléter l'intégralité du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

Pour les petits bassins versants non jaugés, cette approche pourrait être utilisée, au moins en première approximation. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter d'acquisition de données, ni la mise en œuvre d'un modèle pluie-débit dont les incertitudes seraient aussi importantes, en particulier en ce qui a trait aux entrées et sorties occultes.

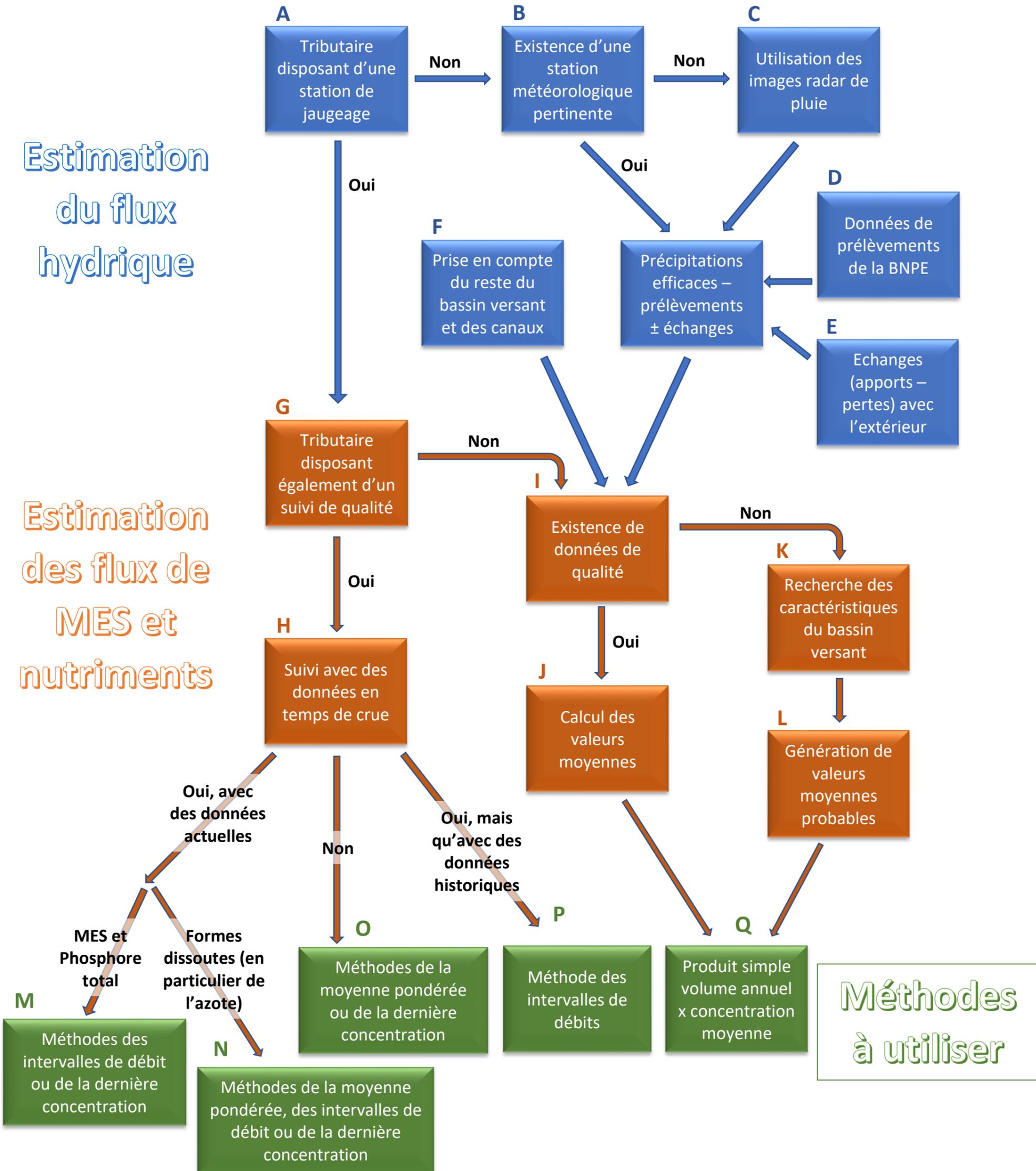
13. Annexe 4 : Cheminement méthodologique proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes

Cheminement méthodologique proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes



Estimation du flux hydrique

Estimation des flux de MES et nutriments



14. Liste des figures

Figure 1 : Localisation des stations hydrométriques et qualité	8
Figure 2 : Répartition des altitudes sur le bassin versant de la Berre	9
Figure 3 : Répartition des altitudes sur les bassins de la Mosson, du Lez, du Salaison et du Vidourle ...	10
Figure 4 : Répartition des altitudes sur le bassin versant de l'Arc	12
Figure 5 : Caractéristiques géographiques des six bassins versants étudiés	13
Figure 6 : Occupation des sols sur les six bassins versants étudiés.....	14
Figure 7 : Population et nombre de station d'épuration des six bassins versants étudiés	14
Figure 8 : Débits spécifiques cumulés de la Berre	17
Figure 9 : Volumes spécifiques annuels de la Berre	18
Figure 10 : Débits cumulés de la Berre	18
Figure 11 : Vue aérienne du site d'implantation de la station de Portel-des-Corbières	19
Figure 12 : Débits spécifiques cumulés du Lez et de son affluent amont le Lirou (au Tiradou)	19
Figure 13 : Volumes spécifiques annuels du Lez et de son affluent amont le Lirou (au Tiradou)	20
Figure 14 : Comparaison des débits spécifiques cumulés du Lez (et son affluent amont le Lirou au Tiradou), de la Mosson et du Salaison	20
Figure 15 : Débits spécifiques cumulés du Vidourle.....	21
Figure 16 : Volumes spécifiques annuels du Vidourle.....	22
Figure 17 : Débits spécifiques cumulés de l'Arc.....	22
Figure 18 : Volumes spécifiques annuels de l'Arc.....	23
Figure 19 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits de la Berre	24
Figure 20 : Volumes spécifiques cumulés des débits de la Mosson et des pluies efficaces.....	25
Figure 21 : Volumes spécifiques cumulés des débits de la Mosson et des pluies efficaces (réduites des prélèvements exercés sur le BV)	26
Figure 22 : Volumes spécifiques cumulés des débits du Lez.....	26
Figure 23 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits du Salaison	27
Figure 24 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits du Vidourle.....	28
Figure 25 : Volumes spécifiques cumulés des pluies efficaces et des débits de l'Arc.....	28
Figure 26 : Rapport entre les débits spécifiques cumulés et les précipitations efficaces cumulées diminuées des prélèvements	29
Figure 27 : Rapport entre les débits spécifiques cumulés et les précipitations efficaces cumulées diminuées des prélèvements (avec les débits du Lez diminués des apports de la Source du Lez et du soutien d'étiage de BRL).....	29
Figure 28 : Exemple d'une population log-normale bimodale représentée en histogramme de fréquence, en fonction de probabilité bimodale et en fonctions de probabilité unimodales	31
Figure 29 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de la Berre (station de Portel-des- Corbières)	31
Figure 30 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de la Mosson (station de Saint-Jean-de- Védas).....	32
Figure 31 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Lez (station de lattes)	32
Figure 32 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Salaison (station de Mauguio).....	33
Figure 33 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits du Vidourle (station de Gallargues)	33
Figure 34 : Histogrammes de fréquence des mesures de débits de l'Arc (station de Berre-l'Etang).....	34
Figure 35 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur la Berre (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Portel des Corbières)	37

Figure 36 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur la Mosson (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Saint-Jean-de-Védas)	38
Figure 37 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Lez (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Lattes).....	38
Figure 38 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Salaison (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Mauguio)	39
Figure 39 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur le Vidourle (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Gallargues-le-Montueux)	39
Figure 40 : Représentativité des échantillonnages réalisés sur l’Arc (points rouges = échantillons du suivi qualité 2015-2020 ; courbes bleue = ensemble des débits classés mesurés sur la station hydrométrique de Berre-l’Etang)	40
Figure 41 : Relation entre les concentrations de PO4 et les débits du Vidourle (données 2001-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) – les lignes rouges illustrent les différentes limites analytiques de détection/quantification caractérisant les données. 41	41
Figure 42 : Relation entre concentrations d’azote total Kjeldahl et débits de la Berre (données 2000-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) – les lignes rouges illustrent les différentes limites analytiques de détection/quantification caractérisant les données.....	41
Figure 43 : Relation entre concentrations de MES (en haut) et Phosphore total (en bas) et débits du Vidourle (données 2001-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) – données brutes à gauche, moyennes mobiles sur 10 valeurs à droite	42
Figure 44 : Concentrations de phosphore total en fonction du débit du Lez (données 2000-2020 issues des bases de données NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) montrant deux populations différentes reliées à une modification de la source principale de pollution en 2005 ; la relation est améliorée en prenant en compte les seules données postérieures à 2006	43
Figure 45 : Concentrations d’ammonium en fonction du débit du Salaison (données 2007-2020 issues des bases de données NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr) montrant deux populations différentes reliées à une modification de la source de pollution en 2009.....	44
Figure 46 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations de MES (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr)	45
Figure 47 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations d’azote total, azote inorganique et nitrate (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr).....	45
Figure 48 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations d’azote Kjeldahl, ammonium et nitrite (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr).....	46
Figure 49 : Valeurs moyennes mensuelles des concentrations de phosphore total et d’ortho-phosphate (toutes données disponibles sur la période 2000-2020 des six tributaires ; disponibles sur NAIADE – eaufrance.fr).....	46
Figure 50 : Variation conjointe des MES et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	47
Figure 51 : Variation conjointe de l’azote total et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	47
Figure 52 : Variation conjointe de l’azote Kjeldahl et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	48
Figure 53 : Variation conjointe de l’azote inorganique et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	48

Figure 54 : Variation conjointe des nitrates et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	49
Figure 55 : Variation conjointe du phosphore total et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	49
Figure 56 : Variation conjointe de l'ortho-phosphate et du débit durant les crues (données 2015-2020 respectivement disponibles sur les bases NAIADE et HYDRO – eaufrance.fr).....	50
Figure 57 : Comparaison de l'utilisation de la moyenne arithmétique (en haut à droite), de la médiane (en bas à gauche) et de la moyenne géométrique (en bas à droite) pour les concentrations de MES de la Berre.....	51
Figure 58 : Exemples de types de relation entre les paramètres et les débits.....	53
Figure 59 : Comparaison azote total / MES	54
Figure 60 : Comparaison azote Kjeldahl / MES.....	55
Figure 61 : Comparaison azote inorganique / MES	55
Figure 62 : Comparaison azote inorganique / azote total	56
Figure 63 : Comparaison nitrate / MES.....	56
Figure 64 : Comparaison nitrate / azote inorganique	57
Figure 65 : Comparaison nitrate / azote total	57
Figure 66 : Comparaison nitrite / MES	58
Figure 67 : Comparaison nitrite / azote inorganique	58
Figure 68 : Comparaison ammonium / MES.....	59
Figure 69 : Comparaison ammonium / azote total	59
Figure 70 : Comparaison phosphore total / MES	60
Figure 71 : Comparaison ortho-phosphate / MES	60
Figure 72 : Comparaison ortho-phosphate / phosphore total	61
Figure 73 : Comparaison phosphore total / azote total.....	61
Figure 74 : Comparaison ortho-phosphate / azote total.....	62
Figure 75 : Comparaison ortho-phosphate / nitrate	62
Figure 76 : Comparaison phosphore total / azote Kjeldahl	63
Figure 77 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	69
Figure 78 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Lez et du Salaison.....	69
Figure 79 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Vidourle et de l'Arc	70
Figure 80 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique du Lez, du Salaison et du Vidourle	70
Figure 81 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson et de l'Arc	71
Figure 82 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés.....	71
Figure 83 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Salaison et de l'Arc.....	72
Figure 84 : Relations Azote total (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Lez et du Vidourle.....	72
Figure 85 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	73
Figure 86 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Salaison et de l'Arc	73
Figure 87 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Lez et du Vidourle.....	74
Figure 88 : Relations Phosphore total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	74
Figure 89 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	75
Figure 90 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre et du Vidourle	75
Figure 91 : Relations Ortho-phosphate (médiane glissante) / Débit spécifique de la Mosson, du Lez, du Salaison et de l'Arc	76

Figure 92 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour la Berre.....	76
Figure 93 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour la Mosson.....	77
Figure 94 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Lez	77
Figure 95 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Salaison.....	78
Figure 96 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour le Vidourle	78
Figure 97 : Concentration médiane par classes standardisées de débit spécifique pour l'Arc.....	79
Figure 98 : Nombre d'échantillons disponibles (en fréquence relative) dans chacune des 6 classes déterminées par la méthode d'équidistance logarithmique	80
Figure 99 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Berre	80
Figure 100 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Mosson.....	81
Figure 101 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Lez	81
Figure 102 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Salaison....	82
Figure 103 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Vidourle ...	82
Figure 104 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour l'Arc.....	83
Figure 105 : Débit annuel moyen de la Berre.....	85
Figure 106 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode de la moyenne pondérée)	86
Figure 107 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode de la dernière concentration)	86
Figure 108 : Flux annuel de MES dans la Berre (méthode des intervalles de débits).....	87
Figure 109 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	87
Figure 110 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	88
Figure 111 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Berre (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	88
Figure 112 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode de la moyenne pondérée)	89
Figure 113 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode de la dernière concentration)	89
Figure 114 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Berre (méthode des intervalles de débits).....	89
Figure 115 : Débit annuel moyen de la Mosson.....	90
Figure 116 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode de la moyenne pondérée)	90
Figure 117 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode de la dernière concentration).....	91
Figure 118 : Flux annuel de MES dans la Mosson (méthode des intervalles de débits).....	91
Figure 119 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	92
Figure 120 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	92
Figure 121 : Flux annuel d'azote (en N) dans la Mosson (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	92
Figure 122 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode de la moyenne pondérée)	93
Figure 123 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode de la dernière concentration). 93	
Figure 124 : Flux annuel de phosphore (en P) dans la Mosson (méthode des intervalles de débits).....	93
Figure 125 : Débit annuel moyen du Lez	94
Figure 126 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode de la moyenne pondérée)	94
Figure 127 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode de la dernière concentration)	95
Figure 128 : Flux annuel de MES dans le Lez (méthode des intervalles de débits).....	95
Figure 129 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	96
Figure 130 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	96
Figure 131 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Lez (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	96
Figure 132 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode de la moyenne pondérée).....	97

Figure 133 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode de la dernière concentration)	97
Figure 134 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Lez (méthode des intervalles de débits)	97
Figure 135 : Débit annuel moyen du Salaisou.....	98
Figure 136 : Flux annuel de MES dans le Salaisou (méthode de la moyenne pondérée)	98
Figure 137 : Flux annuel de MES dans le Salaisou (méthode de la dernière concentration).....	99
Figure 138 : Flux annuel de MES dans le Salaisou (méthode des intervalles de débits)	99
Figure 139 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaisou (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	99
Figure 140 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaisou (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	100
Figure 141 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Salaisou (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	100
Figure 142 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaisou (méthode de la moyenne pondérée) ...	101
Figure 143 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaisou (méthode de la dernière concentration)	101
Figure 144 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Salaisou (méthode des intervalles de débits)....	101
Figure 145 : Débit annuel moyen du Vidourle.....	102
Figure 146 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode de la moyenne pondérée).....	102
Figure 147 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode de la dernière concentration)	102
Figure 148 : Flux annuel de MES dans le Vidourle (méthode des intervalles de débits)	103
Figure 149 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	103
Figure 150 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	103
Figure 151 : Flux annuel d'azote (en N) dans le Vidourle (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	104
Figure 152 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode de la moyenne pondérée)...	104
Figure 153 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode de la dernière concentration)	104
Figure 154 : Flux annuel de phosphore (en P) dans le Vidourle (méthode des intervalles de débits) ...	105
Figure 155 : Débit annuel moyen de l'Arc	105
Figure 156 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode de la moyenne pondérée)	106
Figure 157 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode de la dernière concentration).....	106
Figure 158 : Flux annuel de MES dans l'Arc (méthode des intervalles de débits).....	106
Figure 159 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la moyenne pondérée).....	107
Figure 160 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode de la dernière concentration)	107
Figure 161 : Flux annuel d'azote (en N) dans l'Arc (l'azote Kjeldahl comporte l'azote ammoniacal) (méthode des intervalles de débits)	108
Figure 162 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode de la moyenne pondérée)	108
Figure 163 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode de la dernière concentration).....	108
Figure 164 : Flux annuel de phosphore (en P) dans l'Arc (méthode des intervalles de débits).....	109
Figure 165 : Comparaison des flux annuels moyens des nutriments (MES, azote total, phosphore total ; voir Tableau 17) calculés par les différentes méthodes (ID = intervalles de débit ; MP = moyenne pondérée ; DC = dernière concentration)	110
Figure 166 : Comparaison des flux annuels moyens des nutriments (MES, azote total, phosphore total ; voir Tableau 17) calculés par les différentes méthodes (ID = intervalles de débit ; MP = moyenne pondérée ; DC = dernière concentration) (en échelle log)	110
Figure 167 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre	111

Figure 168 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de la Berre.....	114
Figure 169 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de la Mosson.....	115
Figure 170 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Lez	116
Figure 171 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Salaison.....	117
Figure 172 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total du Vidourle	118
Figure 173 : Comparaison des concentrations instantanées (points verts), des médianes mobiles de 9 valeurs consécutives (points noirs) et des concentrations médianes de la méthode ID (courbe rouge) ; données de MES, azote total et phosphore total de l'Arc	119
Figure 174 : Comparaison des concentrations utilisées pour les plus forts débits : médiane de la dernière classe de la méthodes ID et valeur médiane des données instantanées utilisées par la méthode MP pour les débits entrant dans cette classe	120
Figure 175 : Relation entre concentrations de MES (en haut) et Phosphore total (en bas) et débits du Vidourle – données brutes à gauche, moyennes mobiles sur 10 valeurs à droite	122
Figure 176 : Flux annuels moyens calculés par la méthode MP avec différents nombres d'échantillons de crue	124
Figure 177 : Flux annuels spécifiques de MES, azote total et phosphore total calculés pour les six scénarios avec la méthode ID et la méthode MP avec tous les échantillons de crue ou aucun.....	126
Figure 178 : Flux annuels moyens calculés par la méthode ID et la méthode MP sans échantillons de crue	127
Figure 179 : Flux annuels moyens calculés par la méthode MP avec ou sans échantillons de crue	127
Figure 180 : Concentrations (μM) d'azote total dissous (NTD) et de phosphore total dissous (PTD) avec la taille des points proportionnelle à la salinité	133
Figure 181 : Concentrations (μM) d'azote total dissous (NTD) et de phosphore total dissous (PTD) avec la taille des points proportionnelle à la salinité (excluant le Canal de Lunel 1 et 2).....	133
Figure 182 : Flux massiques d'azote dissous échangés tenant compte de l'effet yoyo	134
Figure 183 : Flux massiques de phosphore dissous échangés tenant compte de l'effet yoyo.....	134
Figure 184 : Volume cumulé entrant dans l'Étang de l'Or via Canalette (millions de m^3)	137
Figure 185 : Débits cumulés en amont et en aval de Canalette (millions de m^3).....	138
Figure 186 : Volumes mensuels apportés par les ASA entre septembre 2019 et décembre 2020	139
Figure 187 : Illustration des coûts (en k€) des acquisitions de connaissances sur l'étang de l'Or	140
Figure 188 : Stations de suivi qualité de la Berre.....	145
Figure 189 : Stations de suivi qualité de la Mosson, du Lez, du Salaison et du Vidourle	146
Figure 190 : Stations de suivi de la qualité de l'Arc	147
Figure 191 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec les MES.....	149
Figure 192 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec l'azote inorganique	150
Figure 193 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants avec le phosphore total...	150
Figure 194 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte des seules caractéristiques propres aux sous-bassins	151
Figure 195 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte des MES (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins).....	152
Figure 196 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	153

Figure 197 : Relations MES (médiane glissante) / Débit spécifique de la Berre, du Vidourle et de l'Arc	153
Figure 198 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte de l'azote inorganique (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins).....	154
Figure 199 : Relations Azote inorganique (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés.....	154
Figure 200 : Analyse discriminante menée sur les 66 sous-bassins versants tenant compte du phosphore total (les carrés représentent les stations aux exutoires des bassins).....	155
Figure 201 : Relations Phosphore total (médiane glissante) / Débit spécifique des six tributaires étudiés	155
Figure 202 (page suivante) : Dendrogramme de la classification ascendante hiérarchique menée sur les 66 sous-bassins versants	156
Figure 203 : Exemple de la projection d'individus sur les deux axes principaux de l'ACP (à gauche) et les deux axes discriminants de l'AFD (à droite) (tiré des notes du Cours Cnam RCP208).....	158
Figure 204 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les seules caractéristiques propres aux sous-bassins	159
Figure 205 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données MES des STEP et de la station de suivi	160
Figure 206 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données Azote inorganique des STEP et de la station de suivi.....	160
Figure 207 : Analyse en Composantes Principales (ACP) menée sur les 66 sous-bassins versants avec les caractéristiques propres aux sous-bassins et les données Phosphore total.....	161
Figure 208 : Comparaison des log-concentrations de MES calculées avec les paramètres issus de la régression multiple et des log-médianes des concentrations mesurées aux stations de suivi qualité	162
Figure 209 : Comparaison des concentrations de MES calculées avec les paramètres issus de la régression multiple et des médianes des concentrations mesurées aux stations de suivi qualité ...	162
Figure 210 : Comparaison des log-concentrations calculées d'azote et des log-médianes des concentrations mesurées	163
Figure 211 : Comparaison des concentrations calculées d'azote et des médianes des concentrations mesurées	164
Figure 212 : Comparaison des log-concentrations calculées de phosphore et des log-médianes des concentrations mesurées	164
Figure 213 : Comparaison des concentrations calculées de phosphore et des médianes des concentrations mesurées (régression multiple avec toutes les variables explicatives).....	165
Figure 214 : Flux annuels de nutriment calculés par la méthode des intervalles de débits et par le produit simple des concentrations moyennes et des précipitations efficaces	167
Figure 215 : Corrélations effectuées sur les valeurs logs de la Figure 214	167
Figure 216 : Comparaison des concentrations simulées à l'aide des régressions multiples et des concentrations moyennes observées.....	168
Figure 217 : Corrélations effectuées sur les valeurs logs de la Figure 216	168
Figure 218 : Flux annuels de nutriment calculés par la méthode des intervalles de débits et à partir des précipitations efficaces et des concentrations simulées à l'aide des régressions multiples	169
Figure 219 : Corrélations effectuées sur les valeurs logs de la Figure 218	169
Figure 220 : Principales lagunes méditerranéennes et stations météorologiques associées.....	170
Figure 221 : Comparaison graphique des flux calculés par l'approche développée avec ceux indiqués dans les rapports antérieurs	173
Figure 222 : Cheminement méthodologique proposé pour l'estimation des flux de nutriments apportés aux lagunes (une version A3 de cette figure est fournie à l'Annexe 4)	177

Figure 223 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur la Berre	181
Figure 224 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur la Mosson.....	182
Figure 225 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Lez	182
Figure 226 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Salaison.....	183
Figure 227 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur le Vidourle	183
Figure 228 : Concentration de Glyphosate et d'AMPA sur l'Arc.....	183
Figure 229 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur la Berre.....	184
Figure 230 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur la Mosson	184
Figure 231 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Lez.....	185
Figure 232 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Salaison	185
Figure 233 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur le Vidourle	185
Figure 234 : Influence de la saison sur l'apparition du Glyphosate et de l'AMPA sur l'Arc	186
Figure 235 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur la Berre	189
Figure 236 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur la Mosson	189
Figure 237 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Lez.....	190
Figure 238 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Salaison	190
Figure 239 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur le Vidourle.....	190
Figure 240 : Relation entre concentrations de pesticides et débits sur l'Arc	191
Figure 241 : Bassins versants utilisés pour le test de la méthode d'estimation des flux hydriques	197
Figure 242 : Comparaison sur le Tech des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	198
Figure 243 : Comparaison sur la Têt des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	199
Figure 244 : Comparaison sur l'Agly des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	199
Figure 245 : Comparaison sur la Berre des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	200
Figure 246 : Comparaison sur l'Orb des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	201
Figure 247 : Comparaison sur l'Hérault des cumuls des débits mesurés (station d'Agde), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	201
Figure 248 : Comparaison sur l'Hérault des cumuls des débits mesurés (station de Montagnac), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	202
Figure 249 : Comparaison sur la Mosson des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	202
Figure 250 : Comparaison sur le Lez des cumuls des débits mesurés (station de Lattes), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	203
Figure 251 : Comparaison sur le Lez des cumuls des débits mesurés (station de Montpellier - Garigliano), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	204
Figure 252 : Comparaison sur le Salaison des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	204
Figure 253 : Comparaison sur le Vidourle des cumuls des débits mesurés (station de Gallargues), des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	205
Figure 254 : Comparaison sur le Vistre des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	206
Figure 255 : Comparaison sur la Touloubre des cumuls des débits mesurés à Cornillon, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	206
Figure 256 : Comparaison sur la Touloubre des cumuls des débits mesurés à La Barben, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	207
Figure 257 : Comparaison sur l'Arc des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés.....	207

Figure 258 : Comparaison sur l’Huveaune des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	208
Figure 259 : Comparaison sur le Gapeau des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	209
Figure 260 : Comparaison sur le Giscle des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	209
Figure 261 : Comparaison sur l’Argens des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	210
Figure 262 : Comparaison sur la Siagne des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	210
Figure 263 : Comparaison sur le Loup des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	211
Figure 264 : Comparaison sur le Var des cumuls des débits mesurés, des pluies efficaces avec ou sans les prélèvements déclarés	211

15. Liste des tableaux

Tableau 1 : Types de relation pouvant être observées entre la concentration et le débit	7
Tableau 2 : Tributaires et stations de suivi de la qualité	7
Tableau 3 : Caractéristiques géographiques des six bassins versants étudiés	13
Tableau 4 : Occupation des sols sur les six bassins versants étudiés	14
Tableau 5 : Stations hydrométriques actives des six bassins versants étudiés	16
Tableau 6 : Principaux constats issus de la comparaison de l'évolution concomitantes des concentrations et des débits	50
Tableau 7 : Types de relations de relations observées entre la concentration des nutriments et les débits (les flèches indiquent les formes d'évolution des courbes – voir Figure 58)	52
Tableau 8 : Pourcentage de valeurs inférieures à la limite de quantification	63
Tableau 9 : Principaux avantages et inconvénients des trois méthodes de calcul des flux étudiées	68
Tableau 10 : Valeurs limites des six classes de débits utilisées dans la méthode ID	80
Tableau 11 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Berre	81
Tableau 12 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour la Mosson ...	81
Tableau 13 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Lez	82
Tableau 14 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Salaison ...	82
Tableau 15 : Concentration médiane des classes personnalisées de débit spécifique pour le Vidourle ..	83
Tableau 16 : Concentration médiane par classes personnalisées de débit spécifique pour l'Arc	83
Tableau 17 : Synthèse des flux annuels moyens (2015-2020) calculés par les différentes méthodes (MP = moyenne pondérée ; ID = intervalles de débit ; DC = dernière concentration)	109
Tableau 18 : Concentrations de MES correspondant aux divers débits spécifiques de la Figure 167, avec 3 scénarios théoriques d'échantillonnage (éch.) des épisodes de crues	111
Tableau 19 : Rapports entre les flux annuels moyens calculés par les méthodes ID et MP	121
Tableau 20 : Valeurs seuils des débits considérés représentatifs d'un état de crue (5% supérieurs des débits classés 2020-2020) et fraction d'échantillonnages correspondant à ce critère	123
Tableau 21 : Flux annuels moyens calculés pour la période 2015-2020 par les méthodes des intervalles de débit (ID) et des moyennes pondérées (MP), avec tous les échantillons de crue ou aucun	125
Tableau 22 : Facteurs des équations de calcul des flux de nutriments à partir des caractéristiques des bassins versants	166
Tableau 23 : Caractéristiques des principales lagunes du Golfe du Lion	171
Tableau 24 : Caractéristiques des principales lagunes du Golfe du Lion (Suite)	171
Tableau 25 : Concentrations moyennes et flux annuels moyens estimés au moyen des régressions multiples	172
Tableau 26 : Comparaison des flux annuels moyens estimés au moyen des régressions multiples avec les bilans réalisés par les études antérieures	172
Tableau 27 : Pertinence des différentes méthodes en fonction des objectifs du calcul des flux (indépendamment de la disponibilité et qualité des données requises)	180
Tableau 28 : Nombre de dépassements du seuil d'effet individuel ($QR_{indiv} > 1$) pour les pesticides quantifiés dans l'étude OBSLAG de l'IFREMER (2017-2019) et leur contribution au risque pesticide global (ΣQR_{ind} tous legs et toutes lagunes)	188
Tableau 29 : Bassins versants étudiés de la façade méditerranéenne métropolitaine	196