



L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le ministère de l'Économie, de l'Innovation et des Exportations (MEIE).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille à chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

#### **Notre mission**

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable.

#### **Notre vision**

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

#### **Pour en savoir plus**

[www.irda.qc.ca](http://www.irda.qc.ca)

## **LE RAPPORT PEUT ÊTRE CITÉ COMME SUIT :**

Ricard, S., A. Blais-Gagnon, W. Huertas, A. Michaud et M. Wu. 2022. CARACTÉRISATION HYDROMÉTRIQUE DES BRANCHES 5 DU RUISSEAU AU CASTOR ET 46 DU RUISSEAU MORPIONS. Rapport final. IRDA et partenaires. 17 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

## ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Responsable scientifique : Simon Ricard, Ph. D., IRDA
- Arianne Blais-Gagnon, IRDA
- William Huertas, IRDA
- Aubert Michaud, OBVBM
- Mick Wu, IRDA

## COLLABORATEURS

- Colline Gombault, IRDA
- Olivier Perret, producteur en support à l'échantillonnage
- Johanne Bérubé, OBVBM

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Simon Ricard

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)

2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, poste 691

Courriel : [simon.ricard@irda.qc.ca](mailto:simon.ricard@irda.qc.ca)

## TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	1
2	Méthodologie .....	2
2.1	Description des stations à l'étude .....	2
2.2	Dispositifs.....	6
2.3	Mesure des débits.....	6
2.4	Concentration et flux de sédiments .....	7
2.5	Détection des changements de qualité d'eau.....	7
3	Résultats.....	8
3.1	Courbes de tarage et débits.....	8
3.2	Concentrations et charges sédimentaires .....	13
3.3	Analyse statistique .....	17
4	Conclusion .....	20
	Annexe A. Précipitations mensuelles estimées .....	21
	Annexe B. Résultats des analyses de matières en suspension aux stations 16_MOR (Br_46) et 16_CAS5 (Br-5)...	22
	Annexe C. Résultats des analyses physico-chimiques à la station 16_CAS .....	23
	Annexe D. Sorties du modèle FLUX 32.....	25
	Annexe E. Rapport complet sur la modélisation statistique .....	27

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Charges annuelles moyennes de sédiments transportés dans les cours d'eau entre 2019 et 2022.....	14
Tableau 2.	Paramètres des modèles retenus.....	17

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Localisation des stations instrumentées par l'équipe IRDA et des travaux d'aménagement sur les cours d'eau.....	3
Figure 2.	Relief (A), occupation du territoire (B) et pédologie (C) du bassin versant Morpions.....	4
Figure 3.	Relief (A), occupation du territoire (B) et pédologie (C) du bassin versant Castor.....	5

Figure 4. Sonde barométrique HOBO (A), récolte des données de la sonde barométrique à la station 16_MOR (B) et sonde acoustique ISCO à la station 16_CAS et son dispositif d'alimentation installé sur la rive (C).....	6
Figure 5. Visites terrain pour les mesures de débit à la station 16_MOR en mars 2021 (A), en septembre 2021 (B), en mars 2022 (C) et en juin 2022 (D); à la station 16_CAS en mars 2021 (E), en septembre 2021 (F), en mars 2022 (G) et en juin 2022 (H) et à la station 16_CAS5 en mars 2021 (I) et en septembre 2021 (J). .....	9
Figure 6. Points de tarage aux stations 16_MOR (A), 16_CAS5 (B) et 16_CAS (C). En orange : avant aménagement; en bleu : après aménagement. ....	10
Figure 7. Séries chronologiques des hauteurs d'eau journalières à la station 16_MOR (A), à la station 16_CAS5 (B) et à la station 16_CAS (C), de novembre 2019 à août 2022. ....	12
Figure 8. Lame d'eau exportée et précipitations générées. ....	13
Figure 9. Hauteur d'eau et flux de sédiments à la station 16_MOR (A), à la station 16_CAS5 (B) et à la station 16_CAS (C).....	15
Figure 10. Concentrations en matières en suspension en fonction des débits spécifiques mesurés aux stations 16_MOR avant l'aménagement (A), 16_MOR suivant l'aménagement (B), 16_CAS5 (C) et 16_CAS (D)...	16
Figure 11. Valeurs moyennes prédites avec intervalle de confiance (95 %) par la première étude statistique (un modèle commun) aux stations 16_MOR (A) et 16_CAS (B).....	18
Figure 12. Valeurs moyennes prédites avec intervalle de confiance (95 %) par la seconde étude statistique (deux modèles séparés) aux stations 16_MOR (A) et 16_CAS (B).....	19

# 1 INTRODUCTION

---

Le présent rapport offre une synthèse du travail de suivi de l'hydrométrie réalisé par l'IRDA sur la branche 46 du ruisseau Morpions et sur la branche 5 du ruisseau au Castor, des affluents de la rivière aux Brochets en Estrie. Le projet s'inscrit en appui aux actions concertées de la MRC Brome Missisquoi et de l'Organisme de bassin versant Baie Missisquoi dans l'évaluation de nouvelles approches dans l'aménagement des cours d'eau en milieu agricole.

L'objectif principal des dispositifs de mesures hydrométriques mis en place était de détecter, dans le temps, une réponse des débits de pointe et des flux de sédiments des deux ruisseaux à des aménagements hydro-agricoles innovants, notamment des sections d'écoulement à deux niveaux.

Ainsi, deux sous-objectifs au mandat ont été définis pour l'équipe IRDA :

- Assurer le suivi hydrométrique par la mesure et l'enregistrement de la hauteur de la colonne d'eau en continu et par des mesures ponctuelles de débits au courantomètre;
- Assurer le suivi géochimique ponctuel par l'échantillonnage et le dosage en laboratoire des matières en suspension (MES).

Le protocole établi a permis de suivre les flux d'eau et de sédiments pour les périodes précédant l'aménagement (novembre 2019 à août 2021) et suivant l'aménagement (septembre 2021 à août 2022).

Ce document présente la méthodologie retenue, les résultats du suivi hydrométrique (courbes de tarages, débits et flux de sédiments) ainsi que l'analyse statistique des réponses hydrologiques avant et après aménagement. Pour une présentation détaillée des travaux d'aménagement des cours d'eau, le lecteur peut se référer aux rapports des parties impliquées dans les projets d'aménagement, soit la MRC Brome-Missisquoi et ALPG consultants inc.

## 2 MÉTHODOLOGIE

---

Cette première section du rapport présente, dans l'ordre, le détail sur le dispositif et les équipements, les mesures de l'hydrométrie et de la géochimie réalisées ainsi que le protocole d'analyse statistique retenu.

### 2.1 DESCRIPTION DES STATIONS À L'ÉTUDE

L'instrumentation des branches 46 du ruisseau Morpions (16\_MOR) et 5 du ruisseau au Castor (16\_CAS5) a été réalisée en novembre 2019. Toutefois, étant donné l'annulation du projet d'aménagement en 2021 dans la branche 5, la station 16\_CAS5 a été démantelée en décembre de cette même année. En remplacement, il a été proposé de valoriser le suivi hydrométrique réalisé à la station IRDA 16\_CAS, elle-même localisée à l'embouchure de la branche principale du Castor. Cette dernière station est opérée dans le cadre du projet pilote sur le ruisseau au Castor de la Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030 du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC).

La Figure 1 permet de localiser les différentes stations instrumentées et les travaux d'aménagement réalisés :

16\_MOR : travaux en août 2021, tout juste en amont de la station sur la branche 46 du Morpions;

16\_CAS : travaux en octobre 2021, en tête de bassin;

16\_CAS5 : aucuns travaux d'aménagement sur la branche 5 du Castor.

La Figure 2 et la Figure 3 présentent les caractéristiques propres à chaque bassin, en termes de relief, d'occupation du territoire et de pédologie.

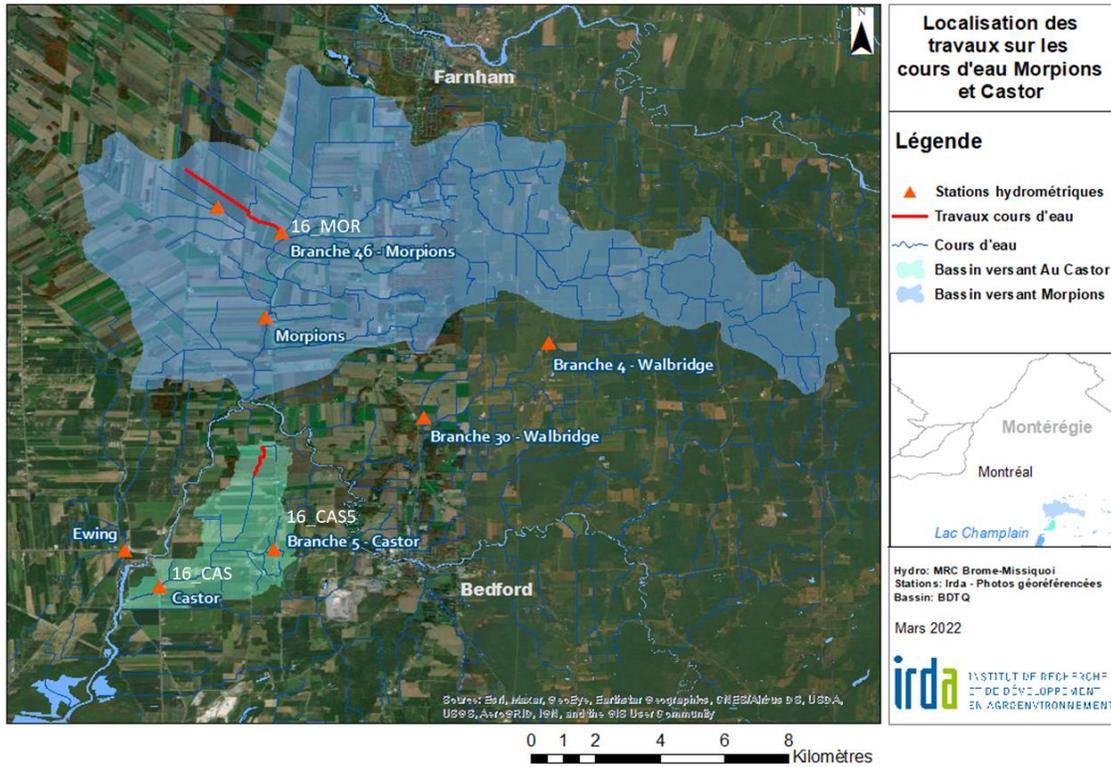


Figure 1. Localisation des stations instrumentées par l'équipe IRDA et des travaux d'aménagement sur les cours d'eau.

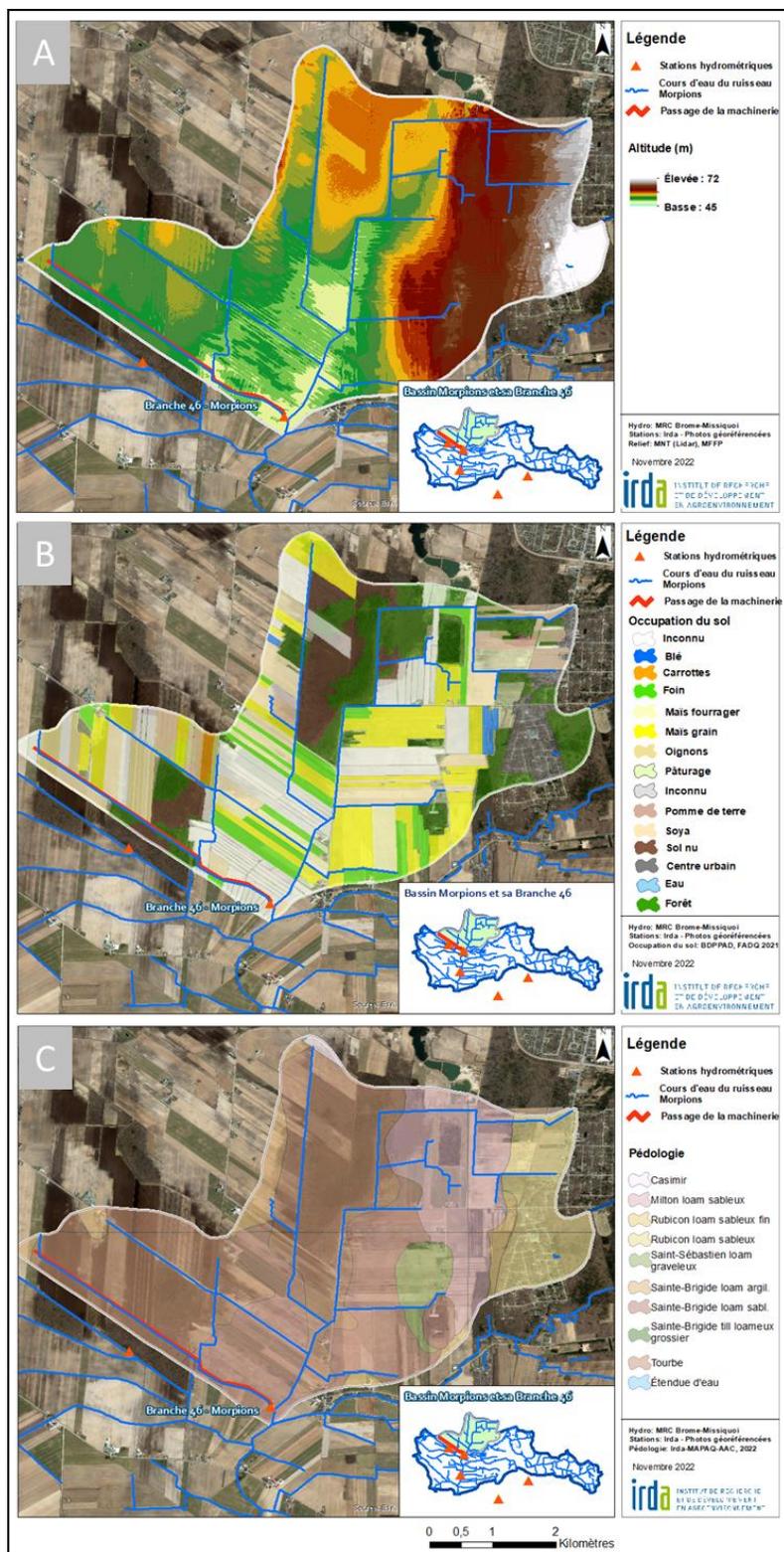


Figure 2. Relief (A), occupation du territoire (B) et pédologie (C) du bassin versant Morpions.

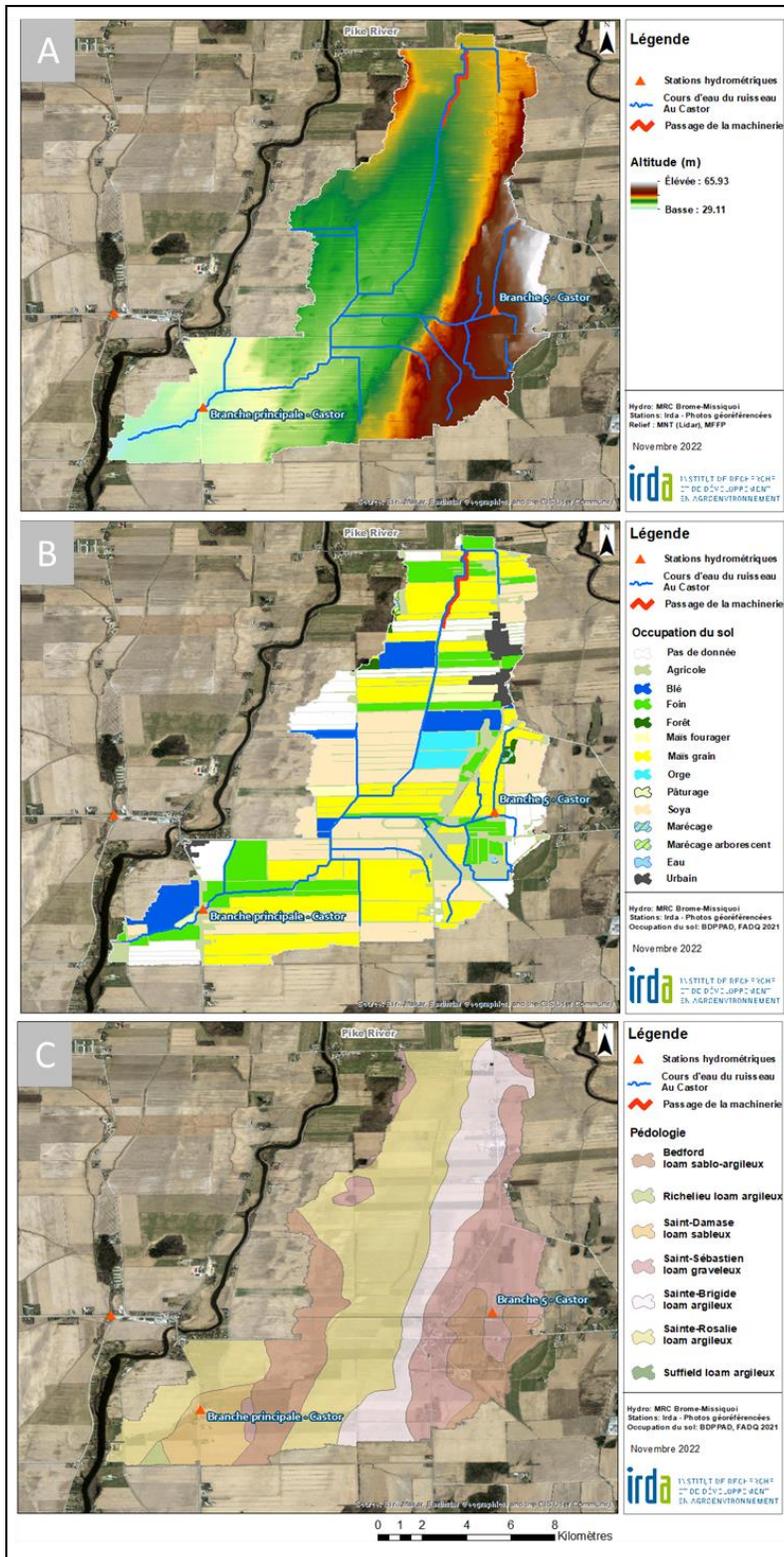


Figure 3. Relief (A), occupation du territoire (B) et pédologie (C) du bassin versant Castor.

## 2.2 DISPOSITIFS

À chacune des stations, une sonde barométrique ONSET U20L 04 (Figure 4) installée de façon fixe au centre de la section d'écoulement collige en continu, à intervalle de 15 minutes, des observations sur le niveau de l'eau dans le ruisseau. À la station 16\_CAS, en plus de la sonde à pression, une sonde acoustique ISCO installée dans le cours d'eau collige en continu des mesures de vitesses, de hauteurs et de températures de l'eau. Cette sonde possède un dispositif électronique d'enregistrement de données alimenté par une source d'électricité provenant d'un panneau solaire installé sur la rive du cours d'eau (Figure 4C). L'équipe IRDA récupère les données des sondes à chaque visite.



**Figure 4.** Sonde barométrique HOBO (A), récolte des données de la sonde barométrique à la station 16\_MOR (B) et sonde acoustique ISCO à la station 16\_CAS et son dispositif d'alimentation installé sur la rive (C).

## 2.3 MESURE DES DÉBITS

Des mesures de débits instantanés, obtenues avec un débitmètre de type Flowtracker®, sont réalisées lors des visites mensuelles sur le terrain. Chaque jaugeage est effectué avec un minimum de 10 observations réparties uniformément le long de la section du cours d'eau. Les mesures de débits instantanés permettent d'établir la courbe de tarage hauteur-débit du ruisseau et d'estimer par la suite les débits en continu. L'équipe profite de ses

visites sur le terrain pour procéder à l'entretien des équipements et de la section du cours d'eau en nettoyant au besoin les sédiments et la végétation qui nuisent à l'écoulement normal des ruisseaux.

## 2.4 CONCENTRATION ET FLUX DE SÉDIMENTS

Des échantillons d'eau sont récoltés ponctuellement pour l'analyse des matières en suspension (MES). L'observation de la pluviométrie et de l'hydrogramme à la station hydrométrique Ewing du MELCC (030426) sert à déclencher l'échantillonnage qui se fait de concert avec un collaborateur local. Pour bien décrire chaque évènement, un premier échantillon est récolté en période de montée de crue. Deux autres campagnes d'échantillonnage se font dans les 36 heures suivant ce même pic, séparées minimalement par quatre heures entre chacune. La balance des échantillonnages est répartie à travers chaque saison afin d'obtenir un portrait de la variabilité saisonnière de la qualité de l'eau. La chaîne de gestion réfrigérée (< 4 degrés Celsius) des échantillons est maintenue depuis la collecte jusqu'au dosage des matières en suspension au Laboratoire d'analyse agroenvironnementale de l'IRDA. Le traitement des données de débits couplé à celui des résultats de dosages au laboratoire des échantillons prélevés ponctuellement dans les ruisseaux permettent de décrire en continu les flux de sédiments. Le logiciel FLUX 32 est utilisé pour modéliser les flux journaliers de sédiments aux stations 16\_MOR et 16\_CAS5. La station 16\_CAS, instrumentée avec une sonde de turbidité, permet le suivi direct en continu du transport de sédiments.

## 2.5 DÉTECTION DES CHANGEMENTS DE QUALITÉ D'EAU

La détection d'une réponse des débits et des flux de sédiments à l'aménagement a été étudiée suivant les trois années de projet.

Une première analyse conjointe (données de 16\_MOR et de 16\_CAS ensemble) testant l'effet bassin a été menée afin d'observer les relations des concentrations en MES et du débit entre les bassins. Une seconde analyse, cette fois en séparant les bassins, a été réalisée afin de détecter un effet de l'aménagement sur les cours d'eau. La méthodologie reste la même dans les deux types d'analyses. La quantité de matière en suspension a été modélisée en fonction du débit (log), de l'aménagement (avant/après) et de la précipitation journalière<sup>1</sup> ( $\log(x+1)$ ), avec un modèle linéaire généralisé (distribution Gamma). Les interactions à deux voies avec l'aménagement ont été incluses afin de tester l'effet de l'aménagement sur la dynamique hydrologique (débit\*aménagement et précipitation\*aménagement). Le modèle inclut également une structure d'autocorrélation (sauf dans l'étude 2, pour 16\_CAS) puisque les données sont temporelles et parfois prises à de courts intervalles. Le modèle statistique a été validé en examinant les résidus et a été par la suite simplifié en comparant des modèles avec le critère d'information d'Akaike (AIC). Les résultats sont présentés à la section 3.3 du présent rapport.

## 3 RÉSULTATS

---

Cette section présente les résultats des suivis hydrométriques de la:

- Branche 46 du ruisseau Morpions (16\_MOR) : 15 novembre 2019 au 9 août 2022, pour un total de 950<sup>1</sup> jours;
- Branche 5 du ruisseau au Castor (16\_CAS5) : 15 novembre 2019 au 7 décembre 2021, pour un total de 754 jours;
- Branche principale du ruisseau au Castor (16\_CAS) : 14 novembre 2019 à 9 août 2022, pour un total de 1000 jours.

Au total pour la durée du projet, 16, 9 et 26 relevés des débits au débitmètre ont été réalisés respectivement aux stations 16\_MOR, 16\_CAS5 et 16\_CAS, de novembre 2019 à août 2022.

Les courbes de tarage et les débits d'eau sont d'abord présentés, suivis des flux de sédiments et de l'analyse des relations débit – MES.

### 3.1 COURBES DE TARAGE ET DÉBITS

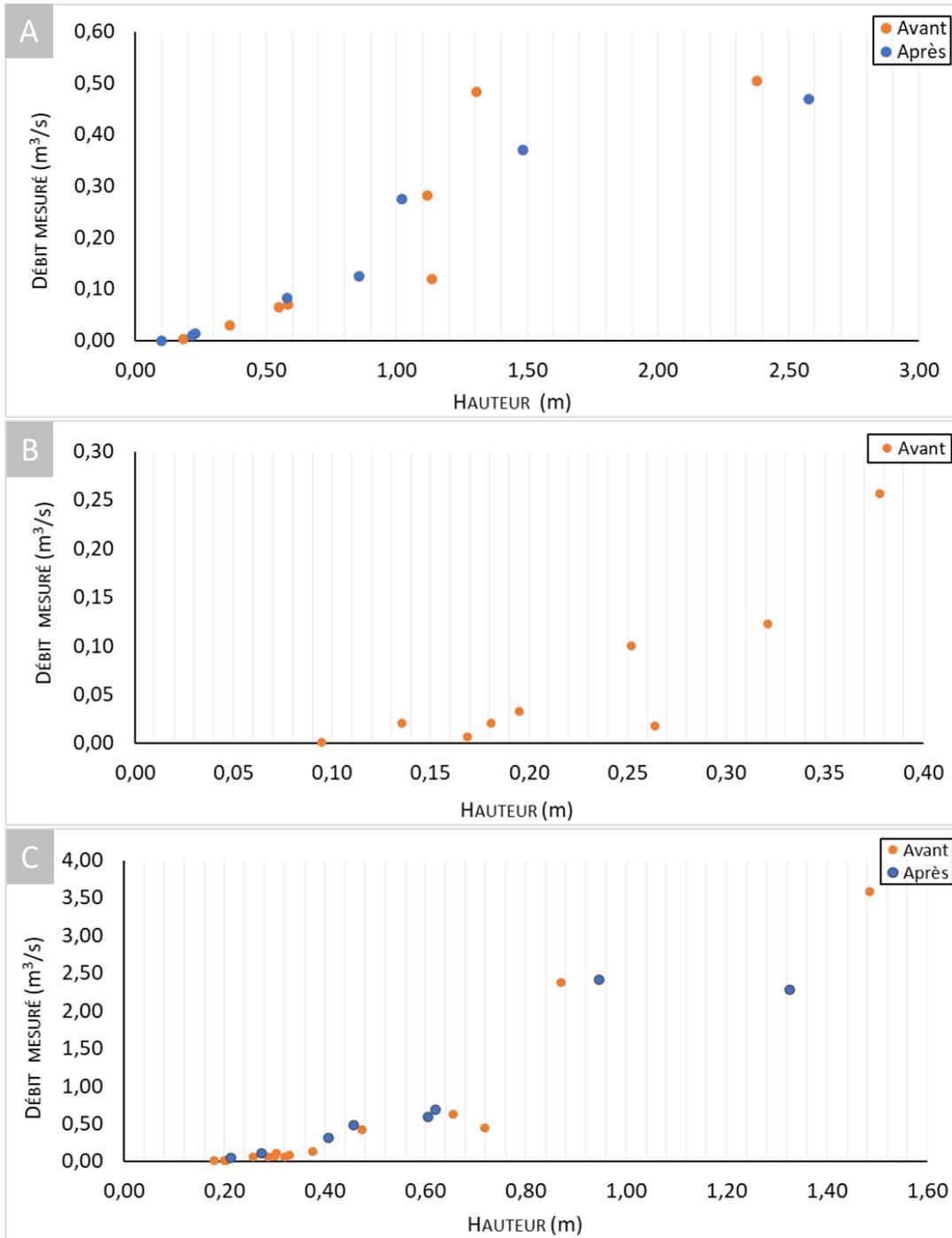
Le protocole repose sur l'enregistrement en continu à intervalle de 15 minutes de la vitesse d'écoulement moyenne mesurées par la sonde acoustique (station 16\_CAS seulement) et de l'élévation de la colonne d'eau par les sondes barométriques (stations 16\_MOR et 16\_CAS5). Les jaugeages mensuels de débit permettent d'établir la courbe de tarage entre la hauteur d'eau et le débit à l'exutoire de chaque ruisseau (Figure 5). La Figure 6 présente les mesures lors des jaugeages en distinguant la période, soit avant aménagement ou après aménagement.

---

<sup>1</sup> Le suivi a été stoppé pendant un peu plus d'un mois durant les travaux d'aménagement en 2021.



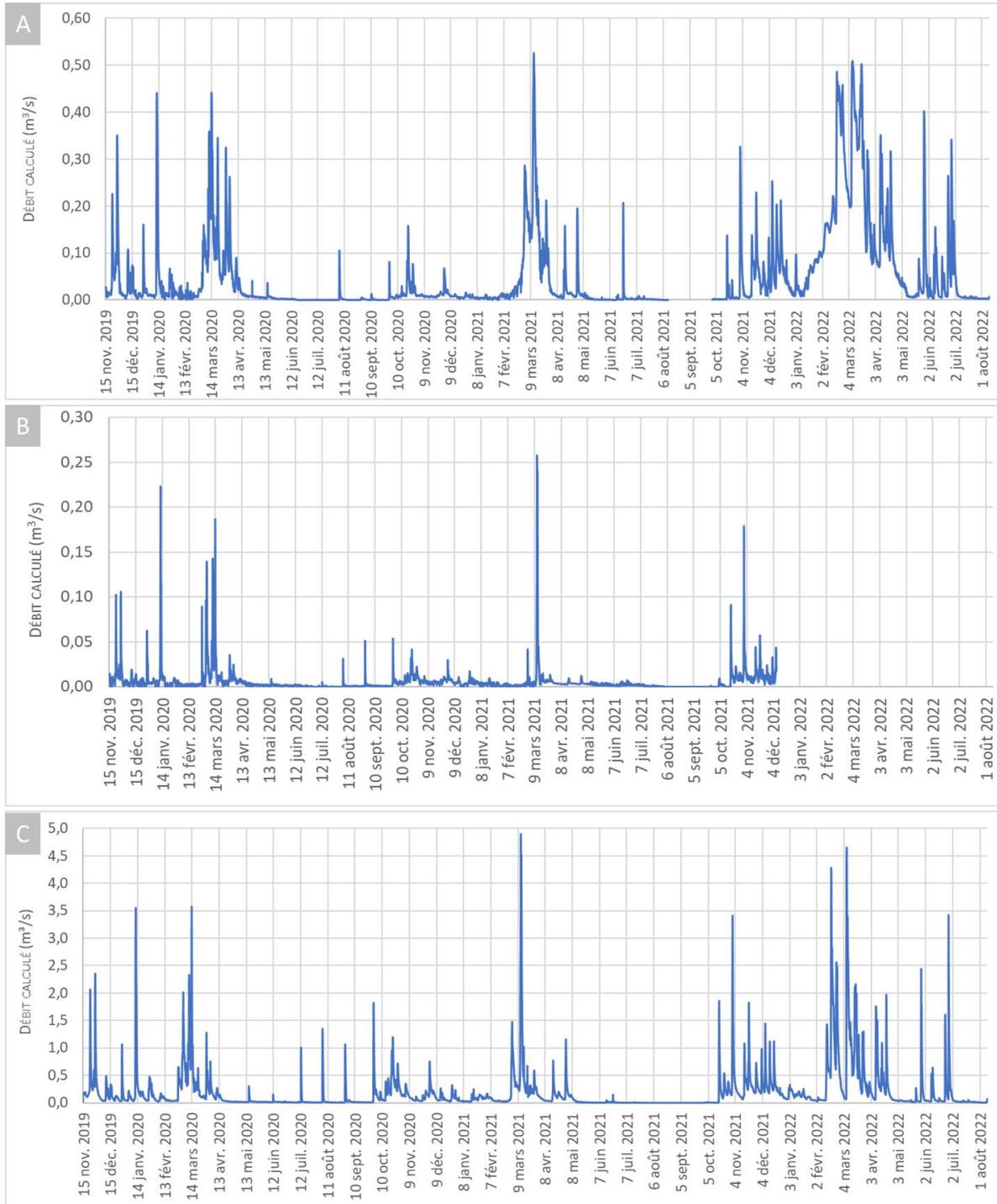
**Figure 5.** Visites terrain pour les mesures de débit à la station 16\_MOR en mars 2021 (A), en septembre 2021 (B), en mars 2022 (C) et en juin 2022 (D); à la station 16\_CAS en mars 2021 (E), en septembre 2021 (F), en mars 2022 (G) et en juin 2022 (H) et à la station 16\_CAS5 en mars 2021 (I) et en septembre 2021 (J).



**Figure 6. Points de tarage aux stations 16\_MOR (A), 16\_CAS5 (B) et 16\_CAS (C). En orange : avant aménagement; en bleu : après aménagement.**

La figure 7 illustre la série des débits observés aux 15 minutes pour la durée du projet. Les débits les plus élevés (16\_MOR : 0,50 m³/s, 16\_CAS5 : 0,15 m³/s et 16\_CAS : 4,07 m³/s) sont associés à la période printanière hâtive de

chaque année (mars), alors que la fonte du couvert de neige et les précipitations sur des sols saturés en eau favorisent l'émission du ruissellement vers les cours d'eau. Les bassins à l'étude ont des réponses hydrologiques similaires, tel que suggéré par la comparaison des hydrogrammes respectifs (Figure 8). À l'été 2020, les cours d'eau de la branche 46 du Morpions et de la branche 5 du Castor ont vu leur lit s'assécher complètement. La sécheresse estivale de 2020 n'a toutefois pas été aussi marquée que celle observée lors de l'été exceptionnellement sec de 2021, alors que même la branche principale du Castor a été totalement asséchée pendant plusieurs semaines. Aucun assèchement des lits n'a été observé en 2022. Les mois de juin, juillet et août en 2021 ont reçu entre deux et trois fois moins d'eau que pour les mêmes mois en 2020 et en 2022 (annexe A).



**Figure 7.** Séries chronologiques des hauteurs d'eau journalières à la station 16\_MOR (A), à la station 16\_CAS5 (B) et à la station 16\_CAS (C), de novembre 2019 à août 2022.

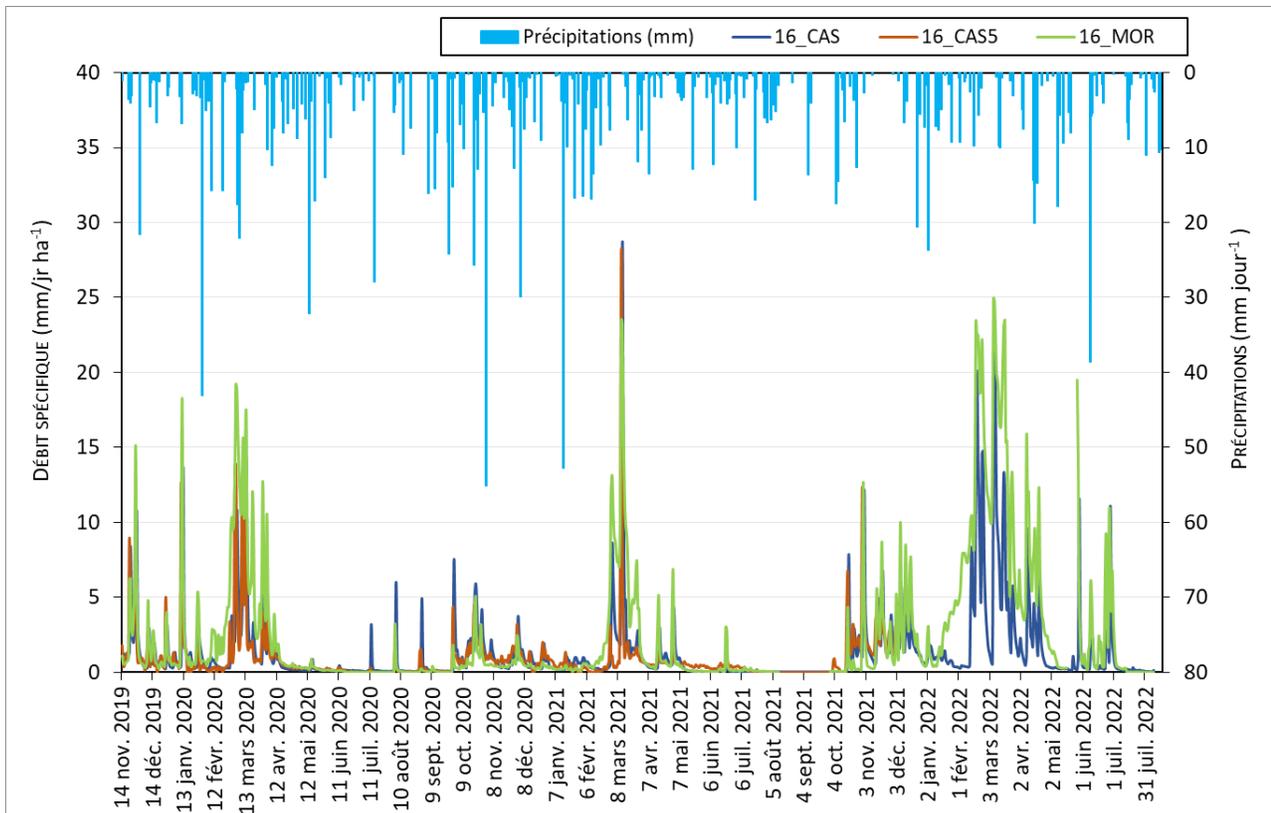


Figure 8. Lame d'eau exportée et précipitations générées.

### 3.2 CONCENTRATIONS ET CHARGES SÉDIMENTAIRES

La concentration instantanée de l'eau en matières en suspension est fortement influencée par le débit du cours d'eau. En règle générale, la concentration augmente de manière importante en fonction du débit, cette augmentation traduisant la force érosive du ruissellement de surface dans le bassin versant. À l'échelle d'un même événement de ruissellement, la quantité de sédiments charriée par le ruisseau est beaucoup plus élevée en montée de crue, que pour le même débit du ruisseau en décrue (phénomène d'hystérésis). Le tableau 1 consigne les exportations totales de sédiments estimées alors que la Figure 9 met en relation les flux modélisés de matières en suspension avec la lame d'eau exportée et les précipitations, pour chacune des stations.

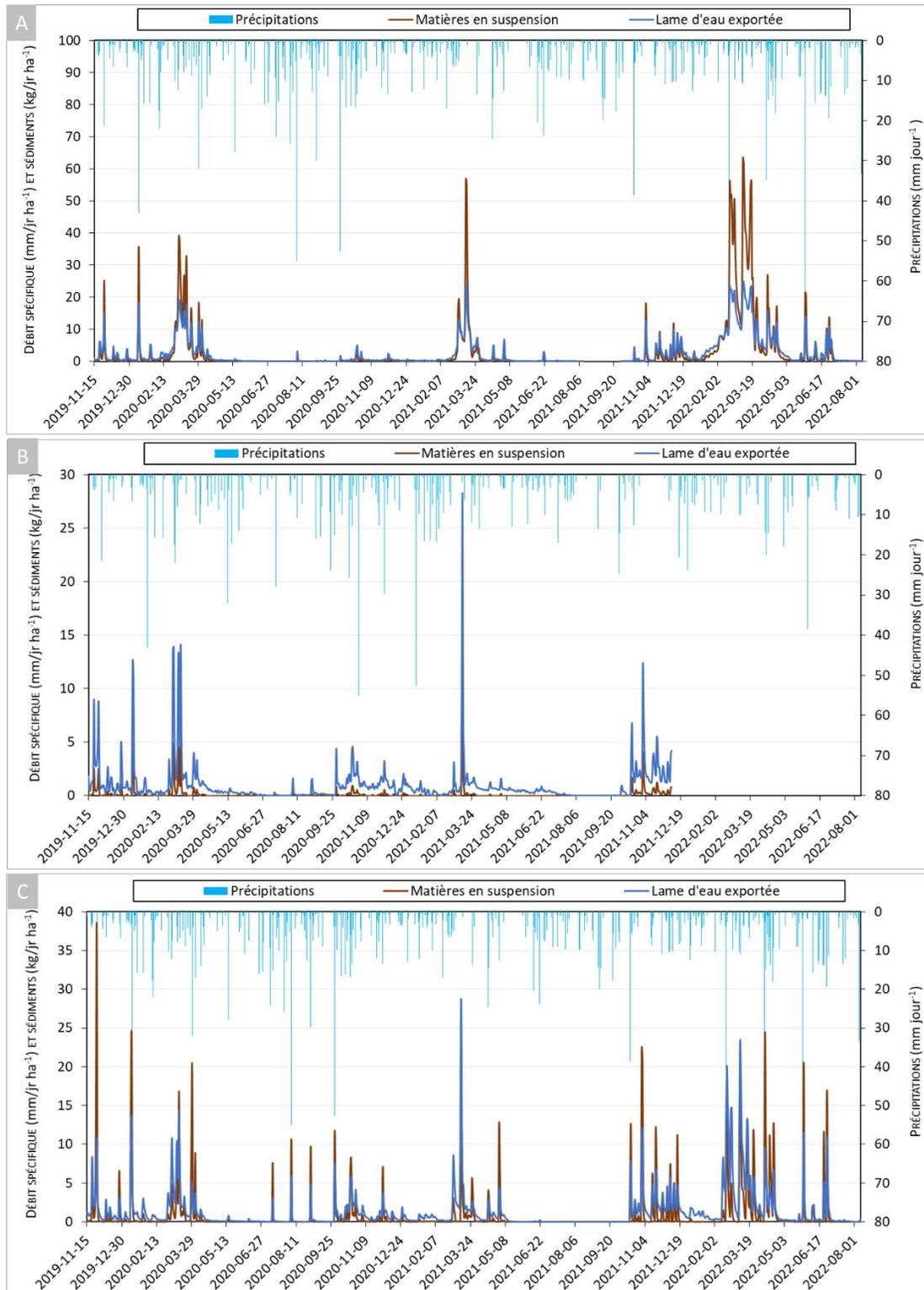
La charge annuelle moyenne de sédiments à la station 16\_CAS a été estimée à 350 kg MES/ha-an. Aux stations 16\_MOR et 16\_CAS5, elles sont respectivement de 1093 et de 61 kg MES/ha-an. Les résultats à la station Morpions sont particulièrement élevés, en comparant avec des suivis antérieurs effectués par l'équipe IRDA. Les perturbations engendrées par les travaux d'aménagement sur la branche 46 ont probablement grandement contribué à la hausse des taux exportés de sédiments. Le sommaire des analyses des échantillons d'eau est d'ailleurs présenté en Annexe B (16\_MOR et 16\_CAS5) et en Annexe C (16\_CAS). La Figure 10 illustre quant à elle

la relation entre les charges de MES mesurées en laboratoire et le débit. Les sorties du modèle FLUX 32 pour les stations 16\_MOR et 16\_CAS5 sont présentées à l'Annexe D.

**Tableau 1. Charges annuelles moyennes de sédiments transportés dans les cours d'eau entre 2019 et 2022.**

Station	Superficie du sous-bassin (ha)	Durée du suivi (jr)	Charge annuelle de sédiments (t/an)	Charge annuelle spécifique de sédiments (kg/ha-an)
16_MOR <sup>2</sup>	174	950	190	1093
16_CAS5	47	754	3	61
16_CAS	1224	1000	428	350

<sup>2</sup> Les totaux sont dérivés d'une seule analyse avec le logiciel FLUX, les périodes avant et suivant l'aménagement sont confondues. Les observations après aménagement n'étaient pas suffisamment nombreuses pour permettre aux modèles du logiciel de s'ajuster adéquatement.



**Figure 9. Hauteur d'eau et flux de sédiments à la station 16\_MOR (A), à la station 16\_CAS5 (B) et à la station 16\_CAS (C).**

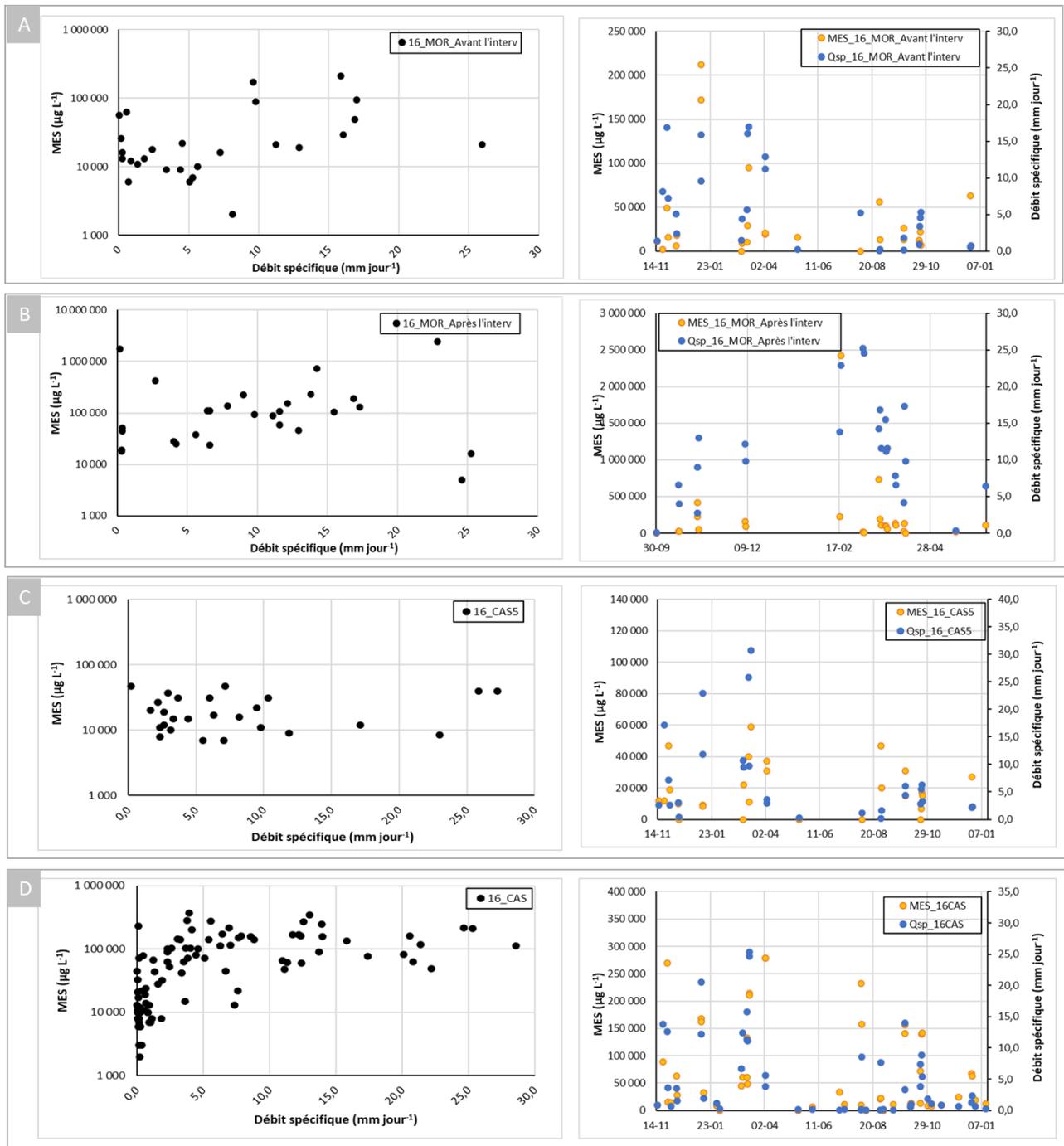


Figure 10. Concentrations en matières en suspension en fonction des débits spécifiques mesurés aux stations 16\_MOR avant l'aménagement (A), 16\_MOR suivant l'aménagement (B), 16\_CAS5 (C) et 16\_CAS (D).

### 3.3 ANALYSE STATISTIQUE

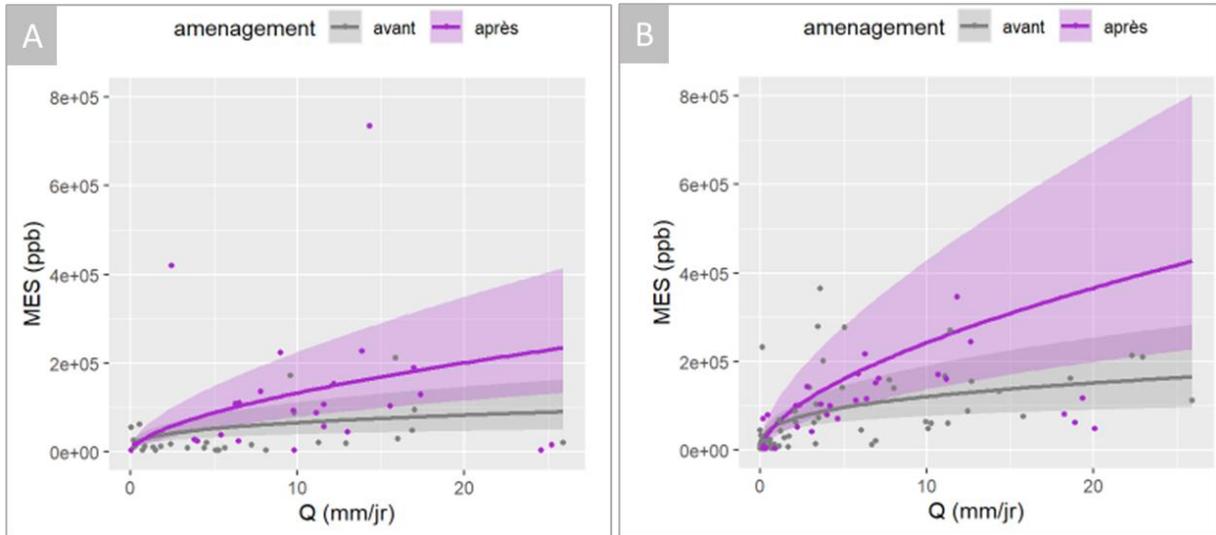
L'analyse statistique vise à répondre à la question suivante: est-ce que le dispositif de mesures hydrométriques a permis de détecter une modification significative de la relation entre les débits et les flux de sédiments?

Les résultats et analyses présentés ci-dessous demeurent exploratoires puisqu'ils ne considèrent qu'une seule année d'échantillonnage suivant les aménagements hydro-agricoles. Toute modification peut être due à d'autres facteurs ayant varié d'une année à l'autre, incluant les conditions météorologiques (accumulation et fonte de la neige au sol, vents, température, ...) et dans les pratiques agricoles en amont des stations (cultures en rotation, types de travaux de sol, implantation d'une bande riveraine, changement d'usage, ...). Le seul facteur pouvant être exclu est la précipitation puisque cette dernière a été incluse dans le modèle statistique. Le tableau 2 ci-dessous recense les paramètres utilisés pour chaque étude.

**Tableau 2. Paramètres des modèles retenus.**

Étude 1 (16_MOR et 16_CAS ensemble)	Étude 2 16_MOR	Étude 2 16_CAS
Aménagement	Aménagement	Débit
Débit	Débit	Précipitation journalière
Interaction débit – aménagement	Précipitation journalière	-
Précipitation journalière	-	-
Station	-	-

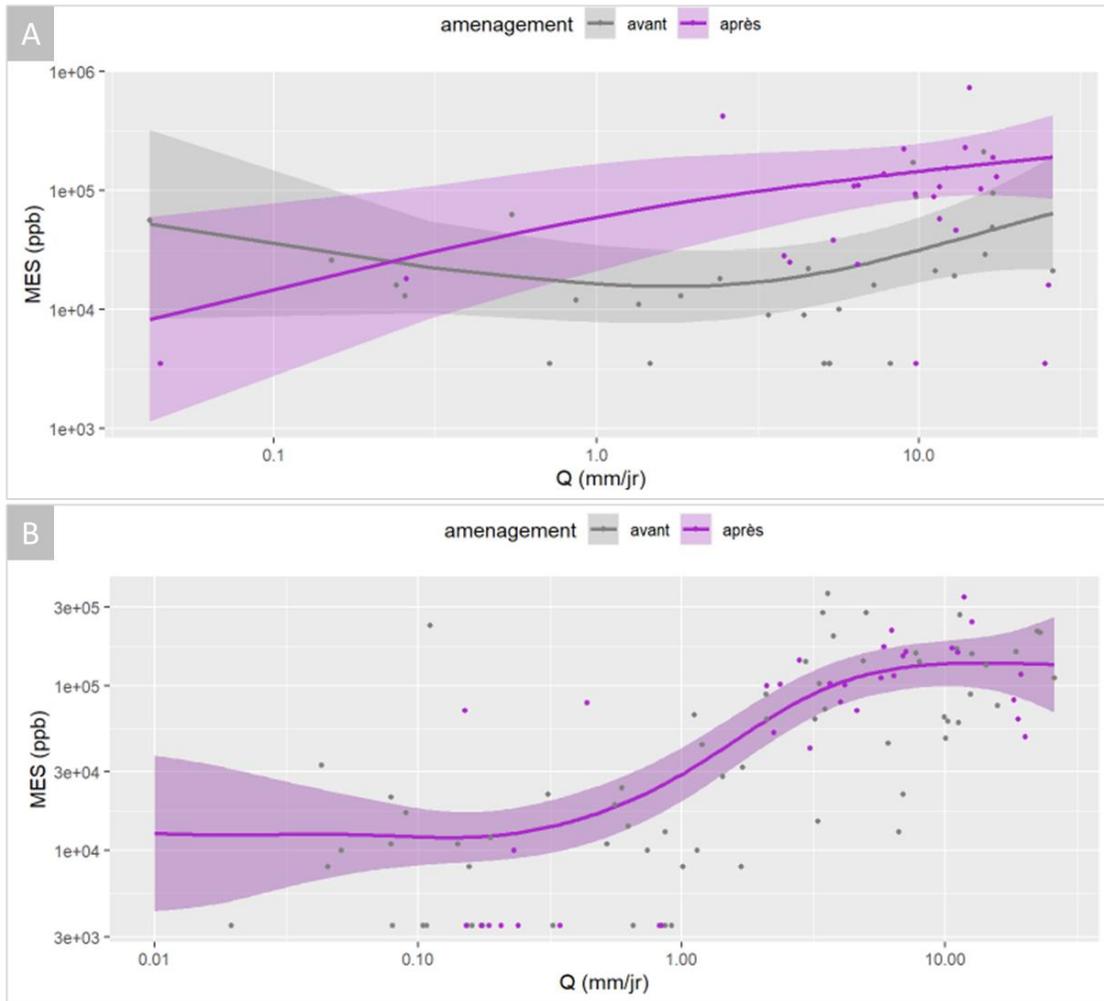
Pour les deux stations (16\_MOR et 16\_CAS), le taux moyen de matières en suspension n'a pas changé après l'aménagement. L'aménagement semble toutefois avoir modifié la relation entre les taux de MES et le débit (Figure 11). Après aménagement, il y a moins de sédiments quand le débit est bas, mais davantage quand le débit est élevé.



**Figure 11. Valeurs moyennes prédites avec intervalle de confiance (95 %) par la première étude statistique (un modèle commun) aux stations 16\_MOR (A) et 16\_CAS (B).**

Les MES sont aussi positivement liés à la précipitation, puisque plus il y a de pluie, plus il y a de MES dans le cours d'eau, mais cette relation ne semble pas avoir été modifiée par l'aménagement. Au final, le modèle explique un peu moins de la moitié de la variance des matières en suspension.

Concernant l'effet de l'aménagement, l'étude statistique 2 a montré que pour la station 16\_MOR, les concentrations moyennes en MES sont plus élevées suivant l'aménagement qu'avant (Figure 12A). Le modèle explique moins de la moitié de la variance des matières en suspension. Pour la station 16\_CAS, les concentrations moyennes de MES sont similaires avant et suivant l'aménagement (Figure 12B). Le modèle explique environ 60 % de la variance des matières en suspension. Toutefois, bien qu'aucun effet de l'aménagement n'ait été détecté, l'incertitude et la sensibilité du modèle incitent à la prudence et cela résulte en l'impossibilité de conclure. Pour approfondir sa compréhension de l'analyse statistique, le lecteur peut se référer à l'Annexe E.



**Figure 12.** Valeurs moyennes prédites avec intervalle de confiance (95 %) par la seconde étude statistique (deux modèles séparés) aux stations 16\_MOR (A) et 16\_CAS (B).

## 4 CONCLUSION

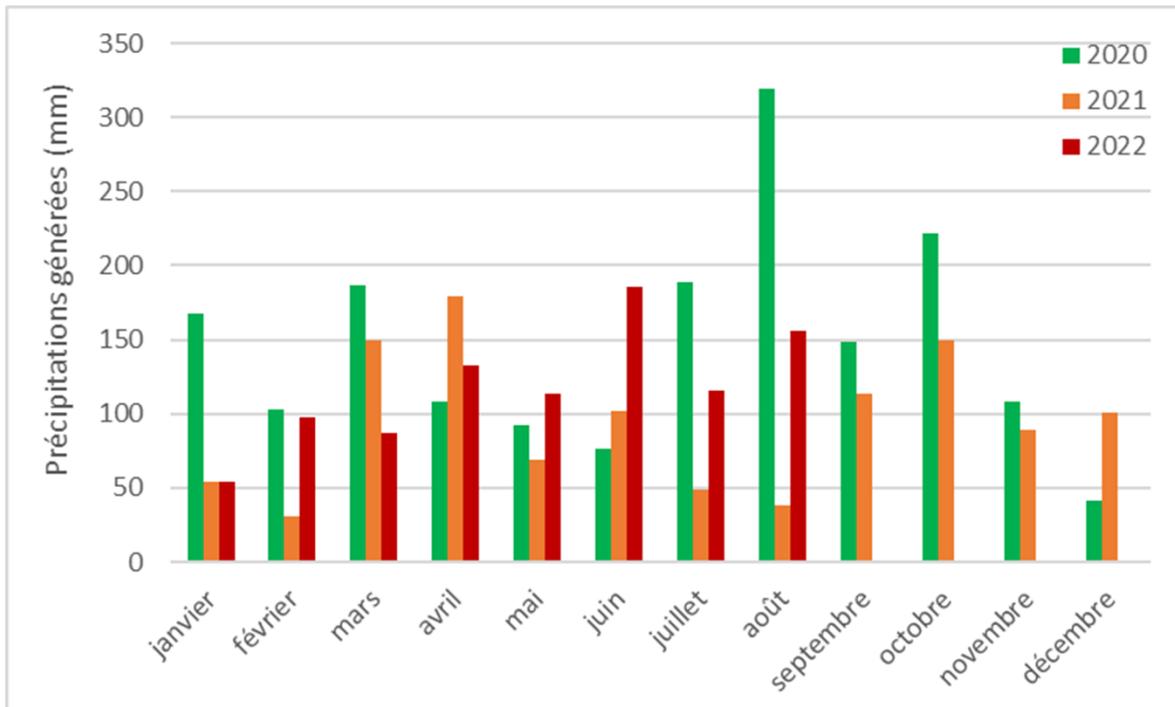
---

Entre 2019 et 2022, les suivis hydrologiques mis en place aux stations hydrométriques de la branche 46 du Morpions et de la branche principale du ruisseau au Castor ont permis de décrire les débits et les flux de sédiments. L'abandon des travaux d'aménagement en amont de la station sur la branche 5 du Castor a mis fin au suivi hydrométrique réalisé à cet endroit en novembre 2021, les résultats recueillis ayant tout de même été inclus dans le présent rapport.

Dans l'ensemble, les réponses des débits des ruisseaux aux précipitations, de même que leurs flux respectifs de sédiments sont d'amplitudes et de distribution semblables. Il est difficile de conclure à un effet significatif de l'aménagement sur les débits et les charges compte-tenu notamment de la courte période (environ 10 mois) de suivi après les aménagements hydro-agricoles.

## ANNEXE A. PRÉCIPITATIONS MENSUELLES ESTIMÉES

La figure ci-bas recense les précipitations mensuelles générées à partir de 55 stations qui ont été utilisées pour l'imputation de valeurs manquantes selon des approches par random forest et kriging. L'exercice permet d'observer les faibles précipitations estivales de 2021, en comparaison avec les deux autres années.



## ANNEXE B. RÉSULTATS DES ANALYSES DE MATIÈRES EN SUSPENSION AUX STATIONS 16\_MOR (BR\_46) ET 16\_CAS5 (BR-5)

SITE	Date_heure	MES (mg/l)	SITE	Date_heure	MES (mg/l)
Br_46	2019-11-15 16:00	11	Br-5	2019-11-15 12:30	12
Br_46	2019-11-22 14:00	2	Br-5	2019-11-22 13:30	12
Br_46	2019-11-28 09:30	49	Br-5	2019-11-28 10:45	47
Br_46	2019-11-29 09:30	16	Br-5	2019-11-29 09:00	19
Br_46	2019-12-10 08:30	6	Br-5	2019-12-10 09:45	10
Br_46	2019-12-11 05:30	18	Br-5	2019-12-11 07:00	0
Br_46	2020-01-11 13:30	172	Br-5	2020-01-11 14:00	90
Br_46	2020-01-11 16:45	212	Br-5	2020-01-11 18:00	85
Br_46	2020-03-03 16:30	0	Br-5	2020-03-03 15:30	0
Br_46	2020-03-04 12:00	9	Br-5	2020-03-04 12:45	22
Br_46	2020-03-10 16:00	10	Br-5	2020-03-10 18:00	40
Br_46	2020-03-11 12:00	29	Br-5	2020-03-11 12:45	11
Br_46	2020-03-13 13:45	95	Br-5	2020-03-13 14:30	59
Br_46	2020-04-03 09:45	19	Br-5	2020-04-03 10:15	31
Br_46	2020-04-03 14:30	21	Br-5	2020-04-03 15:45	37
Br_46	2020-05-15 11:45	16	Br-5	2020-05-15 14:30	0
Br_46	2020-08-05 06:00	0	Br-5	2020-08-05 07:45	0
Br_46	2020-08-29 14:30	56	Br-5	2020-08-29 16:15	47
Br_46	2020-08-30 06:30	13	Br-5	2020-08-30 07:45	20
Br_46	2020-09-30 05:00	26	Br-5	2020-09-30 06:15	15
Br_46	2020-09-30 12:00	13	Br-5	2020-09-30 13:00	31
Br_46	2020-10-20 06:45	12	Br-5	2020-10-20 08:00	0
Br_46	2020-10-20 15:00	9	Br-5	2020-10-20 16:15	7
Br_46	2020-10-21 15:15	22	Br-5	2020-10-21 16:15	17
Br_46	2020-10-22 09:15	7	Br-5	2020-10-22 10:15	15
Br_46	2020-12-25 16:00	63	Br-5	2020-12-25 17:30	27
Br_46	2020-12-26 09:00	6	Br-5	2020-12-26 10:00	8
Br_46	2021-03-12 18:00	21	Br-5	2021-03-12 13:00	119
Br_46	2021-03-26 17:00	88	Br-5	2021-03-26 18:15	11
Br_46	2021-09-30 11:30	0	Br-5	2021-10-17 06:00	16
Br_46	2021-10-17 06:30	24	Br-5	2021-10-17 13:45	0
Br_46	2021-10-17 14:00	28	Br-5	2021-10-31 10:30	31
Br_46	2021-10-31 11:30	420	Br-5	2021-10-31 18:00	40
Br_46	2021-10-31 17:00	224	Br-5	2021-11-01 11:00	7
Br_46	2021-11-01 12:00	46			
Br_46	2021-12-07 06:00	154			
Br_46	2021-12-07 13:30	94			
Br_46	2022-02-17 16:00	228			
Br_46	2022-02-18 14:00	2424			
Br_46	2022-03-07 13:30	16			
Br_46	2022-03-08 13:00	5			
Br_46	2022-03-19 12:00	734			
Br_46	2022-03-20 08:00	190			
Br_46	2022-03-21 09:30	107			
Br_46	2022-03-24 17:00	103			
Br_46	2022-03-25 08:00	89			
Br_46	2022-03-26 08:00	58			
Br_46	2022-04-01 06:30	137			
Br_46	2022-04-01 15:30	110			
Br_46	2022-04-07 17:30	25			
Br_46	2022-04-08 11:30	130			
Br_46	2022-04-09 09:30	0			
Br_46	2022-05-17 08:30	18			
Br_46	2022-06-09 15:30	109			
Br_46	2022-06-10 11:30	38			
Br_46	2022-07-12 10:00	51			
Br_46	2022-07-13 11:30	19			
Br_46	2022-08-08 11:00	1762			
Br_46	2022-08-09 08:00	44			

# ANNEXE C. RÉSULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES À LA STATION 16\_CAS

Date-Heure	Élément Unité Site	MES mg/l	N-NH4 mg/l	N-NO3+N-NO2 mg/l	P réactif ug/l	P NaOH+EDTA ug/l	P Per. ug/l	P ppb	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Na mg/L	Conductivité uS/cm à 25
2019-11-15 13:00	CA	10	0,067	5,08	42	75	79	45	4,17	95,5	23,8	15,1	686
2019-11-22 13:45	CA	89	0,153	3,52	293	383	505	334	4,43	42,9	9,12	8,66	331
2019-11-28 10:30	CA	270	0,129	3,86	132	367	579	147	4,24	35,3	7,14	6,36	271
2019-12-03 12:00	CA	14	0,060	5,68	29	52	56	26,8	4,2	98,6	25,1	16,0	707
2019-12-10 08:45	CA	63	0,201	2,67	127	197	310	154	5,41	51,2	12,3	12,3	414
2019-12-11 06:45	CA	28	0,095	3,8	72	112	150	85	4,44	74,9	18,3	13,9	551
2020-01-11 13:45	CA	168	0,056	1,79	203	329	475	237	4,31	19,8	4,17	6,39	182
2020-01-11 17:15	CA	162	0,158	1,76	204	327	475	236	4,27	19,8	4,14	6,36	181
2020-01-14 14:45	CA	32	0,039	5,44	46	91	118	51,7	3,86	74	17,6	12,8	549
2020-01-31 10:30	CA	8	0,065	4,48	21	42	52	20,9	3,88	101	26	18,3	742
2020-02-04 14:45	CA	0	0,076	3,46	21	35	45	16,9	3,75	99,6	25,7	19,4	737
2020-03-03 14:00	CA	45	0,145	2,09	33	95	106	41,3	1,97	43,3	7,87	10,0	326
2020-03-04 12:15	CA	60	0,175	2,77	67	141	172	81,2	2,81	32,8	6,36	10,3	277
2020-03-10 14:30	CA	61	0,102	2,40	84	164	188	92,7	2,84	32,8	6,75	6,14	257
2020-03-10 17:45	CA	133	0,129	2,07	96	175	338	115	2,75	27,5	5,36	5,44	214
2020-03-11 09:00	CA	48	0,084	1,27	66	126	155	81,4	1,54	21,3	3,64	3,25	159
2020-03-13 14:15	CA	214	0	1,34	121	249	421	142	2,54	17,7	3,30	3,62	135
2020-03-13 18:30	CA	211	0	1,34	121	274	402	130	2,51	17,8	3,32	3,64	135
2020-04-03 09:45	CA	278	0	3,63	65	306	469	68,4	3,24	49,8	10,8	11,1	371
2020-04-03 15:15	CA	279	0	3,66	66	316	467	88,5	3,31	50,2	10,9	11,3	371
2020-05-15 13:00	CA	0	0,049	0,04	10	25	49	10,3	3,76	99,1	32,4	23,1	753
2020-06-02 13:00	CA	6	0,23	2,98	49	68	74	58,2	6,43	104	33,7	24,8	825
2020-07-07 13:00	CA	33	0,15	0,12	255	306	330	299	4,95	95,9	36,0	25,9	793
2020-07-14 14:15	CA	11	0,48	8,02	132	157	166	165	7,48	113	28,3	25,1	849
2020-08-04 20:00	CA	232	0,057	0,88	252	500	715	283	6,33	90,9	33,1	24,2	757
2020-08-05 07:30	CA	158	0,029	7,20	208	350	473	232	4,88	46,2	9,53	15,5	385
2020-08-04 16:00	CA	10	0,079	0,084	215	252	290	246	5,69	94,8	35,7	28	785
2020-08-11 13:00	CA	0	0,056	0,791	121	129	149	135	5,93	117	35	28,2	871
2020-08-29 15:45	CA	21	0,037	0,447	160	207	252	181	6,01	73,7	26,2	17,4	619
2020-08-30 07:15	CA	22	0,048	0,443	160	225	246	182	5,95	73,9	26	17,3	611
2020-09-02 13:00	CA	0	0,023	3,55	111	136	162	128	5,76	101	27,2	22,9	766
2020-09-15 10:00	CA	11	0,03	0,19	103	116	139	114	6,04	113	33,2	25,9	851
2020-09-30 06:00	CA	141	0,134	6,46	385	554	714	446	9,76	46,8	13,4	10,7	415
2020-09-30 12:45	CA	156	0,088	7,97	192	344	526	218	6,34	44,2	9,24	11,1	366
2020-10-07 16:15	CA	11	0	2,74	85	118	149	98,9	5,47	105	27,3	19,1	772
2020-10-08 14:45	CA	13	0	3,82	65	97,0	128	77,0	5,35	103	25,4	19,3	754
2020-10-20 07:45	CA	72	0	5,50	103	178	235	117	5,79	81,3	20,0	15,5	603
2020-10-20 15:50	CA	13	0,047	11,3	66	121	134	72	6,54	85,5	15,9	12,6	595
2020-10-21 16:00	CA	140	0	6,80	121	250	366	132	5,61	69,8	16,0	11,9	516
2020-10-22 09:40	CA	142	0	6,80	117	260	370	131	5,59	69,6	15,8	11,9	512
2020-10-29 16:30	CA	8	0	6,51	48	69	94	42	4,76	105	25,4	17,4	744
2020-11-03 10:00	CA	7	0	4,63	40	63	68	39	5,15	108	27,5	20,4	783
2020-11-16 15:45	CA	24	0	3,34	73	119	148	83	5,59	103	26,8	22,9	783
2020-12-08 13:00	CA	10	0	5,7	30	49	54	23,8	4,04	107	27,9	18,8	790
2020-12-25 17:00	CA	67	0,07	3,46	61	160	230	72	4,58	84,1	22,0	22,9	671
2020-12-26 09:45	CA	63	0,04	6,13	72	165	217	83	4,38	79,5	19,7	31,5	690
2020-12-30 15:00	CA	19	0	5,77	26	69	87	19	3,70	112	29,6	20,0	821
2021-01-12 12:00	CA	12	0,03	2,83	20	69	74	9,3	3,69	102	30,2	23,1	837
2021-01-15 13:00	CA	8	0,03	2,61	23	66	73	22	3,77	114	30,1	24,6	846
2021-02-09 15:00	CA	22	0	2,20	32	89	90	0,029	3,92	114	30,6	42,9	939
2021-03-08 12:30	CA	89	0	5,61	48	118	188	0,052	4,65	102	25,3	32,4	824
2021-03-11 12:00	CA	65	0,22	1,18	108	186	239	0,123	1,25	28,8	3,78	7,59	199
2021-03-11 15:30	CA	76	0,27	3,49	155	234	321	0,176	3,41	32,1	6,35	16,0	301
2021-03-12 10:45	CA	112	0,46	5,40	207	314	409	0,233	4,11	27,5	4,89	7,02	223
2021-04-06 14:15	CA	0	0,033	3,67	20	33	37	0,015	4,06	98,2	27,9	22,9	760
2021-03-26 17:15	CA	365	0	5,35	85	321	608	0,105	3,91	64,7	17,1	16,5	528
2021-04-16 09:15	CA	44	0,075	6,14	64	99	160	0,078	4,60	89,6	25,0	43,5	826
2021-04-16 17:00	CA	201	0,050	8,97	144	288	460	0,167	4,72	72,1	18,1	30,1	648
2021-04-17 07:30	CA	103	0	12,6	113	191	307	0,128	4,46	72,5	16,5	19,6	590
2021-04-26 09:00	CA	0	0	5,12	8	20	25	0,012	3,76	102	27,3	24,3	775
2021-05-04 16:00	CA	0	0	7,04	15	26	32	0,015	4,00	96,0	24,4	20,0	715
2021-05-11 12:15	CA	0	0,065	4,38	5	26	30	0,003	3,81	97,5	27,8	20,8	739

Date-Heure	Élément	MES	N-NH4	N-NO3+N-NO2	P réactif	P NaOH+EDTA	P Per.	P	K	Ca	Mg	Na	Conductivité
	Unité Site	mg/l	mg/l	mg/l	ug/l	ug/l	ug/l	ppb	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	uS/cm à 25
2021-07-13 16:15	CA	13	0,102	0,113	187	792	218	235	219	5,33	86,5	29,8	36,7
2021-06-14 08:00	CA	8	0	0,36	243	260	264	271	4,69	101	36,9	27,8	820
2021-06-21 16:45	CA	17	0	1,75	163	189	192	180	4	96,7	29,2	25,4	756
2021-06-22 15:45	CA	0	0	8,27	132	135	146	149	4,55	103	26	26,2	786
2021-07-09 07:45	CA	0	0	0,61	239	252	254	263	4,91	96,4	31,5	29,1	787
2021-08-30 10:30	CA	45	0,683	0,22	737	852	867	815	7,99	71,6	28,7	30,1	688
2021-08-30 19:00	CA	0	0	2,53	210	223	248	237	5,25	102	30,5	28,2	806
2021-10-17 05:30	CA	170	0,01	13,4	229	376	501	0,244	7,15	64,0	13,0	14,5	506
2021-10-17 13:45	CA	115	0	14,1	213	333	412	0,222	7,21	70,7	14,6	14,9	552
2021-10-31 10:30	CA	217	0,01	9,77	239	437	557	0,250	5,18	60,3	14,7	11,4	476
2021-10-31 13:30	CA	244	0	9,90	216	450	600	0,223	5,02	50,2	10,3	9,68	388
2021-11-01 11:30	CA	160	0,01	10,8	188	385	483	0,197	5,63	53,0	10,5	8,99	403
2021-11-09 11:15	CA	0	0,01	7,62	44	60	70	0,046	5,21	124	29,4	21,5	886
2021-12-07 07:00	CA	152	0	6,92	116	287	414	0,130	4,84	56,8	12,1	12,0	442
2021-12-07 09:30	CA	112	0	7,63	92	219	312	0,105	4,92	66,1	14,6	13,2	502
2022-02-08 12:00	CA	3	0,08	2,27	36	40	54	0,038	4,28	115	30,8	50,3	998
2022-02-17 15:00	CA	117	0,26	1,55	243	337	554	0,275	5,93	22,4	5,42	11,9	239
2022-02-18 15:00	CA	63	0,28	2,94	169	236	333	0,193	5,29	24,0	4,66	12,9	244
2022-03-07 16:00	CA	49	0,30	1,74	149	211	329	0,173	4,19	18,7	3,58	12,6	206
2022-03-08 14:00	CA	82	0,38	2,27	189	269	367	0,22	4,56	25	4,57	13,9	242
2022-03-19 12:45	CA	71	0,13	5,11	70	137	209	0,09	3,57	57,5	13,2	15,0	448
2022-03-20 09:00	CA	162	0,17	5,45	85	229	391	0,12	3,99	46,9	9,43	13,3	372
2022-03-21 11:00	CA	42	0,16	6,34	61	111	166	0,09	3,77	68,6	15,6	15,3	518
2022-03-24 16:30	CA	173	0,24	6,64	80	251	360	0,11	3,81	53,3	11,5	14,1	436
2022-03-25 07:45	CA	101	0,19	7,00	58	169	241	0,08	3,64	66,8	15,6	14,9	528
2022-03-26 07:00	CA	80	0,16	7,32	54	136	206	0,07	3,74	65,8	14,9	14,5	516
2022-04-01 07:30	CA	102	0,12	6,36	46	159	226	0,07	4,06	78,8	19,2	19,9	622
2022-04-01 16:30	CA	100	0,12	6,35	47	160	233	0,07	4,05	78,5	19,0	19,7	617
2022-04-07 18:00	CA	7	0,02	5,36	17	43	48	0,03	3,94	98,3	26,0	21,2	752
2022-04-08 10:00	CA	347	0,15	5,88	106	417	642	0,13	3,61	37,6	7,34	12,2	321
2022-04-09 09:00	CA	103	0	7,98	59	153	232	0,06	3,62	67,8	15,3	14,2	516
2022-05-16 18:45	CA	10	0,03	0,85	6	25	58	0,01	4,04	95,2	30,1	24,3	766
2022-05-17 09:30	CA	7	0,03	1,06	3	27	42	0,01	4,12	101	26,3	36,8	832
2022-05-03 11:30	CA	6	0	3,41	4	32	43	10,7	4,05	101	27,6	22,3	776
2022-06-07 10:30	CA	6	0,02	3,84	0	28	41	6,74	3,57	101	27,1	21,5	779
2022-06-09 16:00	CA	143	0,36	13,2	100	251	367	116	4,52	76,7	17,3	16,3	597
2022-06-10 09:30	CA	52	0,27	12,8	90	149	213	105	4,63	85,9	19,2	15,9	653
2022-07-05 08:15	CA	6	0	5,00	70	93	102	0,08	4,36	116	28,7	27,3	847
2022-07-12 11:00	CA	3	0,03	1,58	81	104	109	0,09	4,50	114	30,8	34,2	881
2022-07-13 10:45	CA	2	0,02	1,75	114	141	154	0,13	4,85	108	26,7	35,5	840
2022-08-08 13:00	CA	71	0,05	3,14	261	367	399	0,30	5,41	73,3	20,5	22,0	611
2022-08-09 09:30	CA	79	0,05	4,17	266	382	428	0,31	8,96	78,3	17,4	39,6	690
2022-09-06 10:30	CA	0	1,86	3,63	87	102	88,5	0,10	5,77	114	26,9	23,1	829
2022-09-14 07:00	CA	10	0,023	2,27	148	171	175	0,16	7,59	107	25,9	26,4	803
2022-09-14 18:00	CA	3	0,025	1,52	143	182	156	0,16	6,58	108	26,2	28,4	815
2022-09-19 09:00	CA	22	1,38	2,71	1305	1396	1456	1,41	9,41	92,0	24,0	22,0	723
2022-09-20 09:15	CA	146	0,384	3,87	492	655	855	0,53	6,34	56,3	11,8	11,2	423

## ANNEXE D. SORTIES DU MODÈLE FLUX 32

### 16\_MOR

#### FLOW AND LOAD SUMMARIES FOR M.E.S. Toute\_la\_période

##### DISTRIBUTION OF SAMPLES VS. DAILY FLOWS

Stratum	Flows	SmpIs	Evnts	Vol %	Daily Flow (m <sup>3</sup> /s)	Smpl Flow (M.E.S.) (m <sup>3</sup> /s)	Flux** (µg/L)	SLOPE (kg/y)	LgC/LgQ	R <sup>2</sup>	p > C/Q
1 Flow < Mean 0,7287	697	15	15	14,4	0,00998867	0,0155023100	0,00000000000000000000	9604,45			-0,104 0,01
2 Flow > Mean 0,0974	253	34	34	85,6	0,16407	0,228189500	0,00000000000000000000	686103,00			0,8413 0,08
Overall 0,0379	950	49	49	100,0	0,0510221	0,163069200	0,00000000000000000000	189767,00			0,279 0,09

##### STRATUM BOUNDARIES (m<sup>3</sup>/s)

STRATUM	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT
1 Flow < Mean	0	0,05102
2 Flow > Mean	0,05102	0,5229

##### DAILY FLOW STATISTICS

Daily Flow Duration	950 Days = 2,601 Years
Daily Mean Flow Rate	0,05102 (m <sup>3</sup> /s)
Daily Total Flow Volume	4,1879 (Mega m <sup>3</sup> )
Daily Flow Date Range	2019/11/15 to 2022/08/09
Samples Date Range	2019/11/15 to 2022/08/09

##### LOAD ESTIMATES FOR M.E.S.

Method	Mass (kg)	Flux Rate (kg/y)**	Flux Variance	Flw Wgted Conc. (µg/L)	C.V.
1 Average Load	498514	191665,00	2,974498E9	119037	0,285
2 Flw Wgthed Conc.	357367	137398,00	1,500775E9	85333	0,282
3 Flw Wgthed IJC.	356342	137004,00	1,507761E9	85089	0,283
4 C/Q Reg1	273777	105260,00	7,961973E8	65373	0,268
5 C/Q Reg2 (VarAdj)	299998	115341,00	1,09057E9	71634	0,286
6 C/Q Reg3 (daily)	493576	189767,00	3,895662E9	117858	0,329
8 Time Series*	405010	155716,00	1,191915E9	96710	0,222

\*Time series estimates use residual interpolation.

Maximum Interpolation Gap is set at 15,17 days

\*\* Flow duration includes a fractional year; units of Flux/y may mislead.

Location: 16\_MOR\_ Toute\_la\_période

Flux Constituent: M.E.S. Calculation Method: (6) C/Q Reg3 (daily)

##### FLUX Breakdown by Stratum:

STRATUM	NS	NE	FREQ DAYS	FLOW m <sup>3</sup> /s	FLUX kg/y	VOLUME Mega m <sup>3</sup>	MASS kg	CONC µg/L	CV
Flow < Mean	15	15	697,0	0,0099887	9604,5	0,60153	18328	30469	0,372
Flow > Mean	34	34	253,0	0,16407	686103	3,58637	475247	132515	0,341
TOTAL	49	49	950,0	0,051022	189767	4,18790	493576	117858	0,329

##### Present Sample Allocation and Optimum Allocation (NEOPT%) For Variance Reduction

STRATUM	NS	NE	NE%	FREQ%	VOL%	MASS%	VAR%	VARIANCE	CV	NEOPT%
Flow < Mean	15	15	30,6	73,4	14,4	3,7	0,2	6887168,8	0,372	2,7
Flow > Mean	34	34	69,4	26,6	85,6	96,3	99,8	3,8887747E9	0,341	97,3
TOTAL	49	49	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	3,8956618E9	0,329	100,0

Optimal Allocation of 49 Sampled Events Across Strata (According to NEOPT%)

Would Reduce CV of FLUX Estimate from 0,329 to 0,281

**16\_CAS5****FLOW AND LOAD SUMMARIES FOR M.E.S.**

Method: C/Q Reg3(daily) (6)

DISTRIBUTION OF SAMPLES VS. DAILY FLOWS

Stratum	Flows	SmpIs	Evnts	Vol %	Daily Flow (m <sup>3</sup> /s)	Smpl Flow(M.E.S.) (m <sup>3</sup> /s)	Flux (µg/L)	SLOPE (kg/y)	LgC/LgQ R <sup>2</sup>	p > C/Q
1 Flow < Mean 0,0931	551	3	3	23,9	0,00171158	0,00155116300	0,000000000000000000	230,593		-6,956 0,98
2 Flow > Mean 0,0374	203	25	25	76,1	0,0147785	0,0518422900	0,000000000000000000	10070,100		0,4737 0,17
Overall 0,0167	754	28	28	100,0	0,00522959	0,0464522200	0,000000000000000000	2879,690		0,4259 0,20

STRATUM BOUNDARIES (m<sup>3</sup>/s)

STRATUM	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT
1 Flow < Mean	0	0,00523
2 Flow > Mean	0,00523	0,2012

## DAILY FLOW STATISTICS

Daily Flow Duration 754 Days = 2,064 Years  
 Daily Mean Flow Rate 0,005230 (m<sup>3</sup>/s)  
 Daily Total Flow Volume 0,3407 (Mega m<sup>3</sup>)  
 Daily Flow Date Range 2019/11/15 to 2021/12/07  
 Samples Date Range 2019/11/15 to 2021/11/01

## LOAD ESTIMATES FOR M.E.S.

Method	Mass (kg)	Flux Rate(kg/y)	Flux Variance	Flw Wgted Conc. (µg/L)	C.V.
1 Average Load	37826,2	18323,600	7,362246E7	111030	0,468
2 Flw Wgghted Conc.	11469,2	5555,880	3747270	33665	0,348
3 Flw Wgghted IJC.	11716,2	5675,530	4077061	34390	0,356
4 C/Q Reg1	6284,54	3044,330	990179	18447	0,327
5 C/Q Reg2(VarAdj)	9185,58	4449,650	1202402	26962	0,246
6 C/Q Reg3(daily)	5944,66	2879,690	228418	17449	0,166
8 Time Series*	7816,52	3786,450	6730809	22944	0,685

\*Time series estimates use residual interpolation.  
 Maximum Interpolation Gap is set at 18,36 days

**Location: 16\_CAS5**

Flux Constituent: M.E.S. Calculation Method: (6) C/Q Reg3(daily)

## FLUX Breakdown by Stratum:

STRATUM	NS	NE	FREQ DAYS	FLOW m <sup>3</sup> /s	FLUX kg/y	VOLUME Mega m <sup>3</sup>	MASS kg	CONC µg/L	CV
Flow < Mean	3	3	551,0	0,0017116	230,59	0,081482	347,86	4269	0,000
Flow > Mean	25	25	203,0	0,014778	10070	0,25920	5596,8	21592	0,179
TOTAL	28	28	754,0	0,0052296	2879,7	0,34068	5944,7	17449	0,166

## Present Sample Allocation and Optimum Allocation (NEOPT%) For Variance Reduction

STRATUM	NS	NE	NE%	FREQ%	VOL%	MASS%	VAR%	VARIANCE	CV	NEOPT%
Flow < Mean	3	3	10,7	73,1	23,9	5,9	-3,1	-7183,3592	0,000	0,0
Flow > Mean	25	25	89,3	26,9	76,1	94,1	103,1	235601,79	0,179	100,0
TOTAL	28	28	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	228418,43	0,166	100,0

Optimal Allocation of 28 Sampled Events Across Strata (According to NEOPT%)

Would Reduce CV of FLUX Estimate from 0,166 to 0,159

# ANNEXE E. RAPPORT COMPLET SUR LA MODÉLISATION STATISTIQUE

---

## Modélisation des matières en suspension dans les ruisseaux Morpions et Castor

Mick Wu

### ÉTUDE 1 (étude conjointe) :

#### 1 Introduction

Ce document décrit le traitement de données et les analyses statistiques pour le projet 400211. Le projet a pour but de décrire l'effet d'un aménagement du cours d'eau sur sa réponse hydrologique:

- Relation entre le débit et les matières en suspension

**Note:** Il faut garder en tête que c'est une comparaison entre 2 années et autre chose pourrait avoir changé d'une année à l'autre. Toute différence pourrait être dû à autre chose que l'aménagement (ex. pratiques agricoles dans les champs avoisinants, météo).

---

#### 2 Exploration des données

Ce document a été préparé avec R version 4.2.1 (2022-06-23 ucrt) et les bibliothèques suivantes:

- readxl version 1.4.1
- ggplot2 version 3.3.6
- ggpubr version 0.4.0
- lubridate version 1.8.0
- tidyverse version 1.3.1
- magrittr version 2.0.3
- GGally version 2.1.2
- ggbeeswarm version 0.6.0
- mgcv version 1.8.40
- MASS version 7.3.57

## Chargement des librairies

```
library(readxl)
library(ggplot2)
library(ggpubr)
library(lubridate)
library(tidyverse)
library(magrittr)
library(GGally)
library(ggbeeswarm)
library(mgcv)
library(MASS)
```

## 2.1 Importer et traiter les données

### 2.1.1 Importer Q et MES

On importe des données sur les matières en suspension (MES) et débits (Q); Ce sont des fichiers .csv exportés à partir de fichiers Excel.

```
datc <- read.csv2("donnees/MES_Castor_20220921.csv", header = TRUE)
datm <- read.csv2("donnees/MES_Morpion_20220915.csv", header = TRUE)
dat <- rbind(datc, datm)
str(dat)

## 'data.frame': 160 obs. of 4 variables:
## $ station : chr "Castor" "Castor" "Castor" "Castor" ...
## $ dateheure: chr "2019-11-15 13:00" "2019-11-22 13:45" "2019-11-28 10:30" "2019-11-29 08:30" ...
## $ Q_mmjr : num 1.142 12.457 11.376 3.294 0.629 ...
## $ MES_ppb : chr "10000" "89000" "270000" "15000" ...
```

### Formatter les variables.

```
names(dat)[3:4] <- c("Q", "MES")
```

```

# Facteur
dat %<>%
  mutate(station = factor(station))
# numérique
dat$MES <- gsub(" ", "", dat$MES)
dat %<>%
  mutate(MES = as.numeric(MES))
# date et jour de l'année
dat %<>%
  mutate(dateheure = as.POSIXct(dateheure, format = "%Y-%m-%d %H:%M")) %>%
  mutate(date = as.POSIXct(format(dateheure, format = "%Y-%m-%d")))

```

### 2.1.2 Ajouter les données de précipitation

On importe aussi des données de précipitation journalières. Ce sont des données générées à partir de 55 stations qui ont été utilisées pour imputations de valeurs manquantes par random forest et kriging pour obtenir des valeurs aux points d'échantillonnage.

```

load("kriggedPrecip_CastorMorpion.RData")
datp <- dat.pe
rm(dat.pe, lidat, pts.coord, sphvgm, stations)
str(datp)
## 'data.frame': 2068 obs. of 8 variables:
## $ point : Factor w/ 2 levels "Castor","Morpion": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ lon : num -73.1 -73.1 -73.1 -73.1 -73.1 ...
## $ lat : num 45.1 45.1 45.1 45.1 45.1 ...
## $ elev : num 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 ...
## $ x : num 5600308 5600308 5600308 5600308 5600308 ...
## $ y : num 12086271 12086271 12086271 12086271 12086271 ...
## $ date : Date, format: "2019-11-02" "2019-11-03" ...
## $ precip: num 1 1.6 0 1.4 1 3 1 0 1 15.3 ...
names(datp)[1] <- "station"

```

## Combiner les données

```
dat <- left_join(dat, dplyr::select(datp, c("station", "date", "precip")),
                by = c("station", "date")) %>%
mutate(doy = as.numeric(format(date, "%j")))
```

## 2.2 Statistiques descriptives

```
# Variables
summary(dat)
##      station      dateheure      Q
## Castor :105  Min.      :2019-11-15 13:00:00.00  Min.      : 0.0000
## Morpion: 55  1st Qu.:2020-07-12 19:56:15.00  1st Qu.: 0.5407
##          Median :2021-03-11 13:45:00.00  Median   : 3.6148
##          Mean   :2021-03-21 17:19:46.88  Mean     : 6.0865
##          3rd Qu.:2022-02-22 20:37:30.00  3rd Qu.:10.1273
##          Max.   :2022-08-09 09:30:00.00  Max.     :25.9422
##      MES      date      precip
## Min.      :      1  Min.      :2019-11-15 00:00:00  Min.      : 0.000
## 1st Qu.: 10000  1st Qu.:2020-07-12 06:00:00  1st Qu.: 0.200
## Median : 43000  Median :2021-03-11 00:00:00  Median   : 2.200
## Mean   : 90294  Mean   :2021-03-21 04:59:15  Mean     : 6.173
## 3rd Qu.:110500  3rd Qu.:2022-02-22 06:00:00  3rd Qu.: 7.675
## Max.   :2424000  Max.   :2022-08-09 00:00:00  Max.     :65.700
##      doy
## Min.      : 11.00
## 1st Qu.: 79.75
## Median :160.00
## Mean     :178.76
## 3rd Qu.:294.00
## Max.     :365.00
# Débits zéro?
```

```
dat[dat$Q==0,]
##      station      dateheure Q   MES      date precip doy
## 69  Castor 2021-08-30 10:30:00 0 45000 2021-08-30    2.8 242
## 70  Castor 2021-08-30 19:00:00 0     1 2021-08-30    2.8 242
```

#### Observation:

- Il y a deux débits de zéro dans Castor.
- Les MES de 1 sont en fait sous la limite de détection.

**Note:** la limite de détection est passée de 7000 ppb à 2000 ppb au premier avril 2022 (Ariane). Il est pratique courante de remplacer les valeurs en dessous de la limite de détection par la moitié de la limite, mais remplacer selon la date pourrait biaiser les analyses concernant l'aménagement. On remplace donc toutes les valeurs en bas de 7000 par 3500 même si plusieurs après avril 2022 sont plus basse.

```
table(dat$MES==1, dat$station)
##
##      Castor Morpion
## FALSE      93      51
##  TRUE      12       4
dat$MES <- ifelse(dat$MES>7000, dat$MES, 3500)
```

## 2.3 Visualisation

### 2.3.1 Débit et précipitation

Visualiser les données.

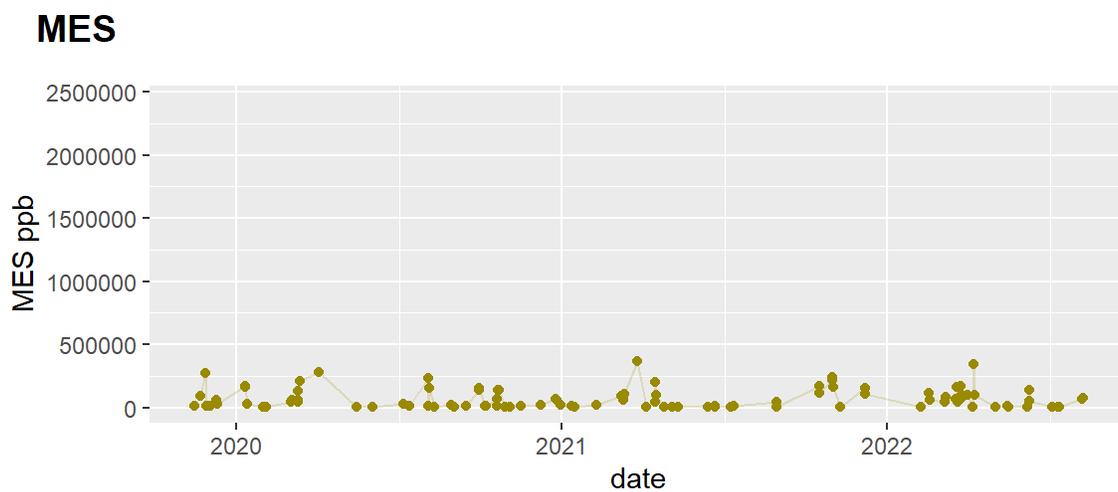
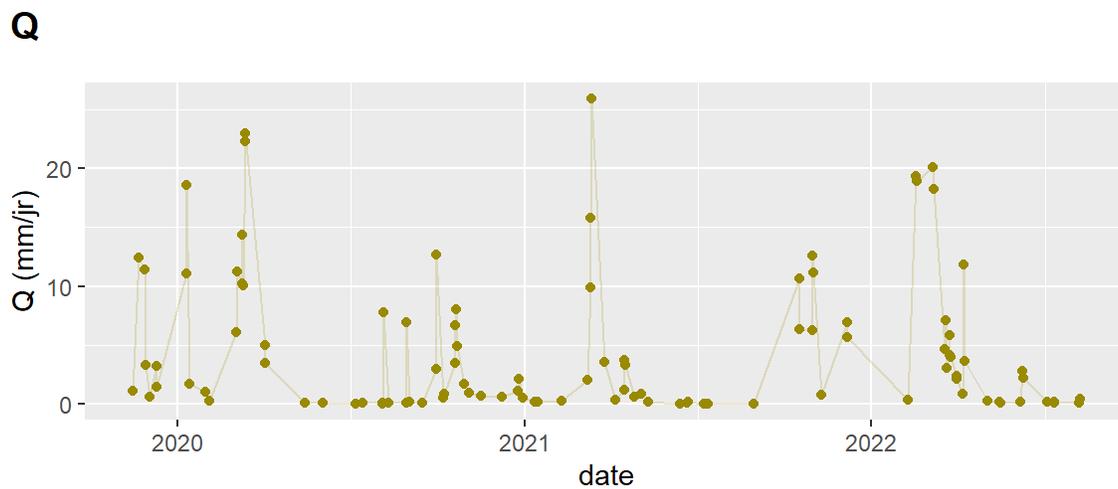
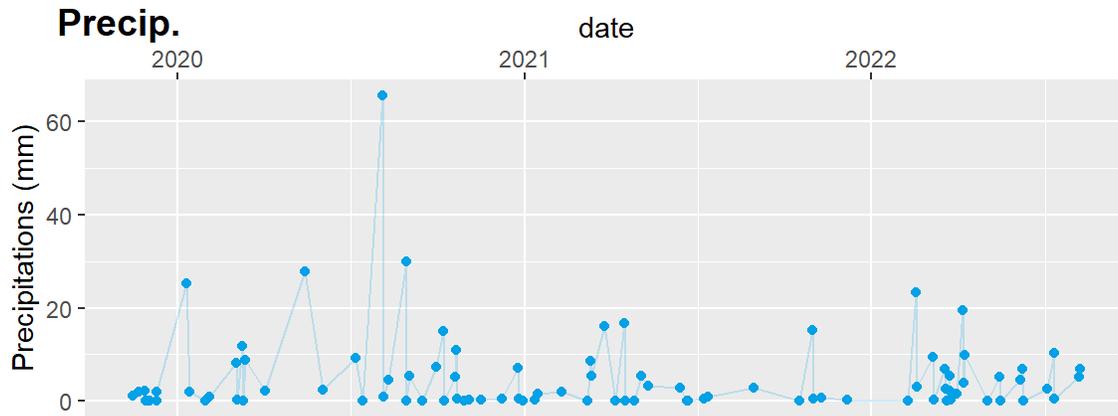
```
# couleurs bleu & kaki & mauve
colz <- hsv(h = c(0.55, 0.15, 0.9), v = c(0.9, 0.6, 0.8))
ylimz <- rbind(range(dat$precip, na.rm = TRUE),
               range(dat$Q, na.rm = TRUE),
               range(dat$MES, na.rm = TRUE))
names(colz) <- rownames(ylimz) <- c("precip", "Q", "MES")

# Précipitation, débit, MES Castor
```

```

ppc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = precip)) +
  geom_line(color = colz[1], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[1]) +
  scale_x_datetime(position = "top") +
  scale_y_continuous(trans = "reverse") +
  ylab("Precipitations (mm)") +
  ylim(ylimz["precip",])
ppc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = Q)) +
  geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[2]) +
  ylab("Q (mm/jr)") +
  ylim(ylimz["Q",])
ppc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = MES)) +
  geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[2]) +
  ylab("MES ppb") +
  ylim(ylimz["MES",])
ggarrange(ppc, pqc, pmc, labels = c("Precip.", "Q", "MES"),
          ncol = 1, widths = 6, align = "h")

```



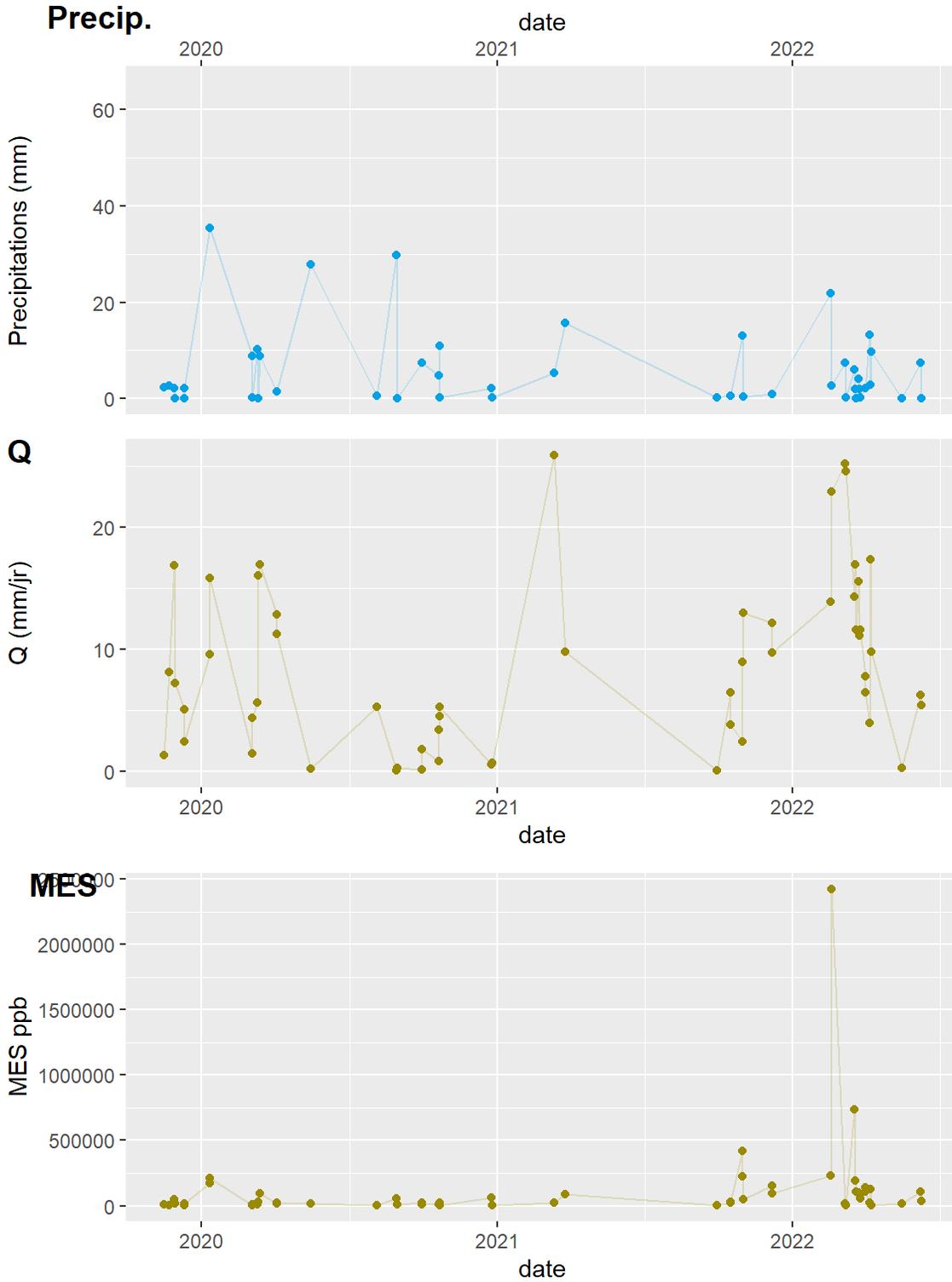
```
# Précipitation, débit, MES Morpion
```

```
ppm <- dat %>%
```

```

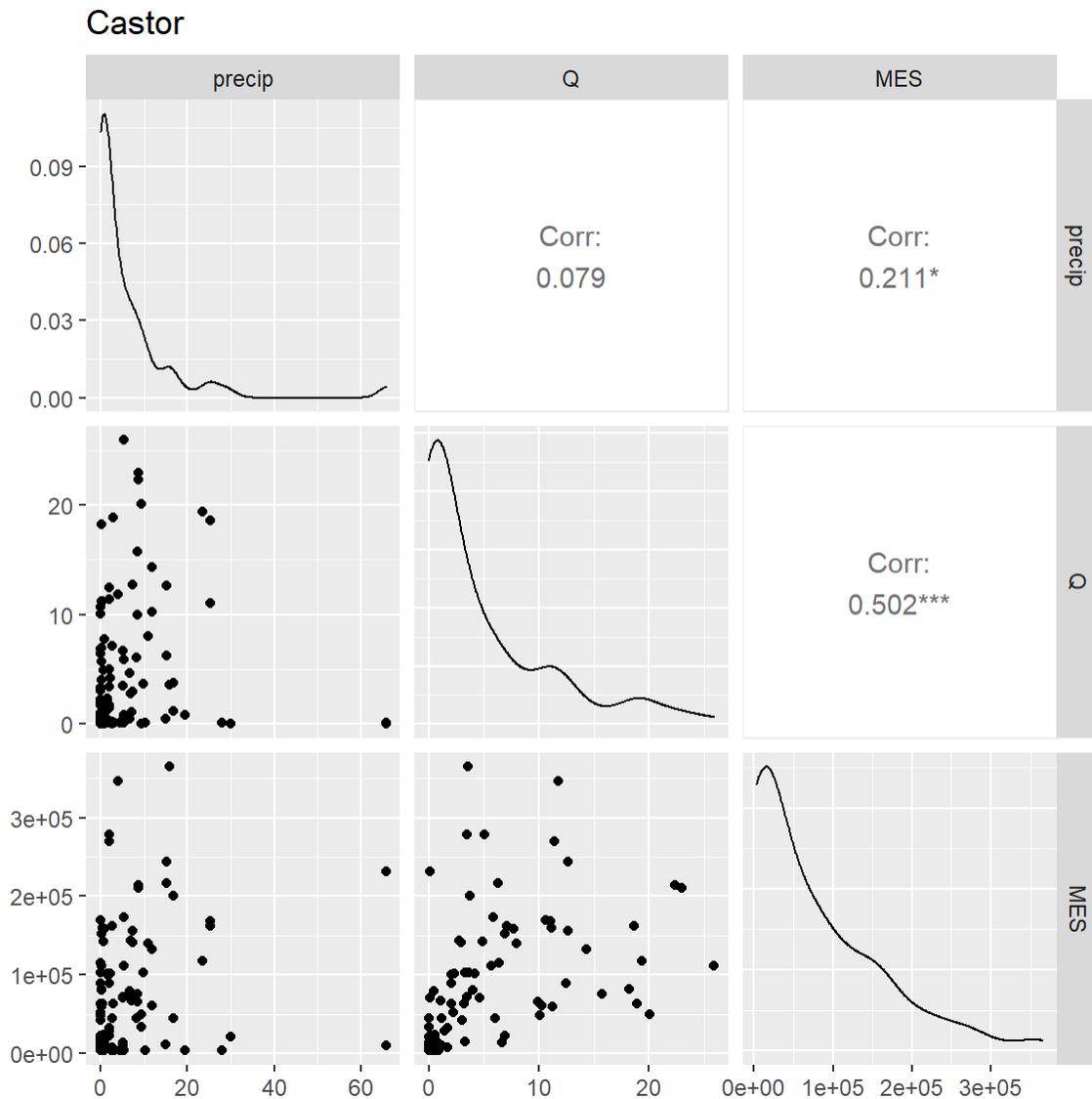
filter(station=="Morpion") %>%
ggplot(aes(x = date, y = precip)) +
geom_line(color = colz[1], alpha = 0.2) +
geom_point(color = colz[1]) +
scale_x_datetime(position = "top") +
scale_y_continuous(trans = "reverse") +
ylab("Precipitations (mm)") +
ylim(ylimz["precip",])
pqm <- dat %>%
filter(station=="Morpion") %>%
ggplot(aes(x = date, y = Q)) +
geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
geom_point(color = colz[2]) +
ylab("Q (mm/jr)") +
ylim(ylimz["Q",])
pmm <- dat %>%
filter(station=="Morpion") %>%
ggplot(aes(x = date, y = MES)) +
geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
geom_point(color = colz[2]) +
ylab("MES ppb") +
ylim(ylimz["MES",])
ggarrange(ppm, pqm, pmm, labels = c("Precip.", "Q", "MES"),
          ncol = 1, widths = 6, align = "v")

```



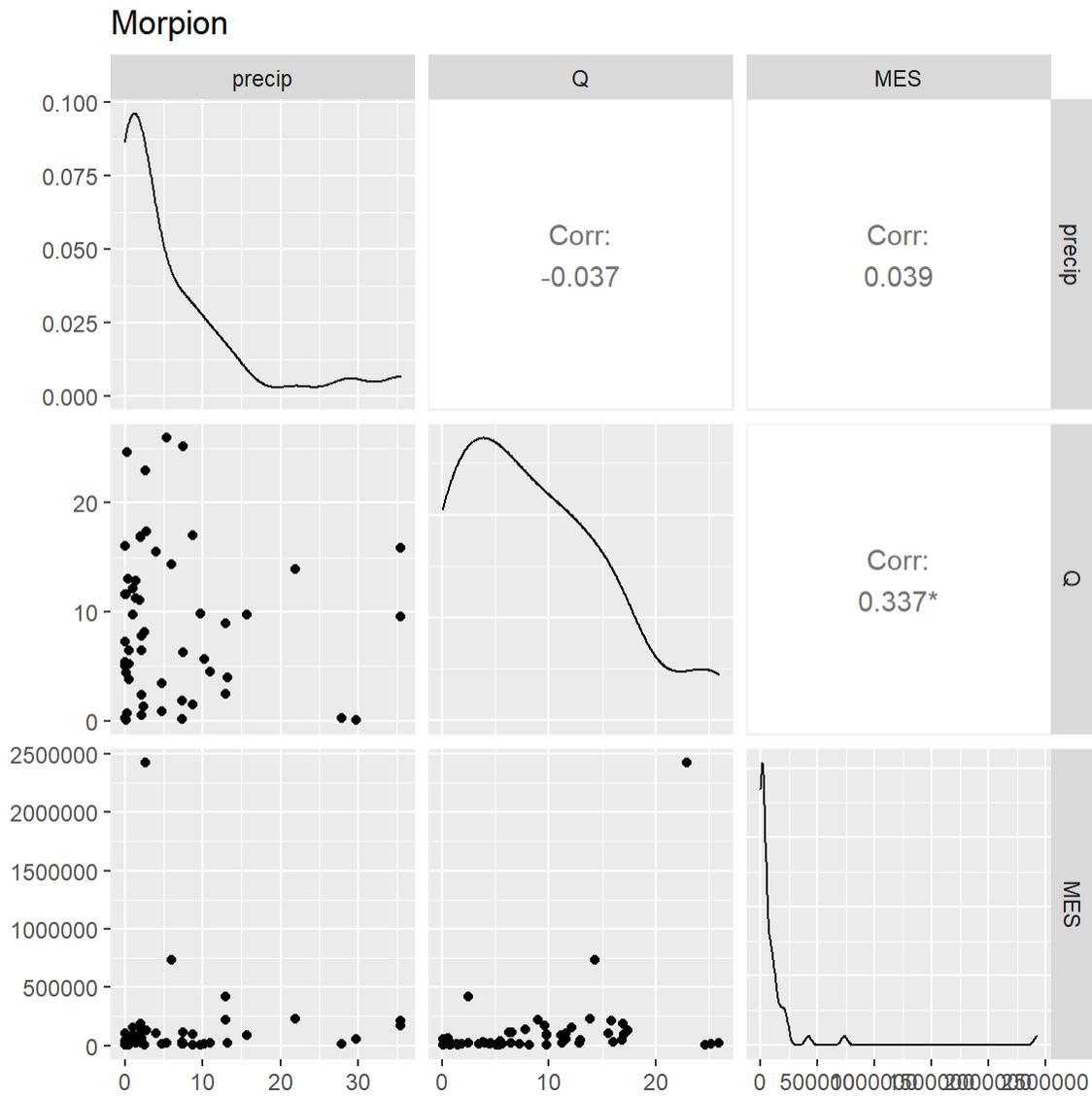
Voir les corrélations entre variables.

```
# Castor
dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  droplevels() %>%
  ggpairs(columns = c("precip","Q","MES"), title = "Castor")
```



```
# Morpion
dat %>%
  filter(station=="Morpion") %>%
  droplevels() %>%
```

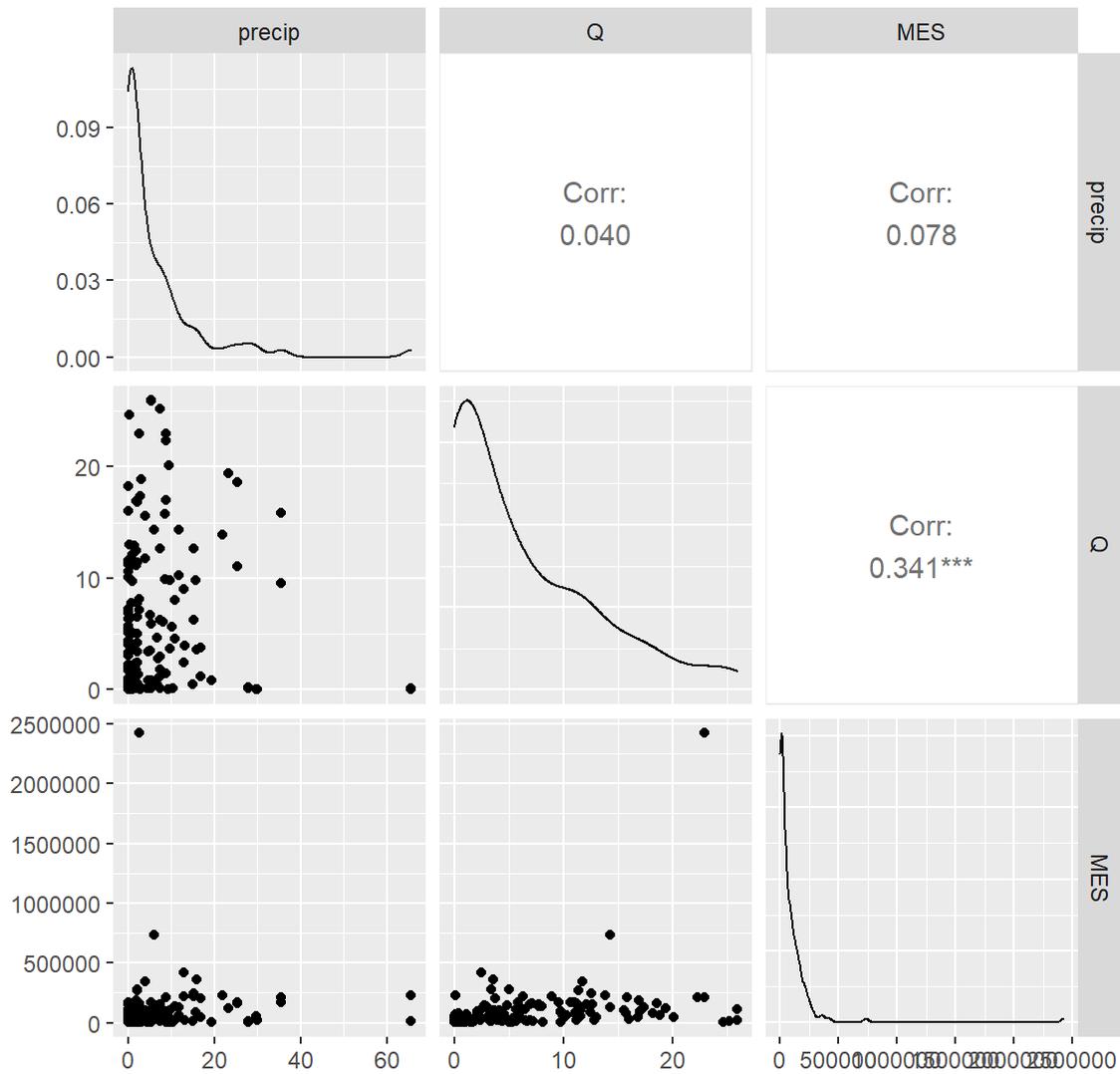
```
ggpairs(columns = c("precip", "Q", "MES"), title = "Morpion")
```



```
# Deux stations
```

```
ggpairs(dat, columns = c("precip", "Q", "MES"), title = "Castor + Morpion")
```

## Castor + Morpion

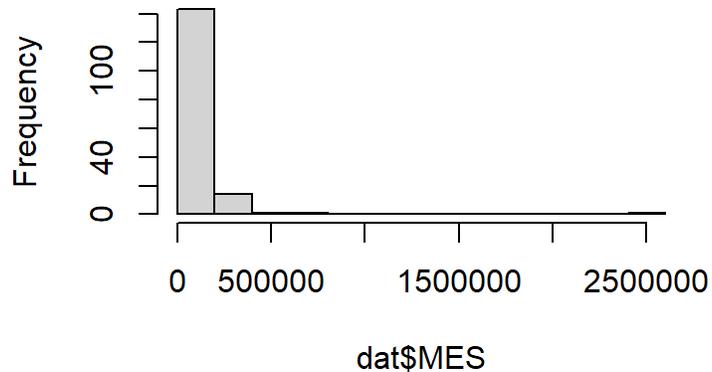


## Observations:

- Il y a une valeur de MES extrême qui risque de déformer les relations
- Les distributions sont très asymétriques (~ exponentielle/gamma)
- MES est surtout corrélé au débit, mais aussi aux précipitations
- Les corrélations sont moins fortes pour Morpion que pour Castor (normal, il y a moins de données)

```
hist(dat$MES)
```

## Histogram of dat\$MES



```
max(dat$MES)
## [1] 2424000
dat %<>% filter(MES<1000000)
```

### 3 Modélisation des MES

#### 3.1 Préparation des données

Période d'aménagement de Castor et Morpion.

```
datecastor <- c("2021-10-04", "2021-10-04") %>%
  as.POSIXct(format = "%Y-%m-%d")
datemorpion <- c("2021-08-12", "2021-09-29") %>%
  as.POSIXct(format = "%Y-%m-%d")
```

Ajouter variable pour distinguer avant/après aménagement

```
datc <- filter(dat, station=="Castor")
datm <- filter(dat, station=="Morpion")
datc %<>%
  mutate(amenagement = factor(dateheure > datecastor[1],
                              labels = c("avant", "après")))
```

```
datm %<>%
  mutate(amenagement = factor(dateheure > datemorpion[1],
                              labels = c("avant", "après")))

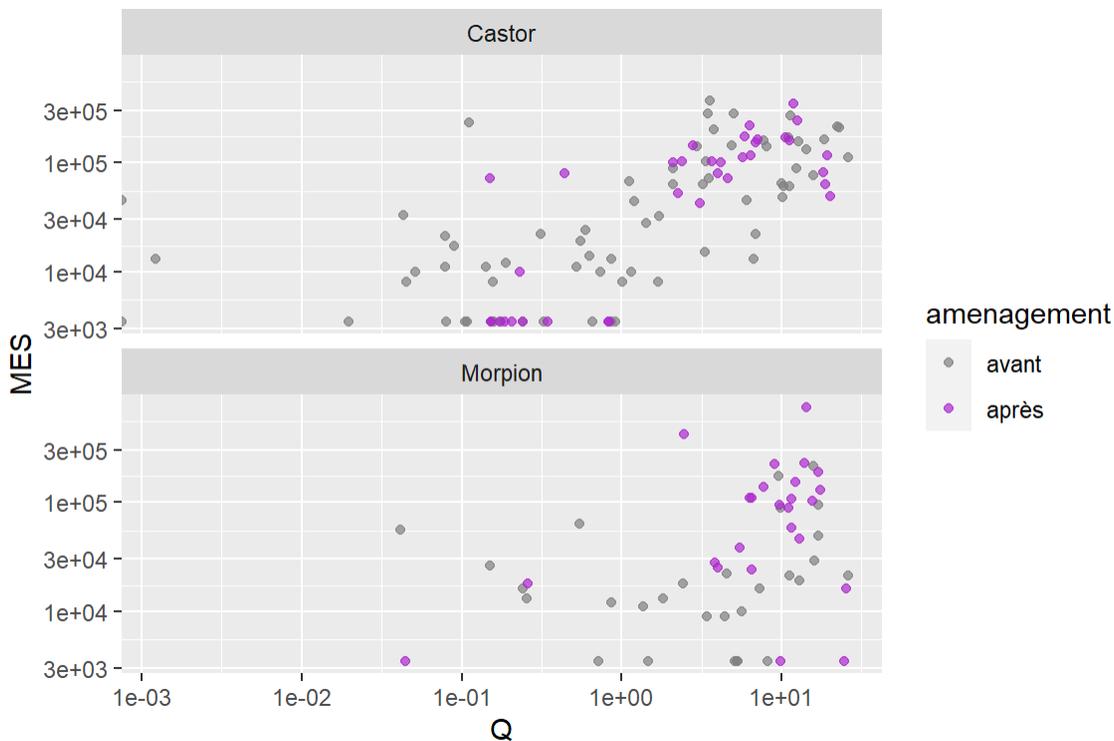
dat <- rbind(datc, datm)
```

### Corrélation entre MES et Q

```
colame <- hsv(h=0.8, s=c(0,0.8), v=c(0.5,0.8))

ggplot(dat, aes(x = Q, y = MES, color = amenagement)) +
  geom_point(alpha = 0.7) +
  scale_color_discrete(type = colame) +
  scale_x_log10() +
  scale_y_log10() +
  facet_wrap(~station, ncol=1)

## Warning: Transformation introduced infinite values in continuous x-axis
```



### 3.2 Spécifications du modèle

On modélise la MES en fonction du débit dans la rivière Morpion. On tente de détecter un changement après l'aménagement de la rivière entre le 11 août et 30 septembre 2021.

On inclut les précipitations dans le modèle comme variable prédictive additionnelle.

On modélise les MES avec une distribution Gamma pour permettre la variance d'augmenter avec la moyenne. Les variables indépendantes sont:

- la station
- le débit Q
- l'aménagement (avant/après)
- l'interaction débit×aménagement
- la précipitation
- l'interaction précipitation×aménagement

On inclut aussi une structure d'autocorrélation temporelle parce que certaines données sont prises à de courts intervalles

Ajouter une date numérique pour la modélisation de l'autocorrélation

```
datmod <- dat %>%
  mutate(numDate = as.numeric(julian(dateheure))) %>%
  filter(Q>0)
```

Il n'y a pas de colinéarité qui serait problématique pour le modèle (vif ~1)

```
car::vif(lm(MES ~ amenagement + log(Q) + log(precip+1) + station, data = datmod))
```

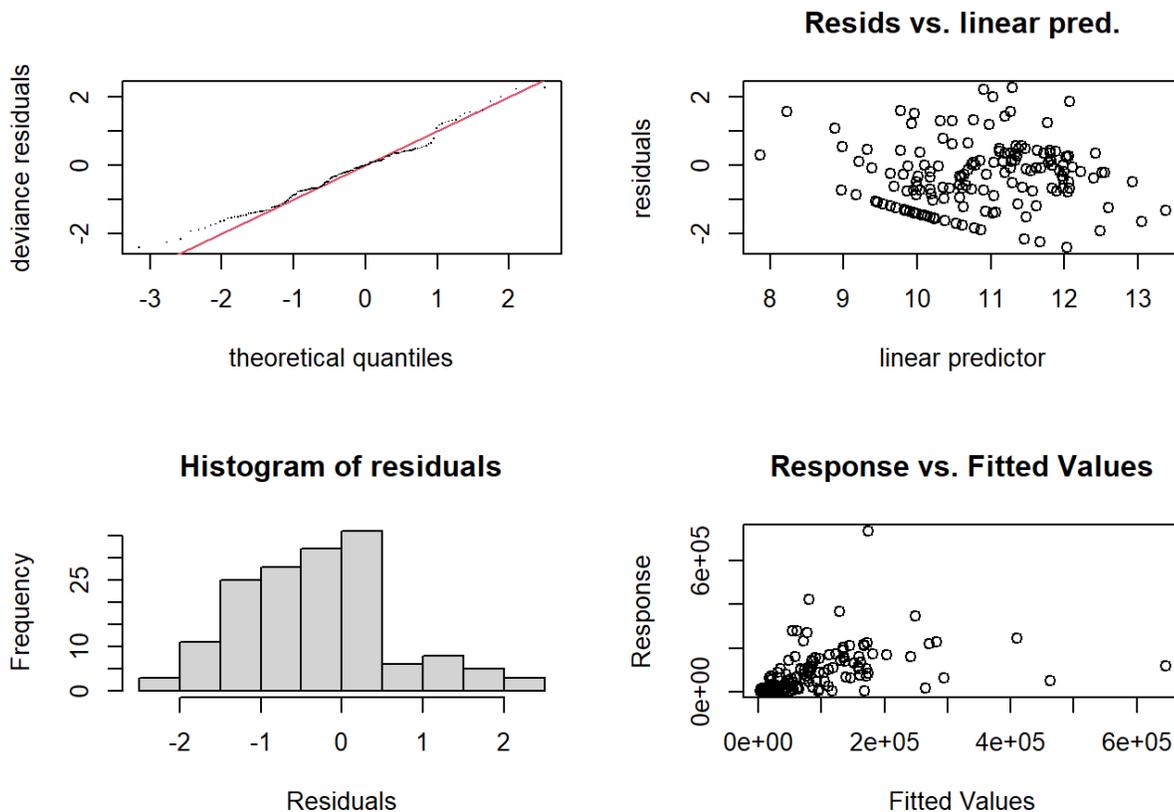
##	amenagement	log(Q)	log(precip + 1)	station
##	1.059260	1.131179	1.013104	1.092199

```
modF <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) + log(Q):aménagement +
            log(precip+1) + log(precip+1):aménagement +
            station + s(numDate, bs = "gp"),
            family = Gamma("log"), data = datmod)
```

### 3.3 Vérifier la validité du modèle

On vérifie les résidus du modèle pour voir si ce dernier est valide.

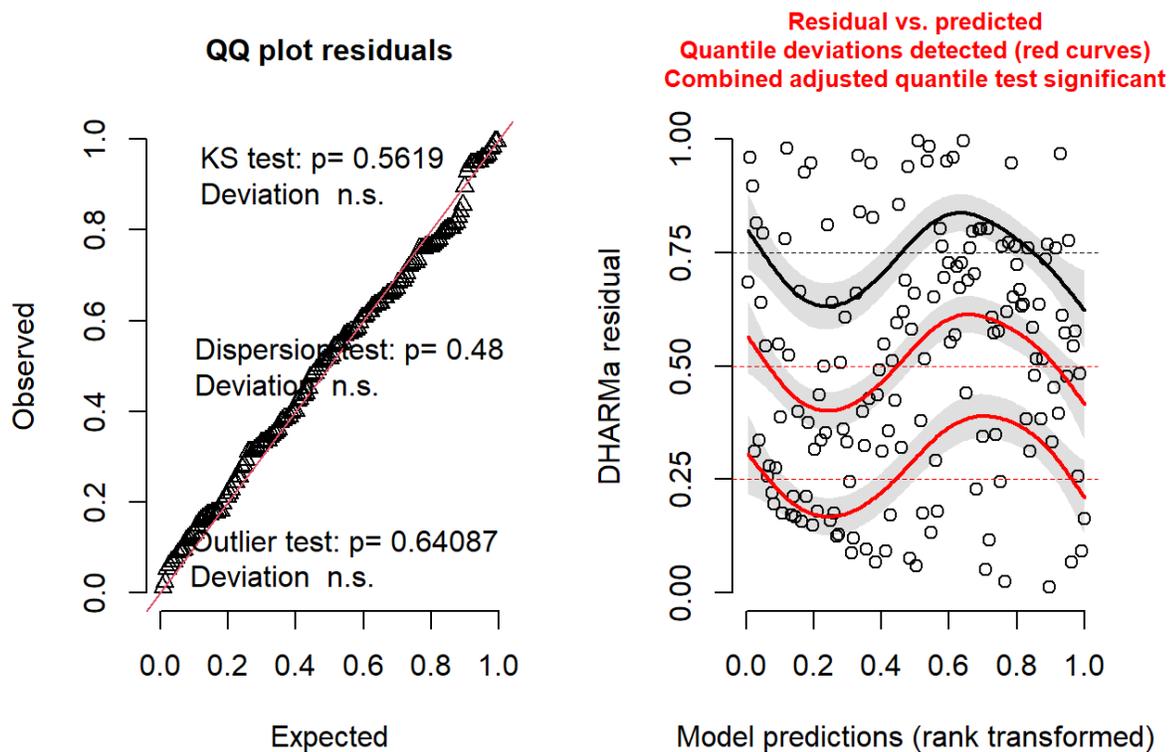
```
gam.check(modF)
```



```
##
## Method: GCV   Optimizer: outer newton
## full convergence after 8 iterations.
## Gradient range [-5.366976e-07, -5.366976e-07]
```

```
## (score 1.070705 & scale 1.043277).
## Hessian positive definite, eigenvalue range [5.366851e-07,5.366851e-07].
## Model rank = 18 / 18
##
## Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
## indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.
##
##           k' edf k-index p-value
## s(numDate) 11  1  0.89  0.28
DHARMA::simulateResiduals(modF, plot=TRUE)
## Registered S3 method overwritten by 'mgcViz':
##   method from
##   +.gg      GGally
```

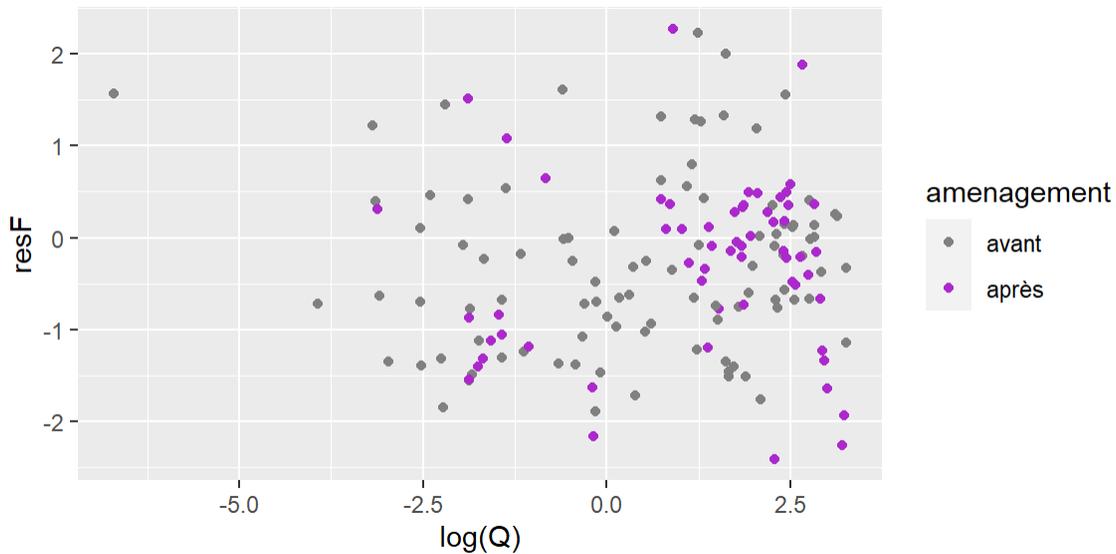
### DHARMA residual



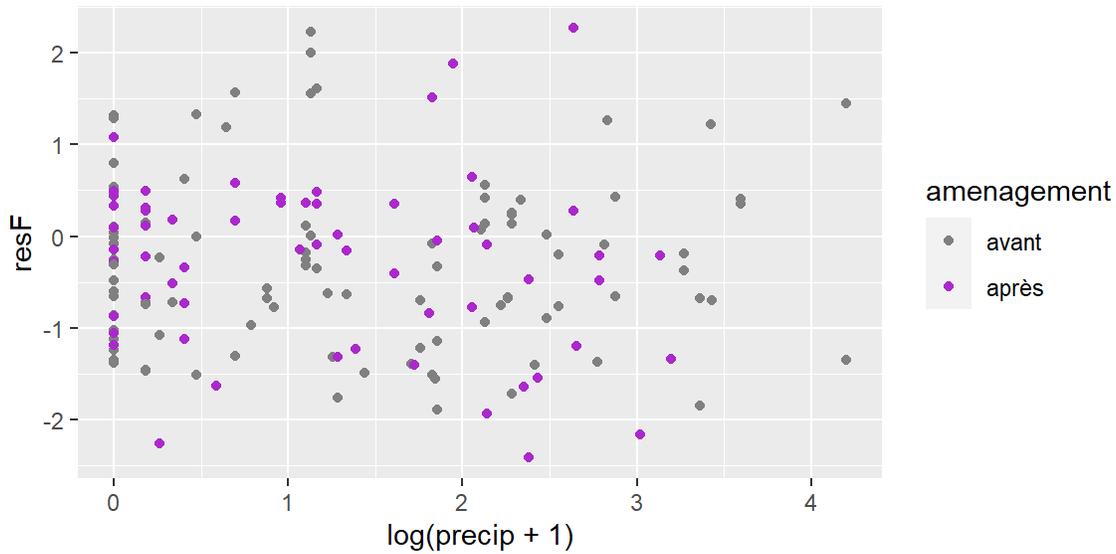
```
## Object of Class DHARMA with simulated residuals based on 250 simulations with re
fit = FALSE . See ?DHARMA::simulateResiduals for help.
```

```
##
## Scaled residual values: 0.324 0.672 0.96 0.4 0.524 0.84 0.492 0.572 0.476 0.512
0.316 0.172 0.348 0.66 0.312 0.516 0.62 0.736 0.768 0.984 ...
```

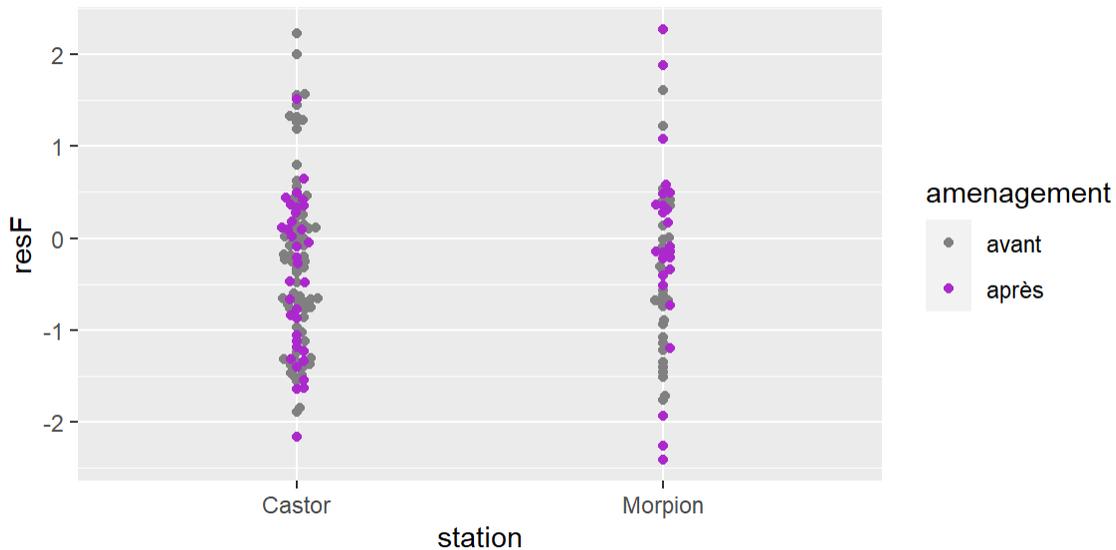
```
datmod$resF <- residuals(modF)
ggplot(datmod, aes(log(Q), resF, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



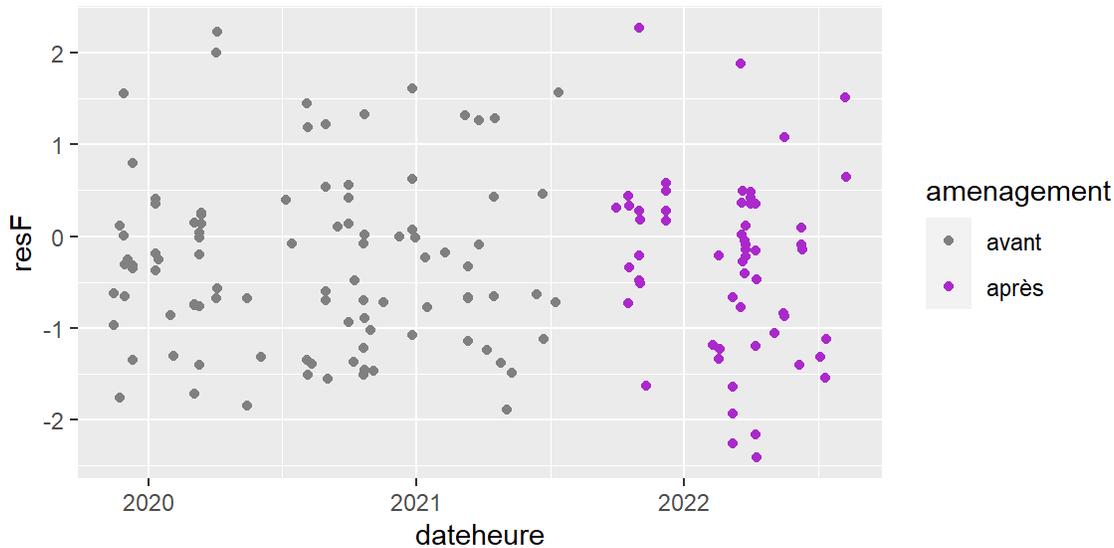
```
ggplot(datmod, aes(log(precip+1), resF, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



```
ggplot(datmod, aes(station, resF, color = amenagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_beeswarm()
```



```
ggplot(datmod, aes(dateheure, resF, color = amenagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



Il y a des petites déviations, mais rien d'extrême.

### 3.4 Sélection de modèle

On sélectionne le modèle le plus parcimonieux qui représente quand-même bien les données observées. On utilise le critère d'information AIC pour comparer des modèles avec différents prédicteurs.

Le AIC représente l'information (variance) non expliquée par le modèle. Un modèle qui représente mieux les données a donc un AIC plus bas. Le AIC pénalise aussi les modèles selon leur complexité pour éviter des résultats fortuits.

Simplifier la relation avec la précipitation parce que l'interaction ne contribue pas vraiment (différence AIC > 2).

```
summary(modF)
##
## Family: Gamma
## Link function: log
##
## Formula:
## MES ~ amenagement + log(Q) + log(Q):amenagement + log(precip +
##      1) + log(precip + 1):amenagement + station + s(numDate, bs = "gp")
##
```

```
## Parametric coefficients:
##
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)    10.07908    0.20089  50.172 < 2e-16 ***
## aménagementaprès    0.10643    0.43461   0.245  0.80688
## log(Q)          0.32625    0.05670   5.754 4.80e-08 ***
## log(precip + 1)  0.44739    0.08848   5.056 1.24e-06 ***
## stationMorpion  -0.60375    0.18224  -3.313  0.00116 **
## aménagementaprès:log(Q)  0.26596    0.09751   2.727  0.00715 **
## aménagementaprès:log(precip + 1) -0.02249    0.16004  -0.141  0.88843
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Approximate significance of smooth terms:
##          edf Ref.df    F p-value
## s(numDate)  1      1 0.157  0.692
##
## R-sq.(adj) = -0.0495  Deviance explained = 44.4%
## GCV = 1.0707  Scale est. = 1.0433    n = 157
mod1 <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) + log(Q):aménagement +
            log(precip+1) + station + s(numDate, bs = "gp"),
            family = Gamma("log"), data = datmod)
AIC(modF, mod1)
##          df      AIC
## modF 9.000064 3743.528
## mod1 8.000059 3741.016
```

Il y a une interaction “significative” entre l’aménagement et le débit alors on garde ces termes.

```
mod2 <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) +
            log(precip+1) + station + s(numDate, bs = "gp"),
            family = Gamma("log"), data = datmod)
AIC(mod1, mod2)
##          df      AIC
```

```
## mod1 8.000059 3741.016
## mod2 7.539973 3746.173
```

La précipitation et la station contribuent aussi à expliquer le MES et on les garde.

```
mod3 <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) +
             log(precip+1) + s(numDate, bs = "gp"),
             family = Gamma("log"), data = datmod)
mod4 <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) +
             station + s(numDate, bs = "gp"),
             family = Gamma("log"), data = datmod)
AIC(mod1, mod3, mod4)
```

```
##           df      AIC
## mod1 8.000059 3741.016
## mod3 6.294231 3753.091
## mod4 6.825141 3804.377
```

### 3.5 Résultats

#### Coefficients du modèle

```
summary(mod1)
##
## Family: Gamma
## Link function: log
##
## Formula:
## MES ~ aménagement + log(Q) + log(Q):aménagement + log(precip +
##       1) + station + s(numDate, bs = "gp")
##
## Parametric coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)    10.08673    0.19139   52.702 < 2e-16 ***
## aménagementaprès    0.08207    0.39768    0.206  0.83679
```

```
## log(Q)                0.32605    0.05628    5.793 3.93e-08 ***
## log(precip + 1)       0.44103    0.07302    6.040 1.16e-08 ***
## stationMorpion        -0.60380    0.18065   -3.342 0.00105 **
## aménagementaprès:log(Q) 0.26556    0.09627    2.759 0.00653 **
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Approximate significance of smooth terms:
##           edf Ref.df      F p-value
## s(numDate)  1      1 0.152  0.697
##
## R-sq.(adj) = -0.0664  Deviance explained = 44.3%
## GCV = 1.0566  Scale est. = 1.0279    n = 157
```

#### Résultats:

- Morpion a légèrement moins de MES que Castor
- Le MES moyen n'a pas changé après l'aménagement
- Il y a une relation positive entre MES et le débit (Q)
- La relation MES ~ Q est plus prononcée après l'aménagement
- Le MES est positivement lié à la précipitation

Le modèle explique un peu moins que la moitié de la variance dans le MES (*Deviance explained*)

### 3.6 Visualisation du résultat

On met les prédictions du modèle et les observations sur un graphique. Pour éviter de trop compliquer les graphiques, on illustre les prédictions pour une précipitation moyenne de chaque site.

Données pour illustrer les valeurs estimées par le modèle (Castor & Morpion)

```
# Castor
rangeQ <- seq(min(datmod$Q), max(datmod$Q), length = 100)
newdatc <- expand.grid(station = levels(datmod$station)[1],
                      aménagement = levels(datmod$aménagement),
```

```

        Q = rangeQ,
        precip = mean(datmod$precip[datmod$station=="Castor"]),
        numDate = mean(datmod$numDate[datmod$station=="Castor"]))
pre <- predict(mod1, se.fit = TRUE, newdata = newdatc)
newdatc %<>%
  mutate(fit = exp(pre$fit),
         low95 = exp(pre$fit - 2*pre$se.fit),
         upp95 = exp(pre$fit + 2*pre$se.fit))

# Morpion
newdatm <- expand.grid(station = levels(datmod$station)[2],
                      amenagement = levels(datmod$amenagement),
                      Q = rangeQ,
                      precip = mean(datmod$precip[datmod$station=="Morpion"]),
                      numDate = mean(datmod$numDate[datmod$station=="Morpion"]))
pre <- predict(mod1, se.fit = TRUE, newdata = newdatm)
newdatm %<>%
  mutate(fit = exp(pre$fit),
         low95 = exp(pre$fit - 2*pre$se.fit),
         upp95 = exp(pre$fit + 2*pre$se.fit))

```

### Créer les graphiques: Valeurs moyennes prédites avec intervalles de confiance (95%)

```

ylims <- range(c(datmod$MES, newdatc$low95, newdatm$low95,
                newdatc$upp95, newdatm$upp95))

# Castor
pmodc <- ggplot(newdatc, aes(x = Q, y = fit, color = amenagement)) +
  geom_ribbon(aes(x = Q, ymin = low95, ymax = upp95,
                fill = amenagement), col=0, alpha = 0.25) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  scale_fill_manual(values = colame) +
  geom_line(size = 1) +
  ylim(c(0, ylims[2])) +

```

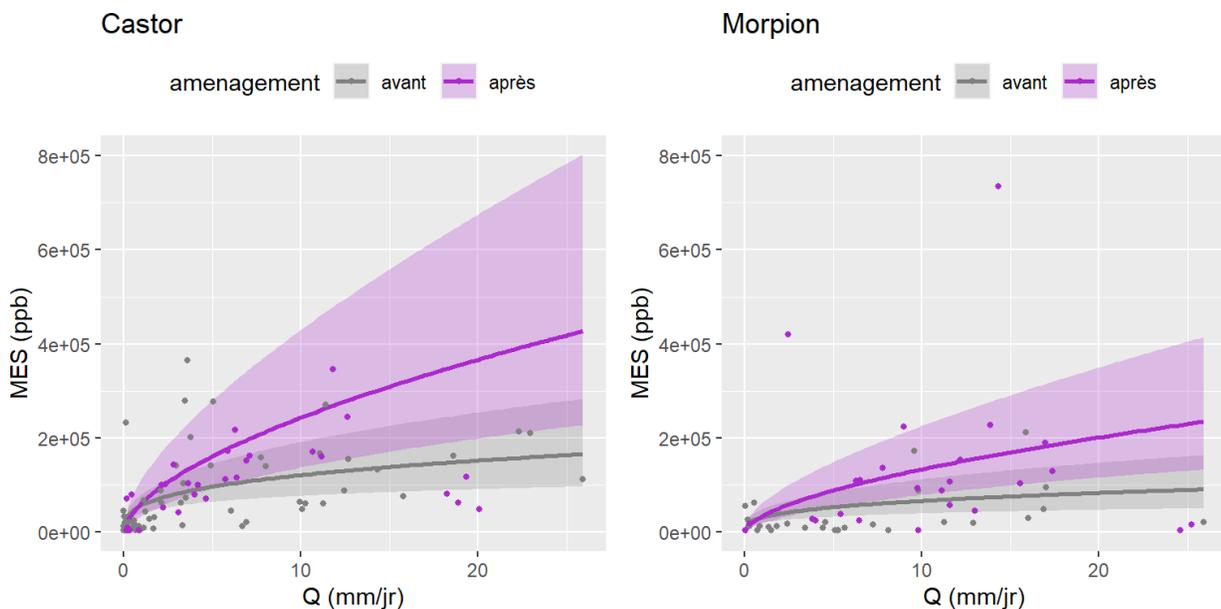
```

labs(x = "Q (mm/jr)", y = "MES (ppb)", title = "Castor") +
theme(legend.position="top") +
geom_point(data = datc, aes(x = Q, y = MES, color = aménagement),
           inherit.aes = FALSE, size = 1)

# Morpion
pmodm <- ggplot(newdatm, aes(x = Q, y = fit, color = aménagement)) +
  geom_ribbon(aes(x = Q, ymin = low95, ymax = upp95,
                fill = aménagement), col=0, alpha = 0.25) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  scale_fill_manual(values = colame) +
  geom_line(size = 1) +
  ylim(c(0, ylims[2])) +
  labs(x = "Q (mm/jr)", y = "MES (ppb)", title = "Morpion") +
  theme(legend.position="top") +
  geom_point(data = datm, aes(x = Q, y = MES, color = aménagement),
            inherit.aes = FALSE, size = 1)

# Mettre les deux graphiques ensemble
ggarrange(pmodc, pmodm, ncol = 2)

```



---

## 4 Conclusion

L'aménagement semble avoir changé la relation entre MES & Q dans les ruisseaux Castor & Morpion: Le MES moyen n'a pas changé, mais la pente qui décrit la relation oui. Cela voudrait dire qu'après l'aménagement, il y a moins de MES quand le débit est bas, mais plus quand le débit est élevé.

### Notes:

- Ces résultats restent exploratoires puisqu'ils reflètent qu'une seule année d'échantillonnage après l'aménagement - tout changement pourrait être dû à autre chose qui change d'une année à l'autre.
- Le modèle suppose que l'effet de l'aménagement est le même pour les ruisseaux Castor et Morpion. Pour modéliser des effets différents, il faudrait soit ajouter une interaction à trois voies ( $Q \times \text{aménagement} \times \text{station}$ ) ou faire deux modèles séparés. Compte-tenu de nombre d'observations, ça réduirait notre confiance sur les estimés des modèles.

---

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

---

## ÉTUDE 2 (études séparées par bassin):

### 1 Introduction

Ce document décrit le traitement de données et les analyses statistiques pour le projet 400211. Le projet a pour but de décrire l'effet d'aménagements dans deux cours d'eau (Castor & Morpions) sur leur réponse hydrologique:

- relation entre le débit et les matières en suspension

Comme le type d'aménagement n'est pas le même entre les cours d'eau, on fait deux analyses séparées (une version antérieure combinait les deux en supposant que l'effet était le même dans les deux cours d'eau).

Cela permet de comparer l'effet des aménagements dans les deux cours d'eau de façon qualitative. Il est à noter par contre, que le jeu de données pour chaque cours d'eau est de cette façon réduit alors des relations pourraient passer inaperçues.

**Note:** Il faut garder en tête que c'est une comparaison entre 2 années et autre chose pourrait avoir changé d'une année à l'autre. Toute différence pourrait être dû à autre chose que l'aménagement (ex. pratiques agricoles dans les champs avoisinants, météo).

---

## 2 Exploration des données

Ce document a été préparé avec R version 4.2.1 (2022-06-23 ucrt) et les librairies suivantes:

- ggplot2 version 3.3.6
- ggpubr version 0.4.0
- lubridate version 1.8.0
- tidyverse version 1.3.1
- magrittr version 2.0.3
- GGally version 2.1.2
- ggbeeswarm version 0.6.0
- mgcv version 1.8.40
- MASS version 7.3.57

### Chargement des librairies

```
library(ggplot2)
library(ggpubr)
library(lubridate)
library(tidyverse)
library(magrittr)
library(GGally)
library(ggbeeswarm)
library(mgcv)
library(MASS)
```

#### 2.1 Importer et traiter les données

### 2.1.1 Importer Q et MES

On importe des données sur les matières en suspension (MES) et débits (Q); Ce sont des fichiers .csv exportés à partir de fichiers Excel.

```
datc <- read.csv2("donnees/MES_Castor_20220921.csv", header = TRUE)
datm <- read.csv2("donnees/MES_Morpion_20220915.csv", header = TRUE)
dat <- rbind(datc, datm)
str(dat)

## 'data.frame': 160 obs. of 4 variables:
## $ station : chr "Castor" "Castor" "Castor" "Castor" ...
## $ dateheure: chr "2019-11-15 13:00" "2019-11-22 13:45" "2019-11-28 10:30" "2019-11-29 08:30" ...
## $ Q_mmjr : num 1.142 12.457 11.376 3.294 0.629 ...
## $ MES_ppb : chr "10000" "89000" "270000" "15000" ...
```

### Formatter les variables.

```
names(dat)[3:4] <- c("Q", "MES")
# Facteur
dat %<>%
  mutate(station = factor(station))
# numérique
dat$MES <- gsub(" ", "", dat$MES)
dat %<>%
  mutate(MES = as.numeric(MES))
# date et jour de l'année
dat %<>%
  mutate(dateheure = as.POSIXct(dateheure, format = "%Y-%m-%d %H:%M")) %>%
  mutate(date = as.POSIXct(format(dateheure, format = "%Y-%m-%d")))
```

### 2.1.2 Ajouter les données de précipitation

On importe aussi des données de précipitation journalières. Ce sont des données générées à partir de 60 stations qui ont été utilisées pour imputations de valeurs manquantes par random forest et kriging pour obtenir des valeurs aux points d'échantillonnage.

```
load("kriggedPrecip_CastorMorpion.RData")
datp <- dat.pe
rm(dat.pe, lidat, pts.coord, sphvgm, stations)
str(datp)
## 'data.frame': 2068 obs. of 8 variables:
## $ point : Factor w/ 2 levels "Castor","Morpion": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ lon : num -73.1 -73.1 -73.1 -73.1 -73.1 ...
## $ lat : num 45.1 45.1 45.1 45.1 45.1 ...
## $ elev : num 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 ...
## $ x : num 5600308 5600308 5600308 5600308 5600308 ...
## $ y : num 12086271 12086271 12086271 12086271 12086271 ...
## $ date : Date, format: "2019-11-02" "2019-11-03" ...
## $ precip: num 0.3 0 0.3 1.5 0 3.8 3.8 0 0 13.2 ...
names(datp)[1] <- "station"
```

## Combiner les données

```
dat <- left_join(dat, dplyr::select(datp, c("station", "date", "precip")),
                by = c("station", "date")) %>%
mutate(doy = as.numeric(format(date, "%j")))
```

## 2.2 Statistiques descriptives

```
# Variables
summary(dat)
## station dateheure Q
## Castor :105 Min. :2019-11-15 13:00:00.00 Min. : 0.0000
## Morpion: 55 1st Qu.:2020-07-12 19:56:15.00 1st Qu.: 0.5407
```

```
##           Median :2021-03-11 13:45:00.00   Median : 3.6148
##           Mean   :2021-03-21 17:19:46.88   Mean   : 6.0865
##           3rd Qu.:2022-02-22 20:37:30.00   3rd Qu.:10.1273
##           Max.   :2022-08-09 09:30:00.00   Max.   :25.9422
##           MES           date           precip
## Min.      :      1   Min.      :2019-11-15 00:00:00   Min.      : 0.000
## 1st Qu.   : 10000   1st Qu.   :2020-07-12 06:00:00   1st Qu.   : 0.400
## Median    : 43000   Median    :2021-03-11 00:00:00   Median    : 2.300
## Mean      : 90294   Mean      :2021-03-21 04:59:15   Mean      : 5.245
## 3rd Qu.   :110500   3rd Qu.   :2022-02-22 06:00:00   3rd Qu.   : 6.600
## Max.      :2424000   Max.      :2022-08-09 00:00:00   Max.      :47.000
##           doy
## Min.      : 11.00
## 1st Qu.   : 79.75
## Median    :160.00
## Mean      :178.76
## 3rd Qu.   :294.00
## Max.      :365.00
```

```
# Débits zéro?
```

```
dat[dat$Q==0,]
```

```
## station      dateheure Q   MES      date precip doy
## 69 Castor 2021-08-30 10:30:00 0 45000 2021-08-30      0 242
## 70 Castor 2021-08-30 19:00:00 0      1 2021-08-30      0 242
```

#### Observation:

- Il y a deux débits de zéro dans Castor.
- Les MES de 1 sont en fait des valeurs sous la limite de détection.

**Note:** la limite de détection est passée de 7000 ppb à 2000 ppb au premier avril 2022 (Ariane). Il est pratique courante de remplacer les valeurs en dessous de la limite de détection par la moitié de la limite, mais remplacer selon la date pourrait biaiser les analyses concernant l'aménagement. On remplace donc toutes les valeurs en bas de 7000 par 3500 même si plusieurs après avril 2022 sont plus basse.

```
table(dat$MES==1, dat$station)
```

```
##
```

```
##           Castor Morpion
## FALSE      93      51
## TRUE       12       4
dat$MES <- ifelse(dat$MES>7000, dat$MES, 3500)
```

&nbsp;

On exclut les débits de zéro.

```
dat %<>%
  filter(Q>0) %>%
  droplevels()
```

## 2.3 Visualisation

### 2.3.1 Débit et précipitation

Visualiser les données.

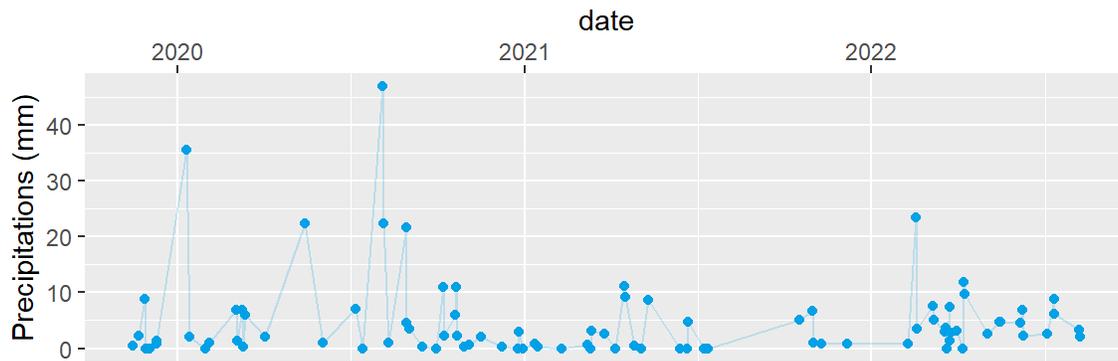
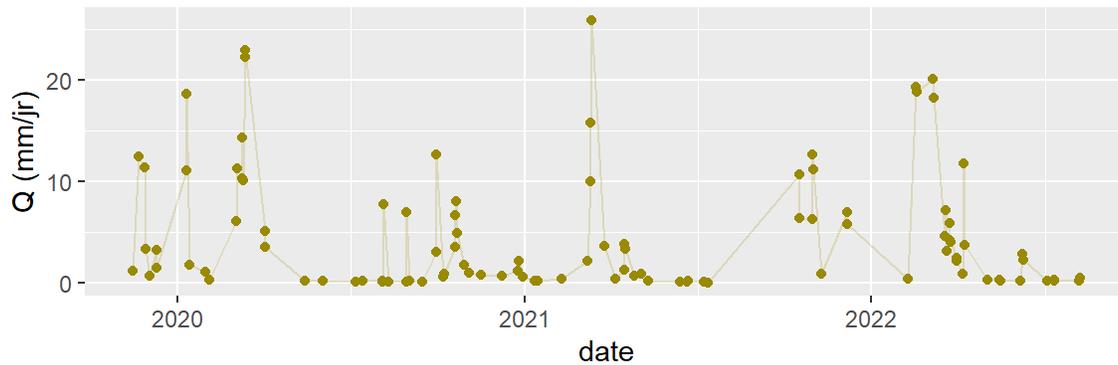
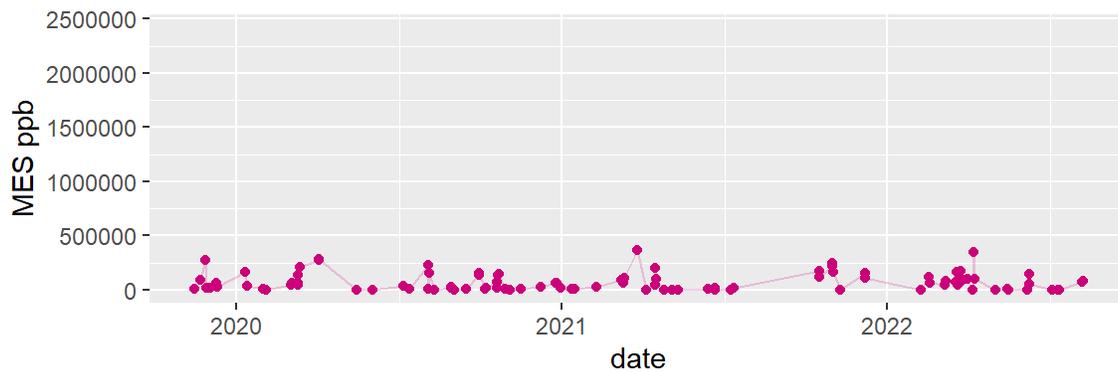
```
# couleurs bleu & kaki & mauve
colz <- hsv(h = c(0.55, 0.15, 0.9), v = c(0.9, 0.6, 0.8))
ylimz <- rbind(range(dat$precip, na.rm = TRUE),
               range(dat$Q, na.rm = TRUE),
               range(dat$MES, na.rm = TRUE))
names(colz) <- rownames(ylimz) <- c("precip", "Q", "MES")

# Précipitation, débit, MES Castor
ppc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = precip)) +
  geom_line(color = colz[1], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[1]) +
  scale_x_datetime(position = "top") +
  scale_y_continuous(trans = "reverse") +
  ylab("Precipitations (mm)") +
  ylim(ylimz["precip",]) +
```

```

ggtitle("Castor") +
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))
ppc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = Q)) +
  geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[2]) +
  ylab("Q (mm/jr)") +
  ylim(ylimz["Q",])
pmc <- dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = MES)) +
  geom_line(color = colz[3], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[3]) +
  ylab("MES ppb") +
  ylim(ylimz["MES",])
ggarrange(ppc, pqc, pmc, labels = c("Precip.", "Q", "MES"),
          ncol = 1, widths = 6, align = "h")

```

**Precip.****Castor****Q****MES**

```
# Précipitation, débit, MES Morpion
```

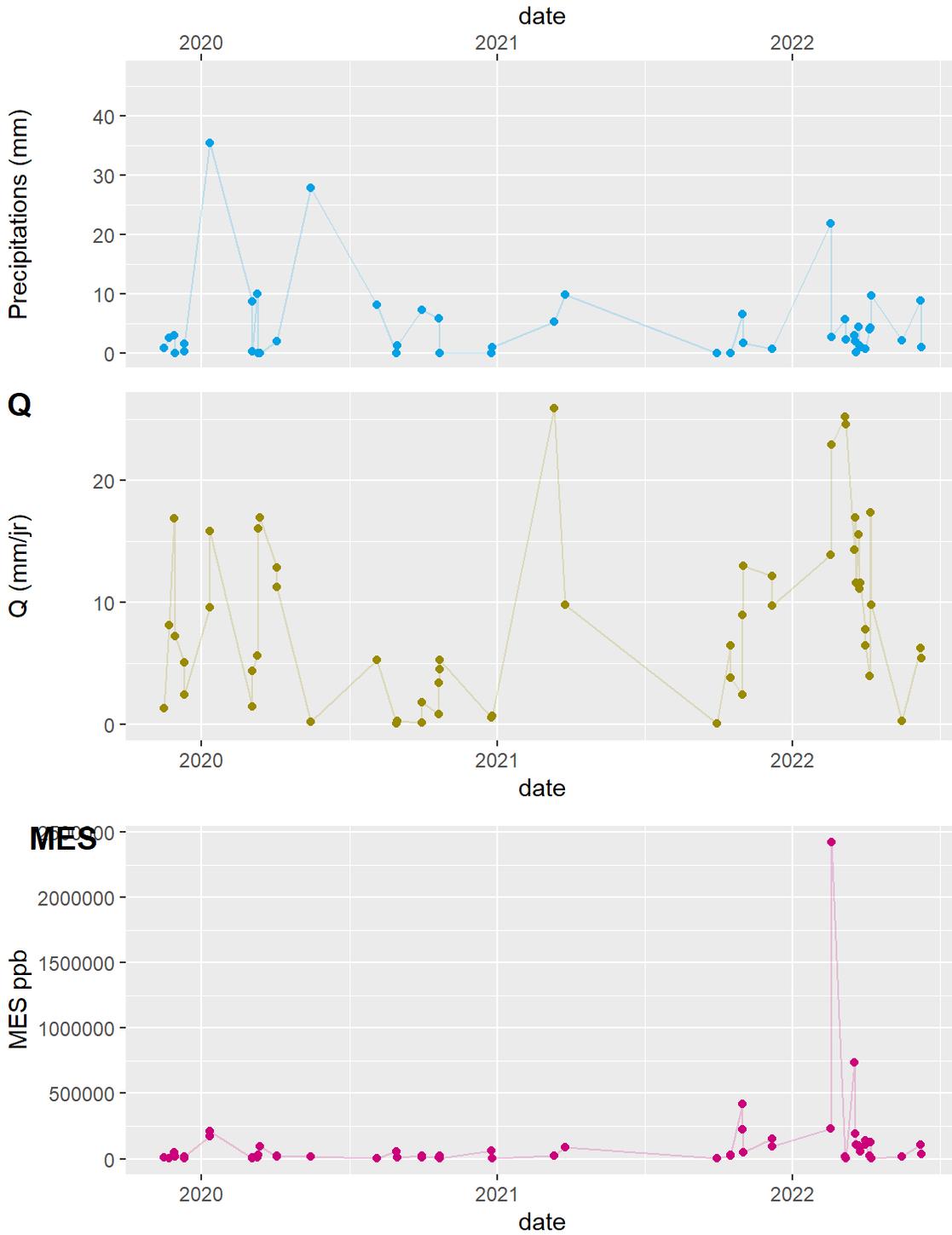
```
ppm <- dat %>%
```

```

filter(station=="Morpion") %>%
ggplot(aes(x = date, y = precip)) +
geom_line(color = colz[1], alpha = 0.2) +
geom_point(color = colz[1]) +
scale_x_datetime(position = "top") +
scale_y_continuous(trans = "reverse") +
ylab("Precipitations (mm)") +
ylim(ylimz["precip",]) +
ggtitle("Morpion") +
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))
ppm <- dat %>%
  filter(station=="Morpion") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = Q)) +
  geom_line(color = colz[2], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[2]) +
  ylab("Q (mm/jr)") +
  ylim(ylimz["Q",])
pmm <- dat %>%
  filter(station=="Morpion") %>%
  ggplot(aes(x = date, y = MES)) +
  geom_line(color = colz[3], alpha = 0.2) +
  geom_point(color = colz[3]) +
  ylab("MES ppb") +
  ylim(ylimz["MES",])
ggarrange(ppm, ppm, pmm, labels = c("Precip.", "Q", "MES"),
          ncol = 1, widths = 6, align = "v")

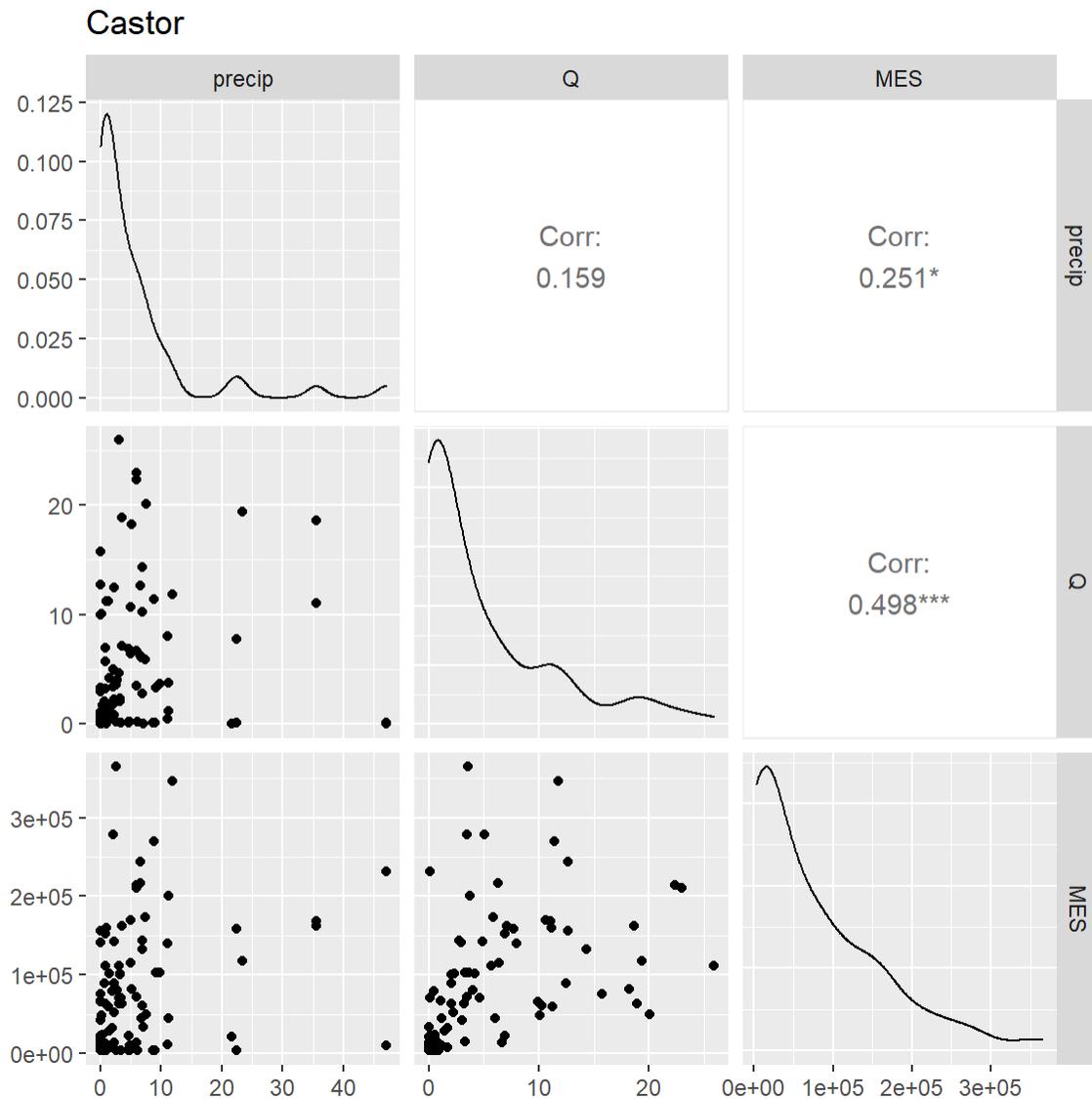
```

# Precip. Morpion



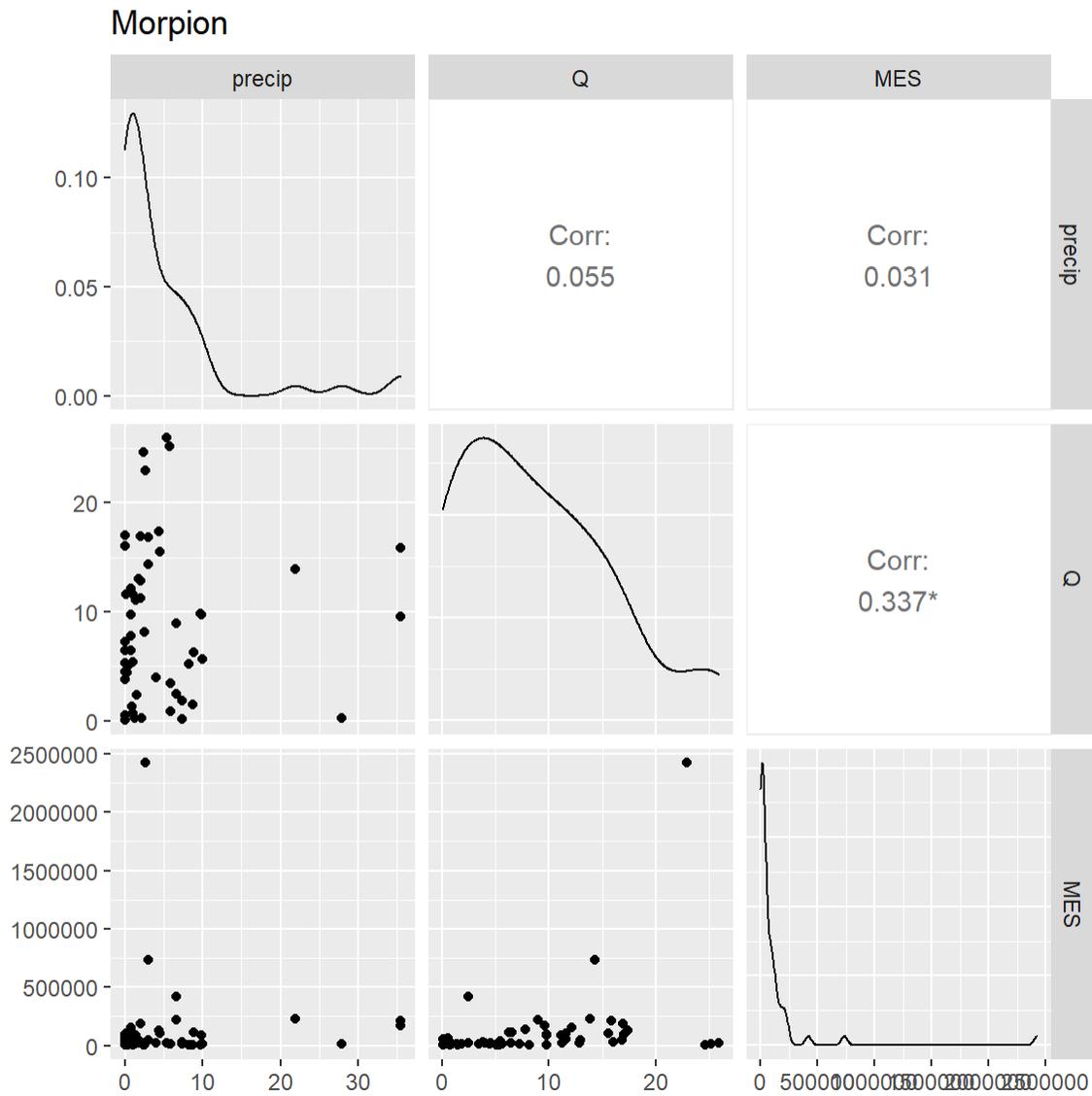
Voir les corrélations entre variables.

```
# Castor
dat %>%
  filter(station=="Castor") %>%
  droplevels() %>%
  ggpairs(columns = c("precip", "Q", "MES"), title = "Castor")
```



```
# Morpion
dat %>%
  filter(station=="Morpion") %>%
  droplevels() %>%
```

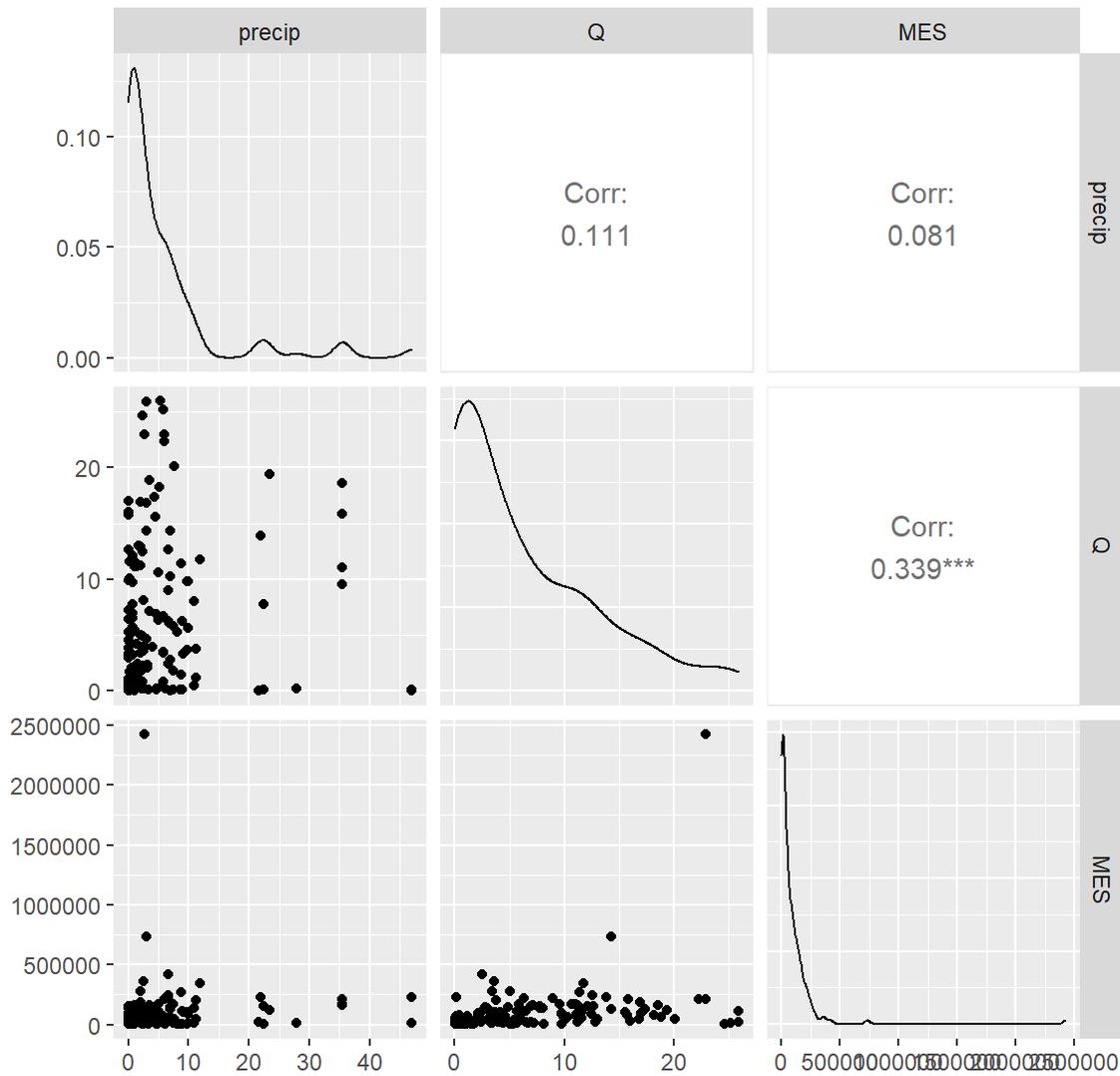
```
ggpairs(columns = c("precip", "Q", "MES"), title = "Morpion")
```



```
# Deux stations
```

```
ggpairs(dat, columns = c("precip", "Q", "MES"), title = "Castor + Morpion")
```

## Castor + Morpion

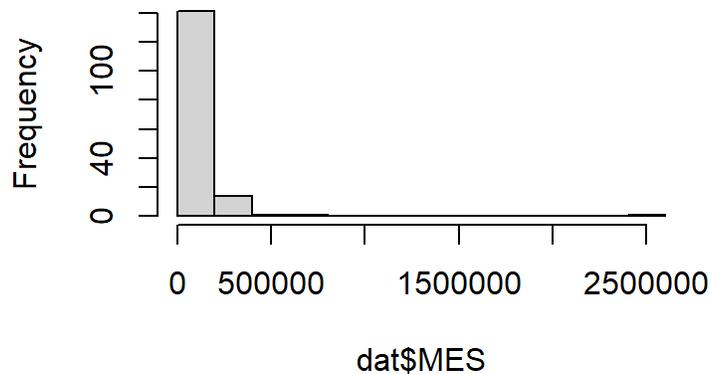


## Observations:

- Il y a une valeur de MES extrême qui risque de déformer les relations
- Les distributions sont très asymétriques (~ exponentielle/gamma)
- MES est surtout corrélé au débit, mais aussi aux précipitations
- Les corrélations sont moins fortes pour Morpions que pour Castor (normal, il y a moins de données)

```
hist(dat$MES)
```

## Histogram of dat\$MES



```
max(dat$MES)
## [1] 2424000
dat %<>% filter(MES<1000000)
```

### 3 Modélisation des MES

#### 3.1 Préparation des données

Période d'aménagement de Castor et Morpions.

```
datecastor <- c("2021-10-04", "2021-10-04") %>%
  as.POSIXct(format = "%Y-%m-%d")
datemorpion <- c("2021-08-12", "2021-09-29") %>%
  as.POSIXct(format = "%Y-%m-%d")
```

Ajouter variable pour distinguer avant/après aménagement

```
datc <- filter(dat, station=="Castor")
datm <- filter(dat, station=="Morpion")
datc %<>%
  mutate(amenagement = factor(dateheure > datecastor[1],
                              labels = c("avant", "après")))
```

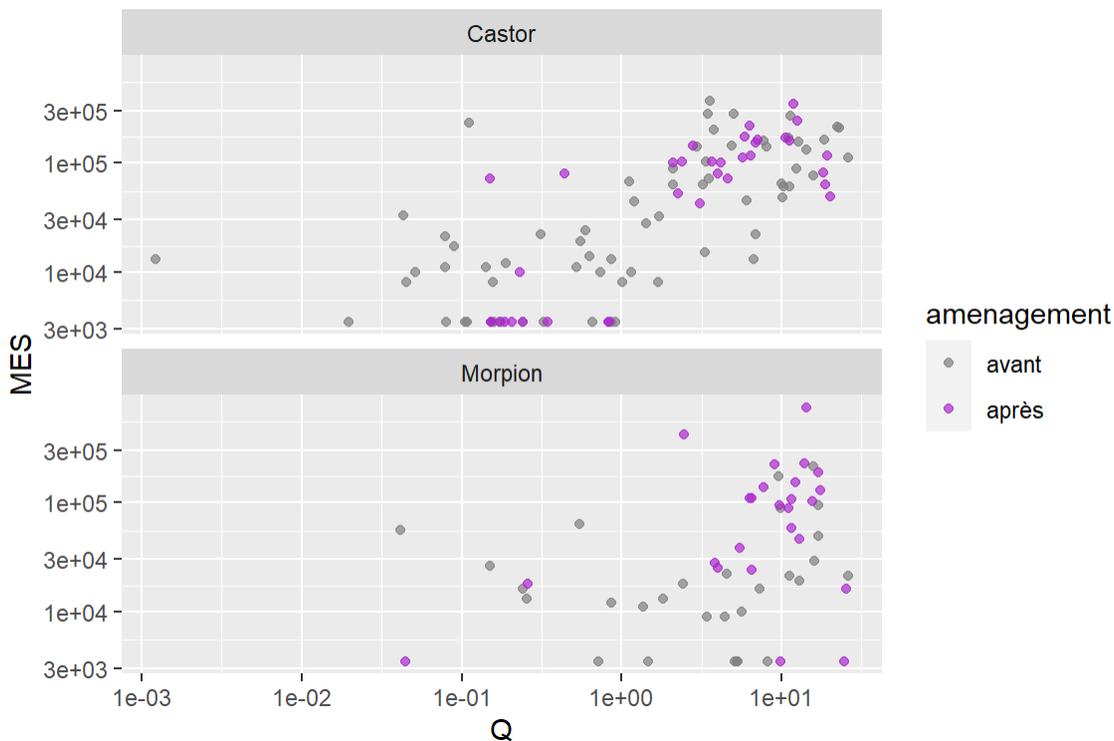
```
datm %<>%
  mutate(amenagement = factor(dateheure > datemorpion[1],
                              labels = c("avant", "après")))

dat <- rbind(datc, datm)
```

### Corrélation entre MES et Q

```
colame <- hsv(h=0.8, s=c(0,0.8), v=c(0.5,0.8))

ggplot(dat, aes(x = Q, y = MES, color = amenagement)) +
  geom_point(alpha = 0.7) +
  scale_color_discrete(type = colame) +
  scale_x_log10() +
  scale_y_log10() +
  facet_wrap(~station, ncol=1)
```



### 3.2 Spécifications du modèle

On modélise la MES en fonction du débit séparément pour chaque cours d'eau. On tente de détecter un changement après les aménagements.

On inclut les précipitations dans le modèle comme variable prédictive additionnelle.

On modélise les MES avec une distribution Gamma pour permettre la variance d'augmenter avec la moyenne. Les variables indépendantes sont:

- le débit Q
- l'aménagement (avant/après)
- l'interaction débit×aménagement
- la précipitation
- l'interaction précipitation×aménagement

On inclut aussi une structure d'autocorrélation temporelle parce que certaines données sont prises à de courts intervalles

Ajouter une date numérique pour la modélisation de l'autocorrélation

```
datmod <- dat %>%
  mutate(numDate = as.numeric(julian(dateheure))) %>%
  filter(Q>0)
```

Il n'y a pas de colinéarité qui serait problématique pour le modèle (vif ~1)

```
car::vif(lm(MES ~ aménagement + log(Q) + log(precip+1) + station, data = datmod))
```

##	amenagement	log(Q)	log(precip + 1)	station
##	1.051831	1.155782	1.031444	1.096646

### 3.3 Castor

#### 3.3.1 Modèle

```

datmcas <- datmod %>%
  filter(station == "Castor") %>%
  droplevels()

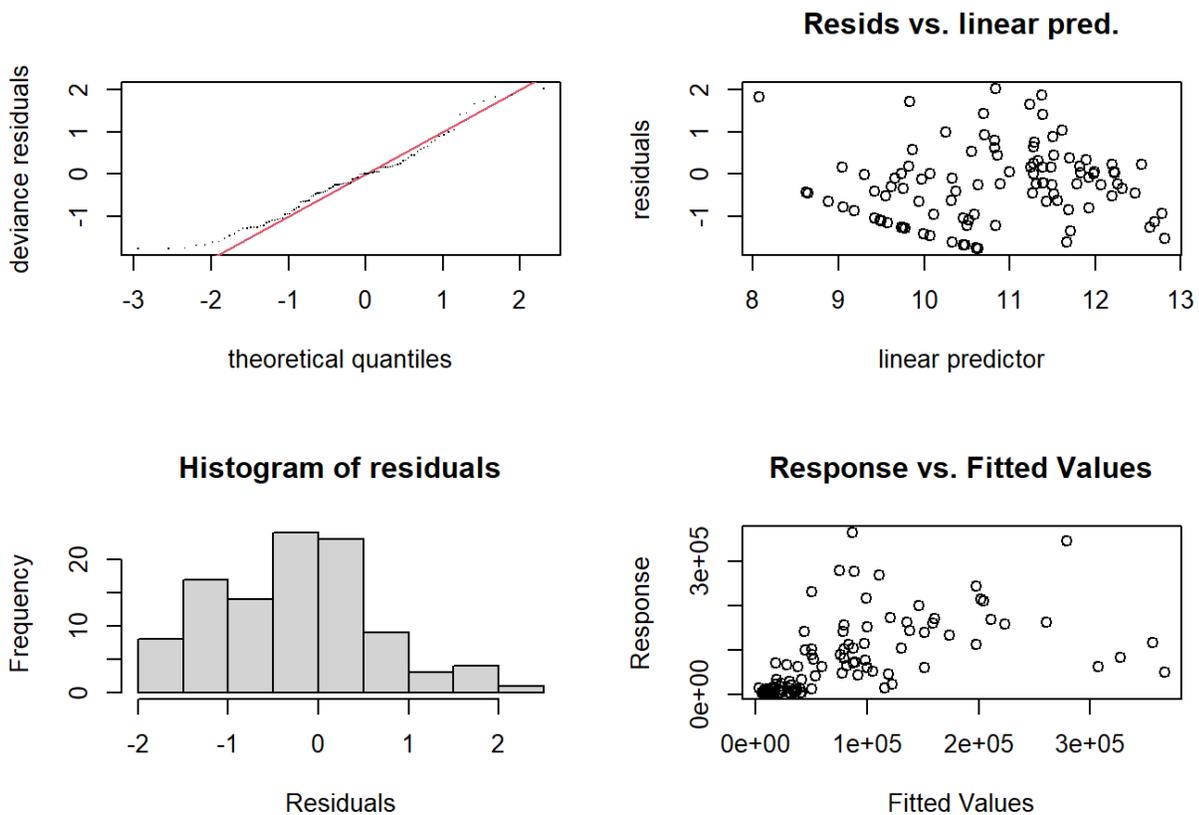
modCasF <- gam(MES ~ aménagement + log(Q) + log(Q):aménagement +
  log(precip+1) + log(precip+1):aménagement +
  s(numDate, bs = "gp"),
  family = Gamma("log"), data = datmcas)

```

### 3.3.2 Vérifier la validité du modèle

On vérifie les résidus du modèle pour voir si ce dernier est valide.

```
gam.check(modCasF)
```

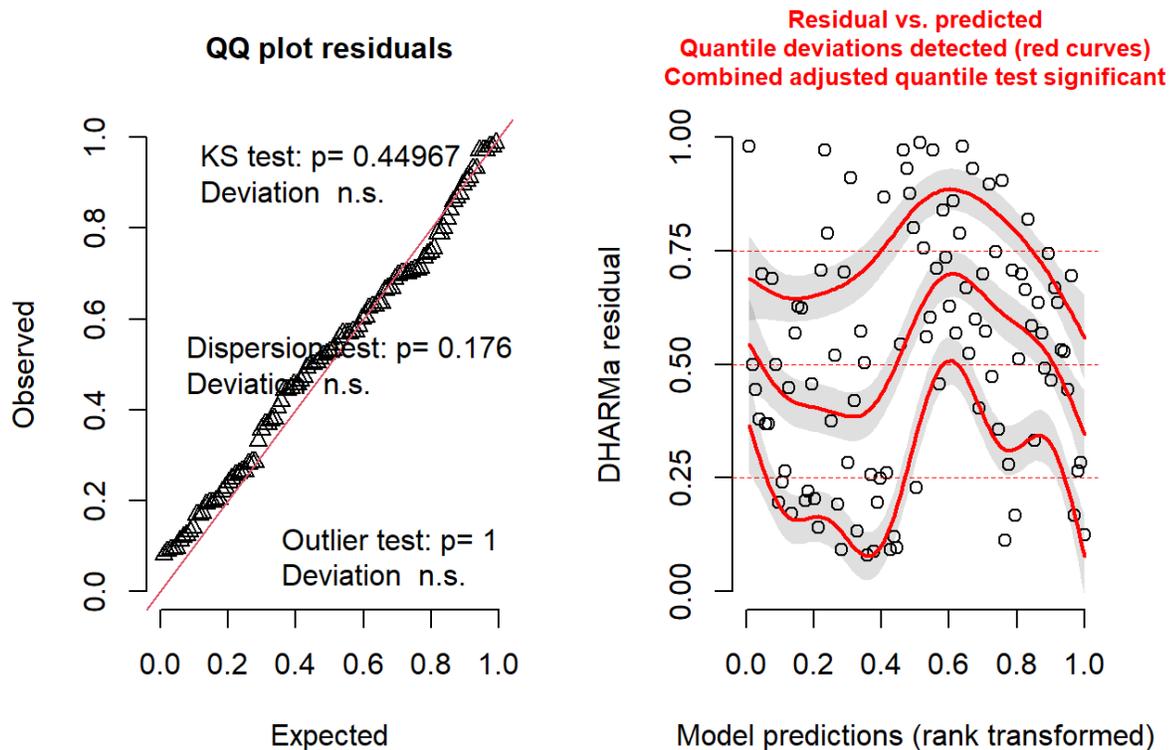


```

##
## Method: GCV   Optimizer: outer newton
## full convergence after 2 iterations.
## Gradient range [6.983017e-11,6.983017e-11]
## (score 1.044452 & scale 1.002349).
## Hessian positive definite, eigenvalue range [0.01316273,0.01316273].
## Model rank = 17 / 17
##
## Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
## indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.
##
##           k'   edf k-index p-value
## s(numDate) 11.00  4.98   0.77   0.05 *
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
DHARMA::simulateResiduals(modCasF, plot=TRUE)
## Registered S3 method overwritten by 'mgcViz':
##   method from
##   +.gg   GGally

```

## DHARMA residual



```
## Object of Class DHARMA with simulated residuals based on 250 simulations with re
fit = FALSE . See ?DHARMA::simulateResiduals for help.
```

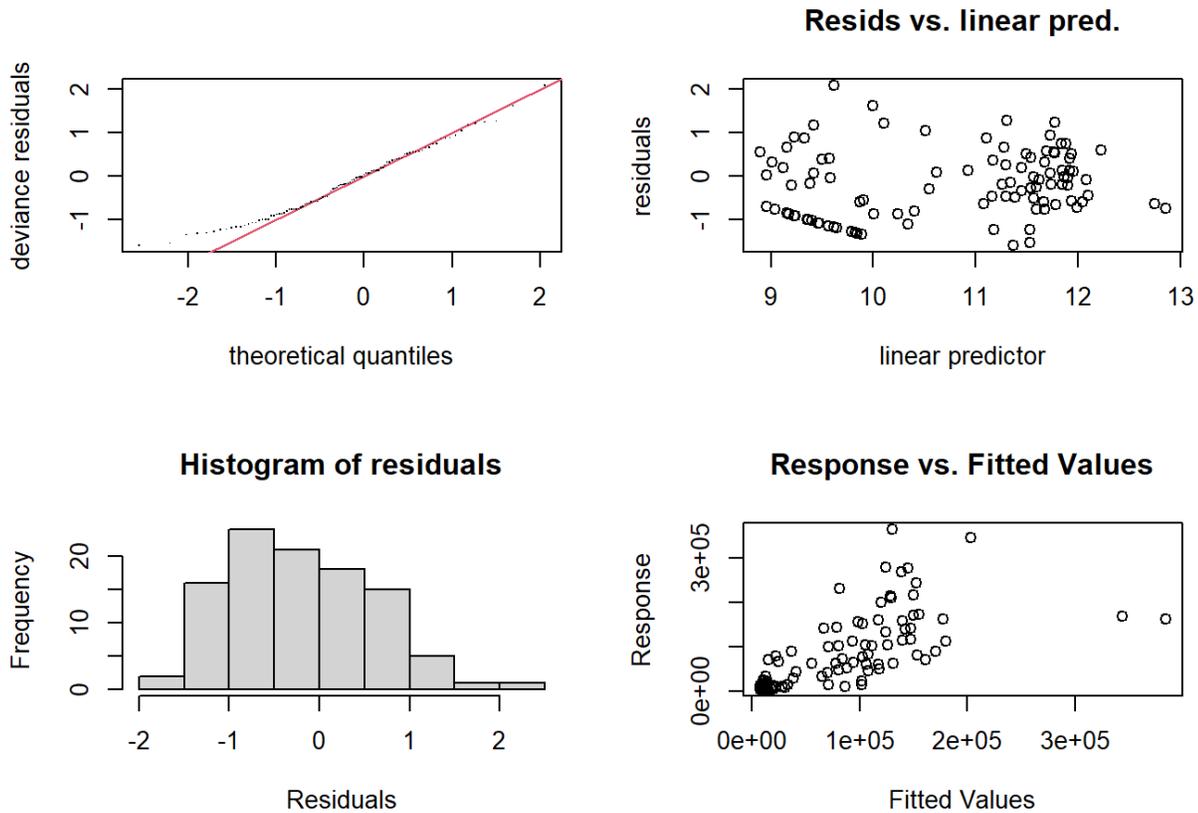
```
##
```

```
## Scaled residual values: 0.376 0.712 0.904 0.42 0.628 0.868 0.572 0.532 0.444 0.5
44 0.284 0.14 0.28 0.472 0.332 0.492 0.456 0.668 0.636 0.932 ...
```

La relation MES -  $\log(Q)$  ne semble pas linéaire, alors on passe à un modèle nonlinéaire. On estime la forme de la relation avec des "smoothing splines". Pour voir s'il y a un effet de l'aménagement, on compare des modèles qui ont soit une forme pour l'ensemble des données, ou une forme pour chaque période (avant/après).

```
gammapar <- 1.2
modCasF1 <- gam(MES ~ amenagement + s(log(Q), by = amenagement) +
  s(log(precip+1)), gamma = gammapar,
  family = Gamma("log"), data = datmcas)
```

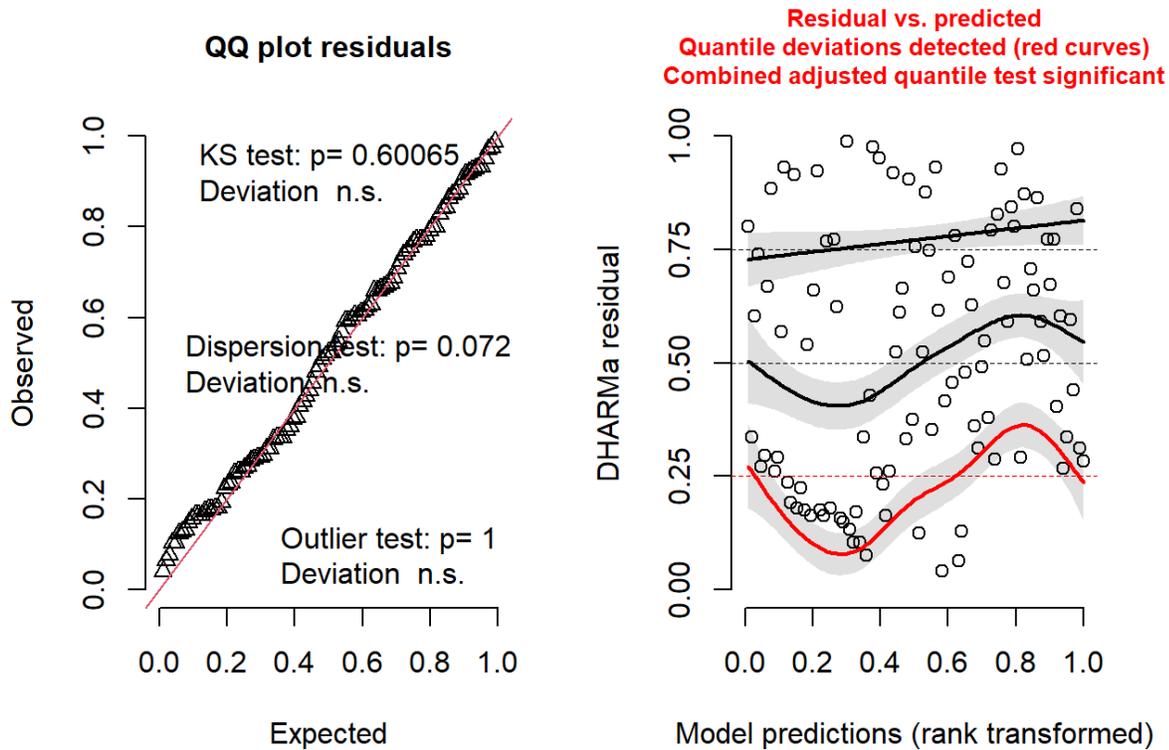
```
gam.check(modCasF1)
```



```
##
## Method: GCV   Optimizer: outer newton
## full convergence after 5 iterations.
## Gradient range [-1.74692e-09,8.630919e-10]
## (score 0.9374682 & scale 0.7749322).
## Hessian positive definite, eigenvalue range [0.005972037,0.01296426].
## Model rank = 29 / 29
##
## Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
## indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.
##
##
##           k'   edf k-index p-value
## s(log(Q)):amenagementavant 9.00 4.53   0.91   0.36
```

```
## s(log(Q)):amenagementaprès 9.00 3.29 0.91 0.39
## s(log(precip + 1))          9.00 5.98 0.90 0.35
DHARMA::simulateResiduals(modCasF1, plot=TRUE)
```

### DHARMA residual



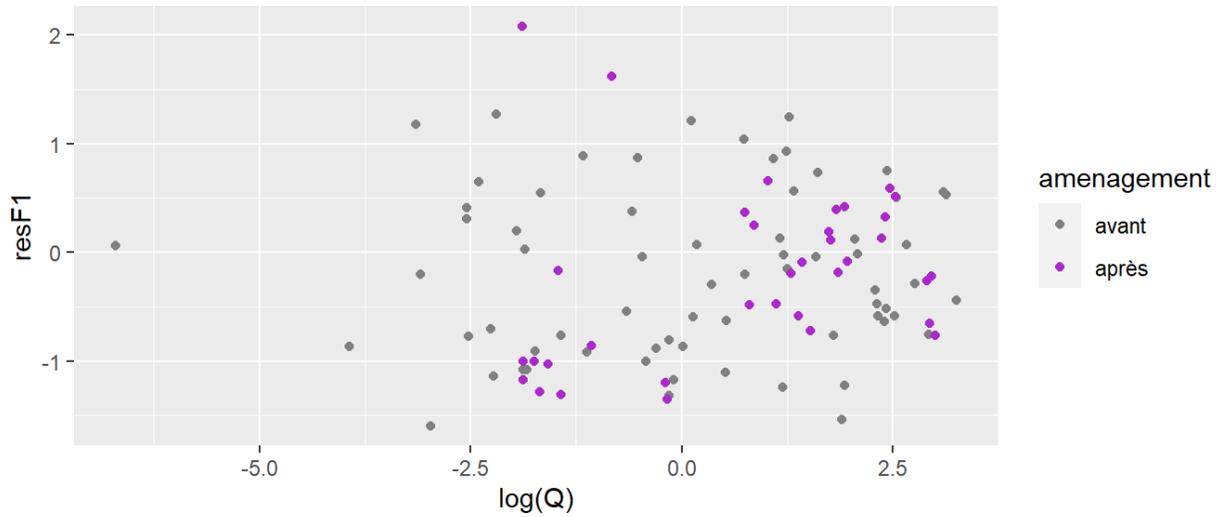
```
## Object of Class DHARMA with simulated residuals based on 250 simulations with re
fit = FALSE . See ?DHARMA::simulateResiduals for help.
```

```
##
```

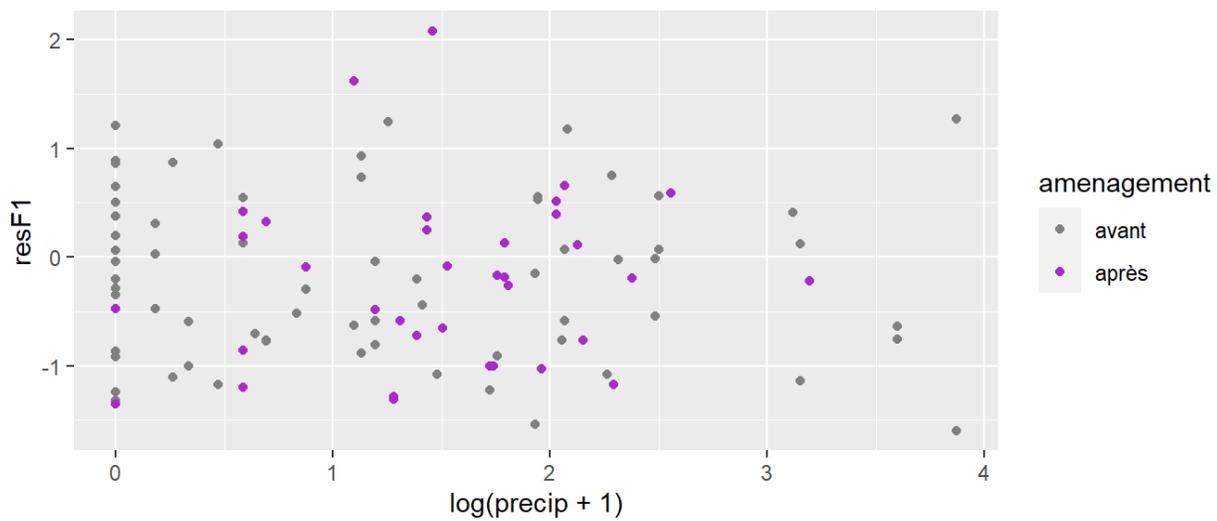
```
## Scaled residual values: 0.336 0.336 0.872 0.124 0.624 0.664 0.524 0.312 0.284 0.
332 0.256 0.272 0.312 0.36 0.38 0.676 0.352 0.844 0.8 0.864 ...
```

```
datmcas$resF1 <- residuals(modCasF1)
```

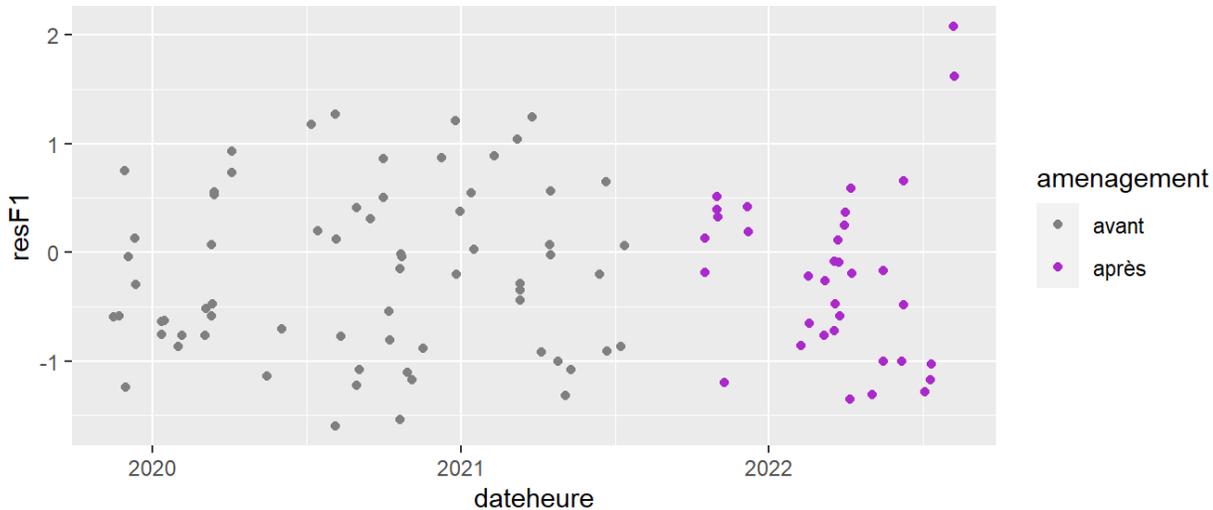
```
ggplot(datmcas, aes(log(Q), resF1, color = amenagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



```
ggplot(datmcas, aes(log(precip+1), resF1, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



```
ggplot(datmcas, aes(dateheure, resF1, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



### 3.3.3 Sélection de modèle

On sélectionne le modèle le plus parcimonieux qui représente quand-même bien les données observées. On utilise le critère d'information AIC pour comparer des modèles avec différents prédicteurs.

Le AIC représente l'information (variance) non expliquée par le modèle. Un modèle qui représente mieux les données a donc un AIC plus bas. Le AIC pénalise aussi les modèles selon leur complexité pour éviter des résultats fortuits.

Une différence de AIC de 2 ou plus est généralement considéré comme "significative"

```
# modèles sans interaction
modCasF1a <- gam(MES ~ aménagement + s(log(Q)) +
                s(log(precip + 1)), gamma = gammapar,
                family = Gamma("log"), data = datmcas)
modCasF1b <- gam(MES ~ aménagement + s(log(Q)), gamma = gammapar,
                family = Gamma("log"), data = datmcas)

# modèles sans effet aménagement
modCasF0a <- gam(MES ~ s(log(Q)) + s(log(precip + 1)), gamma = gammapar,
                family = Gamma("log"), data = datmcas)
modCasF0b <- gam(MES ~ s(log(Q)), gamma = gammapar,
                family = Gamma("log"), data = datmcas)
```

```
AIC(modCasF1, modCasF1a, modCasF1b,
     modCasF0a, modCasF0b)
```

```
##           df      AIC
## modCasF1 16.794335 2435.396
## modCasF1a 13.137376 2431.965
## modCasF1b  9.849893 2482.453
## modCasF0a 11.919248 2431.200
## modCasF0b  8.810664 2479.823
```

Il n'y a aucun effet détectable de l'aménagement.

### 3.3.4 Résultats

#### Coefficients du modèle

```
summary(modCasF1a)
```

```
##
## Family: Gamma
## Link function: log
##
## Formula:
## MES ~ amenagement + s(log(Q)) + s(log(precip + 1))
##
## Parametric coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)    10.6831    0.1106   96.599  <2e-16 ***
## amenagementaprès  0.1346    0.2027    0.664   0.508
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Approximate significance of smooth terms:
##              edf Ref.df      F p-value
## s(log(Q))      4.333  5.294 24.093 < 2e-16 ***
## s(log(precip + 1)) 5.805  6.886  3.176 0.00527 **
```

```
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## R-sq.(adj) =  0.326   Deviance explained = 61.3%
## GCV = 0.88779   Scale est. = 0.77114   n = 103
```

### Résultats:

- Les MES moyens des échantillons pré-/post-aménagement sont similaires
- Le MES est lié au débit
- Le MES est lié à la précipitation

Le modèle explique environ 60% de la variance dans le MES (*Deviance explained*)

### 3.3.5 Visualisation du résultat

On met les prédictions du modèle et les observations sur un graphique. Pour éviter de trop compliquer les graphiques, on illustre les prédictions pour la précipitation moyenne et la date moyenne de chaque site.

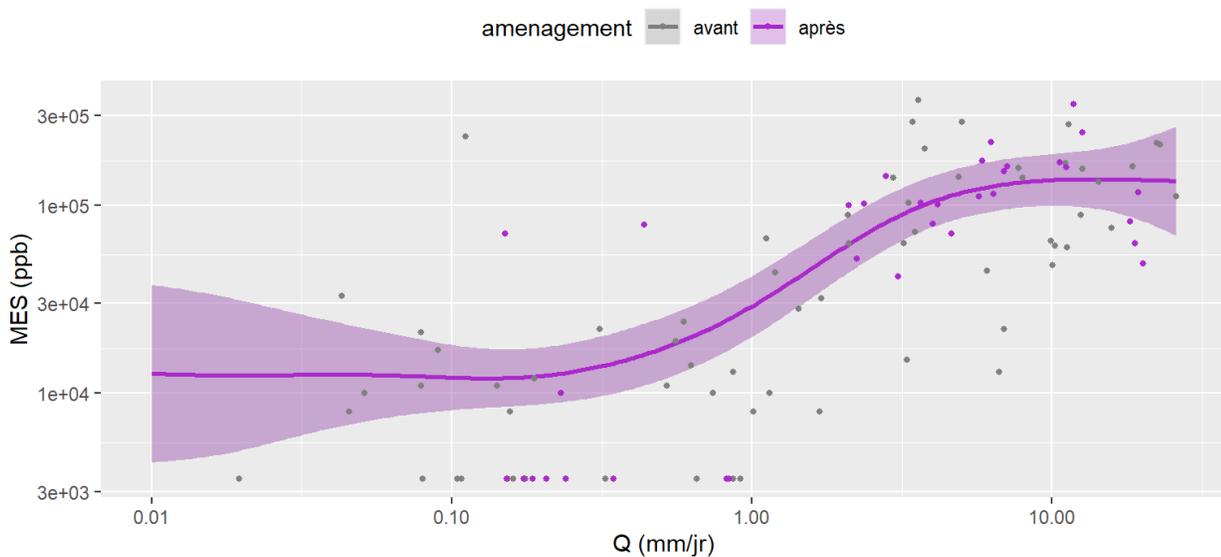
Données pour illustrer les valeurs estimées par le modèle

```
# Castor
rangeQ <- seq(log(0.01), log(max(datmcas$Q)),
              length = 250) %>% exp()
newdatc <- expand.grid(amenagement = levels(datmcas$amenagement),
                      Q = rangeQ,
                      precip = min(datmcas$precip),
                      numDate = min(datmcas$numDate))
pre <- predict(modCasF0a, se.fit = TRUE, newdata = newdatc,
              exclude = c("s(log(precip + 1))", "s(precip)" )
newdatc %<>%
  mutate(fit = exp(pre$fit),
         low95 = exp(pre$fit - 2*pre$se.fit),
         upp95 = exp(pre$fit + 2*pre$se.fit))
```

## Créer les graphiques: Valeurs moyennes prédites avec intervalles de confiance (95%)

```
# Castor
ggplot(newdatc, aes(x = Q, y = fit, color = aménagement)) +
  geom_ribbon(aes(x = Q, ymin = low95, ymax = upp95,
                fill = aménagement), col=0, alpha = 0.25) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  scale_fill_manual(values = colame) +
  geom_line(size = 1) +
  scale_x_log10() +
  scale_y_log10() +
  labs(x = "Q (mm/jr)", y = "MES (ppb)", title = "Castor") +
  theme(legend.position="top") +
  geom_point(data = datmcas[datmcas$Q>0.01,], aes(x = Q, y = MES, color = aménagement),
            inherit.aes = FALSE, size = 1)
```

Castor



## 3.4 Morpions

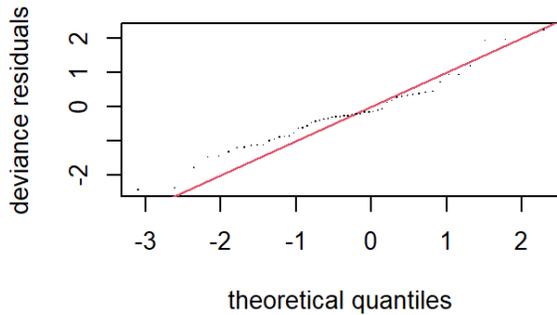
### 3.4.1 Modèle

```
datmmor <- datmod %>%  
  filter(station == "Morpion") %>%  
  droplevels()  
gammapar <- 1.2  
modMorF1 <- gam(MES ~ aménagement + s(log(Q), by = aménagement) +  
  s(log(precip+1)), gamma = gammapar,  
  family = Gamma("log"), data = datmmor)
```

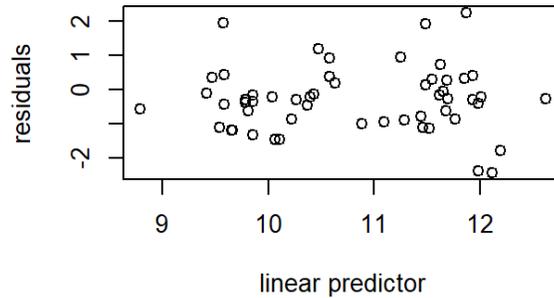
### 3.4.2 Vérifier la validité du modèle

On vérifie les résidus du modèle pour voir si ce dernier est valide.

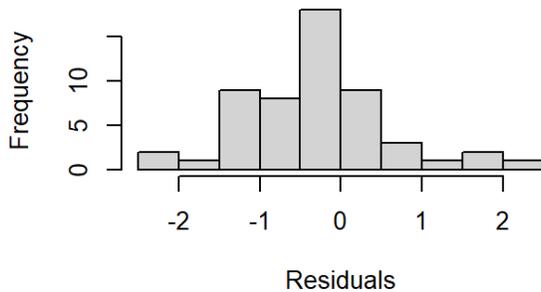
```
gam.check(modMorF1)
```



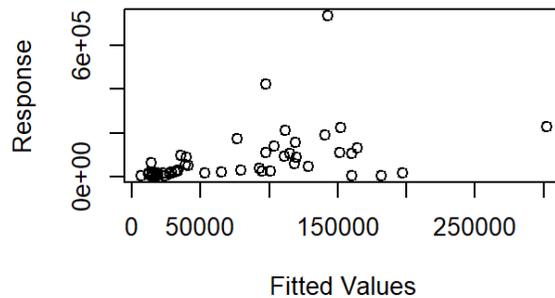
Resids vs. linear pred.



Histogram of residuals



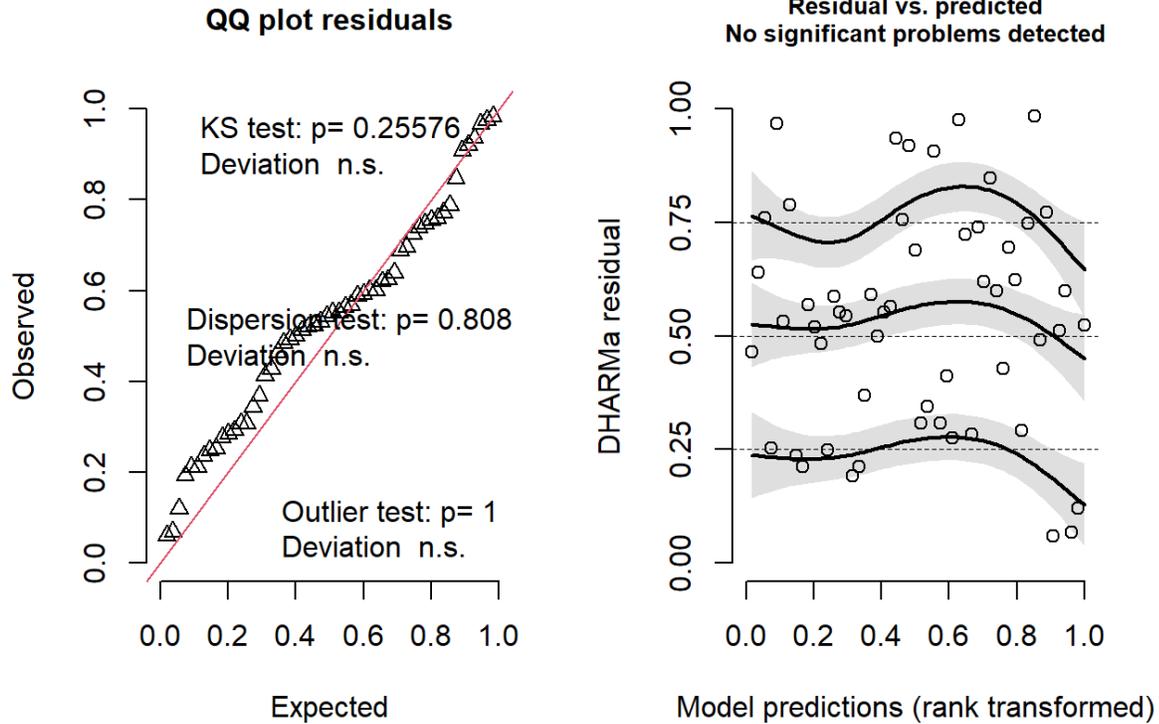
Response vs. Fitted Values



```
##
## Method: GCV   Optimizer: outer newton
## full convergence after 5 iterations.
## Gradient range [-1.460934e-06,-4.109141e-09]
## (score 1.362365 & scale 1.272431).
## Hessian positive definite, eigenvalue range [0.005783678,0.02431217].
## Model rank = 29 / 29
##
## Basis dimension (k) checking results. Low p-value (k-index<1) may
## indicate that k is too low, especially if edf is close to k'.
##
##           k'   edf k-index p-value
## s(log(Q)):amenagementavant 9.00 2.18   0.85   0.28
## s(log(Q)):amenagementaprès 9.00 1.41   0.85   0.26
## s(log(precip + 1))          9.00 1.54   0.92   0.52
```

```
DHARMA::simulateResiduals(modMorF1, plot=TRUE)
```

### DHARMA residual



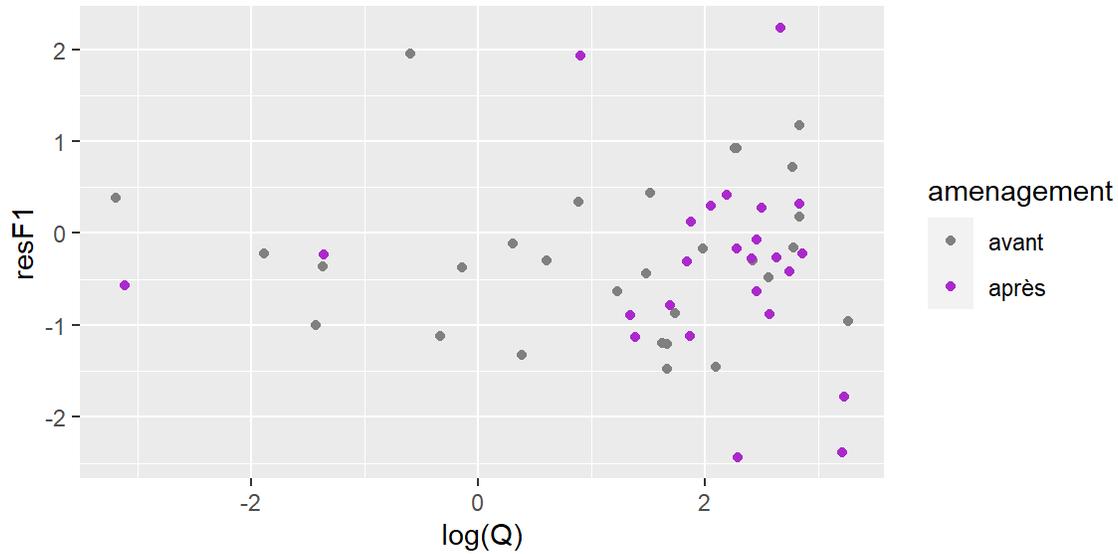
```
## Object of Class DHARMA with simulated residuals based on 250 simulations with re
fit = FALSE . See ?DHARMA::simulateResiduals for help.
```

```
##
```

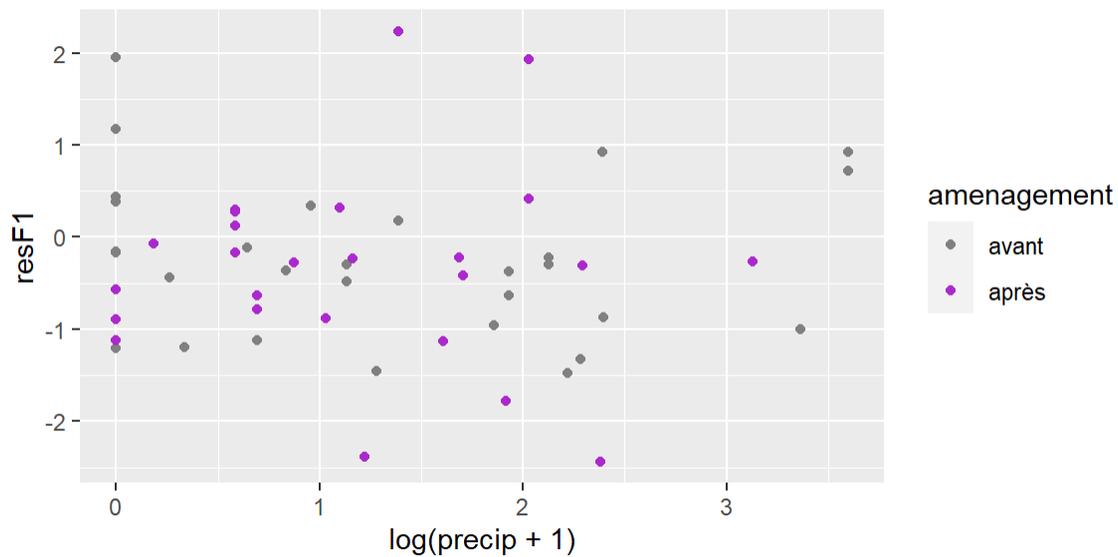
```
## Scaled residual values: 0.64 0.192 0.688 0.588 0.236 0.76 0.908 0.848 0.248 0.53
2 0.368 0.564 0.936 0.5 0.592 0.308 0.212 0.756 0.552 0.552 ...
```

```
datmmor$resF1 <- residuals(modMorF1)
```

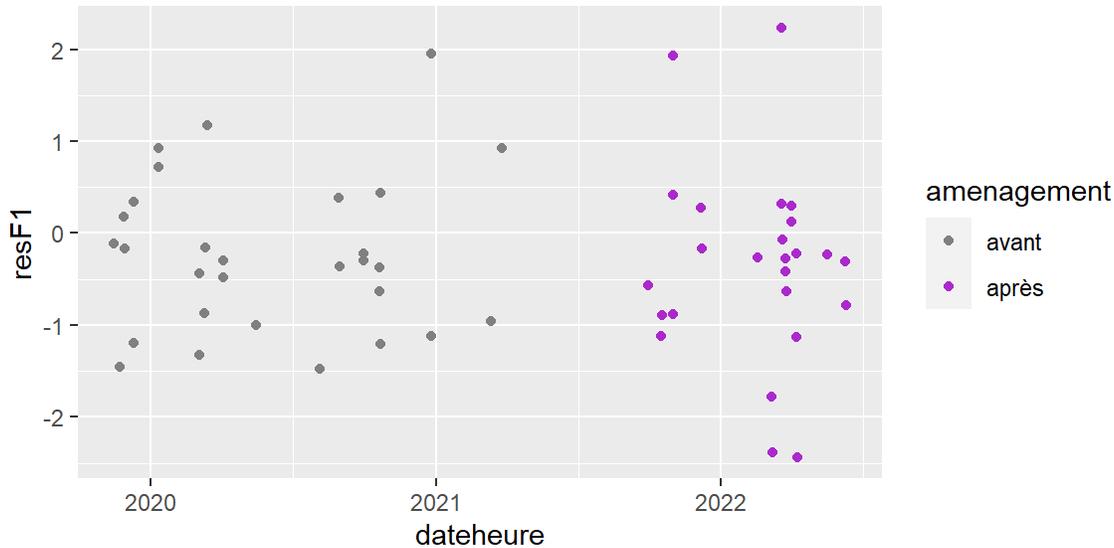
```
ggplot(datmmor, aes(log(Q), resF1, color = amenagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



```
ggplot(datmmor, aes(log(precip+1), resF1, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



```
ggplot(datmmor, aes(dateheure, resF1, color = aménagement)) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  geom_point()
```



Les résidus semblent ok.

### 3.4.3 Sélection de modèle

Simplifier la relation avec la précipitation parce que l'interaction ne contribue pas vraiment

```
# modèles sans interaction
modMorF1a <- gam(MES ~ aménagement + s(log(Q)) +
                 s(log(precip + 1)), gamma = gammapar,
                 family = Gamma("log"), data = datmmor)
modMorF1b <- gam(MES ~ aménagement + s(log(Q)), gamma = gammapar,
                 family = Gamma("log"), data = datmmor)

# modèles sans effet aménagement
modMorF0a <- gam(MES ~ s(log(Q)) + s(log(precip + 1)), gamma = gammapar,
                 family = Gamma("log"), data = datmmor)
modMorF0b <- gam(MES ~ s(log(Q)), gamma = gammapar,
                 family = Gamma("log"), data = datmmor)

AIC(modMorF1, modMorF1a, modMorF1b,
    modMorF0a, modMorF0b)
```

```
##           df      AIC
## modMorF1  8.123015 1296.423
## modMorF1a 6.192405 1300.640
## modMorF1b 4.515907 1307.038
## modMorF0a 4.209033 1320.580
## modMorF0b 3.000187 1321.539
```

Il semble y avoir un effet de l'aménagement sur la relation MES-Q ( $\Delta AIC \approx 4$ ,  $\Delta AIC \approx 4$ )

### 3.4.4 Résultats

#### Coefficients du modèle

```
summary(modMorF1)
##
## Family: Gamma
## Link function: log
##
## Formula:
## MES ~ aménagement + s(log(Q), by = aménagement) + s(log(precip +
##      1))
##
## Parametric coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)    10.2096    0.2198  46.446 < 2e-16 ***
## aménagementaprès  1.2532    0.3296   3.803 0.000413 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Approximate significance of smooth terms:
##              edf Ref.df    F p-value
## s(log(Q)):aménagementavant 2.176  2.729 2.154 0.1556
## s(log(Q)):aménagementaprès 1.411  1.705 5.719 0.0229 *
## s(log(precip + 1))          1.536  1.890 2.630 0.1347
## ---
```

```
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## R-sq.(adj) =  0.0896   Deviance explained = 46.8%
## GCV = 1.3624   Scale est. = 1.2724   n = 54
```

### Résultats:

- Le MES moyen est plus élevé dans les échantillons post-aménagement
- Le MES est lié au débit, et la relation a changé après l'aménagement
- Le MES est lié à la précipitation

Le modèle explique moins de la moitié de la variance dans le MES (*Deviance explained*)

#### 3.4.5 Visualisation du résultat

On met les prédictions du modèle et les observations sur un graphique. Pour éviter de trop compliquer les graphiques, on illustre les prédictions pour une précipitation moyenne de chaque site.

Données pour illustrer les valeurs estimées par le modèle

```
# Morpion
rangeQ <- seq(min(datmmor$Q), max(datmmor$Q), length = 100)
newdatm <- expand.grid(amenagement = levels(datmmor$amenagement),
                      Q = rangeQ,
                      precip = mean(datmmor$precip),
                      numDate = mean(datmmor$numDate))
pre <- predict(modMorF1, se.fit = TRUE, newdata = newdatm)
newdatm %<>%
  mutate(fit = exp(pre$fit),
         low95 = exp(pre$fit - 2*pre$se.fit),
         upp95 = exp(pre$fit + 2*pre$se.fit))
```

Créer les graphiques: Valeurs moyennes prédites avec intervalles de confiance (95%)

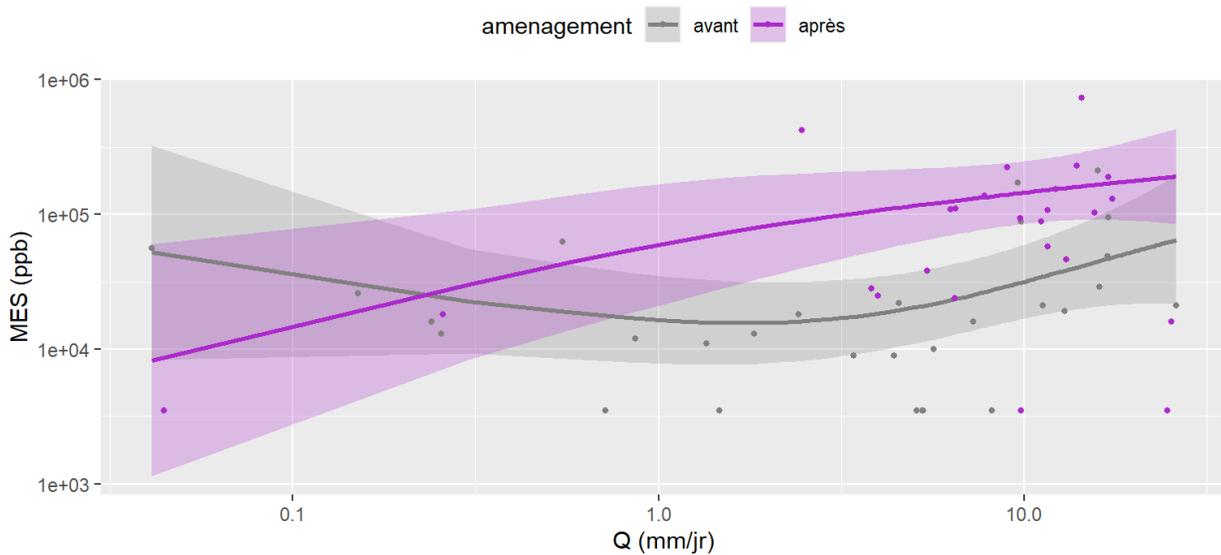
```
ylims <- range(c(datmmor$MES, newdatm$low95, newdatm$upp95))
```

```

# Castor
ggplot(newdatm, aes(x = Q, y = fit, color = aménagement)) +
  geom_ribbon(aes(x = Q, ymin = low95, ymax = upp95,
                fill = aménagement), col=0, alpha = 0.25) +
  scale_color_manual(values = colame) +
  scale_fill_manual(values = colame) +
  geom_line(size = 1) +
  ylim(ylims) +
  scale_x_log10() +
  scale_y_log10() +
  labs(x = "Q (mm/jr)", y = "MES (ppb)", title = "Morpion") +
  theme(legend.position="top") +
  geom_point(data = datmmor, aes(x = Q, y = MES, color = aménagement),
            inherit.aes = FALSE, size = 1)
## Scale for 'y' is already present. Adding another scale for 'y', which will
## replace the existing scale.

```

### Morpion



#### 4 Conclusion

On a détecté un effet de l'aménagement sur la relation entre MES & Q dans le cours d'eau Morpions, mais pas Castor.

- Castor: Bien qu'aucun effet de l'aménagement a été détecté, le résultat est très incertain. La conclusion est plutôt l'impossibilité de se prononcer qu'une absence d'effet.
- Morpions: Le MES moyen n'a pas changé, mais la pente qui décrit la relation oui. Cela voudrait dire qu'après l'aménagement, il y a autant ou moins de MES quand le débit est bas, mais plus quand le débit est élevé.

#### Notes:

- Ces résultats restent **exploratoires** puisqu'ils reflètent qu'une seule année d'échantillonnage après l'aménagement - tout changement pourrait être dû à autre chose qui change d'une année à l'autre.
- L'analyse et le résultat pour Castor est très incertain. L'analyse présentée est le mieux qu'on peut faire, mais de tout petit changements dans les suppositions des modèles statistiques font ressortir un effet de l'aménagement, ou change l'effet de l'aménagement.