



HAL
open science

Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer

Patrick Boyer, Léa Kieffer, Hugo Lepage, Alyssa Serlet, Michal Tal, Jérôme Le Coz, B. Camenen, Théophile Terraz

► **To cite this version:**

Patrick Boyer, Léa Kieffer, Hugo Lepage, Alyssa Serlet, Michal Tal, et al.. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer. [Rapport de recherche] IRSN; Aix-Marseille Université; INRAE. 2023. hal-03750733v2

HAL Id: hal-03750733

<https://hal.science/hal-03750733v2>

Submitted on 4 Oct 2023 (v2), last revised 27 Aug 2024 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Observatoire
des Sédiments
du Rhône

Modélisation hydro- sédimentaire du Rhône du Léman à la mer

Modélisation hydro-sédimentaire de Rhône du Léman à la mer

Rapport scientifique intermédiaire

Version du 25/07/2023

Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action

Axe E – Axe E

Action E2 – Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer

Personnes impliquées

Patrick Boyer (IRSN, LRTA) ; Hugo Lepage (IRSN, LRTA) ; Alyssa Serlet (Aix-Marseille Université, CEREGE UMR 7330) ; Michal Tal (Aix-Marseille Université, CEREGE UMR 7330), Jérôme Le Coz (INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne), Benoît Camenen (INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne), Théophile Terraz (INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne), Léa KIEFFER (INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne)

Pour citer ce rapport

Boyer, P., Kieffer, L. (2023). *Modélisation hydro-sédimentaire de Rhône du Léman à la mer*. Rapport scientifique intermédiaire. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action, 31 p.

Résumé

Ce rapport regroupe les actions menées au cours de cette deuxième année de l'OSR 6 dans le but de développer et d'améliorer le modèle 1D OSR du Rhône du Léman à la mer et de son code de calcul. Au cours de cette année, des simulations hydrauliques des modèles du bas et du haut Rhône ont pu être réalisées sur des périodes de temps long et de manière continue en incluant le fonctionnement du barrage de Génissiat. Le développement et les tests sur le module de charriage du code de calcul Mage8 ont également été poursuivis sur la partie tri granulométrique.

Il présente également les développements menés en Année 2 sur le couplage d'un modèle hydro sédimentaire et d'un modèle de transfert des contaminants en rivière.

Mots-clés

Modélisations hydro-sédimentaire et morphodynamique, évolution historique du lit, transport charriage, réinjections, Rhône, Observatoire, Sédiments, OSR, contaminants, fractionnement liquide/solide

Table des matières

1	Couplage hydro-sédimentaire et transferts de contaminants	5
1.1	Introduction	5
1.2	Calibration du modèle hydro-sédimentaire CASTEAURx	5
1.3	Couplage hydro-sédimentaire et transfert des contaminants	8
1.4	Application au fractionnement liquide/solide du ¹³⁷ Cs à SORA	8
1.5	Conclusions	10
2	Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer avec Mage et Adis-TS	11
2.1	Contexte	11
2.2	Modélisation hydraulique du Bas-Rhône	11
2.3	Modélisation hydraulique du Haut-Rhône	14
2.3.1	Barrage de Génissiat	14
2.3.2	Modélisation de l'année 2012 avec débit horaire et journalier	15
2.3.3	Modélisation de l'année 2016 avec débit horaire et journalier	16
2.3.4	Modélisation continue de 2008 à 2020	18
3	Module charriage de Mage 8	22
3.1	Dépôt progressif de sédiments grossiers dans un canal rectangulaire	22
3.1.1	Description du test	22
3.1.2	Analyse des résultats	22
4	Conclusions et perspectives	24
4.1	Perspectives	24
4.2	Formation et appui aux actions OSR	24
5	Bibliographie	25
	Annexes	27
	Annexe 1 – Résultats des simulations sur Mage de l'année 2012 et lors de l'APAVÉR 2012	27
	Annexe 2 – Résultats des simulations sur Mage de l'année 2016 et lors de l'APAVÉR 2016	29

1 Couplage hydro-sédimentaire et transferts de contaminants

1.1 Introduction

Cette partie présente les actions menées en 2022 pour coupler un modèle hydro-sédimentaire et un modèle de transfert des contaminants particulaires dans la colonne d'eau. Dans ce contexte, la contribution de l'IRSN est de développer ce modèle de transfert et de tester son couplage à un modèle hydro-sédimentaire du Rhône.

Ces actions sont menées à partir de CASTEAURx, un code de l'IRSN pour évaluer la propagation des radionucléides dans les réseaux hydrographiques. Les travaux de la première année (2021) ont conduit à la sélection du tritium et du ^{137}Cs comme contaminants d'intérêt, à l'élaboration et l'implémentation du modèle de transfert et aux premières calibrations des processus de transport/dispersion sur le Rhône (Kieffer et al., 2022).

Dans le prolongement de ces actions, l'année 2022, deuxième année du projet, a été consacrée au couplage de ce modèle de transfert à un modèle hydro-sédimentaire à plusieurs classes de particules de façon à tenir compte des dynamiques spécifiques de chaque classe que ce soit du point de vue sédimentaire ou de leur réactivité au fractionnement liquide/solide des contaminants.

Ces actions s'articulent en deux étapes :

- Calibration du modèle hydro-sédimentaire multi-classe du code CASTEAURx
- Couplage hydro-sédimentaire et transfert des contaminants

1.2 Calibration du modèle hydro-sédimentaire CASTEAURx

La calibration du module hydro-sédimentaire de CASTEAURx a été réalisée en appliquant le code sur la portion du Rhône comprise entre Vallabrègues et les embouchures marines du grand et du petit Rhône.

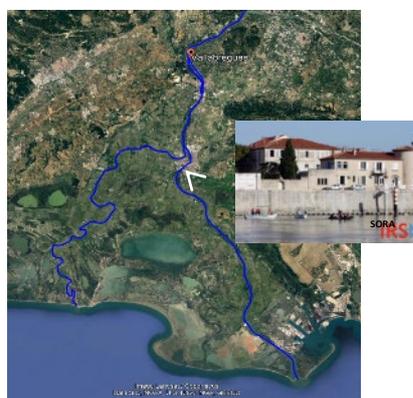


Figure 1 Le Rhône à l'aval de Vallabrègues et station SORA

L'ajustement des paramètres sédimentaires (densité, vitesse de dépôt, taux d'érosion et tension critique d'érosion) de 28 classes de particules de diamètres compris entre 3 et 300 μm a été réalisé en confrontant les chroniques modélisées des charges en suspension de ces classes aux distributions granulométriques acquises à la station SORA entre décembre 2011 et aout 2012 (Adell, 2013).

Pour chacune de ces 28 classes de particule, la figure suivante présente les confrontations modèle/mesures obtenues à la station SORA à l'issue des ajustements.

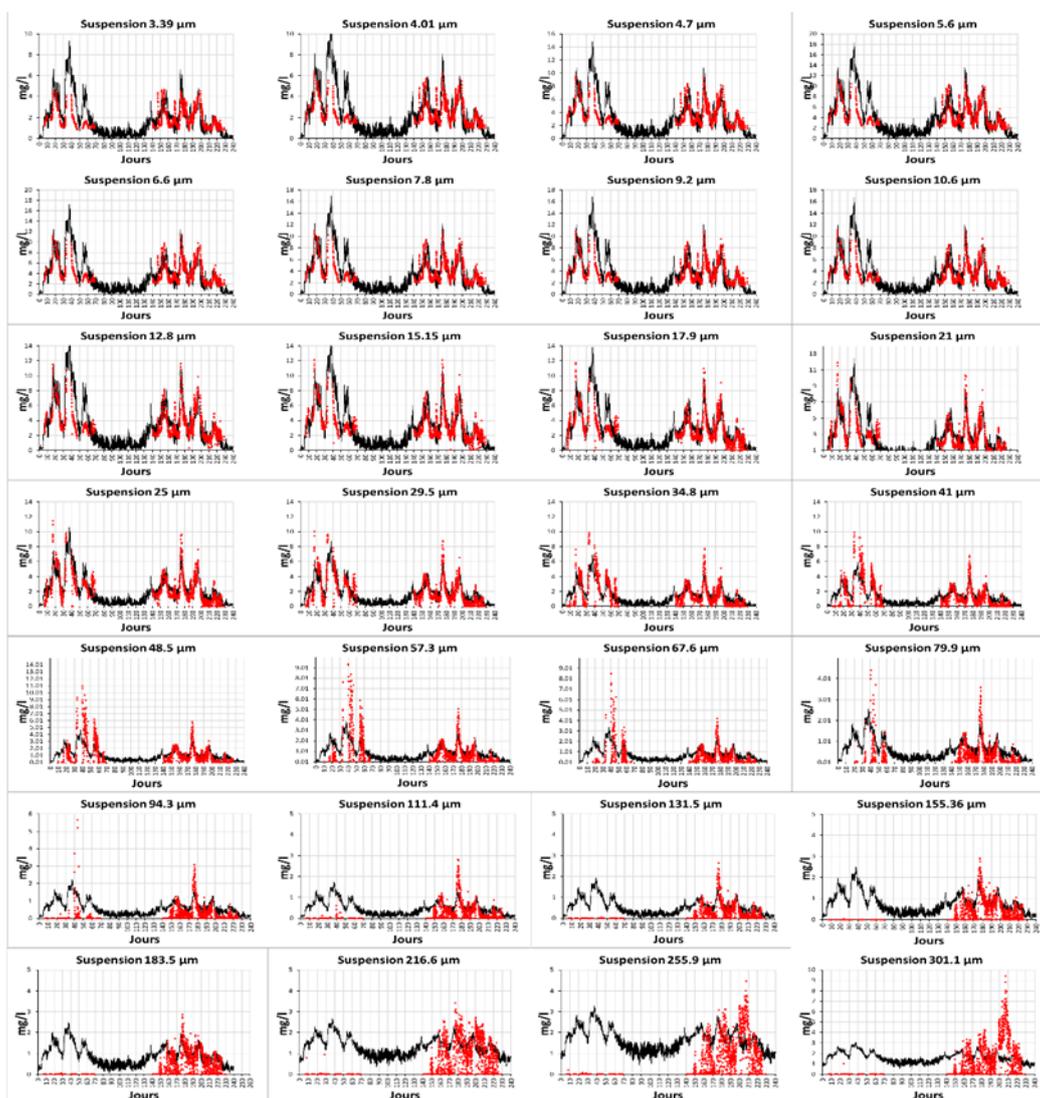


Figure 2 Comparaison modèle/mesures à la station SORA des chroniques de charges en suspension des classes granulométriques. (Points rouges : mesures ; courbe noire : modèle)

Les données granulométriques se partagent en trois périodes :

- 1) 70 premiers jours : chroniques marquées par des fluctuations erratiques de la charge en suspension des particules de diamètre supérieur à 40 μm .
- 2) 70 à 140 jours : absence de mesure en raison d'opérations de maintenance sur la station.
- 3) au-delà de 140 jours : mesures correctes pour les particules inférieures à 150 μm et comportement d'autant plus aléatoire au-delà que les particules sont grossières.

Dans ces conditions, le modèle a été ajusté sur les données de la troisième période. Globalement, l'accord modèle/mesure est satisfaisant pour les classes granulométriques inférieures à 60 μm ($R^2 > 0.7$, Figure 3). Ces classes correspondent aux particules cohésives qui sont essentiellement transportées en suspension et qui sont les principaux supports des fractions particulaires des contaminants. L'accord se dégrade pour les classes plus grossières, en particulier au-dessus de 180 μm . A ce stade, il est difficile d'attribuer ces écarts aux performances du modèle et/ou aux artefacts des mesures mais on notera que ces classes présentent des modes de transport plus complexes que les précédentes et que leur rôle sur le transfert des fractions particulaires des contaminants est négligeable.

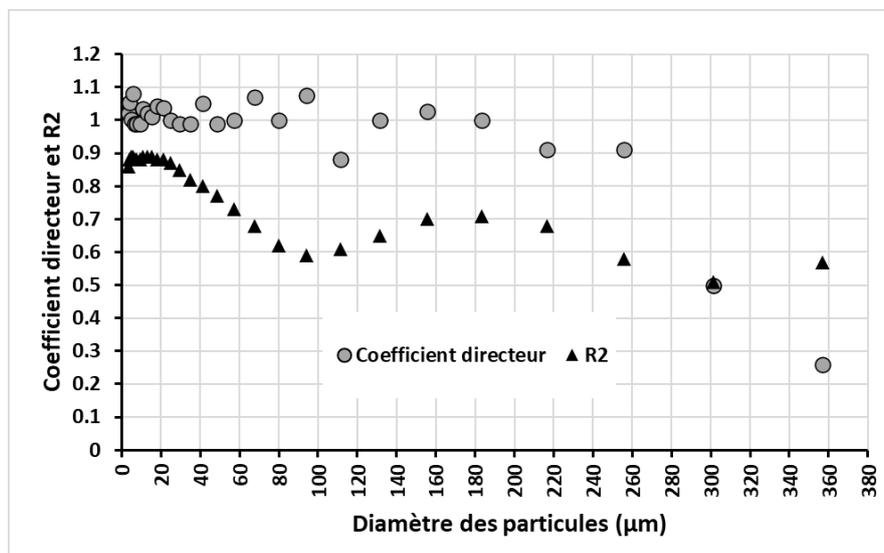


Figure 3 Coefficients directeurs et de corrélation de la comparaison modèle/mesures en fonction de la taille des particules

Ce travail doit être renforcé et conforté par des données plus robustes de distributions granulométriques. Néanmoins, les meilleures performances du modèle s'obtiennent pour les particules fines de diamètre inférieur à 60 μm qui sont les plus pertinentes vis-à-vis de la démarche de couplage à un modèle de transfert des contaminants.

De façon plus générale, le modèle complète de façon réaliste l'absence de mesures entre le 70^{ème} et le 140^{ème} jour qui correspondent à la période estivale caractérisée par des débits bas et de faibles charges en suspension.

1.3 Couplage hydro-sédimentaire et transfert des contaminants

Le modèle de transfert des contaminants du code CASTEAURx est adapté aux radionucléides. Pour cela, il implique les processus de dispersion, de fractionnement liquide/solide, de décroissances et de filiations radioactives. Son couplage au module hydro-sédimentaire consiste à paramétrer les processus de dispersion et de fractionnement liquide/solide à partir des variables de sortie des modules hydraulique (vitesses, coefficient de dispersion) et sédimentaire (charge en suspension et propriétés des différentes classes de particules).

Dans les grandes lignes, le fractionnement liquide/solide des contaminants métalliques est modélisé en fonction de la taille et de la concentration des différentes classes de particules et des apports par lessivage du bassin-versant et par rejets directs dans les rivières.

Pour chaque contaminant le modèle distingue les fractions qui peuvent s'échanger avec la couche superficielle réactive des particules et les fractions réfractaires intégrées à la partie interne non-réactive (Tomczak et al., 2021), de sorte que la contribution réactive est d'autant plus prépondérante que les particules sont fines et inversement pour la contribution non-réactive (Figure 4).

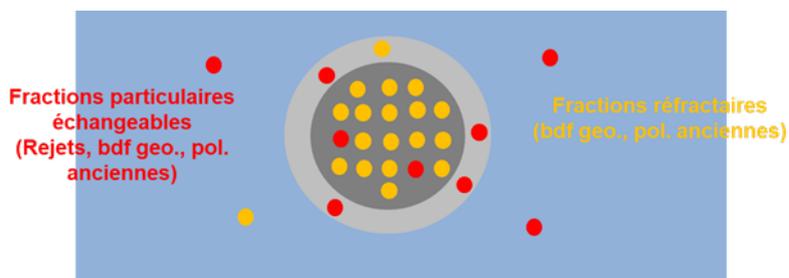


Figure 4 Schéma conceptuel du modèle d'interaction métaux/particules avec une représentation sphérique des particules

1.4 Application au fractionnement liquide/solide du ¹³⁷Cs à SORA

Pour tester et évaluer le couplage hydro-sédimentaire/contaminants, les activités massiques particulières du ¹³⁷Cs dans les matières en suspension sont modélisées sur le Rhône depuis le Centre d'Etudes Nucléaires de Marcoule jusqu'à la station SORA pour la période comprise entre 2010 et 2019. Les données d'entrée sont les débits journaliers du Rhône à la station de Beaucaire, les rejets liquides mensuels du centre de Marcoule et les apports par lessivage moyennés à l'échelle du bassin versant du Rhône. Pour ces simulations, les activités particulières n'ont pas été calculées sur chaque classe de particule mais en fonction du D50,

le diamètre médian des distributions granulométriques modélisées. Les calculs ont été réalisés avec un pas de temps de 15 minutes puis moyennés sur trente jours pour être comparables aux chroniques de mesures qui sont représentatives des moyennes mensuelles.

La figure suivante présente la confrontation des chroniques modélisées et mesurées à la station SORA sur la période d'étude.

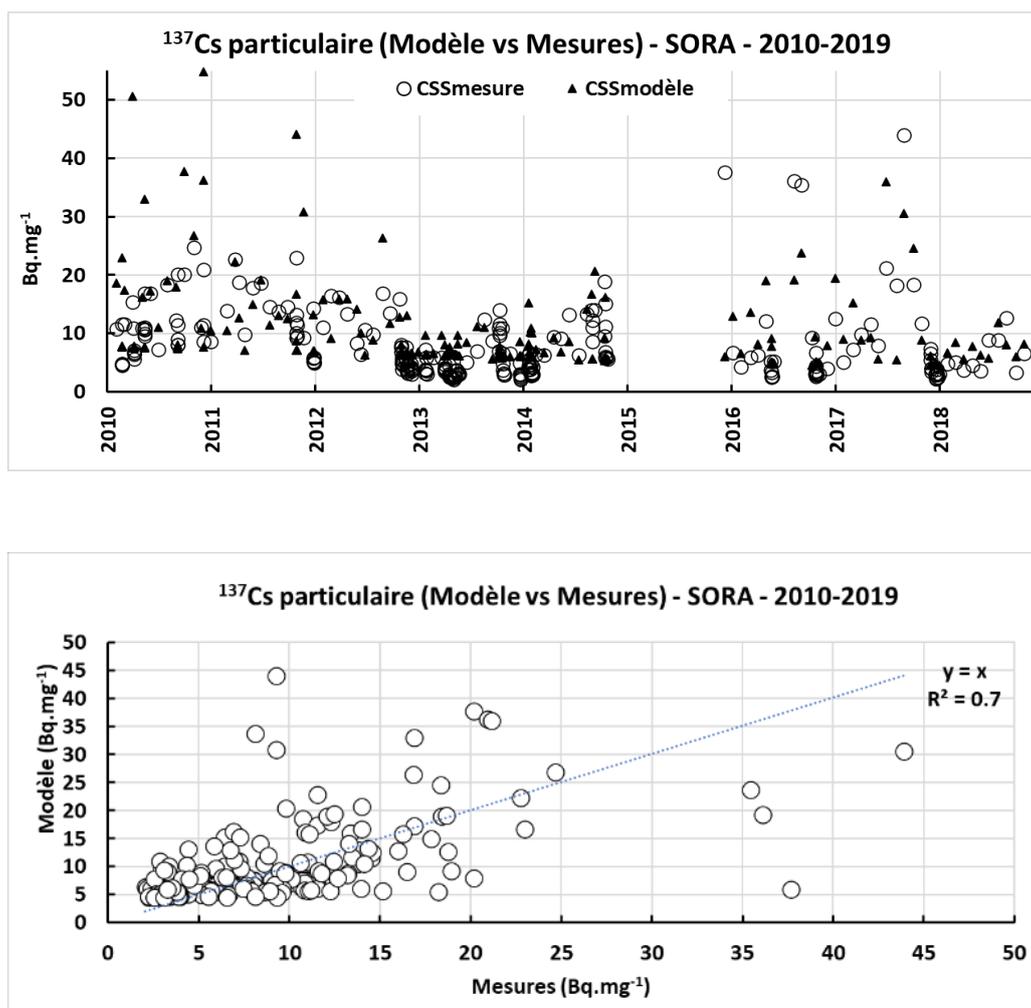


Figure 5 Comparaison modèle/mesure du ^{137}Cs particulaire à SORA entre 2010 et 2019

Les concentrations modélisées ont tendance à être supérieures aux mesures avant 2012 et après 2016 et l'erreur moyenne sur l'ensemble de la chronique est de 80%. Le R^2 est de 0.7 et il s'accompagne d'une erreur moyenne inférieure à un facteur 2, ce qui est plutôt raisonnable au regard des incertitudes des modèles de fractionnement liquide/solide qui peuvent couvrir plusieurs ordres de grandeur.

Parmi les pistes d'amélioration, les deux principales sont la prise en compte :

- De la réactivité du ^{137}Cs pour chaque classe de particules et non pas en fonction du d_{50} comme c'est le cas ici.
- Du lessivage du bassin versant en fonction des contributions des principaux affluents du Rhône et non pas à l'échelle globale du bassin.

1.5 Conclusions

Les actions réalisées aux cours de cette deuxième année sur la thématique du couplage de l'hydro-sédimentaire et des transferts de contaminants ont d'abord consisté à tester et calibrer un modèle hydro-sédimentaire à plusieurs classes de particules sur le Rhône à l'aval de Vallabrègues. Les résultats ont montré un bon comportement du modèle vis-à-vis des particules fines cohésives de diamètres inférieurs à $60\ \mu\text{m}$ qui sont les particules les plus pertinentes au regard des transferts de contaminants. Pour les autres particules, les performances du modèle se dégradent d'autant plus que les diamètres augmentent sans qu'il soit possible d'attribuer les écarts à la modélisation et/ou à des artefacts de mesure. Il en résulte que des confrontations à d'autres jeux de données granulométriques sont souhaitables pour conforter ces résultats.

La seconde action s'est attachée au couplage du modèle de transfert des contaminants (cf. année 1) à ce modèle hydro-sédimentaire. Cet ensemble a été testé à partir des activités massiques en ^{137}Cs mesurées sur les matières en suspension prélevées au niveau de la station SORA entre 2010 et 2019 et en fonction des d_{50} modélisés (diamètre médian), des apports de ^{137}Cs par lessivage à l'échelle globale du bassin versant du Rhône et par les rejets mensuels du centre de Marcoule. Les résultats montrent que le modèle approche les activités massiques particulières avec une erreur moyenne inférieure à un facteur 2 et que les deux principales pistes d'amélioration sont la prise en compte du lessivage en fonction des contributions des principaux affluents du Rhône et de la réactivité des contaminants spécifiquement à chaque classe de particule. Ce dernier point est en cours de traitement.

A ce stade, ces travaux proposent une base de modélisation opérationnelle pour jouer les scénarios tests qui seront définis par l'action D4 (Modélisation de scénarios de propagation de contaminants particuliers) de l'axe D (Prévoir les changements pour anticiper les impacts).

2 Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer avec Mage et Adis-TS

2.1 Contexte

Le modèle hydro-sédimentaire 1D du Rhône a été initié dans le cadre du projet Axelera-PCB (Andriès et al., 2012a ; 2012b) et poursuivi dans le cadre des programmes OSR2, OSR3, OSR4 et OSR5. L'objectif est de parvenir à une modélisation continue du Rhône sur tout son linéaire du lac Léman à la mer Méditerranée en incluant le fonctionnement des 21 ouvrages hydro-électriques.

Dans le cadre de l'OSR 6, l'objectif principal en termes d'application est d'utiliser le modèle pour réaliser une simulation des processus de dépôt érosion dans les retenues du haut-Rhône entre 1990 et 2020, afin de pouvoir comparer les résultats avec les bilans bathymétriques réalisés par la CNR. Cela permettra ainsi de caler et valider les paramètres du modèle.

2.2 Modélisation hydraulique du Bas-Rhône

La modélisation hydraulique avec Mage 1D du secteur entre Lyon Perrache et la mer Méditerranée a été étendue à la période entre 2000 et 2020. Les données d'entrée nécessaires à ce modèle (hydrogrammes au niveau de Perrache et des différents affluents et évolution de la cote au niveau du delta) ont été fournies par la CNR en majorité. Les données manquantes ont été récupérées sur BDOH et la banque hydro.

La simulation a été réalisée en utilisant la version 7 de mage et le temps de simulation pour toute la période a été d'environ 11h.

Les résultats obtenus au niveau du delta (stations de Beaucaire, Arles et Fourques) sont présentés Figure 6 en comparaison avec les mesures. On peut observer que le modèle reproduit bien les débits mesurés.

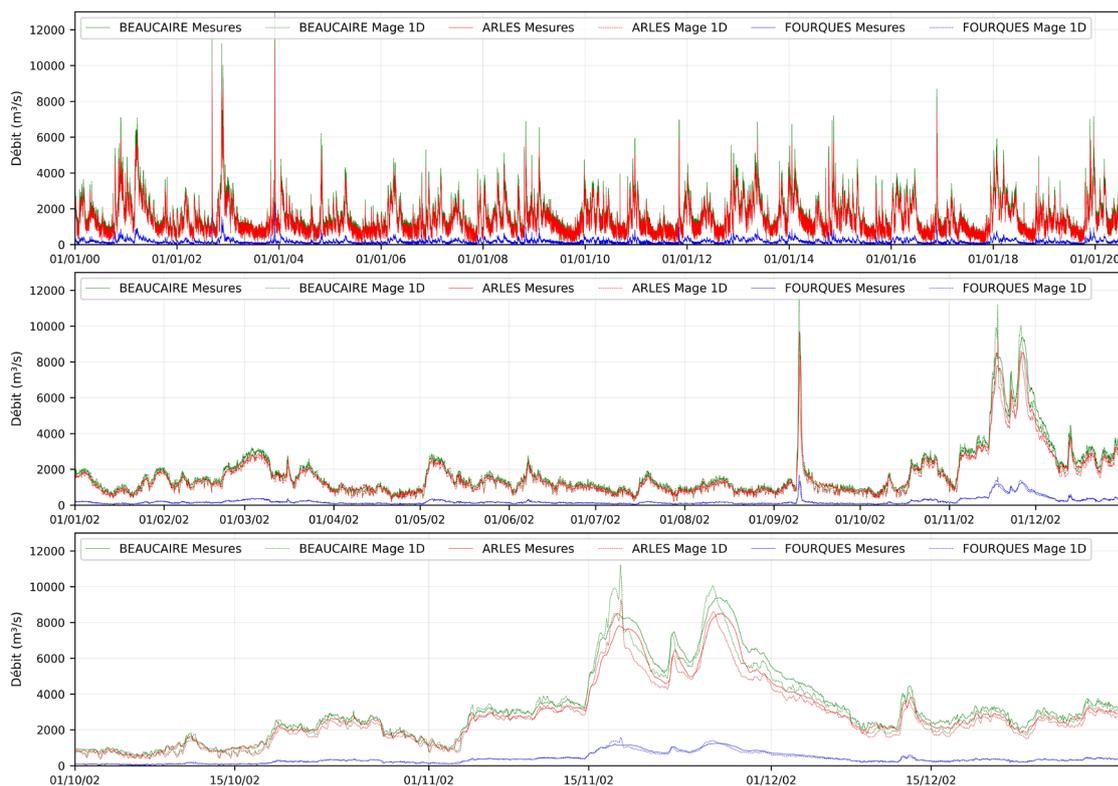


Figure 6. Débits modélisés par Mage 1D et mesurés au niveau des stations de Beaucaire, Arles et Fourques du pluriannuel à événementiel : 2000-2020 (en haut), année 2002 (au milieu), octobre-décembre 2002 (en bas).

Si on trace les moyennes journalières des débits modélisés en fonction des débits mesurés à ces trois stations (Figure 7) on peut apercevoir que les nuages de points sont bien centrés et proches de la droite d'accord parfait pour les débits allant de faibles à forts. Pour les débits de crue, on peut apercevoir une dispersion un peu plus importante.

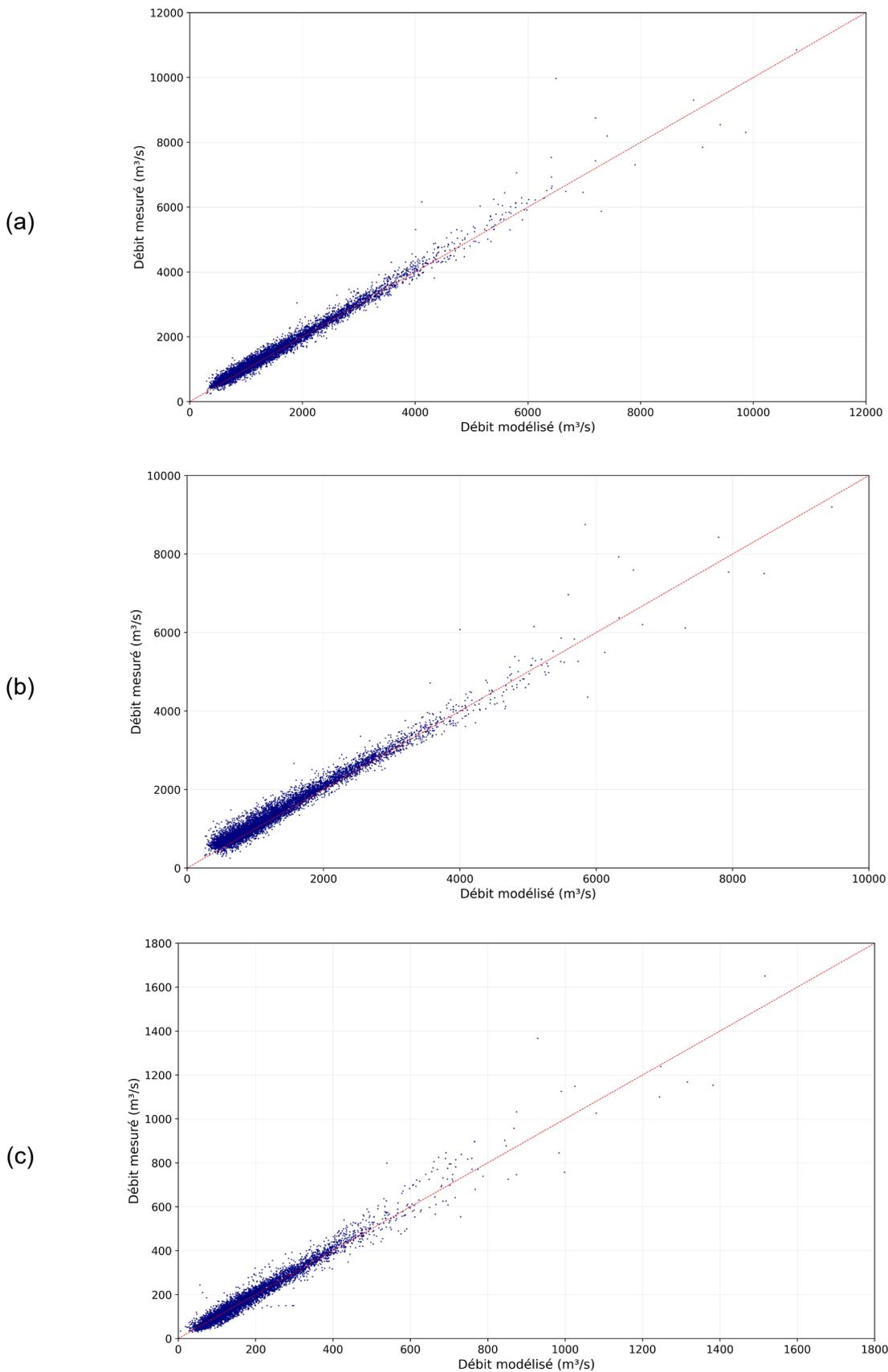


Figure 7. Débit journalier modélisé en fonction du débit journalier mesuré à Beaucaire (a), Arles (b) et Fourques (c), période 2000-2020

2.3 Modélisation hydraulique du Haut-Rhône

Le modèle du haut-Rhône s'étend de la frontière suisse au niveau de la station de Pougny, à Lyon au niveau de Perrache. Il comprend tous les ouvrages au fil de l'eau présents sur le linéaire du Rhône ainsi que l'ouvrage de moyenne chute de Génissiat. La simulation intègre le fonctionnement de ce barrage en période de gestion classique mais aussi lors des événements de crue et d'APAVÉR. La simulation intègre également les différents affluents du haut Rhône.

La simulation a été réalisée sur toute la période entre 2008 et 2020 avec la dernière version de mage, `mage_as7`, qui permet d'entrer les données (conditions aux limites, lois d'ouvrages) sous format date. Initialement, le temps de simulation était de plus de 12h pour une année. On a pu constater que la simulation était particulièrement lente durant les périodes de basses eaux. Les zones ralentissant la simulation (principalement les vieux Rhône et les zones en aval des barrages) ont pu être identifiées et des seuils virtuels ont été ajoutés afin d'améliorer la convergence. Ce travail a permis de passer à environ 3 à 6h de simulation par année.

2.3.1 Barrage de Génissiat

Le barrage de Génissiat est l'unique ouvrage de moyenne chute du Rhône. Dans le modèle, il est représenté par différents orifices ; un orifice représentant le barrage usine, un orifice pour la vanne de fond, un pour la vanne de demi-fond, et 3 orifices pour les évacuateurs de surface.

Ce barrage nécessite un mode de fonctionnement différent des autres ouvrages du Rhône. En effet, d'une part, lorsque l'ouvrage fonctionne en production d'électricité, sa cote présente des variations de hauteur d'une amplitude de 5m maximum (contre 0,5m pour les autres ouvrages du Rhône). D'autre part, lors des épisodes de chasse des barrages suisses, le fonctionnement de Génissiat est modifié avec ouvertures des différentes vannes de l'ouvrage dans le cadre des APAVER. Le barrage de Génissiat fonctionne également de manière couplée avec le barrage de Seyssel afin de réguler les variations importantes de cote dues aux éclusées énergétiques.

Dans le modèle, nous avons dû implémenter deux types de fonctionnement pour les ouvrages de Génissiat et Seyssel. Tout d'abord, un fonctionnement pour les événements d'APAVÉR ; la cote mesurée en fonction du temps est imposée au niveau des deux barrages, ainsi que l'ouverture des vannes de Génissiat en fonction de temps.

Ensuite, pour le fonctionnement hors chasse, la modélisation semble plus compliqué. En effet, la cote de Génissiat est réglée de manière à maximiser la production d'électricité, elle présente ainsi des variations horaires ce qui crée des oscillations de débit importantes. La cote est ainsi programmée chaque jour en fonction du prix de l'électricité et du débit amont.

Afin de mieux comprendre et représenter le fonctionnement hors chasse de Génissiat dans le modèle, une réunion avec les expert de la CNR a été réalisée (01/02/2023). A l'issue de cette réunion plusieurs types de modélisation de Génissiat ont été envisagés.

Tout d'abord une option serait d'essayer de représenter le plus fidèlement possible ces fluctuations, soit par une méthode d'assimilation du débit mesuré à l'aval, soit en implémentant un fonctionnement hebdomadaire type, basé sur la variation moyenne de cote au cours de la

semaine hors période de crue et d'été.

Le deuxième méthode, serait a contrario de ne pas représenter ces variations journalières mais au contraire d'effectuer un lissage temporel sur les entrants pour supprimer le signal d'écluse des barrages suisses. En effet ces variations journalières ont a priori très peu d'impact sur le transport solide. Et cela permettra d'éviter que de fortes oscillations dans les débits se propagent jusqu'à l'aval du modèle. C'est cette méthode qui a donc été retenue en première approximation et qui sera présentée ici.

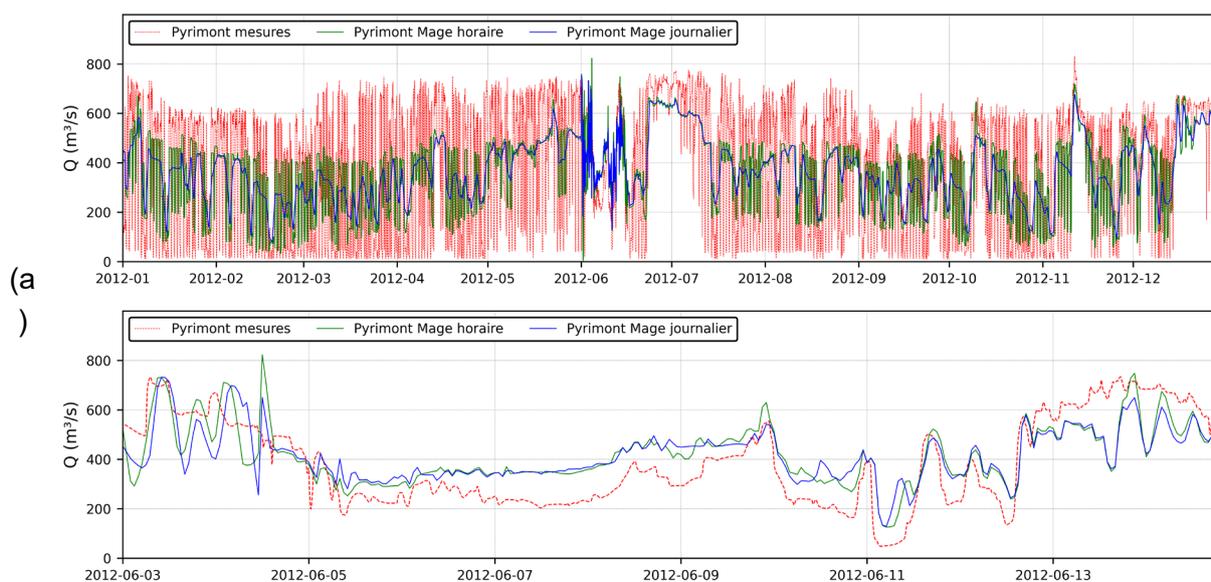
La condition limite amont de débit horaire est donc remplacée par des moyennes journalières glissantes hors période de crue. Pour régler la cote du barrage, comme pour les autres ouvrages au fil de l'eau, on applique des consignes d'ouvrage de type cote constante en fonction du débit amont de l'usine basées sur les consignes d'exploitation.

Afin de tester ce fonctionnement avec moyenne journalière, nous avons réalisé une simulation des années 2012 et 2016 avec débits journaliers et horaires. Les années 2012 et 2016 sont des années d'intérêt étant donné qu'elles présentent des événements d'APAVÉR (Abaissement PARTiel de la retenue suisse de VERbois).

2.3.2 Modélisation de l'année 2012 avec débit horaire et journalier

Le temps de simulation pour cette année était de 3h avec les débits horaires en condition amont (Léman). En utilisant les moyennes journalières, on est passé à 1h de simulation.

Les résultats obtenus aux différentes stations pour l'année 2012 et pour l'événement d'APAVÉR en comparaison avec les mesures sont présentés ci-après (Figure 8). L'ensemble des résultats sur toutes les stations du Haut-Rhône est donné en annexe (Figure 15).



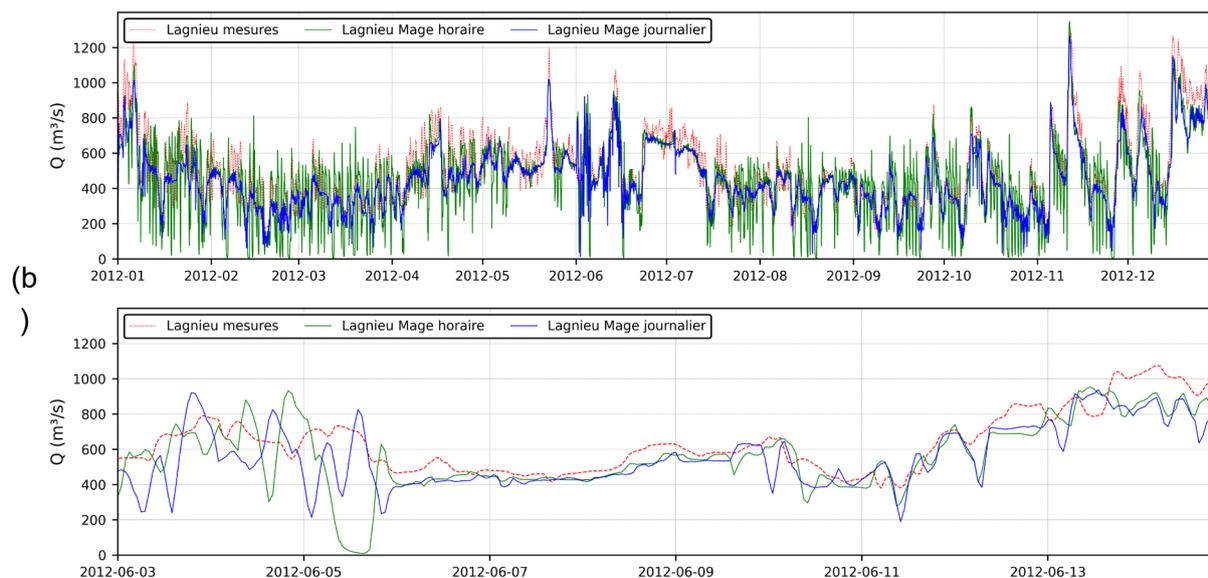


Figure 8. Débits simulés par Mage et mesurés sur l'année 2012 et lors de l'APAVER à Pyrimont (a) et Lagnieu (b).

En observant le débit mesuré en rouge, on constate bien le fonctionnement particulier en couplage des barrages de Génissiat et Seyssel. Figure 8a, le débit mesuré présente de fortes oscillations journalières, tandis qu'aux stations suivantes ces oscillations sont beaucoup moins marquées (Figure 8b, Figure 15). Le barrage de Seyssel a bien rempli son rôle de tampon pour les variations de cote de Génissiat.

L'utilisation d'une moyenne journalière semble donc justifiée et permet une représentation plus juste du débit à l'aval de Seyssel, avec des variations beaucoup moins marquées que sur la simulation avec débit horaire. Comme attendu, pendant l'évènement d'APAVER les résultats avec débits horaires et journaliers sont similaires.

2.3.3 Modélisation de l'année 2016 avec débit horaire et journalier

Une nouvelle fois, l'utilisation de débits moyens journaliers en condition limite amont a permis de fortement réduire le temps de simulation, on est passé de plus de 6h de simulation à 3h30.

Les résultats obtenus aux différentes stations pour l'année 2016 et pour l'évènement de chasse sont présentés ci-après pour les stations de Pyrimont et Lagnieu (Figure 9). L'ensemble des résultats sur toutes les stations du Haut-Rhône est donné en annexe (Figure 16).

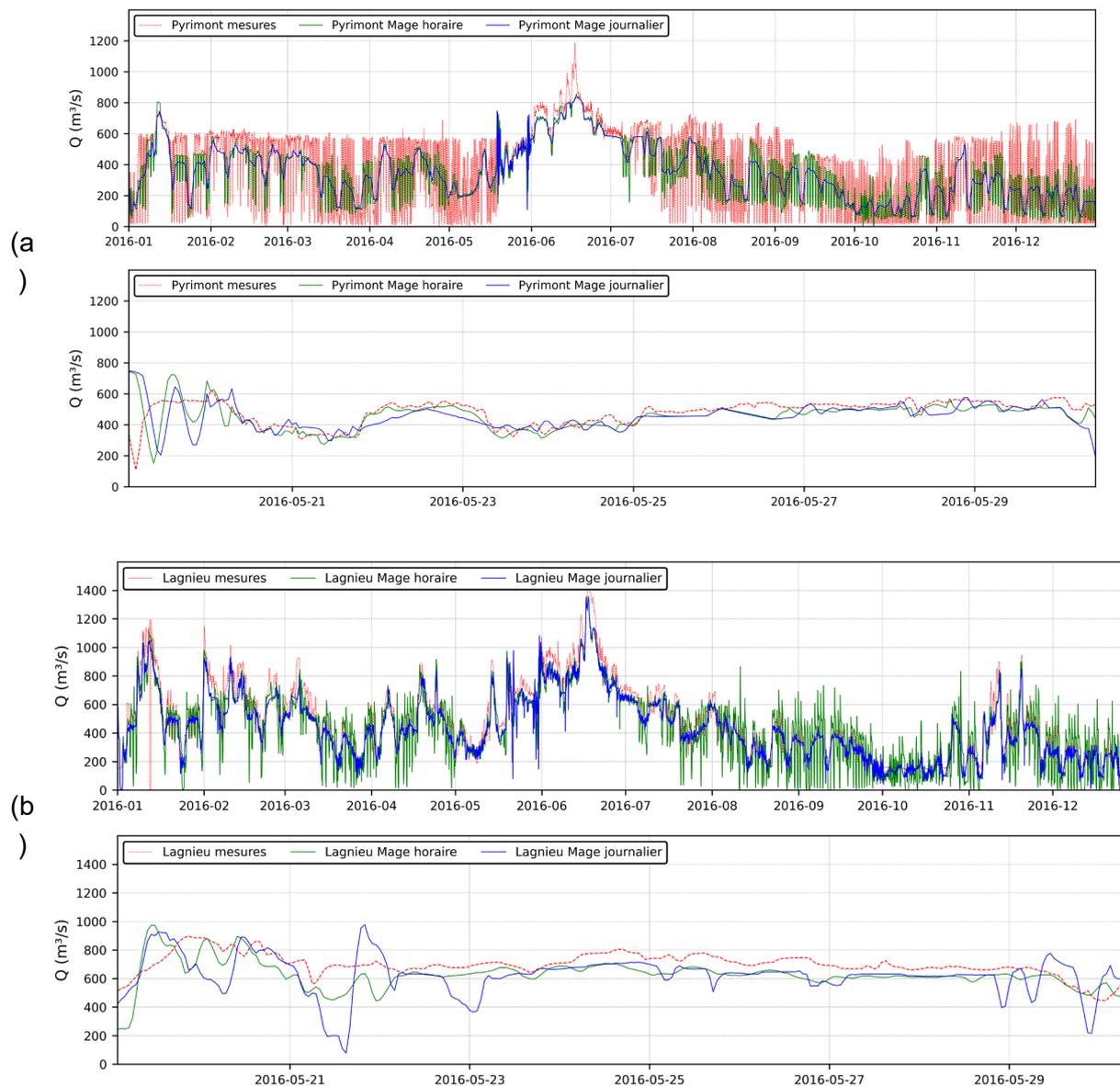


Figure 9. Débits simulés par Mage et mesurés sur l'année 2016 et lors de l'APAVER à Pylimont (a) et Lagnieu (b).

De la même manière que pour 2012, on constate que la simulation avec moyenne journalière reproduit mieux les débits à l'aval de Seyssel avec des oscillations beaucoup moins marquées.

On peut constater que sur les périodes de forts débits, le modèle, que ce soit avec moyenne journalière ou horaire, sous-estime le débit. Cela est particulièrement marqué Figure 9b sur la période entre juin et juillet.

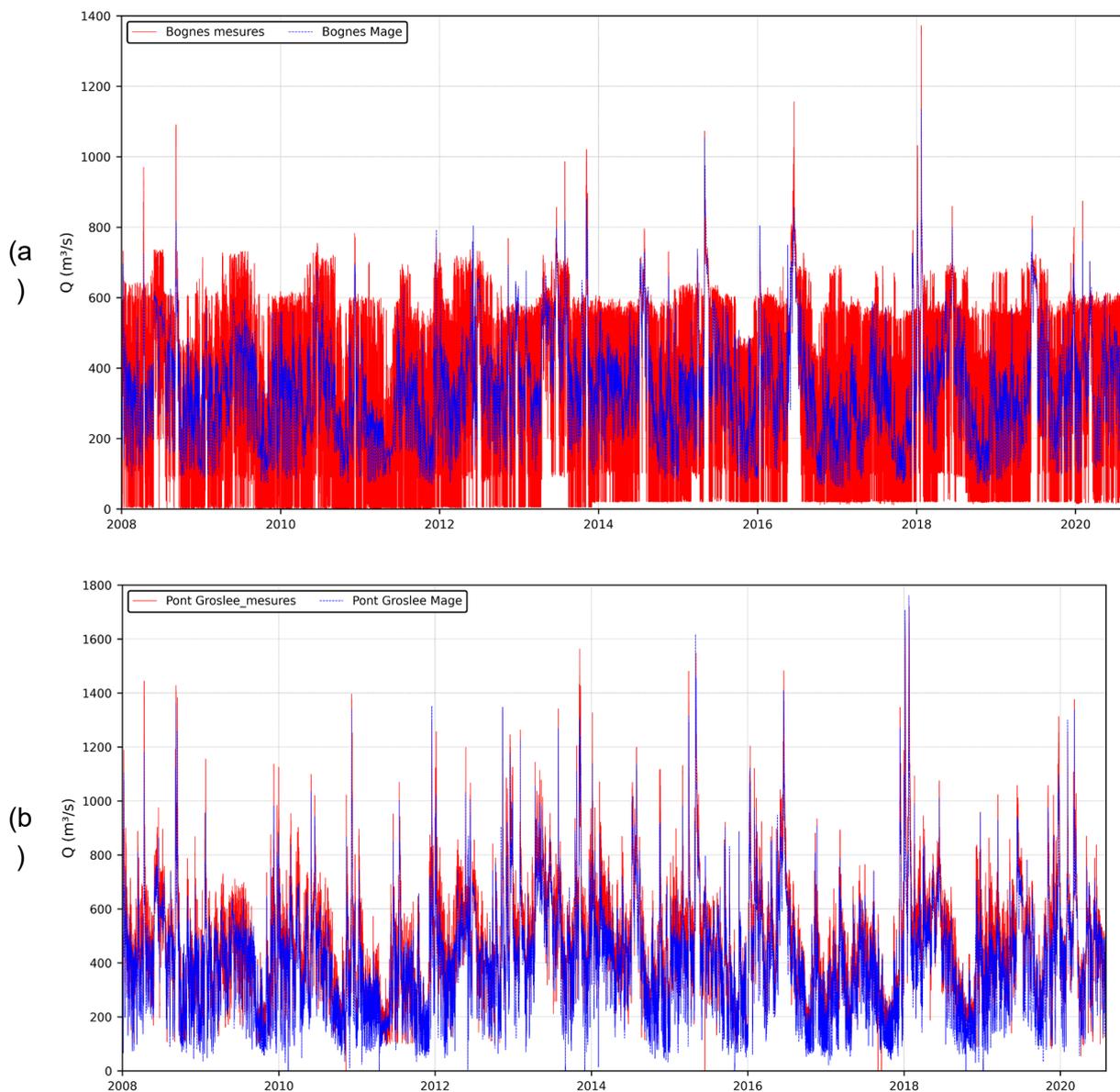
En dehors de ces périodes, le débit est bien modélisé en période d'APAVER ainsi que le reste de l'année.

En conclusion, l'utilisation des moyennes journalières pour les débits entrants semble être une méthode efficace. Cela permet à la fois d'obtenir de meilleurs résultats à l'aval de Seyssel en

limitant les oscillations, mais également de diminuer fortement le temps de calcul (simulations 2 à 3 fois plus rapides).

2.3.4 Modélisation continue de 2008 à 2020

Étant donné les résultats obtenus sur ces deux années, une simulation complète sur la période de 2008 à 2020 a été réalisée en utilisant les moyennes journalières comme conditions limites amonts (Figure 10). Le temps de simulation pour cette période a été de 40h, on est donc sur un temps de calcul plus important que sur le modèle bas-Rhône, cependant nous avons maintenant la possibilité de réaliser les calculs sur un cluster de calcul.



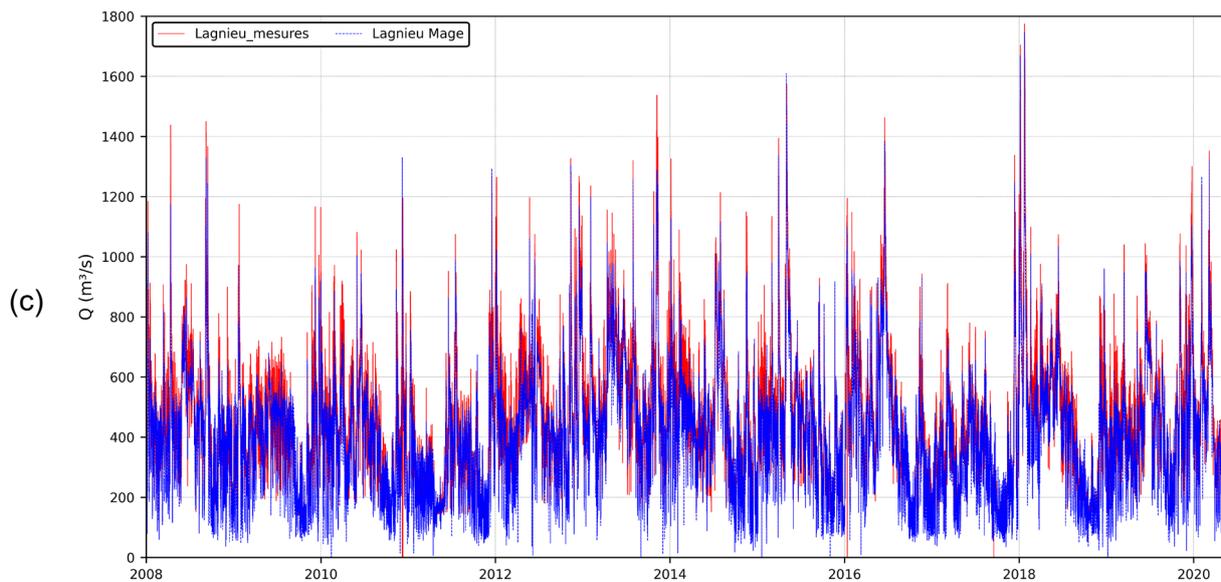
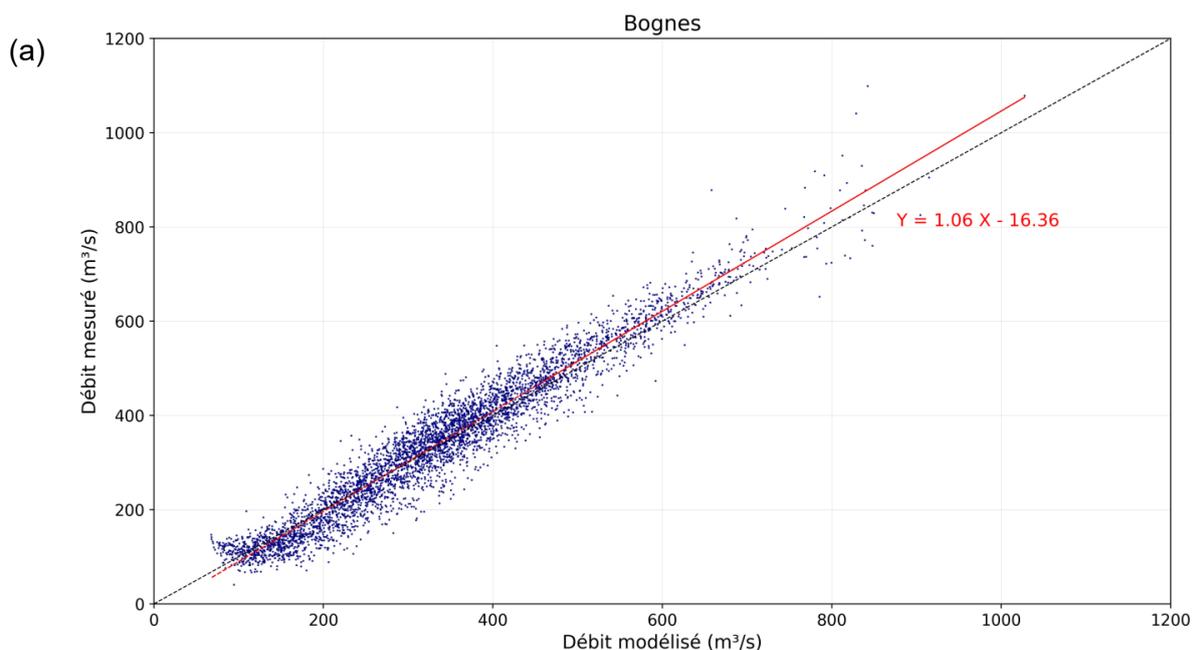


Figure 10. Débits simulés par Mage et mesurés sur la période de 2008 à 2020 à Bognes (a) Pont Grolee (b) et Lagnieu (c).

Comme sur la simulation de 2016, on remarque que les pics de débits semblent être parfois sous-estimés par le modèle en particulier au niveau de Bognes. En dehors de ces périodes de crue, les débits simulés restent proches des mesures pour les stations à l'aval de Seyssel. Au niveau de Bognes, les oscillations de débit ne peuvent évidemment pas être reproduites.

Comme précédemment, les moyennes journalières des débits modélisés en fonction des débits mesurés ont été représentées aux stations de Bognes, Pont Groslee et Lagnieu (Figure 11).



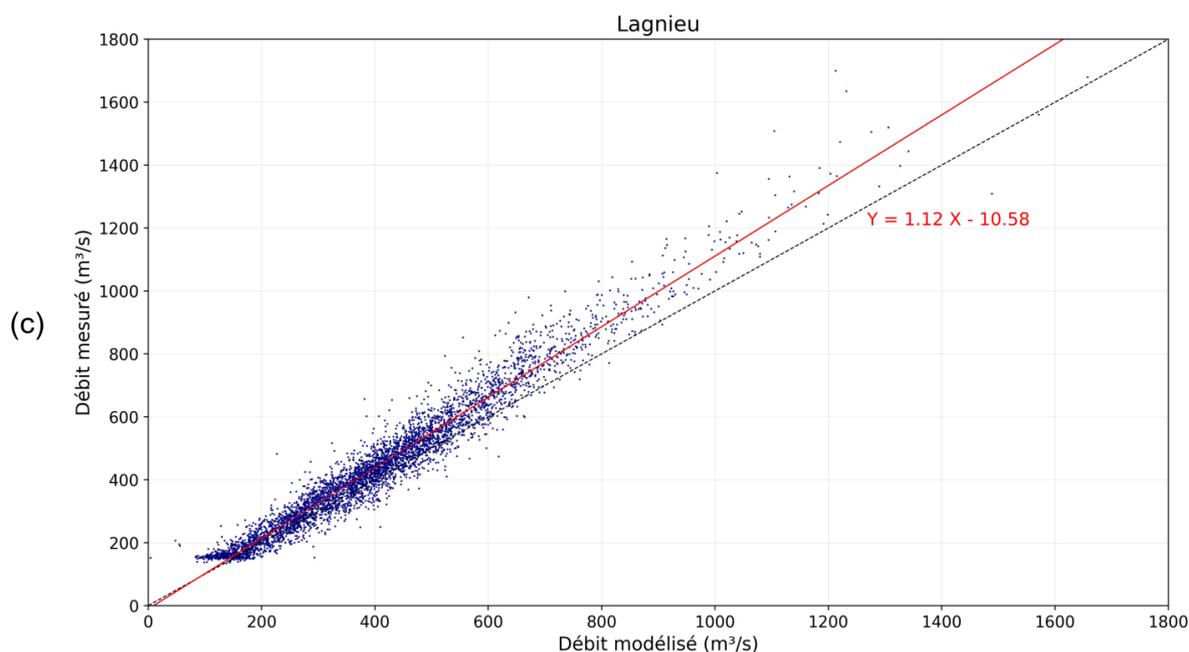
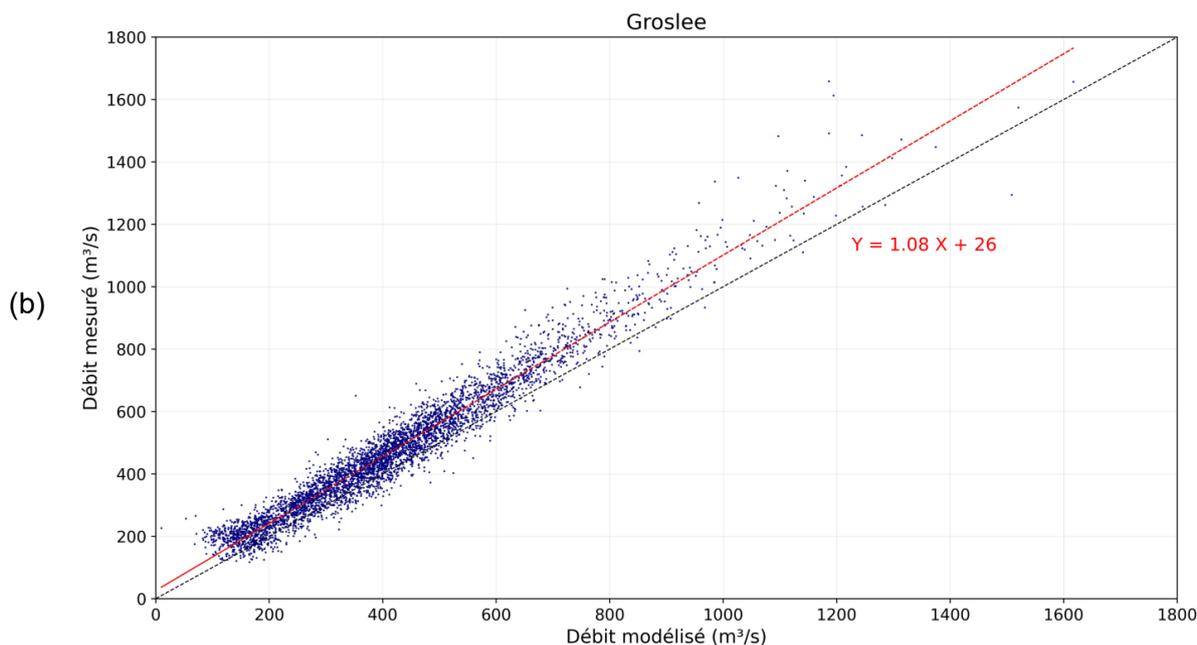


Figure 11. Débit journalier modélisé en fonction du débit journalier mesuré à Bognes (a) Pont Grolee (b) et Lagnieu (c).

On peut constater que au niveau de Bognes, le nuage de point est globalement bien centré autour de la proportionnel. En revanche, pour les stations de pont de Groslée et Lagnieu on constate un décalage du nuage de point, et en particulier une sous-estimation par le modèle des débits allant de moyen à fort.

Cependant le problème ne semble pas venir de la modélisation, en effet, si regarde les

résultats obtenus au niveau des mesures aux différentes stations jusqu'à Lyon, le même décalage est observé.

Figure 12, les débits moyens journaliers mesurés au niveau de la station de Pougny ont été comparés aux débits journaliers des autres stations retranchés des débits des affluents présents dans le modèle.

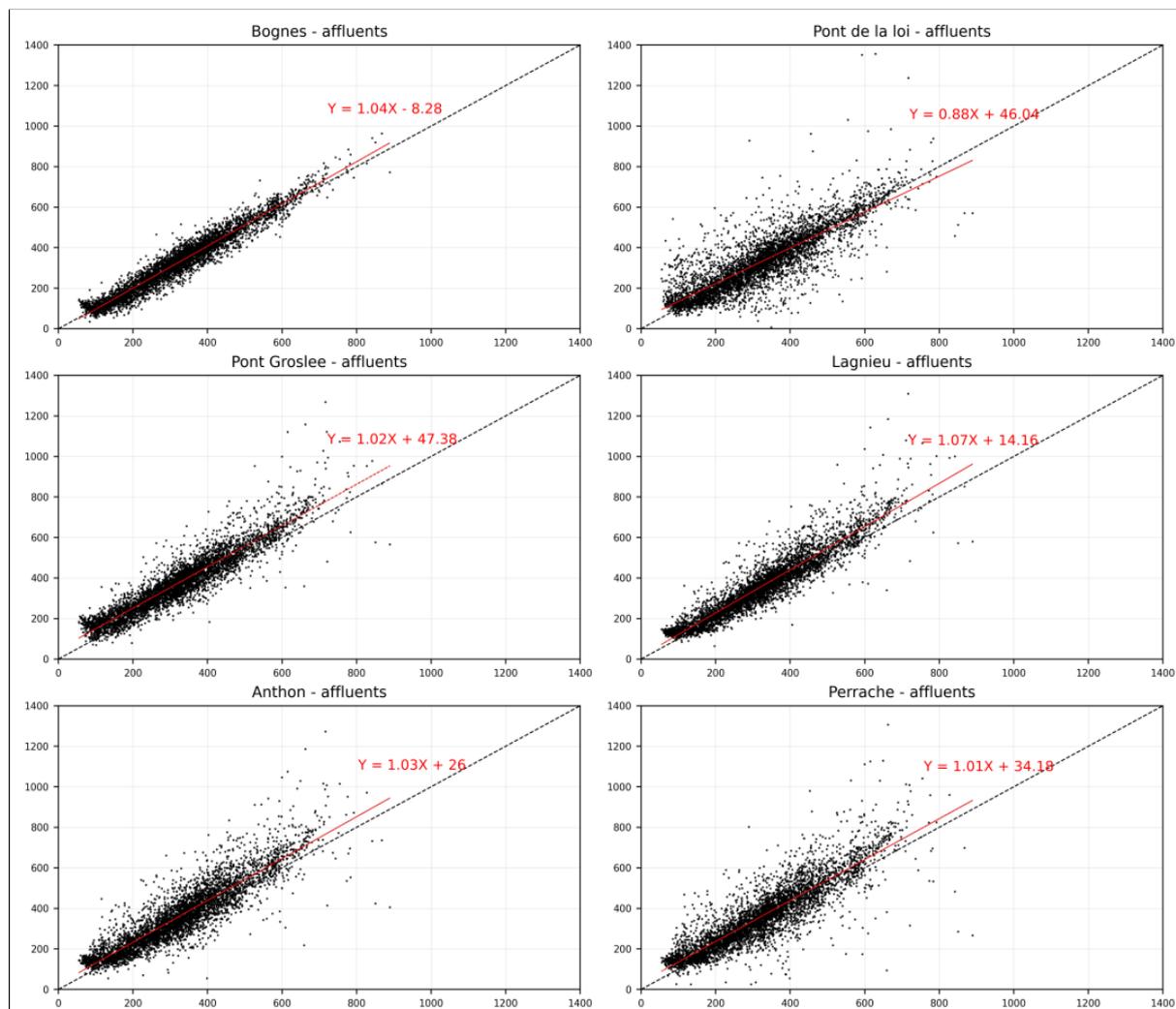


Figure 12. Débit journalier modélisé en fonction du débit journalier mesuré à Lagnieu

Au niveau de Bognes et de pont de la loi, les débits semblent cohérents avec les débits de Pougny, le nuage de points est centré autour de la proportionnelle. Par contre pour les stations suivantes jusqu'à Perrache, on observe un décalage équivalent à celui observé dans la modélisation. Ce décalage peut cependant provenir des incertitudes des courbes de tarage. Il convient juste de tenir compte de cet écart dans l'évaluation du modèle.

3. Module charriage de Mage 8

Dans le cadre de l'OSR 5, la modélisation du transport solide par charriage et de l'évolution des fonds avait été implémentée dans le code de mage 8. Ce nouveau module avait été testé et validé à l'aide de cas tests. De nouveaux tests ont été réalisés sur ce module sur la partie tri granulométrique.

3.1 Dépôt progressif de sédiments grossiers dans un canal rectangulaire

3.1.1 Description du test

Le canal est de section rectangulaire et de 1000 m de long avec une pente de 0,001 m/m. Initialement, le fond est composé d'une couche de sédiments fins de 0,1 m d'épaisseur, la granulométrie de cette couche est la suivante : $D_{50} = 0,001$ m et $\sigma = 1,6$.

On introduit dans ce canal un apport en sédiments solides à l'amont, de granulométrie plus grossière que les sédiments en place ($D_{50} = 0,01$ m et $\sigma = 5$)

Tableau 1. Résumé des paramètres hydrauliques et sédimentaires

Débit liquide Q (m ³ /s)	Débit solide Qs (kg/s)	Distance de chargement Dchar (m)	Niveau d'eau aval h (m)
20	3	200	8,53

3.1.2 Analyse des résultats

L'apport en sédiments grossiers provoque bien un dépôt progressif dans le canal jusqu'à arriver à un état final où le tirant d'eau est réduit et la pente du fond augmentée.

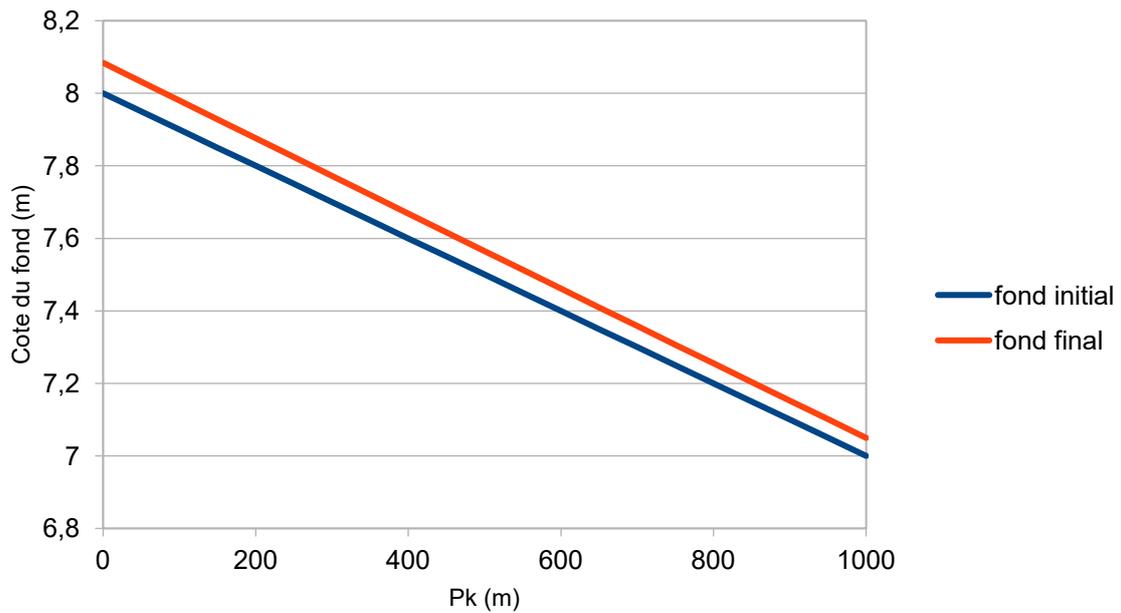


Figure 13. Cote du fond en fonction du Pk à l'instant final et initial.

Au niveau de la répartition granulométrique, conformément aux attentes, on constate que le d_{50} et le sigma ont bien été augmentés suite à l'apport de sédiments grossiers. La répartition granulométrique le long du canal semble cohérente, le d_{50} est plus élevé à l'amont qu'à l'aval ce qui montre que les sédiments grossiers se sont déposés en premier.

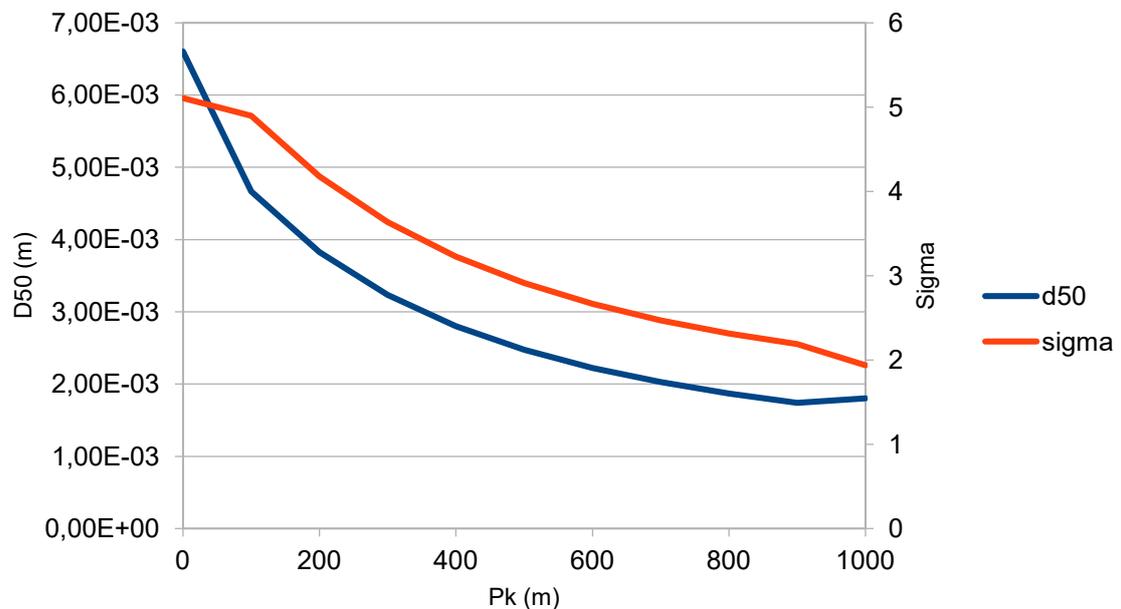


Figure 14. Evolution du D_{50} et de sigma en fonction du PK à l'instant final.

4. Conclusions et perspectives

4.1 Perspectives

En vue d'atteindre les objectifs de modélisation et d'améliorer le modèle du Rhône, les actions à mener sont les suivantes :

- Tester d'autres méthodes de modélisation de Génissiat pour mieux représenter les variations hebdomadaires de cote ; en utilisant le module de programmation périodique des ouvrages, ou par assimilation des données de débits aval.
- Modéliser le transport en suspension avec AdisTS sur les modèles du bas et du haut Rhône sur les périodes 2000-2020 et 2008-2020, respectivement
- Modéliser les processus de dépôt et érosion dans toutes les retenues du haut-Rhône dans le but de valider et caler les paramètres d'Adis-TS par comparaison avec les bilans bathymétriques de la CNR
- Suite aux travaux de Nicolas Noclin dans sa thèse, améliorer et faciliter le calage des paramètres sédimentaires des différentes classes de sédiments dans Adis-TS lorsque l'on souhaite réaliser des carottes sédimentaires virtuelles par des modélisation long terme des dépôts.
- Améliorer et continuer le développement du code du module de charriage de Mage, notamment au niveau de la représentation des couches sédimentaires et des processus granulométriques.
- Tester le module de charriage sur des cas réels d'intérêt sur le Rhône (canal de Jonage)

4.2 Formation et appui aux actions OSR

- Aide à la réalisation de modèles Mage et Adis-ts sur le secteur de PDR dans le cadre de la thèse de Nicolas Noclin (ENTPE/INRAE). L'objectif était d'utiliser Mage et Adis-TS afin de modéliser le dépôt de sédiments dans les lônes de ce secteur de 1965 à 2018, afin de pouvoir créer des carottes sédimentaires virtuelles. Au cours de cette année, plusieurs calages des paramètres d'Adis-ts ont été réalisés afin d'obtenir des carottes sédimentaires virtuelles proches des carottes réelles.
- Simulation et extractions de données de vitesses, débits et hauteurs d'eau sur le territoire de la métropole de Lyon pour les travaux de thèse de Célia Maghakian (EVS/SDMIS)
- Formations aux logiciels Pamhyr/Mage, AdisTS et aide ponctuelle concernant leur utilisation à différents utilisateurs : Sylvain Coulibaly, contractuel INRAE ; Purnima Das, stagiaire INRAE 2022 ; Floriane Masquelier, stagiaire INRAE 2022 ; Nathan Pellerin, stagiaire INRAE 2022 ; Aurore REFLOCH, ingénieure Ginger Burgeap.

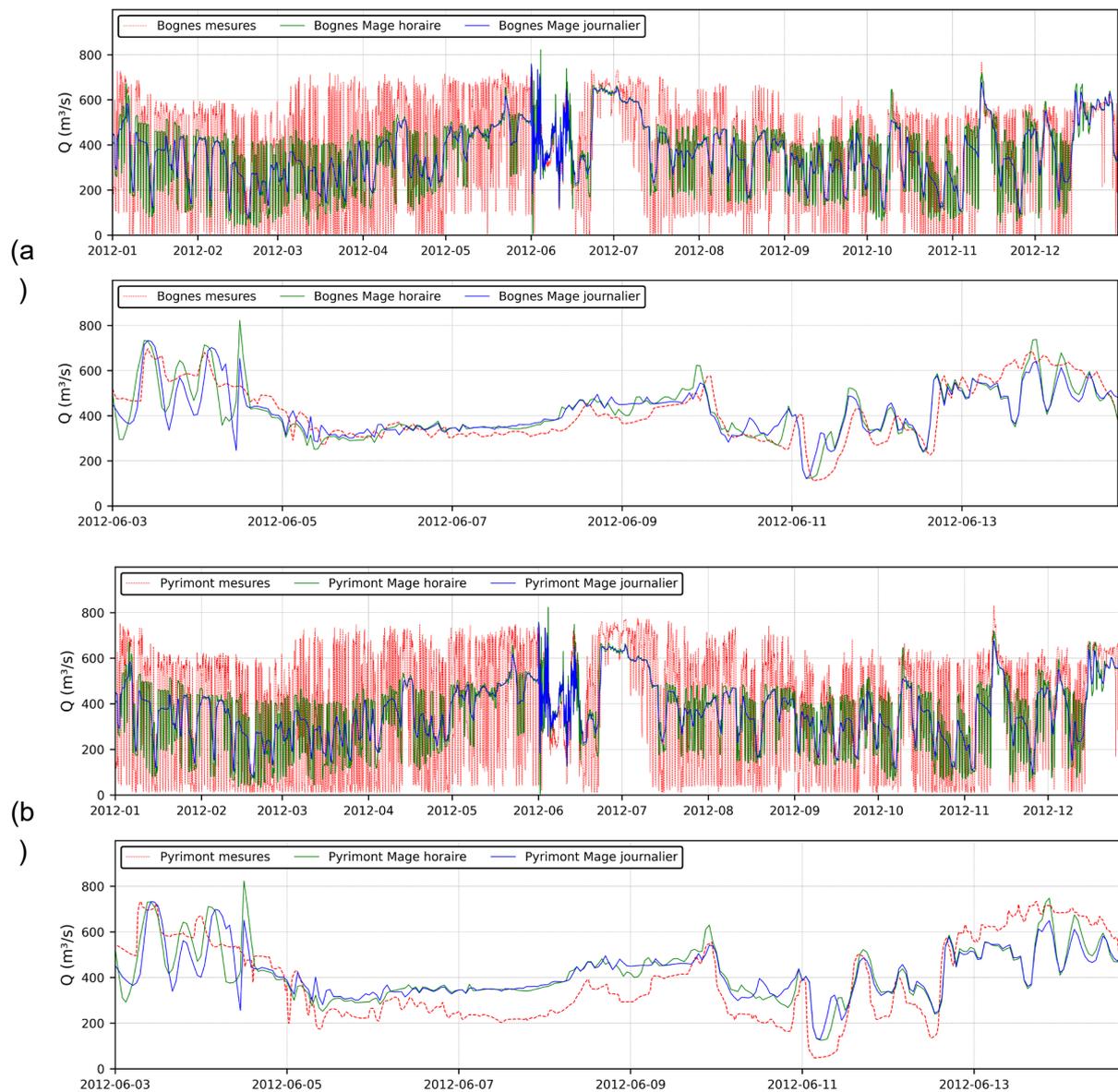
5. Bibliographie

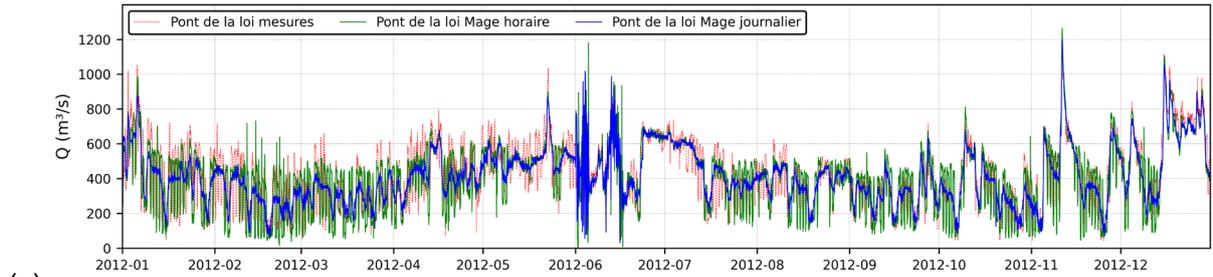
- Adell, W. (2013). Caractérisation de la distribution granulométrique des particules en transit dans le Rhône aval au cours du temps et des conditions hydrologiques. Rapport stage Master Sciences de l'Eau et de l'Environnement - Hydrosystèmes et Bassins Versants : diagnostic et risque environnemental. 51 pp.
- Andriès E., Camenen B., Faure J.-B., Launay M., and Le Coz J. (2012). Modélisation hydro-sédimentaire du site de Miribel-Jonage à l'aide des modèles numériques Mage et AdisTS, Rapport scientifique, Irstea Lyon-Villeurbanne.
- Andriès E., Camenen B., Faure J.-B., Le Coz J., and Launay M. (2012). Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et AdisTS, Rapport scientifique, Irstea Lyon-Villeurbanne.
- Bégorre C. (2021). *Origine des matières en suspension et des sédiments déposés dans le bassin versant du Rhône : historique des apports et réactivité des traceurs*. Thèse de Doctorat, Chimie environnementale, Université de Lyon – INRAE. <https://theses.hal.science/OSR/tel-03322601v1>
- Bravard J.-P., Clémens A. (ed.) (2008). *Le Rhône en 100 Questions*. ZABR, GRAIE.
- Dendievel, A. M., Mourier, B., Coynel, A., Evrard, O., Labadie, P., Ayrault, S., et al. (2020). Spatio-temporal assessment of the polychlorinated biphenyl (PCB) sediment contamination in four major French river corridors (1945–2018). *Earth System Science Data*, 12(2), 1153-1170. <https://hal.archives-ouvertes.fr/cea-02615076v1>
- Ghaffarian H., Piégay H. Seignemartin G., Arnaud F., Le Coz J. (2021). *Analyse rétrospective de l'évolution contemporaine des niveaux d'eau dans les secteurs de Péage-de-Roussillon (PDR) et Donzère-Mondragon (DZM)*. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5^{ème} Programme d'Actions. <https://hal.science/OSR/hal-03293545>
- Guertault L. (2015). Evaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France. <https://hal.science/OSR/tel-01273431v1>
- Kieffer, L., Serlet, A., Tal, M., Boyer, P. (2022). Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer. Rapport intermédiaire. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. <https://hal.science/OSR/hal-03750733v1>
- Lepage, H., Launay, M., Eyrolle Boyer, F., Le Coz, J., Coquery, M., (2018). *Consequences of a dam flushing operation on concentration and fluxes of suspended sediment and associated contaminants in the Rhône River*. IS Rivers, Lyon, France <https://hal.science/OSR/hal-02608486v1>
- Provansal, M. Sabatier, F. (2008). Pourquoi la côte de Camargue recule-t-elle ? In Bravard J.-P., Clémens A. (ed.), *Le Rhône en 100 Questions*. (pp. 50-51). ZABR, GRAIE.
- Tomczak, W., Boyer, P., Eyrolle, F., Radakovitch, O., Krimissa, M., Lepage, H., Amielh, M., Anselmet, F. (2021). Modelling of solid / liquid fractionation of trace metals for suspended

sediments according to the hydro-sedimentary conditions of rivers - Application to ^{137}Cs in the Rhone River (France). Environmental Modelling and Software, 145, 13p.

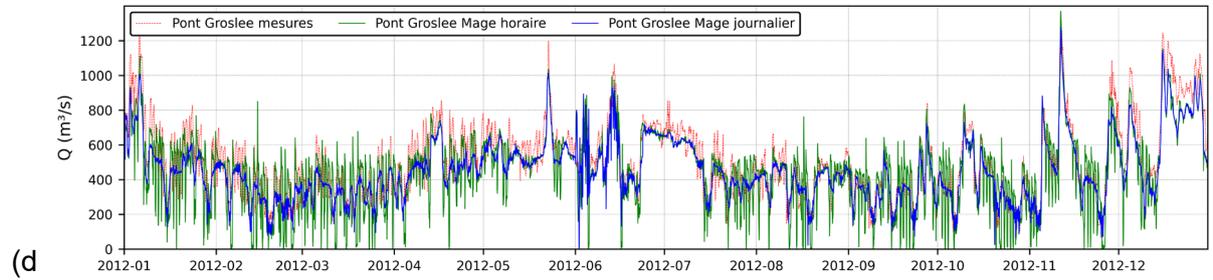
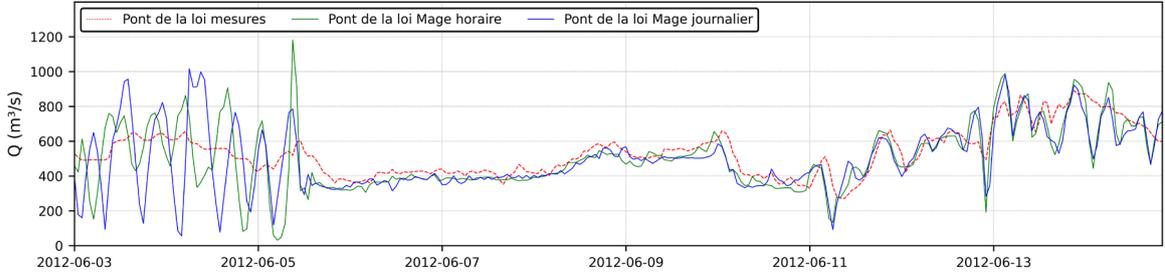
Annexes

Annexe 1 – Résultats des simulations sur Mage de l'année 2012 et lors de l'APAVER 2012

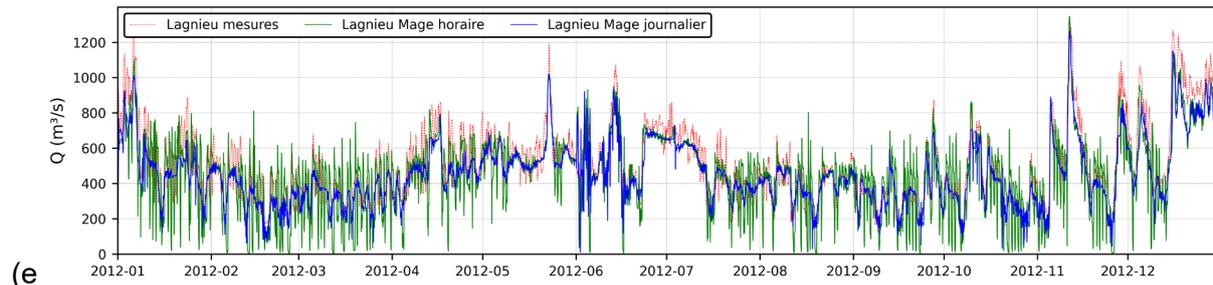
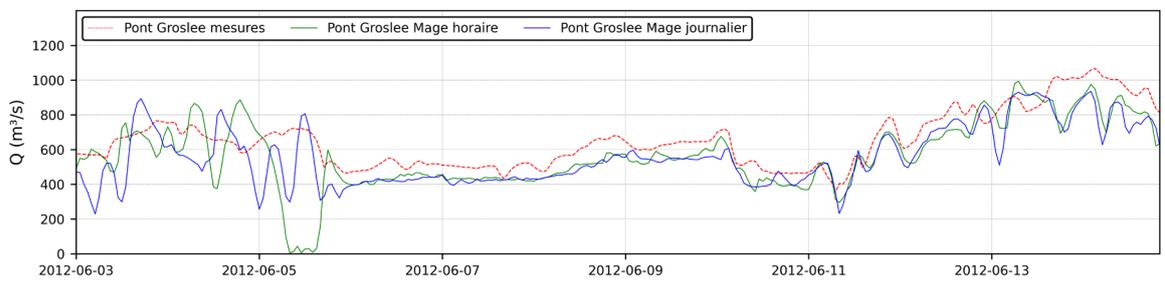




(c)



(d)



(e)

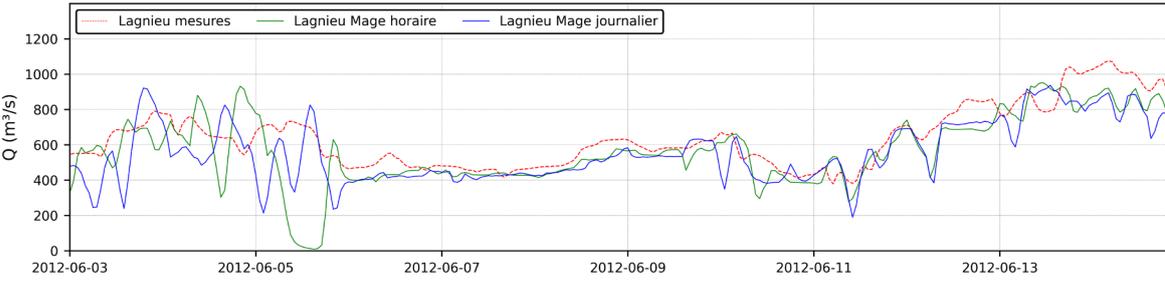
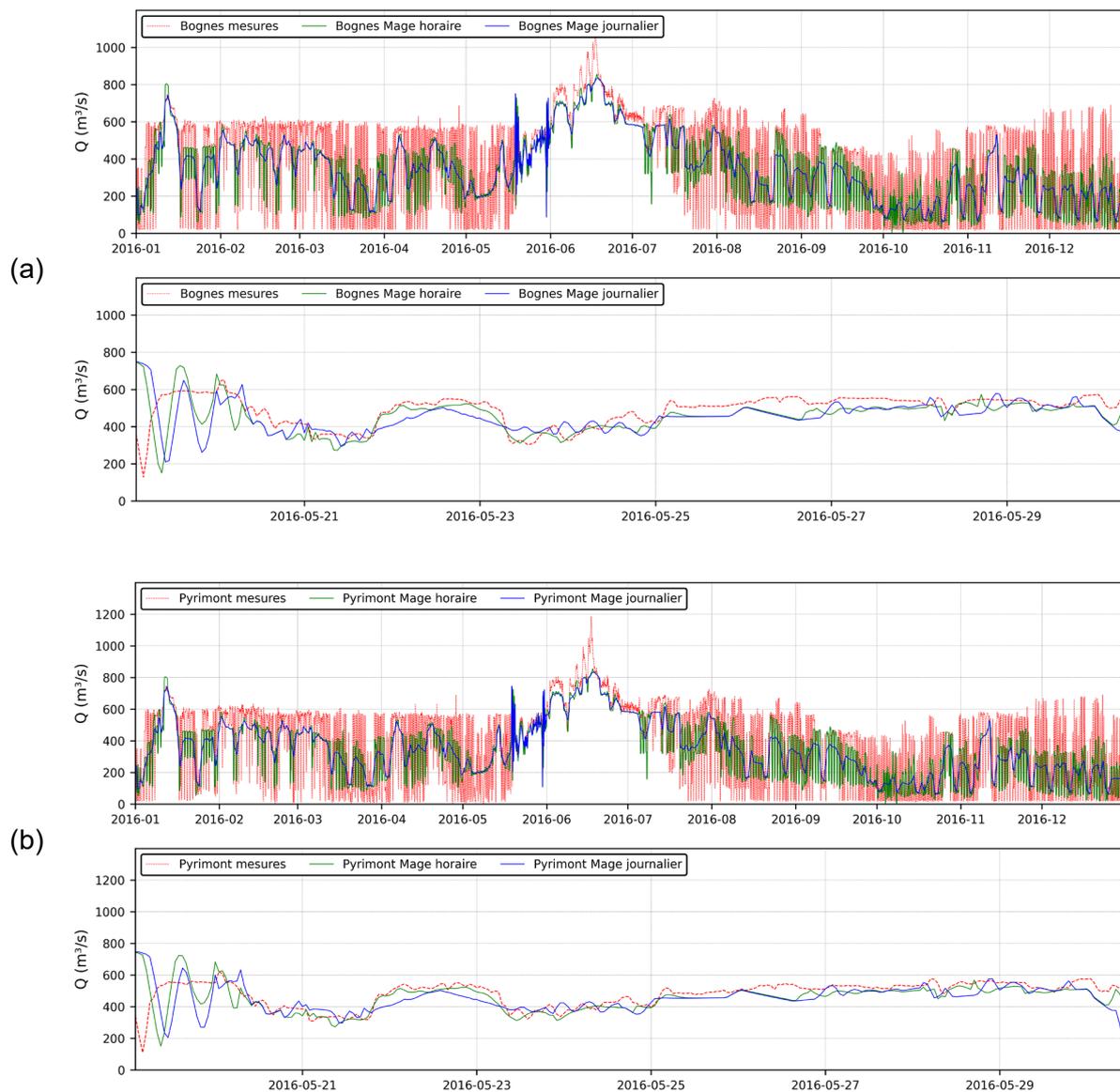


Figure 15. Débits simulés par Mage et mesurés sur l'année 2012 et lors de l'APAVER à Bognes (a), Pyrimont (b), Pont de la Loi (c), Pont Grolee (d), et Lagnieu (e)

Annexe 2 – Résultats des simulations sur Mage de l'année 2016 et lors de l'APAVER 2016



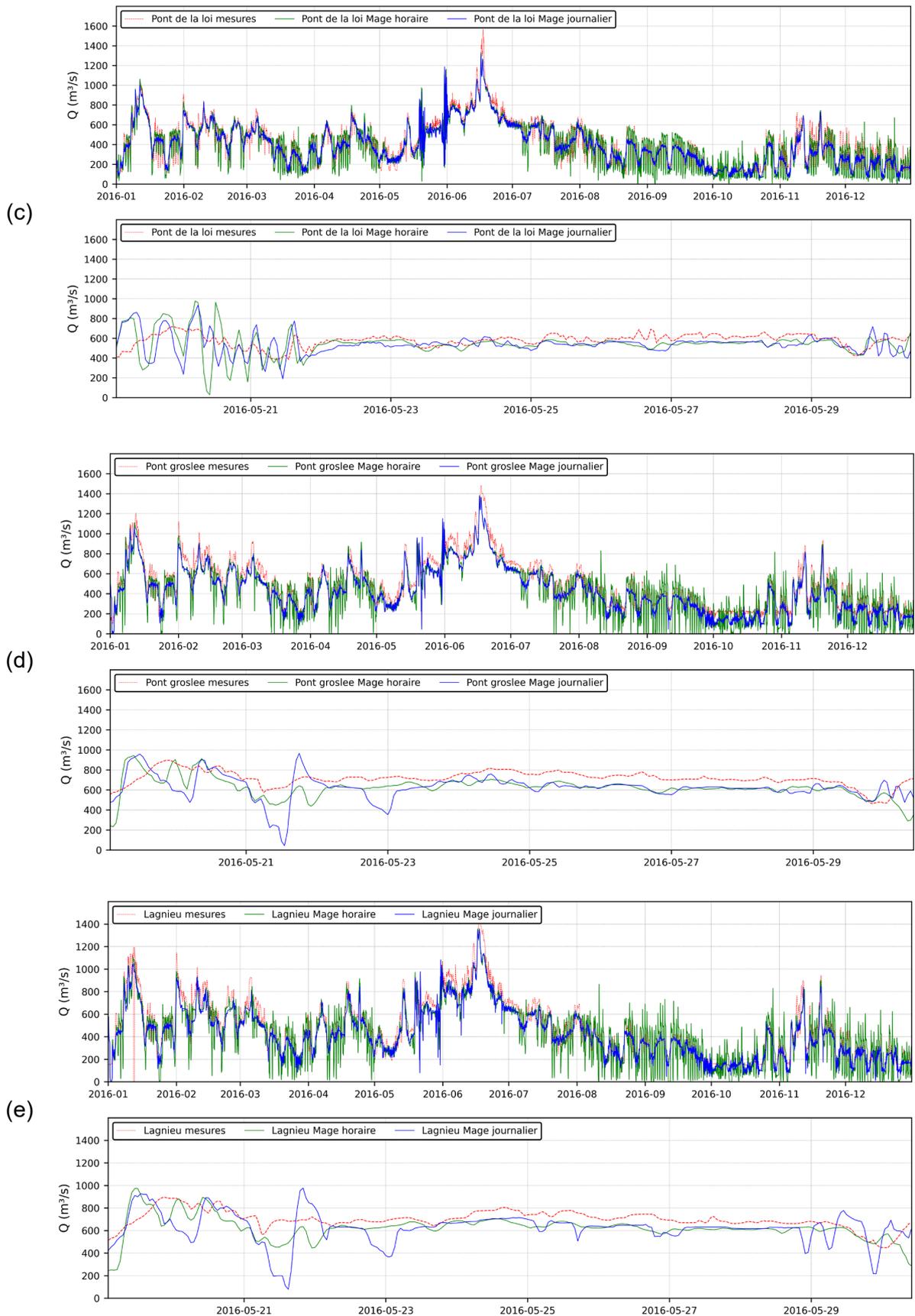


Figure 16. Débits simulés par Mage et mesurés sur l'année 2016 et lors de l'APaver à Bognes (a), Pyrimont (b), Pont de la Loi (c), Pont Grolee (d), et Lagnieu (e)



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers



Cofinancé par
l'Union européenne