



**HAL**  
open science

## Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer. OSR6 | Axe E - Action E2 | Rapport scientifique intermédiaire

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

### ► To cite this version:

Patrick Boyer, Michal Tal, Jérôme Le Coz, Léa Kieffer, B. Camenen, et al.. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer. OSR6 | Axe E - Action E2 | Rapport scientifique intermédiaire. [Rapport de recherche] IRSN; Aix-Marseille Université; INRAE. 2022. hal-03750733v1

**HAL Id: hal-03750733**

**<https://hal.science/hal-03750733v1>**

Submitted on 12 Aug 2022 (v1), 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 du Rhône du Léman à la mer

Rapport scientifique intermédiaire

Version du 22/06/2022

---

**Observatoire des Sédiments du Rhône – 6<sup>ème</sup> programme d'action**

---

**Axe E – Coordonner et transférer**

---

**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, UR RiverLy) ; Benoît Camenen (INRAE, UR RiverLy) ; Théophile Terraz (INRAE, UR RiverLy) ; Léa Kieffer (INRAE, UR RiverLy)

## Pour citer ce rapport

Kieffer, L., Serlet, A., Tal, M., Boyer, P. (2022). *Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer*. Rapport scientifique intermédiaire. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6<sup>ème</sup> programme d'action, 48 p.

L'OSR est un dispositif animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter Bertrand Morandi ([bertrand.morandi@graie.org](mailto:bertrand.morandi@graie.org))



---

## Résumé

Ce rapport regroupe les actions menées au cours de cette première année de l'OSR 6 dans le but de développer une modélisation hydro-sédimentaire du secteur de Donzère-Mondragon, de développer un modèle de transfert des polluants, et d'améliorer le modèle 1D OSR du Rhône du Léman à la mer et son code de calcul. Sont également présentées ici les applications de ce modèle aux différents sites, périodes et paramètres (eau, MES et contaminants) dans le but de produire des données utiles aux différentes actions du programme.

---

## Mots-clés

Modélisation hydrosédimentaire ; morphodynamique ; évolution du lit ; charriage ; réinjections ; Rhône ; Observatoire ; Sédiments

---

# Table des matières

<b>1. Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon.....</b>	<b>5</b>
1.1. Contexte.....	5
1.2. Site d'étude.....	6
1.3. Méthodologie.....	6
1.3.1. <i>Données disponibles</i> .....	8
1.4. Résultats : le présent.....	11
1.4.1. <i>Taux de transport actuels par fraction granulométrique</i> .....	11
1.4.2. <i>Réinjection de sédiments</i> .....	14
1.5. Discussion.....	18
1.5.1. <i>Dynamique actuelle</i> .....	18
1.6. Perspectives.....	19
<b>2. Modèle de transfert des polluants.....</b>	<b>19</b>
2.1. Contaminants d'intérêt pour l'IRSN.....	20
2.2. Modèle de transfert.....	20
2.2.1. <i>Fractionnement liquide/solide</i> .....	21
2.2.2. <i>Dispersion</i> .....	23
2.2.3. <i>Processus physico-chimiques</i> .....	23
2.2.4. <i>Implémentation dans le code</i> .....	24
2.3. Premier tests de calibration.....	24
2.3.1. <i>Hydraulique</i> .....	25
2.3.2. <i>Dispersion</i> .....	28
2.4. Conclusions et perspectives.....	30
<b>3. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer avec Mage et Adis-TS.....</b>	<b>31</b>
3.1. Contexte.....	31
3.2. Implémentation des ouvrages dans Adis-TS.....	31
3.2.1. <i>Cas réels de la chasse du Haut-Rhône de 2012 et de l'APAVÉR de 2016</i> .....	31
3.3. Implémentation du charriage dans Mage 8.....	41
3.3.1. <i>Cas test – Respiration du lit</i> .....	42
3.4. Autres modifications du code et perspectives.....	44
3.4.1. <i>Modifications du code</i> .....	44
3.4.2. <i>Perspectives</i> .....	45
3.5. Formation et appui aux actions OSR.....	46
<b>4. Bibliographie.....</b>	<b>46</b>

---

# 1. Modélisation morphodynamique 1D du secteur Donzère-Mondragon

## 1.1. Contexte

Le travail présenté dans ce rapport est une continuation directe du travail effectué dans l'OSR5 (Serlet & Tal, 2021) pour construire et valider un modèle morphodynamique 1D pour des tronçons clés du Rhône. Dans l'OSR5, nous avons établi un protocole pour modéliser l'évolution historique et le fonctionnement actuel du Rhône. Le tronçon du Péage de Roussillon (PDR) a servi de test pour développer notre approche de modélisation. Dans l'OSR6, notre travail s'est concentré sur l'affinement de la méthode développée dans l'OSR5 et sur son application au tronçon de Donzère-Mondragon (DZM). Les tronçons PDR et DZM ont été choisis en coordination avec la CNR en raison de leur fort potentiel de restauration ainsi que des données disponibles provenant des réinjections de sédiments effectuées récemment et du traçage RFID. Pour éviter toute confusion, une version mise à jour du rapport OSR5 (version B) a été soumise dans laquelle l'approche finale de modélisation est décrite en détail. Dans ce rapport, nous ne fournissons qu'un bref résumé des méthodes avant de présenter les détails du site d'étude DZM et les résultats pour ce bief. À la fin de ce rapport, nous comparons brièvement les principaux résultats pour les deux tronçons.

Pour rappel, les objectifs des travaux menés dans le cadre de l'OSR5/6 étaient doubles. Le premier était d'étudier *l'évolution historique* du fleuve Rhône en réponse aux différentes phases de gestion. Le second était de caractériser le flux sédimentaire *dans les conditions actuelles du lit et de l'hydraulique* et de voir comment il serait impacté par une réinjection de sédiments. Nous présenterons ici uniquement les résultats obtenus pour le système actuel.

Les simulations à court terme visant à comprendre le fonctionnement actuel nécessitent une représentation précise du lit et des conditions aux limites (en particulier dans le cas d'un système fragmenté et complexe comme le Rhône). Pour cela, nous avons utilisé le modèle Basement (ETH, Zurich), un modèle bien adapté aux simulations à court terme (échelle annuelle à plusieurs décennies), pour étudier le fonctionnement actuel du Rhône.

Le modèle est capable de simuler des mélanges de sédiments (granulométrie multiple) et est disponible gratuitement :

Basement : <https://basement.ethz.ch/>

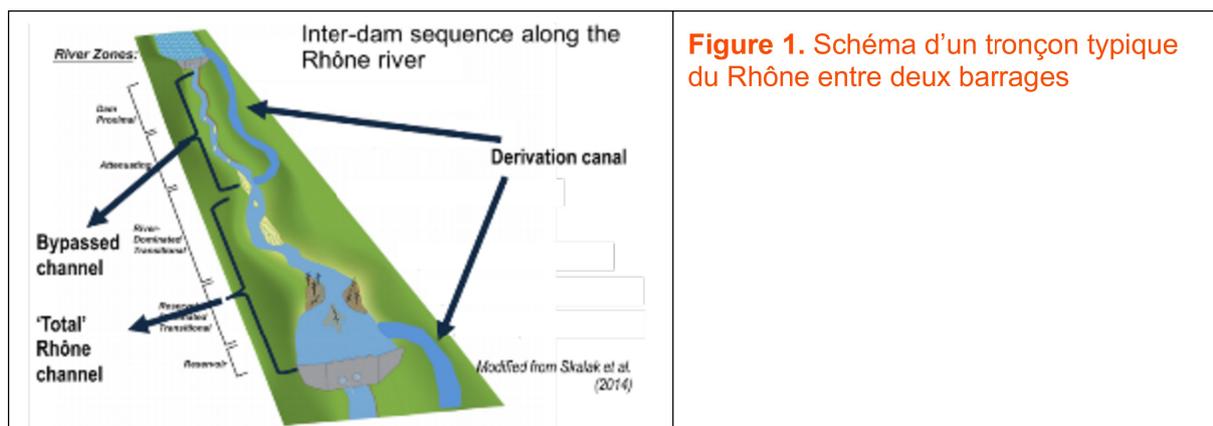
Ce travail s'appuie fortement sur les données OSR disponibles qui comprennent la bathymétrie historique et actuelle, les distributions granulométriques, les courbes de durée d'écoulement et les sorties de modèle hydraulique 1D d'un modèle existant (Mage) développé par INRAE. Les périodes pré-endiguement, post-endiguement et post-barrage ont été simulées séparément. Chaque période a été validée avec toutes les données disponibles pour cette période. Les périodes suivantes ont été simulées sur la base des résultats de la période qui la précède. Afin d'estimer les paramètres historiques pour lesquels aucune

donnée n'est disponible (apport de sédiments, distribution granulométrique en surface et en subsurface du lit du chenal), nous avons utilisé une approche analytique (Blom et al., 2017; Parker & Sutherland, 1990) couplée à une modélisation numérique utilisant Basement (voir le rapport OSR5 pour plus de détails).

## 1.2. Site d'étude

Le tronçon d'étude, Donzère-Mondragon (DZM) est compris entre le barrage de Donzère en amont (PK 171.5 en service depuis 1952) et le barrage de Caderousse en aval (PK 213.1 en service depuis 1975). Le tronçon a une longueur d'environ 40 km et se compose d'un tronçon court-circuité (RCC) à l'aval immédiat du barrage qui est parallèle au chenal de dérivation, de la confluence (PK 201) où la dérivation du débit est rétablie, et d'un tronçon total du Rhône entre la confluence et le barrage aval, dont une partie se trouve dans la zone de retenue (Figure 1).

L'Ardèche rejoint le Rhône au PK 192. Dans le RCC, un total entre 3 200 000 et 3 900 000 m<sup>3</sup> a été extrait pour l'exploitation des sédiments entre 1969 et 1991, la majorité en aval de la confluence avec l'Ardèche (PK 192 -201 ; Laval et al., 2021).



## 1.3. Méthodologie

Pour une description complète du protocole suivi et les justifications, il faut se référer au rapport OSR 5 (Serlet & Tal, 2021). Nous reprenons ci-dessous seulement les principaux aspects.

Nous avons utilisé le modèle Basement pour étudier le système actuel :

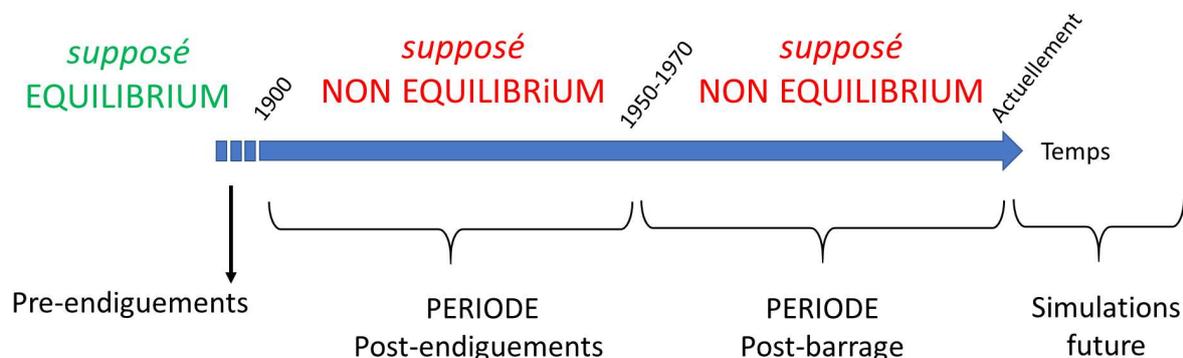
- Taux de transport actuels par fraction granulométrique
- Effets de retenue (barrages-réservoirs)
- Réinjection de sédiments

Compte tenu des multiples phases de travaux sur le chenal réalisées tout au long du 20<sup>e</sup> siècle, il nous a semblé nécessaire de remonter jusqu'au Rhône avant la construction des digues pour définir nos conditions initiales et limites préliminaires. Les hypothèses suivantes

sous-tendent notre reconstitution historique à partir de la fin de la période de pré-aménagement :

- 1 Le Rhône était en équilibre avant l'endiguement du chenal.
- 2 Le régime hydrologique (hydrogramme) n'a pas changé au cours des 150 dernières années et les réductions du débit dans le RCC sont strictement le résultat des détournements de débit.
- 3 Les mesures de la distribution granulométrique (DG) de sub-surface des bancs sont une approximation raisonnable de la DG moyenne à long terme de la charge sédimentaire de la rivière (Bankert & Nelson, 2018)
- 4 La charge sédimentaire transportée estimée dans les conditions du lit actuel sous un régime d'écoulement non perturbé est une approximation raisonnable de premier ordre pour la charge historique et l'apport sédimentaire.

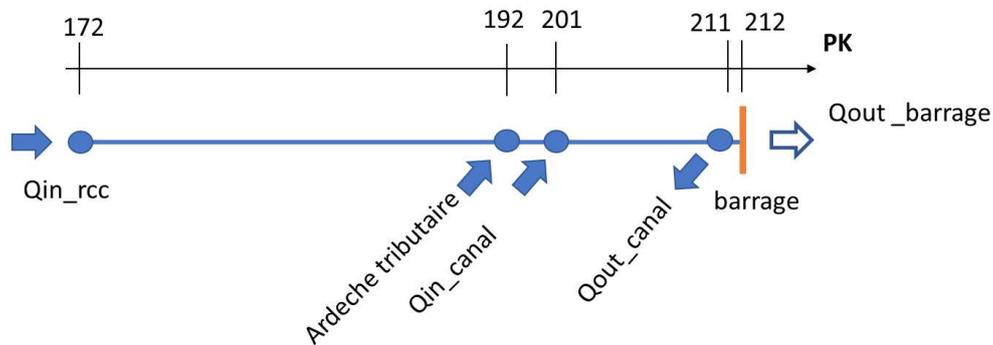
Nous soulignons que le seul objectif de la simulation pré-endiguements du lit était de définir l'état initial de la période post-endiguements. Une étude de la période pré-endiguements en soi est en dehors de la portée de cette étude. Une fois nos conditions initiales préliminaires fixées, les périodes post-endiguements et post-barrage ont chacune été simulées pour leur durée historique équivalente, et les conditions finales à la fin de chaque période ont été prises comme conditions initiales de la période suivante. L'équilibre dans le modèle a été défini comme l'absence de changement significatif de l'élévation du lit et de la distribution granulométrique entre deux pas de temps consécutifs. La Figure résume la chronologie des périodes historiques du Rhône et les simulations qui leur correspondent.



**Figure 2.** Vue d'ensemble des différentes périodes impactant le lit du Rhône

Toutes les structures hydrauliques ont été intégrées dans le modèle Basement. Le modèle commence juste en aval du barrage de Donzère (PK172) et reçoit le débit entrant dans le RCC ( $Q_{in\_rcc}$ ) à cette limite amont (Figure 3). A la confluence avec le canal (PK201), on définit un débit hydraulique entrant ( $Q_{in\_canal}$ ) égal au débit passant par le canal. Un autre apport hydraulique est défini au niveau de l'affluent de l'Ardèche (PK192). À la limite aval (PK212), on définit un débit hydraulique sortant ( $Q_{out\_canal}$ ) égal au débit s'écoulant vers le

canal en aval ; le débit restant s'écoule par-dessus le barrage ( $Q_{out\_barrage}$ ). Les valeurs de  $Q_{in\_rcc}$ ,  $Q_{in\_canal}$  et  $Q_{out\_canal}$  sont basées sur les courbes de durée d'écoulement après le barrage et sur la répartition du débit fournie par le modèle Mage.

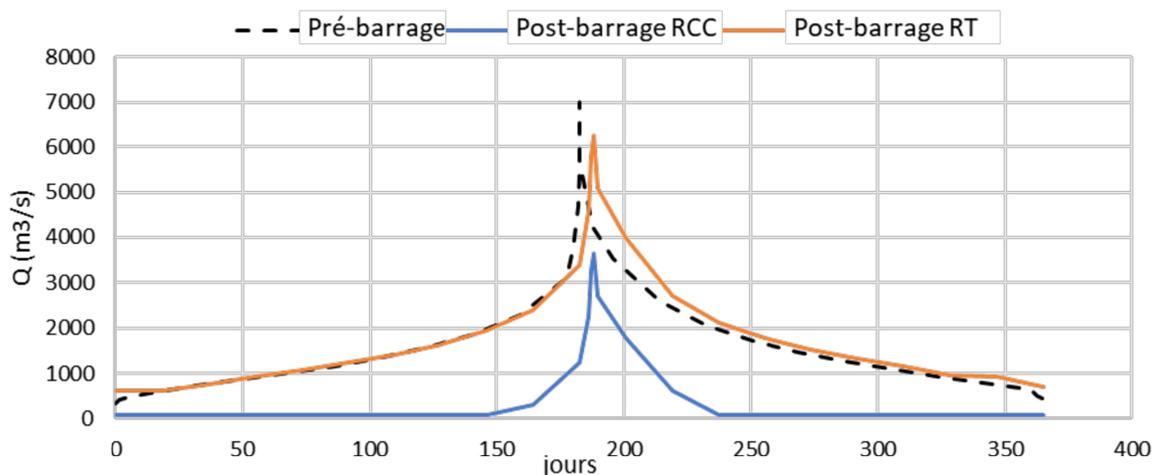


**Figure 3.** Représentation schématique de la configuration du modèle pour la période post-barrage

### 1.3.1. Données disponibles

#### a) Hydraulique et courbes de durée d'écoulement

Nous avons utilisé la courbe de débit classé actuelle compilée par Vazquez-Tarrio dans l'OSR4 à partir des données des stations de mesure de la CNR et de la DREAL disponibles dans la base de données hydrologiques française (BanqueHydro). Les hydrogrammes utilisés dans le modèle ont été dérivés directement de ces courbes de débit classé avec un pic au milieu et des faibles débits au début et à la fin pour assurer la stabilité du modèle (Figure 4). Les sorties hydrauliques (relations Q-H) du modèle MAGE (INRAE) calculées pour l'ensemble du fleuve Rhône pour la courbe de débit classé actuelle complète avec et sans dérivation du débit aux barrages (OSR4 report I.4, 2017; Vázquez-Tarrio et al., 2019) ont également été utilisées. Les débits maximaux qui ont été modélisés avaient une période de retour de 10 ans puisque le modèle MAGE n'a pas été validé pour des crues plus importantes.



**Figure 4.** Courbe de durée de débit réorganisée, appelée hydrogramme "post-barrage" pour RCC et RT et courbe de durée de débit réorganisée sans l'impact des barrages, appelée hydrogramme "pré-barrage"

On a utilisé les mêmes coefficients de friction (Strickler) et la même largeur du lit mineur éclairé dans le tronçon DZM que ceux utilisés dans le modèle MAGE. Nous avons émis l'hypothèse que les coefficients de friction n'ont pas changé historiquement, une analyse de sensibilité en OSR5 a montré que des changements mineurs n'affectent pas les résultats.

## b) Distributions granulométriques

Nous avons utilisé les distributions granulométriques actuelles à partir d'échantillons prélevés dans le chenal (environ tous les 5 km) et à la surface et la sub-surface de bancs occasionnelles (rapport OSR2 Action 2, Parrot, 2015). La Figure 3A montre la distribution granulométrique moyenne dans les sous-tronçons RCC et RT du DZM, calculée sur l'ensemble des échantillons collectés. Une distribution plus fine est observée pour le RCC. La Figure 3B montre la distribution granulométrique moyenne de la sub-surface des bancs comparée à la moyenne pour le chenal RCC et démontre que la DG des bancs, dont nous supposons qu'elle est une approximation de la charge historique du Rhône, est beaucoup plus fine que le lit actuel du chenal. La distribution de la sub-surface des bancs a été reconstruite à partir des D50 et D90 rapportés de 5 échantillons (Parrot, 2015) en utilisant le module granulométrique de Bedloadweb (bedloadbweb.com), qui applique le modèle DG de Recking (2013b). Les Figure 3C et D montrent les distributions pour tous les échantillons de chaque sous-tronçon (RCC et RT) ainsi que la distribution moyenne pour chaque sous-tronçon. Il n'y avait que 2 échantillons pour le RT puisque ce tronçon ne fait que 12 km de long.

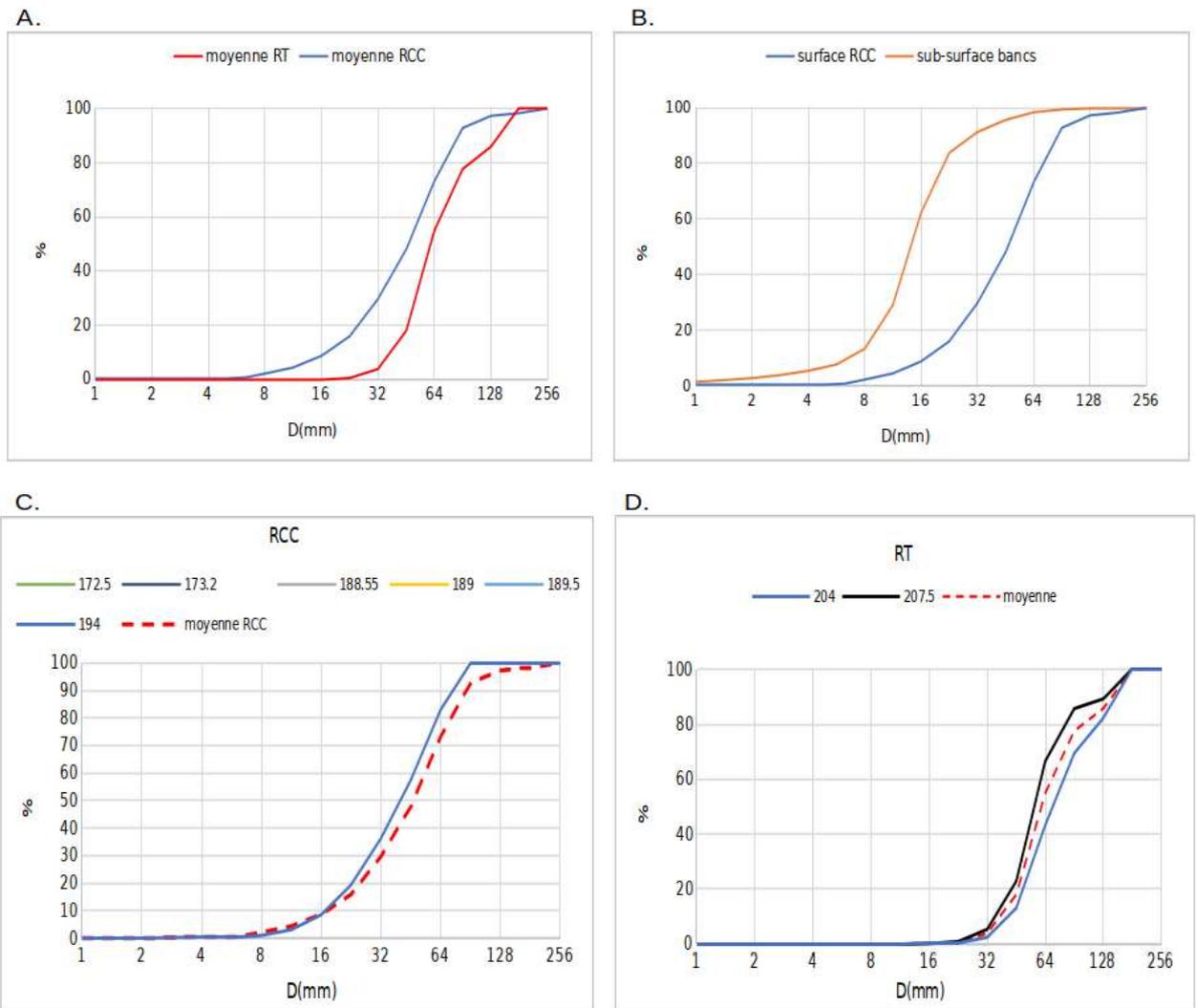
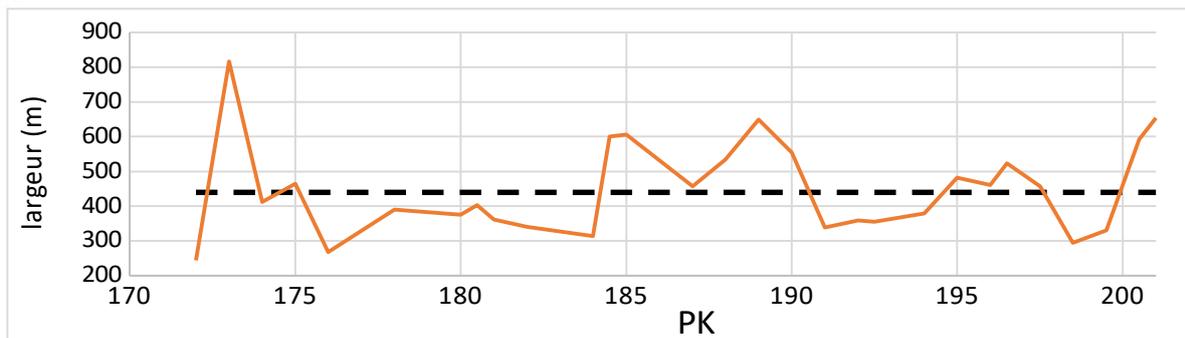


Figure 5. Distributions granulométriques moyennes

### c) Géométrie du chenal

Le chenal actif a été configuré comme une série de sections rectangulaires et sa largeur joue un rôle important dans la morphodynamique. Nous avons mesuré les largeurs à partir de cartes historiques et de photos aériennes disponibles sur IGN Geoportail afin d'estimer une largeur moyenne du chenal avant et après endiguements (carte de l'Etat Major, 1820-1866, et photos aériennes, 1950-1965, respectivement). Comme on peut le voir dans Figure 5 la largeur est très variable le long du tronçon. Nous avons également utilisé des profils en travers historiques du chenal et des profils longitudinaux compilés pour différentes périodes à partir des analyses bathymétriques de l'OSR2 (rapport Action 2 2014, Parrot, 2015). Les sections transversales actuelles mesurées par la CNR (à partir de 2007 pour le tronçon DZM) ont été exportées du modèle Mage.



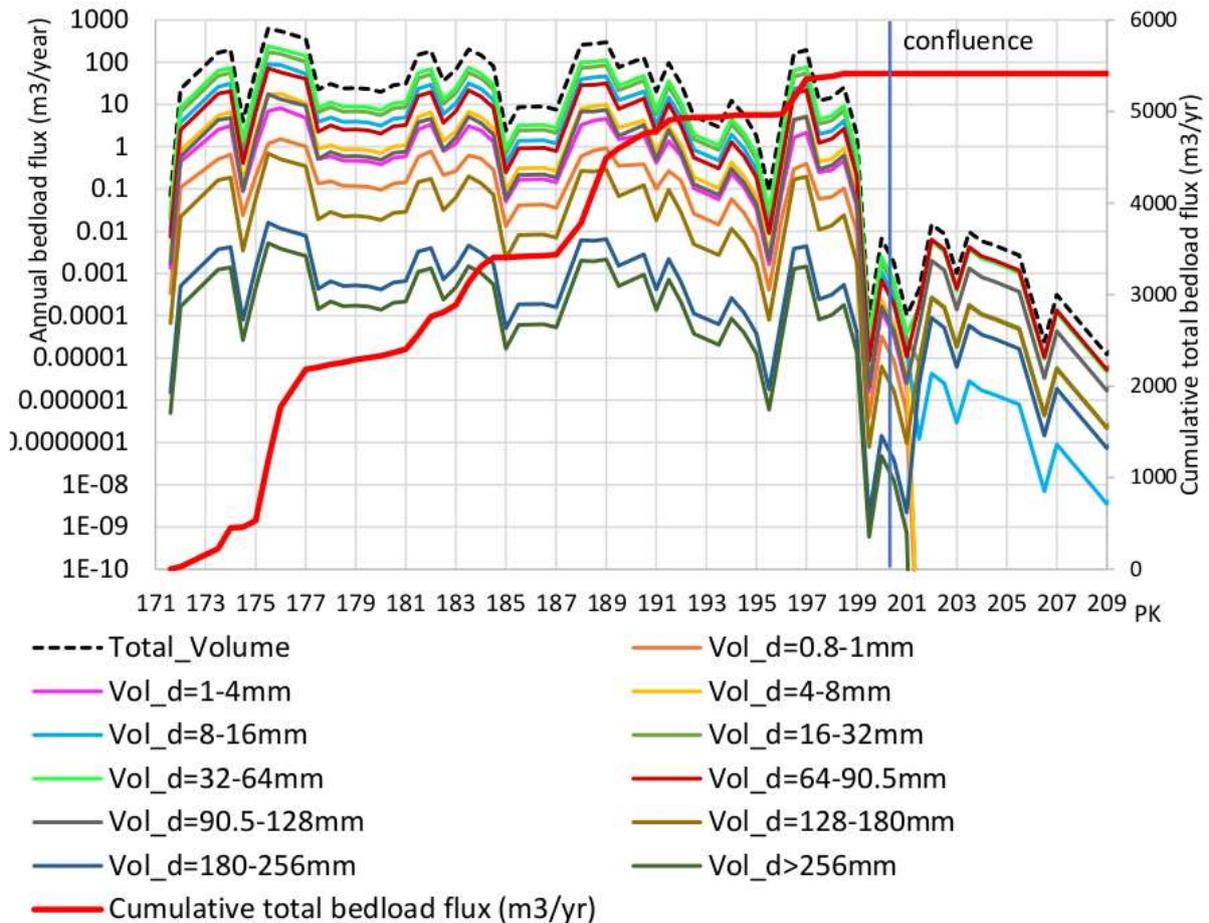
**Figure 6.** Largeur mesurée avant les endiguements (carte de l'Etat Major) (ligne orange) et moyenne sur l'ensemble du bief (ligne noire intermittente)

## 1.4. Résultats : le présent

Les résultats de l'analyse historique ont montré que les changements dans la morphologie du chenal au cours de la période post-endiguements et post-barrage étaient très faibles, ce qui suggère que le chenal est stable. En tant que tel, nous avons considéré qu'il était valide de simuler le lit actuel en utilisant des données actuelles (profils en travers, DG) plutôt que de se baser sur les simulations historiques. Cependant, étant donné qu'il n'existe pas de données permettant de calibrer les taux de transport, nous ne considérons pas que cela soit adéquat pour les simulations à long terme (historiques ou futures). Les analyses présentées ici sont basées sur des simulations à court terme (annuelles), à l'exception des réinjections, que nous avons simulées jusqu'à 50 ans, afin d'avoir une idée générale de la façon dont le lit pourrait évoluer.

### 1.4.1. Taux de transport actuels par fraction granulométrique

Nous avons commencé par analyser les volumes annuels de transport par fraction granulométrique sur le tronçon (Figure 7) sur la base d'un hydrogramme annuel moyen. Dans cette simulation, nous avons imposé un apport sédimentaire d'équilibre dans lequel l'apport est déterminé automatiquement par le modèle sur la base du taux de transport dans la première cellule. Une distribution granulométrique moyenne mesurée à la surface du lit a été utilisée pour le RCC et pour le RT. Les volumes totaux de transport à travers le tronçon prédits par le modèle sont 5415 m<sup>3</sup> par an. On constate que la fraction granulométrique de 32-64 mm prédomine dans le RCC (en amont de la confluence) tandis que la fraction granulométrique de 64-90.5 mm est la plus dominante dans le RT (en aval de la confluence). Les taux de transport chutent significativement dans le réservoir du barrage, PK200 jusqu'à la fin du bief.



**Figure 7.** Volumes annuels de transport de charges par classe de grains et cumulés sur le lit actuel

Pour étudier plus en détail la capacité de transport à travers le réservoir, nous avons simulé un débit constant équivalent à Q10 - le débit le plus important de notre hydrogramme et nous avons examiné les taux de transport fractionnels (Figure 8). Nous pouvons voir que le transport de la charge de fond, même à ce débit élevé, est insignifiant dans le réservoir. Ensuite, nous avons simulé l'évolution du lit actuel sur 5 ans avec le même débit constant et avec l'apport de sédiments déterminé dans notre analyse historique (11093 m<sup>3</sup> /an). Nous voyons que ces sédiments ne sont pas transportés à travers le bief. Ce résultat indique que le débit post-barrage n'est pas capable de transporter beaucoup de sédiments. Sur la base de ces deux résultats, nous avons conclu qu'un apport de sédiments nul est une hypothèse raisonnable pour les simulations historiques post-barrage. Figure 9 montre le changement de l'élévation du lit après 50 ans sans apport de sédiments et indique de très petits changements.

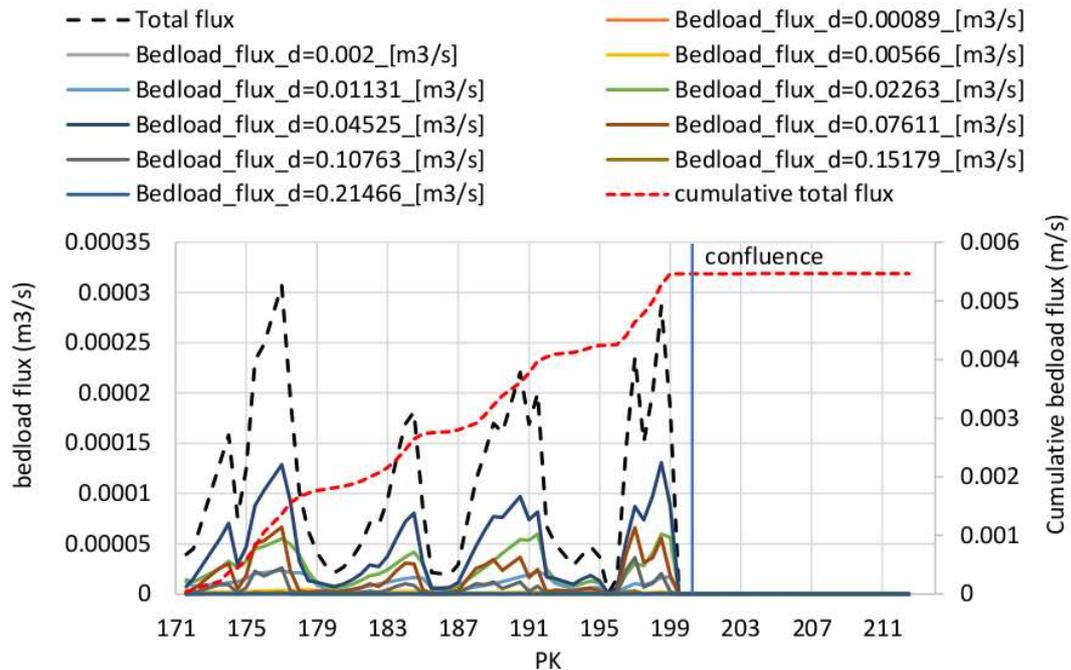


Figure 8. Transport fractionné pour Q10 pour le lit actuel

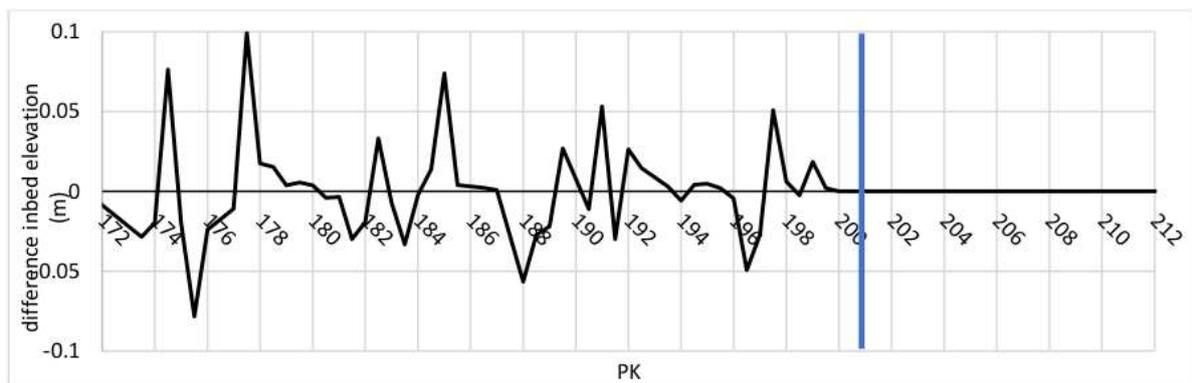


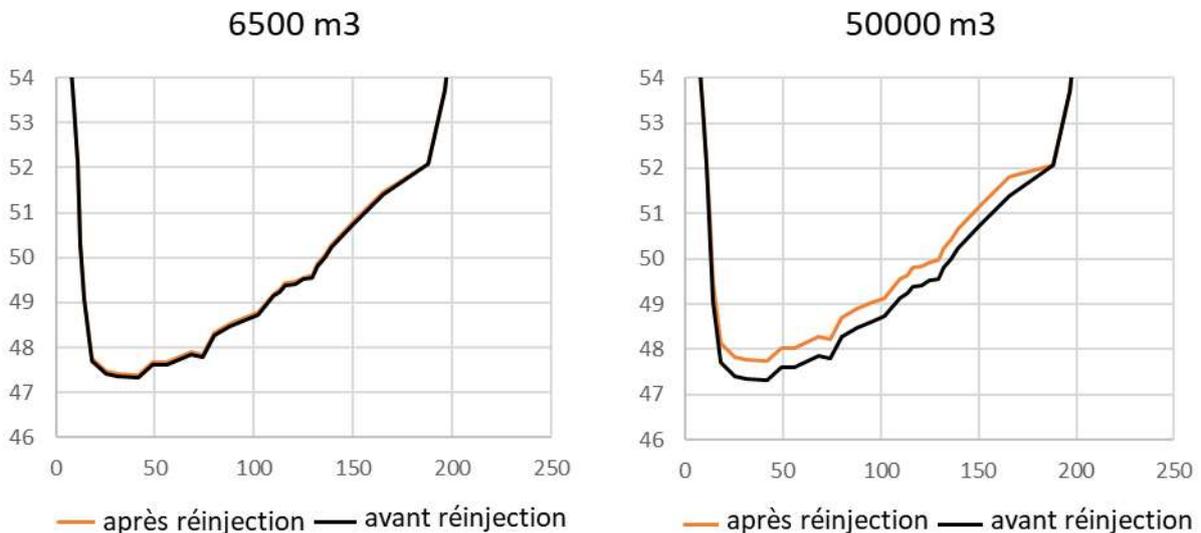
Figure 9. Élévation du lit après 50 ans de simulation

**En résumé,** nous avons utilisé le modèle Basement pour analyser le transport du lit dans le bief dans les conditions actuelles (hydrologie, profils en travers, DG). Le volume annuel estimé pour ce tronçon est très faible (5415 m<sup>3</sup> /an). Les fractions granulométriques dominantes transportées dans le RCC et le RT sont respectivement de 32-64 mm et 64-90.5 mm. Notre simulation montre que les effets de 'backwater' du barrage aval a un impact important sur les capacités de transport, même pour des débits élevés. Ceci nous a amené à conclure qu'il est raisonnable de supposer un apport nul de sédiments dans le bief pour notre simulation historique post-barrage. Une simulation sur 50 ans sans apport de sédiments montre que le lit actuel est presque stable. Pour l'instant, aucune donnée n'est disponible pour valider ces résultats.

## 1.4.2. Réinjection de sédiments

### a) Configuration et validation du modèle

Nous avons réalisé une série de simulations sur notre lit actuel modélisé afin d'étudier l'évolution et les impacts d'une réinjection de sédiments à PK173.5. Ces simulations sont basées sur le volume et la distribution granulométrique de la réinjection réalisée dans PDR (rapport OSR5). Cela est pour deux raisons – premièrement est le manque des données sur la réinjection dans DZM, deuxièmement c'est que cela permet de comparer l'évolution des deux réinjections. Sur la base d'une porosité estimée à 25% (typique des rivières à lit de gravier, par exemple Bui et al. (2019); Frings et al.(2008)), nous avons introduit un volume de 6500 m<sup>3</sup> de sédiments sans porosité dans le modèle. Nous avons également simulé un volume de réinjection beaucoup plus important de 50000 m<sup>3</sup> afin d'étudier ses impacts. Les réinjections simulées ont été implémentées immédiatement en aval du barrage. Étant donné que notre modèle est unidimensionnel, la réinjection a été répartie uniformément sur le profil en travers dans le lit mineur (Figure 10). Basement implémente automatiquement une réinjection sous la forme d'une pyramide avec une élévation maximale au niveau du site de dépôt qui se rétrécit vers la section transversale immédiatement en amont et en aval (étant donné notre espacement de profil en travers de 500 m, la réinjection s'est étendue sur environ 1 km de long).



**Figure 10.** Profil en travers au niveau de PK173.5 avant et après que les volumes de réinjection simulés aient été uniformément distribués dans le profil

## b) Résultats et discussion

Figure 11 montre la différence d'élévation du lit immédiatement après la réinjection ("début") et après 1 et 50 ans par rapport à l'élévation du lit avant la réinjection (6500 m<sup>3</sup> et 50000 m<sup>3</sup> en A et B respectivement). Les sédiments se propagent en aval, et dans le cas de la réinjection de 6500 m<sup>3</sup>, ils sont complètement enlevés, tandis que pour les 50000 m<sup>3</sup>, tous les sédiments n'ont pas bougé même après 50 ans. La Figure 12 est un graphique du changement annuel relatif de l'élévation du lit sur différentes périodes (c'est-à-dire le changement total sur la période normalisée par le nombre d'années écoulées). Elle montre que la majorité du déplacement des sédiments se produit au cours de la première année suivant la réinjection et diminue au cours des années suivantes. Après la première décennie suivant la réinjection, très peu de sédiments continuent à être déplacés.

En comparaison avec l'élévation du lit après 50 ans sans réinjection (Figure 11), la réinjection de 6500 m<sup>3</sup> montre un dépôt légèrement plus élevé dans les zones de dépôt en aval du point de réinjection (environ 2,5 cm au PK 174,5, 1 km en aval du point de réinjection). La même chose est visible avec la réinjection de 50 000 m<sup>3</sup>, qui présente une couche plus épaisse de dépôts supplémentaires (7 cm par exemple au PK 174,5, 1 km en aval du point de réinjection, 1,8 cm au PK 177,5, 4 km en aval du point de réinjection).

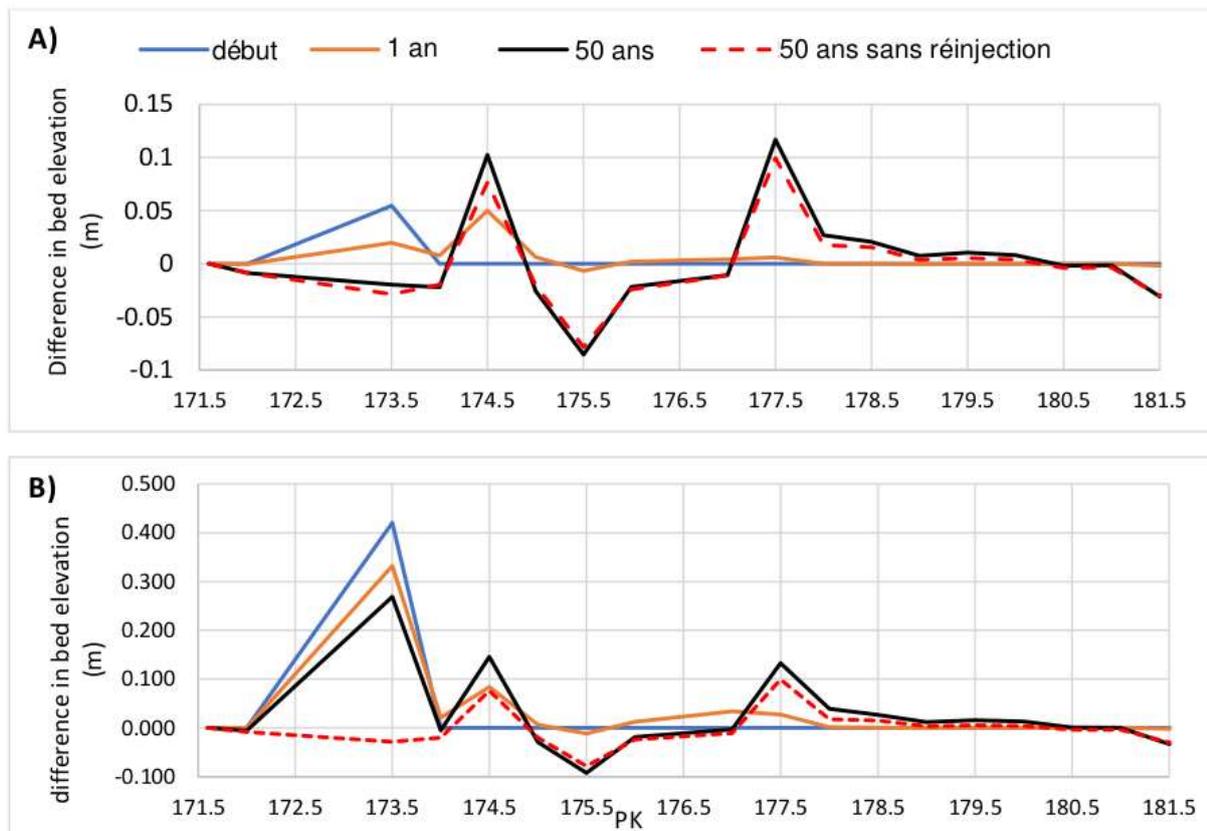
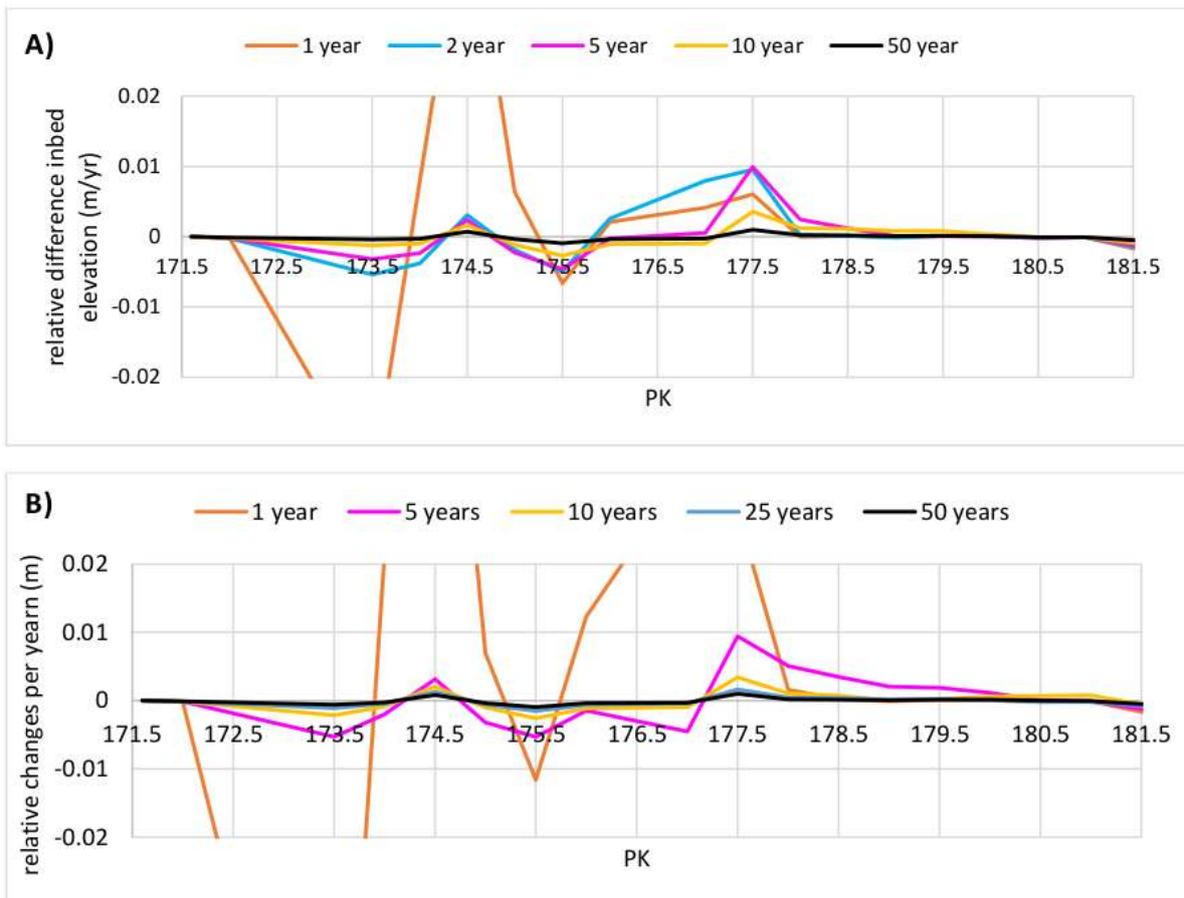


Figure 11. Différence d'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m<sup>3</sup> et B) 50000m<sup>3</sup>



**Figure 12.** Différence relative de l'élévation du lit après 50 ans pour A) 6500 m<sup>3</sup> et B) 50000m<sup>3</sup>

Figure 13 montre la distribution granulométrique de la surface du lit à 1 km en aval de la réinjection, où le dépôt le plus important a été observé (Figures 10 et 11), à différents moments après la réinjection par rapport à l'état initial du lit. Pour la réinjection de 6500 m<sup>3</sup> (Figure 13A), on constate que la diminution de la DG se produit au cours de la première année. Après, une légère augmentation de la DG par rapport à l'année 1 est observé. Une tendance similaire est observée pour le volume de réinjection de 50 000 m<sup>3</sup> (Figure 13B). Ces résultats indiquent qu'après une phase initiale de diminuer la DG, le lit redevient progressivement plus grossier et retrouve son pavage mobile d'origine. Néanmoins, même après 50 ans, le lit est toujours plus fin qu'il ne l'était avant la réinjection (Figure 14).

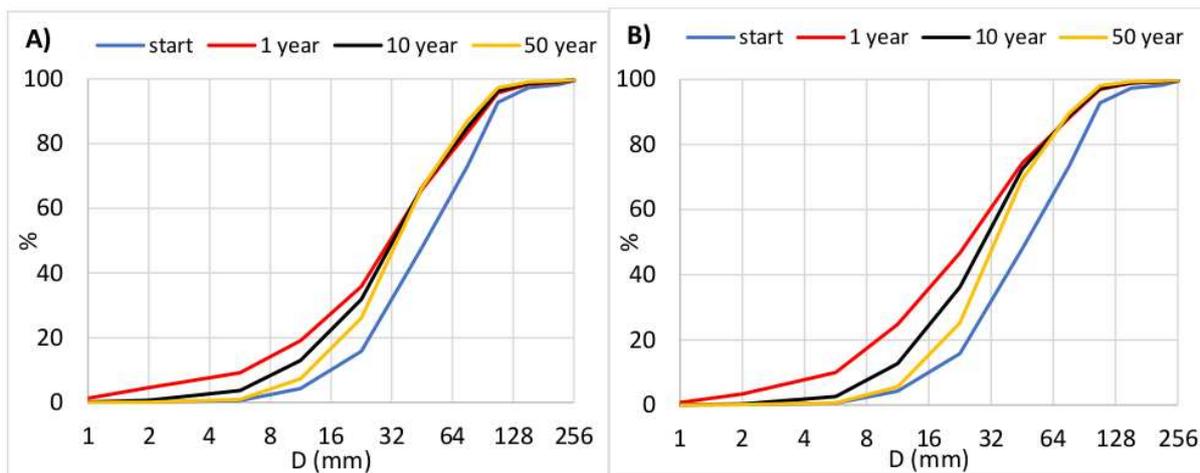


Figure 13. Changement dans la distribution granulométrique pour A) 6500 m3 et B) 50000m3

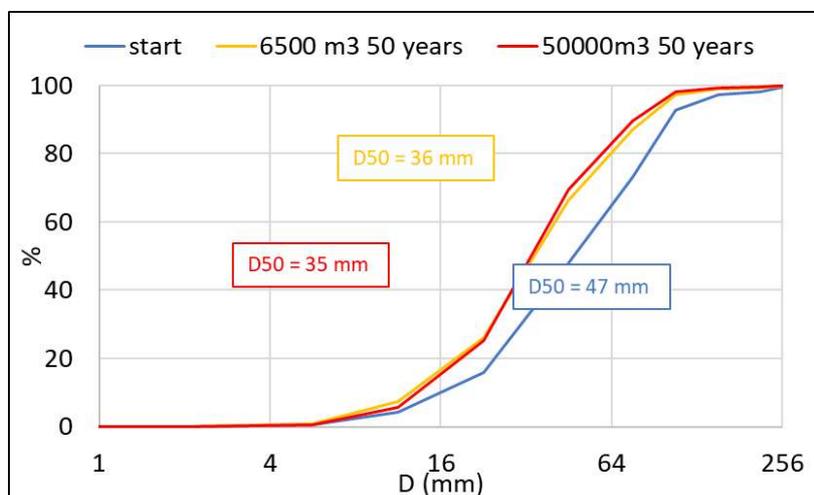
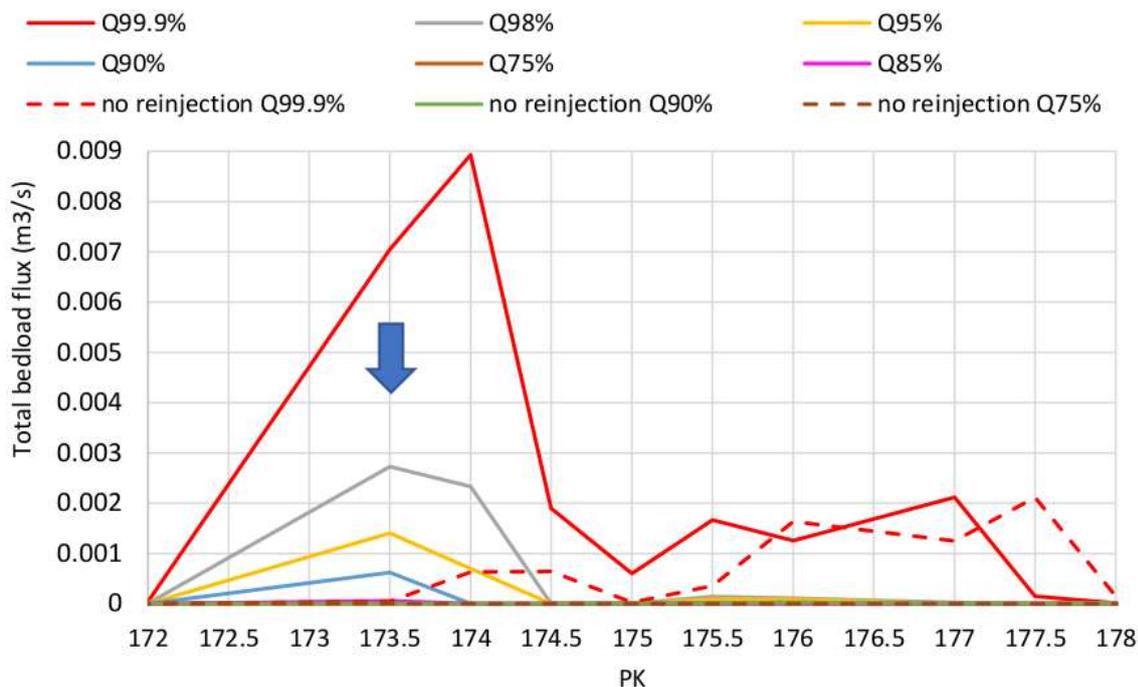


Figure 14. Évolution de la D50 après 50 ans post-réinjection.

Pour avoir une idée du débit nécessaire à la mobilisation du pieu de réinjection, nous avons comparé le flux total de charriage à différents débits. Le taux de transport à Q99.9% (c'est-à-dire 99.9% du temps où le débit est inférieur à cette valeur) et Q75% sans réinjection est inclus pour comparaison. Nous observons une réduction rapide des taux de transport pour les débits inférieurs à Q99.9% (3650 m<sup>3</sup> /s dans le RCC). En dessous de Q90% (618 m<sup>3</sup> /s dans le RCC) le taux de transport est négligeable et nous pouvons supposer que les sédiments issus de la réinjection sont immobiles. En résumé, les sédiments réinjectés sont transportés aux débits les plus élevés et les taux de transport des sédiments réinjectés chutent très rapidement à des débits plus faibles.



**En résumé**, les simulations des réinjections de sédiments comme définis dans OSR5 montrent un certain déplacement vers l'aval qui se produit principalement dans les premières années suivant la réinjection. En aval de la réinjection, la surface du lit diminue la DG dans la première année, puis s'augmente. Seuls des débits très élevés, supérieurs à Q90%, sont capables de remobiliser les sédiments réinjectés. Ces simulations démontrent qu'un modèle morphodynamique 1D est un outil utile pour étudier le devenir général des réinjections. Cependant, des simulations 2D sont nécessaires pour étudier en détail les modèles de dépôt locaux.

## 1.5. Discussion

Dans cette section, nous résumons et comparons les tendances générales observées pour le Péage de Roussillon (OSR 5) et Donzère-Mondragon (OSR 6) sur la base des résultats de la modélisation morphodynamique 1D.

### 1.5.1. Dynamique actuelle

Les taux estimés de transport des charges de fond à partir de simulations basées sur les conditions actuelles de l'hydraulique et du lit et utilisant l'équation Wilcock & Crowe (Wilcock & Crowe, 2003) étaient de 42 m³/an et 5415 m³/an pour le PDR et le DZM respectivement (naturellement plus faibles que les valeurs sous un régime hydrologique non-perturbé). Ces valeurs sont inférieures à celles estimées dans l'OSR 4 à partir du formule de transport de charriage de Recking (7780 m³/an et 24966 m³/an pour le PDR et le DZM respectivement).

Ces différences soulignent la nécessité d'effectuer des mesures afin de valider les estimations et d'affiner les méthodes utilisées pour les obtenir.

En PDR la fraction granulométrique de 16-32 mm prédomine dans le RCC tandis que la fraction granulométrique de 32-64 mm est la plus dominante dans le RT. En DZM, la fraction 32-64 mm prédomine dans le RCC et 64-90.5 mm dans le RT. Une valeur plus grossière dans le RT correspond aux mesures. De plus, les taux de transport dans les réservoirs des barrages en aval des deux tronçons étaient insignifiants, ce qui suggère qu'aucune charge de fond n'est transportée à travers les barrages (c.-à-d. que l'apport de sédiments grossiers est nul). Une simulation sur 50 ans basée sur l'apport actuel de lit montre des changements de l'élévation du lit  $<0,01$  m pour le PDR et  $<0,1$  m pour le DZM, suggérant un lit très stable dans les deux tronçons (en accord avec les résultats des simulations historiques).

Les deux tronçons n'ont montré qu'une capacité très limitée à transporter les sédiments réinjectés vers l'aval dans le cadre de l'hydrologie annuelle moyenne actuelle et les simulations ont confirmé que seuls des débits très importants sont capables de mobiliser les sédiments réinjectés (supérieurs à Q98% dans le PDR et supérieurs à Q90% dans le DZM). Ces résultats sont cohérents avec la surveillance RFID dans le tronçon PDR. Le mouvement des sédiments a été le plus important au cours de la première année et a progressivement diminué au fil du temps. Les taux de transport du lit plus élevés dans le tronçon DZM ont entraîné un taux de propagation plus rapide des sédiments de réinjection. La surface du lit est devenue plus fine au cours des premières années qui ont suivi la réinjection, puis a commencé à se grossir. Néanmoins, le lit était encore plus fin 50 ans après la réinjection par rapport au lit avant la réinjection (D50 réduit de 42 à 33-38 mm dans le PDR et de 47 à 35-36 mm dans le DZM).

## 1.6. Perspectives

Les résultats de ce travail doivent être validés avec des mesures quand davantage de données seront disponibles (RFID, bathymétrie, mesures de flux...). Les résultats de la modélisation morphodynamique 1D des réinjections peuvent être implémentés dans des modèles statistiques d'habitat pour déterminer leurs impacts (voir Tal et al., 2021). Un modèle 2D est nécessaire afin d'étudier les changements locaux en réponse aux réinjections.

---

## 2. Modèle de transfert des polluants

Le but de cette action est de proposer un modèle de transfert des contaminants qui puisse être couplé aux outils de simulation hydro-sédimentaire du Rhône. Pour ce faire, l'action s'articule en quatre étapes qui s'appuient sur le code CASTEAURx, un outil de l'IRSN pour évaluer la propagation des pollutions radioactives introduites en routine et/ou accidentellement dans les réseaux hydrographiques. Ce code associe un module hydrographique pour décrire les réseaux hydrographiques, un module hydraulique pour

représenter les déplacements des masses d'eau, un module sédimentaire pour évaluer les flux solides en suspension et les échanges avec les sédiments de fond et un module radioécologique pour évaluer les transferts dans le réseau des formes dissoutes et particulaires des contaminants radioactifs. Développés pour un contexte opérationnel, ces différents modules appliquent des modélisations qui répondent à des critères de robustesse et de simplicité de paramétrage et de rapidité des calculs.

Dans le cadre de l'OSR 6, cet outil servira de banc d'essai pour les quatre phases de développement du modèle de transfert des contaminants dans le Rhône :

- 1 Etablissement d'une liste réduite de radionucléides d'intérêt pour l'IRSN.
- 2 Développement du modèle de transfert des polluants.
- 3 Compilation et mise en forme des données nécessaires à la calibration et au paramétrage.
- 4 Calibration et paramétrisation du modèle.

Pour l'année 2021, les objectifs sont de développer le modèle et d'identifier des contaminants d'intérêt pour l'IRSN afin de le tester. Les travaux réalisés sur ces deux points sont développés ci-après.

## **2.1. Contaminants d'intérêt pour l'IRSN**

Deux contaminants d'intérêt pour l'IRSN sont proposés : le tritium et le césium 137. Ces deux radionucléides ont des comportements contrastés qui permettront d'évaluer différents aspects du modèle et ils sont associés à des jeux de données compilées depuis plusieurs années par les surveillances IRSN, EDF et CEA et diverses études sur le Rhône (Antonelli et al., 2008 ; Eyrolle et al., 2012 ; Eyrolle et al., 2020).

Le tritium interagit très peu avec les sédiments et les rejets des Centres Nucléaires de Production Electrique (CNPE) le rendent mesurable dans le Rhône. C'est donc un bon marqueur de la dispersion.

Beaucoup plus réactif aux particules solides, le césium 137 soulève les problématiques du fractionnement liquide/solide et du couplage aux processus sédimentaires. Dans le Rhône, il a deux origines qui sont les rejets des installations nucléaires et le lessivage et l'érosion des dépôts atmosphériques accumulés sur les bassins versants à la suite des essais nucléaires et de l'accident de Tchernobyl (Zebracki et al., 2015).

## **2.2. Modèle de transfert**

Le modèle de transfert représente les variations spatio-temporelles des concentrations des contaminants dans les colonnes d'eau et sédimentaire du réseau hydrographique. A l'échelle du Rhône, son couplage aux modèles hydro-sédimentaires justifie une approche dynamique et monodimensionnelle qui intègre plusieurs processus tels que les différentes formes

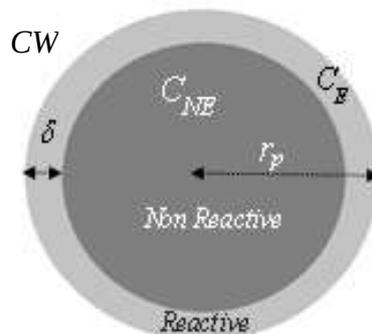
d'apports dans le réseau, la dispersion, le fractionnement liquide/solide, les échanges sédimentaires entre les colonnes d'eau et sédimentaire et des processus physico-chimiques spécifiques à chaque contaminant.

A ce stade du projet, les principaux processus de transfert dans la colonne d'eau ont été implémentés (apports, dispersion et fractionnement liquide/solide avec plusieurs classes de matière en suspension) avec, compte tenu des contaminants d'intérêt (tritium et  $^{137}\text{Cs}$ ), la décroissance et les filiations radioactives comme processus physico-chimique spécifique. Les échanges sédimentaires entre les sédiments de fond et la colonne d'eau font l'objet des développements de l'année 2022.

Les modélisations implémentées au cours de cette première année du projet sont décrites ci-après.

### 2.2.1. Fractionnement liquide/solide

Le fractionnement liquide/solide des contaminants est modélisé par une adaptation du modèle d'Abril et Fraga (1996) qui prend en compte les échanges avec plusieurs classes de particules et les contributions des rejets anthropiques et du bruit de fond géochimique du bassin versant (Tomczak et al., 2021). Le modèle distingue les fractions non-échangeables et échangeables des contaminants en supposant, pour ces dernières, un équilibre de fractionnement instantané et réversible. Conceptuellement, il repose sur une représentation géométrique des particules qui leur attribue une couche superficielle réactive qui peut échanger les contaminants avec la solution et une partie interne non réactive dans laquelle les contaminants ne sont pas échangeables.



**Figure 15.** Conceptualisation des particules pour le fractionnement liquide/solide

Avec  $r_p$ , le rayon des particules (m),  $CW$ , la concentration du contaminant en solution (unité. $\text{m}^{-3}$ ),  $CE$ , la concentration du contaminant dans la couche d'échange (unité. $\text{kg}^{-1}$ ),  $CNE$ , la concentration du contaminant dans la partie non-échangeable (unité. $\text{kg}^{-1}$ ) et  $\delta$ , l'épaisseur de la couche d'échange (m). Unité est un terme générique qui peut correspondre à Bq, kg, mol en fonction du contaminant ciblé.

L'épaisseur de la couche d'échange,  $\delta$ , dépend du contaminant ainsi que sa capacité d'échange qui est caractérisée par un coefficient de fractionnement à l'équilibre ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ) :

$$Kd_\delta = CE/CW$$

### Équation 1

La concentration non-échangeable dépend du rayon de la classe de particule via les relations suivantes :

$$\begin{array}{ll} 5 & \text{si } r_p > \delta \quad CNE_p = C_{bdf} \\ 6 & \text{si } r_p \leq \delta \quad CNE_p = 0 \end{array}$$

### Équation 2

Les paramètres spécifiques à chaque contaminant sont  $C_{bdf}$ , le bruit de fond dans le bassin versant ( $\text{unité} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $\delta$ , l'épaisseur de la couche réactive (m) et  $Kd_\delta$ , le coefficient de fractionnement liquide/solide de cette couche.

La concentration totale du contaminant dans la colonne d'eau,  $C$  ( $\text{unité} \cdot \text{m}^{-3}$ ), s'exprime en fonction des charges en suspension des classes de particules,  $SS_p$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) et laisse apparaître les concentrations dissoutes et particulaires et les pools échangeable et non-échangeable totaux :

$$C = \underbrace{C_w + \sum_{r_p \leq \delta} SS_p \cdot CE_p + \sum_{r_p > \delta} SS_p \cdot CE_p}_{CE_T : \text{pool échangeable total}} + \underbrace{\sum_{r_p > \delta} SS_p \cdot C_{bdf} \cdot \frac{(r_p - \delta)^3}{r_p^3}}_{CNE_T : \text{pool non-échangeable total}}$$

Dissous
Particulaire

### Équation 3

Le pool échangeable total cumule les rejets anthropiques et le bruit de fond lié à la couche échangeable des particules. Avec l'hypothèse d'équilibre instantané, les activités dissoutes et particulaires échangeables se déduisent de ce pool avec les relations suivantes :

$$CW = \frac{C}{1 + Kd_\delta \cdot \sum_{r_p \leq \delta} SS_p + Kd_\delta \cdot \sum_{r_p > \delta} SS_p \cdot \left(1 - \frac{(r_p - \delta)^3}{r_p^3}\right)}$$

$$CE_p = Kd_\delta \cdot C_w$$

### Équation 4

### 2.2.2. Dispersion

La dispersion des contaminants est modélisée avec l'équation standard de dispersion 1D appliquée au pool échangeable total et à la fraction non-échangeable de chaque classe de particules :

$$\frac{\partial C \cdot SM}{\partial t} + \frac{\partial (C \cdot Q)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( SM \cdot K \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \sigma_c \cdot SM$$

#### Équation 5

Le débit,  $Q$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la section mouillée,  $SM$  ( $\text{m}^2$ ), et le coefficient de dispersion longitudinal,  $K$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), sont transmis par le modèle hydraulique.

Les flux d'apport,  $\sigma_c$  ( $\text{unité} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), sont des données d'entrées spécifiques à chaque scénario. Ils peuvent représenter des rejets d'installation, des apports du bassin versant, des dépôts atmosphériques...

### 2.2.3. Processus physico-chimiques

Ces processus transforment une espèce de contaminant en une autre espèce. Ils couvrent un large spectre de mécanismes de dégradation et de production induits par des réactions chimiques et nucléaires. Compte tenu des contaminants d'intérêt pour l'IRSN, ce sont les réactions nucléaires de décroissance et de filiation radioactive spontanées qui ont été implémentées dans le modèle.

Pour cela, l'équation suivante est appliquée à chaque pas de temps et à chaque section de calcul au pool échangeable total et à la fraction non-échangeable de chaque classe de particules :

$$\frac{\partial C_i \cdot SM}{\partial t} = \left( \sum_{j=0}^{NRN} f_{j,i} \cdot \frac{as_i}{as_j} \cdot \lambda_j \cdot C_j - \lambda_i \cdot C_i \right) \cdot SM$$

#### Équation 6

Avec  $C_i$ , la concentration du contaminant  $i$ ,  $\lambda_i$ , la constante de décroissance radioactive du contaminant  $i$  ( $\text{s}^{-1}$ ),  $f_{j,i}$ , la proportion de la décroissance du contaminant  $j$  qui est transformée en contaminant  $i$  (-),  $as_i$ , l'activité spécifique du contaminant  $i$  ( $\text{Bq} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) et  $SM$ , la section mouillée ( $\text{m}^2$ ).

Par la suite, des réactions chimiques spécifiques à d'autres contaminants pourront être ajoutées en suivant la même procédure d'implémentation.

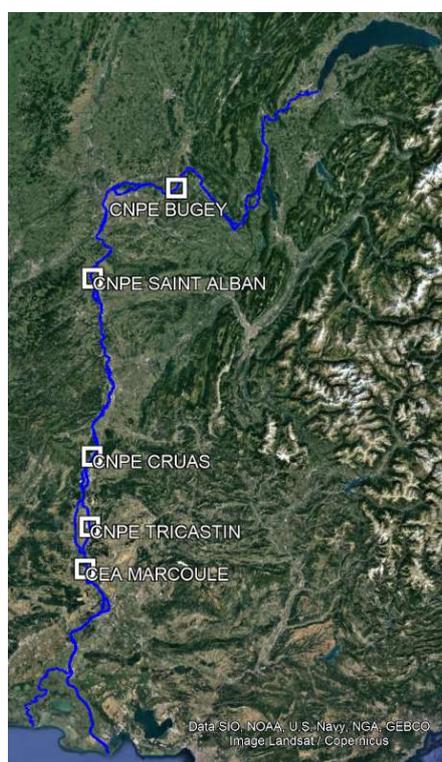
#### 2.2.4. Implémentation dans le code

Les modélisations décrites ci-dessus ont été codées dans le code CASTEAURx au moyen d'approches numériques implicites de type différences finies. Le code permet de traiter plusieurs polluants, plusieurs termes sources de différents types et plusieurs classes de particules. Les calculs sont configurés en précisant la période modélisée et les pas de temps et d'espace.

### 2.3. Premier tests de calibration

Des premiers tests de calibration sur le Rhône ont été effectués en 2021 pour les modules hydrographique, hydraulique et la partie dispersion du module de transfert. Ces tests ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration avec EDF qui a permis à l'IRSN de réaliser des suivis de la propagation des rejets liquides de tritium des CNPE du Rhône (Bugey, Saint Alban, Cruas et Tricastin) entre le CNPE du Bugey et les deux embouchures marines pour trois conditions de débit (étiage, module et crue).

Pour la partie hydrographique, ce réseau de plus de 600 km est décrit par 162 biefs. Chacun constitue une suite de sections réparties au pas de 4 m et paramétrées de façon semi-automatique à partir d'un Système d'Information Géographique par leurs coordonnées géographiques (latitude, longitude), côte, largeur au plafond, angle de berge et coefficient de Strickler (Figure 16).



**Figure 16. Domaine de calcul : du CNPE du Bugey aux embouchures marines**

Les calculs ont été réalisés au pas de temps de 15 minutes et au pas d'espace de 200 mètres.

### 2.3.1. Hydraulique

Le module hydraulique a été testé en mode Manning-Strickler sans prise en compte implicite des ouvrages hydrauliques. Ce mode est une version simplifiée des équations 1D de Barré de Saint Venant dans laquelle l'équation de bilan de quantité de mouvement est ramenée sous sa forme en régime permanent et uniforme :

$$\frac{\partial SM}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \sigma_Q$$

$$Q = SM \cdot K_S \cdot RH^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{-i}$$

#### Équation 7

Avec  $Q$ , le débit ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $K_S$ , le coefficient de Strickler ( $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $RH$ , le rayon hydraulique (m) et  $i$ , la pente du lit ( $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Peu précise pour modéliser la ligne d'eau, cette approche présente un intérêt opérationnel pour évaluer les débits à grande échelle en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa robustesse calculatoire.

Les répartitions de débits aux séparations vieux Rhône/canal ont été calibrées pour chaque campagne par ajustement des largeurs des sections entrantes des bras du vieux Rhône. La chronique de débit en tête de réseau au niveau du CNPE du Bugey est attribuée à celle de la station hydrologique de Lagnieu située à 11 km en amont. Les autres données de débit sont les chroniques aux confluences de plus de vingt affluents : Bourbre, Ain, Saône, Gier, Varèze, Valencize, Cance, Ay, Galaure, Doux, Isère, Embroye, Eyrieux, Drome, Ouvèze, Roubion, Escoutay, Ardèche, Cèze, Ouvèze, Durance, Gardon. Ces chroniques sont assimilées à celles des stations hydrologiques les plus proches des confluences et disponibles sur les sites de l'Hydrau Portail ([hydro.eaufrance.fr](http://hydro.eaufrance.fr)) et de la BDOH de l'OSR ([bdoh.irstea.fr](http://bdoh.irstea.fr)).

Pour chacune des trois campagnes, la calibration du modèle hydraulique a porté sur l'ajustement des coefficients de Strickler et des largeurs des premières sections des bras du vieux Rhône de façon à obtenir les meilleures corrélations entre les débits modélisés et mesurés aux stations hydrologiques du Rhône de Jons, Andancette, Beaucaire-Tarascon et Arles et des bras du vieux Rhône à Bourg-Saint-Andéol, Pont Saint Esprit et Pont de Beaucaire (Figure 17 ; Figure 18 ; Figure 19).

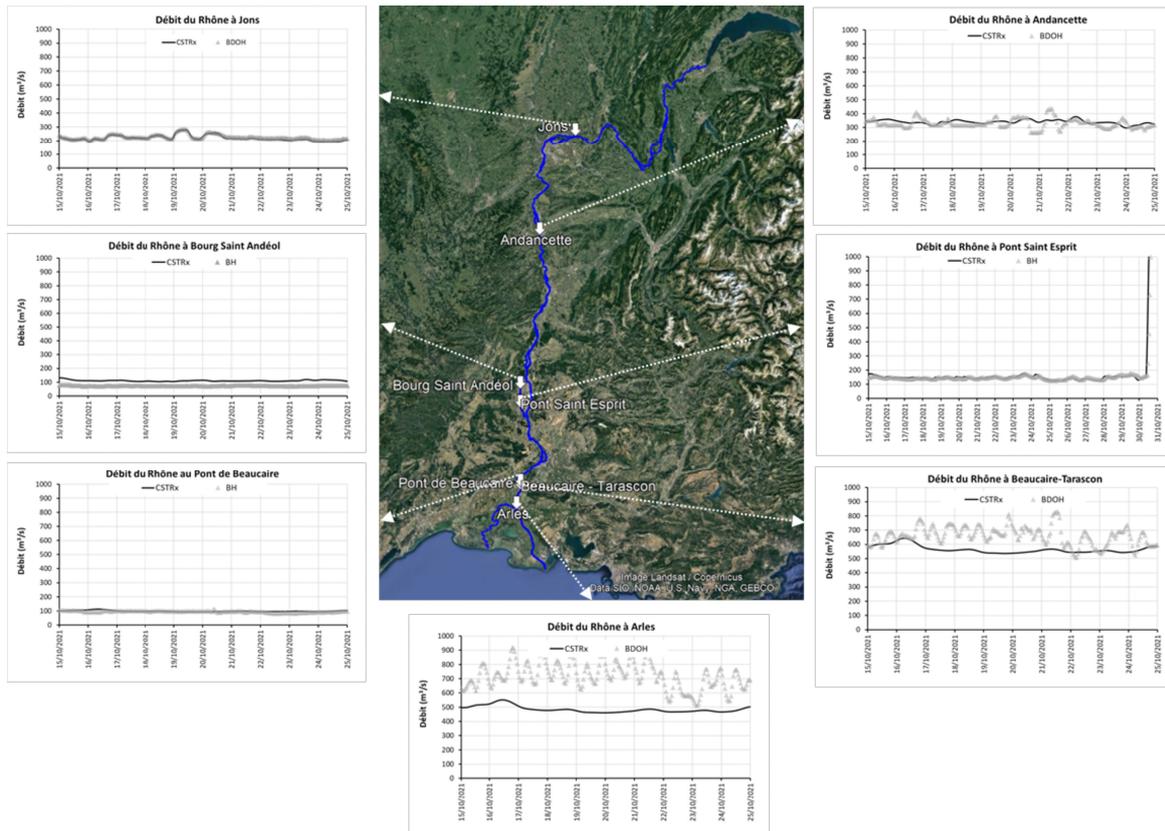


Figure 17. Débits modélisés vs mesurés pour le Rhône en été

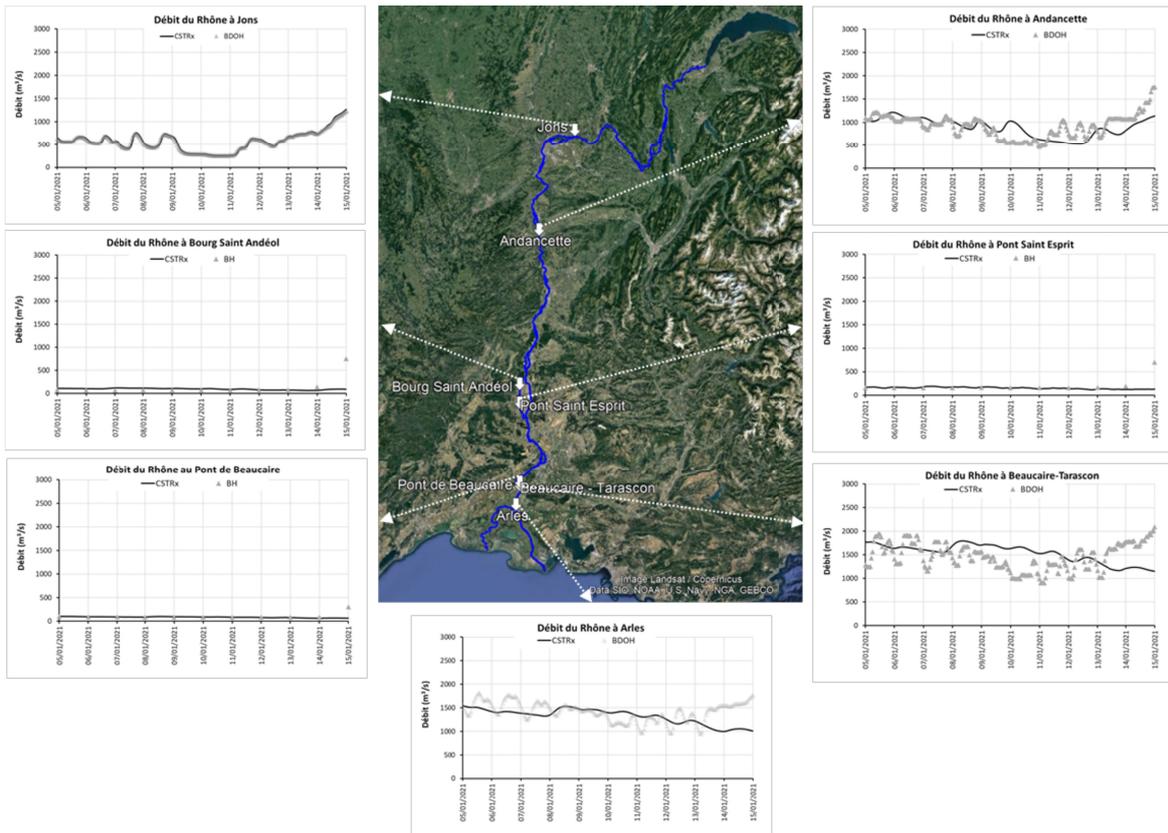


Figure 18. Débits modélisés vs mesurés pour le Rhône au module

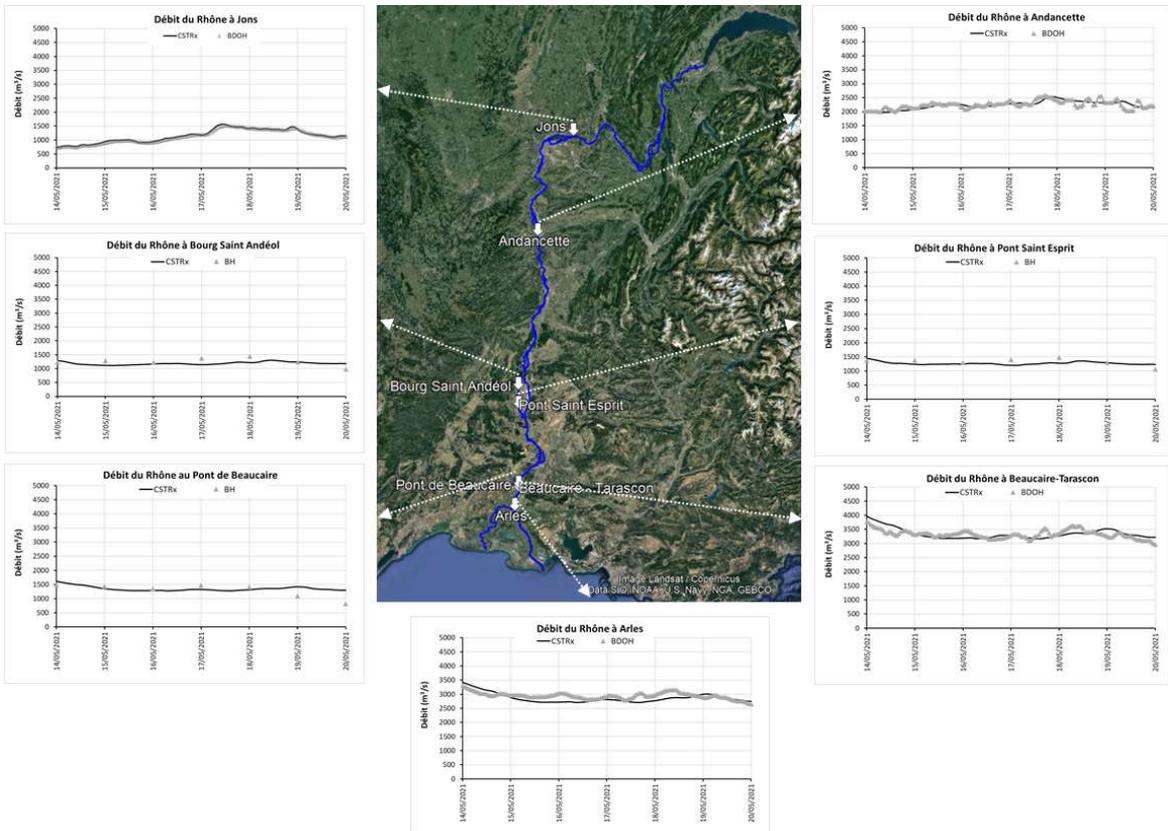


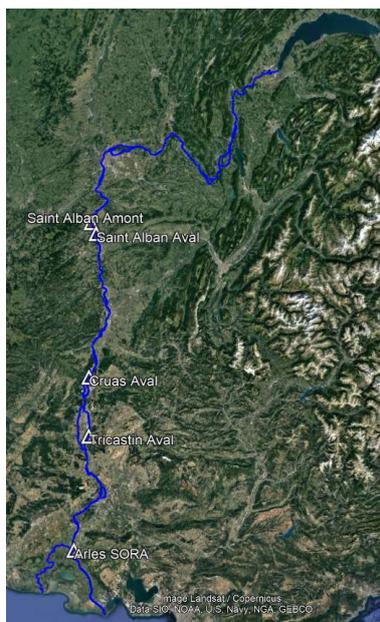
Figure 19. Débits modélisés vs mesurés pour le Rhône en crue

Malgré la simplicité du modèle hydraulique et l'absence de modélisations spécifiques des ouvrages, l'accord entre les débits modélisés et mesurés est globalement satisfaisant pour les trois conditions et ce d'autant plus que la station est en amont dans le réseau et que les débits sont élevés. Les résultats sont corrects aux stations des bras du vieux Rhône de Bourg Saint-Andéol, Pont Saint Esprit et Pont de Beaucaire, bien que des écarts significatifs, non visibles sur ces résultats, apparaissent pendant les phases de fortes transitions de débit en raison des calibrations spécifiques à chaque campagne des coefficients de Strickler et des largeurs des sections entrantes des bras du vieux Rhône. Ainsi, la principale piste d'évolution pour renforcer l'intérêt opérationnel de ce modèle hydraulique est l'ajout de fonctionnalités pour consigner ces paramètres en fonction des conditions de débits. Plus généralement, ces écarts seront nécessairement atténués avec un modèle plus physique de type Barré de Saint-Venant 1D intégrant le fonctionnement des ouvrages, comme c'est le cas avec le code MAGE de l'INRAE.

A l'étiage (Figure 17), il est surprenant que les débits mesurés à la station de Arles, à l'aval de la diffluence du petit Rhône, soient supérieurs à ceux de la station de Beaucaire-Tarascon, en amont de la diffluence.

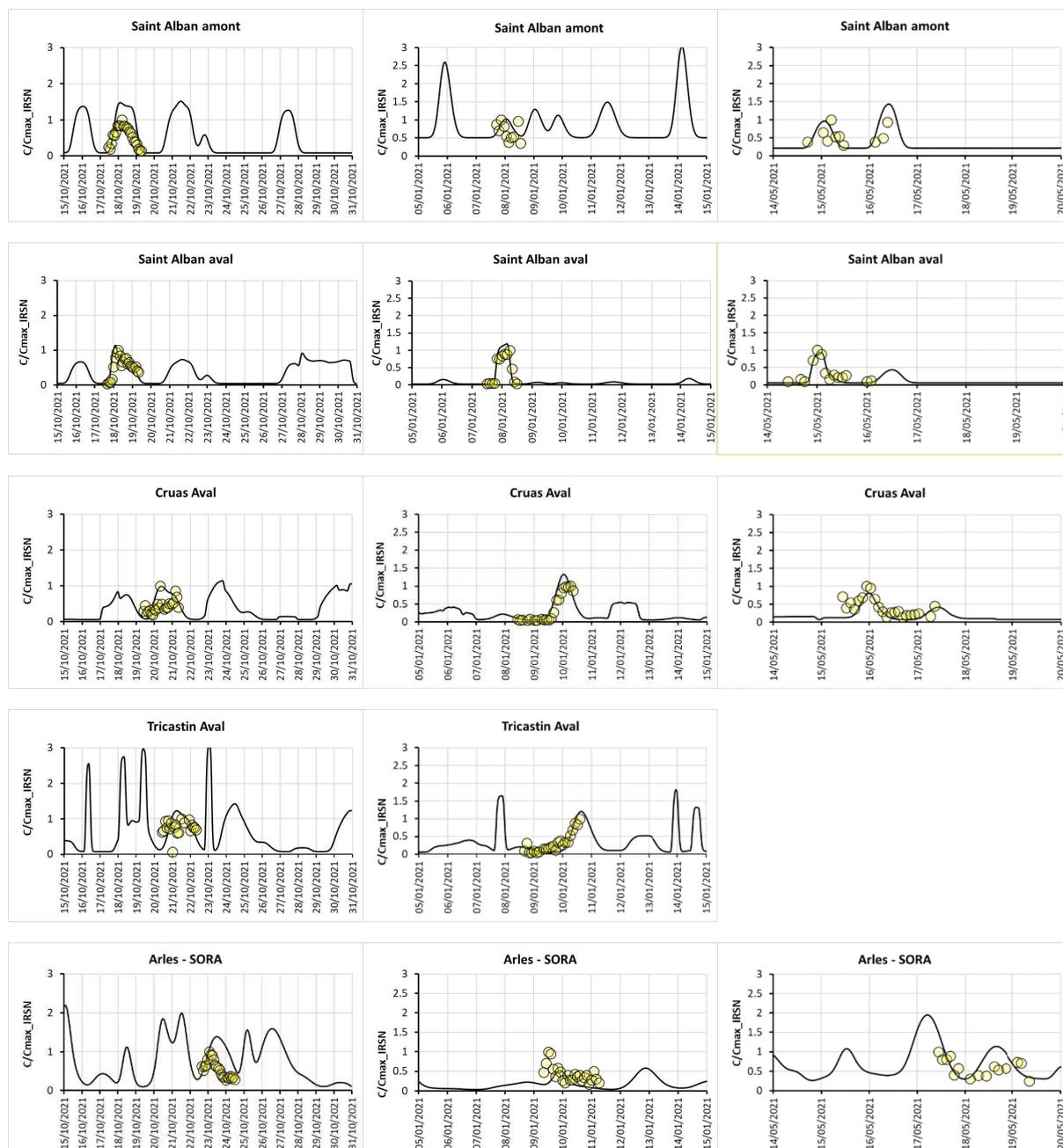
### 2.3.2. Dispersion

Pour les trois conditions de débit, l'évaluation du modèle de dispersion a porté sur la comparaison des chroniques de concentrations en tritium mesurées par l'IRSN à l'aval des CNPE de Saint Alban, Cruas et Tricastin et à la station SORA à Arles (Figure 20) et modélisées à partir des rejets des CNPE du Rhône et des débits et des coefficients de dispersion donnés par le modèle hydraulique.



**Figure 20.** Stations de mesure des campagnes de suivi des rejets liquide de tritium des CNPE

La Figure 21 présente les comparaisons modèle/mesure des concentrations normalisées par la concentration maximale mesurée à chaque section au cours des trois campagnes de suivi.



a Etiage

(b) Module

(c) Crue

**Figure 21. Concentrations modélisées vs mesurées aux stations de suivi**

(Courbe noire : modèle ; cercles jaunes : mesures ;  $C_{max\_IRSN}$  : concentrations maximales mesurée à chaque station et à chaque campagne)

Pour les trois conditions et sur l'ensemble des stations, l'accord est globalement satisfaisant entre les niveaux et les cinétiques de transferts des concentrations modélisées et mesurées, ce qui tend à renforcer la confiance dans l'opérationnalité du modèle vis à vis de la dispersion.

## 2.4. Conclusions et perspectives

Les actions réalisées au cours de cette première phase de l'action E2 de l'OSR 6 ont concerné l'élaboration d'un modèle de transfert des contaminants qui pourra être couplé aux outils hydro-sédimentaires du Rhône, la sélection de deux contaminants d'intérêt pour l'IRSN et les premiers tests sur le Rhône via le codage de ce modèle dans le code CASTEAURx.

A ce stade, le modèle est finalisé pour ce qui concerne les transferts dans la colonne d'eau. Il s'agit d'un modèle 1D qui prend en compte les processus de dispersion, de fractionnement liquide/solide avec plusieurs classes de particules en suspension et les décroissances et filiations radioactives qui ont été introduites pour répondre aux besoins de l'IRSN. Par la suite, des réactions chimiques spécifiques à d'autres types de contaminants pourront être ajoutées selon le même schéma d'implémentation.

Pour tester ce modèle, l'IRSN a identifié deux contaminants d'intérêt qui sont le tritium et le césium 137. Ces deux radionucléides sont bien documentés sur le Rhône et ils ont des comportements suffisamment contrastés pour évaluer les deux principaux aspects du modèle de transfert : la dispersion avec le tritium et le fractionnement liquide/solide avec le césium 137.

Le modèle de transfert est codé dans le code CASTEAURx et des premiers tests de calibration ont été menés sur le Rhône grâce à une collaboration avec EDF qui a permis de suivre la dispersion des rejets de routine de tritium des CNPE du Rhône entre le CNPE du Bugey et les embouchures marines pour des conditions d'étiage, de module et de crue. La confrontation du modèle aux mesures réalisées pendant ces suivis a donné des résultats satisfaisants pour les niveaux et les cinétiques de transfert des concentrations.

Les étapes suivantes vont concerner les tests du modèle de fractionnement liquide/solide dans la colonne d'eau à partir des données sur le césium 137 et l'extension du modèle de transfert aux échanges entre les colonnes d'eau et sédimentaire.

## 3. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer avec Mage et Adis-TS

### 3.1. Contexte

Le modèle du Rhône hydro-sédimentaire a été initié dans le cadre du projet Axelera-PCB (Andriès et al., 2012a ; 2012b) et poursuivi dans le cadre des programmes OSR2, OSR3 et OSR4. 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.

Actuellement le modèle présente une discontinuité au niveau de l'aménagement Génissiat, le seul barrage de moyenne chute du Rhône, les autres étant tous de basse chute. Une des actions est l'intégration de cet aménagement au modèle. Cela permettrait d'obtenir une simulation continue en partant des apports du Lac Léman et de l'Arve, et de simuler en parallèle des événements de type chasse ou APAVER ainsi que le fonctionnement classique des ouvrages du Rhône.

Dans le cadre de l'OSR 5, la modélisation de l'effet des ouvrages sur la concentration en sédiments avait été implémentée dans le code d'Adis-TS. Cette modélisation a été basée sur les travaux de Lucie Guertault dans sa thèse (2015). Le principe est de déterminer la distribution verticale de concentration en fonction de la concentration moyenne dans la section, de la hauteur et du paramètre de Rouse. En effet, les concentrations en sédiments fins ne sont constantes sur la verticale dans un profil en travers de rivière.

### 3.2. Implémentation des ouvrages dans Adis-TS

#### 3.2.1. Cas réels de la chasse du Haut-Rhône de 2012 et de l'APAVER de 2016

L'implémentation de ce module ouvrage dans Adis-TS a notamment pour objectif de pouvoir simuler de manière plus réaliste les événements au niveau du barrage de Génissiat. En effet, ce barrage étant le seul ouvrage de moyenne chute du Rhône, il possède la particularité de présenter une différence de hauteur relativement importante (plus de 50 m) entre les différentes vannes. Dans cette configuration considérer que la concentration moyenne dans la lame d'eau est représentative de la concentration au niveau des différentes vannes entraîne des erreurs sur les concentrations en sédiments à l'aval du barrage.

Le barrage de Génissiat est composé de différents orifices placés dans une configuration tridimensionnelle :

- Vanne de fond (vf), cote du radier à 262,2 m et surface d'environ 90 m<sup>2</sup>, pour les évacuations de sédiments et abaisser le plan d'eau de la retenue.
- Vanne de demi-fond (vdf), cote du radier à 285,9 m et surface d'environ 150 m<sup>2</sup>.

- Évacuateur de surface (erd), cote à 316,80 m, pour diluer les flux évacués par la vanne de fond et composé de 3 orifices en entrée (erd1, erd2, et erd3).

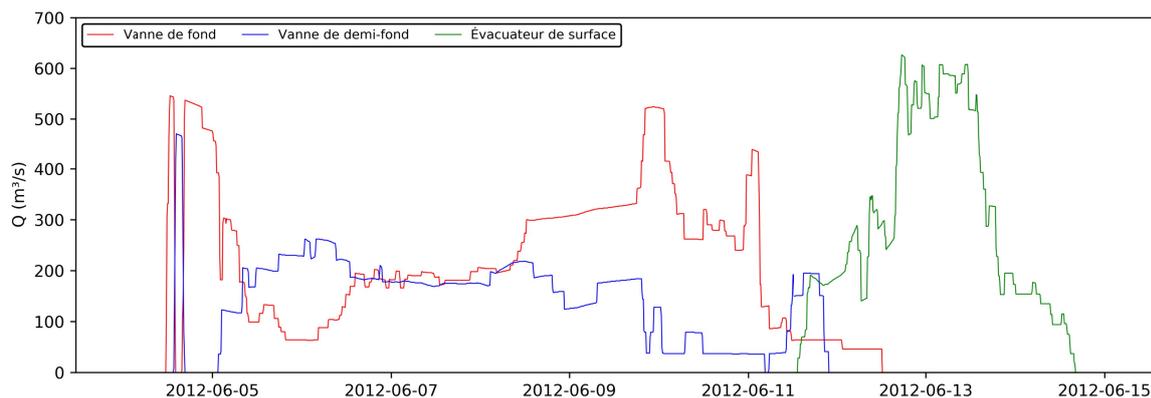
La nouvelle version d'Adis-TS permet de prendre en compte les différentes hauteurs de la prise d'eau des orifices à travers l'ouvrage. Chacun des organes (vf, vdf, erd1, erd2, erd3) est positionné à sa cote radier. Contrairement aux versions précédentes du modèle où l'ouvrage de Génissiat était représenté par une seule vanne orifice dont le débit était contrôlé par le niveau d'eau imposé à l'amont dans la retenue en respectant les règles issues de la courbe d'exploitation de la CNR (données issues de l'Étude globale du Rhône).

L'aménagement hydroélectrique du Haut-Rhône en aval des retenues suisses (comprenant les barrage-usines de Verbois à l'amont et Chancy-Pougny à l'aval) a nécessité la mise en place de mesures d'accompagnement des opérations de chasses par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). L'aménagement de Génissiat, à l'aval immédiat des retenues suisses, est la seule retenue qui permet de réguler le débit des chasses suisses et ainsi le flux de MES grâce à sa capacité de stockage importante. Ainsi, les opérations d'accompagnement des chasses par la CNR reposent avant tout sur la retenue de Génissiat. Cette régulation du débit par l'ouvrage de Génissiat est importante car elle permet un contrôle de la concentration en MES rejetées en aval.

#### **a) Chasse de 2012**

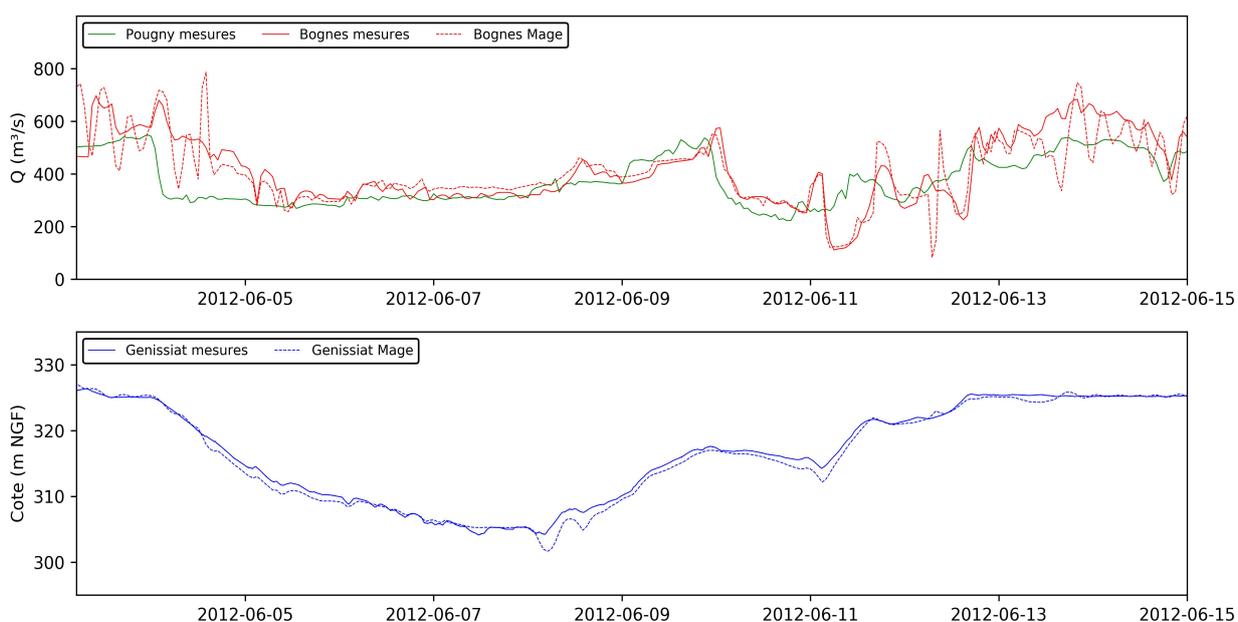
La chasse de 2012 et plus particulièrement les chroniques de concentration à l'aval de Génissiat avaient été modélisées par Lucie Guertault au cours de sa thèse. L'objectif est de pouvoir reproduire ses résultats en utilisant le nouveau module de prise en compte des ouvrages d'Adis-TS. En effet, lors de sa thèse, un module additionnel en R avait été utilisé pour calculer les concentrations au niveau des vannes, étant donné que l'ancienne version Adis-TS ne permettait pas de le faire. Le modèle était donc un modèle discontinu avec une rupture au niveau de Génissiat : Une simulation Mage / Adis-TS de Pougny jusqu'à l'amont du barrage de Génissiat, un module de calcul sous R permettant de calculer la concentration passant dans les différentes vannes de l'ouvrage à l'aide d'un modèle de distribution verticale de la concentration, enfin, une simulation Mage / Adis-TS de Génissiat jusqu'à Seyssel prenant en entrée les concentrations calculées par le module R. Le nouveau modèle est un modèle continu de Pougny jusqu'à Seyssel.

Pour ce test, la chronique de débit horaire observée est imposée en condition limite amont. Le fonctionnement hydraulique au cours du temps des différents organes, présenté figure 22 est affecté aux orifices du modèle.



**Figure 22.** Evolution des débits instantanés mesurés des différents organes de Génissiat lors de la chasse de 2012

Une des particularité de cet événement est le fonctionnement des évacuateurs de surface en seconde partie de chasse. En règle générale pour les autres évènements de chasse, ces évacuateurs ne sont pas utilisés.



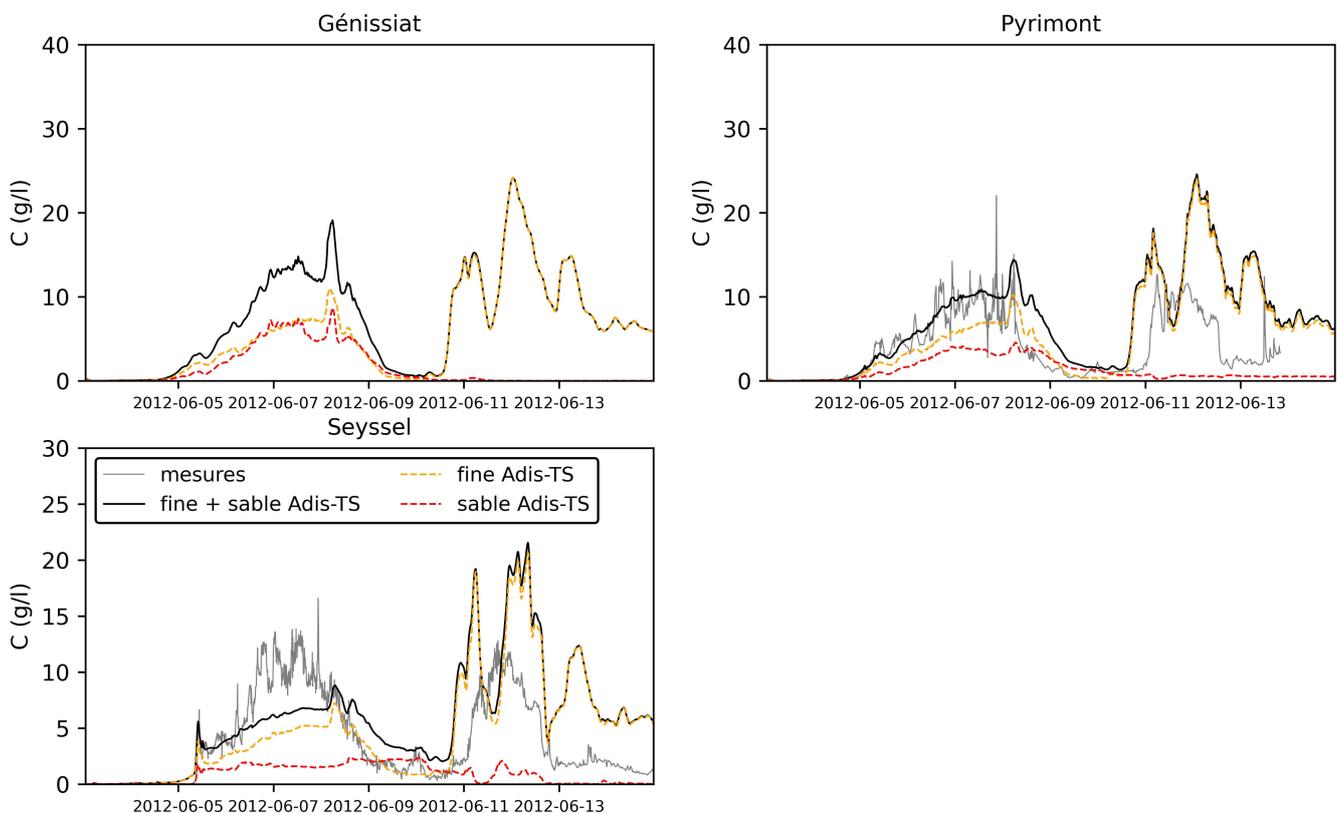
**Figure 23.** Résultats de modélisation pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel a) débits mesurés et simulés à Bognes b) cote mesurée et simulée à l'amont de Génissiat

La cote simulée au niveau de la retenue de Génissiat suit correctement celle observée. Les débits observés à Bognes sont correctement simulés sur la période du 5 au 12 juin. Des fluctuations de débit sont présentes au début et à la fin de la chasse de Verbois, liées au fonctionnement en simultané des différents orifices à différentes hauteurs sur le barrage.

Une chronique de turbidité a été enregistrée à Pougny lors de la chasse permettant d'imposer une concentration en MES pour différentes classes (6 au total allant des argiles aux sables, établies par Lucie Guertault dans sa thèse) en amont lors du calcul du transport

de MES par Adis-TS. Cette chronique observée est détaillée dans la thèse de Guertault (2015), ainsi que le choix du pourcentage de répartition des classes au cours de la chasse, et est imposée en condition limite amont. De même les conditions initiales de dépôt de sédiments répartis en amont de la retenue sont issues du travail de la thèse de Guertault (2015).

Des chroniques de concentration ont été observées à l'aval de l'ouvrage de Génissiat, à Pylimont et dans la retenue de Seyssel. Ces mesures sont comparées aux résultats de simulation d'Adis-TS prenant en compte un profil vertical de concentration au niveau de l'ouvrage pour répartir la concentration passant par les différents orifices. Les résultats, présentés en figure 24, montrent que la modélisation ne parvient pas encore à reproduire fidèlement les mesures.

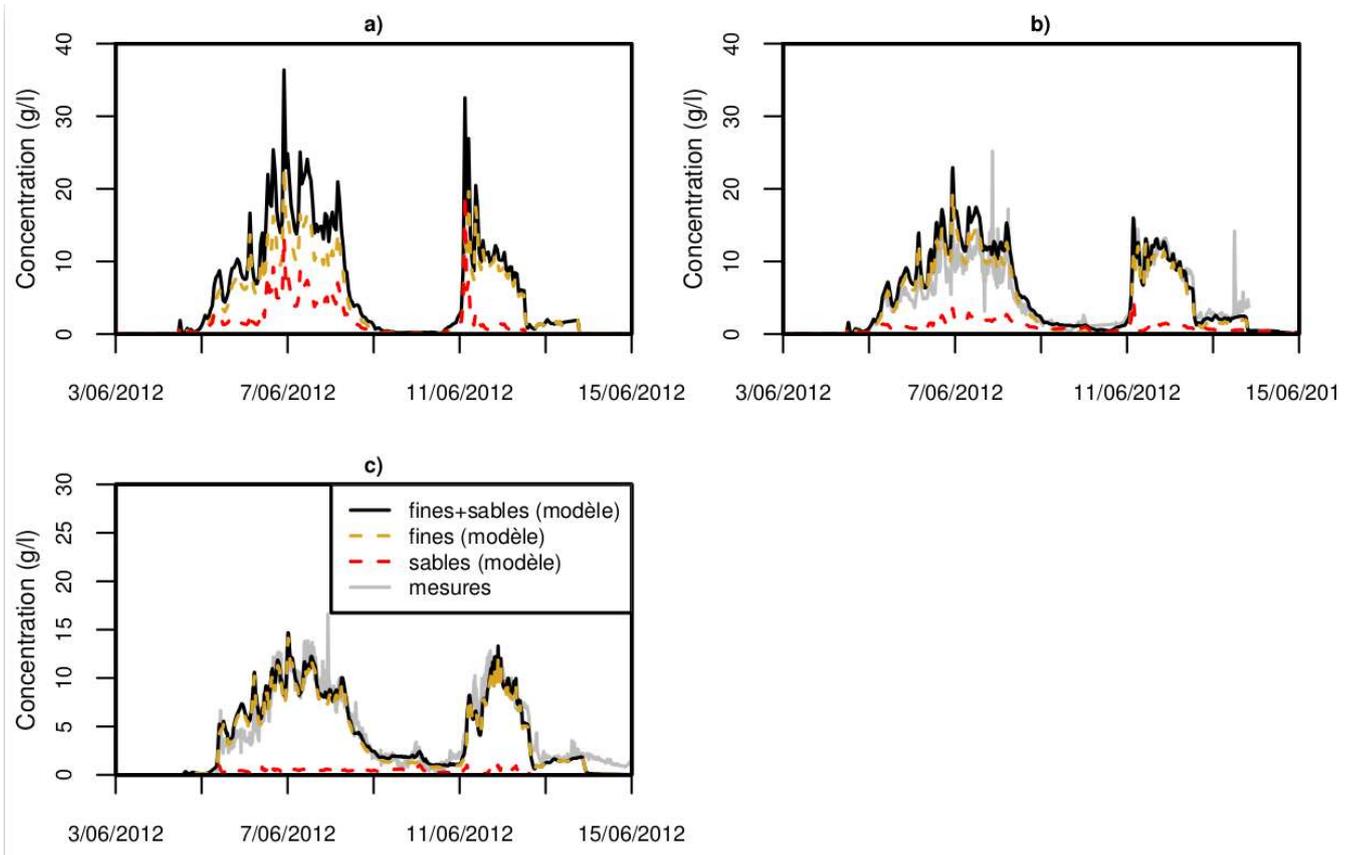


**Figure 24.** Résultats de modélisation Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel, MES mesurées et simulées à Génissiat Pylimont et Seyssel

La première phase de la chasse, entre le 5 et 9 juin, est bien représentée par le modèle, les concentrations en MES suivent correctement les concentrations observées. En revanche, dans la seconde phase de chasse entre le 11 et le 15 le modèle surestime les concentrations. De plus, on peut constater que les sédiments fins sont majoritairement présents en cette seconde partie de chasse.

Il est intéressant de comparer avec les résultats issus de la thèse de Lucie Guertault présentés figure 25, qui ont été calculés avec le module externe sous R. On constate que ce

module représente de manière beaucoup plus réaliste la dynamique sédimentaire mesurée à Pylimont et Seyssel.



**Figure 25.** Résultats issus de la thèse de Lucie Guertault pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel, MES mesurées et simulées à a) Génissiat b) Pylimont c) Seyssel

Une piste d'explication de ces différences de résultats entre le module sous R et le module intégré à Adis-TS serait dû au fonctionnement de l'évacuateur de surface. Cet évacuateur est constitué de trois pertuis à son extrémité amont et est donc représenté par 3 vannes différentes dans Mage et Adis-TS (erd1, erd2 et erd3).

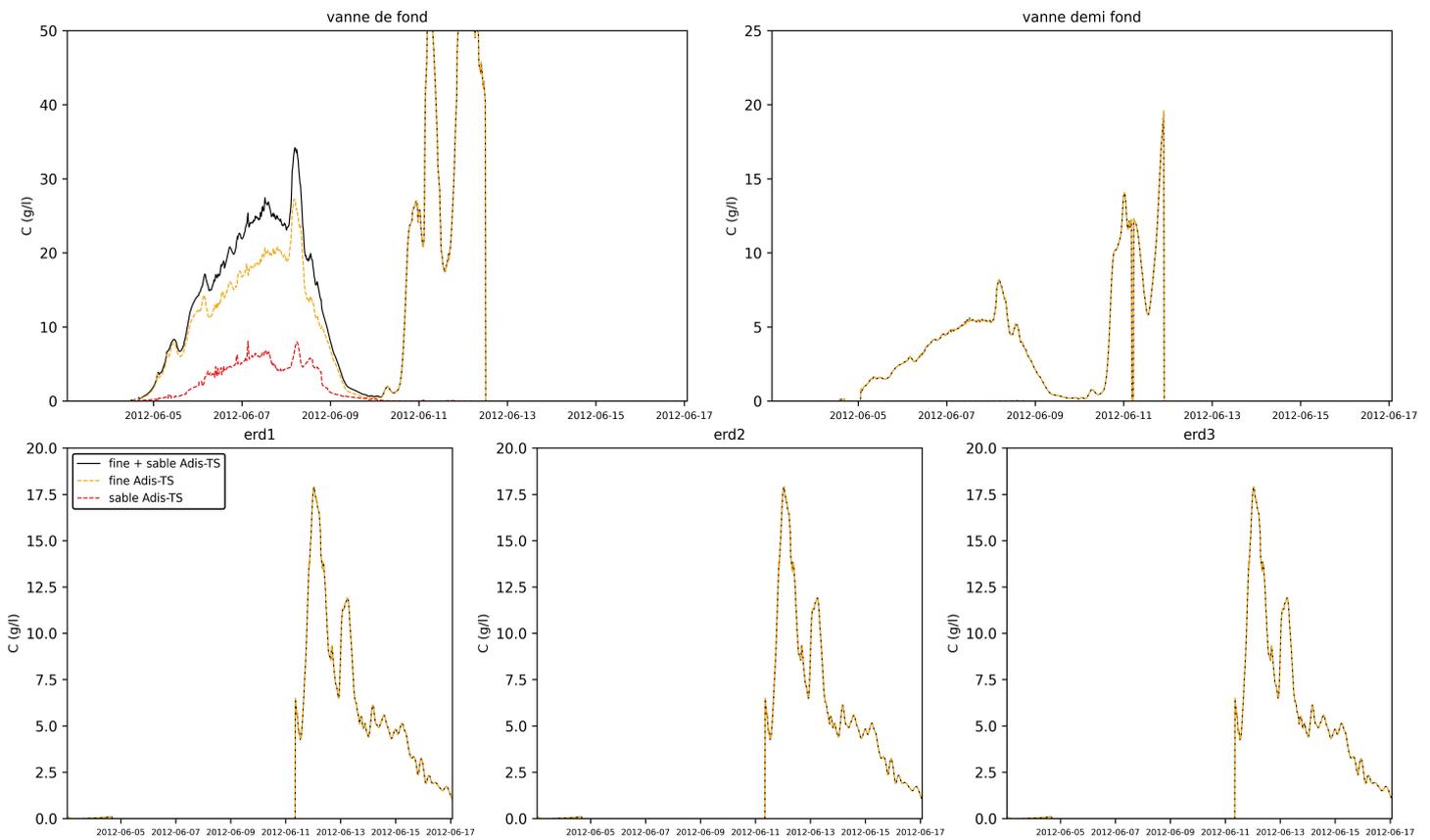
Il avait été constaté par Lucie Guertault au cours de sa thèse que le modèle 1D ne permettait pas de modéliser correctement la concentration au niveau de l'évacuateur à cause sa proximité avec un talus rocheux. Dans son module R, elle a donc utilisé la formule empirique suivante pour calculer la concentration au lieu du modèle de répartition verticale des concentrations :

$$c_{ERD} = \alpha_{ERD} \left( \frac{\tau_{ERD}}{\tau_c} - 1 \right)$$

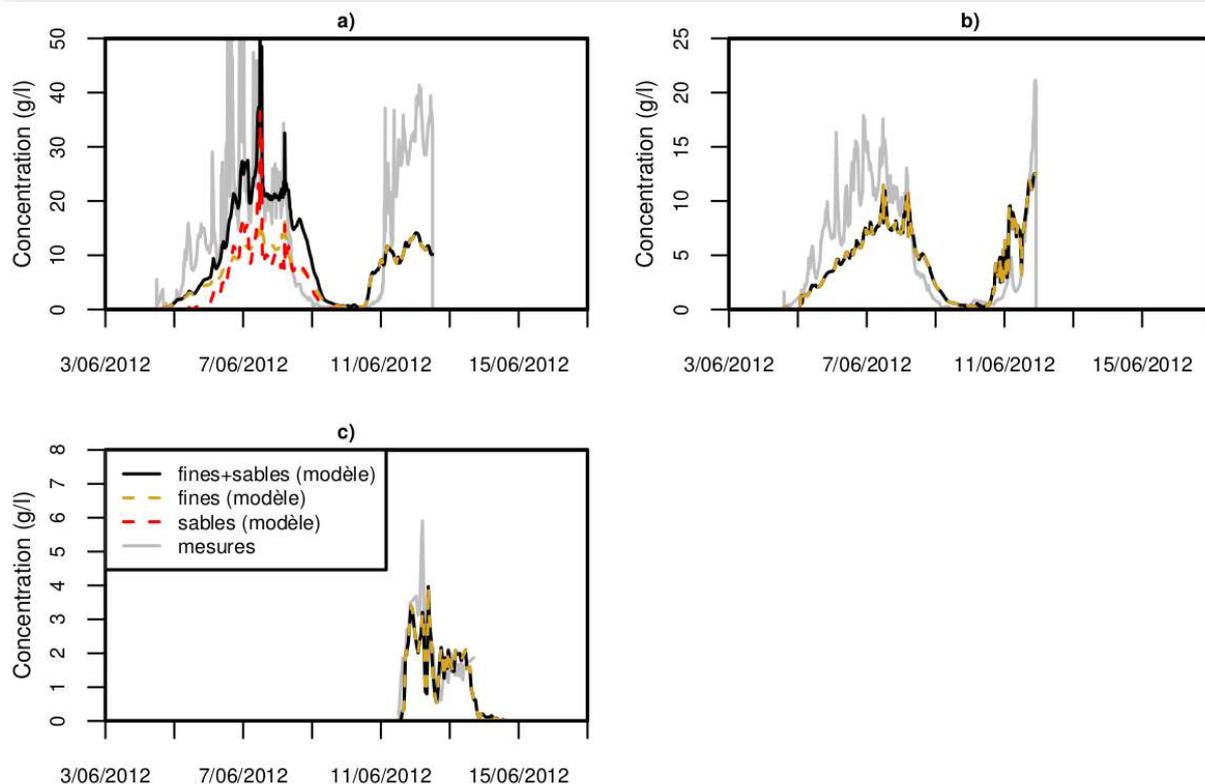
Où  $\tau_{ERD}$  est la contrainte locale,  $\tau_c$  est une contrainte critique fixée à 0,15 Pa (correspondant à la contrainte de mise en mouvement des argiles et limons) et  $\alpha_{ERD}$  est un paramètre de calage.

Ceci constitue la différence principale entre le module R et le module Adis-TS.

Il est donc intéressant de regarder la concentration en MES qui passe au niveau des différentes vannes de Génissiat, avec la modélisation Adis-TS, figure 26, et avec le module R, figure 27.



**Figure 26.** Résultats de modélisation Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel, MES simulées transitant par les différents organes de Génissiat : vanne de fond, de demi-fond et évacuateurs de surface erd1, erd2 et erd3



**Figure 27.** Résultats issus de la thèse de Lucie Guertault pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel, MES mesurées et simulées au niveau de a) la vanne de fond b) la vanne de demi-fond c) l'évacuateur de surface

On peut constater que dans le modèle Adis-TS, la concentration au niveau des évacuateurs de surface est plus élevée que dans les résultats de la thèse.

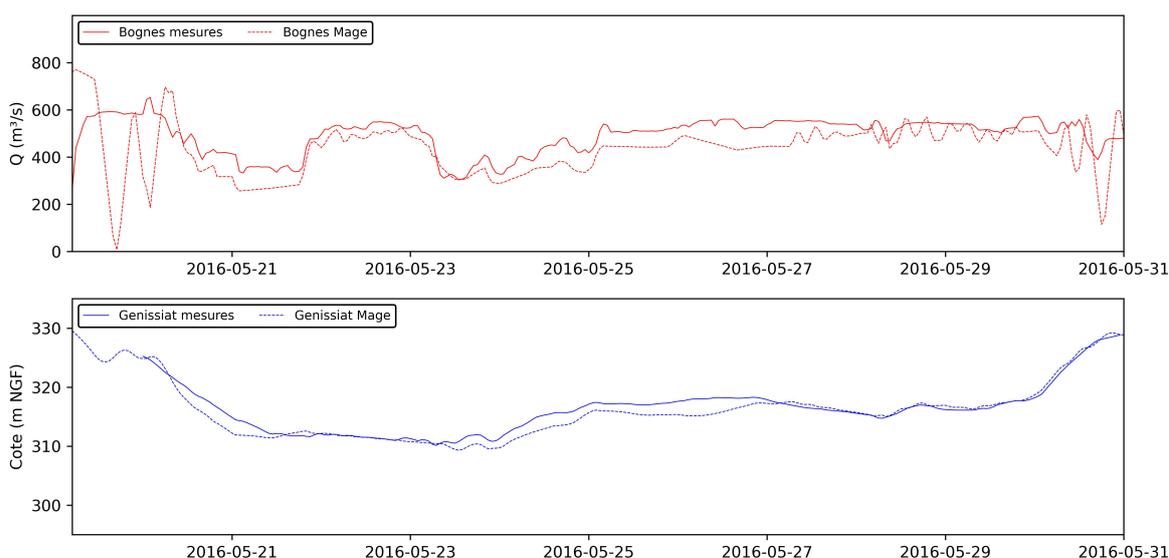
Cet excès de concentration au niveau des évacuateurs pourrait expliquer pourquoi la concentration en aval du barrage est trop élevée en seconde partie de chasse. En effet, l'évacuateur de surface était en fonctionnement uniquement lors de la seconde partie de la chasse, comme représenté en figure 22.

En conclusion, on a pu constater que la distribution verticale des concentrations n'était pas représentative de la concentration au niveau de l'évacuateur de surface de Génissiat, celle-ci étant dépendante des conditions locales (l'évacuateur de surface est situé proche de la berge au niveau d'un talus rocheux). Par conséquent, le module Adis-TS ne permet pas d'obtenir une modélisation satisfaisante. Actuellement, la formule empirique utilisée par Lucie Guertault pour calculer la concentration au niveau de l'évacuateur n'est pas incluse code. Il pourrait être envisagé de l'ajouter afin de pouvoir avoir une représentation correcte des concentrations en MES au cours de cet événement. Cependant, il est nécessaire de garder à l'esprit que le module a vocation à pouvoir être utilisé pour tout type d'ouvrage et pas uniquement celui de Génissiat. De plus, comme évoqué précédemment, l'utilisation de l'évacuateur de surface en cas de chasse reste exceptionnelle.

## b) APAVER de 2016

Le même exercice que celui fait précédemment sur la chasse de Verbois de 2012 a été réalisé sur l'APAVER de 2016. Pour cette opération, contrairement à la précédente, les évacuateurs de surface n'ont pas été en fonctionnement.

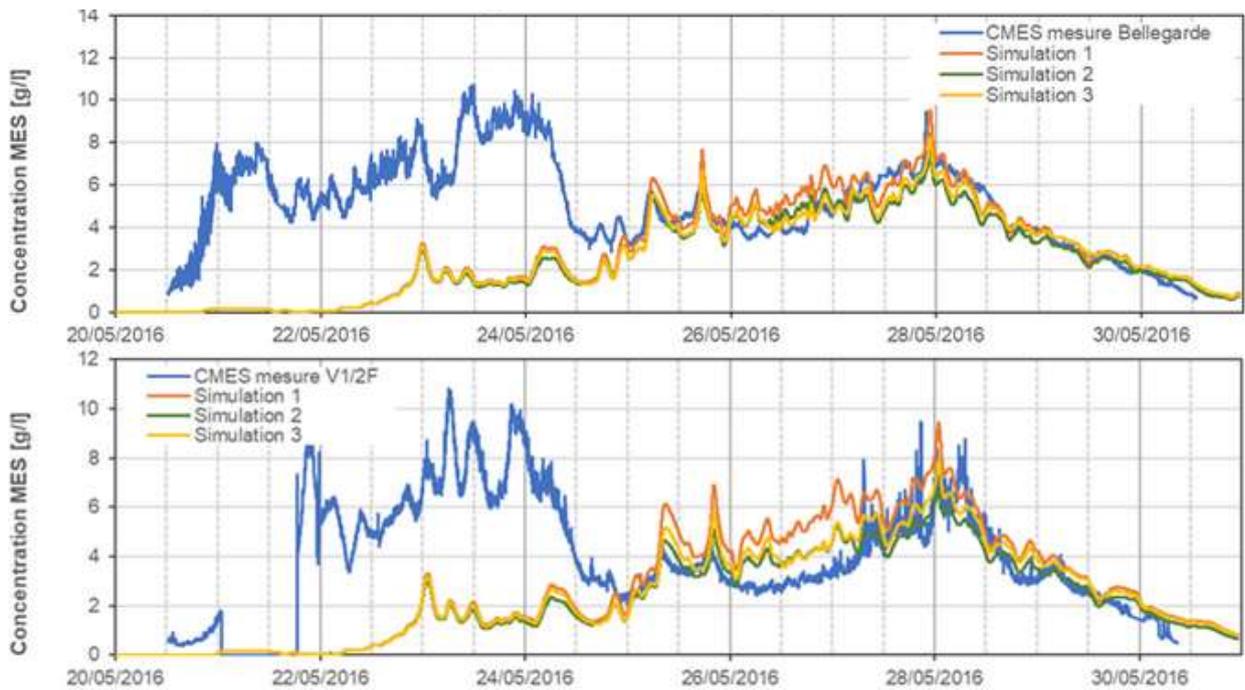
A nouveau pour cet événement, les chroniques de débits au niveau de Pougny sont connues et imposées comme condition limite amont. Tout comme le fonctionnement des vannes de fond et de demi-fond au cours du temps de l'ouvrage de Génissiat.



**Figure 28.** Résultats de modélisation pour l'APAVER de 2016 entre Pougny et Seyssel a) débits mesurés et simulés à Bognes b) cote mesurée et simulée à l'amont de Génissiat

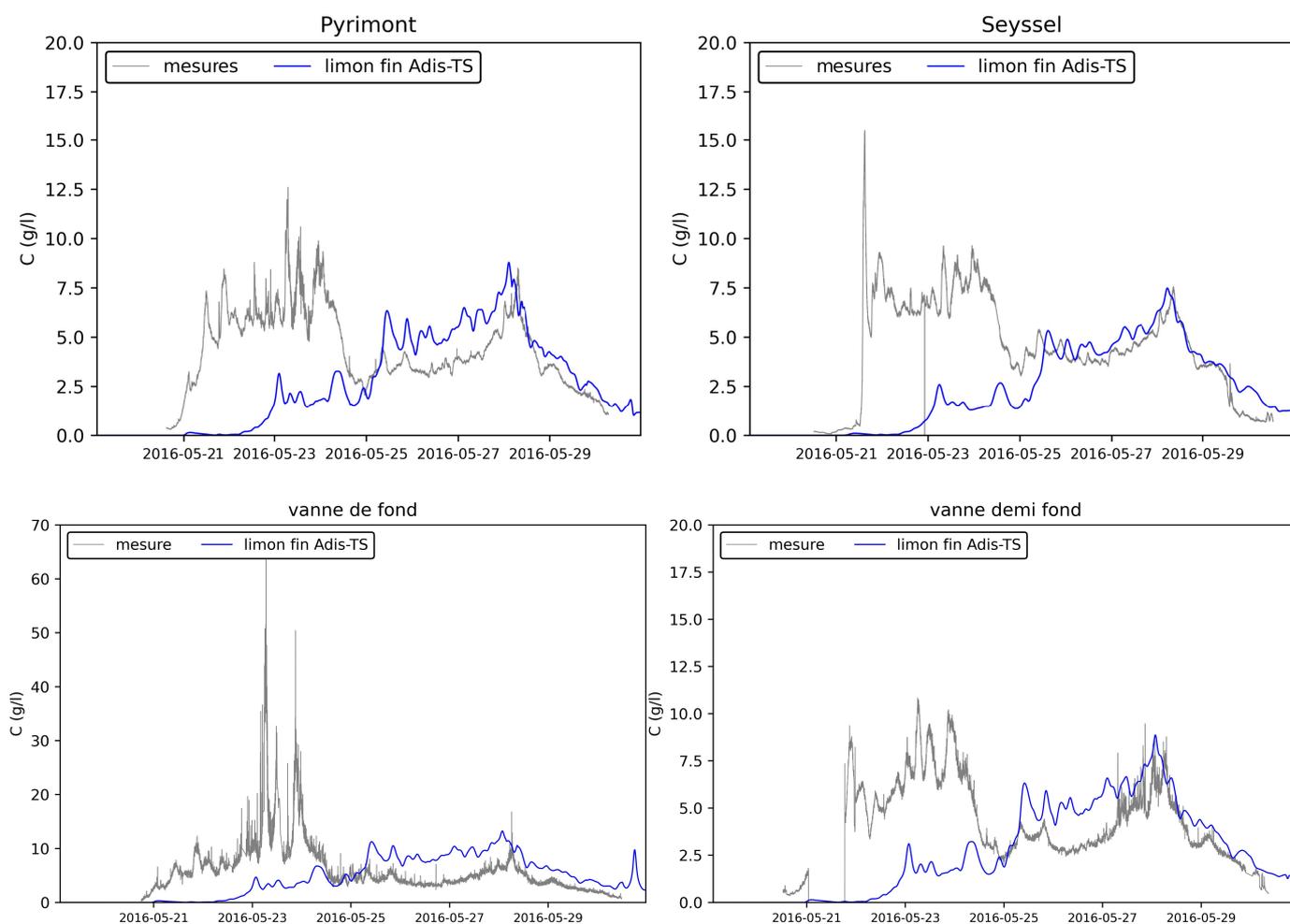
Comme observé figure 28, la cote simulée par Mage au niveau de la retenue de Génissiat correspond aux mesures. Le débit simulé au niveau de Bognes est proche de celui mesuré sauf en début et fin de simulation où on peut observer des oscillations. Celles-ci peuvent être reliées au fonctionnement en simultané des différentes vannes de l'ouvrage.

Comme pour l'APAVER de 2012, les chroniques de concentration en MES ont été enregistrées à Pougny lors de la chasse et sont imposées en condition amont. Pour cet événement, nous n'avons pas le détail de la décomposition granulométrique. Il a donc été choisi de considérer uniquement du limon fin comme sédiment. En effet, les simulations réalisées par Violaine Dugué illustrés figure 29 tendent à prouver que la granulométrie du signal amont ne fait pas varier sensiblement les résultats.



**Figure 29.** Résultats de modélisation de Violaine Dugué pour l'APAVÉR de 2016 concentration mesurée et simulée à Bellegarde et dans la vanne de demi-fond ; Simulation 1 : 100% limon fin ; Simulation 2 : 100% limon grossier ; Simulation 3 : mesures granulométriques

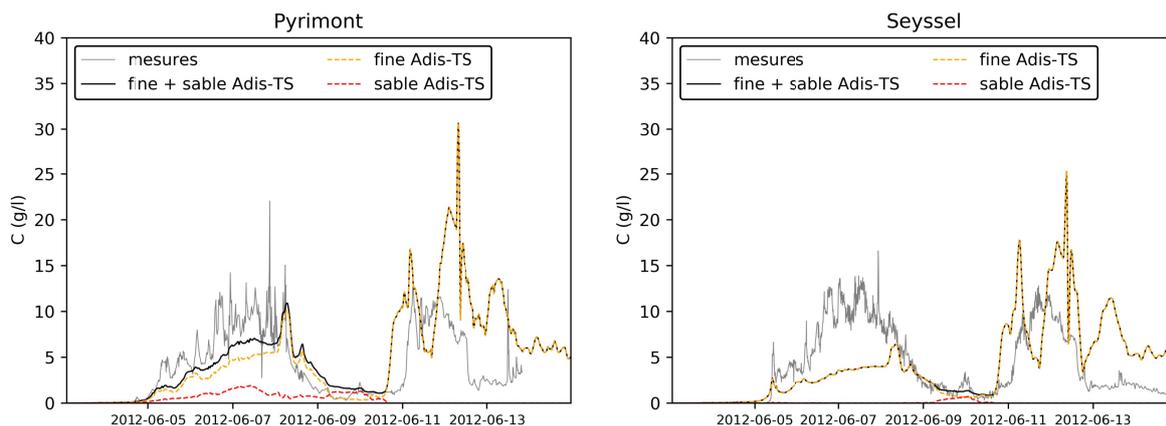
Les chroniques de concentration en MES ont été simulées et comparées aux mesures en différents points ; à l'aval de Génissiat (Pyrimont et Seysel) et dans les vannes de l'ouvrage de Génissiat. Les résultats sont présentés figure 30.



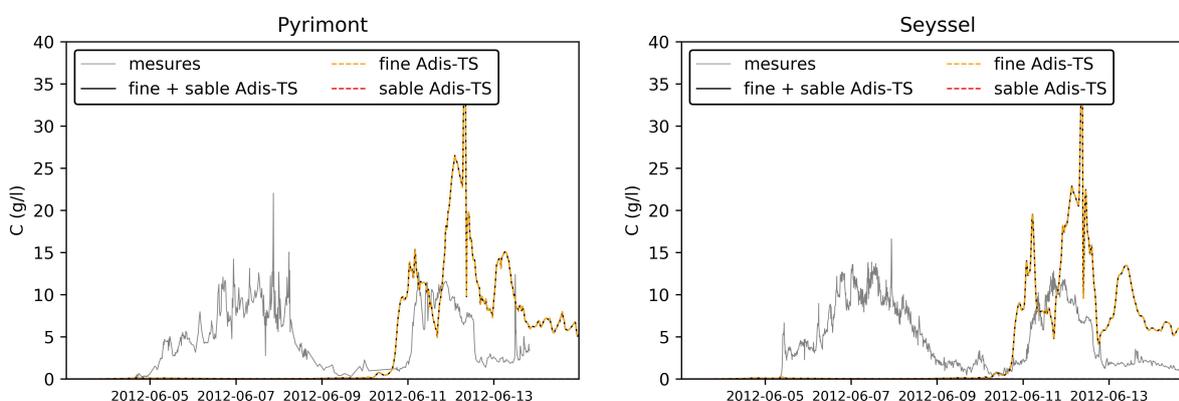
**Figure 30.** Résultats de modélisation Adis-TS pour l'APAVER de 2016 entre Pougny et Seyssel, MES mesurées et simulées à Pyrimont, Seyssel, dans les vannes de fond et de demi-fond

Les concentrations en MES simulées par Adis-TS aux différents points sont relativement proches des mesures en seconde partie de chasse, en particulier au niveau de Seyssel qui est le point de sortie du modèle. Et ces résultats semblent équivalents à ceux obtenus par Violaine Dugué illustrés figure 29. La modélisation s'éloigne des mesures en première partie de chasse mais cela s'explique par le fait que l'étude porte uniquement sur la propagation du signal amont. Les simulations sont réalisées sans conditions initiales de dépôts de sédiments sur le fond, ce qui cause une sous-estimation du transport solide dans la première partie de la chasse.

Les simulations réalisées sur la chasse de 2012 avaient en effet pu montrer que la première phase de suspension observée est associée à une reprise des sédiments sur le fond, et non pas à la propagation du signal amont. En effet, sans conditions de reprise, les concentrations en MES étaient quasi nulles en première partie de chasse, comme illustré figures 31 et 32.



**Figure 31.** Résultats de modélisation d'Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel avec une condition initiale de dépôt de sédiments a)MES mesurées et simulées à Pylimont b:) MES mesurées et simulées à Seyssel



**Figure 32.** Résultats de modélisation d'Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel sans condition initiale de dépôt de sédiments a)MES mesurées et simulées à Pylimont b:) MES mesurées et simulées à Seyssel

Cette étude permet de valider le bon fonctionnement du module barrage d'Adis-TS. En effet, au niveau de barrage de Génissiat en l'absence de fonctionnement de l'évacuateur de surface, le module permet d'obtenir des modélisations de concentration en MES proches de la réalité.

### 3.3. Implémentation du charriage dans 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.

### 3.3.1. Cas test – Respiration du lit

L'objectif de ces tests était de reproduire le phénomène de respiration du lit avec le module de transport solide par charriage de mage.

Le phénomène de respiration du lit est un phénomène qui se produit au passage d'une crue. Il consiste en une érosion importante du fond suivi d'un dépôt jusqu'à revenir à l'état initial.

Ce phénomène a été mis en évidence par l'utilisation de chaînes d'érosion (Laronne et al., 1994). Il est généralement observé dans les lits de rivières présentant des singularités locales comme au niveau de ponts, de stations de mesure, etc.

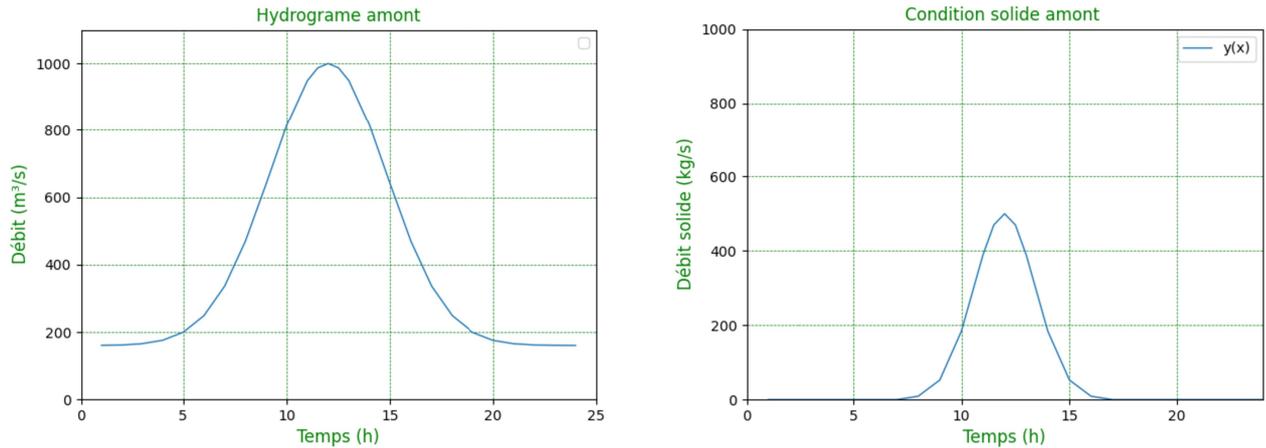
L'objectif des tests réalisés est en premier lieu de regarder s'il est possible reproduire un tel phénomène par simulation numérique, et dans un second temps de tester si les singularités locales sont nécessaires à l'apparition du phénomène.

Les simulations sont basées sur un canal rectangulaire simple de 1000 m de long et de 100 m de large présentant un lit mobile. Les paramètres hydrologiques et sédimentaires utilisés sont décrits dans le tableau 1.

**Tableau 1. Résumé des paramètres hydrologiques et sédimentaires**

Diamètre des grains D50 (m)	Étendue granulométrique $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$	Masse volumique du sédiment $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Porosité $\epsilon$	Distance de chargement (m)	Pente du fond (m/m)	Strickler K ( m <sup>1/3</sup> /s)
0,05	1	2650	0,4	0	0,003	30

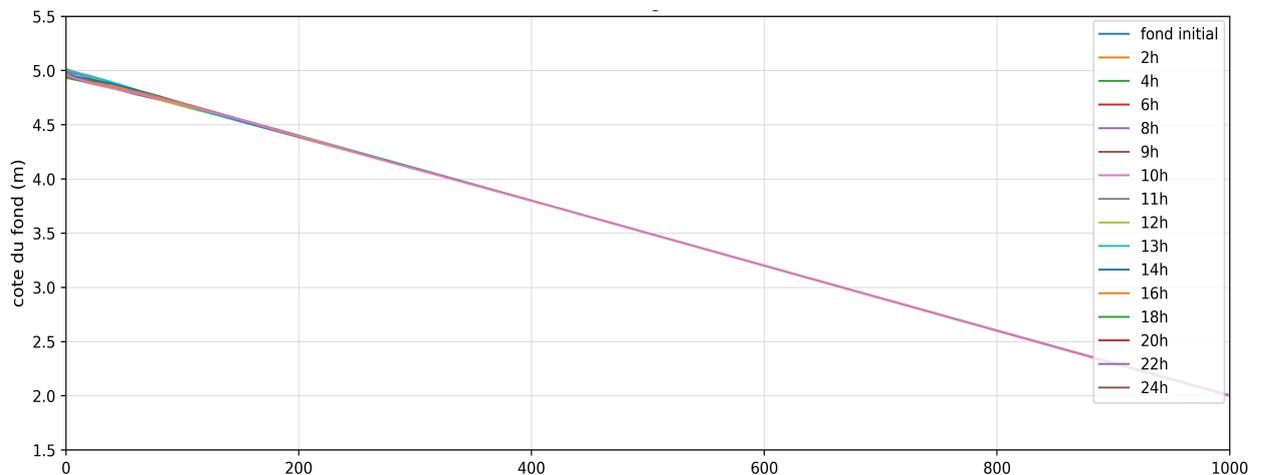
Des hydrogrammes de crue représentés par des gaussiennes de 1000 m<sup>3</sup>/s en maximum pour le débit liquide et de 500 kg/s maximum pour le débit solide sont imposés comme condition à la limite amont.



**Figure 33.** Conditions hydraulique et sédimentaire à l'amont

### a) Canal rectangulaire simple sans singularité

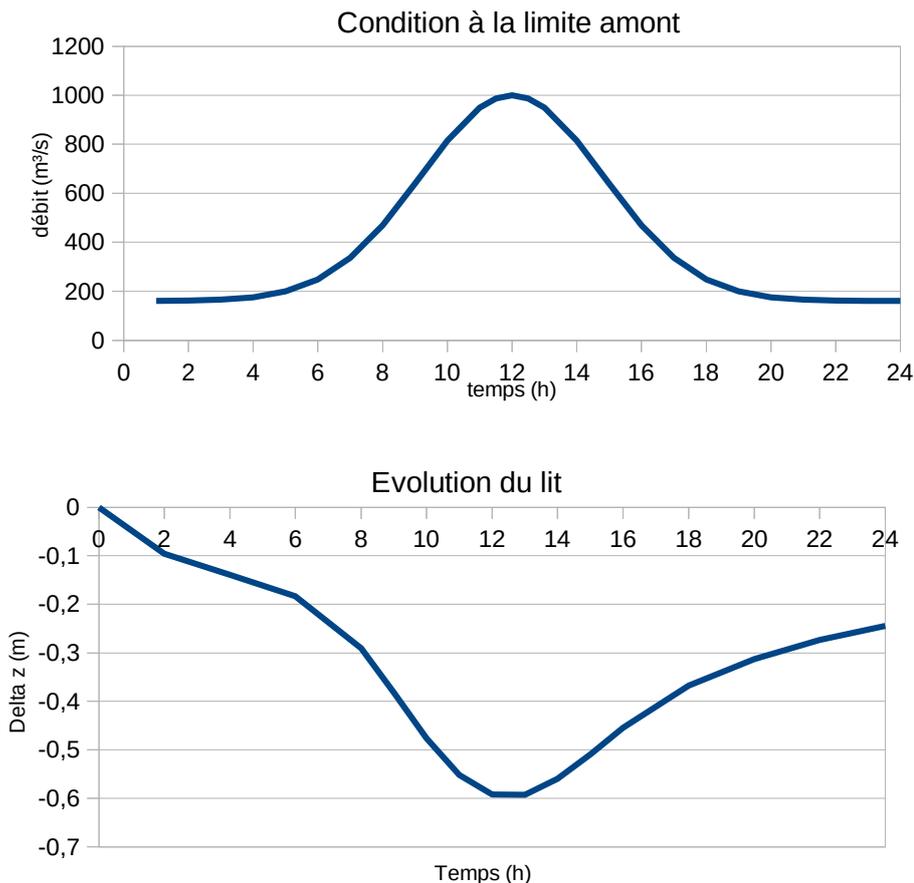
Dans un premier temps, on a considéré un canal simple rectangulaire sans déformations. L'évolution du fond a été modélisée avec Mage charriage et les résultats sont présentés figure 34. On constate que le phénomène de respiration du lit n'est pas observé, le fond du lit reste stable au passage de la crue.



**Figure 34.** Résultats de modélisation mage charriage pour l'évolution du fond du canal

### b) Canal rectangulaire avec rétrécissement du lit

Pour ce 2ème test, un rétrécissement a été introduit dans le canal. Celui-ci initialement d'une largeur de 100 m, passe à une largeur de 80 m sur 10 m de long. L'évolution de la variation de la hauteur du fond a été mesurée au niveau du rétrécissement. Les résultats sont présentés figure 35.



**Figure 35.** Résultats de modélisation mage charriage pour l'évolution du fond du canal dans le cas d'un rétrécissement du lit

On constate qu'au niveau du rétrécissement le phénomène de respiration du lit est bien observé. On peut constater une érosion du fond suivie d'un dépôt suivant le pic de crue.

Le module de modélisation de l'évolution des fonds et du transport solide par charriage de Mage est ainsi capable de reproduire ce phénomène. De plus, ces tests sembleraient montrer que la présence d'une singularité locale serait une condition nécessaire à l'apparition du phénomène.

### 3.4. Autres modifications du code et perspectives

#### 3.4.1. Modifications du code

##### a) Mage 8

Le code de mage8 a été modifié de manière à pouvoir accepter deux formats de date différents : le format précédent correspondant à JJJ:HH:MM:SS et le nouveau format correspondant à une date réelle au format ISO : Année-mois-jourTHH:MM:SS. Le format précédent s'exprimait par rapport à un temps zéro défini classiquement au début de la

simulation. Cette configuration rendait difficile la gestion d'évènements régulier, et demandait une étape de conversion des données issues de mesures. Le nouveau format permet de rentrer les dates "réelles" des évènements, facilite la gestion des ouvrages qui ont un comportement cyclique, par exemple journalier ou hebdomadaire, et est bien plus adapté aux simulations longues. Les deux formats peuvent cohabiter dans un modèle.

### b) Adis-TS

Le code d'Adis-TS a également été modifié dans le cadre de la thèse de Nicolas Noclin afin de permettre un plus grand contrôle de l'utilisateur en ce qui concerne les phénomènes de dépôt et d'érosion.

L'utilisateur a maintenant la possibilité de définir 2 valeurs différentes pour le coefficient de calage adp, une valeur pour le dépôt et une pour l'érosion. Ainsi, si on se trouve en situation de dépôt, le code utilisera la valeur adp dépôt, et inversement dans le cas de l'érosion. Cela permet également de réaliser des simulations sans dépôts ou sans érosion en définissant des paramètres adp dépôt ou érosion nuls.

Ensuite, il est également possible pour l'utilisateur de donner directement des valeurs à la contrainte critique de mise en mouvement  $\tau_{cr}$ . A nouveau, on peut définir une valeur pour le dépôt, et une valeur pour l'érosion.

En l'absence de valeur fournies par l'utilisateur, la contrainte critique est calculé par défaut en utilisant le paramètre de Shields avec l'approximation de Soulsby et Whitehouse (1997) comme dans la version précédente du code.

### 3.4.2. Perspectives

Pour la suite de l'OSR 6 d'autres modifications de Mage 8 et Adis-TS sont prévues ;

- Concernant les ouvrages, l'implémentation de deux modes de fonctionnement, un mode par défaut et un mode de type événementiel. Cela permettrait de modéliser plus simplement les périodes de chasse et d'APAVÉR
- Sur le module charriage et évolution des fonds, l'ajout de nouvelles fonctionnalités comme par exemple le calcul automatique des conditions amont solides, plusieurs modes de répartition des dépôts dans la section, la visualisation et l'extraction des résultats, etc.
- Ajout de nouveaux outils de visualisation 3D des résultats hydrauliques et de l'évolution des fonds de Mage 8
- Proposer un modèle de transferts de contaminants dans Adis-TS similaire à celui développé par l'IRSN avec CASTEAURx

En parallèle de nouvelles actions pourront être réalisées en vue d'améliorer le modèle Rhône avec Mage et Adis-TS ;

- Modèle continu de la frontière suisse (Pouigny) jusqu'à Lyon sur ces 20 dernières années en incluant le fonctionnement de Génissat (et des autres ouvrages) au cours des événements d'APAVÉR
- Calage des ouvrages de Verbois et Chancy-Pouigny
- Modèle continu depuis le Lac Léman jusqu'à Lyon sur ces 20 dernières années (ne incluant le fonctionnement des ouvrages lors des événements particuliers type APAVER)
- Modélisation de l'APAVÉR de 2021
- Continuer les tests et la validation sur le module charriage et évolution des fonds, notamment sur l'évolution granulométrique
- Tester le module charriage et évolution des fonds sur des cas réels (tronçons d'intérêt sur le modèle Rhône)
- Reproduire les simulations Basement sur les secteurs de Péage de Roussillon et Donzère Mondragon avec Mage 8 et le module charriage et évolution des fonds

### 3.5. 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. 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, différents modèles Mage et Adis-ts ont été réalisés afin d'intégrer les mesures de géométrie et de débits réalisées sur le terrain, et de présenter différents scénarios de décomposition granulométrique.

- Modélisation de temps de propagation de crues sur le modèle du Rhône dans le cadre de la thèse de Mathieu Lucas.

- Formations aux logiciels Pamhyr/Mage, Adis-ts et aide ponctuelle concernant leur utilisation à différents utilisateurs : Kevin Galamin ; stagiaire INRAE 2021, Sylvain Coulibaly ; contractuel INRAE, Purnima Das ; stagiaire INRAE 2022, Felipe Alberto MENDEZ RIO ; contractuel INRAE

---

## 4. Bibliographie

Bravard J.-P., Clémens A. (ed.) (2008). *Le Rhône en 100 Questions*. ZABR, GRAIE.

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.

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>

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

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<sup>ème</sup> Programme d'Actions. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03293545>

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://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03322601v1>

Abril J.M., Fraga E. (1996). Some physical and chemical features of the variability of Kd distribution coefficients for radionuclides. *J. Environ. Radioactivity* 30(3), 253-270.

Antonelli C., Eyrolle F., Rolland B., Provansal M., Sabatier F. (2008). Suspended sediment and <sup>137</sup>Cs fluxes during the exceptional December 2003 flood in the Rhône River, southeast France. *Geomorphology*, 95, 350-360.

Eyrolle F., Radakovitch O., Raimbault P., Charmasson S., Antonelli C., Ferrand E., Aubert D., Raccasi G., Jacquet S., Gurriaran R. (2012). Consequences of hydrological events on the delivery of suspended sediment and associated radionuclides from the Rhône River to the Mediterranean Sea. *J Soils Sediments*, 12, 1479-1495.

Eyrolle F., Lepage H., Antonelli C., Morereau A., Cossonnet C., Boyer P., Gurriaran R. (2020). Radionuclides in waters and suspended sediments in the Rhône River (France) - current contents, anthropic pressures and trajectories. *Science of the Total Environment*, 723, 137-873.

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 <sup>137</sup>Cs in the Rhone River (France). *Environmental Modelling and Software*, 145, 13p.

Zebracki M., Eyrolle-Boyer F., Evrard O., Claval D., Mourier B., Gairoarde S., Cagnat X., Antonelli C. (2015). Tracing the origin of suspended sediment in a large Mediterranean river by combining continuous river monitoring and measurement of artificial and natural radionuclides. *Science of the Total Environment*, 502, 122-132.

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.



## Observatoire des Sédiments du Rhône

### Dispositifs scientifiques cadres



### Partenaires scientifiques



### Partenaires techniques et financiers

