



HAL
open science

Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer

Léa Kieffer, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Théophile Terraz, Patrick Boyer,
Hugo Lepage

► **To cite this version:**

Léa Kieffer, B. Camenen, Jérôme Le Coz, Théophile Terraz, Patrick Boyer, et al.. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer. [Rapport de recherche] INRAE; IRSN. 2024. hal-03750733v3

HAL Id: hal-03750733

<https://hal.science/hal-03750733v3>

Submitted on 27 Aug 2024

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 final

Version du 11 avril 2024

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

Léa Kieffer (INRAE, RiverLy), Benoît Camenen (INRAE, RiverLy), Jérôme Le Coz (INRAE, RiverLy), Théophile Terraz (INRAE, RiverLy), Patrick Boyer (IRSN, LRTA), Hugo Lepage (IRSN, LRTA)

Pour citer ce rapport

Kieffer, L., Camenen, B., Le Coz, J., Terraz, T., Boyer, P. & Lepage, H. (2024). *Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône du Léman à la mer*, Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Action E2, 42 p.

L'OSR est un programme animé par le Graie. Pour toute information vous pouvez contacter

Bertrand Morandi (bertrand.morandi@graie.org)

Résumé

Ce rapport regroupe les actions menées au cours du programme OSR 6 dans le but d'améliorer le modèle 1D OSR du Rhône du Léman à la mer et les codes de calcul associés (Mage, Mage-charriage et AdisTS). Concernant la modélisation, la principale action a été la modélisation des processus de dépôt/érosion dans les retenues du Haut-Rhône sur la période de 2008 à 2020. Concernant les codes de calculs, le module de charriage de Mage 8 a été amélioré, ce qui a permis la réalisation de nouveaux tests. En outre, dans le but de pouvoir faire face aux changements et améliorations des codes, l'interface graphique Pamhyr a été entièrement re-codée en python, et permet maintenant de faire tourner des études Mage8 avec charriage. Ce rapport présente également les développements menés en 2022 sur le couplage d'un modèle hydro sédimentaire et d'un modèle de transfert des contaminants en rivière.

Mots-clés

Rhône, Observatoire, Sédiments, OSR, Modélisation hydro-sédimentaire, Evolution des fonds, Transport, Charriage, Suspension, Contaminants, Fractionnement liquide/solide

1. Module charriage de Mage.....	5
1.1. Contexte.....	5
1.2. Description du module charriage de Mage	5
1.3. Cas-tests de validation du module charriage.....	7
1.3.1. Tests de respiration du lit	7
1.3.2. Analyse de la respiration du lit	11
2. Modélisation avec Mage et AdisTS	13
2.1. Description des codes de calcul	13
2.2. Description du modèle.....	13
2.3. Évolutions morphologiques du Haut-Rhône.....	14
2.4. Description des hypothèses et paramètres de simulation	17
2.5. Simulation des évènements d’APAVÉR de 2012 et 2016.....	18
2.5.1. Impact du sable.....	18
2.5.2. Impact des conditions initiales.....	20
2.5.3. Calage des paramètres sédimentaires : vitesse de chute, contrainte critique d’érosion et dépôt	23
2.6. Résultats long terme de volume accumulé dans les retenues	27
2.7. Conclusion sur les modélisations avec AdisTS	30
3. Evolution des codes et perspectives	31
4. Formation et appui aux actions OSR	32
4.1. Aide à la modélisation.....	32
4.2. Utilisation du modèle OSR pour la production de données	32
5. Couplage hydro-sédimentaire et transferts de contaminants	33
5.1. Modèle de fractionnement liquide/solide.....	33
5.2. Calibration du modèle hydro-sédimentaire CASTEAURx.....	35
5.3. Application au fractionnement liquide/solide du ¹³⁷ Cs à SORA.....	38
5.4. Conclusions	39
6. Bibliographie	41

1. Module charriage de Mage

1.1. Contexte

Afin de pouvoir représenter au mieux les différents phénomènes et problématiques liés au Rhône, il semble nécessaire que le modèle puisse inclure la simulation du charriage et de l'évolution des fonds. Actuellement, le code de calcul RubarBE permet d'effectuer ce type de modélisation, mais en raison de ses temps de calcul élevés, son utilisation ne semble pas adaptée à de la modélisation long terme comme sur le modèle Rhône.

Il a donc été choisi de développer un module de charriage dans le code de Mage8, en se basant sur les mêmes principes et options de modélisation que dans RubarBE.

1.2. Description du module charriage de Mage

Le lit se décompose en une superposition de strates comme présenté **Figure 1**. Ces strates sont caractérisées par deux facteurs ; le diamètre médian D_{50} et l'étendue granulométrique $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ (d_x représente le diamètre dont $x\%$ de la masse des sédiments est inférieur). Il est également possible de définir pour chaque strate une contrainte critique de mise en mouvement différente de celle donnée par la courbe de Shields.

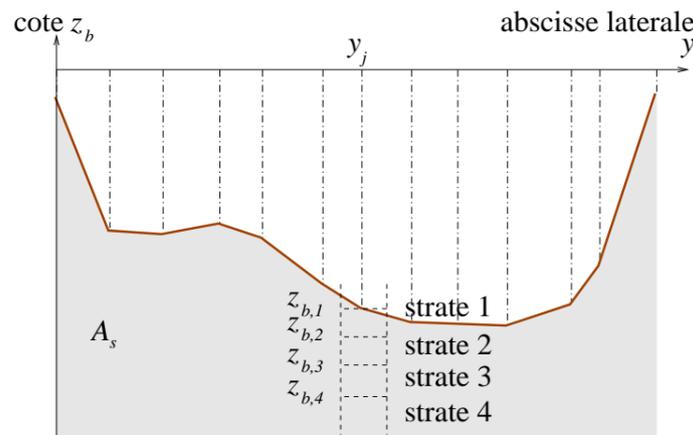


Figure 1 : Description sédimentaire du lit

Du point de vue du charriage un tronçon de rivière est modélisé comme une succession de compartiments sédimentaires. Chaque compartiment est décrit par sa masse (M), son diamètre médian (D_{50}) et son étendue granulométrique (σ). Il est centré sur un profil, donc construit avec la demi-maille amont et la demi-maille aval du profil. Sur chacune de ces mailles sédimentaires et à chaque pas de temps Δt , un flux de sédiments mobiles entrant Q_s^{up} (provenant de la maille sédimentaire amont, soit de masse $M^{up} = Q_s^{up} \Delta t$) interagit avec les sédiments de la strate superficielle du lit (première couche de sédiment) par l'intermédiaire d'une interface d'échange qui peut être considérée comme une zone tampon (cf. **Figure 2**). Il en résulte un flux de sédiments mobiles sortant Q_s^{dn} (masse $M^{dn} = Q_s^{dn} \Delta t$). Ce flux sortant sera le flux entrant de la maille sédimentaire aval.

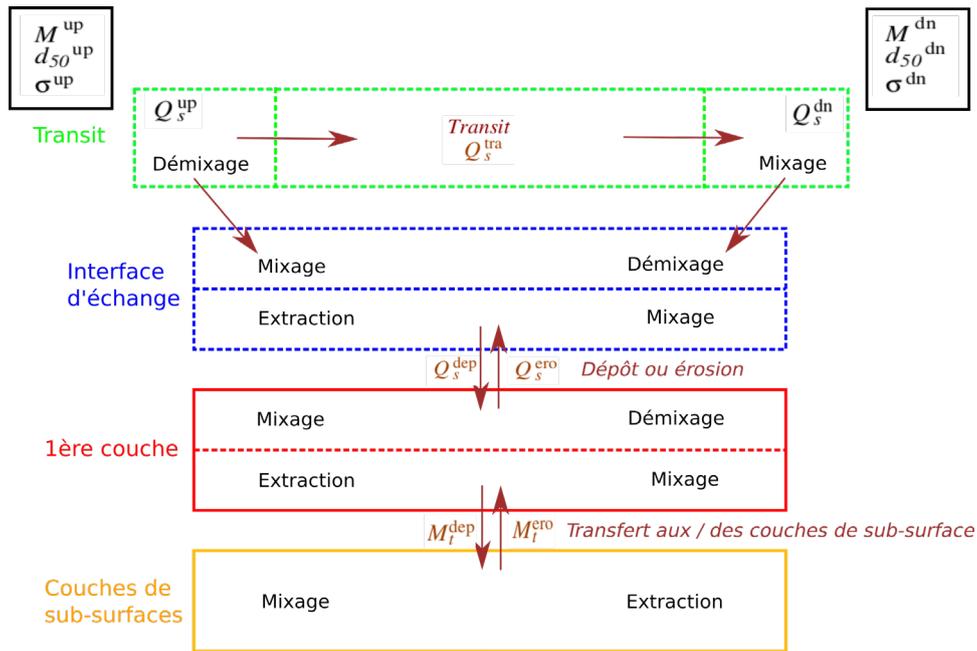


Figure 2 : Schéma des échanges de sédiments au sein d'une cellule de calcul

Le débit solide transitant vers l'aval est calculé à partir de la loi de chargement :

$$Q_s^{tra} = Q_s^{up} \exp\left(\frac{-\Delta x}{L_a}\right) \quad \text{Équation 1}$$

où L_a est la distance de chargement telle que définie par la formule de Han :

$$L = \alpha_{Han} \frac{u_*}{W_s} \quad \text{Équation 2}$$

où u_* est la vitesse de frottement, W_s est la vitesse de chute et α_{Han} un coefficient à choisir qui a la dimension d'une distance.

Le débit solide déposé dans la première couche s'écrit donc tel que :

$$Q_s^{dep} = Q_s^{up} - Q_s^{tra} = Q_s^{up} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta x}{L_a}\right)\right] \quad \text{Équation 3}$$

Ces deux étapes incluent un démixage du compartiment amont et un mixage du sédiment déposé avec les sédiments de l'interface d'échange, opérations visant à représenter les évolutions de granulométrie dues au transport.

Le débit solide érodé est aussi calculé à l'aide de la loi de chargement mais à partir de la capacité de transport, elle-même calculée à partir des conditions hydrauliques locales sur cette maille :

$$Q_s^{ero} = Q_s^{cap} \exp\left(\frac{-\Delta x}{L_a}\right) \quad \text{Équation 4}$$

Cette étape induit donc un démixage du compartiment de l'interface d'échange.

Enfin, le débit solide sortant à l'aval correspond au mélange des masses transitées et érodées :

$$Q_s^{dn} = Q_s^{tra} + Q_s^{ero} = Q_s^{cap} + (Q_s^{up} + Q_s^{cap}) \exp\left(\frac{-\Delta x}{L_a}\right) \quad \text{Équation 5}$$

À chaque pas de temps, à la fin du bilan sédimentaire, la masse correspondante à l'interface d'échange doit être réévaluée. Dans ce cas, il y a éventuellement un échange de matière entre l'interface et la première couche du lit.

Actuellement, le module de charriage est capable de modéliser l'évolution des fonds par modification uniforme de la géométrie. La capacité solide peut être calculée selon quatre équations : Meyer-Peter & Müller (1948), Engelund & Hansen (1967), Camenen & Larson (2005) et Recking (2010). Le module est également capable de calculer automatiquement les conditions solides à l'amont pour atteindre l'équilibre.

En revanche, le mixage et démixage des sédiments permettant le tri granulométrique et la création de nouvelles couches de sédiments n'est pas encore implémenté dans le code.

1.3. Cas-tests de validation du module charriage

Plusieurs cas-tests ont été réalisés afin de valider le bon fonctionnement du module en termes d'évolution des fonds. Ces tests ont été présentés dans les rapports OSR intermédiaires.

1.3.1. Tests de respiration du lit

De nouveaux tests ont été réalisés sur des cas théoriques de respiration du lit. Ces résultats ont été présentés à la conférence IAHR 2023.

Le phénomène de respiration du lit peut apparaître dans les rivières à fond mobile au passage d'une crue. Il est caractérisé par une érosion durant la montée de crue, suivie par un dépôt pour retourner à l'état initial du lit.

Pour tous les cas-tests, on considère un canal rectangulaire de 1000 m de long et 100 m de large avec un fond mobile de 1 m d'épaisseur en tout point. Les caractéristiques des sédiments en place et en apport amont sont décrites **Tableau 1**.

Tableau 1 : Propriétés des sédiments utilisés pour le test de respiration du lit.

D_{50} (m)	σ (-)		porosité	pente du fond (°)	Coefficient de Strickler (s)
0.01	1	2650	0.4	0.003	30

Afin de pouvoir observer le phénomène, plusieurs scénarios d'hydrogramme de crue sont appliqués à l'amont (cf **Figure 3**). Dans les trois cas, on considère une gaussienne avec un pic étroit pour le cas 1, un pic large pour le cas 2 et un pic asymétrique pour le cas 3.

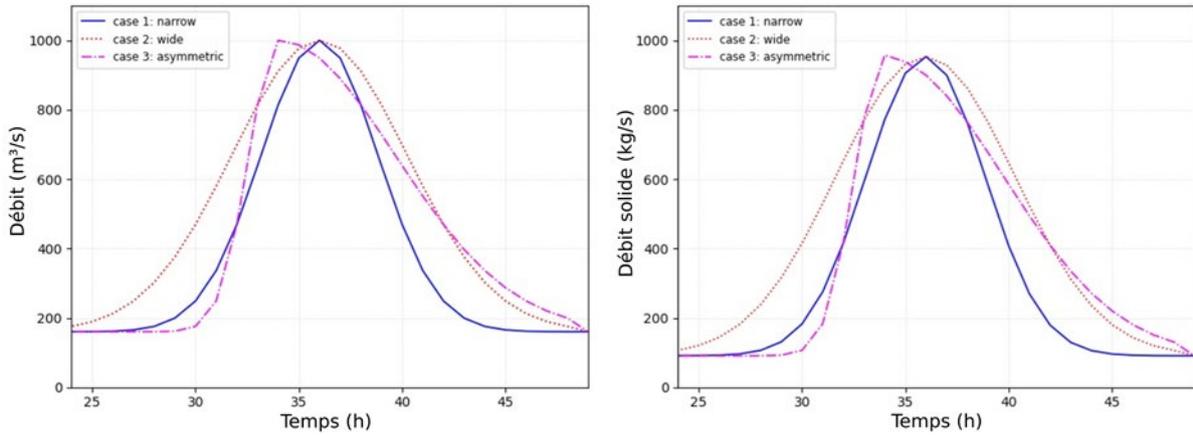


Figure 3 : Conditions aux limites liquide et solide pour 3 scénarios de crue.

Pour tous les tests, l'hydrogramme de crue est appliquée suite à une première phase de stabilisation à débit constant afin de s'assurer que le lit est à l'équilibre au moment de commencer les calculs. On s'intéressera ensuite à la variation d'élévation du lit au centre du canal.

Cas 1 : canal rectangulaire simple

Dans un premier temps on considère un canal rectangulaire simple sans aucune singularité. En appliquant les trois scénarios de crue en condition amont, on peut constater **Figure 4** que le fond du lit reste stable. On observe seulement un très léger dépôt (inférieur à 3 mm), et donc pas de phénomène de respiration du lit. Cela semble indiquer qu'il est nécessaire d'avoir une forme de variation dans la géométrie pour que le phénomène se produise.

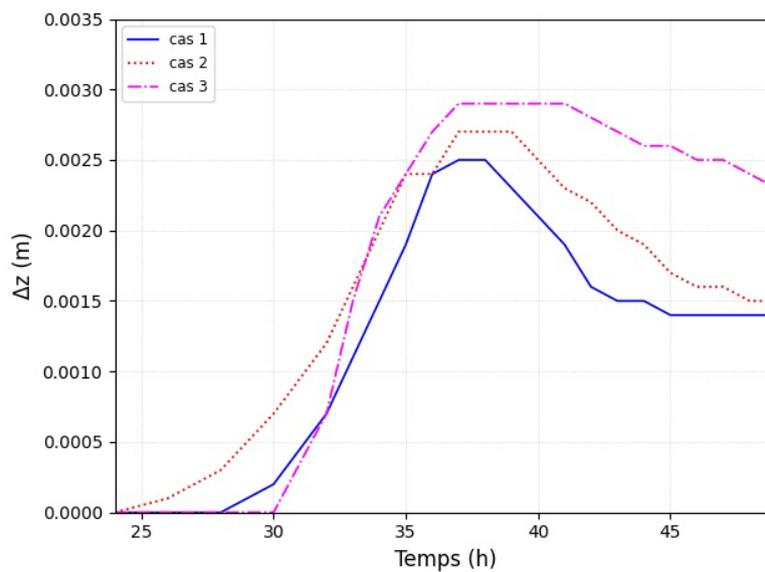


Figure 4 : Variation de l'élévation du fond du lit au centre du canal pour les trois scénarios de crue

Cas 2 : Canal avec rétrécissement de section

On considère un canal dans lequel est introduit en son centre un rétrécissement de section de 20 m (cf **Figure 5**).

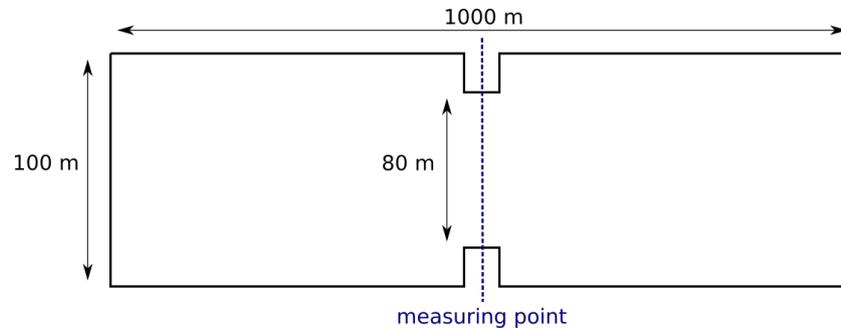


Figure 5 : Schéma du canal vu de dessus.

Avec cette géométrie, le phénomène de respiration du lit est bien observé au niveau du rétrécissement pour les trois cas. La variation d'élévation du lit suit proportionnellement les différents pics de crue, avec une excavation pouvant aller jusqu'à 0.36 m.

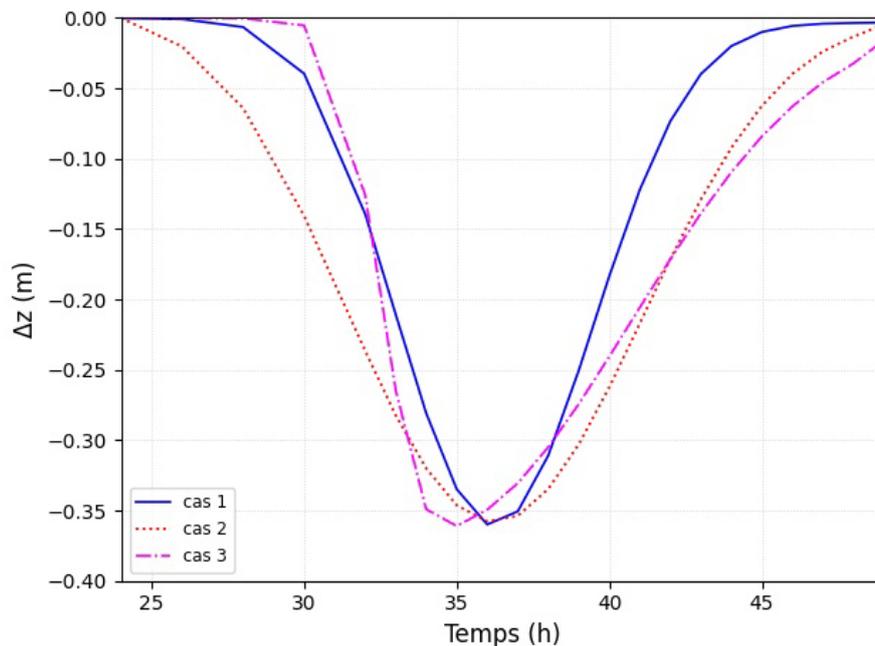


Figure 6 : Variation de l'élévation du fond du lit au centre du canal pour les trois scénarios de crue dans le cas d'un rétrécissement de section.

Par ailleurs, on s'est également intéressé à l'intensité du phénomène en fonction de la taille du rétrécissement, présenté, ainsi qu'en fonction du débit liquide maximum au pic de la crue (**Figure 7**). On constate que plus le rétrécissement est important, plus l'excavation du lit est forte, et de la même manière plus le débit est important, plus l'érosion est forte. Les érosions obtenues sur ces deux tests peuvent aller jusqu'à plus de 0.6 m de profondeur.

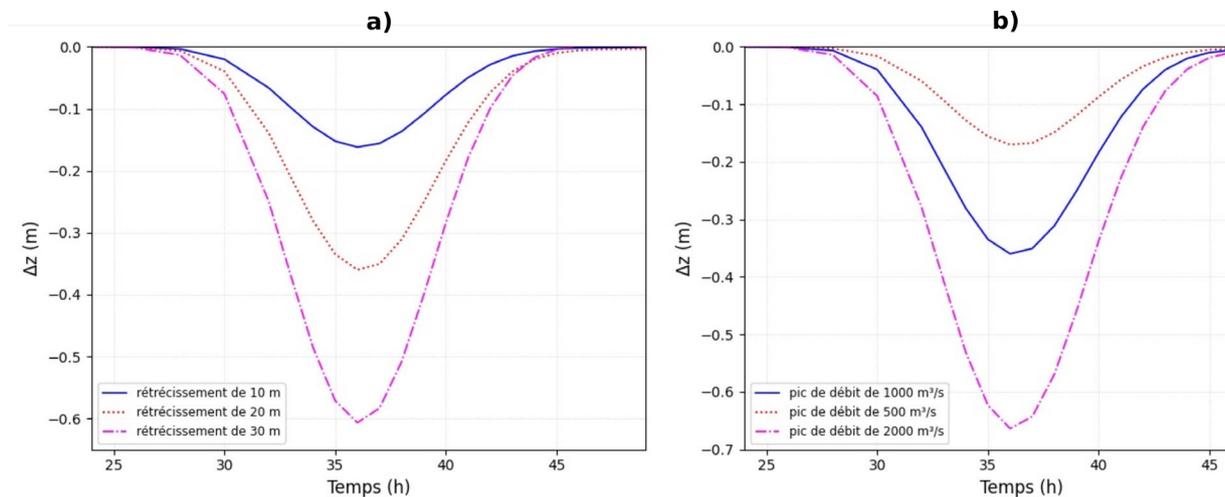


Figure 7 : Variation de l'élévation du fond du lit au centre du canal dans le cas a) de trois tailles de rétrécissement et b) pour trois valeurs de pics de crues différentes.

En revanche, le débit de base n'a pas d'influence sur l'intensité de l'érosion durant la crue, il modifie uniquement la forme du canal suite à la phase de stabilisation à débit constant.

On a pu constater que la présence d'un rétrécissement dans le canal permet bien de déclencher le phénomène. On peut maintenant se demander si d'autres types de perturbations permettent d'aboutir à des résultats similaires.

Cas 3 : canal avec élargissement de section

On considère un canal dans lequel est introduit un élargissement de 20 m en son centre. On observe cette fois-ci, **Figure 8**, le phénomène inverse ; un dépôt suivi d'une érosion pour revenir à l'état initial, en accord avec la forme de l'hydrogramme de crue du scénario considéré.

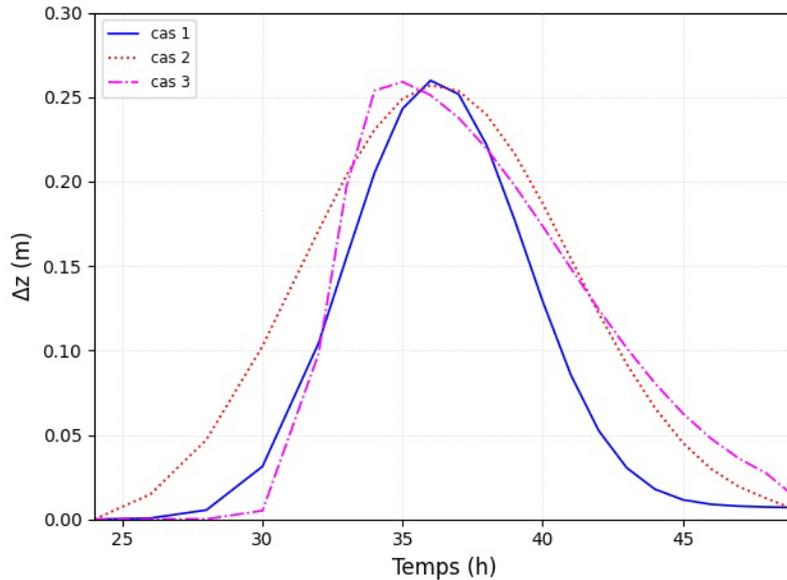


Figure 8 : Variation de l'élévation du fond du lit au centre du canal pour les trois scénarios de crue dans le cas d'un élargissement de section de 20 m.

1.3.2. Analyse de la respiration du lit

Ces résultats semblent indiquer qu'il serait possible d'établir une relation entre la variation de la largeur Δw et la variation de l'élévation du lit Δz ou plus précisément de la variation de vitesse entre la section amont et la section du rétrécissement ou élargissement. Un modèle simple pour représenter ce phénomène peut se baser sur l'épaisseur de la couche de charriage δ_b pour un écoulement donné comme définit dans Camenen et al. (2009) :

$$\delta_b = \alpha_b d_{50} \theta \quad \text{Équation 6}$$

avec α_b un coefficient d'ajustement et θ le paramètre de Shields ($\theta = u_*^2 / [(s - 1)gd_{50}]$). L'érosion maximale au pic de crue peut alors être estimée comme la différence d'épaisseur de couche de charriage entre la section perturbée et la section de référence (en amont), soit :

$$\Delta z = \delta_{b,peak,pert.} - \delta_{b,peak,ref.} \quad \text{Équation 7}$$

Les résultats sont présentés **Figure 9** avec $\alpha_b = 280$ ajusté pour le modèle. Il apparaît clairement que l'érosion maximale observée au pic de crue est inversement fonction de la réduction de la section et donc fonction de l'augmentation de vitesse sur cette section modifiée. Le modèle proposé (**Eqs. 6 et 7**) semble aussi reproduire correctement ce phénomène.

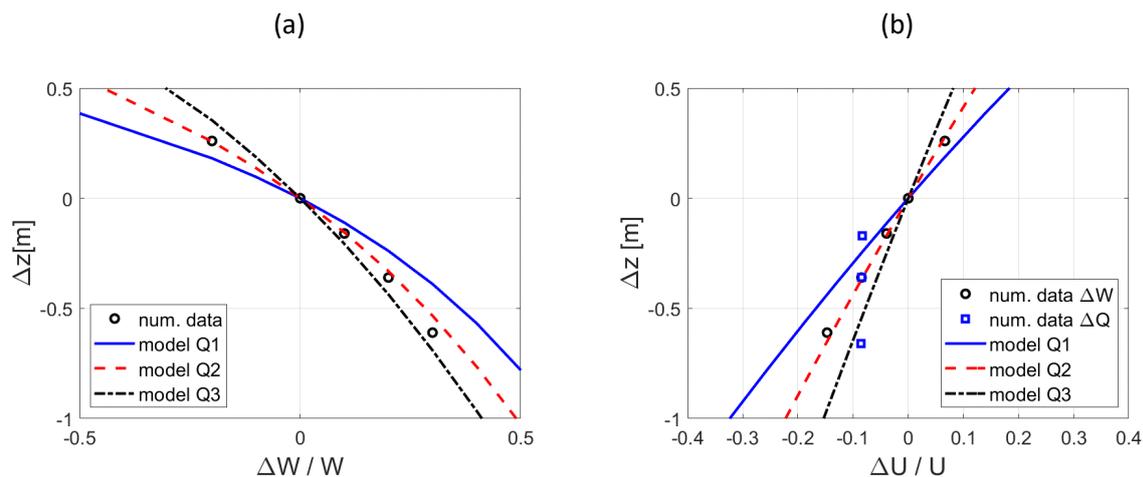


Figure 9 : Variation d'élévation du fond du lit au pic de crue en fonction de la variation de largeur de canal (a) et en fonction de la variation de la vitesse moyenne (b) par rapport à la section de référence (en amont).

En conclusion, on a pu montrer qu'il était possible de reproduire le phénomène de respiration du lit avec le module charriage de Mage 8. A travers les différents cas étudiés, on a constaté que la présence d'un rétrécissement était nécessaire à l'apparition du phénomène, comme constaté par Martin-Vide et al. (2019), tandis que l'élargissement provoquait l'effet inverse. Ces résultats tendent à prouver que le phénomène de respiration du lit est un phénomène local provoqué par des disparités dans la géométrie, et non un phénomène global lié à la propagation de la crue.

2. Modélisation avec Mage et AdisTS

2.1. Description des codes de calcul

Le code de calcul hydraulique 1D Mage a déjà été décrit lors de rapports précédents de l'OSR. AdisTS est un code de calcul 1D qui résout l'équation de conservation de la masse pour le transport de sédiments en suspension :

$$\frac{\partial SC_i}{\partial t} + \frac{\partial QC_i}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_f S \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) = (E_i - D_i)W \quad \text{Équation 8}$$

où C_i est la concentration pour la taille de grain i , Q est le débit, S la surface mouillée, D_f le coefficient de diffusion longitudinal, E_i et D_i les taux d'érosion et de dépôt, W la largeur de la rivière.

Le terme source combine la formule de Partheniades (1965) pour le taux d'érosion et la formule de Krone (1962) pour le taux de dépôt :

$$(E_i - D_i) = a_{PD,i} w_{s,i} (C_{eq,i} - C_i) \quad \text{Équation 9}$$

où $C_{eq,i}$ est la concentration d'équilibre pour la taille de grain i , $w_{s,i}$ la vitesse de chute pour la taille de grain i , $a_{PD,i}$ un coefficient de calage fixé à 1 par défaut. La concentration d'équilibre $C_{eq,i}$ est calculée de la manière suivante :

$$C_{eq,i} = \begin{cases} C_{0,i} \left(\frac{\tau}{\tau_{c,i}} - 1 \right) & \text{si } \tau/\tau_{c,i} > 1 \\ 0 & \text{si } \tau/\tau_{c,i} \leq 1 \end{cases} \quad \text{Équation 10}$$

où τ est la contrainte de fond effective, $\tau_{c,i}$ la contrainte critique de mise en mouvement et $C_{0,i}$ un paramètre de calage qui a la dimension d'une concentration (g/L).

L'utilisateur a la possibilité pour chaque classe de sédiment de changer la valeur des paramètres de calage $a_{PD,i}$, $C_{0,i}$. Afin de pouvoir améliorer les calages sur le modèle Rhône, la possibilité de définir deux valeurs différentes pour la contrainte critique « de mise en mouvement » a également été ajoutée au code ; une pour le dépôt $\tau_{cr,dep,i}$ (calculée sur la base de la courbe de Shields) et une pour l'érosion $\tau_{cr,ero,i}$ (potentiellement supérieure à la contrainte critique de dépôt) permettant ainsi de tenir compte d'une potentielle consolidation du sédiment. Cela équivaut à définir deux concentrations d'équilibre $C_{eq,dep,i}$ et $C_{eq,ero,i}$, et :

$$E_i - D_i = \begin{cases} a_{PD,i} w_{s,i} (C_{eq,ero,i} - C_i) & \text{si } C_i \leq C_{eq,ero,i} \text{ (érosion)} \\ 0 & \text{si } C_{eq,ero,i} \leq C_i < C_{eq,dep,i} \\ a_{PD,i} w_{s,i} (C_{eq,dep,i} - C_i) & \text{si } C_i > C_{eq,dep,i} \text{ (déposition)} \end{cases} \quad \text{Équation 11}$$

2.2. Description du modèle

Le haut-Rhône est un espace avec de forts enjeux hydro-sédimentaires, du fait notamment de ces différentes centrales hydro-électriques, et du barrage de moyenne chute de Génissiat. Obtenir un modèle capable de reproduire les processus hydrauliques et sédimentaires est donc un atout important pour la compréhension et la gestion de ce site. De plus, de par sa

complexité et sa variété, cette zone constitue un test intéressant pour le paramétrage des codes Mage et Adis-ts sur de grandes échelles de temps.

Le Rhône, du lac Léman à Lyon tel que défini dans notre modèle avec ses affluents et aménagements est présenté **Figure 10**.

Du fait de ces affluents alpins, le Rhône présente un transport de sédiments en suspension assez élevé. De plus, dans le but de prévenir des risques d'inondations, des évènements de chasses des sédiments contenus dans les retenues des barrages suisses sont organisés régulièrement. Cela impacte fortement le transport sédimentaire du reste du fleuve, et donc le fonctionnement des retenues des autres barrages à l'aval de la frontière.

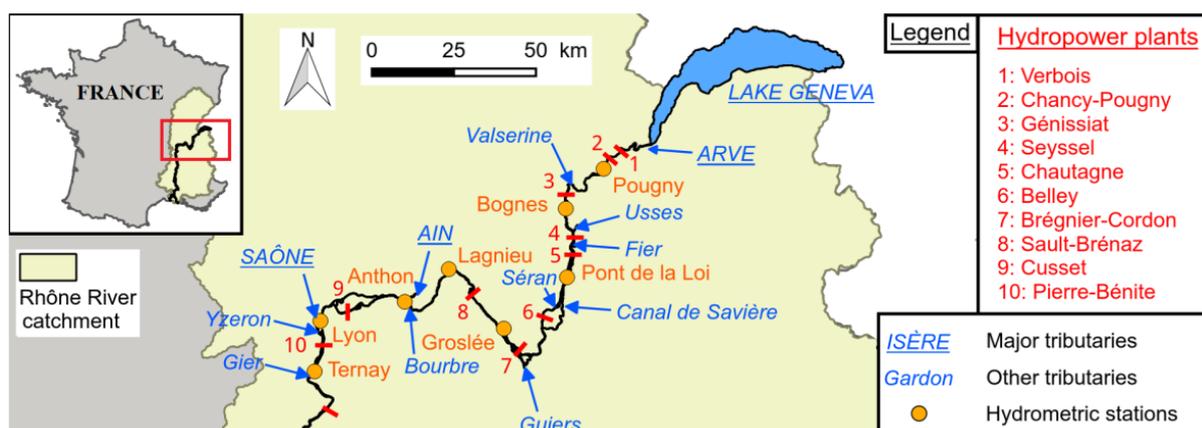


Figure 10 : Le Rhône du lac Léman à Lyon avec les différents affluents et centrales hydroélectriques inclus dans le modèle numérique, ainsi que les stations de mesures de débit et hauteur d'eau.

Le travail présenté à suivre a fait l'objet d'une publication dans la conférence internationale River Flow (Camenen et al., 2024).

2.3. Évolutions morphologiques du Haut-Rhône

Grâce aux bilans bathymétriques réalisés par la CNR, on constate que les retenues du Haut-Rhône présentent des comportements différents comme observé **Figure 11**. La retenue de Génissiat a tendance à se remplir de manière régulière durant les périodes inter-chasses, et présente un comportement variable pendant les opérations de chasse APAVER (Abaissement PARTiel de VERbois), dépendamment des apports provenant des barrages suisses et des règles de gestion concernant l'ouverture des différentes vannes de Génissiat au cours de l'évènement. Les retenues de Seysssel et Chautagne à l'aval de Génissiat présentent un comportement dynamique avec plus d'érosion. Sur Seysssel en particulier, on constate de l'érosion pendant les évènements de chasse APAVER et un léger dépôt lors de période inter-chasse. La retenue de Chautagne quant à elle a tendance à s'éroder durant les périodes d'inter-chasse alors que des dépôts sont observés pendant les APAVER. Il est à noter que des dragages en 2009 ont permis une forte réduction du volume déposé dans cette retenue. Les retenues de Belley, de Brégnier-Cordon, et Sault-Brenaz ont un fonctionnement assez similaire avec globalement du dépôt de manière continue pendant les périodes normales, et un dépôt encore plus important sur les évènements de chasses. Pour Brégnier-Cordon, on observe toutefois un certain équilibre sur les périodes inter-chasse (dépôt modéré, voire érosion modérée).

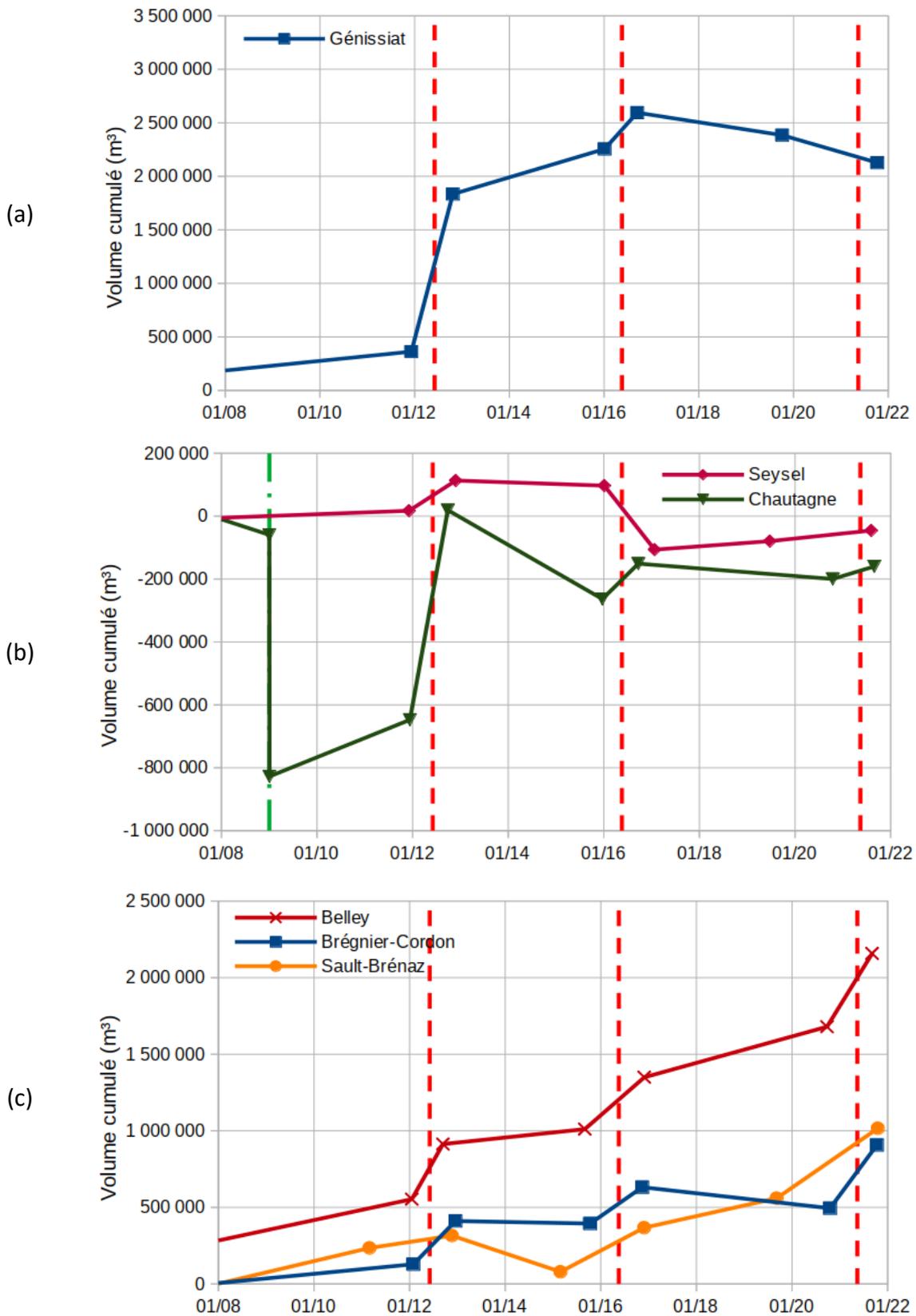


Figure 11 : Volume cumulé déposé dans les retenues de Génissiat (a), Seyssel et Chautagne (b) et Belley, Brégnier-Cordon et de Sault-Brénaz (c) basé sur les bilans bathymétriques CNR.

Aussi, la dynamique observée dans Sault-Brénaz est plus singulière avec des dépôts moins francs lors des opérations APAVER et potentiellement de l'érosion sur certaines périodes inter-chasse (2013-2016).

Sur la période de 2008 à 2022, un dépôt total de 6 Mm³ de sédiments (résultats de l'addition des dépôts dans les 6 retenues) a été mesuré. Si on compare ce résultat au flux de sédiment mesuré sur la période à la station de Jons (qui est la station possédant la plus longue chronique de mesures en continu) ainsi qu'au cumul des flux entrants des différents affluents mesurés, on constate **Figure 12** que ces différents résultats présentent le même ordre de grandeur avec une différence très faible (environ 1 Mm³) par rapport aux dépôts estimés. Toutefois, les stations de mesure des flux de matière en suspension (issues d'une mesure de turbidité) ne permettent pas de mesurer correctement les concentrations en sable (Thollet et al., 2013). Cela semble donc indiquer que la différence de volume entre celui correspondant à la différence des flux amont et aval et volume déposé dans les retenues correspondrait potentiellement au volume de sable non mesuré.

Cependant, cette remarque reste à nuancer étant donné que ces résultats ne prennent pas en compte les sédiments évacués de la retenue de Verbois lors des événements de chasse.

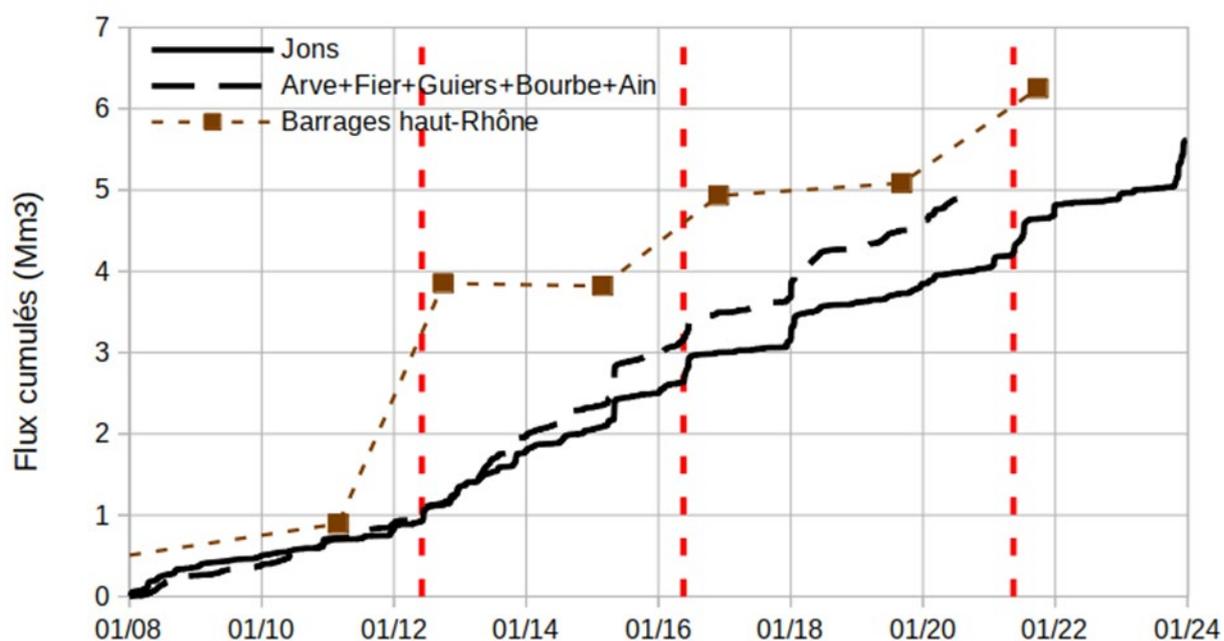


Figure 12 : Volume cumulé déposé dans les 6 retenues du haut-Rhône basé sur les bilans bathymétriques, volume de sédiments fins mesurés à la station de Jons et volume total des sédiments mesurés provenant des différents affluents.

2.4. Description des hypothèses et paramètres de simulation

L'objectif est de modéliser toute la période de 2008 à 2020 de manière continue afin de tenter de reproduire les évolutions dans les retenues de barrage comme observé au paragraphe 14. Cette simulation a été réalisée avec Mage pour la partie hydraulique, et AdisTS dans un second temps pour le transport des particules en suspension (couplage faible entre les deux codes de calcul). La simulation hydraulique comprend le fonctionnement de tous les ouvrages, et le fonctionnement exact mesuré des différents organes des ouvrages de Génissiat et Seyssel durant les deux opérations d'APAVER sur cette période (2012 et 2016).

Pour réaliser la simulation du transport sédimentaire, il est nécessaire de connaître la concentration en MES aux différents points d'entrée (affluents) du réseau. Par la suite, nous considérerons que les mesures des stations hydro-sédimentaire n'incluent que les argiles et limons et excluent les sables. Des chroniques partielles de concentration mesurées sont disponibles pour les affluents principaux.

En première approximation, il a été considéré que les affluents pour lesquels nous ne disposons pas de mesures ne seraient pas pris en compte dans la simulation, et donc de considérer une concentration en MES nulle en ces points. Cela concerne le point d'entrée au niveau du lac Léman (il semble en effet raisonnable de considérer que la concentration en MES à l'exutoire d'un lac soit nulle), la Valserine, les Usses, Le canal de Savière et le Séran.

Pour les autres affluents, à savoir l'Arve, le Fier, le Guiers, la Bourbe et l'Ain, les chroniques de concentrations mesurées ont été complétées pour les périodes lacunaires à l'aide de relations débit concentration établies pour toutes ces stations par Laura Troudet (cf. rapport Le Coz et al., 2021). Ces relations ont été établies en s'inspirant de la relation C_s-Q (Poulier et al. 2019) issu de la méthode SiRCA (Sadaoui et al., 2016) suivi de la méthode BaRatin (Le Coz et al. 2014).

Pour les épisodes d'APAVER de 2012 et 2016, la concentration en sédiments augmente fortement du fait de l'abaissement des retenues des barrages suisses. La concentration a été mesurée au niveau de la station de Pougny (frontière) pour ces deux événements. Afin d'inclure ces apports de sédiments dans le modèle, une première simulation a été réalisée sans ceux-ci sur les deux périodes. La concentration en MES simulée au niveau de Pougny a été extraite et retranchée de la concentration mesurée afin d'obtenir la concentration à appliquer en ce point (sans les apports de l'Arve). Les chroniques pour ces deux périodes ont ensuite été appliquées dans la nouvelle simulation comme un apport ponctuel au niveau de Pougny.

Le logiciel AdisTS permet de modéliser plusieurs classes de sédiments différentes pour lesquelles est défini un certain nombre de paramètres (diamètre médian, étendue granulométrique, porosité des dépôts, et paramètres de calage). En l'absence de nouvelles mesures pour déterminer ces paramètres, il a été choisi de repartir des travaux de Marina Launay (2014) qui sur base d'échantillons de sédiments du Rhône avait défini une décomposition entre plusieurs classes de sédiments allant de l'argile aux sables. On se basera également sur la thèse de Lucie Guertault (2015) qui avait réalisé un calage des paramètres des différentes classes sur le barrage de Génissiat. Les paramètres sédimentaires utilisés en première approximation sont définis **Tableau 2**.

Tableau 2 : Propriétés des classes de sédiments et répartition granulométrique des concentrations en MES

	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sable très fin	Sable fin	Sable grossier
$d_{50}(\mu\text{m})$	7	20	50	100	220	440
a_{PD}	1	1	1	1	1	1
C_0	1	1	0,5	0,2	0,2	0,2
% concentration	31	44	25	-	-	-

En sortie de simulation, AdisTS fournit des épaisseurs de dépôts en chaque section maillée du modèle. Afin d'obtenir le volume total de dépôt dans les retenues, les épaisseurs sur toutes les sections de la retenue ont été extraites. On a ensuite calculé la somme totale de toutes ces épaisseurs multipliées par la largeur de la section correspondante et la distance entre la section actuelle et la suivante.

2.5. Simulation des évènements d'APAVER de 2012 et 2016

Dans un premier temps, les simulations ont été réalisées sur les périodes d'APAVER uniquement (2012 et 2016). Cela permet de tester différentes hypothèses et de voir l'impact des paramètres sédimentaires pour caler le modèle avec des temps de calculs plus faibles. En effet les temps de calculs pour les évènements d'APAVER sont de quelques heures, contre une dizaine de jours pour la période 2008 à 2020 complète.

2.5.1. Impact du sable

Une première simulation a été réalisée avec une décomposition du flux de MES entre classes de fines uniquement (tel que présenté **Tableau 2** conformément à ce qui avait été défini par Marina Launay, 2014). Toutefois, du transport de sable est également observé lors de certains évènements et en provenance d'affluents (Arve, Fier). Mais les appareils de mesures de turbidité utilisés pour déterminer les flux de MES ne permettent pas de mesurer les sables (sensibilité inversement proportionnelle à la taille des grains ; Thollet et al., 2013 ; Camenen et al., 2023). Ainsi pour pouvoir les prendre en compte dans le modèle, une nouvelle simulation a été réalisée avec les mêmes décompositions que précédemment, mais à laquelle est ajouté 60 % de la concentration en sable, réparti équitablement entre 3 classes (sables très fins, sables fins et sables grossiers). Cette modification est appliquée sur les apports de Pougny et de l'Arve et du Fier. Cette hypothèse est celle qui a été choisie par Lucie Guertault (2015) lors de ses simulations de chasses sur Génissiat.

Les **Figure 13** et **Figure 14** présentent les résultats des simulations pour les retenues de Génissiat, Seyssel, Chautagne, Belley, Bregnier-Cordon et Sault-Brénaz en comparaison avec les volumes mesurés pour les APAVER de 2012 et 2016, respectivement.

En regardant les résultats obtenus sur ces deux périodes, on peut voir qu'ajouter un flux de sable a un impact très fort sur la retenue de Génissiat, les volumes déposés sont bien plus proches des mesures sur les deux évènements considérés. En revanche au niveau des

retenues aval, le sable semble ne pas avoir d'impact (ou un impact très faible) sur les résultats qui restent très en deçà des mesures. Cela semble donc indiquer que le flux de sable s'est déposé en grande majorité dans la retenue de Génissiat mais n'a pas eu le temps d'être propagé à l'aval sur les deux semaines de simulation.

Cela indique l'importance des apports intermédiaires pouvant correspondre aux dépôts existants dans les retenues.

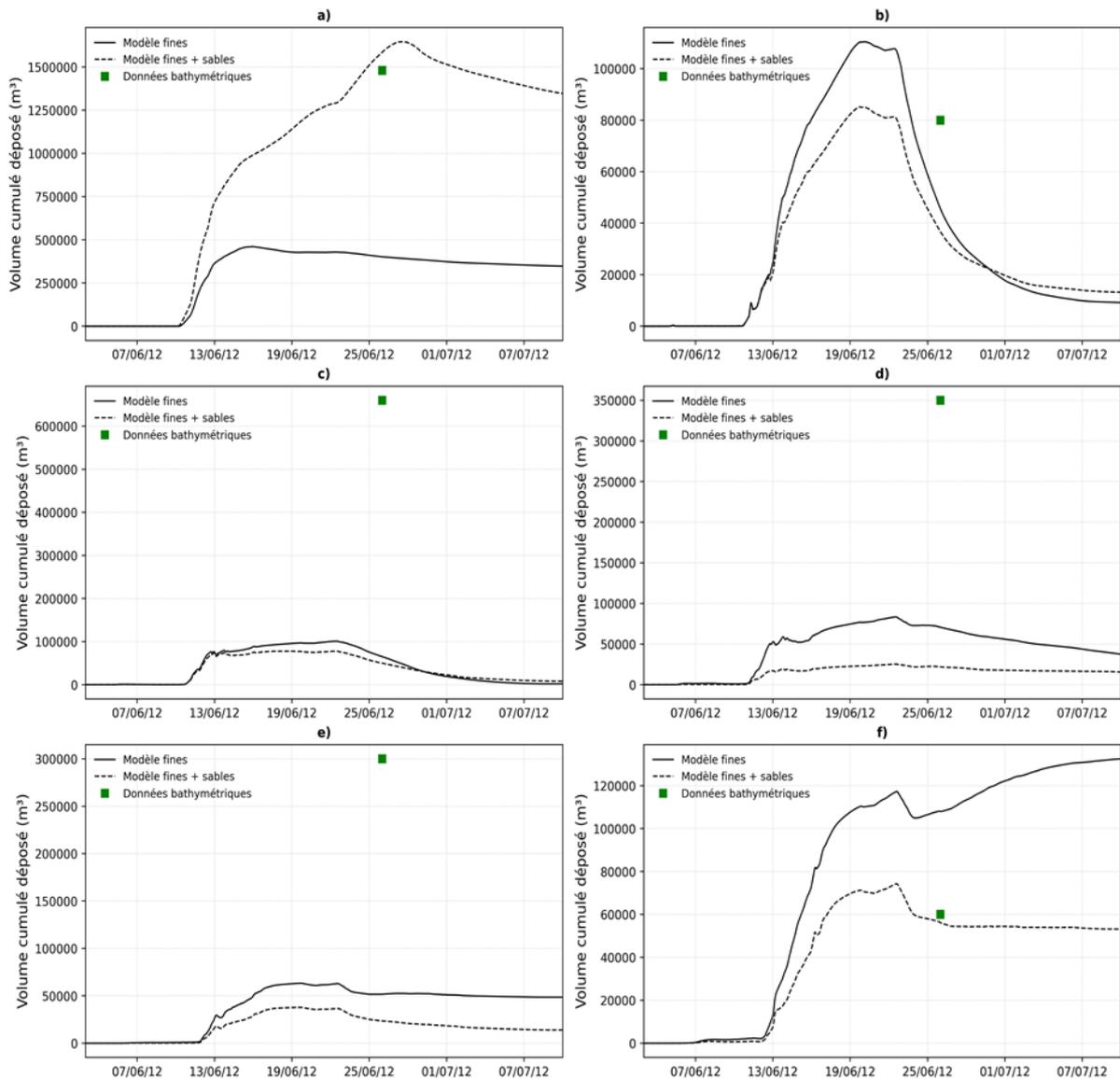


Figure 13 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l'évènement d'APAVÉR de 2012 pour les modèles avec fines uniquement et avec fines + sables en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Bregnier-Cordon, f) Sault-Brénaz.

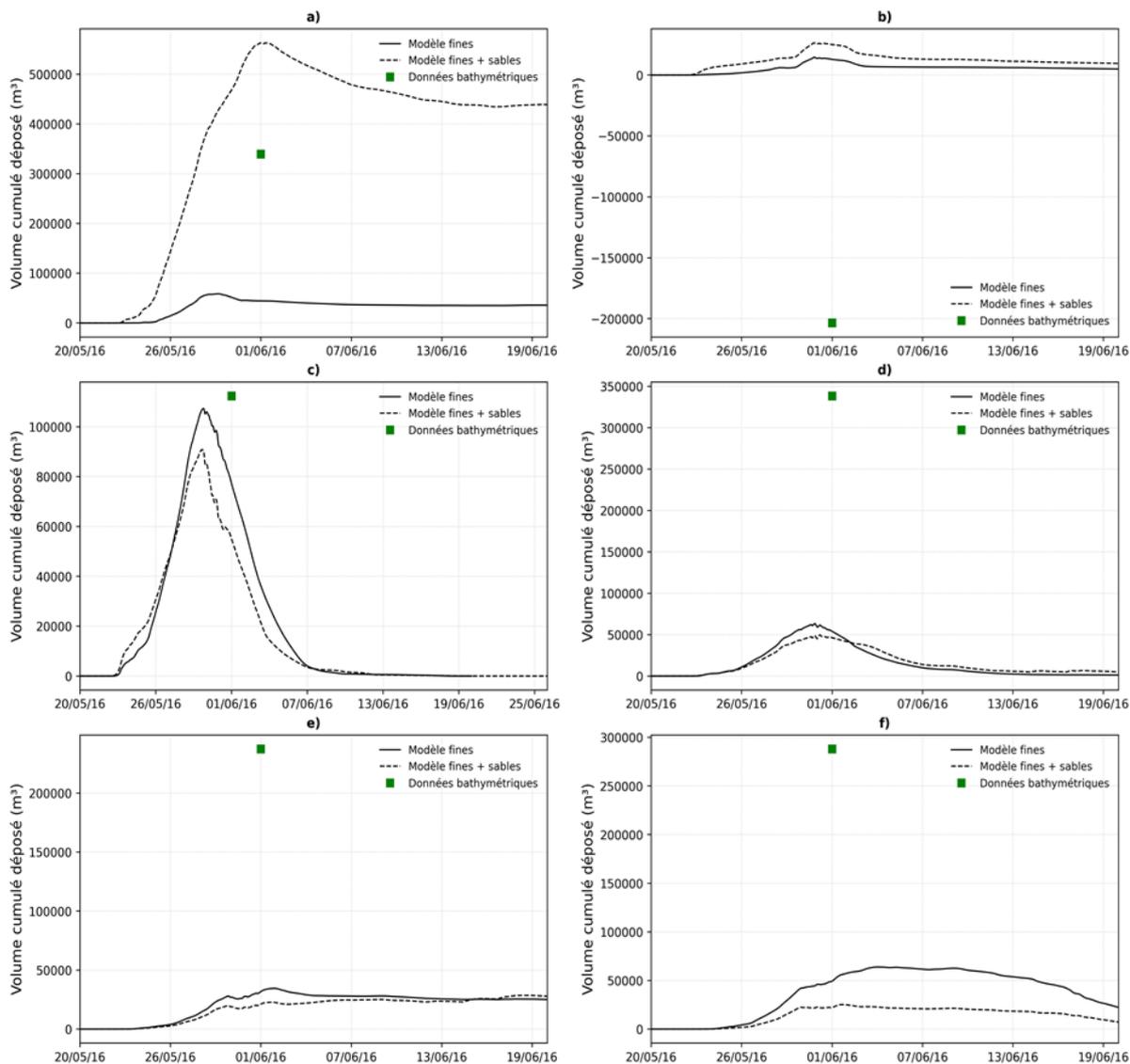


Figure 14 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l'évènement d'APAVÉR de 2016 pour les modèles avec fines uniquement et avec fines + sables en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Brégnier-Cordon, f) Sault-Brénaz.

2.5.2. Impact des conditions initiales

Pour les simulations précédentes, on avait considéré des conditions initiales de dépôts nulles. Cela signifie qu'il n'y avait pas de sédiments initialement en place remobilisables au début de la simulation. Or on sait que dans la réalité les retenues des barrages contiennent un certain volume de sédiments, et que la reprise de ces sédiments est parfois observée notamment lors des évènements d'APAVÉR en particulier au niveau des retenues de Génissiat et Seyssel.

Une nouvelle simulation a donc été réalisée avec des conditions initiales de dépôt afin d'étudier l'impact de ce paramètre sur les résultats. Ces conditions initiales consistent en une épaisseur de sédiments déposés sur le fond des tronçons choisis, pour chaque classe de sédiments. Pour la retenue de Génissiat, les conditions initiales ont été reprises de la thèse de Lucie Guertault (2015) à l'identique. Pour toutes les autres retenues, à partir des bilans CNR, le volume de dépôt dans chaque retenue avant l'évènement modélisé a été converti en une

épaisseur appliquée de manière uniforme sur toutes les sections de la retenue. Cette épaisseur est répartie entre les classes de sédiments selon la décomposition C de la thèse de Marina Launay (2013), soit 12 % argile, 18 % limon fin, 40 % limon grossier, 30 % sable réparti entre les 3 classes de sable.

Les **Figure 15** et **Figure 16** présentent les résultats des simulations pour les retenues de Génissiat, Seyssel, Chautagne, Belley, Bregnier-Cordon et Sault-Brénaz en comparaison avec les volumes mesurés pour les APAVER de 2012 et 2016, respectivement.

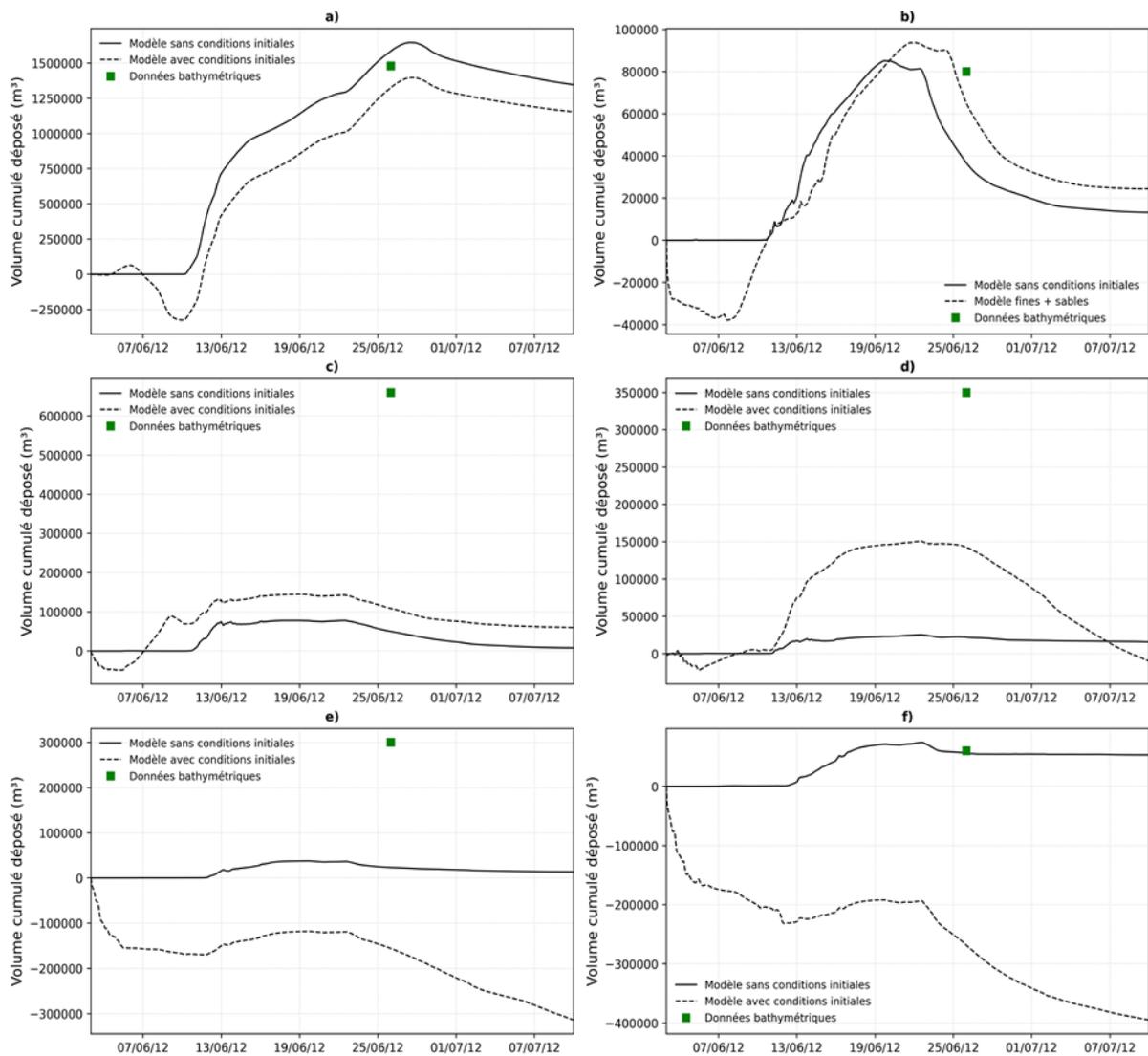


Figure 15 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l'évènement d'APAVER de 2012 pour les modèles avec fines + sables, et avec et sans conditions initiales en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Bregnier-Cordon, f) Sault-Brénaz.

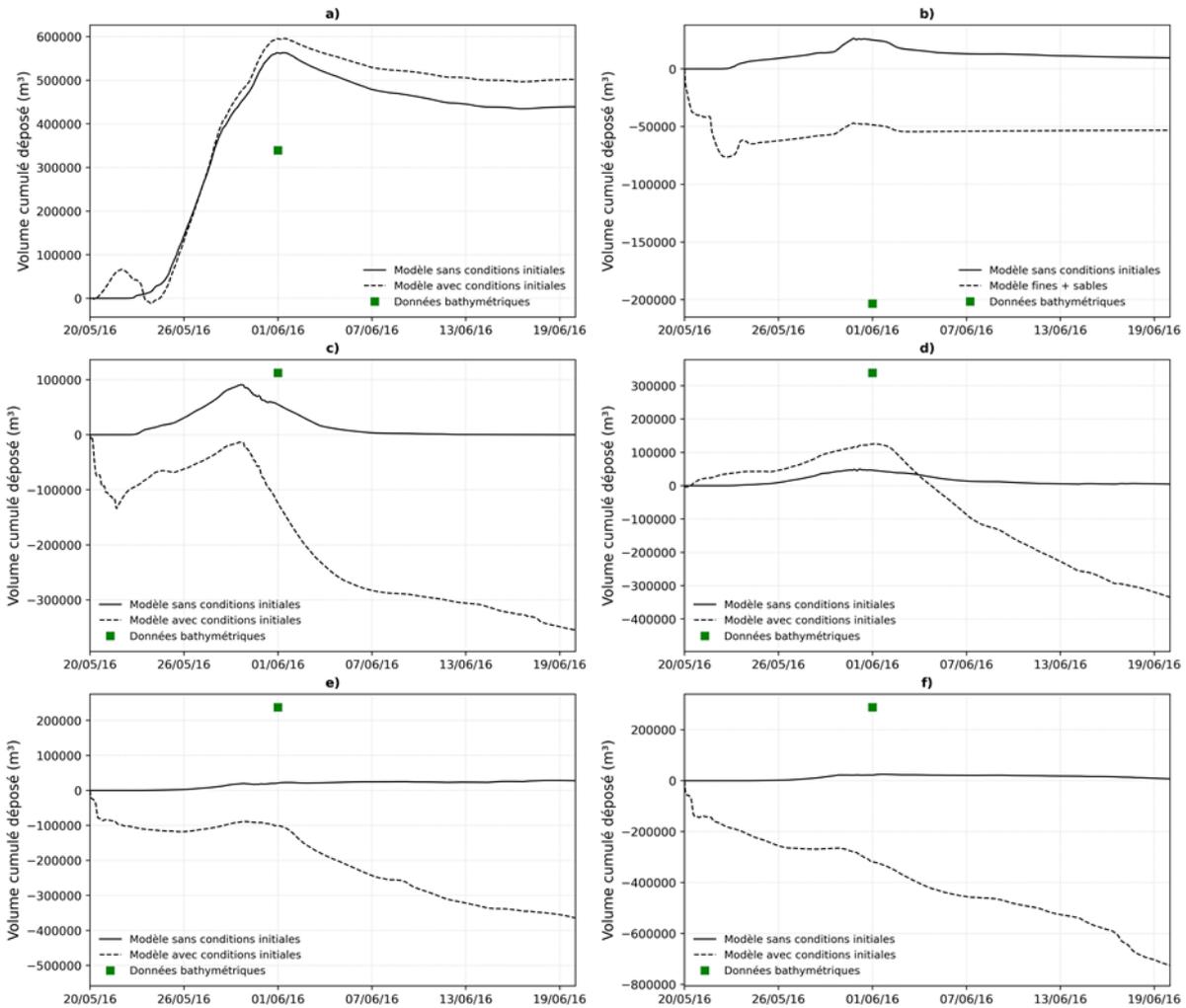


Figure 16 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l'évènement d'APAVER de 2016 pour les modèles avec fines + sables, et avec et sans conditions initiales en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Brégnier-Cordon, f) Sault-Brénaz

L'ajout de conditions initiales a un impact important sur les résultats de volume déposé, et peut permettre d'obtenir des résultats plus cohérents avec les mesures. Notamment au niveau de Seyssel, la présence de dépôts en conditions initiales a permis d'obtenir de l'érosion sur la chasse de 2016 conformément aux bilans bathymétriques. En revanche, pour les retenues plus à l'aval, on constate que le modèle a tendance à éroder trop fortement, ce qui n'est pas cohérent avec les mesures. En effet, les bilans bathymétriques semblent indiquer un stock dans les retenues aval faiblement remobilisable étant donné qu'on n'observe pas d'érosion avant 2012. Pour ces retenues, il ne semble donc pas nécessaire d'ajouter des conditions initiales de dépôt pour les simulations long-terme de 2008 à 2020 ; en tout cas, ces dernières prises telles quelles ne donnent pas le résultat attendu.

De manière générale pour les retenues aval on observe qu'avec ou sans conditions initiales, le volume de dépôt modélisé reste très inférieur aux mesures.

Au niveau des résultats de concentration (**Figure 17**), l'ajout des conditions initiales permet d'être plus proche des mesures à Pyrimont en première partie de chasse (**Figure 17a**). En effet, il avait été constaté que les concentrations observées dans cette phase de la chasse étaient dues à la reprise des sédiments sur le fond.

En revanche, on observe très clairement que si les résultats sont globalement proches des mesures en sortie de Génissiat, plus on se place à l'aval, plus ils s'en éloignent. On observe ainsi une forte sur-estimation des concentrations par le modèle au niveau de Jons (**Figure 17b**).

Cette observation, couplée avec le fait qu'au niveau des retenues aval le volume de dépôt est trop faible par rapport aux mesures, semble indiquer que le modèle ne dépose pas assez les fines.

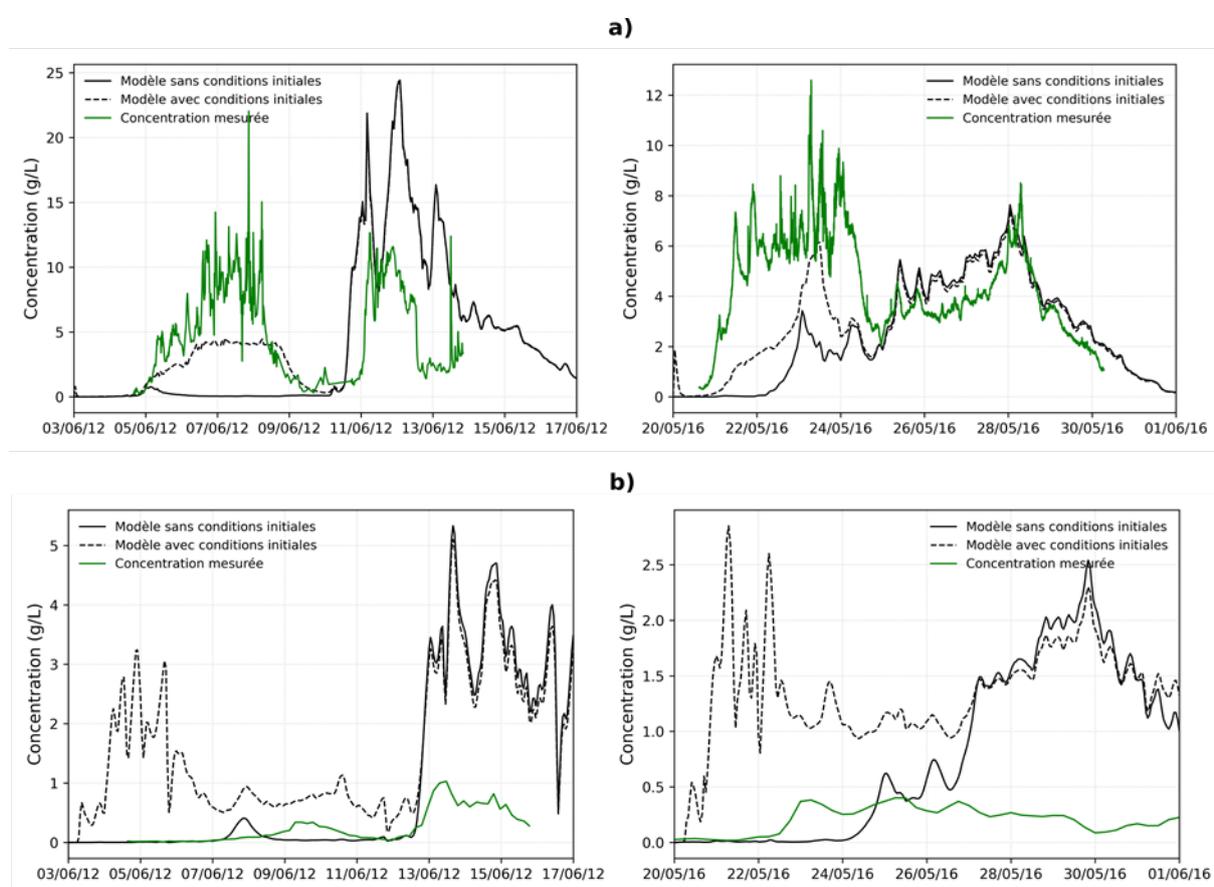


Figure 17 : Concentration en MES au cours des APAVER de 2012 et 2016 pour les modèles fines + sables, et avec et sans conditions initiales en comparaison avec les mesures au niveau de a) Pyrimont et b) Jons.

2.5.3. Calage des paramètres sédimentaires : vitesse de chute, contrainte critique d'érosion et dépôt

Comme relevé dans la partie précédente, on observe au niveau des retenues aval un volume déposé simulé par le modèle trop faible, associé à une concentration de sédiments en suspension trop élevée, ce qui semble indiquer un dépôt de fines insuffisant. Cela peut être résolu en jouant sur les paramètres sédimentaires des classes de sédiments.

Pour ce faire, plusieurs solutions sont possibles dans le code AdisTS. La première consiste à modifier la vitesse de chute (en modifiant le diamètre médian) des classes de fines. En effet dans la réalité les particules plus grosses ont tendance à entraîner les fines et donc augmenter leur vitesse de chute, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle. C'est ce qui a été observé sur une chasse de l'Arc (Camenen et al., 2016). De récentes expérimentations de laboratoires (Jing et al., 2024) ont de plus confirmé la potentielle interaction en classes pour des concentrations élevées (>1g/L) limitant la vitesse de chute des particules grossières (sables) et augmentant la vitesse de chute des fines (argile et limons fins).

La seconde solution serait de modifier la contrainte critique d'érosion des fines en imposant une valeur différente (supérieure) que celle de la contrainte critique de dépôt, ce qui correspondrait à une possible consolidation des sédiments déposés dans les retenues.

Comme premier test a donc été testé d'utiliser la vitesse de chute de la classe limons grossiers pour les classes argile et limons fins, et également de doubler la valeur de la contrainte critique d'érosion pour ces trois classes.

Les **Figure 18** et **Figure 19** présentent les résultats des simulations pour les retenues de Génissiat, Seyssel, Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Sault-Brénaz en comparaison avec les volumes mesurés pour les APAVER de 2012 et 2016, respectivement, en utilisant le modèle fine + sable avec conditions initiales en modifiant ou non la vitesse de chute et la contrainte d'érosion.

Les résultats ne sont représentés ici que pour la chasse de 2012 mais le facteur qui a apparemment le plus d'impact est la modification de la vitesse de chute, permettant la formation de dépôt beaucoup plus important sur les retenues aval comme espéré (**Figure 18 c, d, et f**). Il n'y a que pour la retenue de Brégnier-Cordon que le dépôt n'est pas reproduit (**Figure 18e**). Modifier la contrainte critique d'érosion ne produit pas de changements très importants que ce soit en termes de volume déposé ou de concentration. En revanche, la modification de ces deux paramètres simultanément donne des résultats encore différents et semble être la combinaison qui permet d'obtenir les meilleurs résultats. Les volumes déposés dans les retenues aval sont bien plus conséquents que dans les simulations précédentes et donc plus proches des mesures. Par contre, si cette modification améliorerait globalement les résultats sur l'APAVER de 2016, les améliorations sont moins flagrantes en particulier sur les retenues où de l'érosion a été observées (**Figure 19b**, Seyssel).

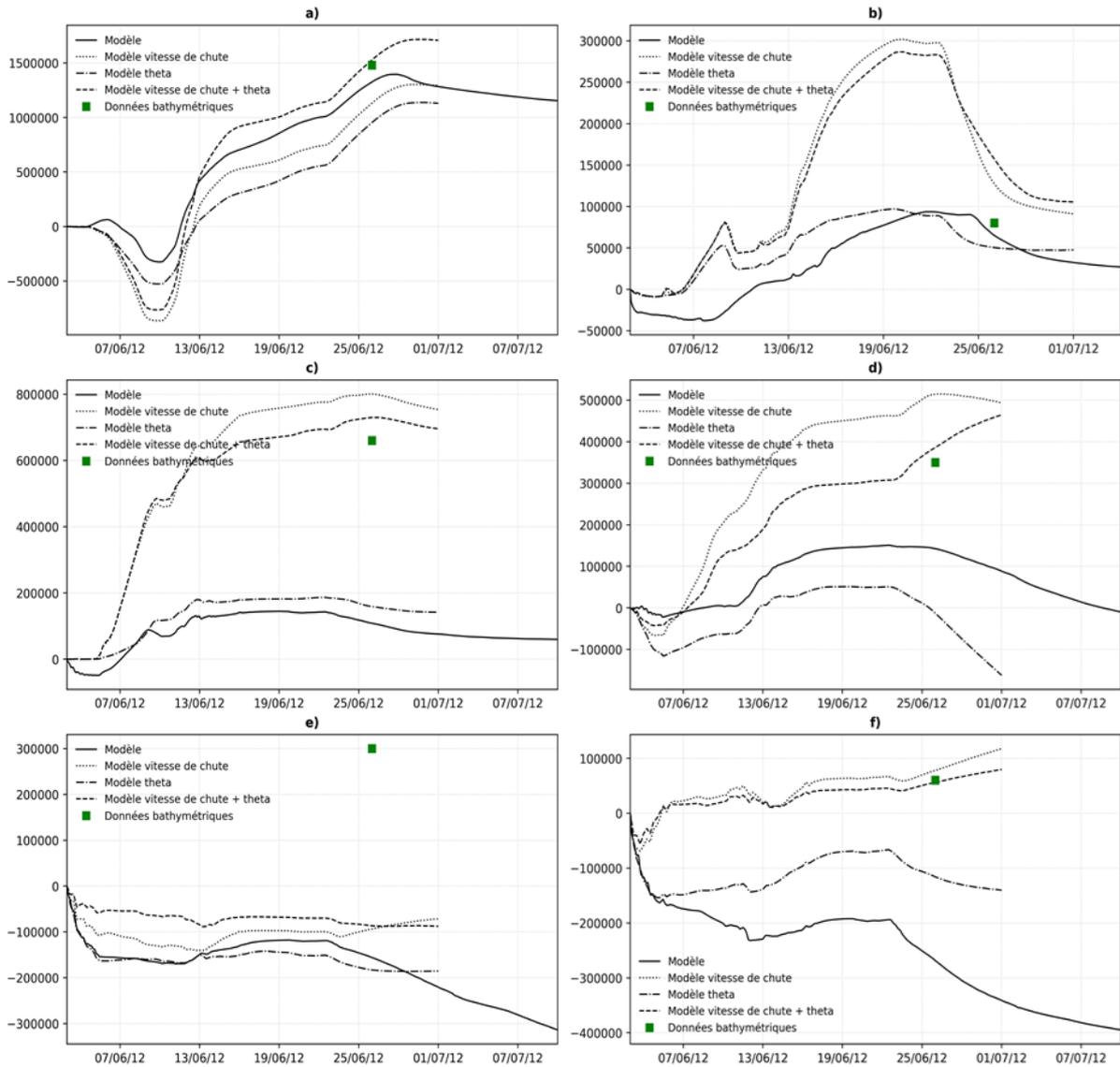


Figure 18 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l’APAVER de 2012 pour le modèle fine + sable avec conditions initiales, et avec ou sans modification de la vitesse de chute et de la contrainte critique d’érosion en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Bregnier-Cordon, f) Sault-Brénez .

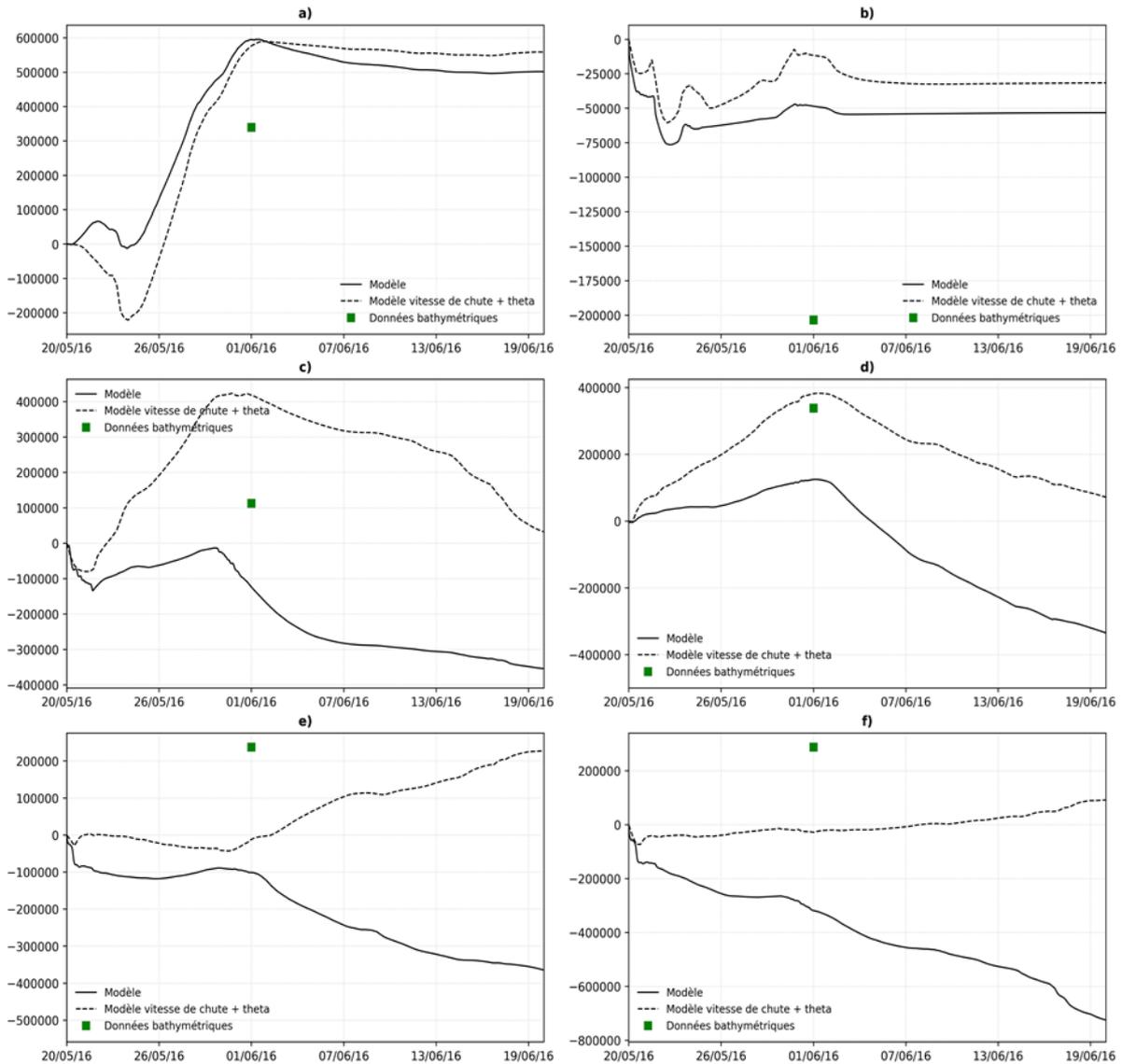


Figure 19 : Volume cumulé déposé/érodé au cours de l’APAVER de 2016 pour le modèle fine + sable avec conditions initiales, et avec ou sans modification de la vitesse de chute et de la contrainte critique d’érosion en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne, d) Belley, e) Bregnier-Cordon, f) Sault-Brénez.

En termes de concentration, ces modifications permettent d’obtenir des flux de MES plus faibles à Jons en bonne adéquation avec les mesures (**Figure 20**). Au niveau de la sortie de Génissiat, on observe aussi une amélioration des résultats notamment pour l’APAVER de 2012 où on obtient des concentrations plus fortes en début de chasse, et plus faibles en seconde partie comparé aux résultats précédemment obtenus. On observe cependant toujours un pic de concentration excessif en début de modélisation sur Jons pouvant correspondre à une érosion des retenues aval.

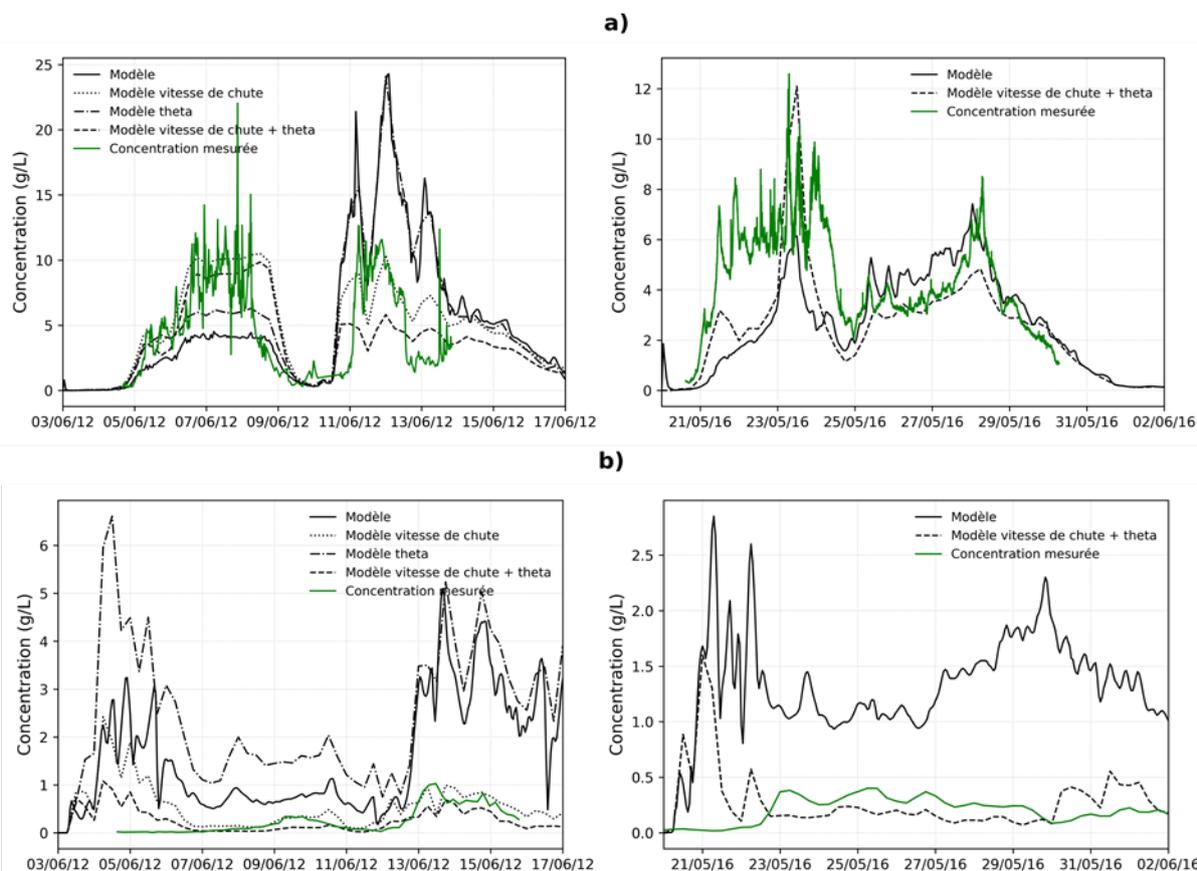


Figure 20 : Concentration en MES au cours des APAVER de 2012 et 2016 pour le modèle fine + sable avec conditions initiales, et avec ou sans calage de la vitesse de chute ou de la contrainte critique d'érosion en comparaison avec les mesures au niveau de a) Pyrimont et b) Jons.

2.6. Résultats long terme de volume accumulé dans les retenues

En parallèle de ces simulations d'évènements sur 2012 et 2016, des simulations long-terme continues sur la période 2008 2020 ont été réalisées. Les différents scénarios utilisés pour ces simulations sont les suivants :

- S1 : simulation avec des classes de fines uniquement (argile, limons fins et grossiers), pas de conditions initiales et les paramètres sédimentaires par défaut ;
- S2 : simulation avec des classes de fines et de sables (correspondant à 60 % du flux) ainsi que des conditions initiales pour toutes les retenues et les paramètres sédimentaires par défaut ;
- S3 : simulation avec des classes de fines et de sables, des conditions initiales pour les retenues de Génissiat et Seyssel et la modification de la vitesse de chute et du θ critique d'érosion des fines.

Les **Figure 21** et **Figure 22** présentent les résultats des simulations avec les trois scénarios pour les retenues de Génissiat, Seyssel, et Chautagne (**Figure 21**) et Belley, Bregnier-Cordon et Sault-Brénaz (**Figure 22**) en comparaison avec les volumes mesurés sur la période.

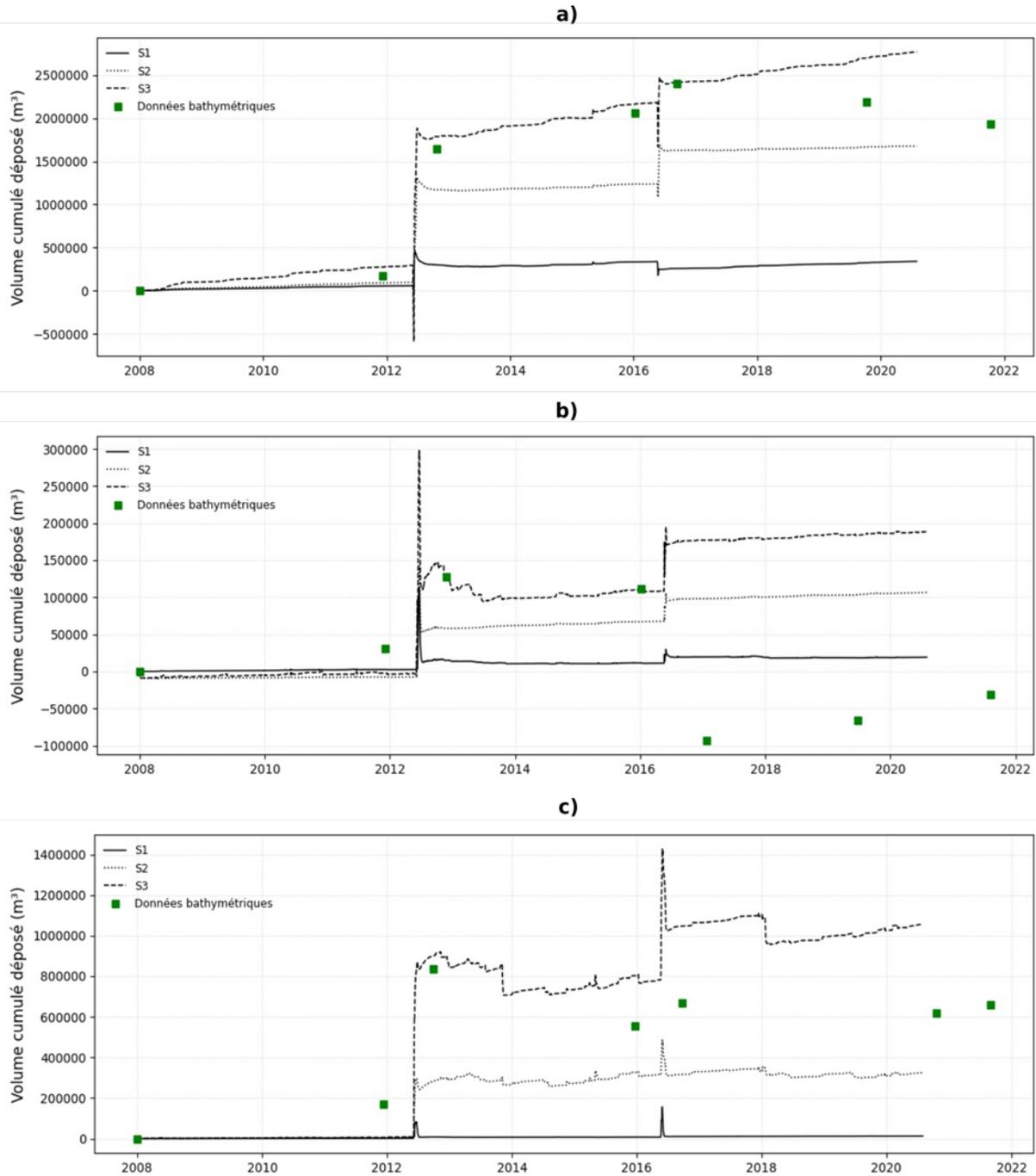


Figure 21 : Volume cumulé déposé sur la période 2008-2020 pour les trois scénarios de simulation en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de a) Génissiat, b) Seyssel, c) Chautagne.

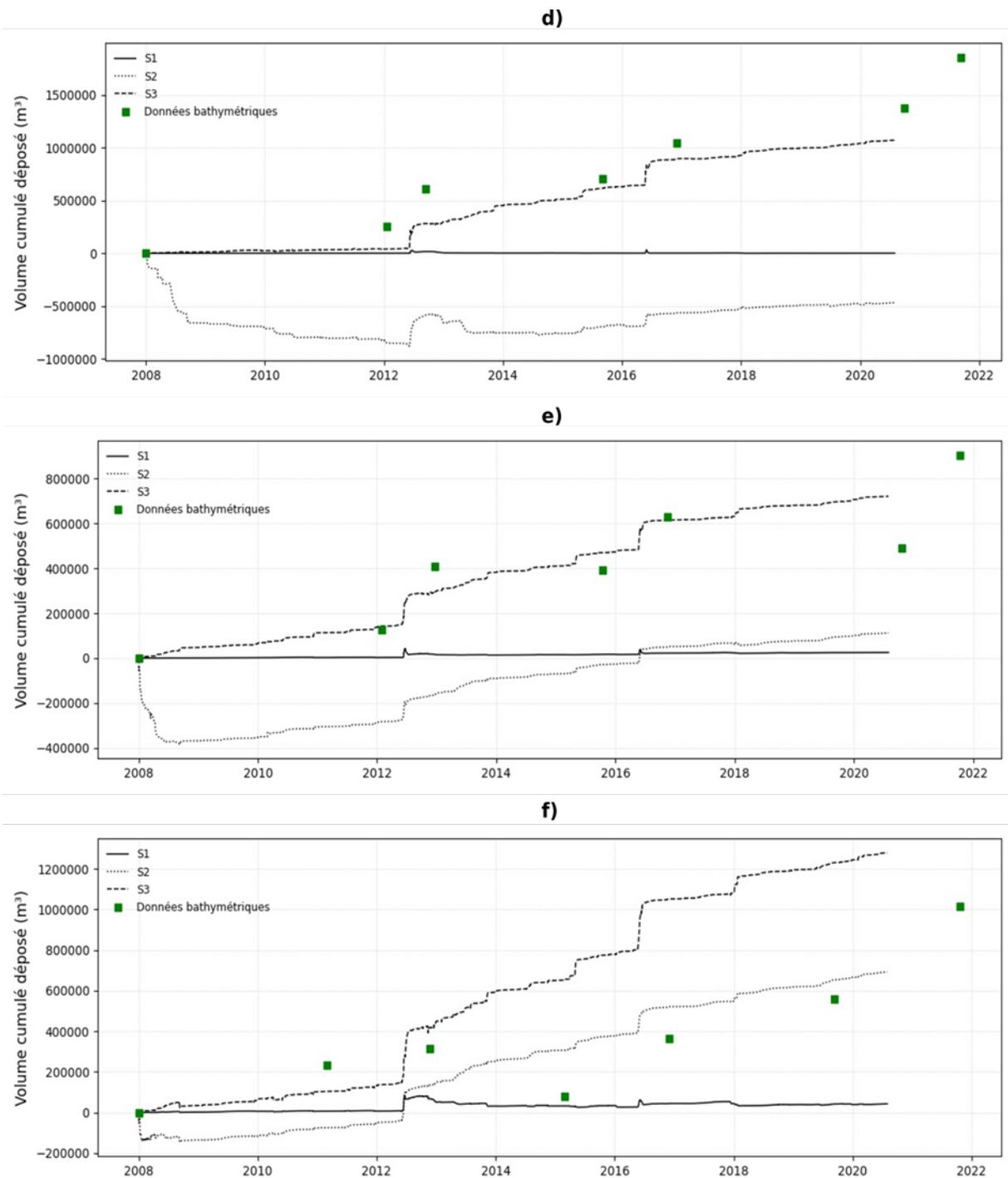


Figure 22 : Volume cumulé déposé sur la période 2008-2020 pour les trois scénarios de simulation en comparaison avec les bilans bathymétriques dans les retenues de d) Belley, e) Bregnier-Cordon, f) Sault-Brénaz.

Dans premier temps, il est intéressant de noter que les résultats obtenus sur la simulation long terme au niveau des évènements d'APAVÉR de 2012 et 2016 ne sont pas équivalents aux résultats sur les simulations de ces évènements seuls avec les mêmes paramètres. Cela s'explique par le fait que l'état du fond (dû aux potentiels dépôts qui se sont faits au cours de la simulation long terme) au moment de débiter ces évènements n'est pas le même que l'état

initial des simulations d'évènements. Cela montre à nouveau l'impact fort des conditions initiales sur la simulation des APAVER. Caler le modèle en se basant uniquement sur ces simulations d'évènements ne garantit donc pas nécessairement de bons résultats sur les simulations long-terme.

Ensuite, on peut constater que le calage des paramètres sédimentaires (simulation S3) a permis d'améliorer grandement les résultats sur les retenues aval, mais également sur Génissiat. Les volumes de dépôts obtenus sur les retenues de Belley et Bregnier-cordon en particulier sont en très bonne adéquation avec les bilans CNR. En revanche, on constate que si le modèle génère bien les dépôts, il peine à reproduire les périodes d'érosions, comme on peut le voir au niveau de Seyssel (**Figure 21b**) et de Sault-Brenaz (**Figure 22c**).

2.7. Conclusion sur les modélisations avec AdisTS

Si les résultats obtenus sur cette simulation ne sont pas encore parfaits, ils sont très encourageants. En effet, le module est capable d'obtenir des volumes de dépôt relativement proches des mesures sur la majorité des retenues, malgré les incertitudes et hypothèses faites au niveau de la granulométrie et des conditions initiales. On peut toutefois constater que si les périodes de dépôt sont bien reproduites, le modèle a plus de difficulté à simuler les périodes d'érosion.

Afin d'améliorer ce modèle, il semblerait nécessaire d'effectuer un travail plus poussé retenue par retenue, et d'avoir plus de mesures et de données sur les vitesses de chute, les proportions de sable et l'état initial des retenues afin de valider les hypothèses et le calage.

Ces travaux ont porté uniquement sur l'étude des dépôts totaux dans les retenues mais il serait intéressant d'étudier maintenant les zones de dépôt dans le modèle afin de pouvoir estimer si cela correspond avec la réalité. Enfin, il serait également intéressant d'élargir la période de simulation pour inclure la chasse de 2021 dans les résultats long terme.

3. Evolution des codes et perspectives

Une évolution de l'interface graphique PamHyr (devenue Pamhyr2) permet désormais de créer les couches sédimentaires pour le charriage et de visualiser l'évolution des fonds calculée par Mage. Cette nouvelle interface est disponible en open-source ici : <https://gitlab.irstea.fr/theophile.terraz/pamhyr>.

Plusieurs travaux sont en cours pour améliorer la plateforme Pamhyr 2 :

- Gérer les sédiments fins en suspension avec AdisTS ;
- Intégrer d'autres solveurs (RubarBe, Mascaret).

Aussi, le portage du modèle du Rhône sur Pamhyr2 est en cours.

Pour la suite de cette action modélisation, plusieurs pistes restent à poursuivre, que ce soit sur le développement des codes de calcul, ou sur la modélisation.

Concernant le module de charriage de Mage8 ;

- Implémenter dans le code le démixage et mixage des sédiments ainsi que la création de nouvelles couches sédimentaires
- Tester le module sur des cas réel du Rhône (sur le secteur de Miribel notamment)

Concernant les modèles Mage-AdisTS ;

- Réaliser une étude plus poussée sur une retenue « test » du haut-Rhône afin de mieux comprendre le comportement d'AdisTS et de réaliser un meilleur calage du modèle. Avec par exemple l'appui de mesures de suivi au cours de l'APAVÉR de 2025
- Tester AdisTS sur des cas-tests maîtrisés avec des résultats expérimentaux de laboratoire
- Étendre la période de simulation pour inclure l'APAVÉR de 2021

4. Formation et appui aux actions OSR

Sont présentés dans cette section les principaux supports de Léa Kieffer lors de l'OSR6 en tant que référente de la modélisation numérique 1D avec le modèle du Rhône de l'OSR. Ceci n'inclut pas les nombreux échanges avec les développeurs (J.B. Faure, T. Terraz, P.A. Rouby) pour les débogages des outils numériques.

4.1. Aide à la modélisation

Support régulier :

- Dans le cadre de la thèse de Nicolas Noclin (ENTPE) : Réalisation d'un modèle Mage sur le secteur de Péage-de-Roussillon ; création du modèle, modification de la géométrie suite aux mesures bathymétriques, calage du modèle, création de plusieurs simulations sur différentes périodes et hypothèses. Réalisation d'un modèle AdisTS : traitement des données d'entrées, création du modèle, calage des paramètres sédimentaires, réalisation de carottes numériques.
- Dans le cadre du stage de Florianne Masquelier (INRAE) : Réalisation d'un modèle Mage et AdisTS sur le secteur de Miribel Jonage, réalisation de plusieurs simulations sous différentes hypothèses.

Support ponctuel :

- Formation aux logiciels Pamhyr, Mage, Adis-TS et aide à la création de modèles et à leurs utilisations pour plusieurs utilisateurs : Kevin Galamin ; stagiaire INRAE 2021, Purnima Das ; stagiaire INRAE 2022, Felipe Alberto Mendez-Rio ; contractuel INRAE, Nathan Pellerin ; stagiaire INRAE 2022, Aurore Refloch ; ingénieure Ginger Burgeap, Axel Roman ; stagiaire INRAE 2023 ; Kathleen Gerarduzzi ; stagiaire INRAE 2023 ; Batiste Chrétien, stagiaire INRAE 2024.
- Participation (en tant que formatrice) aux journées modélisation 1D organisée les 30 et 31 janvier 2024 (15 stagiaires)

4.2. Utilisation du modèle OSR pour la production de données

- 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)
- Dans le cadre de la thèse d'Etienne Dureuil (INRAE) :
 - Simulation et extraction du débit à St-Alban sur l'année 2022
 - Extraction des données de vitesses, débit et hauteur d'eau au niveau de la confluence Rhône-Saône sur la période 2000 à 2020
- Dans le cadre de la thèse de Mathieu Lucas (INRAE) ; modélisation de temps de propagation de crues sur le modèle bas-Rhône (axe C OSR6).
- Extraction des données de niveau d'eau sur la période de 2018 à 2020 sur tout le secteur de Miribel-Jonage à partir du modèle haut-Rhône pour intégration dans le modèle FEFLOW par Hamza Jerbi à l'IGE

5. Couplage hydro-sédimentaire et transferts de contaminants

Cette partie présente les actions menées en OSR6 par l'IRSN pour coupler un modèle hydro-sédimentaire et un modèle de transfert des contaminants particuliers dans la colonne d'eau. L'objectif était de développer un modèle de fractionnement liquide-solide des contaminants et de tester son couplage à un modèle hydro-sédimentaire par une application sur le Rhône. Ces actions ont été menées avec le code 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 au modèle hydro-sédimentaire à plusieurs classes de particules du code CASTEAURx 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 trois étapes :

- Proposition d'un modèle de fractionnement liquide/solide des contaminants adapté au couplage hydro-sédimentaire.
- Calibration du modèle hydro-sédimentaire multi-classe du code CASTEAURx.
- Couplage hydro-sédimentaire et transfert des contaminants.

5.1. Modèle de fractionnement liquide/solide

Le modèle de fractionnement liquide-solide traite de la répartition des contaminants en une fraction dissoute, une fraction colloïdale et différentes fractions particulières spécifiques à chaque classe de particules. Dénommé E-K-P, il s'agit d'une adaptation aux rivières de l'approche E-K initialement développée pour les sols. Il distingue les fractions des particules qui échangent des contaminants quasi-instantanément et à l'équilibre avec l'eau, celles qui échangent plus lentement et les fractions réfractaires non-échangeables (Tomczak et al., 2021), de sorte que les contributions échangeables sont d'autant plus prépondérantes que les particules sont fines et inversement pour la contribution non-échangeable.

Dans la chaîne de calcul du code CASTEAURx, ce modèle s'inscrit à chaque pas de temps à la suite de la résolution des modèles hydraulique, sédimentaire et de dispersion des contaminants. Il modélise le fractionnement liquide/solide des contaminants en fonction de la taille et des concentrations des différentes classes de particules données par le modèle sédimentaire, des apports de contaminants dans le cours d'eau par érosion-lessivage du bassin-versant et par rejets directs et des concentrations volumiques totales obtenues après la résolution de la dispersion et décrites par la relation suivante :

$$[C] = [Cw] + [pc] \cdot [Cpc] + \sum_{p=0}^{Np} ([pe_c] \cdot [Cpe] + [pk_c] \cdot [Cpk] + [pp_c] \cdot [Cpp]) \quad \text{Équation 1}$$

Avec $[C]$, la concentration volumique totale du contaminant C , $[Cw]$, sa concentration volumique dissoute, $[Cpc]$, sa concentration massique colloïdale et, pour chaque classe de particule, $[Cpe]$, $[Cpk]$ et $[Cpp]$ ses concentrations massiques dans les fractions à l'équilibre, $[pe_c]$, dynamique, $[pk_c]$, et passive, $[pp_c]$.

Pour chaque classe de particule, et par analogie à des particules sphériques, ces trois fractions sont obtenues en fonction du rayon r_p et de deux épaisseurs d'échange spécifiques à chaque contaminant : celle de la couche superficielle d'équilibre, δe_c , et celle la couche dynamique, δk_c (**Figure 23**).

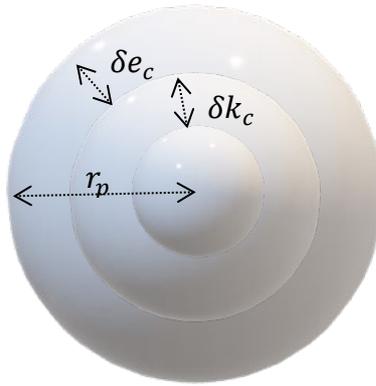


Figure 23 : fractions particulières équilibre, dynamique et passive d'une particule

$$r_p \geq \delta e_c \Rightarrow [pe_c] = \left(1 - \left(1 - \frac{\delta e_c}{r_p}\right)^3\right) \cdot [p]$$

$$r_p < \delta e_c \Rightarrow [pe_c] = [p]$$

Équation 12

$$r_p \geq \delta e_c + \delta k_c \Rightarrow [pk_c] = \left(1 - \frac{\delta e_c}{r_p}\right)^3 \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{\delta e_c - \delta k_c}{r_p - \delta e_c}\right)^3\right) \cdot [p]$$

$$\delta_{PE} < r_p < \delta e_c + \delta k_c \Rightarrow [pk_c] = \left(1 - \left(1 - \frac{\delta e_c}{r_p}\right)^3\right) \cdot [p]$$

$$r_p \leq \delta e_c \Rightarrow [pk_c] = 0$$

Équation 13

$$r_p > \delta e_c + \delta k_c \Rightarrow [pp_c] = \left(1 - \frac{\delta e_c + \delta k_c}{r_p}\right)^3 \cdot [p]$$

$$r_p \leq \delta e_c + \delta k_c \Rightarrow [pp_c] = 0$$

Équation 14

Les concentrations $[Cw]$, $[Cpc]$ et, pour chaque classe p , $[Cpe]$, $[Cpk]$ et $[Cpp]$ sont déduites de la concentration volumique totale du contaminant issue de la résolution des processus de dispersion. Elles sont données par les relations suivantes :

➤ Pour la fraction dissoute :

$$\frac{d[Cw]}{dt} = \frac{k_c^-}{\alpha_c} \cdot \left(-[Cw] \cdot \sum_{p=0}^{Np} ([pk_c] \cdot Kdpk) + \sum_{p=0}^{Np} ([pk_c] \cdot [rpk]) \right) \quad \text{Équation 15}$$

Avec :

- $\alpha_c = 1 + Kd_\delta \cdot ([pc] + \sum_{p=0}^{Np} [pe_c])$
- $Kdpk = \frac{k_c^+ \cdot Kd_\delta}{k_c^-} \cdot \frac{[pe_c]}{[pk_c]}$: coefficient de fractionnement liquide-solide à l'équilibre du contaminant c dans la couche dynamique des particules.
- Kd_δ : coefficient de fractionnement à l'équilibre du contaminant dans la couche équilibre des particules.
- k_c^- et k_c^+ : cinétiques d'échange entre les couches équilibre et dynamique.

➤ Pour chaque classe de particule ($p = 0 \rightarrow Np$) :

$$\frac{d[Cpk]}{dt} = k_r^- \cdot (Kdpk \cdot [Cw] - [Cpk]) \quad \text{Équation 16}$$

Ces équations permettent de déduire $[Cw]$ et $[Cpk]$ pour chaque classe de particules et, à l'issue, de déduire les concentrations de leurs fractions équilibre et colloïdale :

$$[Cpc] = Kd_\delta \cdot [Cw] \quad \text{Équation 17}$$

$$[Cpe] = Kd_\delta \cdot [Cw] \quad \text{Équation 18}$$

Les concentrations particulières passives ne changent pas :

$$[Cpp] = [Cpp] \quad \text{Équation 19}$$

En pratique, ce modèle est activé après la résolution des processus de dispersion qui donne les concentrations volumiques totales, $[C]$. Le fractionnement solide-liquide est ensuite déterminé à partir des paramètres spécifiques aux contaminants (Kd_δ , k_c^- , k_c^+ , δe_c , δk_c et $[Cpp]$) et des concentrations des classes de particule, $[p]$, données par le modèle hydro-sédimentaire.

5.2. 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.

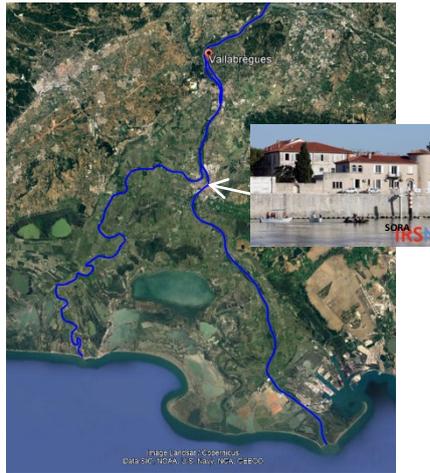


Figure 24 : Le Rhône à l'aval de Vallabrègues et station SORA

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 des 28 classes de particule, la **Figure 25** présente les confrontations modèle/mesures obtenues à la station SORA à l'issue de ces ajustements.

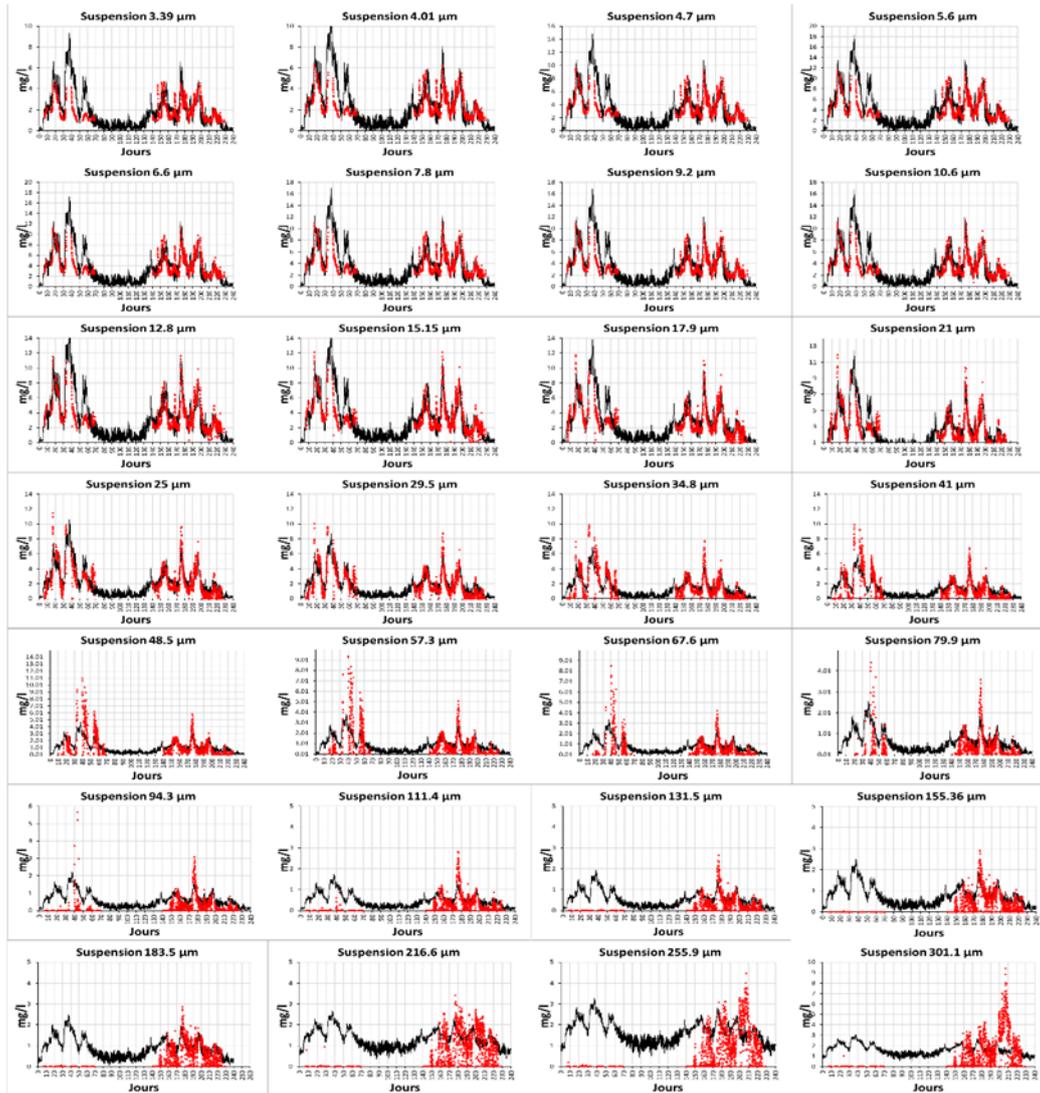


Figure 25 : Comparaison modèle/mesures à la station SORA des chroniques de charges en suspension des classes granulométriques (Points rouges : mesures ; courbe noire : modèle)

Les chroniques des données granulométriques se partagent en trois périodes :

- 70 premiers jours μm : chroniques marquées par des fluctuations erratiques de la charge en suspension des particules de diamètre supérieur à $40 \mu\text{m}$.
- 70 à 140 jours : absence de mesure en raison d'opérations de maintenance sur la station.
- au-delà de 140 jours : mesures correctes pour les particules inférieures à $150 \mu\text{m}$ et, au-delà, comportement d'autant plus aléatoire 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 $60 \mu\text{m}$ ($R^2 > 0.7$, **Figure 26**). Ces classes correspondent aux particules cohésives qui sont essentiellement transportées en suspension et qui sont les principaux supports des fractions particulières des contaminants. L'accord se dégrade pour les classes plus grossières, en particulier au-dessus de $180 \mu\text{m}$. 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 particulières des contaminants est négligeable.

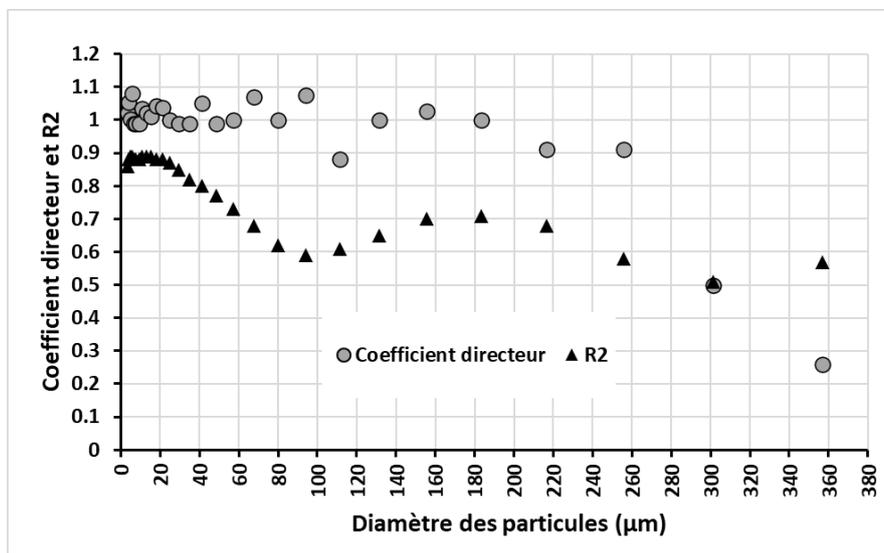


Figure 26 : Coefficients directeurs et de corrélation de la comparaison modèle/mesures en fonction de la taille des particules

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. En particulier, le modèle permet de compléter de façon réaliste l’absence de mesures entre les 70^{ème} et 140^{ème} jours qui correspondent à la période estivale caractérisée par des débits bas et de faibles charges en suspension.

5.3. 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 du Rhône sont modélisées 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 premières simulations, les activités particulières ont été calculées 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 27** présente la confrontation des chroniques modélisées et mesurées à la station SORA sur la période d’étude.

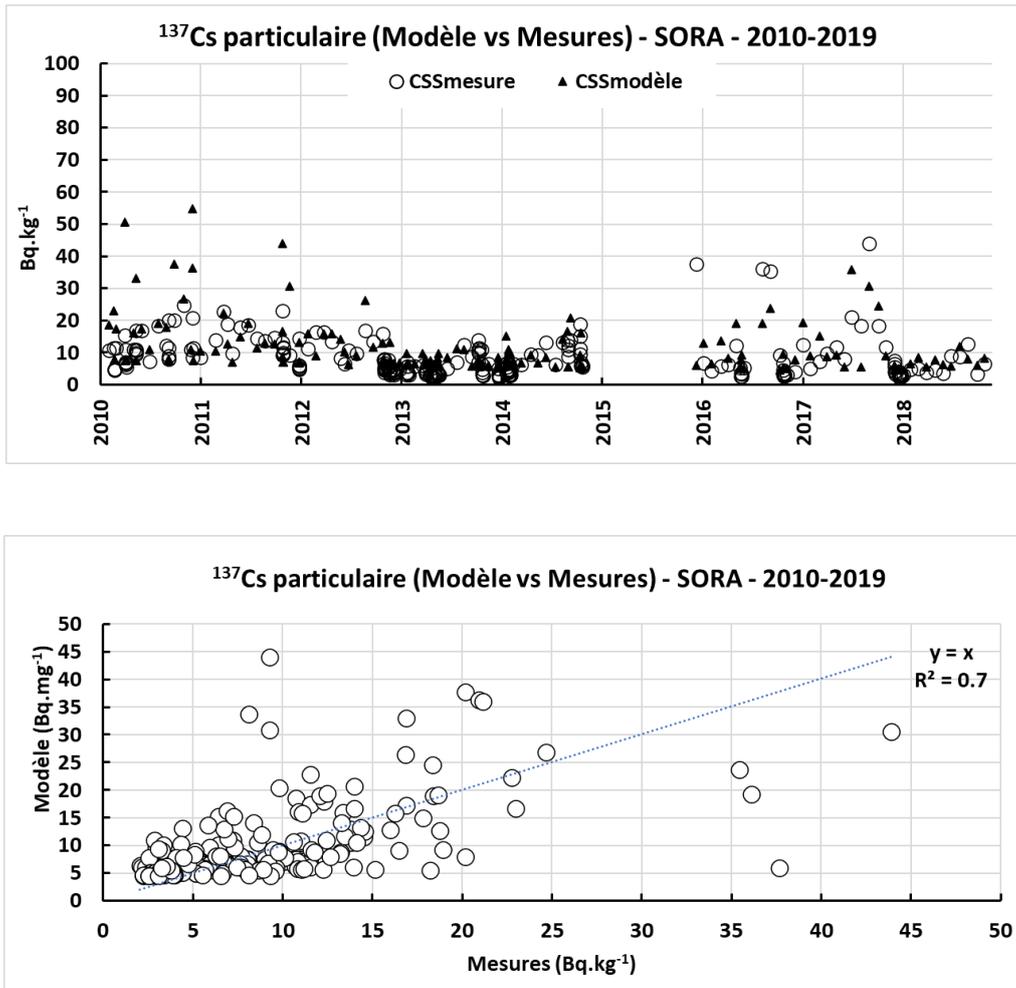


Figure 27 : Comparaison modèle/mesure du ¹³⁷Cs particulaire à SORA entre 2010 et 2019

Les concentrations modélisées ont tendance à être supérieures aux mesures avant 2012 et après 2016. Le R2 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.

5.4. Conclusions

Les actions réalisées sur le couplage des modèles hydro-sédimentaire et de transfert des contaminants ont consisté :

- 1) à proposer un modèle de fractionnement liquide/solide des contaminants qui tienne compte des différentes classes de particules modélisées par les modèles hydro-sédimentaires, qui permette de considérer les principaux processus de fractionnement liquide-solide, qui puisse distinguer l'origine des contaminants notamment en intégrant les bruits de fond géochimiques et qui s'appuie sur des paramètres accessibles.

- 2) A calibrer un modèle hydro-sédimentaire à plusieurs classes de particules sur le Rhône à l'aval de Vallabrègues.
- 3) A tester le couplage des deux modèles par confrontation à des données empiriques.

Pour le premier point, le travail a abouti au modèle E-K-P qui est une adaptation aux rivières de l'approche E-K initialement développée pour les sols. Cette adaptation consiste à prendre en compte plusieurs classes de particules en fonction de leur taille et à ajouter une fraction particulaire passive et non-échangeable notée P.

Pour le second point, la calibration du modèle hydro-sédimentaire sur le Rhône à l'aval de Vallabrègues a montré un bon comportement du modèle vis-à-vis des particules fines cohésives de diamètres inférieurs à 60 μm 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.

Pour le troisième et dernier point, le couplage des modèles hydro-sédimentaire et de transfert des contaminants a été testé en confrontant les activités massiques en ^{137}Cs des matières en suspension modélisées à celles mesurées au niveau de la station SORA entre 2010 et 2019. Cette confrontation a été réalisée en fonction des d_{50} modélisés (diamètre médian) et des apports de ^{137}Cs par lessivage à l'échelle globale du bassin versant du Rhône et par les rejets liquides du centre de Marcoule. Les résultats montrent que le modèle approche les activités massiques particulières avec une erreur moyenne inférieure à un facteur 2.

Les deux principales pistes d'amélioration qui seront traitées avec le prochain programme OSR7 sont l'érosion/lessivage des bassins versants en fonction des contributions des principaux affluents du Rhône et l'intégration des échanges entre les sédiments de fond et les matières en suspension.

6. 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.
- Camenen, B., Dramais, G., Laible, J., Le Coz, J., Lauters, F. & Pierrefeu, G. (2023) Quantification of continuous sand flux time-series downstream of a dam during a flushing event. *Environmental Fluid Dynamics* (sous presse), doi : 10.1007/s10652-023-09955-9
- Camenen, B., Kieffer, L., Le Coz, J., Dugué, V. & Reynaud, S. (2024). Long-term modelling of dam reservoir deposits in the River Rhône from Lake Geneva to Lyon, France. Proc. 12th RiverFlow conference, Sept. 2024, Liverpool, Angleterre. 8 p.
- Camenen, B. & Larson, M. (2005), A bedload sediment transport formula for the nearshore, *Estuarine, Coastal & Shelf Science*, 63 : 249–260, doi : 10.1016/j.ecss.2004.10.019
- Camenen B., Larson M. & Bayram A. (2009). Equivalent roughness height for plane bed under oscillatory flow, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 81(3): 409-422. doi: 10.1016/j.ecss.2008.11.019
- Camenen, B., Perret, E., Herrero, A., Berni, C., Thollet, F., Buffet, A., Dramais, G., Le Bescond C., & Lagouy M. (2016). Estimation of the volume of a fine sediment deposit over a gravel bar during a flushing event. Proc. 8th RiverFlow conference, St Louis, Missouri, Etats-Unis, Juillet 2016, CDRom, pp. 533-540.
- Engelund, F. & Hansen, E. (1967), *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*, Technical Press, Copenhagen, Denmark.
- 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 Claude Bernard Lyon 1, Lyon, France. <https://hal.science/OSR/tel-01273431v1>
- Jing, Y., Zhang, J., Zhang, Q. & Maa, J. P.-Y. (2024). Experimental study on the effects of sediment size gradation and suspended sediment concentration on the settling velocity, *ws. Powder Technology*, 437(119541) : 1-13.
- Krone, R. B. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes: final report. Technical report, Hydraulic Eng. Lab. and Sanitary Eng. Res. Lab., University of California, Berkeley, California, USA.
- Launay M. (2014). Flux de contaminants particuliers dans un grand cours d'eau anthropisé : dynamique des PCB et du mercure transportés par les matières en suspension du Rhône, du Léman à la Méditerranée. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1, France. <https://hal.science/OSR/tel-01128294v2>
- Le Coz J., Camenen B., Faure J.B., Launay M., Troudet L., Kieffer L., Boyer P., Radakovitch O. & Verney R. (2021). Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D. Rapport Final. Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR), 5ème Programme d'Actions, 56 p. <https://hal.science/OSR/hal-03293557v1>

- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F. & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gauging in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509 : 573-587, doi : 10.1016/j.jhydrol.2013.11.016
- Martin-Vide, J. P., Capape, S. & C. Ferrer-Boix (2019). Transient scour and fill. The case of the Pilcomayo River. *Journal of Hydrology* , 576 :356-369, doi : 10.1016/j.jhydrol.2019.06.041
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948), Formulas for bed-load transport, in 'Proc.2nd IAHR Congress', Stockholm, Sweden, pp. 39–64.
- Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of Hydraulic Division*, 9 : 105–139.
- Poulier G., Launay M., Le Bescond C., Thollet F., Coquery M. & Le Coz J. (2019). Combining flux monitoring and data reconstruction to establish annual budgets of suspended particulate matter, mercury and PCB in the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean sea, *Science of the Total Environment*, 658: 457-473. <https://hal.science/OSR/hal-02552588v1>
- Recking, A. (2010), A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction, *Water Resources Research*. 46(W03518) : 1–16. doi : 10.1029/2009WR008007
- Sadaoui, M., Ludwig, W., Bourrin, F., Raimbault, P. (2016). Controls, budgets and variability of riverine sediment fluxes to the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea), *Journal of Hydrology*, 540: 1002-1015.
- Thollet F., Le Coz J., Antoine G., François P. , Saguintaah L., Launay M. & Camenen B. (2013). Influence de la granulométrie des particules sur la mesure par turbidimétrie des flux de matières en suspension dans les cours d'eau, *La Houille Blanche*, 4:50-56.
- 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 137Cs in the Rhone River (France). *Environmental Modelling and Software*, 145, 13p.



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers



Cofinancé par
l'Union européenne