



HAL
open science

Rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les bras secondaires

Brice Mourier, Nicolas Noclin, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Léa Kieffer, Théophile Terraz, Thierry Winiarski

► **To cite this version:**

Brice Mourier, Nicolas Noclin, Jérôme Le Coz, Benoît Camenen, Léa Kieffer, et al.. Rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les bras secondaires. [Rapport de recherche] ENTPE; INRAE. 2024. hal-04652887

HAL Id: hal-04652887

<https://hal.science/hal-04652887v1>

Submitted on 29 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

Rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les bras secondaires

Rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les bras secondaires

Rapport scientifique final

Version du 21 Juin 2024

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

Axe A – Comprendre le fonctionnement hydrosédimentaire du fleuve

Action A.3.3 – Évaluer le rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les RCC - couplage terrain et modélisation

Axe B – Comprendre les sources et la dynamique des MES et des contaminants particulaires dans le bassin du Rhône

Action B3.2 – Comparaison des flux de contaminants déposés par rapport aux flux qui transitent

Personnes impliquées

Brice Mourier (CR)
Nicolas Noclin (Doctorant)
Jérôme Le Coz (Chercheur)
Benoit Camenen (DR)
Léa Kieffer (IR)
Théophile Terraz (IR)
Thierry Winiarski (DR)

Equipe de recherche

ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA
INRAE-RiverLy
INRAE-RiverLy
INRAE-RiverLy
INRAE-RiverLy
ENTPE, IAPHY, CNRS UMR 5023 LEHNA

Pour citer ce rapport

Mourier, B., Noclin, N., Le Coz, J., Camenen, B., Kieffer, L., Terraz, T., Winiarski, T. (2024). *Rôle du forçage hydraulique sur la sédimentation des fines dans les bras secondaires*. Rapport final. Observatoire des Sédiments du Rhône – 6^{ème} programme d'action. Actions A3.3-B3.2. 29 p.

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



Résumé

Ce travail s'intéresse à la mise en place des dépôts sédimentaires dans les bras secondaires d'un tronçon court-circuité du Rhône afin d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la sédimentation, et de déterminer quels événements hydrauliques déclenchent la sédimentation dans les bras secondaires. La représentation du fonctionnement hydrosédimentaire des bras secondaires est réalisé sur le long terme (1977-2018) par une approche originale couplant des mesures de terrain à une modélisation numérique. Il s'agit notamment d'étendre le modèle 1D du Rhône (développé par INRAE) aux bras secondaires, en intégrant ces bras sous forme de nouveaux biefs. Après avoir construit et calibré le modèle à l'aide des mesures de terrain, les résultats hydrauliques permettent d'étudier en détail le forçage hydraulique des dépôts, y compris les types de crues, les phases de dépôt, et la relation entre accumulation et fréquence de connexion. Des simulations réalisées sur de longues périodes permettent d'évaluer l'effet des aménagements sur l'hydraulique et la sédimentation dans les bras secondaires, et d'estimer les volumes de sédiments et la contamination associée. Ce travail ouvre des perspectives importantes pour simuler des scénarios futurs en lien avec la gestion du fleuve et le changement hydroclimatique.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Nicolas Noclin intitulée « *Rôle du forçage hydraulique sur les environnements de dépôt sédimentaire des annexes fluviales. Approche sédimentologique et numérique appliquée au Rhône* », soutenue publiquement le 30/01/2024.

Le présent rapport fait état des travaux réalisés dans les sous-actions A3.3 et B3.2 de l'OSR7, qui avaient respectivement pour objectifs une meilleure compréhension (i) du régime hydrosédimentaires des bras secondaires et (ii) des flux de contaminants stockés dans ces annexes hydrauliques.

Mots clefs

Rhône ; Observatoire ; Sédiments ; OSR ; bras secondaires ; modélisation ; hydraulique ; sédimentation fluviale

Table des matières

1. Introduction et objectifs.....	5
2. Site d'étude	6
2.1 Le vieux Rhône de PDR et ses bras secondaires	6
2.2 Synthèse des résultats de terrain sur la lône de Limony	8
3. Démarche mise en œuvre pour l'approche numérique.....	9
3.1 Emprise spatiale de la modélisation pour la période 1977-2018	9
3.2 Extension du modèle aux bras secondaires de PDR	10
3.3 Représentation numérique des bras secondaires	10
4. Eléments de calibration et de validation du modèle.....	11
4.1 Calibration hydraulique des bras secondaires	11
4.2 Réponse hydraulique des bras secondaires à des débits caractéristiques.....	12
4.3 Réponse hydraulique des bras secondaires en termes de débits et de vitesses.....	12
4.4 Calibration hydrosédimentaire	13
4.4.1 Principe	13
4.4.2 Fonctionnement sédimentaire à l'issue du calage	14
5. Résultats du modèle	15
5.1 Répartition des débits dans le vieux Rhône et dans les bras secondaires.....	15
5.2 Répartition des débits dans les bras sur la période 1977-2018.....	16
5.3 Contributions hydrauliques : approche par les hauteurs d'eau	17
6. Simulations numériques.....	19
6.1 Simulations hydrosédimentaires	19
6.2 Carottes Virtuelles Numériques (CVN)	21
6.3 Sédimentation sur le linéaire	22
6.4 Estimation des volumes de sédiments déposés et des stocks de contaminants associés	24
7. Conclusions.....	27
8. Références.....	28

1. Introduction et objectifs

Les fleuves soutiennent des écosystèmes diversifiés, complexes et dynamiques à l'échelle mondiale, fournissant d'importants services sociaux et économiques. Le développement des infrastructures intervenu au cours du 19^{ème} et du 20^{ème} siècle a fortement impacté les processus écologiques, la biodiversité et les services que ces rivières soutiennent. Il est estimé que la plupart des cours d'eau sont affectés par ces pressions, 77 % d'entre eux ne s'écoulent pas naturellement, c'est-à-dire de manière ininterrompue jusqu'à l'océan (Grill et al., 2019). Cette situation est principalement attribuée au degré de fragmentation des cours d'eau, dû à la présence d'infrastructures comme les barrages qui perturbent la continuité longitudinale et latérale des fleuves. La seconde pression la plus récurrente à l'échelle globale est la régulation des débits dans les tronçons aménagés qui modifie le régime naturel d'écoulement de l'eau, vers un fonctionnement très artificialisé.

Ces perturbations engendrent un déséquilibre du fonctionnement hydrosédimentaire des fleuves, modifiant le fonctionnement hydraulique, les dynamiques de sédimentation et de transfert des particules. Sur les tronçons court-circuités par un canal de dérivation, comme ceux du Rhône à l'aval de Lyon, une baisse de la fréquence de connexion des bras secondaires est souvent constatée. De plus, la présence de sédiments hérités de la mise en place des aménagements a été mise en évidence sur les marges et les annexes fluviales. On observe généralement une rupture granulométrique qui distingue les sédiments grossiers, issus d'un fonctionnement sans dérivation, des sédiments fins déposés lorsque le débit réservé est contrôlé à l'amont par un barrage (Vauclin et al., 2021).

Ce travail s'intéresse à la mise en place des dépôts sédimentaires dans les bras secondaires d'un tronçon court-circuité du Rhône afin d'obtenir une meilleure compréhension des mécanismes responsables de la sédimentation dans ces bras secondaires sur le long terme.

L'hypothèse principale est que les bras secondaires enregistrent l'évolution des processus sédimentaires à travers leurs dépôts, et qu'il est possible de simuler numériquement ce fonctionnement. Une des verrous à de telles simulations est que les modèles numériques actuels ont rarement une portée sur le lit majeur, peut-être en raison de la complexité de la géométrie de ces compartiments singuliers. Contrairement à l'hydraulique, le dépôt sédimentaire semble être plus difficile à représenter numériquement dans les bras secondaires.

L'objectif scientifique est de représenter le fonctionnement hydrosédimentaire de bras secondaires d'un tronçon court-circuité par une approche couplant des mesures de terrain à une modélisation numérique. Il s'agit notamment de déterminer quels événements hydrauliques déclenchent la sédimentation dans les bras secondaires. Le modèle 1D du Rhône, développé par INRAE, a été étendu aux bras secondaires, en intégrant ces bras sous forme de nouveaux biefs.

Après avoir construit et calibré le modèle à l'aide des mesures de terrain, les résultats hydrauliques permettront une caractérisation plus approfondie du régime hydraulique des bras, des épaisseurs accumulées (dépôt/érosion) et de la répartition granulométrique des dépôts et des stocks de contaminants associés. Enfin, des simulations sur de longues périodes seront réalisées à haute résolution temporelle pour évaluer les effets des aménagements sur

l'hydraulique et la sédimentation dans les bras secondaires. Ces travaux permettront d'évaluer la variabilité dans le fonctionnement des bras secondaires et de quantifier leur fonction de stockage de contaminants.

D'un point de vue opérationnel, comprendre les mécanismes responsables de la sédimentation dans ces bras secondaires permettra d'obtenir des informations essentielles pour améliorer la gestion de ces milieux, notamment dans le cadre des opérations de restauration écologique ou de l'évaluation des stocks de contaminants préservés dans le compartiment sédimentaire.

2. Site d'étude

2.1 Le vieux Rhône de PDR et ses bras secondaires

Le site de Péage-De-Roussillon (PDR) est localisé 50 km à l'aval de Lyon (Figure 1). Il fait l'objet de suivis scientifiques réguliers dans le cadre des programmes de recherche OSR et RhônEco. L'aménagement se présente depuis son inauguration en 1977 sous la forme d'un canal aménagé de 10 km en rive gauche parallèlement à un tronçon court-circuité dans lequel s'écoule un débit réservé. L'alimentation du tronçon court-circuité (vieux-Rhône) est contrôlée par le barrage poids de Saint-Pierre-de-Bœuf, long de 152 m et haut de 20,95 m. En plus du barrage, on trouve le seuil de Peyraud sur la partie aval du vieux-Rhône construit au cours de l'année 1978 et l'usine hydroélectrique et l'écluse de Sablons sur la partie aval du canal. Le canal aménagé dérive la majeure partie du débit du fleuve, permettant l'alimentation de 4 turbines hydroélectriques accueillant chacune jusqu'à $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Lors de crues supérieures à $1\,600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, l'excédent hydraulique est dirigé vers le tronçon court-circuité ; le vieux Rhône est donc utilisé comme évacuateur des eaux de crues. Ce tronçon est caractérisé par la présence de bras secondaires, les lônes de Limony, Ilon et Platière, dont le fonctionnement hydraulique est régulé par l'exploitation de l'aménagement dans son ensemble. Le débit réservé initial était de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en été et $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en hiver, puis a été rehaussé en 2014 à $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et $125 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ afin d'augmenter les hauteurs d'eau, de redynamiser les berges et d'améliorer la fonctionnalité des habitats.

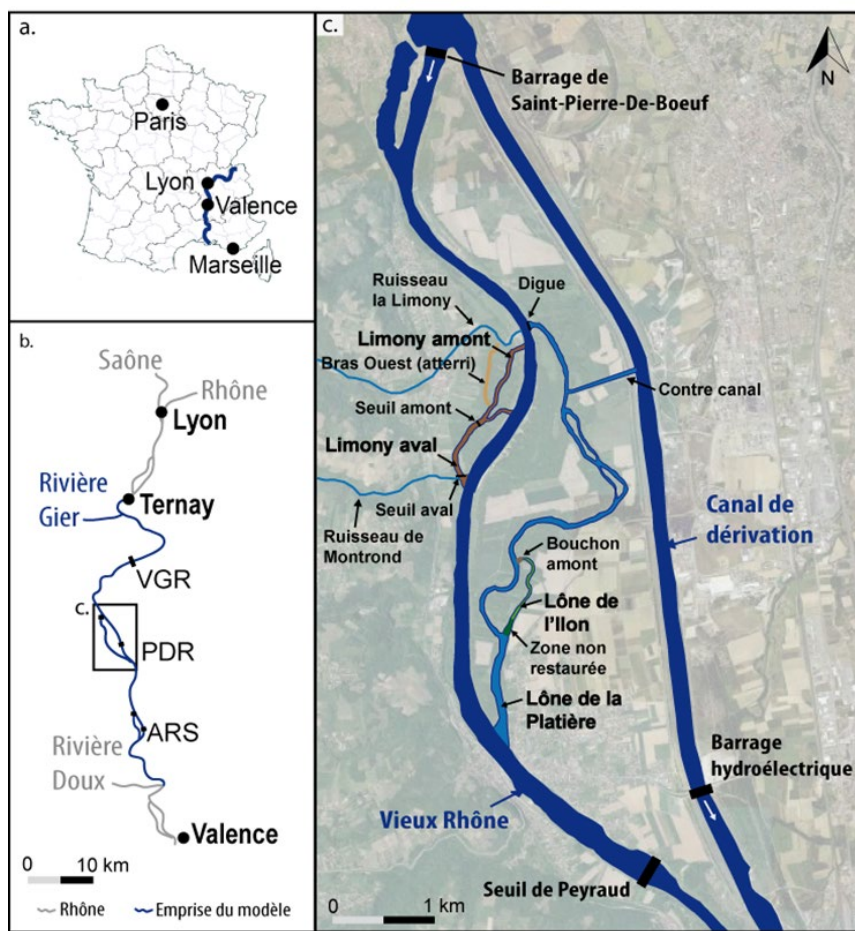


Figure 1 : Résumé cartographique incluant la localisation du Rhône à l'échelle nationale (a), la localisation du secteur d'étude et de l'emprise du modèle (b), et le détail de la zone d'étude de PDR (c) incluant le canal de dérivation, le vieux Rhône et les bras secondaires étudiés : Limony en rive droite et Ilon en rive gauche.

La lône de Limony mesure 1.4 km et se situe en rive droite du vieux-Rhône, elle est constituée de trois bras qui confluent pour donner le bras principal de la lône (Figure 1c). Le bras Ouest est le plus atterri et ne reçoit plus d'écoulements. Ce travail se concentre sur les deux bras principaux, mesurant respectivement 773 m (Limony amont) et 642 m (Limony aval) qui se connectent de manière événementielle lors des crues ; la lône est submergée à partir d'un débit de $1200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ dans le vieux Rhône. L'alimentation par la nappe peut donner des eaux stagnantes plusieurs fois par an. Deux seuils traversent la lône transversalement. Cette lône n'a pas fait l'objet de travaux de restauration.

La lône de l'Ilon, située en rive gauche du vieux Rhône, est connectée à la lône de la Platière et mesure 950 m de long (Figure 1c). La lône de la Platière, qui présente un écoulement permanent avec peu ou pas de problématique de dépôts de sédiments, est incluse dans le modèle uniquement pour simuler les apports à la lône de l'Ilon. Ces deux lônes ayant fait l'objet de différents projets de restauration, une rectification de la topographie au niveau des biefs est réalisée à partir de mesures de terrain. En raison de contraintes liées à la gestion sédimentaire et de travaux opérés sur ce site, seuls des simulations hydrauliques ont été réalisées. Il n'y aura donc pas de présentations des résultats de simulation hydrosédimentaire au niveau du site d'Ilon.

2.2 Synthèse des résultats de terrain sur la lône de Limony

Une pré-étude sédimentaire associant des mesures géophysiques par GPR (8 profils), le prélèvement, l'analyse et la datation de 4 carottes de sédiments ainsi qu'une centaine de sondages à la perche ont permis de caractériser les dépôts de sédiments verticalement, latéralement et longitudinalement. Une synthèse des données collectées sur le terrain permet une première évaluation de la répartition des dépôts sédimentaires dans le bras de Limony (Figure 2). Ces mesures ont également été menées sur le bras de l'Illon, situé en rive droite, mais ne sont pas présentées dans ce rapport. Les résultats couvrent la majeure partie du linéaire ; les zones non documentées étaient inaccessibles au moment des campagnes. Les discontinuités entre les différentes unités sédimentaires sont représentées par des lignes pleines lorsqu'elles sont mesurées directement et par des pointillés lorsqu'elles sont interprétées. Les sondages à la perche sont utilisés pour étendre longitudinalement ce linéaire de 1.3 km.

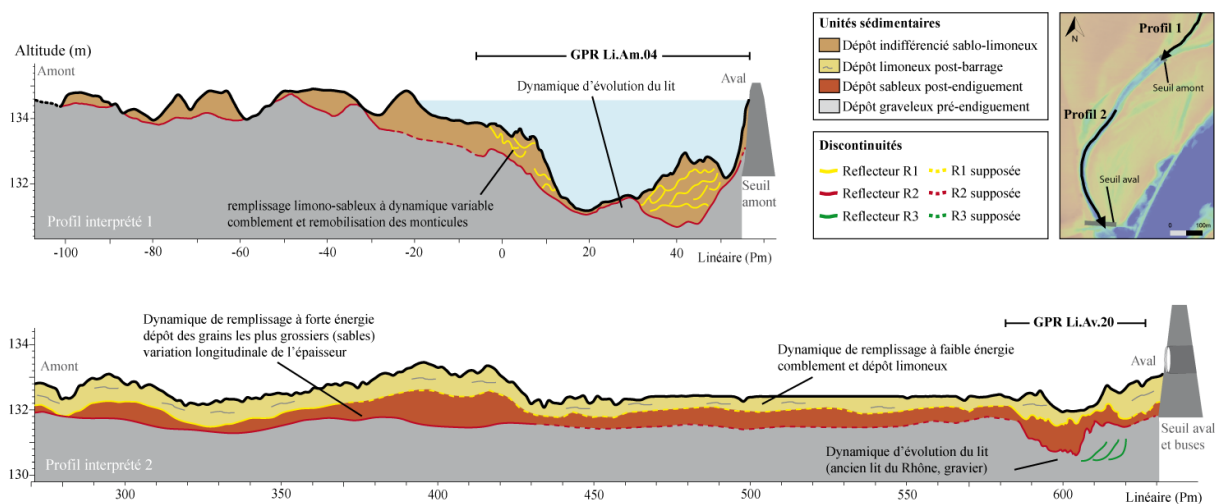


Figure 2 : Synthèse des données de terrain (GPR, carottes, sondages à la perche) réalisées pour évaluer le remplissage sédimentaire de la lône de Limony.

Cette approche in situ a permis de mettre en évidence l'ancien lit de graviers des bras secondaires (en gris dans les figures), surmonté de dépôts sédimentaires plus fins. Un dépôt sédimentaire "indifférencié" incluant sables et limons est observé en amont, tandis qu'un dépôt plus "ordonné", avec des sables surmontés par des limons, est observé en aval (Figure 2). Plusieurs éléments concordants indiquent que la couche supérieure de sédiments fins (de couleur jaune) s'est déposée depuis la mise en place du barrage. L'interprétation de ces données met en évidence un fonctionnement dynamique vraisemblablement pré-aménagement pour les dépôts de galets et de sables, une hétérogénéité longitudinale dans l'accumulation sédimentaire, ainsi que la présence d'un dépôt sédimentaire hérité de la mise en place du barrage couvrant la majeure partie du linéaire (dépôt de limon en jaune sur la figure). La couche de dépôts fins post-aménagement présente une épaisseur plus constante que les couches à granulométrie plus grossière. Ces résultats de terrain seront utilisés par la suite pour calibrer et valider le modèle et serviront de support aux différentes simulations sédimentaires présentées ultérieurement.

3. Démarche mise en œuvre pour l'approche numérique

Le modèle 1D du Rhône¹ ne permettant pas de simuler le fonctionnement hydrosédimentaire des bras secondaires, il est donc nécessaire de construire et d'intégrer ces bras sous forme de nouveaux biefs. Des données supplémentaires telles que la topographie et les chroniques de débits sont nécessaires pour respectivement élaborer la géométrie des bras et évaluer les débits de connexion et d'écoulement dans les biefs, en fonction du débit du vieux-Rhône, afin de calibrer hydrauliquement le modèle. Les connaissances sédimentaires issues de sondages et mesures *in situ* (épaisseur de dépôt, répartition granulométrique) sont également utiles pour ajuster les paramètres sédimentaires en vue de simulations avec Adis-TS.

3.1 Emprise spatiale de la modélisation pour la période 1977-2018

L'emprise du modèle représente la partie du Rhône incluse dans la modélisation. Pour représenter correctement le fonctionnement hydraulique et sédimentaire de la zone d'étude, une portion de 75 kilomètres commençant à Ternay (nœud amont) et se terminant à la confluence Rhône-Doux est prise en compte (Figure 1b). Cette portion inclut 2 aménagements hydroélectriques supplémentaires : Vaugris (1980) à l'amont et le RCC d'Arras (1971) à l'aval. Le Gier, un affluent en rive droite, est également pris en compte dans le modèle.

Les chroniques de débit intégrées à la modélisation pour représenter les écoulements transitoires sur la période sont celles de la station de Ternay couvrant la période 1965-2018. Les enregistrements sont journaliers jusqu'en 2008, puis passent à une fréquence horaire. Pour le Gier, nous disposons de relevés journaliers couvrant la période de 1965 à 1989, puis passant à une fréquence horaire de 1990 à 2018.

Des mesures de concentration en MES sont disponibles sur la base de données BDOH à partir de 2009 pour la Saône (Lyon), de 2000 pour le Rhône (Jons) et de 2013 pour le Gier. Sur le reste de la chronique temporelle, les MES ont été reconstituées à partir de la relation entre les débits d'eau horaires (Q en $m^3 s^{-1}$) et les concentrations horaires de particules en suspension (C_s en $mg l^{-1}$) décrite par Poulier et al. (2019). Cette alternative permet de ne pas utiliser directement les données sédimentaires de la station de Ternay dont les mesures de MES ne sont pas fiables, car le mélange des eaux en crues n'est pas atteint à la station de mesure. La concentration moyenne à Ternay est établie en ajoutant les flux de Jons et de la Saône et en divisant par le débit total à Ternay.

¹ Le modèle 1D du Rhône est un modèle 1D maillée hydro-sédimentaire permettant de réaliser des calculs hydro-sédimentaires sur de longs domaines (plusieurs centaines de kilomètres) et sur du long terme (plusieurs dizaines d'années) et qui a été élaboré à partir des codes de calcul Mage-AdisTS. Le code de calcul Mage résout les équations de Barré-de-Saint-Venant en uni-dimensionnelle; le code de calcul AdisTS résout l'équation d'advection-dispersion d'une concentration en sédiment/polluant avec de potentiels échanges avec le fond via un terme source.

3.2 Extension du modèle aux bras secondaires de PDR

Dans le cadre de ce travail, le modèle 1D du Rhône, développé par INRAE, a été étendu aux bras secondaires en créant des nœuds et des biefs supplémentaires (Figure 3). Le vieux-Rhône est court-circuité par la création du canal de dérivation. Un débit réservé est constamment envoyé dans le vieux-Rhône et le surplus est dirigé vers le canal aménagé, tant qu'il ne dépasse pas le débit maximal que peut recevoir l'usine hydroélectrique. Des lois d'ouvrages sont utilisées pour répartir les écoulements entre les deux biefs, ce qui permet de représenter la gestion théorique par la CNR des écoulements sur ce site. Les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement à l'amont des ouvrages (barrage et usine hydroélectrique) résultent de ces lois.

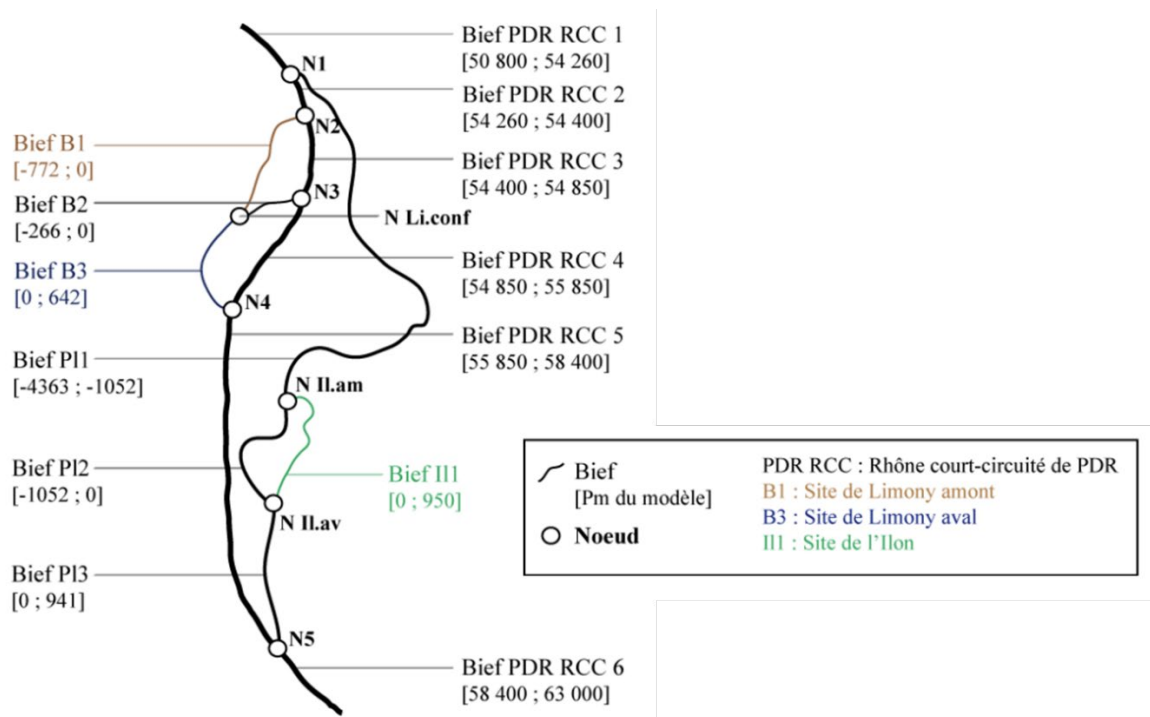


Figure 3 : Représentation des biefs et nœuds du réseau fluvial du site de PDR et des points métriques des débits et des fins de biefs.

3.3 Représentation numérique des bras secondaires

Pour représenter les bras secondaires dans le modèle 1D, un modèle numérique de terrain (MNT) créé en 2013 à partir de mesures LiDAR sur le site de Péage-De-Roussillon a été utilisé pour étendre la géométrie du modèle dans ce secteur. Brièvement, des transects transversaux aux bras étudiés ont été extraits tous les 25 mètres et interpolés pour permettre d'associer des coordonnées et des altitudes à chaque point du MNT au modèle 1D. Une interpolation transversale a ensuite créé 50 à 100 points cotés pour chaque profil, avec une définition des points métriques associés à chacun d'eux. Les petits seuils et orifices présents sur les lînes sont représentés comme des ouvrages associés dans le modèle (nommés singularités), l'écoulement est alors calculé localement par la loi d'ouvrage correspondante. Les profils transversaux, bords et seuils représentent la topographie de surface des lînes et constituent la géométrie des nouveaux biefs utilisés dans le modèle 1D. Au niveau des confluences et des

diffluences, une représentation géométrique particulière est réalisée afin de représenter au mieux la répartition des débits entre les deux biefs.

4. Eléments de calibration et de validation du modèle

4.1 Calibration hydraulique des bras secondaires

Les débits s'écoulant dans les lômes sont basés sur la répartition du débit d'entrée entre le canal de dérivation et le vieux-Rhône, puis entre le vieux-Rhône et les lômes. Au niveau des lômes, cette répartition dépend de la géométrie des diffluences. Pour affiner le calage du modèle et faire correspondre les débits simulés avec les débits réels dans les lômes, une campagne de mesure de débits a été effectuée lors de la crue de mai 2021 à l'aide de d'un profileur acoustique de vitesse par effet Doppler (aDcp, pour «acoustic Doppler current profiler»). Lors de cet événement, le débit entrant dans le vieux-Rhône était de $1\,500\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Les débits mesurés pendant la crue varient de $1\text{ à }2\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ dans la lôme de Limony et sont proches de $10\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ dans la lôme de l'Ilon. Des rectifications topographiques, consistant en des relevés des coordonnées et des altitudes, ont permis d'affiner les géométries du modèle. Ces relevés, effectués à l'aide d'un tachéomètre, ont principalement concerné les nœuds et les seuils transversaux qui ont un impact significatif sur les écoulements.

D'autres adaptations du modèle ont été réalisées pour représenter un écoulement transitoire dans les bras. La création de fentes de Preissmann, qui permet qu'un écoulement en surface libre soit simulé en continu même si le site est parfois sec, facilite l'utilisation des équations de Barré de Saint Venant utilisées dans le modèle 1D. Pour garantir un régime fluvial cohérent dans les simulations, la géométrie du modèle a été ajustée pour éviter les discontinuités bathymétriques et représenter un remplissage par submersion, en particulier au niveau des diffluences. Enfin, la rugosité du fond et la forme du lit ont été représentées par un coefficient de frottement (Strickler), adapté au contexte local : sédiments fins en surface et présence de végétation sur les berges.

Site	Transect associé	Débit simulé (m^3s^{-1})	Ecart aux mesures aDcp (%)
Vieux-Rhône	Pm 62 000	1500	0
Limony amont	Pm -45	2,06	+1,9
Ilon	Pm 406	10,0	-0,2

Tableau 1 : Résultats de simulation de la crue de mai 2021 après calage des coefficients de frottements et comparaison avec les mesures d' ADCP.

La comparaison entre une simulation de la crue de mai 2021 et les mesures de débits effectuées in situ par ADCP pendant la crue donne des résultats très proches (Tableau 1). Les écarts par rapport aux mesures sont inférieurs aux incertitudes de mesure.

4.2 Réponse hydraulique des bras secondaires à des débits caractéristiques

La phase de calibration hydraulique a permis d'ajuster les débits simulés aux mesures effectuées par ADCP. D'autres débits d'écoulement caractéristiques ont été simulés en régime stationnaire pour évaluer la réponse hydraulique des bras secondaires. Les données de sortie fournissent une première estimation de l'ampleur des crues dans les bras pour des débits correspondant à des crues remarquables (Q_5 et Q_{10}) de la période 1977-2018 à Ternay.

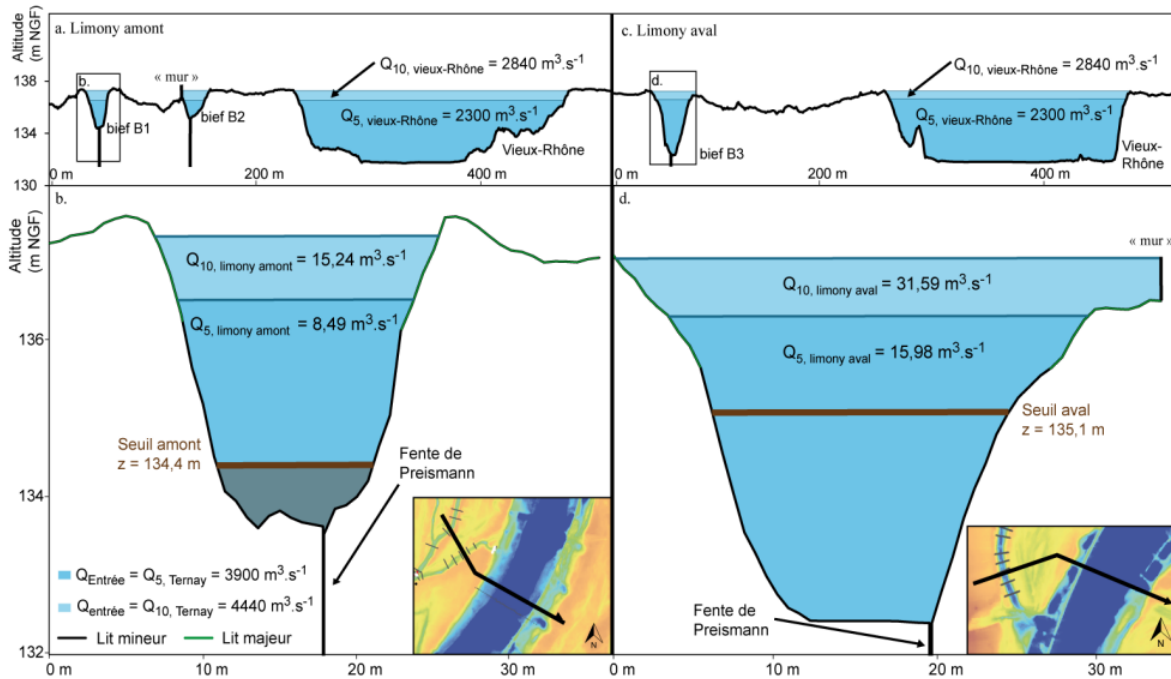


Figure 4 : Réaction des bras secondaires de Limony à des débits Q_5 et Q_{10} en entrée du modèle. A) Partie amont avec bras et vieux Rhône ; B) zoom sur le bief B1 ; C) Partie aval avec bras et vieux Rhône ; D) zoom sur le bief B3.

La figure 4 illustre la simulation de deux débits en régime stationnaire sur la lône de Limony, montrant les hauteurs d'eau et les débits pour l'amont (panneaux A et B) et l'aval (panneaux C et D). L'aval de la lône est alimenté par deux bras, nécessitant la somme de deux débits pour obtenir le débit aval. Sur le bras secondaire de Limony, les écoulements sont contenus par la géométrie pour des débits Q_5 . En revanche, les profils des biefs B2 et B3 ne peuvent contenir une partie de l'écoulement, les crues de débit Q_{10} entraînant un débordement. Pour pallier cette limitation du modèle, un mur est ajouté pour contenir l'écoulement, constituant ainsi une contrainte pour nos simulations numériques à des débits extrêmes. Par conséquent, les débits supérieurs à Q_5 sont difficilement représentables en 1D au regard de la géométrie des chenaux.

4.3 Réponse hydraulique des bras secondaires en termes de débits et de vitesses

La figure 5 représente les vitesses et débits simulés sur une gamme étendue et continue de débits enregistrés à Ternay. La simulation en régime transitoire montre qu'un écoulement est simulé sur la lône de l'Ilon pour un débit entrant dans le modèle $Q_{\text{Rhône}} = 2050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (soit

$Q_{\text{vieux-Rhône}} = 450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Sur la lône de Limony, une connexion aval s'opère pour $Q_{\text{Rhône}} = 2280 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (soit $Q_{\text{vieux-Rhône}} = 680 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et une connexion amont à partir de $Q_{\text{Rhône}} = 2650 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (soit $Q_{\text{vieux-Rhône}} = 1050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Les vitesses d'écoulement simulées ne sont pas proportionnelles au débit dans le réseau fluvial. Lorsque les berges des chenaux secondaires sont en eau on observe un ralentissement des écoulements sur l'Ilon, probablement dû à l'emprise des berges ou aux géométries car les coefficients de frottement sont identiques pour les berges des 2 lônes.

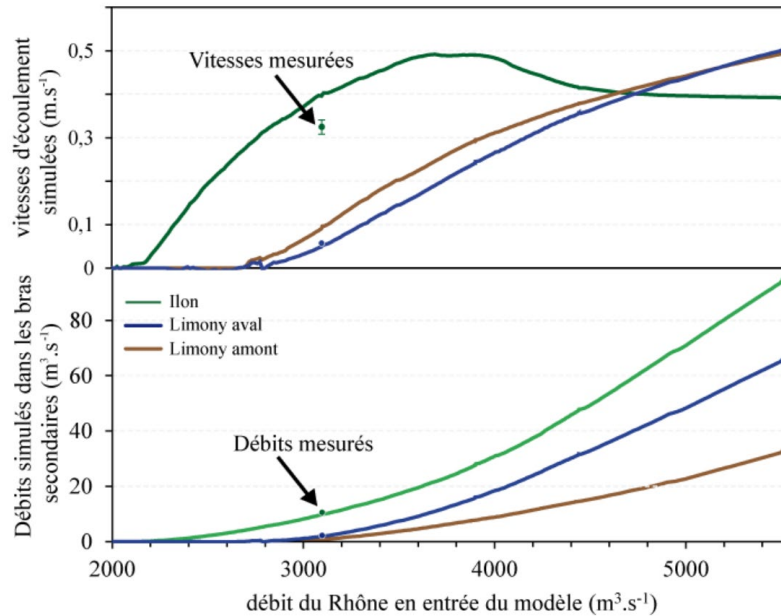


Figure 5 : Représentation des vitesses et des débits dans les bras secondaires en fonction du débit en entrée du modèle (Vert : écoulement simulé au milieu de la lône de l'Ilon ; marron : Limony amont ; bleu : Limony aval).

Concernant les débits simulés, la lône de l'Ilon présente les débits les plus importants, qui augmentent davantage lorsque le débit en entrée augmente. Les débits à Limony sont moins importants en raison de la configuration du bras. Plus le débit d'entrée augmente, plus les débits amont et aval s'éloignent car la zone aval est alimentée par un bras supplémentaire. La concordance des débits simulés avec ceux mesurés lors de la crue de mai 2021 confirme le bon fonctionnement du modèle, qui est considéré comme suffisamment représentatif du fonctionnement hydraulique des bras.

4.4 Calibration hydrosédimentaire

4.4.1 Principe

Le code de calcul Adis-TS résout l'équation d'advection-dispersion d'une concentration en particules et permet son application à des cycles de sédimentation et d'érosion variant dans l'espace et le temps. Les données d'entrée sont les concentrations en MES et la répartition granulométrique par classe de taille. Les classes de taille correspondent à des mesures de MES et de sédiments réalisées par diffraction laser. Les matières en suspension et les sédiments déposés après la mise en place du barrage sont généralement fins, composés principalement d'une fraction limoneuse, ce qui favorise la calibration hydrosédimentaire. Un bilan de masse est calculé par transect, en considérant une répartition uniforme des processus sédimentaires

dans deux compartiments (lit mineur et lit majeur). Différents paramètres sont calibrés pour traduire le transport sédimentaire hors de l'équilibre et donc la dynamique de dépôt/érosion. Des allers-retours entre simulations et données de terrain (épaisseur des dépôts, granulométrie) ont permis de calibrer les volumes de dépôt, la granulométrie et le seuil à partir duquel le dépôt ou l'érosion s'active.

4.4.2 Fonctionnement sédimentaire à l'issue du calage

Les processus sédimentaires simulés dans le bras secondaire de Limony sont caractérisés par des zones d'accumulation et d'érosion, distingués respectivement par les courbes rouge et rose (Figure 6). La courbe noire renseigne de l'accumulation (ou l'érosion) instantanée à chaque pas de temps, cumulant les épaisseurs de sédiments déjà en place au pas de temps précédent. Cette épaisseur accumulée pour chaque évènement est faible pour chaque pas de temps ce qui confirme la cohérence des simulations.

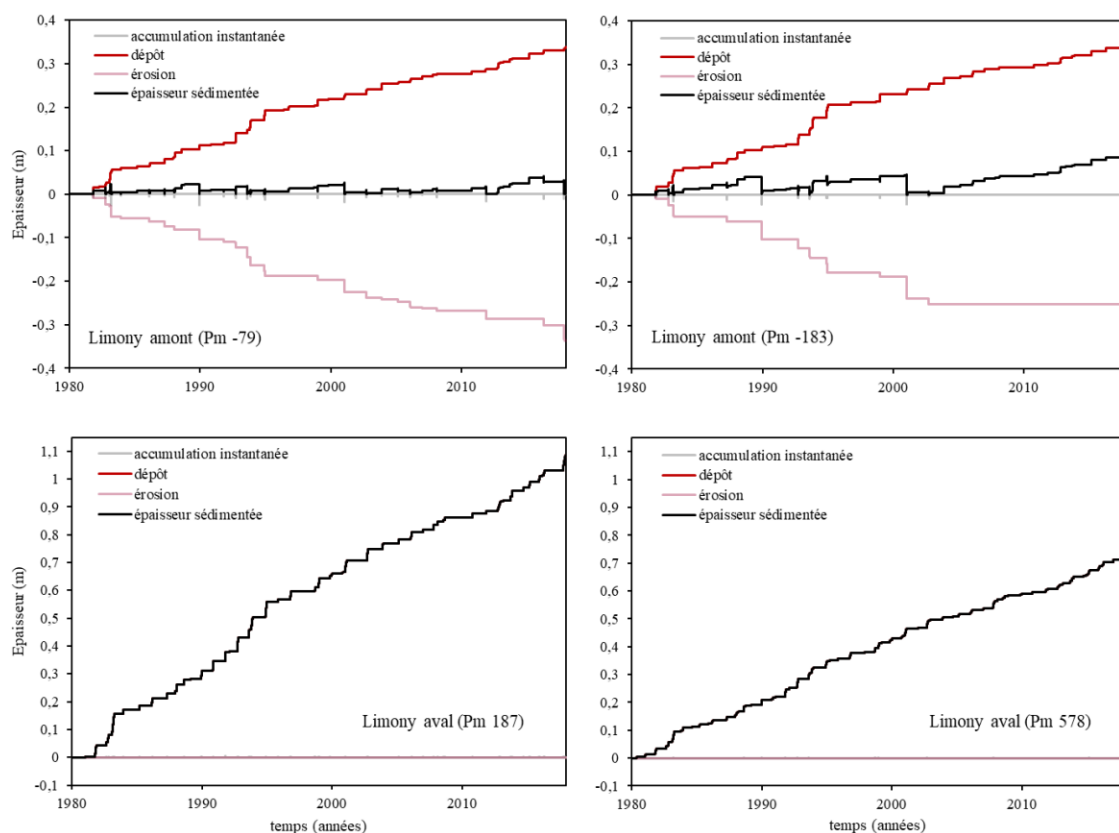


Figure 6 : Processus de sédimentation et d'érosion simulés après calage sur les épaisseurs sédimentées sur 2 transects en amont et 2 transects en aval de la lône de Limony.

À Limony, il est clairement observé qu'un processus d'accumulation est simulé à l'aval de la lône, tandis qu'une érosion significative est simulée à l'amont, où des séquences d'érosion/dépôt prédominent. A l'amont, des accumulations légères se produisent parfois sans phénomènes d'érosion, et sont remobilisées quelques années plus tard. Les simulations de la zone aval montrent des taux d'accumulation relativement similaires : de 2 à 3 cm/an. L'analyse de ces résultats permet de discuter de la sédimentation dans les lônes et d'observer sa dynamique sur le long terme.

5. Résultats du modèle

5.1 Répartition des débits dans le vieux Rhône et dans les bras secondaires

Le débit accordé au vieux-Rhône par rapport au débit total du Rhône a déjà été présenté pour des périodes courtes ou des événements de crues. Avec la simulation sur la période 1977-2018, nous pouvons comparer les débits du Rhône et les débits accordés au vieux-Rhône (Figure 7). Ces résultats reflètent l'application de la loi d'ouvrage intégrée au modèle, qui permet une répartition des débits entre deux biefs (vieux-Rhône et canal aménagé). Pour compenser la réhausse du débit réservé variable entre les saisons dans la chronique de débit du vieux-Rhône, la figure 7 représente à partir de 2014 un débit réservé moyen. Étant donné que les îlons ne sont pas alimentées lorsque le vieux-Rhône reçoit le débit réservé, cette approximation n'a pas d'impact sur nos simulations.

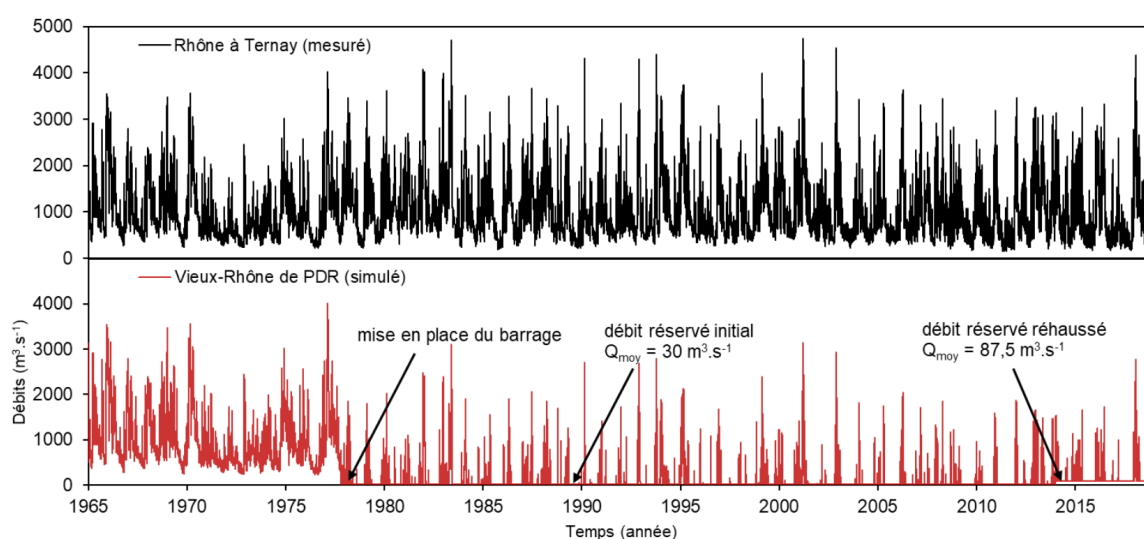


Figure 7 : Chronique de débit du Rhône mesuré à Ternay et débits simulés correspondants pour le vieux-Rhône de PDR

Sur la période 1977-2018, d'après la modélisation, le vieux-Rhône bénéficie d'un débit supérieur au débit réservé seulement 16% du temps (Figure 7). Pour décrire la répartition des débits, nous pouvons également exprimer le pourcentage du débit envoyé vers le vieux-Rhône en fonction du débit du Rhône. Entre un débit d'étiage et une Q_{100} , l'alimentation du vieux-Rhône constitue respectivement 0,03 à 71% des eaux du Rhône. A partir d'un débit de $3200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 50% des écoulements sont dirigés vers le vieux-Rhône. Ces résultats illustrent l'utilisation du vieux-Rhône comme évacuateur de crue. Il est important de rappeler que ces résultats correspondent au fonctionnement « normal » de l'usine hydroélectrique et qu'ils ne tiennent pas compte des arrêts temporaires de turbines dus à la gestion de l'usine. Nous observons très nettement la mise en place du barrage en 1977 traduite par une chute du débit dans le vieux-Rhône. L'alimentation du vieux-Rhône se caractérise par un débit réservé faible mais continu, avec des pics événementiels survenant uniquement en période de crue. Ainsi, le débit réservé est le régime dominant sur la période 1977-2018 (caractérisant les nouvelles conditions hydrauliques du site), justifiant ainsi l'intérêt de se concentrer sur cette période dans ce travail, où de nouvelles conditions hydrosédimentaires « sous contraintes » interviennent.

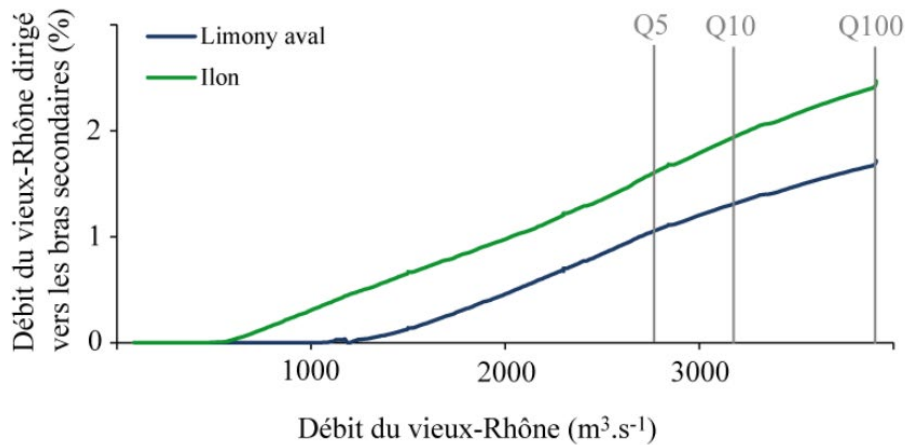


Figure 8 : Pourcentage du débit du vieux-Rhône de PDR s'écoulant dans les bras secondaires

A l'échelle des bras secondaires, nous avons déjà pu constater les débits du vieux-Rhône pour lesquels les lînes commencent à être alimentées (Figure 5). Pour des débits plus importants, la proportion du débit dirigé vers le vieux-Rhône peut aller jusqu'à 2,4% du débit s'écoulant dans la lîne de l'Ilon et 1,7% dans Limony en Q_{100} (Figure 8). Pour des débits inférieurs à $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, les 1% du débit du Rhône transitant dans les bras secondaires ne sont pas dépassés.

5.2 Répartition des débits dans les bras sur la période 1977-2018

Des simulations ont permis de représenter les débits s'écoulant dans les bras secondaires sur l'ensemble de la période ; un extrait de la période 1977-1996 est présenté dans la figure 9. Les résultats de ces simulations montrent les débits s'écoulant dans les bras secondaires en fonction des débits du vieux Rhône.

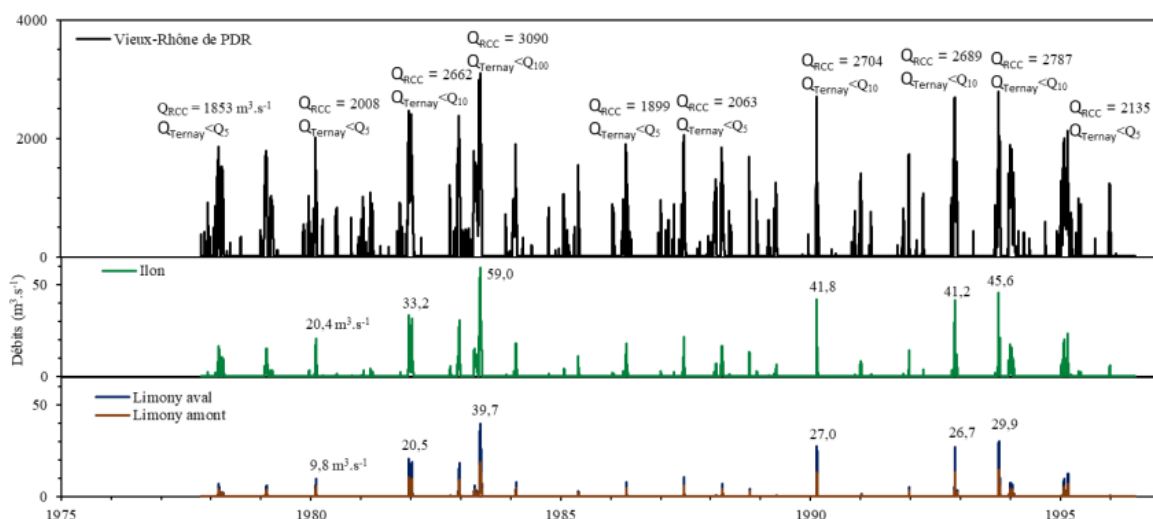


Figure 9 : Extrait d'hydrogrammes représentant les débits d'écoulement dans le vieux-Rhône et les bras secondaires de PDR simulés sur la période 1977-1996. Les résultats de synthèse présentés dans le texte et le tableau 2 concernent la totalité de la période simulée (1977-2018).

A partir des hydrogrammes simulés dans le vieux-Rhône de PDR et des géométries mis en place pour les bras secondaires, l'alimentation des lômes se traduit statistiquement par 136 événements de connexion à $Q > 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour l'Ilon et 55 pour Limony, sur une période de 41 ans (Tableau 2). Les fréquences de connexion sont de respectivement 3,3 et 1,3 fois par an, avec une durée moyenne de 9 et 7 jours.

Tableau 2 : Résumé statistique des données débitométriques pour les bras secondaires étudiés (1977-2018)

	Ilon	Limony aval
Nombre d'évènements de connexion ($Q > 1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	136	55
Fréquence de connexion (évènements par an)	3.3	1.3
Durée moyenne de connexion	207h (~9j)	166h (~7j)
Débit maximum ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	60,8	40,9
Débit moyen de connexion ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	7,6	6,8

Concernant les évènements majeurs sur la période 1977-2018, 5 épisodes de crues compris entre les périodes de retours Q_5 et Q_{10} (décrits comme $Q < Q_{10}$) et 3 épisodes compris entre le Q_{10} et le Q_{100} ($Q < Q_{100}$) sont simulés dans les bras secondaires. Dans la lôme de l'Ilon, les débits $Q < Q_{10}$ varient de 33,2 à 41,8 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ et les débits $Q < Q_{100}$ vont de 51,1 à 60,8 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. A Limony, les débits $Q < Q_{10}$ varient entre 20,5 et 29,9 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, tandis que les débits $Q < Q_{100}$ vont de 33,8 à 40,9 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour l'ensemble de la période simulée.

En considérant uniquement le débit (Figure 9), la lôme de l'Ilon est plus régulièrement alimentée en eau et pour des durées plus longues, possiblement en raison de sa cote de connexion amont plus basse (132,4 m NGF contre 135 m NGF à Limony). Nous avons constaté que l'écoulement Nord-Sud simulé ne rend pas compte des connexions par l'aval, ni du maintien d'une hauteur d'eau par effet de nappe dans les bras secondaires.

5.3 Contributions hydrauliques : approche par les hauteurs d'eau

En utilisant une approche limnimétrique, nous observons un plus grand nombre d'évènements entraînant une augmentation de la hauteur d'eau, et donc une connexion entre le vieux Rhône et les bras secondaires. Le modèle étant unidirectionnel permet de simuler des débits positifs et négatifs par rapport au sens 1D du courant, représenté par un vecteur vitesse allant respectivement vers l'amont ou l'aval. Cette caractéristique permet d'expliquer l'élévation de la hauteur d'eau avec des vitesses et débits négatifs au début des évènements. Par exemple, dans le bras de Limony, les simulations des hauteurs d'eau sur la période 1977-2018 montrent qu'une augmentation des hauteurs en aval ne s'observe pas systématiquement en amont, ce qui permet de mettre en évidence le phénomène de connexion par l'aval (Figure 10).

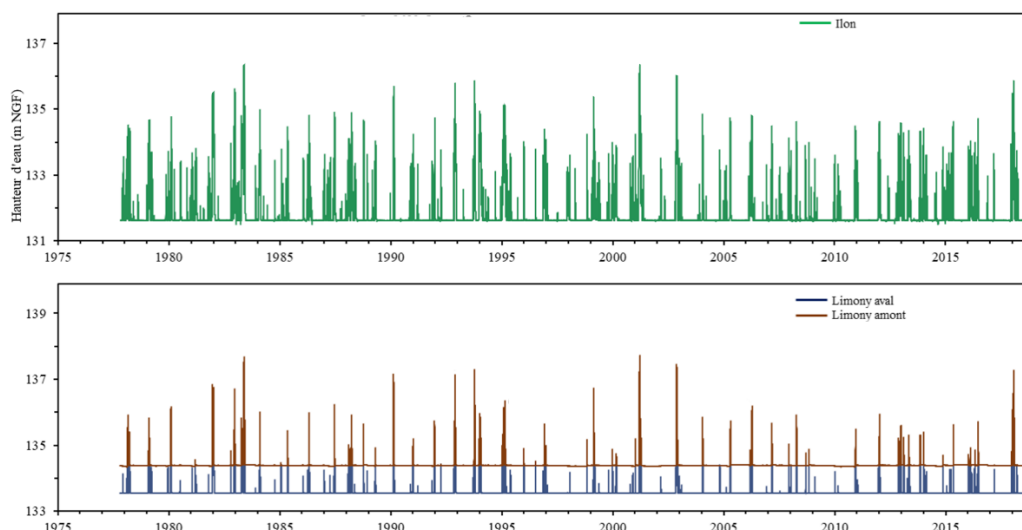


Figure 10 : Représentation de l'évolution temporelle de la hauteur d'eau (m NGF) simulée dans les bras secondaires pour la période 1977-2018.

Les données confirment qu'il y a fréquemment une augmentation de la hauteur d'eau à l'aval, sans une augmentation significative du débit. Une plus grande quantité d'événements de connexion est mesurée, ainsi que des périodes de connexion plus longues. À l'Ilon, 232 événements significatifs sont observés par l'approche limnimétrique, ce qui est supérieur aux 136 événements simulés avec l'approche par débit (Tableau 3). Cependant, la durée des connexions est très similaire (209 heures contre 207 heures). À Limony, les événements de connexion sont distingués entre l'aval et l'amont, avec une submersion des seuils. Les connexions uniquement par l'aval représentent la moitié des apports. 76 événements avec une connexion amont et un écoulement sont enregistrés, soit 21 de plus qu'avec l'approche par débit, et la durée de ces événements est légèrement plus longue (197 heures contre 166 heures). Les connexions par l'aval sont donc plus fréquentes et plus longues que celles par l'amont.

Tableau 3 : Résumé statistique des données limnimétriques (hauteurs d'eau) pour les bras secondaires étudiés (1977-2018)

	Ilon	Limony amont	Limony (aval)
Nombre d'évènements de hauteur supérieure à la cote de référence	232	76	135
Fréquence de connexion (évènements par an)	5.7	1.9	3.3
Durée moyenne de connexion	209h (~9j)	197h (~8j)	223h (~9j)
Hauteur maximum (m NGF)	137.6	137.7	137.5
Hauteur moyenne de connexion (m NGF)	133.4	135.3	134.5

Ces résultats mettent en évidence qu'une alimentation par l'aval amorce toujours les pics de crues dans les bras secondaires semi-aquatiques. En conclusion, l'approche par débit ne suffit pas à caractériser à elle seule le fonctionnement hydraulique des bras car ils sont

souvent alimentés par une connexion aval. Une approche limnimétrique (par les hauteurs d'eau) permet de nuancer et de préciser les caractéristiques et la fréquence de connexion des bras secondaires.

6. Simulations numériques

6.1 Simulations hydrosédimentaires

Pour quantifier les phases de comblement des bras, les résultats à la fois hydrauliques et sédimentaires sont nécessaires. Les données hydrauliques simulées pour la période d'étude sont intégrées dans le code de calcul Adis-TS, qui permet de simuler le transport de sédiments fins dans un réseau hydrographique. Il permet de décrire le comportement d'une matrice sédimentaire de taille unique ainsi que celui d'un mélange de sédiments de plusieurs tailles. L'équation d'advection-dispersion détermine l'influence de la charge en matières en suspension sur la géométrie des bras par la différence entre les taux d'érosion et de dépôt. Les sorties sont les résultats bruts de concentration et de masse de sédiment déposé dans chacun des trois lits (mineur, moyen gauche et moyen droit) en chaque point de calcul et selon un pas de temps choisi.

En raison des interventions et travaux effectués sur une grande partie du bras de l'Ilon, les résultats de simulation des dépôts pour ce bras ne sont pas présentés car cette zone active nécessite probablement un calage spécifique. Par ailleurs, seule la période de 1980 à 2018 est traitée car les résultats des deux premières années suivant la mise en dérivation de l'aménagement ne présentent pas d'intérêt en raison des épaisseurs négligeables simulées. Dans le bras de Limony, les processus sédimentaires sont variables tout le long du linéaire. La partie amont est caractérisée par des zones d'érosion et des zones d'accumulation avec des dépôts peu différenciés (mélange de sables et de limons). La partie aval présente des dépôts plus ordonnés avec un niveau de sables surmontés par des limons que l'on observe sur toute cette partie. Depuis la mise en service de l'aménagement, l'approche de terrain a permis de mettre en évidence que la hauteur des dépôts dans la partie aval du bras varie de 0.5 à 1.5 m (Figure 2).

Pour évaluer le lien entre les événements hydrauliques et les processus sédimentaires, les résultats de simulation des vitesses d'écoulement, des limnigrammes et de l'épaisseur de sédiments accumulés sont comparés (Figure 11). L'accumulation sédimentaire étant événementielle, l'analyse de ces résultats a permis de mieux comprendre la contribution relative de différents types d'événements. Trois types de crues, relativement redondantes dans le temps, ont pu être définis :

- Type A: crues regroupant des débits de crue extrême à modéré ($>Q_5$) pouvant être longues et complexes, avec un taux d'accumulation variable dans le linéaire,
- Type B: crues très brèves, accompagnées d'un taux d'accumulation important en phase de décrue,
- Type C: crues de quelques jours et d'intensité faible, les taux d'accumulation étant proches des crues de type A, avec une contribution importante de la décantation post-crue.

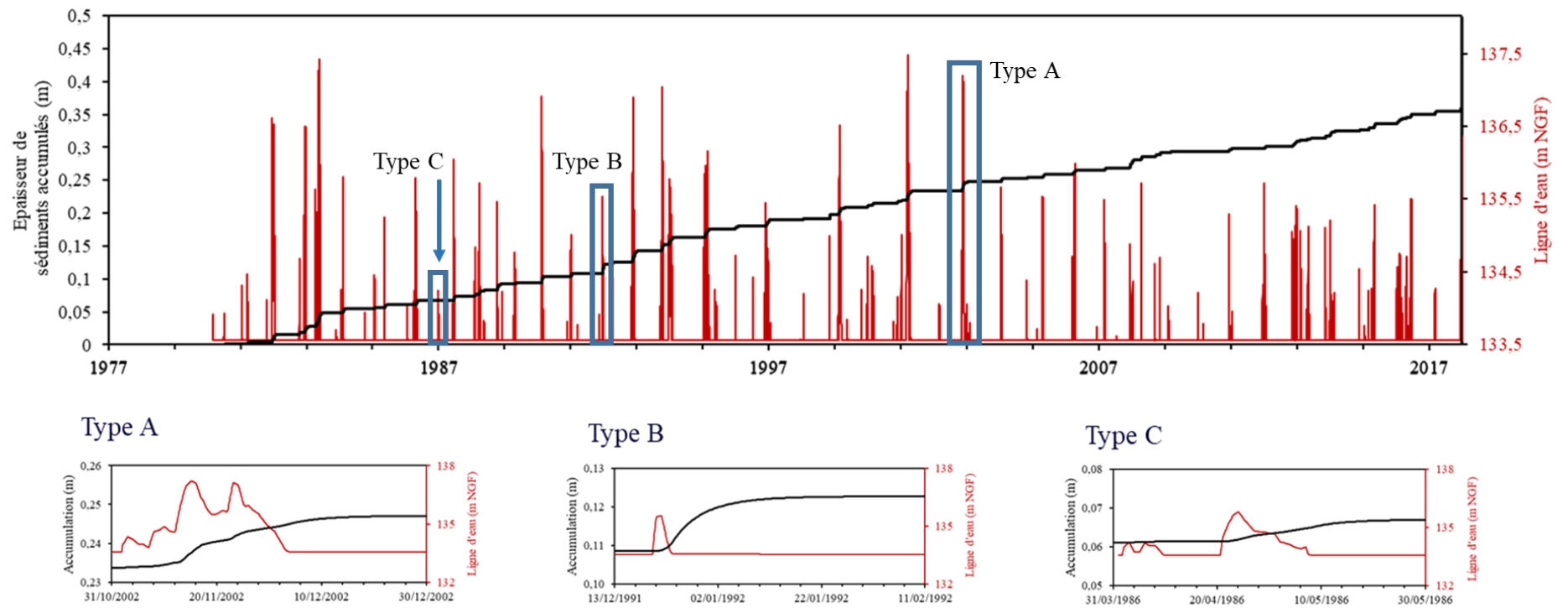


Figure 11 Chronique regroupant les résultats de simulation de l'épaisseur des sédiments accumulés (m) dans le bras de Limony et des lignes d'eau (m NGF) au pm-219 pour la période 1980-2018. Les différents types de crue associés à un dépôt de sédiments sont présentés au sein de la chronique et à l'échelle de l'événement.

Sur la partie aval de la zone, les crues de type A représentent 33% de l'apport sédimentaire, mis en place en 36% du temps en eau. Les crues de type B représentent 12% de l'apport en 5% du temps en eau. Ces crues sont rares, mais l'apport est rapide et conséquent. Enfin, les crues de type C représentent 54 % des contributions sédimentaires en 58% de la période en crue. Elles expliquent la moitié de la sédimentation et sont un ensemble de petits apports régulièrement déposés sur le site. Ces événements se caractérisent par des débits faibles, parfois avec une alimentation seulement par l'aval et enchaînant parfois plusieurs événements de faible intensité.

Sur la partie amont de la zone, le nombre d'évènements contributeurs est plus faible qu'à l'aval, ce qui se traduit par une fréquence de dépôt moins élevée. En revanche, l'épaisseur des dépôts est deux fois plus importante que sur le site aval. Les événements les plus contributeurs sont les crues de type A, reflétant une connexion nord-sud avec des débits importants. Ces crues représentent 44% de l'apport sédimentaire, déposé en 63% du temps en eau. Les crues de type B représentent 9% de l'apport en 6% du temps. Ces crues sont plus rares à l'amont, mais l'apport est rapide et conséquent. Enfin, les crues de types C représentent 47 % des contributions sédimentaires en 30% du temps. Comme à l'amont, elles expliquent la moitié de la sédimentation.

La comparaison des deux sites indique un remplissage plus fréquent à l'aval qu'à l'amont et une contribution importante de l'alimentation par connexion aval sur la sédimentation. Les petites crues expliquent environ la moitié de l'apport dans les deux cas, le temps de présence varie très fortement entre les deux sites. D'un point de vue hydraulique, les simulations ont mis en évidence que les bras secondaires sont alimentés de manière événementielle depuis 1980, en connexion aval dans un premier temps, et si les conditions le permettent, avec une connexion amont et donc un écoulement Nord-Sud. Le raisonnement basé uniquement sur le débit est limitant pour comprendre et décrire le fonctionnement hydraulique. L'étude des hauteurs d'eau et des vitesses est complémentaire pour ajuster les relations en termes de fréquence, de durée et d'épaisseurs accumulées. C'est particulièrement important dans un contexte où l'alimentation du site se fait dans un premier temps par l'aval et où la hauteur de la ligne d'eau du Rhône n'est pas toujours suffisante pour alimenter l'ensemble de la lône.

6.2 Carottes Virtuelles Numériques (CVN)

Afin de représenter les résultats numériques des accumulations sédimentaires, un algorithme a été créé par INRAE à partir des résultats obtenus au niveau de chaque transect dans les biefs modélisés et du code de calcul Adis-TS. Présentée sous la forme de Carottes Virtuelles Numériques (CVN), cette représentation permet d'évaluer l'évolution temporelle du stock de sédiments déposés à chaque pas de temps et en un point. En fonction de leur localisation, cette évolution peut être positive ou négative, reflétant un dépôt ou une érosion à un endroit donné. La hauteur totale des sédiments déposés est nécessairement supérieure ou égale à 0. La particularité de cette approche est multiple : prise en compte de la granulométrie (5 classes sont prises en compte), possibilité de distinguer chaque événement contributeur d'une accumulation sédimentaire et facilité de comparaison des sorties avec les carottes prélevées in situ, datées et analysées en laboratoire. Les carottes numériques traduisent en ordonnée l'épaisseur des sédiments et en abscisse le pourcentage de chaque classe granulométrique (Figure 12).

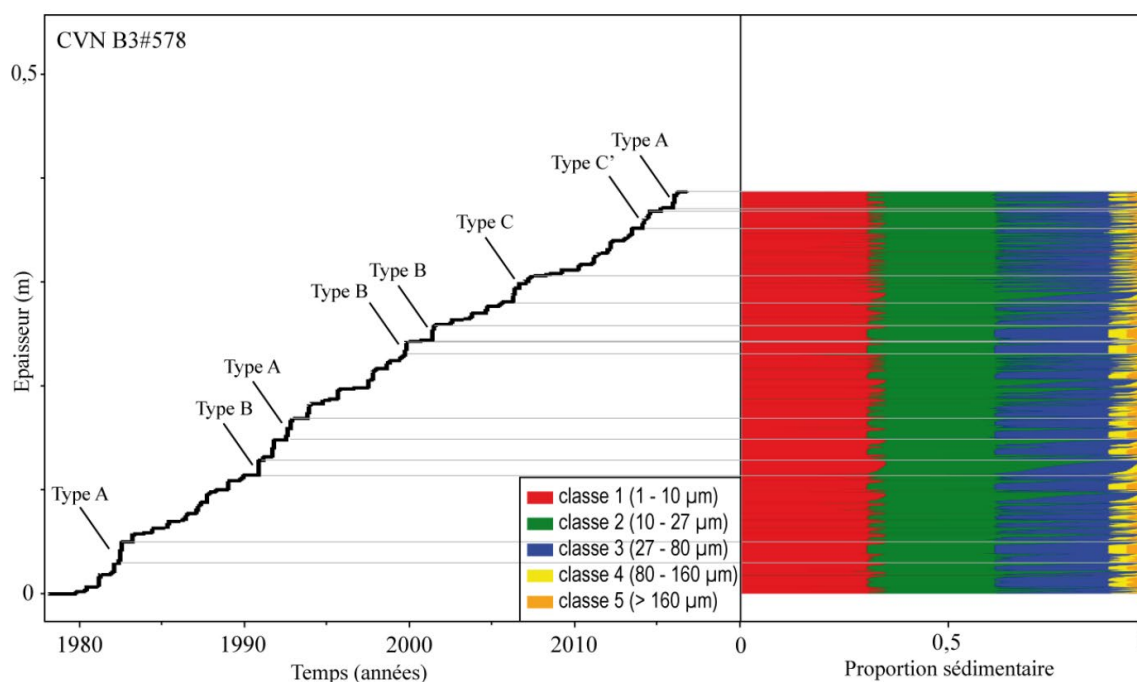


Figure 12 : Représentation d'une CVN sur le linéaire de la lône de Limony. Les carottes numériques représentent l'épaisseur des sédiments en fonction du temps et des types de crue (à gauche) et le pourcentage de chaque classe granulométrique constitutifs des dépôts (à droite). Etant donné qu'il n'y a pas d'érosion simulée à ce point, cette représentation permet une évaluation fine de l'accumulation sédimentaire en fonction du temps et de déterminer quels événements hydrauliques déclenchent la sédimentation.

Les 5 classes granulométriques sont toujours représentées, avec majoritairement les classes 1, 2 et 3 qui expliquent respectivement 29,6%, 57,9% et 10,5% de la composition de la carotte. Des fluctuations lors des événements extrêmes sont mises en évidence avec un dépôt des classes les plus fines plus important à la fin de la crue. Dans l'ensemble, nous pouvons dire que les sédiments fins de type limons prédominent largement dans la plupart des CVN après la mise en dérivation du vieux Rhône, ce qui est conforme aux mesures de terrain (in situ).

6.3 Sédimentation sur le linéaire

Les résultats de CNV ont été produites sur le linéaire de Limony ce qui permet de quantifier la sédimentation sur l'ensemble du bras secondaire. Sur l'ensemble des CVN simulés sur le linéaire de Limony, les épaisseurs de sédiments varient entre 0,014 cm et 1,49 m. La granulométrie est peu variable quand on compare les résultats au sein d'une même CNV ou entre les CNV. En revanche, les événements contributeurs et les épaisseurs de dépôts diffèrent davantage et des hétérogénéités longitudinales sont mises en évidence. Au sein des dépôts, la contribution de chaque crue n'est pas proportionnelle sur le linéaire, même si l'épaisseur d'un dépôt peut être similaire en fin de simulation.

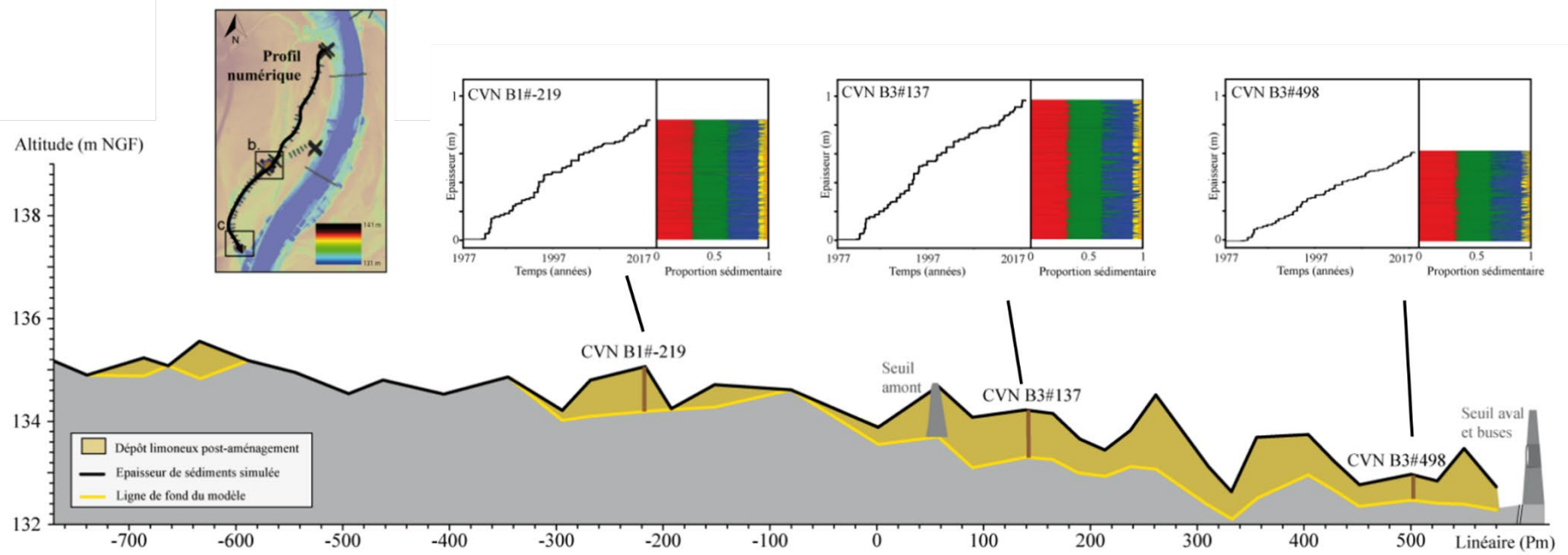


Figure 13 : Unité sédimentaire simulée pour la période aménagée (1980-2018). Ce schéma synthétise les résultats de simulation hydrosédimentaire sur l'ensemble du linéaire du bras de Limony et représente la géométrie simplifiée du lit (avec un point tous les 20 à 50 mètres)

La représentation de ces dépôts sur l'ensemble du linéaire permet de comparer les résultats numériques avec ceux de terrain (Figure 2). L'approche numérique ne permet pas de reproduire à l'identique les dépôts in situ car la représentation de la géométrie du lit est simplifiée avec un point tous les 20 à 50 mètres. La figure 13 présente l'hétérogénéité longitudinale de la sédimentation sur le linéaire de la lône de Limony. Les 400 premiers mètres présentent peu de zones de sédimentation ce qui traduit plutôt des zones de transfert pendant les cures. Plus à l'aval, entre les points -300 et -100 m (pm), un dépôt plus important est simulé, pouvant être en lien avec la dépression topographique à cet endroit. Sur la partie aval, après le seuil amont, les épaisseurs de dépôt sont hétérogènes mais significatives sur tout le linéaire. Ces tendances sont cohérentes avec les observations in situ. En effet, la partie amont se caractérise par une sédimentation très hétérogène, parfois inexistante, de la même manière que les résultats de simulation. La partie aval montre une couche de sédiments limoneux post-barrage présente sur tout le linéaire, ce que nous retrouvons également dans la simulation.

6.4 Estimation des volumes de sédiments déposés et des stocks de contaminants associés

L'estimation des volumes de sédiments fins déposés depuis la mise en barrage a été réalisée à partir de mesures de la surface d'emprise du lit mineur des bras et des épaisseurs de sédiments estimées pour chaque transect. Cette estimation est basée sur les données de terrain de deux transects de Limony qui couvrent plus de 80 % du bras, ainsi que sur les données simulées pour les mêmes profils et sur l'ensemble du linéaire à partir de l'approche numérique. Des méthodes d'estimation de volumes sont disponibles dans la bibliographie pour calculer les volumes de sédiments retenus à l'amont des barrages (Guertault et al., 2014) et sont transposables à notre étude. Dans notre cas, nous utilisons une équation simplifiée qui ne considère pas de variation transversale de l'épaisseur, car les surfaces ont été calculées précisément de sorte à cibler uniquement le lit mineur des bras :

$$V = \frac{\sum_{i=1}^M (z_{t,i} - z_{b,i})}{M} \cdot A$$

avec V le volume de sédiments estimé pour un profil, i la distance d'intervalle prise entre chaque transect (10 à 20 mètres dans notre cas), où $z_{t,i}$ représente l'altitude la plus basse de la couche et $z_{b,i}$ l'altitude de la couche la plus haute. A représente l'aire du lit mineur sur laquelle est présente la couche et M le nombre de sections transversales prises en compte.

Les incertitudes généralement associées aux estimations de volumes proviennent du manque d'information entre les sections transversales, de l'imprécision due à la simplification transversale des couches et de l'imprécision liée à l'instrument de mesure. Dans notre cas, les valeurs prédites reposent sur deux simplifications majeures : le calcul de la géométrie de l'aire correspondant au produit du linéaire par la profondeur et la prise en compte d'une épaisseur similaire sur la transversalité du lit mineur. Ces simplifications peuvent entraîner une surestimation des volumes réels.

Sur le profil 1, les estimations de volumes par les approches de terrain et numérique sont concordantes, avec des valeurs respectives de 1354 m³ et 1581 m³ (Tableau 4). Dans le profil 2, elles sont supérieures pour l'approche numérique (V = 4299 m³) par rapport à l'approche de terrain (V = 2921 m³), potentiellement en raison d'une plus grande variabilité de l'épaisseur des dépôts dans ce linéaire. L'estimation du volume de sédiments présent dans l'ensemble du bras de Limony est de 8124 m³ et a pu être calculée uniquement par l'approche numérique. En effet, environ 30 % du linéaire n'étaient pas accessibles et n'ont donc pas pu être caractérisés lors de l'approche terrain.

La masse de sédiments associée à ces dépôts a pu être calculée en considérant une masse volumique de 1.71 t.m⁻³ pour les limons (Serratrice 2013). La masse de limons estimée pour l'ensemble du linéaire étudié (1.3 km) est de 11780 tonnes. En comparaison avec l'étude de Camenen et al. (2013) qui utilise le modèle 1D pour modéliser les dépôts dans la lône du Beurre, nos résultats montrent une sédimentation moins importante dans les bras : 0,23 tonnes par mètre linéaire par an (t/m/an) à Limony contre 0,69 t/m/an dans la lône du Beurre. Ces différences s'expliquent potentiellement par le fait que notre étude se situe dans un RCC avec un débit réservé tandis que l'étude de Camenen et al. (2013) porte sur une lône connectée au Rhône total.

Tableau 4 : Volumes et masses de limons et de contaminants estimés à partir des études in situ et numériques pour les profils 1 et 2 de la lône de Limony et estimation sur l'ensemble du linéaire de la lône à partir de l'approche numérique.

	Emprise du lit mineur (m ²)	Volume de limons (m ³)	Masse de limons (t)	Masse de $\Sigma 7\text{PCBi}^a$ (g)	Masse de $\Sigma 9\text{PBDE}^a$ (g)	Masse de $\Sigma 7\text{PCBi}^b$ (g)	Masse de $\Sigma 9\text{PBDE}^b$ (g)
Profil 1 (terrain)	2603	1354	2133	61.0	158	210	314
Profil 1 (numérique)	2603	1581	2292	65.5	169	245	367
Profil 2 (terrain)	5312	2921	4236	121	313	453	678
Profil 2 (numérique)	5312	4299	6233	178	461	666	998
Ensemble du linéaire (numérique)	17855	8124	11780	337	871	1259	1885

^a estimation moyenne

^b fourchette haute

Afin d'estimer la masse de contaminants présents dans les dépôts sédimentaires du linéaire de Limony, les données de concentration de la somme de 7 PCB ($\Sigma 7\text{PCBi}$) et de 9 PBDE ($\Sigma 9\text{PBDE}$) provenant d'une trentaine d'échantillons de carottes de sédiment collectées dans le bras sont utilisées comme valeurs de référence (Vauclin et al., 2021). La concentration médiane calculée pour la colonne sédimentaire post aménagement est de 28,6 $\mu\text{g kg}^{-1}$ pour les $\Sigma 7\text{PCBi}$ et de 73,9 $\mu\text{g kg}^{-1}$ pour les $\Sigma 9\text{PBDE}$. Une concentration représentant une fourchette haute des niveaux de concentration (3^{ème} quartile de l'ensemble des échantillons) est également utilisée pour mieux quantifier et comprendre la variabilité potentielle du stock de contaminants (e.g. 90,6 $\mu\text{g kg}^{-1}$ pour les $\Sigma 7\text{PCBi}$ et 135,7 $\mu\text{g kg}^{-1}$ pour les $\Sigma 9\text{PBDE}$).

Sur l'ensemble du linéaire de Limony, les masses de contaminants stockés sont estimées à 0.34 kg de $\Sigma 7\text{PCBi}$ et 0.90 kg de $\Sigma 9\text{PBDE}$ (Tableau 4). La fourchette haute de concentration estime des quantités 2 à 4 fois supérieures, allant de 1.3 kg de $\Sigma 7\text{PCBi}$ et 1.9 kg de $\Sigma 9\text{PBDE}$. À

titre de comparaison, les mêmes calculs réalisés sur la lône de l'Ilon, en rive droite du RCC de PDR, montrent que les stocks sont deux fois supérieurs, ce qui s'explique par le volume de sédiments et non par des concentrations plus élevées sur ce site. Dans un casier Girardon localisé à proximité, Winiarski et al. (2015) ont estimé une quantité de 0.52 à 1.8 kg de ΣPCBi , soit une moyenne de 1.3 kg par casier, dont le volume est d'environ 24200 m³. Concernant les PFAS, les données de concentration obtenues pour le secteur de PDR dans le cadre de l'OSR 6 permettent d'évaluer un stock moyen en PFAS de 0.08 kg et une fourchette haute à 0.71 kg dans le linéaire de Limony.

De manière surprenante, le stock de PBDE (retardateurs de flamme bromés) est plus important que celui en PCB, tandis que les PFAS sont présents en moindre quantité. D'un point de vue opérationnel, ce travail et ces données permettent de mieux comprendre et estimer les quantités de contaminants stockés dans les compartiments sédimentaires du lit majeur des fleuves. C'est important pour les gestionnaires, notamment en cas de travaux sur des sédiments contaminés ou dans le cadre d'opérations de gestion sédimentaire ou de restauration écologique des marges.

7. Conclusions

Ce rapport synthétise les résultats d'une étude hydrosédimentaire détaillée des bras secondaires d'un RCC depuis son aménagement (1977-2018). Une approche originale croisant des méthodes géophysiques et sédimentologiques avec une approche numérique a permis d'améliorer notre compréhension des processus de dépôt dans les annexes fluviales.

Les résultats de terrain montrent que les prospections géophysiques (GPR) sont en très bon accord avec les sondages et les carottes sédimentaires, permettant de décrire avec précision les zones de dépôt à haute résolution spatiale et de mettre en évidence les différents processus de dépôt avant et après aménagement.

Les simulations numériques ont été mises en place grâce à un important effort d'extension des géométries aux bras secondaires, de calage et de paramétrisation, réalisés notamment grâce aux mesures de terrain (topographie, ouvrages, ADCP, carottes/sondages). Elles n'ont pas toujours été couronnées de succès (Ilon) et les résultats peuvent comporter beaucoup d'incertitudes concernant les hauteurs de dépôts, la granulométrie, etc.

Concernant les contributions hydrauliques des bras secondaires, les approches par débit et hauteur d'eau sont complémentaires : l'approche par débit ne suffit pas à elle seule pour caractériser le fonctionnement hydraulique des bras, car ils sont souvent alimentés par une connexion aval. Une approche limnimétrique (par les hauteurs d'eau) permet de nuancer et de préciser les caractéristiques et la fréquence de connexion des bras secondaires.

Cette approche permet, sur certains sites :

- De préciser et confirmer la datation des dépôts dans les carottes et de les relier aux événements. Les représentations sous forme de carottes numériques virtuelles (CNV) permettent de déterminer finement quels événements hydrauliques provoquent la sédimentation dans une carotte.
- D'étudier en détail le forçage hydraulique des dépôts : typologie de crues (type A, B et C), phases de dépôt et importance de la décantation après la baisse du débit, lien accumulation vs. fréquence de connexion, durée, etc.
- De tester des scénarios, comme faire de l'attribution avec ou sans aménagement, estimer les volumes de sédiments et la contamination associée.

Ce travail ouvre de nombreuses perspectives pour simuler des scénarios futurs liés aux problématiques de gestion sédimentaire du fleuve. Cela inclut la possibilité de croiser notre approche avec le suivi de la restauration des îlots du programme RhônEco, en observant par exemple leur réaction aux changements morphologiques, ainsi que leur réponse face à l'évolution future du forçage hydroclimatique.

8. Références

Camenen, B., Andries, E., Faure, J.B., De Linares, M., Gandilhon, F. et al. (2013) Experimental and numerical study of long term sedimentation in a secondary channel: example of the Beurreisland on the Rhône River, France. International Symposium on River Sedimentation, Sep2013, Kyoto, Japan. 8 p. <https://hal.science/hal-00926113/document>

Guertault. L. (2015) Évaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2015. Français. <https://hal.science/OSR/tel-01273431v1>

Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., Babu, S., Borrelli, P., Cheng, L., Crochetiere, H., 2019. Mapping the world's free-flowing rivers. Nature 569, 215–221. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1111-9>

Serratrice 2013. Comportement d'un limon compacté. BLPC, n°280-281.

Vauclin, S., Mourier, B., Dendievel, A.-M., Noclin, N., Piégay, H., Marchand, P., Vénisseau, A., de Vismes, A., Lefèvre, I., Winiarski, T., 2021. Depositional environments and historical contamination as a framework to reconstruct fluvial sedimentary evolution. Science of the Total Environment 764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142900>
<https://hal.science/OSR/hal-03070723v1>

Winiarski, T., Roux, G., Moiroud, C., 2015. Caractérisation optimisée du remplissage sédimentaire des casiers Girardon : Optimisation par l'utilisation couplée de carottages haute résolution et de profils au radar géologique. IS Rivers 2015



Observatoire des Sédiments du Rhône

Dispositifs scientifiques cadres



Partenaires scientifiques



Partenaires techniques et financiers

