



**HAL**  
open science

## Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D

Jérôme Le Coz, B. Camenen, Jean-Baptiste Faure, Marina Launay, Laura Troudet, Léa Kieffer, Patrick Boyer, Olivier Radakovitch, Romaric Verney

► **To cite this version:**

Jérôme Le Coz, B. Camenen, Jean-Baptiste Faure, Marina Launay, Laura Troudet, et al.. Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D. [Rapport de recherche] INRAE; IFREMER. 2021. hal-03293557

**HAL Id: hal-03293557**

**<https://hal.science/hal-03293557>**

Submitted on 21 Jul 2021

**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.

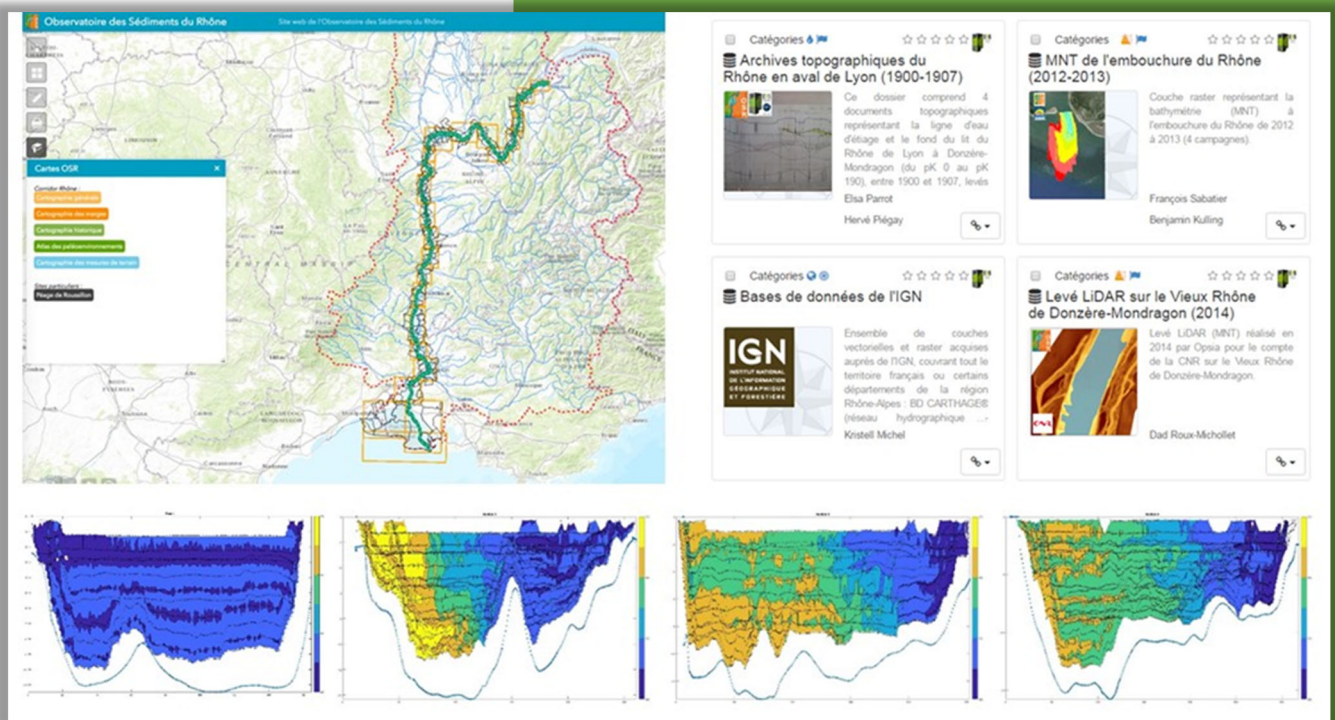


**O**bservatoire  
**S**édiments  
**du** **R**hône

# Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D

OSR5 2018-2020

*Rapport final*



**Plan**  
**Rhône**



# Modélisation des flux – Modèle hydro-sédimentaire 1D

*Rapport final – Version du 15 juin 2021*

|                  |  |
|------------------|--|
| Axe D            | Modélisation / Bancarisation et valorisation des données   |
| <b>Action D1</b> | <b>Modélisation des flux – modèle hydrosédimentaire 1D</b> |

| Personnes impliquées              | Equipe de recherche                 |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Jérôme Le Coz                     | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Benoît Camenen                    | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Jean-Baptiste Faure               | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Marina Launay (CDD OSR 2017-2018) | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Laura Troudet (CDD OSR 2018-2020) | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Léa Kieffer (CDD OSR 2020-2021)   | INRAE – Centre de Lyon Villeurbanne |
| Patrick Boyer                     | IRSN – Centre de Cadarache          |
| Olivier Radakovitch               | IRSN – Centre de Cadarache          |
| Romarc Verney                     | Ifremer – Centre de Brest           |

**Pour citer ce document :**

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), 5<sup>ème</sup> Programme d'Actions, 56 p.

## Résumé

L'axe D de l'OSR5 regroupe les outils numériques et de communication : modèle hydro-sédimentaire, base de données BDOH pour les calculs de flux, web-SIG et métadonnées.

Ce document décrit les améliorations et applications opérationnelles effectuées sur le modèle hydro-sédimentaire 1D du Rhône développé dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône pour les années 2018 à 2020 (OSR5).

Le développement du modèle hydro-sédimentaire 1D est une action transversale à l'OSR5 qui vient alimenter les problématiques des actions A2, B2, B3, C1, C2 et C3 en lien avec l'évolution des fonds et les impacts sur les lignes d'eau, la charge de fond, les flux de MES, de contaminants et de sable.

Les travaux effectués se sont concentrés sur la modélisation des flux de MES de l'échelle de l'évènement au pluriannuel et le développement des outils de modélisation (Mage 8, couplage Mage-Adis-TS, charriage et évolution des fonds). Une démarche de comparaison et d'intégration des outils de simulation numériques INRAE, IRSN et Ifremer a progressé en vue d'actions communes.

## Mots-clés

OSR ; Rhône ; modélisation numérique ; hydrodynamique ; MES ; Mage-Adis-TS

## Sommaire

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 1.         | Simulations de flux de mes pluriannuelles .....                        | 5  |
| 1.1.       | Le Modèle du Rhône du Léman à la mer .....                             | 5  |
| 1.2.       | Modélisation hydraulique de l'évènement au pluriannuel .....           | 6  |
| 1.2.1.     | Série de données 2010-2018 .....                                       | 6  |
| 1.2.2.     | Simulation numérique de l'évènement au pluriannuel.....                | 6  |
| 1.3.       | Décomposition des flux d'eau et de MES .....                           | 7  |
| 1.3.1.     | Décomposition des flux d'eau de l'évènement au pluriannuel.....        | 8  |
| 1.3.2.     | Actualisation des relations Cs-Q.....                                  | 9  |
| 1.3.3.     | Décomposition des flux de MES .....                                    | 11 |
| 1.4.       | Calcul des dépôts stratigraphiques .....                               | 13 |
| 2.         | Implémentation du charriage dans Mage-8.....                           | 15 |
| 2.1.       | Résumé .....   | 15 |
| 2.2.       | Introduction.....  | 15 |
| 2.3.       | Implémentation des ouvrages dans Adis-TS .....                         | 15 |
| 2.3.1.     | Fonctionnement des ouvrages dans Adis-TS .....                         | 16 |
| 2.3.1.1.   | Principes .....  | 16 |
| 2.3.1.2.   | Mise en œuvre pratique .....   | 17 |
| 2.3.2.     | Cas réel de la chasse du Haut-Rhône de 2012.....                       | 18 |
| 2.4.       | Module de charriage .....  | 22 |
| 2.4.1.     | Implémentation du bilan sédimentaire .....                             | 23 |
| 2.4.2.     | Notion de largeur active .....   | 24 |
| 2.4.3.     | Méthode de modification de la géométrie sous l'effet du charriage..... | 25 |
| 2.5.       | Tests de validation du module de charriage .....                       | 25 |
| 2.5.1.     | Cas-test théoriques.....   | 25 |
| 2.5.1.1.   | Cas test 1 : Canal avec élargissement de section.....                  | 25 |
| 2.5.1.1.1. | Évolution dans le temps et comparaison avec RubarBE.....               | 26 |
| 2.5.1.1.2. | Influence de la distance de chargement.....                            | 28 |
| 2.5.1.1.3. | Influence du pas de maillage .....                                     | 29 |
| 2.5.1.2.   | Cas test 2 : Canal avec cassure de pente .....                         | 30 |
| 2.5.1.3.   | Cas test 3 : Canal avec bosse .....                                    | 32 |
| 2.5.2.     | Cas-test expérimentaux .....   | 34 |
| 2.5.2.1.   | Test de Van Rijn.....  | 34 |
| 2.5.3.     | Conclusion sur les tests de validation.....                            | 36 |
| 2.6.       | Charriage sur cas réels.....   | 36 |
| 2.6.1.     | Bief de Gier à Vaugris.....  | 37 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 2.6.2. | Barrage de Vaugris .....                      | 38 |
| 2.7.   | Autres développements .....                   | 39 |
| 2.8.   | Perspectives.....                             | 40 |
| 2.8.1. | Développements en cours .....                 | 40 |
| 2.8.2. | Tests et simulations .....                    | 40 |
| 3.     | Collaboration autour de la modélisation ..... | 40 |
| 3.1.   | Réunions d'échanges et projets communs.....   | 40 |
| 3.2.   | Formation et appui aux actions OSR .....      | 41 |
| 4.     | Références.....                               | 41 |
| 5.     | ANNEXES.....                                  | 44 |
| 5.1.   | Annexe 1 .....                                | 44 |
| 5.2.   | Annexe 2 .....                                | 45 |
| 5.3.   | Annexe 3 .....                                | 47 |
| 5.4.   | Annexe 4.....                                 | 55 |

# 1. SIMULATIONS DE FLUX DE MES PLURIANNUELLES

## 1.1. Le Modèle du Rhône du Léman à la mer

Le développement du modèle du Rhône a été initié dans le cadre du projet Axelera-PCB (Andriès et al., 2012a ; 2012b) et poursuivi dans le cadre des programmes OSR2, OSR3 et OSR4. La description détaillée du modèle ainsi que les améliorations apportées (règles de gestion des ouvrages, géométrie, calage des lignes d'eau, etc.) sont incluses dans les divers livrables OSR précédents.

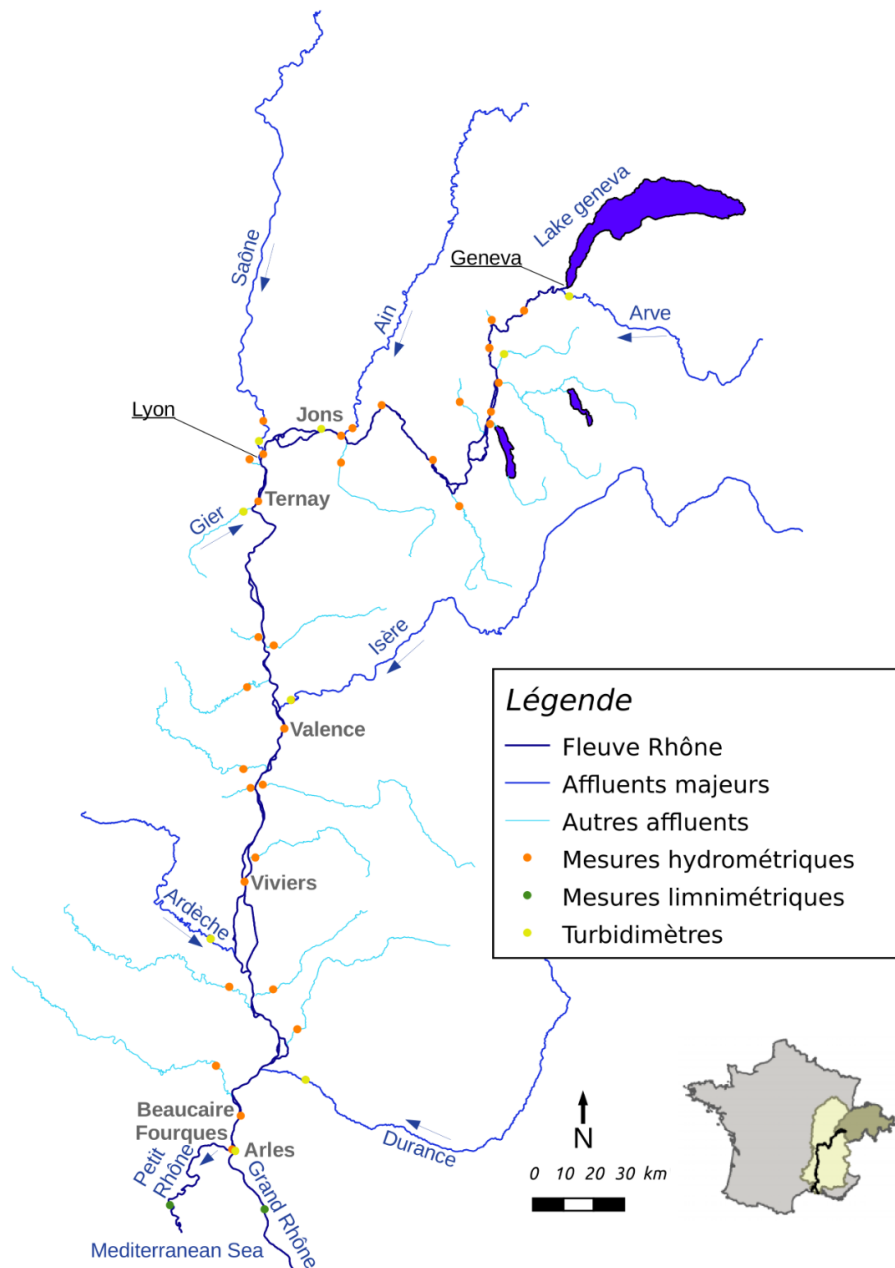


Figure 1 : Emprise du modèle du Rhône entre le lac Léman et la mer Méditerranée. (Les 26 affluents et les 21 ouvrages inclus dans le modèle sont représentés.)

Le modèle du Rhône présente une continuité hydraulique sur tout le tronçon linéaire, 545 km, du lac Léman à la mer Méditerranée excepté au niveau de l'aménagement à grande capacité de Génissiat (Figure 1). Le modèle intègre le fonctionnement des 20 autres ouvrages hydro-électriques via leurs consignes d'ouvrage fonction des débits et lignes d'eau en amont des usines aux points de contrôle (Dugué et al., 2015). L'une des actions de l'axe D1 est d'intégrer le module Génissiat au modèle afin d'obtenir une modélisation hydraulique continue sur tout le linéaire du Léman à la mer. Action présentée au paragraphe §15 .

## 1.2. Modélisation hydraulique de l'évènement au pluriannuel

Le modèle numérique 1D du Rhône permet de modéliser les écoulements à surface libre sur le linéaire du Rhône. Seuls des évènements de crue et de chasse (en 2008, 2011, 2012 et 2015) ont été simulés jusqu'à l'OSR4. Le modèle a montré sa robustesse face à de tels évènements hydro-sédimentaires intenses sur des échelles de temps de l'ordre de quelques semaines ou mois de simulation (en moyenne 1 à 2 mois en continu). L'intérêt aujourd'hui est porté sur la modélisation pluriannuelle sur la période disposant de mesures OSR pour *in fine* simuler des flux de MES et de contaminants sur plusieurs années afin de réaliser des bilans de flux moyens tracés par affluents.

Le contenu du modèle du Rhône développé à INRAE est repris (Dugué et al., 2015) amélioré et adapté pour effectuer des modélisations non plus sur des évènements, de type crue ou chasse, mais sur plusieurs années incluant les variations de périodes de forts à faibles débits.

### 1.2.1. Série de données 2010-2018

L'avantage du bassin versant du Rhône est qu'il dispose de nombreuses stations de mesure implantées le long des cours d'eau et permet une mesure en continu des hauteurs d'eau et le calcul des débits. Les sources de données, intégrées au modèle, sont la CNR, la Banque HYDRO, l'OFEV et BDOH.

Les conditions aux limites amont du modèle sont des hydrogrammes, pour le Rhône et tous les affluents. Les conditions aux limites aval sont des limnigrammes.

Le choix s'est porté sur une période récente de 2010 à 2018. Les données sont quasi complètes pour toutes les stations intégrées au modèle du Rhône. Les périodes de lacunes ont été comblées par interpolation linéaire.

### 1.2.2. Simulation numérique de l'évènement au pluriannuel

La première simulation est effectuée sur la partie du modèle, appelé Bas-Rhône, de Lyon-Perrache à la mer Méditerranée. Les résultats de simulation des hydrogrammes de 2010 à 2018 aux stations de Ternay, Valence, Viviers et Ternay sont présentés en Annexe 1.

Le modèle numérique reproduit bien l'évolution temporelle des débits le long du linéaire sur cette période de plusieurs années 2010-2018. Il reproduit particulièrement bien les évènements de forts débits, voir Figure 2. Ainsi, le débit calculé à Beaucaire lors des crues est très satisfaisant. Le modèle est moins robuste pour le calcul des périodes de faibles débits, ce qui était attendu étant donné que le fonctionnement infra-journalier des aménagements (éclusées) n'est pas simulé.

Des tests ont été effectués afin d'améliorer les écoulements en période d'étiage. Des modifications sur l'ajout de seuils dit « fictifs » et les consignes d'ouvrages sont testés en respectant le calage des lignes d'eau. Ces seuils qui n'existent pas sur le terrain permettraient d'éviter des calculs en régime torrentiel, se produisant à cause d'une variation brutale de la géométrie du chenal. Fréquemment rencontrés lors de la simulation de



périodes de faibles débits, ces calculs en régime torrentiel augmentent considérablement les temps de calcul du modèle.

Les temps de calculs initiaux de Mage 1D pour simuler la période de 9 ans étaient de 24 heures. Avec des améliorations sur les paramétrages et le fonctionnement hydraulique, le temps de calcul est divisé presque par un facteur 5.

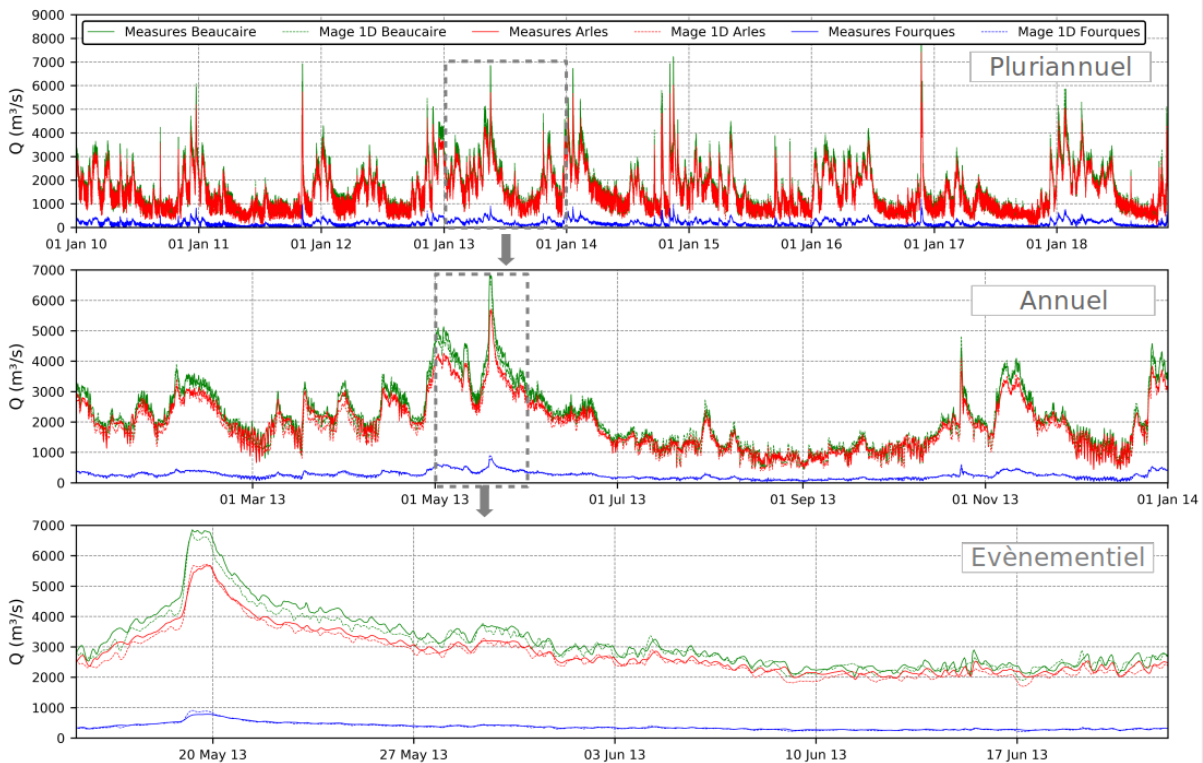


Figure 2 : Répartition des eaux dans le delta du Rhône. Comparaison des débits mesurés et calculés par Mage 1D aux stations de Beaucaire, Arles et Fourques, à différentes échelles temporelles emboîtées : pluriannuelle (période de 2010 à 2018, en haut), annuelle (2013, au milieu), événementielle (crue de mai 2013, en bas).

La répartition des eaux dans le delta du Rhône est correctement modélisée. La Figure 2 montre, pour l'année 2013, que les débits calculés à Fourques et à Arles sont très proches de ceux mesurés *in situ*.

Le module Génissiat (voir §15) est intégré au modèle, Une simulation hydraulique sur plusieurs décennies est en cours sur tout le tronçon du Rhône, du lac Léman à la mer Méditerranée, quand le module sédimentaire de Génissiat sera satisfaisant.

### 1.3. Décomposition des flux d'eau et de MES

Le modèle numérique 1D du Rhône permet de modéliser la propagation des flux d'eau et de matières en suspension (MES) et leur dépôt/érosion sur le linéaire du Rhône. Pour un évènement donné, et sous réserve de connaître les différentes conditions d'entrée (hydrogrammes, limnigrammes et concentrations en MES) du modèle, il est possible de connaître en tout point donné du réseau :

- le débit et la hauteur d'eau en fonction du temps,
- la concentration en MES en fonction du temps,

- la quantité d'eau provenant de chaque affluent (origine de l'eau),
- l'origine des pics de concentration en MES (origine du sédiment),
- la granulométrie des sédiments encore en suspension (sous réserve de connaître la granulométrie des conditions amont).

### 1.3.1. Décomposition des flux d'eau de l'évènement au pluriannuel

L'utilisation de solutés fictifs comme « traceur numérique » des différents affluents avec Adis-TS permet de déterminer la quantité d'eau provenant de chaque affluent, ce qui est appelé décomposition des flux d'eau ou des hydrogrammes.

Le résultat de simulation de décomposition des flux d'eau à Beaucaire de l'évènement au pluriannuel est présenté en Figure 3. Les résultats de décomposition des hydrogrammes à Arles entre 2010 et 2018 sont présentés en Annexe 2.

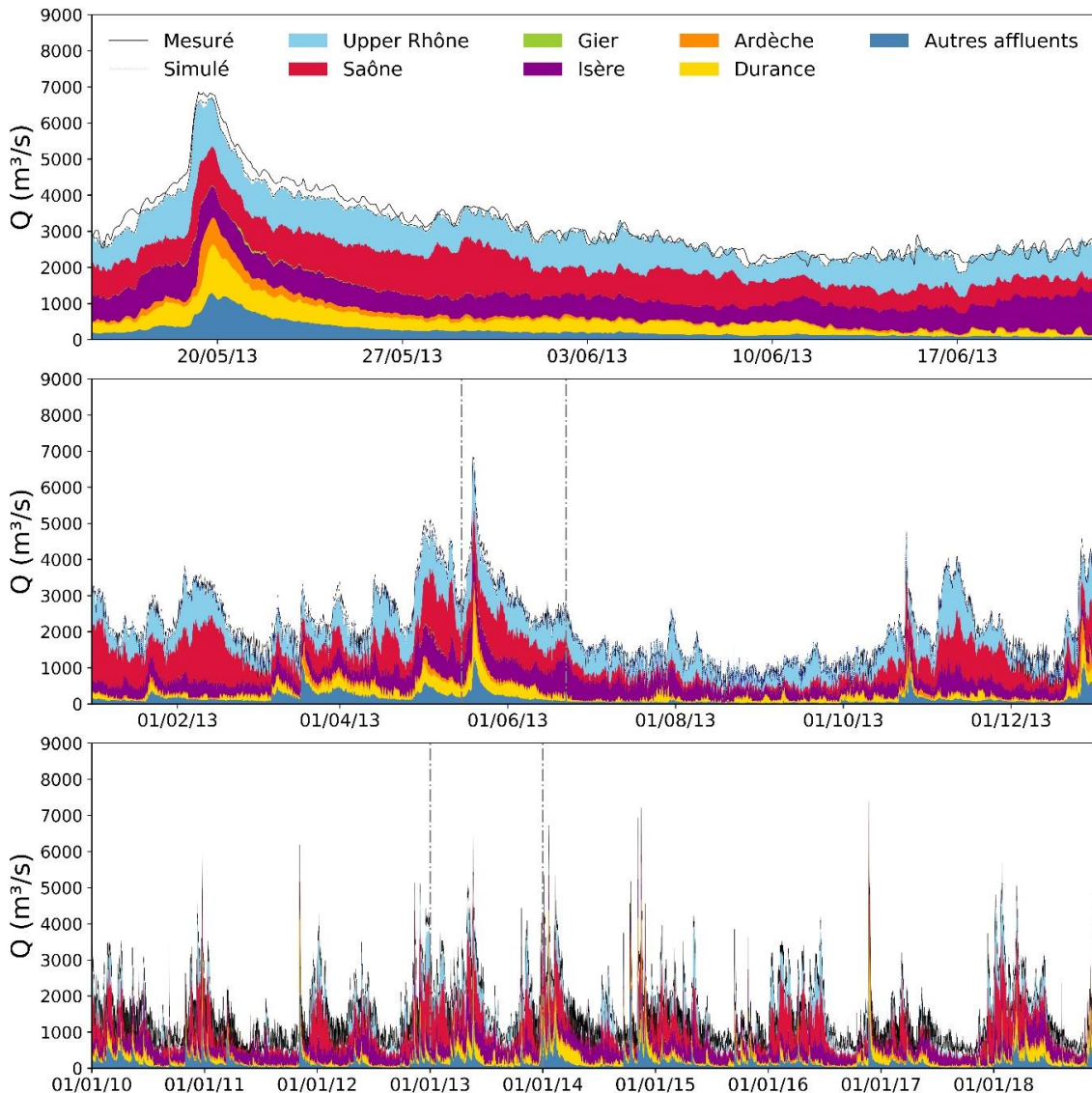


Figure 3 : Décomposition de l'hydrogramme à Beaucaire en 2016 en fonction des apports (événementiel, annuel et pluriannuel).

### 1.3.2. Actualisation des relations Cs-Q

A l'échelle de l'évènement, la simulation de la décomposition des flux d'eau et de MES a été validée courant 2018 par le précédent CDD OSR (Launay et al, 2019). Une partie des résultats est présentée dans cet article.

Avant de modéliser des flux de MES sur plusieurs années, il faut reconstituer les concentrations en MES en fonction du temps aux différents points d'entrée du modèle. Nous disposons des séries de concentration en MES sur des périodes courtes et seulement pour quelques affluents intégrés au modèle. À titre d'exemple les périodes de mesure pour les stations du Bas-Rhône jusqu'à 2018 sont présentées en Figure 4 et commencent en 2010. Elles combinent plusieurs évènements de crues.

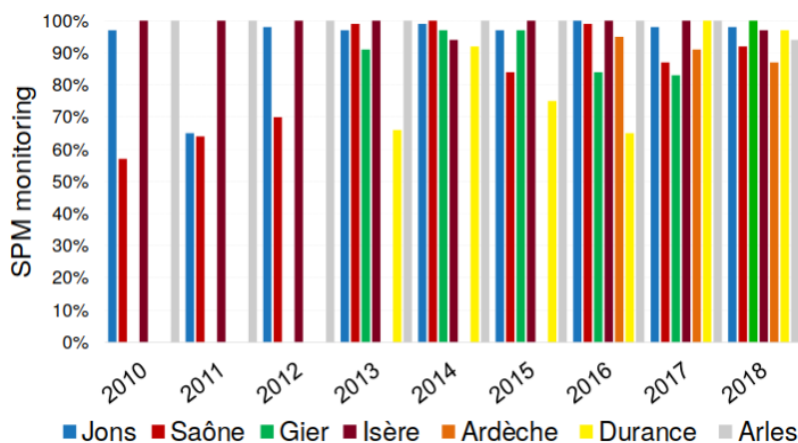


Figure 4 : Périodes d'échantillonnage des MES jusqu'à 2018 pour les stations du Bas-Rhône.

Le choix de la méthode de reconstitution des concentrations s'inspire de la relation Cs-Q (Poulier et al. 2019) issu de la méthode SiRCA (Sadaoui et al., 2016) suivi de la méthode Baratin (Le Coz et al. 2014). La reconstitution des concentrations en MES est exposée en Figure 5.

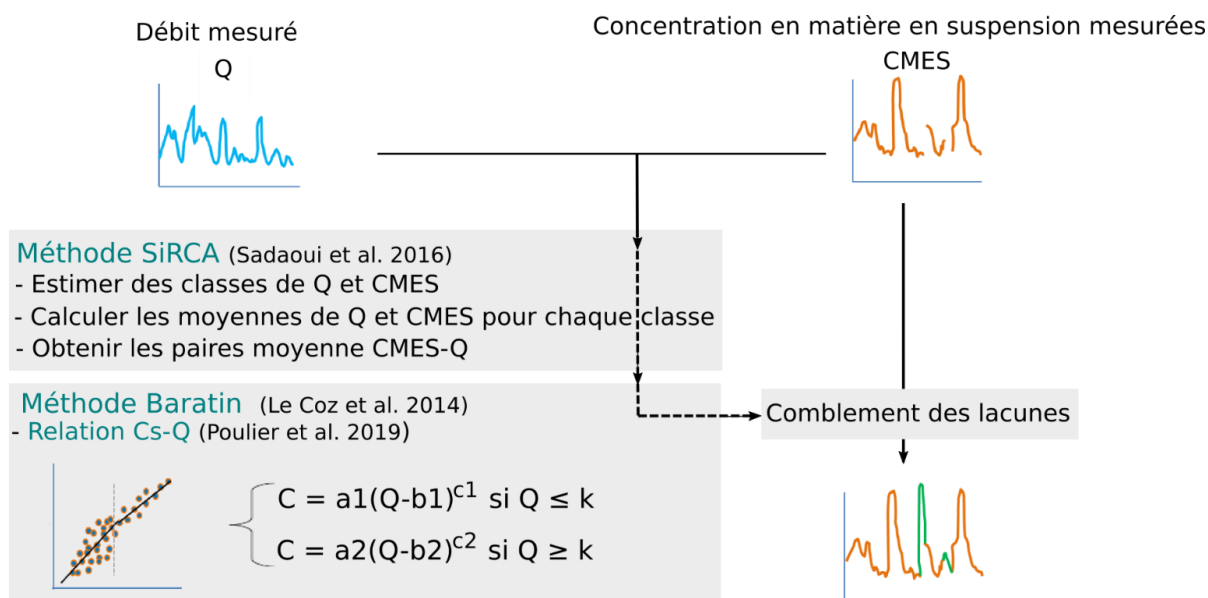


Figure 5 : Méthode de reconstitution des Concentrations en MES – Comblement des lacunes par la relation Cs-Q

Au cours de l'OSR5 il aura été utile, voir nécessaire pour les stations ne disposant que de quelques mois ou années de mesures, d'actualiser chaque année les relations Cs-Q pour les affluents du Rhône, mais aussi pour des stations du Rhône. Vous trouverez 1 les relations Cs-Q pour toutes les stations ainsi que les périodes de données hydrométriques, turbidimètres ou échantillonnages, utilisés pour établir ces relations. En Annexe 3 vous trouverez les graphiques représentant les jeux de données ainsi que les relations pour chacune des stations. Les résultats présentés sont les calculs actualisés avec toutes les données disponibles jusqu'à début 2021 et toutes ces données sont disponibles sous BDOH.

| AFFLUENT | ID  | a1        | c1      | k   | a2        | c2       | b2         | DEBIT     | MES       |
|----------|-----|-----------|---------|-----|-----------|----------|------------|-----------|-----------|
| ARVE     | ARV | 0,130169  | 1,57866 | 320 | 0,0011669 | 2,00387  | -669,31958 | 1973-2020 | 2012-2021 |
| FIER     | FIE | 3,99998   | 0,17812 | 40  | 0,0003397 | 2,55091  | -11,02266  | 1999-2020 | 2014-2020 |
| BOURBRE  | BOU | 14,9267   | 0,62834 | 15  | 0,489962  | 1,92888  | 0,7973763  | 1980-2020 | 2011-2013 |
| GUIERS   | GUI |           |         |     | 0,0078572 | 2,16924  | -8,5238272 | 1990-2020 | 2012-2012 |
| AIN      | AIN |           |         |     | 0,0002332 | 1,85508  | -117,77481 | 1984-2020 | 2012-2017 |
| SAÔNE    | SAO |           |         |     | 0,0017389 | 1,37465  | -279,35161 | 1981-2020 | 2009-2020 |
| GIER     | GIE | 7,66621   | 0,82159 | 13  | 1,2623    | 1,21854  | -11,773403 | 1989-2020 | 2013-2021 |
| ISÈRE    | ISE | 0,0056336 | 1,53469 | 450 | 0,0014643 | 2,15816  | 306,1673   | 1997-2020 | 2010-2020 |
| DRÔME    | DRO | 1,17261   | 1,39694 | 70  | 0,993729  | 1,5347   | 16,750465  | 2018-2020 | 2018-2021 |
| ARDÈCHE  | ARD | 0,999981  | 0,60474 | 259 | 0,0002139 | 1,73555  | -643,40835 | 2010-2021 | 2016-2021 |
| DURANCE  | DUR | 0,269305  | 1,19943 | 311 | 1,06461   | 1,26776  | 233,81405  | 1993-2020 | 2013-2020 |
| GARDON   | GAR | 1,01815   | 0,65623 | 98  | 0,874559  | 0,977631 | 72,640533  | 2000-2020 | 2017-2021 |

| RHONE      | ID  | a1        | c1      | k    | a2        | c2      | b2        | DEBIT     | MES        |
|------------|-----|-----------|---------|------|-----------|---------|-----------|-----------|------------|
| ANDANCETTE | AND | 0,10147   | 0,61318 | 901  | 0,0059161 | 1,26049 | 640,03027 | 2017-2020 | 2019-2020  |
| JONS       | JON | 0,0036416 | 1,27394 | 606  | 3,829E-06 | 2,37002 | 40,709141 | 1991-2020 | 2000-2021  |
| BEAUCAIRE  | BEA | 2,167E-05 | 1,94924 | 4205 | 6,695E-05 | 2,08636 | 2789,964  | 1999-2020 | idem Arles |
| ARLES      | ARL | 0,0001402 | 1,69708 | 2744 | 0,0003061 | 1,91365 | 1999,3703 | 1990-2020 | 2005-2019  |

Tableau 1 : Coefficients des relations Cs-Q et périodes des données

### 1.3.3. Décomposition des flux de MES

Plusieurs simulations ont été faites en utilisant 4 classes de sédiments, allant de l'argile jusqu'au sable très fin. Ces classes de sédiments ont été déterminées sur des échantillons du Rhône dans le cadre de la thèse de Marina Launay (Launay, 2014) voir Tableau 2. Le calage des paramètres sédimentaires du modèle a été effectué par Lucie Guertault, sur l'aménagement de Génissiat pour chacune des classes de sédiment modélisées (Guertault, 2015) et a été repris ici dans la modélisation du transport de MES à granulométrie composée entre 2010 et 2018. Trois scénarios de la répartition (fin, moyen et grossier) de la taille des grains (GSD) ont été modélisés (Tableau 2 et Figure 6). Les pourcentages sont obtenus par la méthode de démodulation présentée dans la thèse de Marina Launay (Launay, 2014).

|                                     | Argile | Limon fin | Limon grossier | Sable très fin |
|-------------------------------------|--------|-----------|----------------|----------------|
| $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )          | 7      | 20        | 50             | 100            |
| Porosité                            | 0.45   | 0.45      | 0.45           | 0.45           |
| $\rho_s$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 2650   | 2650      | 2650           | 2650           |
| $a_{PD}$                            | 1      | 1         | 1              | 1              |
| $C_o$                               | 1      | 1         | 0.5            | 0.2            |
| % échantillon A – Fin GSD           | 31     | 44        | 25             | 0              |
| % échantillon B – Moyen GSD         | 23     | 28        | 31             | 18             |
| % échantillon C – Grossier GSD      | 12     | 18        | 40             | 30             |

Tableau 2 : Propriétés des sédiments du Rhône pour la modélisation du transport de MES

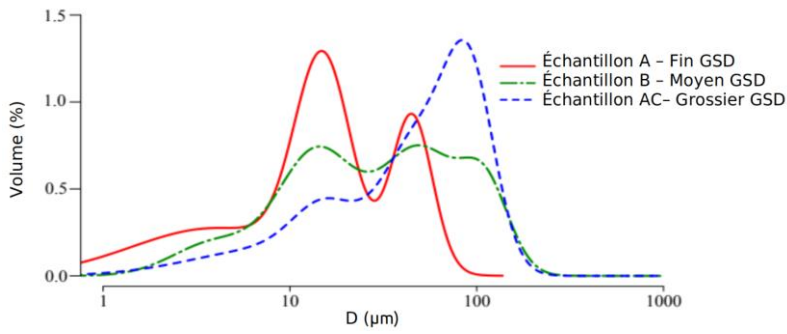


Figure 6 : Trois scénarios de la répartition de la taille des grains (GSD).

Les résultats de la simulation entre 2010 et 2018 pour les 3 scénarios montrent que les concentrations de SPM simulées sont sensibles à la distribution de la taille des grains en raison des processus d'érosion/dépôt. Les résultats à Arles pour l'année 2016 sont présentés en Figure 7. Ces résultats révèlent bien que les MES plus fines sont principalement transportées pendant la période d'inondation naturelle, les crues. Les MES plus grossiers sont surtout transportés pendant les périodes de rinçage des barrages, i.e. les chasses et abaissements.

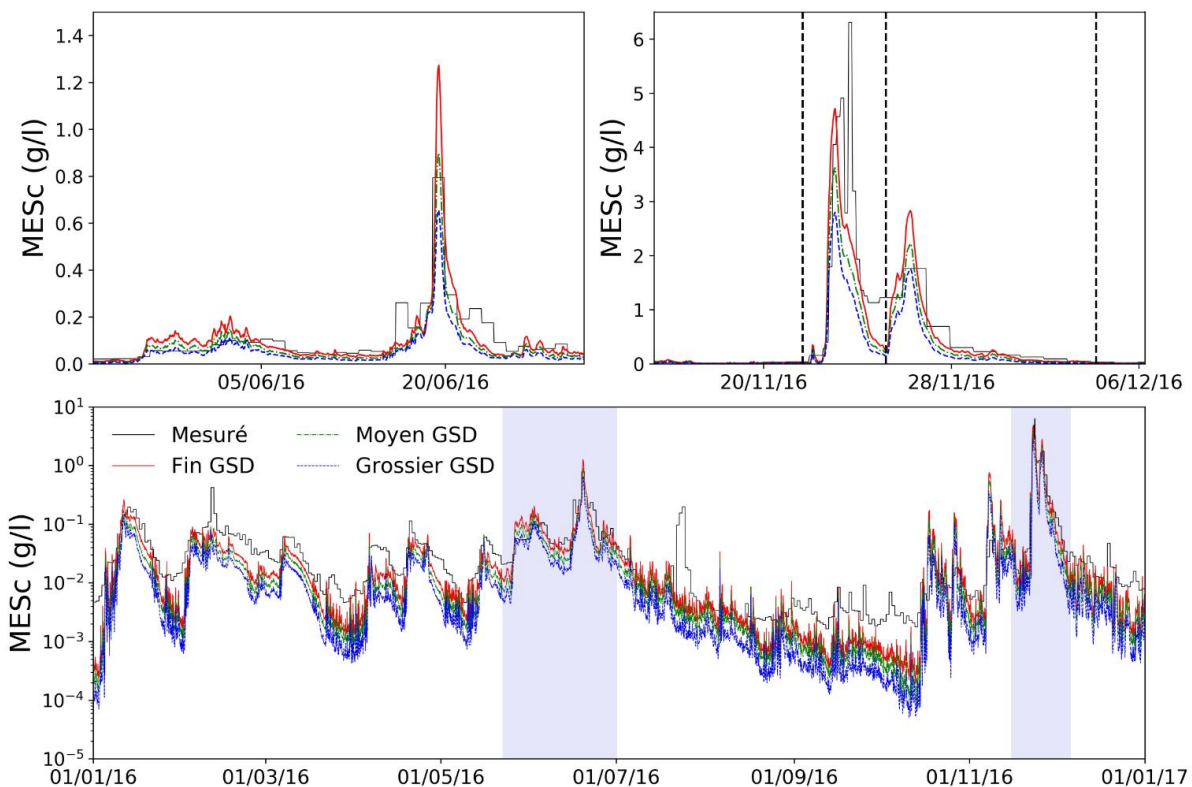


Figure 7 : Résultat de simulation à Arles pour l'année 2016 de 3 scénarios de répartition de la taille des grains (GSD).

La simulation de la décomposition des MES permet de révéler les différents apports en MES suivant les évènements. Il est à noter que la distribution des sources de MES est différente tout au long de l'année en raison du régime hydrologique moyen. Un des résultats est présenté en figure 9 pour la simulation à Arles

pour l'année 2016 dans le cas d'une distribution fine des MES. Il en ressort que la contribution la plus importante vient de la Saône et du Haut-Rhône en hiver, et de l'Isère au printemps et en été, en accord avec les régimes hydrologiques. La part de MES provenant de la Durance et de l'Ardèche sont relativement faibles mais elles correspondent à des événements courts et violents au printemps et à l'automne.

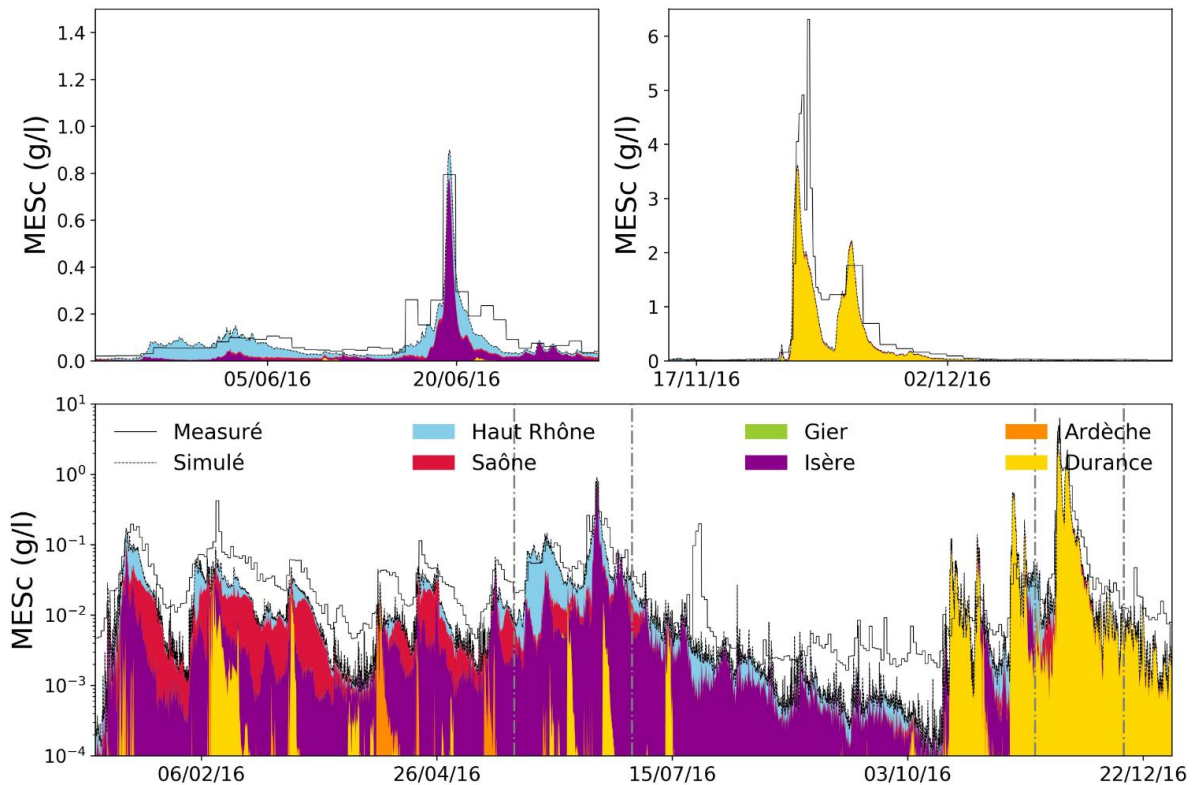


Figure 8 : Décomposition des MES à Arles pour l'année 2016 dans le cas d'une répartition fine des MES

L'intérêt d'un tel modèle est de révéler les sources de MES en tout point du fleuve. La relation Cs-Q semble ici efficace pour palier aux périodes manquants de données en particulier lors des crues, cependant sur certains événements en majorité lors des faibles à moyens débits les concentrations en MES modélisées sont sous estimées. Prendre en compte les éclusées lors de la modélisation au cours du temps améliorera peut-être ce résultat, piste qui sera menée au cours de l'ORS6. Il est envisagé aussi d'adimensionnaliser les relations Cs-Q par le débit moyen des affluents pour transférer des relations Cs-Q « types » d'une station hydro-sédimentaire vers un affluent « similaire » ne disposant pas de données. On s'appuiera également sur les analyses spatiales de la production sédimentaire des bassins versants réalisées par INRAE et EVS dans l'action C1.2 de l'ORS5.

L'outil de modélisation est actuellement opérationnel, sur la période 2010-2018, et bientôt entre 2005-2020, et peut modéliser les flux de MES, mais aussi de contaminants souhaités, solutés ou particuliers le long du linéaire du Rhône.

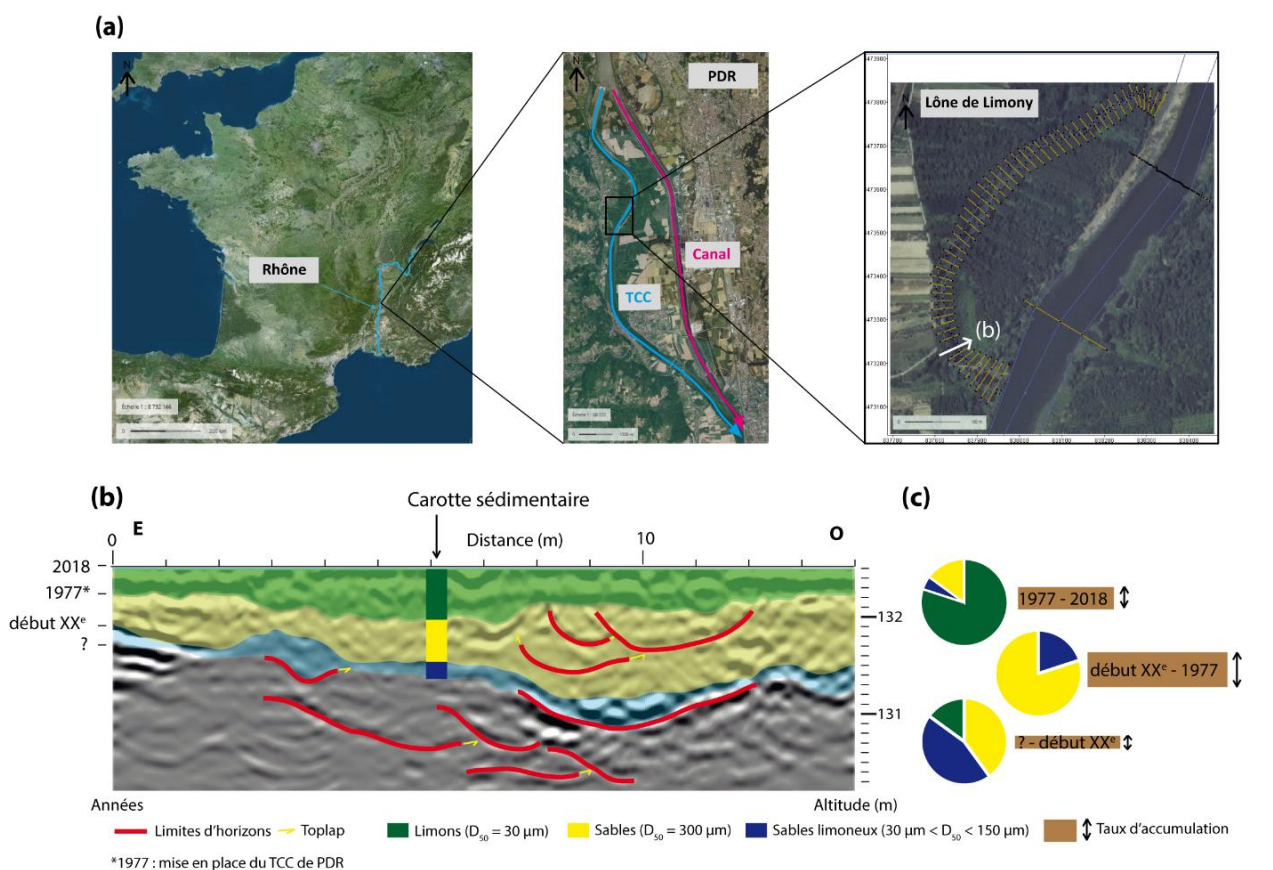
## 1.4. Calcul des dépôts stratigraphiques

Le calcul hydro-sédimentaire est stable et robuste sur plusieurs années, le modèle est opérationnel pour divers cas d'études sur le secteur du Bas-Rhône. Les 2 principales études sont :

- la modélisation des MES et de certaines substances (contaminants), déjà présentée au §7,
- la modélisation des séries de dépôts.

Des séries de dépôts, ou plus communément appelée séries stratigraphiques, sont actuellement connues. À plusieurs endroits (Lône de Beurre, Haut-Rhône), des carottes sédimentaires ont été analysées en lien avec l'action C2 de l'OSR5 sur l'historique des contaminations. Les objectifs sont les suivants :

- améliorer le calage des taux de dépôt dans le modèle,
- affiner la datation des évènements de crue individuels dans les carottes,
- reconstituer les flux de MES du passé ayant pu entraîner les dépôts de crue observés dans les carottes.



(a)

Figure 9 : Situation de la lône de Limony en rive droite du vieux-Rhône de Péage-de-Roussillon (PDR) (b) profil géophysique transversale interprété et données sédimentaire (c) exemple d'information que l'on peut extraire d'une simulation pluri-déca-annuelle sous MAGE/Adis-TS.

Ce travail a été initié en novembre 2019 dans le cadre de la thèse de Nicolas Noclin (LEHNA et INRAE), voir Figure 9. L'ajout de la géométrie des lônes de Limony et de la Platière, dans le modèle du Rhône 1D est terminé. Le modèle hydraulique est actuellement stable pour modéliser 54 années, de 1965 à 2018, entre Ternay et Arras-sur-Rhône, afin de reproduire les épisodes de dépôt et érosion au sein des lônes. Les premières simulations de transport sédimentaires ont eu lieu début 2021. Le modèle étant en cours de calage les résultats ne seront pas présentés ici mais au cours de l'OSR6.



## 2. IMPLEMENTATION DU CHARRIAGE DANS MAGE-8

### 2.1. Résumé

On présente dans ce rapport final les développements réalisés sur les codes Mage-8 et Adis-TS relatifs au transport de sédiments fins et au transport par charriage. On a travaillé sur deux axes de développement principaux :

1. Implémenter dans Adis-TS la modélisation de l'effet des ouvrages élaborée par Lucie Guertault dans sa thèse consacrée à la retenue de Génissiat.
2. Implémenter dans Mage-8 un module de transport solide par charriage et de déformation des sections sous l'effet de celui-ci.

À cela il faut ajouter les développements d'arrière-plan réalisés en parallèle : amélioration de l'utilisabilité des programmes à mesure que les besoins apparaissent, corrections de bugs, amélioration de fonctionnalités déjà implémentées comme le couplage fort de Adis-TS avec Mage-8 pour la prise en compte de l'évolution des fonds sous l'effet des dépôts-érosions.

Il faut noter que désormais les développements logiciels concernent autant Mage-8 que Adis-TS. En effet l'intégration de l'effet des ouvrages sur la propagation des concentrations a conduit à repenser et réimplémenter toute la structure de données permettant de représenter les ouvrages. Ce travail a été fait autant dans Mage-8 que dans Adis-TS. En effet pour assurer un bon couplage entre Mage et Adis-TS d'une part et faciliter ensuite la maintenance du code, il était nécessaire d'utiliser le même code pour Mage-8 et Adis-TS. De même, après réanalyse de la question, il a été décidé que, pour des raisons techniques, il est préférable d'implémenter le module de charriage dans Mage-8 et non dans Adis-TS. Cela ne change rien pour l'utilisateur final qui doit, de toutes façons, utiliser les 2 codes de calcul. Au contraire, dans les cas où il souhaite ne prendre en compte que le charriage, un seul code, Mage-8, lui sera nécessaire.

**Mots-clés :** Adis-TS, Mage, charriage, développement logiciel

### 2.2. Introduction

Le code de calcul Adis-TS résout des équations de convection – diffusion pour chaque polluant et classe granulométrique suivis. La modélisation est monodimensionnelle et couplée à la modélisation hydraulique à surface libre réalisée avec le code de calcul Mage. Un des principaux objectifs du développement d'Adis-TS est de modéliser le transport et la dispersion des sédiments fins sur le Rhône entre le lac Léman et la mer. Cette modélisation hydro-sédimentaire du Rhône est l'objet de l'autre versant de l'axe D-1.

Adis-TS est un code de calcul qui s'utilise en ligne de commande, il est développé sous Linux mais peut aussi être utilisé sous MS-Windows, bien qu'avec des performances moindres. Comme on veut pouvoir réaliser des simulations très longues (plusieurs années) et que le linéaire à prendre en compte est grand (plus de 500 km), un effort important est fait pour obtenir les meilleures performances en temps de calcul. Pour cela le code est écrit afin qu'il puisse utiliser au mieux les capacités de parallélisation des processeurs modernes (processeurs multi-cœurs).

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

Dans les versions antérieures d'Adis-TS, et en particulier dans celles utilisées par Lucie Guertault pour son travail sur la retenue de Génissiat, Adis-TS considère les ouvrages en travers comme transparents pour les concentrations. Cependant comme les concentrations en solutés ou en sédiments fins ne sont pas constantes sur la verticale dans un profil en travers de rivière et que la lame d'eau qui traverse un ouvrage ne représente qu'une partie de la section d'écoulement du profil qui contient l'ouvrage, il est clair que les concentrations dans cette lame d'eau sont différentes des concentrations moyennes dans le profil complet.

Considérer les ouvrages comme transparents pour les concentrations permettait de ne pas se préoccuper de connaître les détails de leur constitution, la connaissance de leur position suffisait (savoir qu'il y a un ouvrage entre ce profil et le suivant). Au contraire modéliser l'effet de filtre des ouvrages requiert de disposer de tous leurs paramètres géométriques et hydrauliques. Il faut donc que Adis-TS lise le même fichier de données que

Mage. Cela a été l'occasion de rajeunir en profondeur la structure de données permettant de manipuler les ouvrages à la fois dans Mage-8 et dans Adis-TS. Une autre contrainte poussait à cette mise à niveau : dans le cas de la modélisation des débordements en lit majeur à l'aide d'ISM (*Independent Subsections Method*, projet ANR Flowres), il faut pouvoir répartir les ouvrages élémentaires qui constituent un ouvrage global dans un profil en travers, entre les différentes sous-sections du profil. La représentation des ouvrages telle qu'elle est faite dans les versions précédentes de Mage ne permet pas cela.

Prendre en compte les ouvrages dans Adis-TS impose une modification supplémentaire de Mage-8 pour les cas où il y a des ouvrages mobiles comme dans le modèle hydro-sédimentaire du Rhône. Il faut enregistrer la position de chacun des ouvrages élémentaires au même pas de temps d'enregistrement que les lignes d'eau calculées par Mage-8. Cet enregistrement n'est fait que pour les ouvrages mobiles, pour les autres l'état fourni par le fichier de données initial (fichier SIN) suffit. Il y a un fichier de type CSV (*Comma Separated Values*) pour chaque ouvrage mobile. Coté Adis-TS il fallait compléter la lecture des lignes d'eau enregistrées par la lecture des positions des ouvrages mobiles plus les fonctions d'interpolation adéquates puisque les pas de temps utilisés par Adis-TS sont beaucoup plus courts que les pas de temps de calcul de Mage-8 et *a fortiori* ses pas de temps d'enregistrement des résultats.

### 2.3.1. Fonctionnement des ouvrages dans Adis-TS

#### 2.3.1.1. Principes

La question traitée ici est celle de savoir quelle concentration on a dans la section aval d'un ouvrage connaissant la concentration moyenne dans la section amont et la position verticale de la section d'écoulement de l'ouvrage.

Le flux de matière qui passe à travers l'ouvrage est le produit du débit de l'ouvrage (une part seulement du débit total s'il y a plusieurs ouvrages dans le profil en travers) par la concentration moyenne dans la section d'écoulement. Dans le cas d'une vanne, cette section d'écoulement est le produit de la largeur de la vanne par la hauteur d'ouverture de la vanne.

Pour estimer la concentration moyenne dans la section d'écoulement de l'ouvrage, on a pris le parti d'utiliser l'estimation de la concentration à la profondeur de son point central.

Pour chaque ouvrage élémentaire qui constitue un ouvrage global, on calcule le flux de matière qui transite par lui ; la somme de ces flux donne le flux total qui, divisé par le débit total, donne une concentration à l'aval de l'ouvrage.

Au final cette modélisation de l'effet des ouvrages sur le transfert de concentration repose sur une reconstitution du profil vertical de concentration à partir de la concentration moyenne.

Le profil vertical de concentration est une exponentielle définie de la façon suivante :

$$C(z) = C_R e^{(-R \frac{z}{h})} \text{ avec } C_R = \bar{C} \frac{R}{1-e^{-R}} \quad (1)$$

$C_R$  est la concentration de référence,  $C$  est la concentration moyenne,  $h$  est la hauteur de la surface libre au-dessus du fond et  $z$  est une hauteur entre 0 et  $h$ .  $R$  est le paramètre de Rouse défini par :

$$R = \frac{w_s}{\kappa u_*} \quad (2)$$

où  $w_s$  est la vitesse de chute (gravité),  $u_*$  la vitesse de cisaillement (turbulence) et  $\kappa = 0,4$  est la constante de von Karman. Si on intègre  $C$  entre 0 et  $h$  on retrouve bien la concentration moyenne  $C$ . Le problème se résume finalement à estimer  $u_*$  pour chaque ouvrage.  $u_*$  est défini par :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \sqrt{g R_h J} = \sqrt{g R_h} \frac{V}{K R_h^{2/3}} \quad (3)$$

Comme on a besoin de la contrainte locale, on remplace le premier  $R_h$  par la hauteur d'eau locale  $h$  :

$$u_* = \sqrt{gh} \frac{V}{Kh^{2/3}} \quad (4)$$

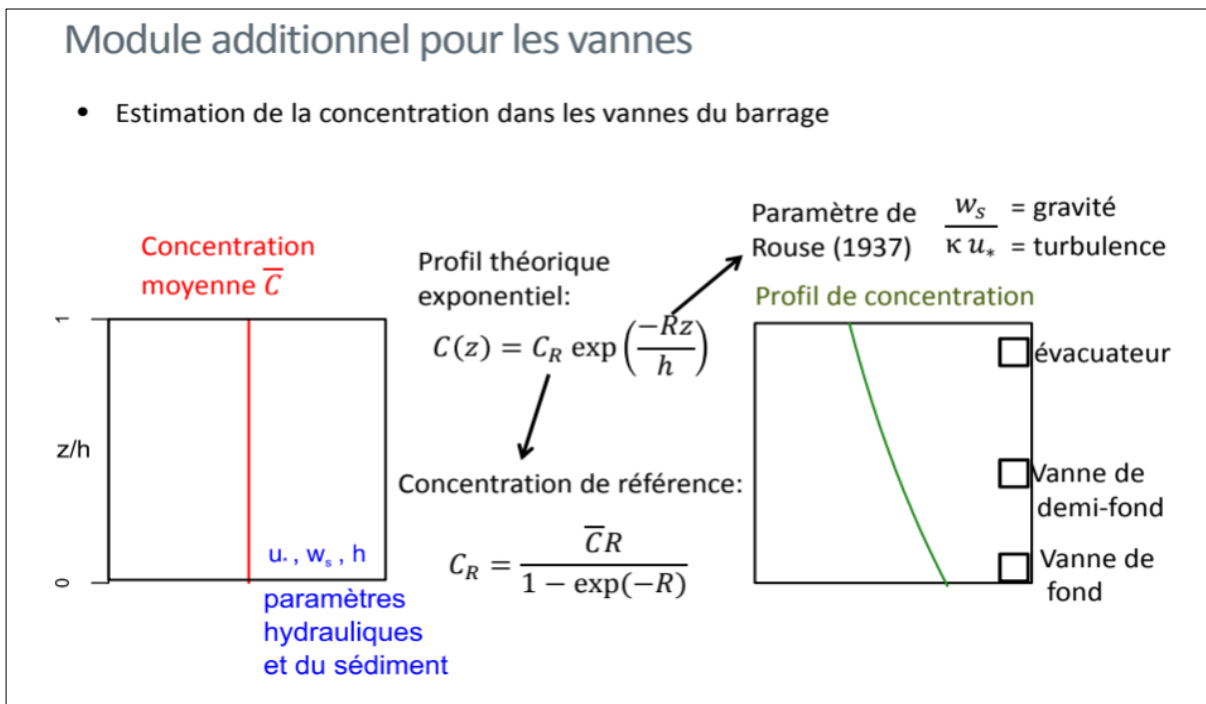


Figure 10 : Extrait du diaporama de soutenance de thèse de Lucie Guertault (2015)

### 2.3.1.2. Mise en œuvre pratique

La mise en œuvre a été plus compliquée que prévu et, pour l'instant au moins, ce modèle d'ouvrage est incompatible avec les schémas numériques traditionnels d'Adis-TS. Pour pouvoir avancer, j'ai donc dû implémenter un schéma numérique plus simple, le schéma explicite décentré amont. Cela m'a amené à enrichir la panoplie des méthodes numériques disponibles dans Adis-TS.

Tous les problèmes ne sont pas encore résolus, notamment le mécanisme qui, à partir d'un saut de concentration au passage d'un ouvrage (comme les vannes du barrage de Génissiat), déclenche une érosion dans la retenue, n'est pas encore bien représenté. En clair on sait estimer l'augmentation de concentration au passage du barrage, mais pas bien comment cela se traduit dans la retenue. Divers essais pour ajuster un terme source sur cette différence de concentration n'ont, pour l'instant, pas encore donné de résultats satisfaisants.

La figure suivante (Figure 11) donne un exemple de résultat obtenu sur le barrage de Génissiat montrant l'augmentation de concentration en limon au passage du barrage lors d'une ouverture de la vanne de fond. Cette augmentation est due au fait que la concentration au niveau de la vanne de fond est plus grande que la concentration moyenne dans toute la section de la retenue.

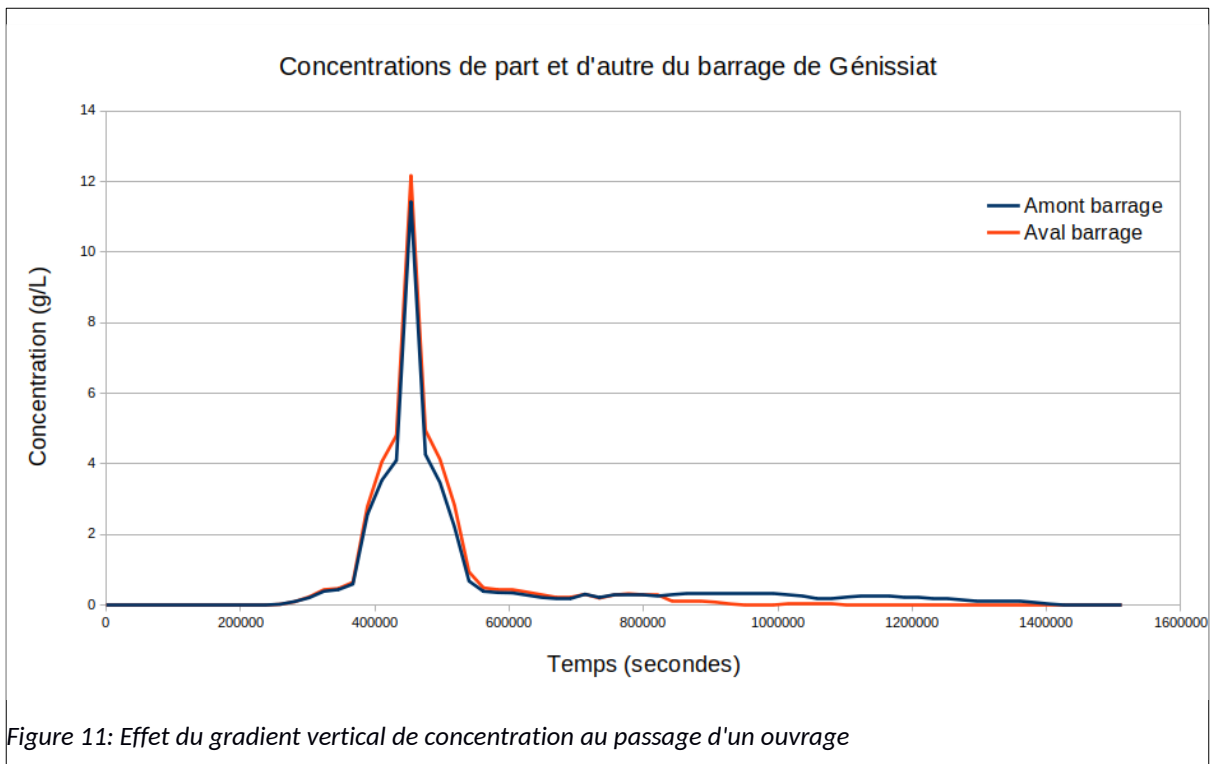


Figure 11: Effet du gradient vertical de concentration au passage d'un ouvrage

### 2.3.2. Cas réel de la chasse du Haut-Rhône de 2012

L'aménagement hydroélectrique du Haut-Rhône en aval des retenues suisses (comprenant les barrage-usines de Verbois à l'amont et Chancy-Pougny à l'aval) a nécessité la mise en place de mesures d'accompagnement des opérations de chasses par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR). L'aménagement de Génissiat, à l'aval immédiat des retenues suisses, est la seule retenue qui permet de réguler le débit des chasses suisses grâce à sa capacité de stockage importante. Ainsi les opérations d'accompagnement des chasses par la CNR reposent avant tout sur la retenue de Génissiat. Cette régulation du débit par l'ouvrage de Génissiat est importante car elle permet un contrôle de la qualité des eaux rejetées en aval. L'ouvrage de Génissiat comprend une usine, qui ne fonctionne pas lors des chasses suisses, et un barrage composé de différents orifices placés dans une configuration tridimensionnelle :

- Vanne de fond (vf), cote du radier à 262,2 m et surface d'environ 90 m<sup>2</sup>, pour les évacuations de sédiments et abaisser le plan d'eau de la retenue.
- Vanne de demi-fond (vdf), cote du radier à 285,9 m et surface d'environ 150 m<sup>2</sup>.
- Évacuateur de surface (erd), cote à 316,80 m, pour diluer les flux évacués par la vanne de fond et composé de 3 orifices en entrée (erd1, erd2, et erd3).

La configuration spatiale de ces différents organes permet de diluer les flux transitant par l'ouvrage de Génissiat. Ainsi, il est important de prendre en compte cette configuration spatiale de l'ouvrage dans le modèle 1D du Rhône afin d'améliorer le calcul des flux sédimentaires à travers l'ouvrage lors des chasses suisses et interchasses.

Historiquement, l'ouvrage de Génissiat configuré dans le modèle 1D du Rhône était représenté par une seule vanne orifice dont le débit était contrôlé par le niveau d'eau imposé à l'amont dans la retenue en respectant les règles issues de la courbe d'exploitation de la CNR (données issues de l'Étude globale du Rhône).

La représentation hydraulique de l'ouvrage de Génissiat, lors d'une chasse suisse, a ici évoluée afin de prendre en compte les différentes hauteurs de la prise d'eau des orifices à travers l'ouvrage. Chacun des organes (vf, vdf, erd1, erd2, erd3) ainsi que les vannes de l'usine est positionné à sa cote radier et le fonctionnement des orifices connu lors de la chasse de 2012 permet d'imposer son fonctionnement au cours du temps dans le modèle hydraulique 1D du Rhône.

Bien que les résultats ne soient pas encore satisfaisants concernant la gestion des ouvrages dans Adis-TS avec la prise en compte d'un gradient vertical de concentration au travers de l'ouvrage, nous allons illustrer les

améliorations dans le modèle 1D du Rhône à partir des résultats de modélisation de la chasse suisse de 2012. Lors du mois de juin 2012, l'ouvrage de Génissiat a subi un abaissement hydraulique, lié à la chasse de l'aménagement de Verbois, présentant un vaste jeu de données hydro-sédimentaires mesurées. La Figure 12 montre l'évolution des débits instantanés observés pour les différents organes de Génissiat au cours de la chasse de 2012 (données fournies par la CNR).

Pour ce cas test réel, l'emprise du modèle s'étend de Pougny, chronique de débit horaire observé imposée en condition limite amont, jusqu'à la retenue de Seyssel, condition limite aval imposée par la cote de la retenue au cours de la chasse. Ces deux chroniques sont présentées en Figure 13. Le fonctionnement hydraulique au cours du temps des différents organes, Figure 12, est affecté à chacun des orifices du modèle.

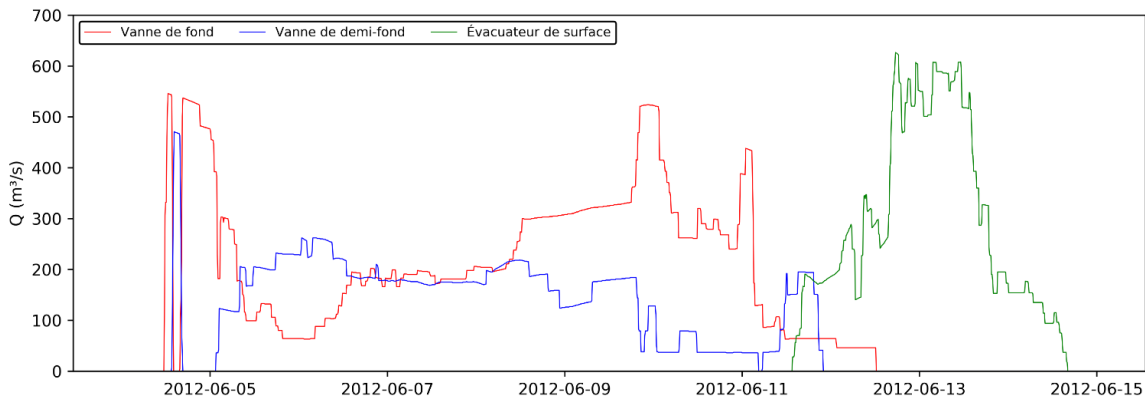


Figure 12 : Évolution des débits instantanés mesurés des organes de Génissiat lors de la chasse de Verbois de 2012

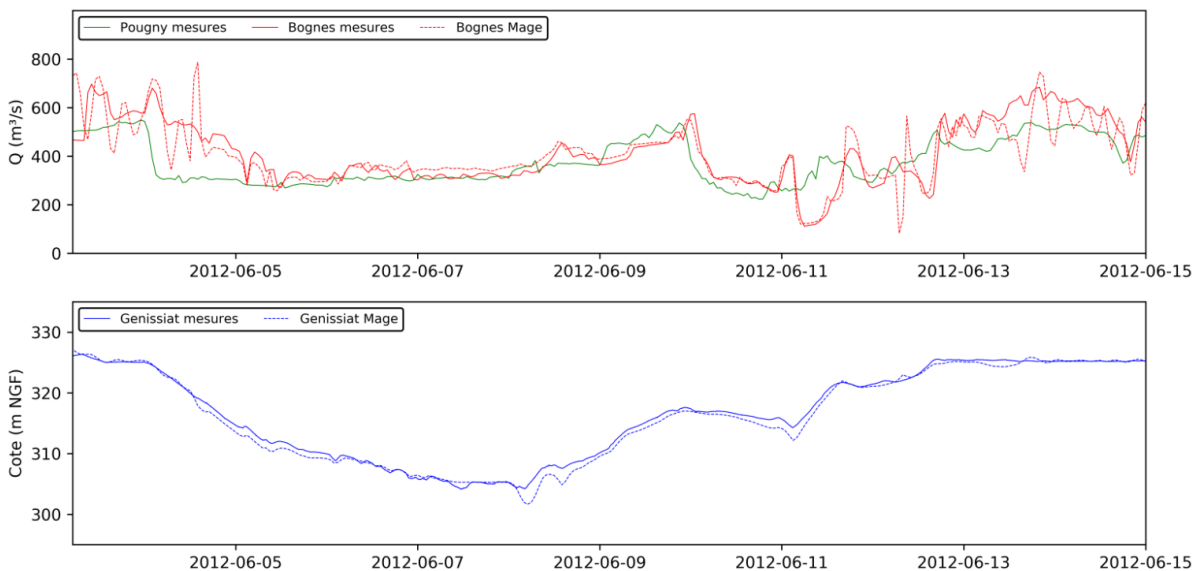


Figure 13 : Résultats de modélisation de Mage-8 pour la chasse de Verbois de 2012 entre Pougny et Seyssel a) débits mesurés et simulés à Bognes b) cote mesurée et simulée à l'amont de Génissiat

Les résultats de modélisation des variables hydrauliques, débit à Bognes, et cote dans la retenue de Génissiat à partir du code de calcul Mage-8 sont illustrés en Figure 13. La cote simulée au niveau de la retenue de Génissiat suit correctement celle observée. Les débits observés à Bognes sont correctement simulés sur la période du 5 au 12 juin. Des fluctuations de débits sont présentes au début et à la fin de la chasse de Verbois, reliées au fonctionnement en simultané des différents orifices à différentes hauteurs sur le barrage.

Une chronique de turbidité a été enregistrée à Pougny lors de la chasse permettant d'imposer une concentration en MES pour différentes classes (6 au total allant des argiles aux sables) en amont lors du calcul du transport de MES par Adis-TS. Cette chronique observée est détaillée dans la thèse de L. Guertault 2015, ainsi que le choix du pourcentage de répartition des classes au cours de la chasse, et est imposée en condition limite amont. De même les conditions initiales de dépôt de sédiments répartis en amont de la retenue sont issues du travail morphologique de la thèse de L. Guertault 2015.

Des chroniques de concentration ont été observées à l'aval de l'ouvrage de Génissiat, à Pyrimont et dans la retenue de Seyssel. Ces mesures sont comparées aux résultats de simulation d'Adis-TS prenant en compte un profil vertical de concentration au niveau de l'ouvrage pour répartir la concentration passant par les différents orifices, décrit en Figure 10. Les résultats, présentés en Figure 14, montrent que les résultats ne sont pas encore concluants.

La première phase de la chasse, entre le 5 et 9 juin, au niveau de Pyrimont montre que les concentrations en MES suivent correctement les concentrations observées et se composent majoritairement de fines. Les simulations sans conditions initiales de dépôts de sédiments au fond du lit ont montré que cette première phase de suspension de fines et grossiers sont associés à une reprise des sédiments sur le fond. En effet, sans condition initiale de dépôt il y a un transport quasi nul entre le 5 et 9 juin, voir Figure 15. Dans la seconde phase de la chasse, entre le 11 et le 15 le modèle surestime les concentrations. Et seulement des fines transitent. Sur cette période les évacuateurs de surfaces sont majoritairement ouverts, par rapport aux orifices de fond et demi-fond, ce qui expliquerait le peu de transport de particules grossières sur cette seconde phase. La tendance modélisée à Seyssel est identique, et en phase 1, les concentrations totales sont encore plus sous estimées. Au niveau de Seyssel le modèle montre que ce sont majoritairement les sédiments fins qui sont présents.

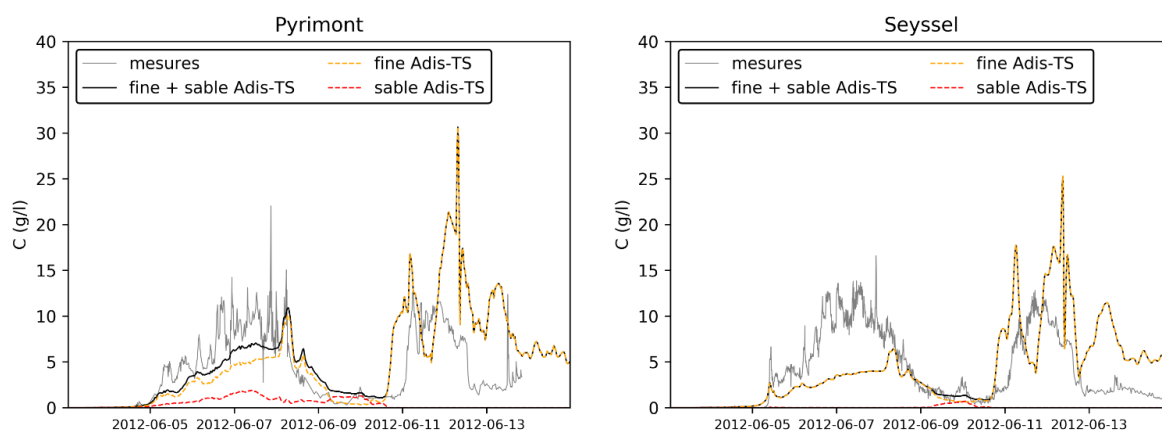


Figure 14 : Résultats de modélisation d'Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel avec une condition initiale de dépôt de sédiments a) MES mesurées et simulées à Pyrimont b) MES mesurées et simulées à Seyssel

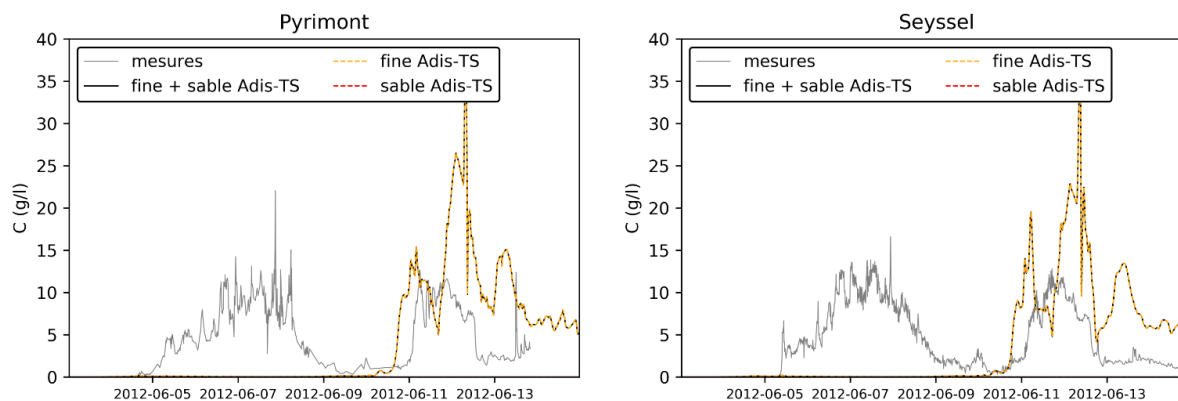


Figure 15 : Résultats de modélisation d'Adis-TS pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel sans condition initiale de dépôt de sédiments a) MES mesurées et simulées à Pyrimont b) MES mesurées et simulées à Seyssel

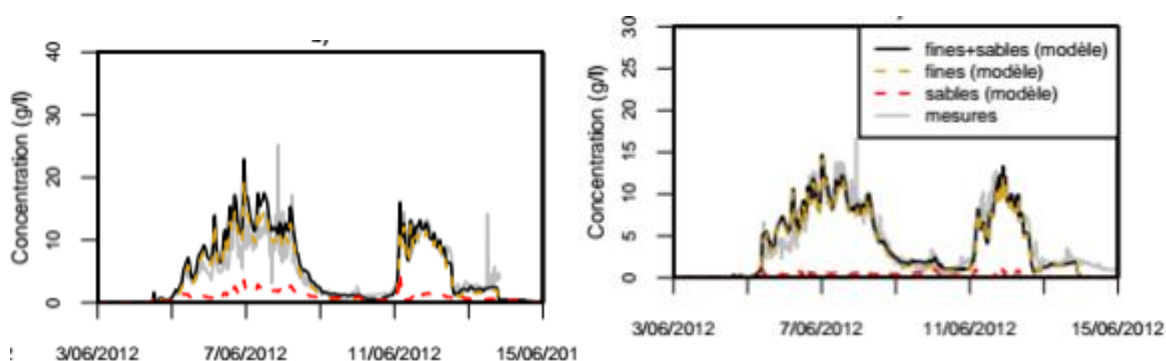


Figure 16 : Résultats issus de la Thèse Lucie Guertault pour la chasse de 2012 entre Pougny et Seyssel avec un module externe de transport par suspension et charriage a) MES mesurées et simulées à Pyrimont b) MES mesurées et simulées à Seyssel

Il est intéressant de comparer les résultats du modèle 1D avec les résultats du module externe de transport issu de la thèse de L. Guertault, 2015, qui sont présentés en Figure 16. Le module externe de transport prend

en compte le transport en suspension et par charriage. Il est clair que le modèle externe suit correctement la dynamique sédimentaire mesurée à Pymont et Seyssel.

Le calcul du transport au travers d'un ouvrage par le code Adis-TS n'est pas encore satisfaisant et des améliorations seront effectuées, certaines ont commencés par l'implémentation du charriage dans le code, présenté au paragraphe §22, et les améliorations de la reprise/dépôt sédimentaire à l'amont immédiat d'un ouvrage. Un autre évènement de chasse, celui de 2016, sera aussi comparé au modèle 1D, abaissement hydraulique sans évacuateurs de surfaces, et suite aux améliorations de développement du code 1D.

## 2.4. Module de charriage

Dans le cadre de l'OSR-4, une première implémentation de la structure de données nécessaire à la modélisation du charriage (représentation des couches sédimentaires) a été réalisée dans Adis-TS. À l'étude il s'est avéré qu'il serait plus pratique de modéliser le charriage dans le code de calculs hydrauliques (Mage) plutôt que dans le code de transport en suspension (Adis-TS). Les raisons qui ont conduit à ce changement de stratégie sont les suivantes :

- il faut pouvoir faire du charriage sans transport en suspension et on ne peut pas faire tourner Adis-TS sans au moins une concentration à transporter ;
- le travail sur le couplage fort Adis-TS - Mage a montré que le couplage entre l'hydraulique et l'évolution de la géométrie est plus facile à gérer à l'intérieur du même code de calcul que entre 2 codes qui doivent calculer en parallèle ;
- l'implémentation de la structure de données dans Adis-TS n'est pas satisfaisante parce qu'elle a une empreinte mémoire trop importante dans les cas sans charriage puisqu'elle réserve la place nécessaire aux données de charriage absentes.

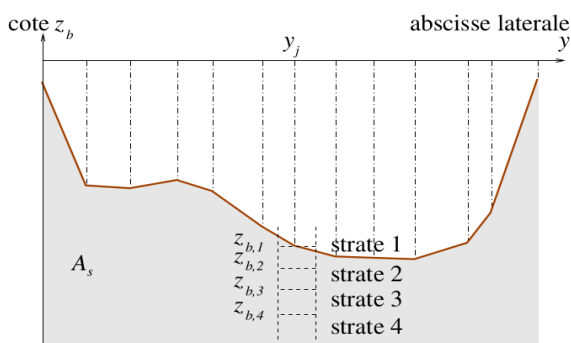


Figure 17: profil en travers avec strates sédimentaires

Il a donc été décidé d'implémenter le module de charriage dans Mage-8. Pour cela la structure de données qui avait été implémentée dans Adis-TS pour représenter les couches sédimentaires a été transférée dans Mage et largement modifiée. Un des objectifs était de ne pas avoir à gérer des données vides quand ces données n'existent pas. Il a été possible et relativement facile d'atteindre cet objectif en utilisant les facultés de programmation orientée objet introduites dans les normes récentes du langage Fortran.

Actuellement nous avons ainsi une version de Mage-8 qui dispose des fonctionnalités supplémentaires suivantes :

- chaque point de chaque profil en travers peut être enrichi de plusieurs couches sédimentaires (Figure 17) définies par leur cote plancher, leur granulométrie ( $d_{50}$ ), leur étendue granulométrique et une contrainte de mise en mouvement ;
- les données des couches sédimentaires peuvent être définies de 2 façons différentes :
  - soit point par point : dans ce cas les fichiers de géométrie au format ST sont complétés sur chaque ligne pour donner, en plus des coordonnées (x,y,z) du point, la liste de ses couches sédimentaires ;



- soit par tronçons : dans ce cas les couches sédimentaires sont définies par leur épaisseur. Pour les secteurs où on ne veut pas définir de tronçon, on définit une couche sédimentaire par défaut.
- Cette double méthode de définition permet, grâce à une fonction d'export de la géométrie au format ST étendu (points (x,y,z) + couches sédimentaires) d'initialiser confortablement une simulation (donnée par tronçons) et de faire une reprise à partir d'un état final ou intermédiaire (donnée point par point).
- Une option de la ligne de commande permet à l'utilisateur de choisir le mode de prise en compte du charriage qu'il souhaite : pas de charriage (valeur par défaut), charriage à partir de données point par point et charriage à partir de données par tronçon. Cela fonctionne sans que l'utilisateur ait besoin de modifier ses fichiers de données, les données inutiles sont ignorées et s'il manque des données il y a un message d'erreur bloquante.

Depuis la rédaction du rapport intermédiaire de mars 2020, les développements suivants ont été réalisés :

- implémentation du bilan sédimentaire en se basant sur les travaux de thèses réalisés précédemment à Irstea, principalement la thèse de Pierre Balayn (2001) et la thèse de Kamal Elkadi Abderrezzak (2006) ;
- implémentation d'une première méthode de modification de la géométrie sous l'effet du charriage.
- Des tests de validation par comparaison avec des simulations réalisées avec RubarBE issues de la thèse de Kamal Elkadi Abderrezzak (2006).
- Des tests sur des cas réels qui n'ont pour objectif que de vérifier le comportement numérique du modèle, et pas encore de simuler le comportement réel de ces sites.

Les travaux en cours portent sur l'amélioration de la procédure de modification de la géométrie et sur la prise en compte de l'effet des ouvrages hydrauliques (voir § 40).

#### 2.4.1. Implémentation du bilan sédimentaire

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 ( $\sigma$ ). Il est centré sur un profil, donc construit avec la demie maille amont et la demie maille aval du profil.

Le bilan sédimentaire sert à mettre à jour, sous l'action de l'écoulement, les caractéristiques de la couche sédimentaire active (la plus haute), c'est-à-dire sa masse et sa composition. Le bilan sédimentaire est réalisé selon la méthode décrite dans la thèse de Pierre Balayn et résumé dans le schéma ci-dessous :

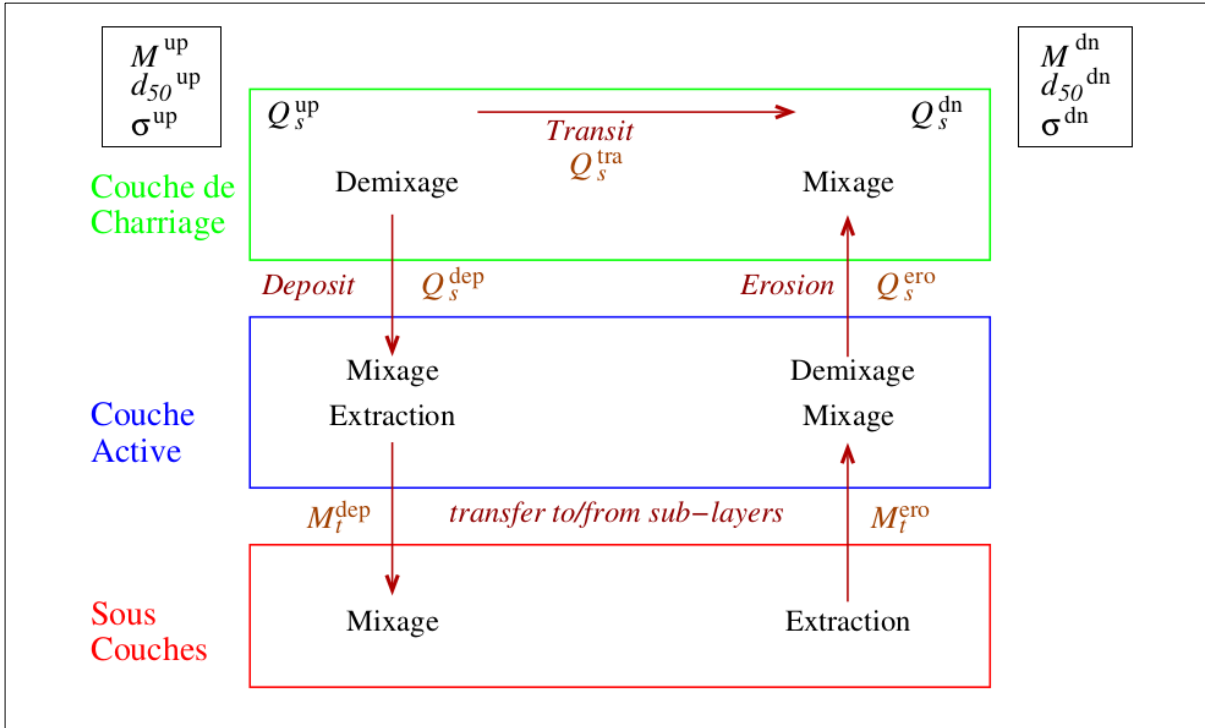


Figure 18: Schéma du bilan sédimentaire dans une maille

L'opération de mixage permet de construire un compartiment sédimentaire résultant du mélange de 2 compartiments sédimentaires de caractéristiques différentes.

L'opération de démixage permet d'extraire un compartiment sédimentaire d'un autre de façon que cette opération soit la réciproque de l'opération de mixage. Si on mixe le compartiment extrait avec le compartiment résiduel, on retrouve le compartiment initial.

Le bilan sédimentaire est réalisé sous-section par sous-section (lit mineur et lits majeurs gauche et droit). Généralement le transport par charriage ne concerne en fait que le lit mineur.

Les lois de capacité solide actuellement implémentées sont :

- Meyer-Peter & Müller :  $q_s = 8 \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} (\theta_{eff} - \theta_{cr})^{1,5}$
- Engelund et Hansen :  $q_s = \frac{0,05K_f R_h^{1/6}}{(\rho_s - \rho)^2 \rho^2 d_{50} g^{5/2}} \tau_f^2 U$
- Camenen & Larson :  $q_s = 12 \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \theta_{eff}^{1,5} \exp(-4,5 \frac{\theta_{cr}}{\theta_{eff}})$

Le bilan sédimentaire dépend de la distance de chargement définie par la formule de Han :

$$L = \alpha_{Han} \frac{u_*}{W_s} \quad (5)$$

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

### 2.4.2. Notion de largeur active

Comme dans RubarBE, l'utilisateur de Mage-8 peut définir une largeur active qui lui permet de limiter pour chaque profil les points sur lesquels le charriage peut agir. Cette largeur active est définie à l'aide de 2 lignes directrices que le modélisateur choisit comme il veut. Seuls les points des profils situés entre ces 2 lignes directrices sont affectés par le charriage. Si de telles lignes directrices ne sont pas définies, alors les profils entiers sont affectés par le charriage.

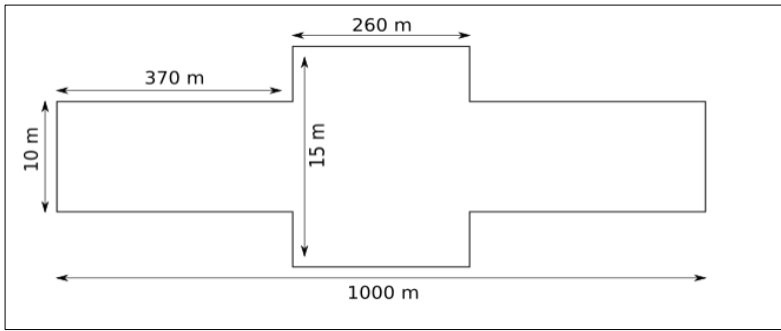


Figure 19 : Schéma du canal (vue de dessus)

### 2.4.3. Méthode de modification de la géométrie sous l'effet du charriage

Une fois le bilan sédimentaire réalisé, il faut traduire l'évolution de la masse du sédiment qui constitue la couche active en évolution géométrique et donc en déformation des profils en travers qui décrivent la forme du lit de la rivière.

Plusieurs méthodes de calcul de cette déformation existent et sont implémentées dans le code RubarBE depuis la thèse de Kamal Elkadi Abderrezzak. Pour l'instant Mage-8 ne dispose que la méthode « naïve » qui consiste à convertir la variation de masse de la couche active en variation d'épaisseur. Ensuite cette variation d'épaisseur, positive ou négative, est ajoutée à la cote du fond de chaque point de la largeur active situé sous la surface de l'eau.

## 2.5. Tests de validation du module de charriage

### 2.5.1. Cas-test théoriques

Afin d'évaluer les performances du module charriage et évolution des fonds, un ensemble de cas-tests a été réalisé et les résultats ont été comparés aux résultats fournis par RubarBE dont le code a déjà été validé en amont. Les cas-tests étudiés ont été en partie repris de la thèse de Kamal El Kadi (El Kadi, 2006), qui avait pour but la validation du code RubarBE.

Ces cas théoriques consistent en des biefs rectilignes de section trapézoïdale dans lesquels différentes situations particulières, jouant sur le profil en long, les sections ou la granulométrie du canal sont représentés.

Tableau 3 : Résumé des paramètres sédimentaires et hydrologiques utilisés

| Diamètre des grains (mm) | Étendue granulométrique $\sigma = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ | Masse volumique du sédiment (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosité | Pente du fond (m/m) | Strickler (m <sup>1/3</sup> /s) | Débit liquide (m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------------|---|--|----------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1                        | 1   | 2650   | 0,4      | 0,001               | 30                              | 20                                |

#### 2.5.1.1. Cas test 1 : Canal avec élargissement de section

On considère un canal de section trapézoïdale de 1 000 m de long divisé en trois parties. Les parties amont et aval du canal possèdent une largeur de 10 m, tandis que dans la partie centrale, le tronçon a une largeur de 15 m. La longueur de cette partie centrale est de 260 m, et la pente est la même sur tout le bief.

Pour ce cas-test, la capacité de transport solide est calculée avec la formule de Meyer-Peter et Müller et le paramètre de Shields critique est égal à 0,047.

### 2.5.1.1.1. Évolution dans le temps et comparaison avec RubarBE

Dans un premier temps, des simulations ont été réalisées dans le but de vérifier que l'évolution dans le temps du profil en long est bien conforme aux attentes, et que les résultats fournis par Mage et RubarBE sont bien équivalents.

Pour ces simulations, la distance de chargement est prise égale à zéro, le pas de discrétisation spatiale  $\Delta x$  est égal à 20 m.

Deux cas ont été étudiés ; le cas où il n'y a pas de correction du paramètre de Shields effectif. On a donc :

$$\tau_{eff} = \tau \quad (6)$$

Et le cas où la correction est appliquée :

$$\tau_{eff} = \left(\frac{K}{K_g}\right)^{3/2} \tau \quad (7)$$

Pour ces deux cas, le débit solide permettant un canal initialement à l'équilibre (c'est-à-dire un canal où il n'y a ni dépôt ni érosion) a été calculé et est imposé comme condition à la limite amont et comme condition initiale.

Tableau 4 : Résumé des paramètres et conditions des simulations

|                                       | Condition initiale $Q_s$ (kg/s) | Conditions aux limites |                           | Distance de chargement (m) | $\Delta x$ (m) |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|
|                                       |                                 | $Q_s$ (kg/s)           | Niveau d'eau à l'aval (m) |                            |                |
| Simulation 1 (sans facteur correctif) | 22,95                           | 22,95                  | 1,4788                    | 0                          | 20             |
| Simulation 2 (avec facteur correctif) | 2,85                            | 2,85                   | 1,4788                    | 0                          | 20             |

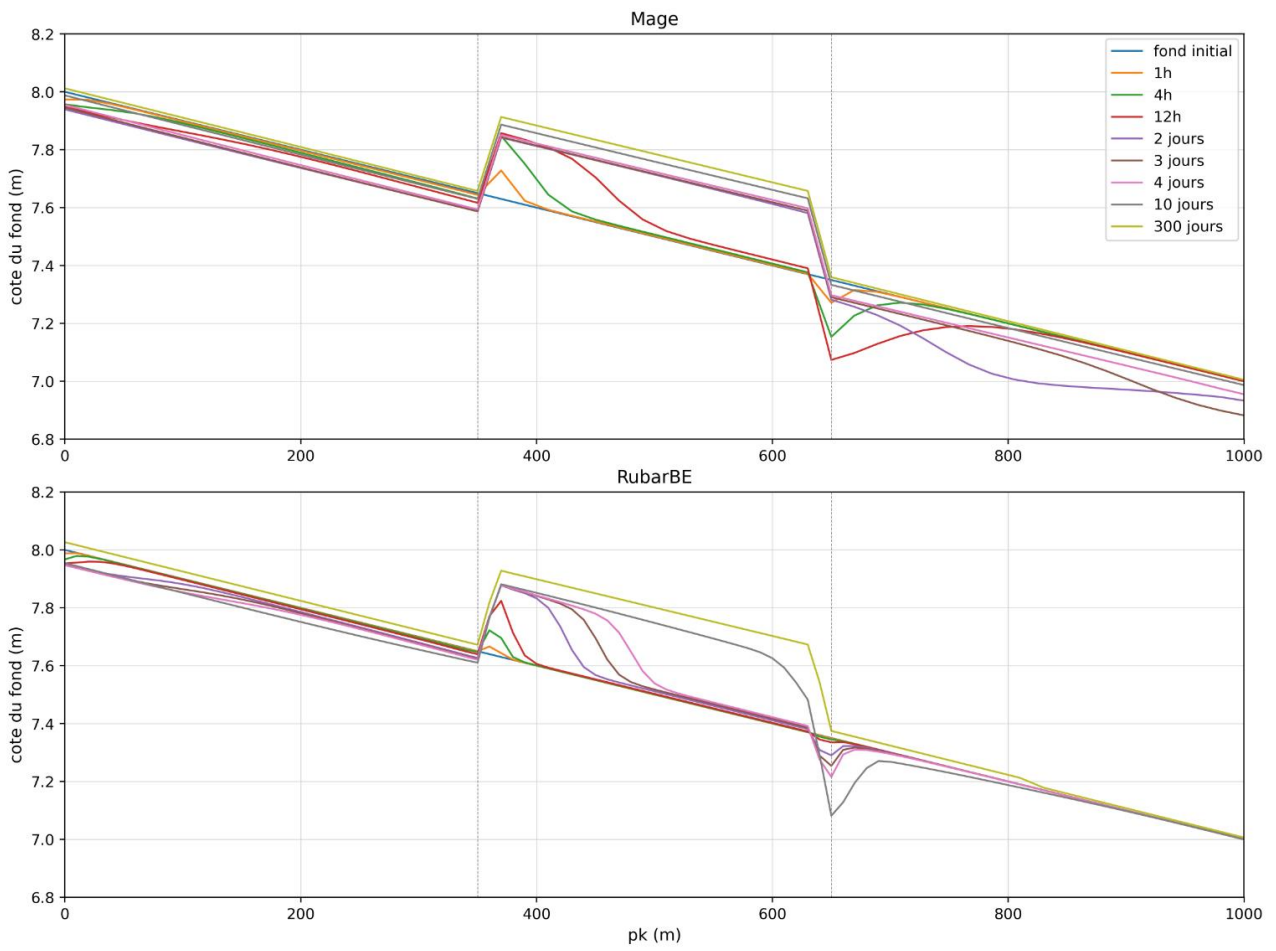


Figure 20: Évolution du profil en long par Mage et RubarBE sans facteur correctif

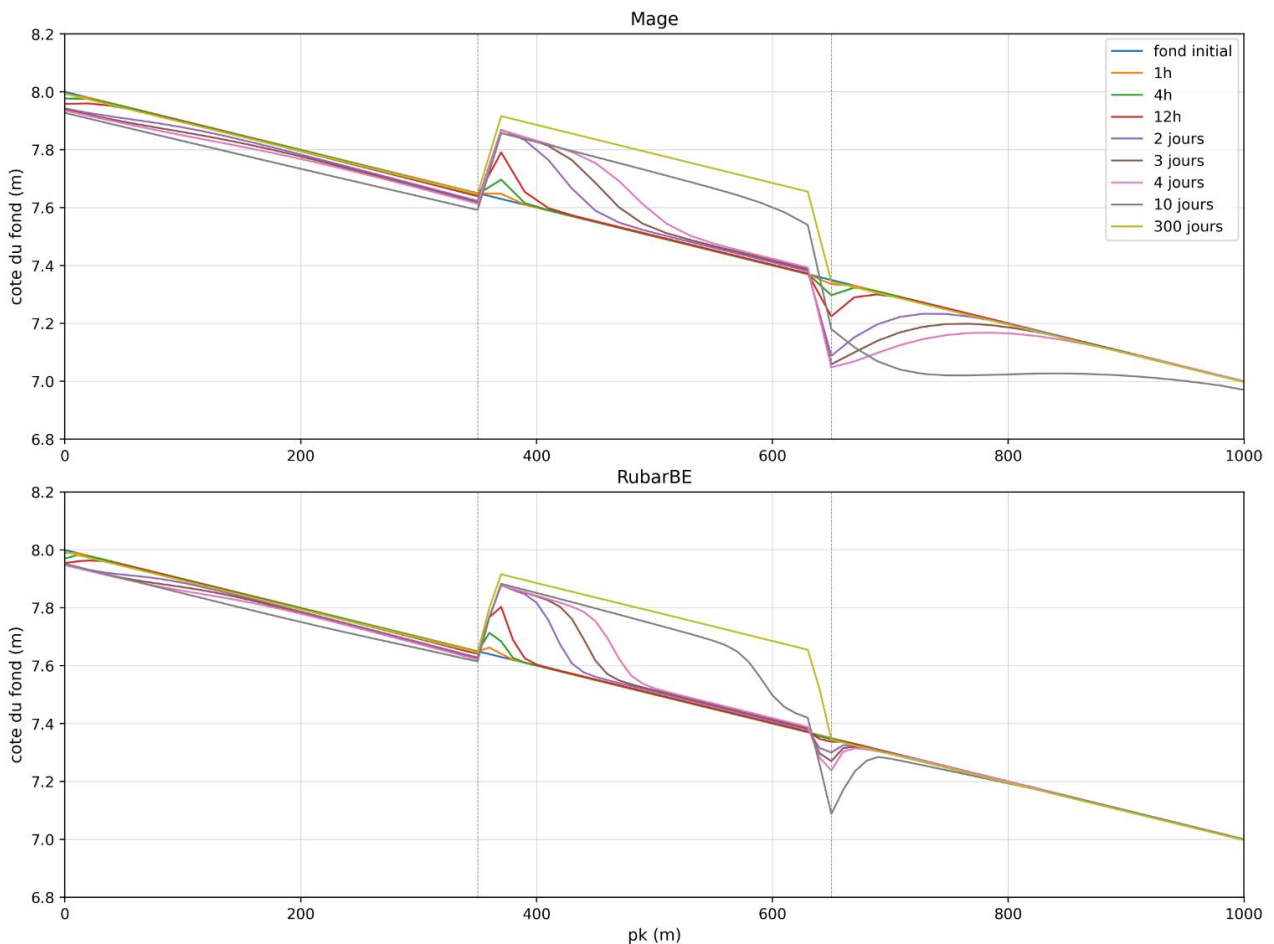


Figure 21: Évolution du profil en long par Mage et RubarBE avec facteur correctif

Dans les deux cas, on constate que les résultats fournis par Mage et RubarBE correspondent bien aux résultats attendus. On observe un dépôt de sédiments dans le tronçon élargi ainsi que dans un premier temps une érosion progressive à l'aval du tronçon, suivi d'un exhaussement du fond par dépôt progressif.

On constate également que si dans les deux cas, les résultats de Mage et RubarBE tendent vers le même état final, la simulation Mage semble évoluer plus rapidement et atteindre plus vite son état d'équilibre final. La simulation Mage semble également produire plus de diffusion numérique que celle de RubarBE.

#### 2.5.1.1.2. Influence de la distance de chargement

Une simulation a été réalisée afin d'étudier l'influence de la distance de chargement sur les résultats. Pour cela, différentes valeurs de la distance de chargement de référence  $\alpha_{Han}$  ont été testées. La distance de chargement s'exprime comme suit :

$$D_{char} = \alpha_{Han} \frac{V'}{w} \quad (8)$$

avec  $V'$  = vitesse de frottement (m/s) et  $w$  = vitesse de chute des particules (m/s).

Les paramètres et conditions sont les mêmes que précédemment. Les simulations ont été réalisées sur 1 jour, 5 jours et 300 jours.

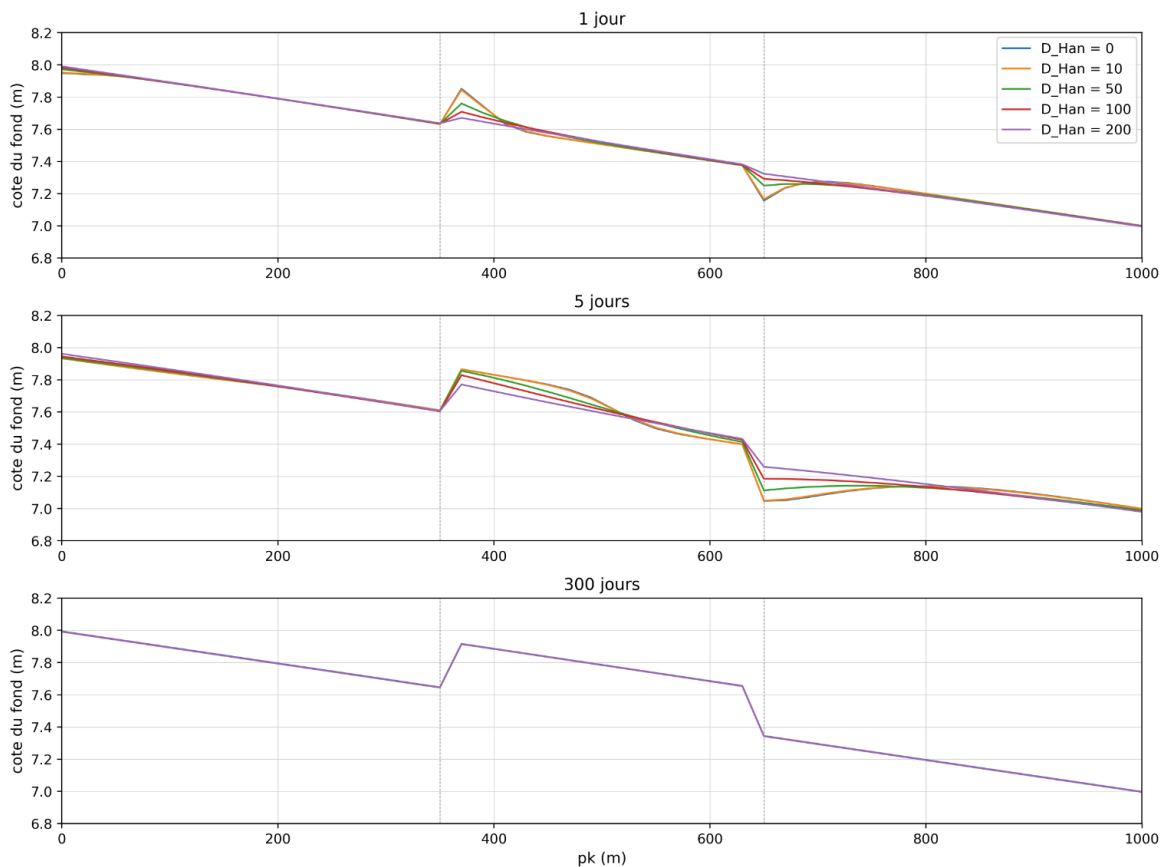


Figure 22 : Évolution du profil en long pour différentes valeurs de la distance de chargement

On peut constater que plus la distance de chargement est grande, plus les variations du fond (pics de dépôt et d'érosion) sont faibles. Cependant, le fond final reste le même quelle que soit la distance de chargement. La distance de chargement semble donc avoir un effet de lissage sur la géométrie.

### 2.5.1.1.3. Influence du pas de maillage

Une simulation a été réalisée afin de déterminer la sensibilité des résultats au pas de discrétisation spatiale  $\Delta x$ . Pour cela, plusieurs valeurs de  $\Delta x$  ont été testées sur des simulations de 1 jour, 5 jours et 300 jours.

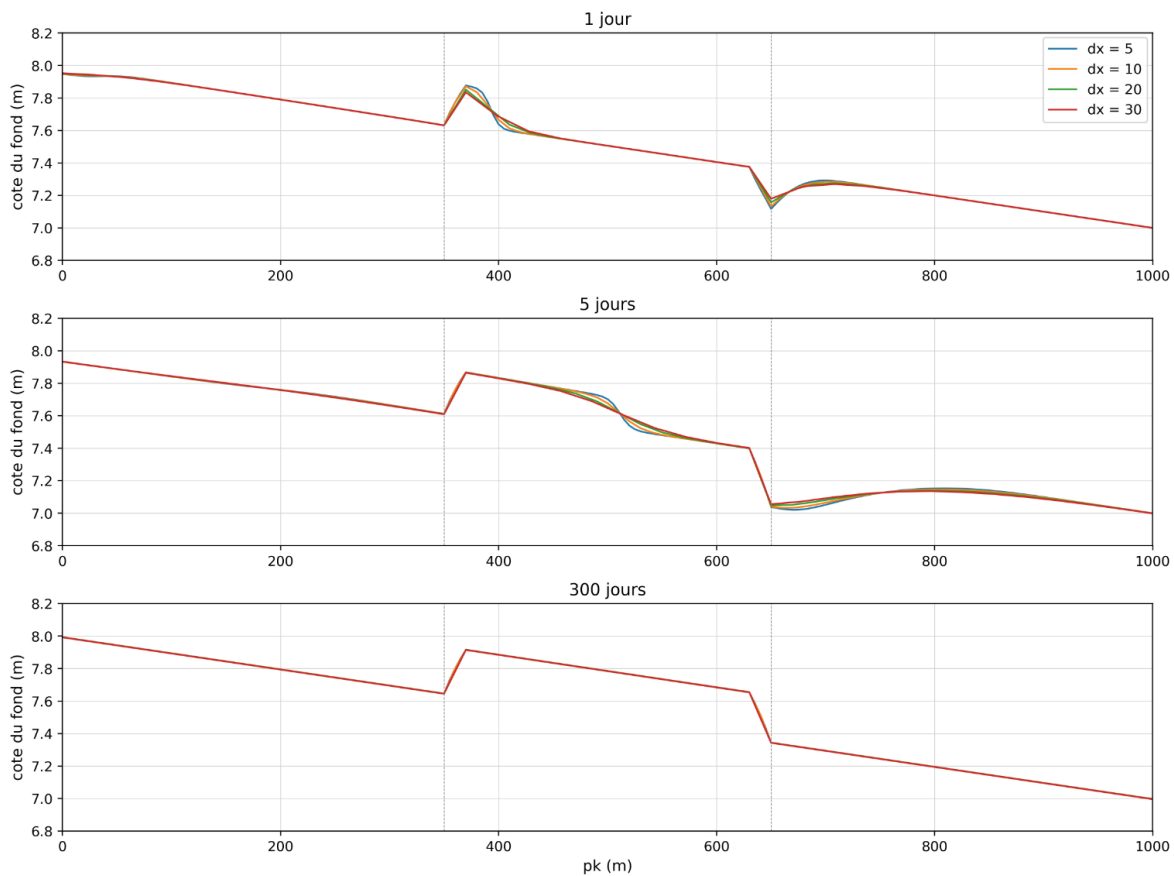


Figure 23 : Évolution du profil en long pour différentes valeurs du pas de maillage

On constate que le comportement du code reste stable lorsque  $\Delta x$  varie. En effet, les évolutions du fonds sont similaires et l'équilibre final est identique.

### 2.5.1.2. Cas test 2 : Canal avec cassure de pente

On considère un canal de 3 000 m de long divisé en trois parties. Les tronçons amont et aval possèdent une pente de 0,001 m/m, tandis que le tronçon central, de 200 m de long, possède une pente plus importante égale à 0,01 m/m.



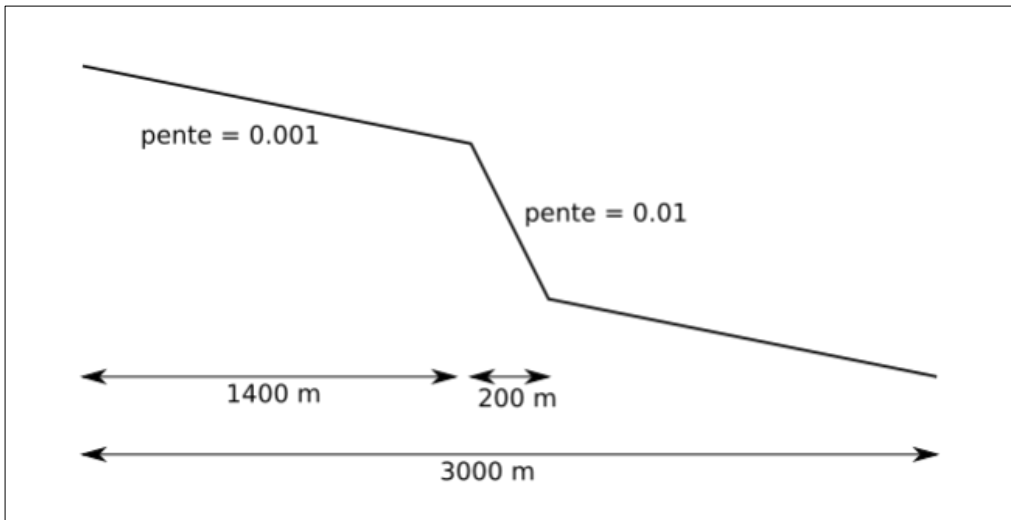


Figure 24 : Schéma du canal, profil en long

Pour ce cas-test, le paramètre de Shields critique est calculé par la formule de Soulsby dans la simulation avec Mage, et grâce à la courbe de Shields dans la simulation RubarBE. En effet, en appliquant un Shields critique de 0,047 des discontinuités sont obtenus sur les profils en long.

Tableau 5 : Résumé des paramètres et conditions des simulations

|                    | Conditions initiales $Q_s$ (kg/s) | Conditions aux limites |                           | Distance de chargement (m) | $\Delta x$ (m) | Shields critique   |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|--------------------|
|                    |                                   | $Q_s$ (kg/s)           | Niveau d'eau à l'aval (m) |                            |                |                    |
| Simulation Mage    | 3,3                               | 3,3                    | 1,6789                    | 0                          | 10             | Formule de Soulsby |
| Simulation RubarBE | 3,3                               | 3,3                    | 1,6789                    | 0                          | 10             | Courbe de Shields  |

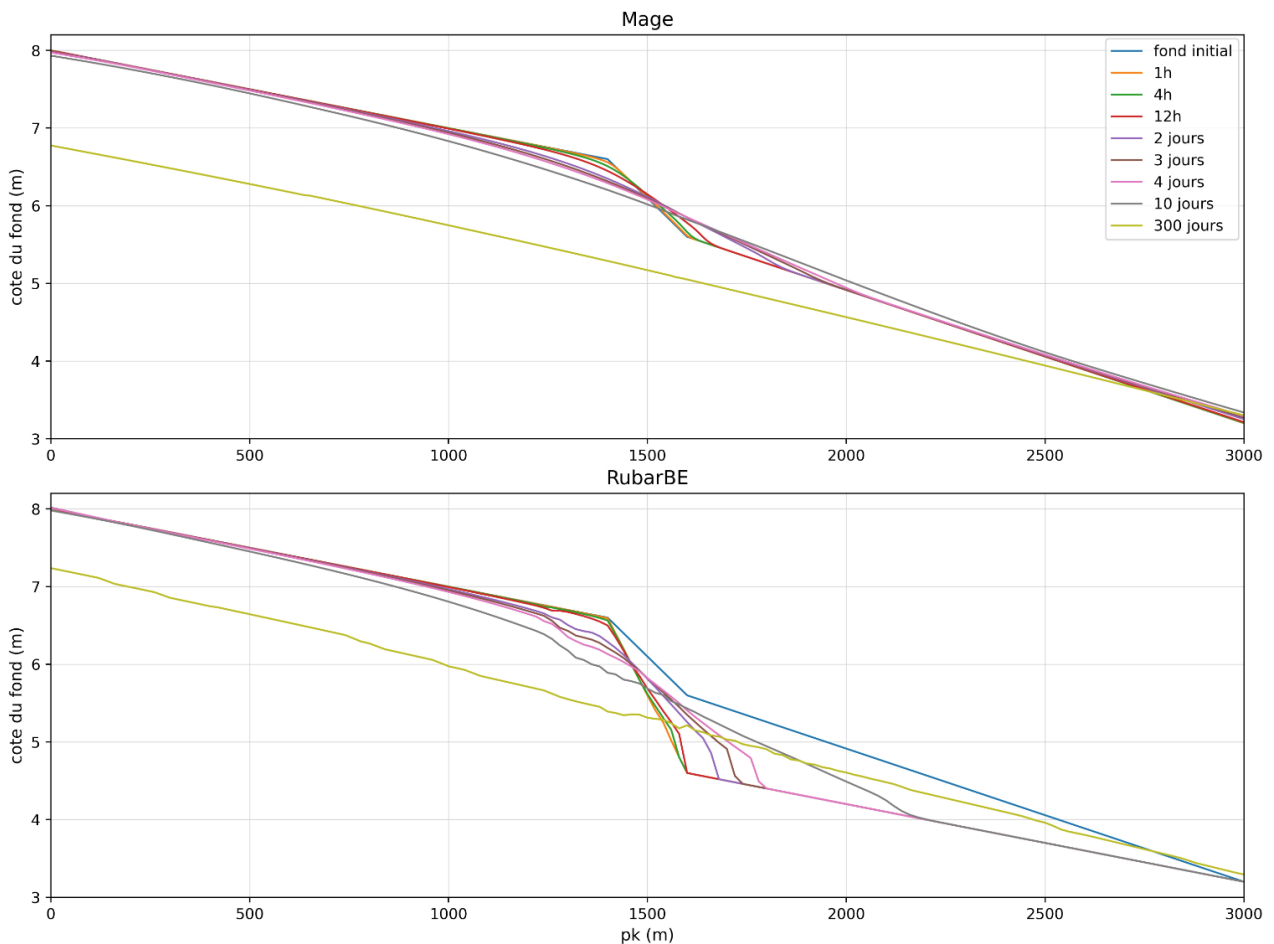


Figure 25 : Évolution du profil en long par Mage et RubarBE

Les résultats sont cohérents avec la réalité. Les profils tendent vers un état d'équilibre constitué d'un profil en long droit, avec une pente légèrement plus importante que la pente initiale.

On peut constater par ailleurs que l'état d'équilibre n'est pas le même entre les simulations Mage et RubarBE, la cote du fond en amont est plus basse dans la simulation Mage.

### 2.5.1.3. Cas test 3 : Canal avec bosse

On considère un canal de 3 000 m de long. Dans ce canal est présent un amas de sédiments de la forme d'une loi gaussienne centrée autour du pk 1 000 m. La formule de la fonction de Gauss est la suivante :

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (9)$$

avec  $a = 0,5$  ;  $b = 1000$  ;  $c = 100$

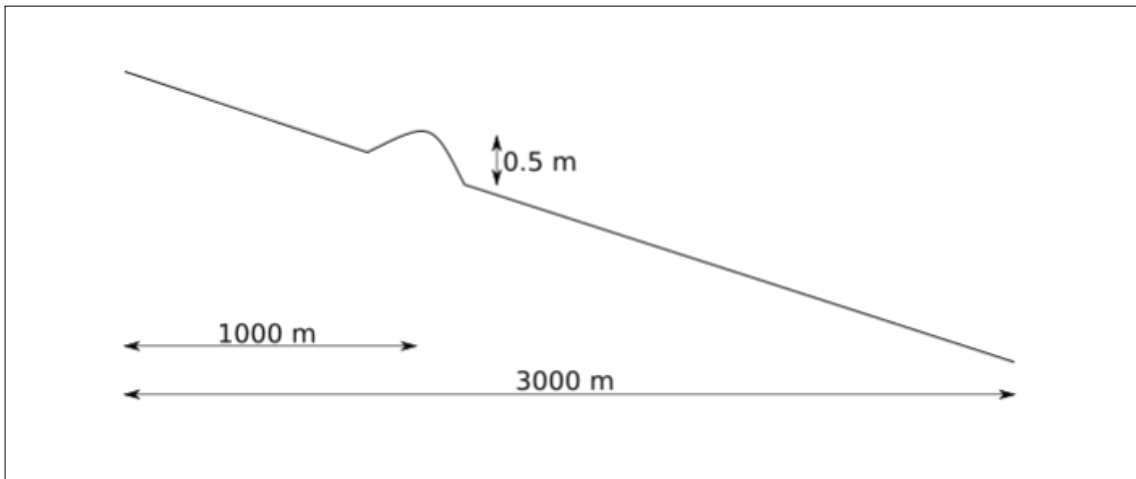


Figure 26 : Schéma du canal, profil en long

Tableau 6 : Résumé des paramètres et conditions des simulations

| Conditions initiales<br>$Q_s$ (kg/s) | Conditions aux limites |                           | Distance de<br>chargement (m) | $\Delta x$ (m) | Shields<br>critique |
|--------------------------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|---------------------|
|                                      | $Q_s$ (kg/s)           | Niveau d'eau à l'aval (m) |                               |                |                     |
| 2,85                                 | 2,85                   | 1,4775                    | 0                             | 10             | 0,047               |

De la même manière que précédemment, l'évolution du profil en long est simulée avec Mage et RubarBE.

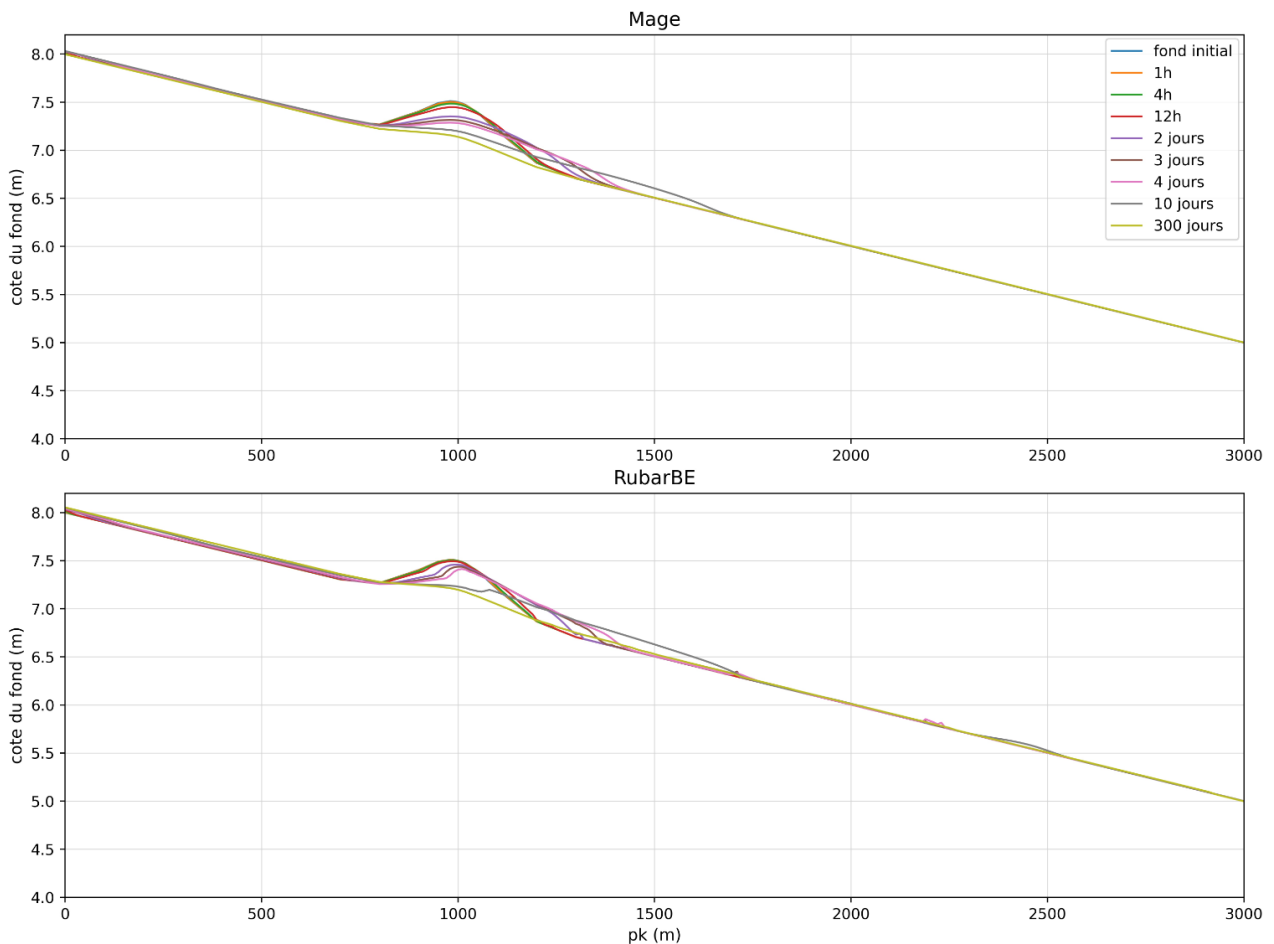


Figure 27: Évolution du profil en long par Mage et RubarBE

Les résultats des deux simulations Mage et RubarBE sont encore une fois très similaires et suivent la même évolution. La bosse se déplace au cours du temps de l'amont vers l'aval et tend à s'aplatir jusqu'à obtenir un profil en long quasiment rectiligne.

### 2.5.2. Cas-test expérimentaux

Afin d'aller plus loin dans la validation du code de Mage, les résultats numériques ont été confrontés à des mesures expérimentales réalisées en laboratoire par Kamal El Kadi et présentées dans sa thèse (El Kadi, 2006).

#### 2.5.2.1. Test de Van Rijn

L'expérience de Van Rijn consiste en un canal de 30 m de long et 0,5 m de large dans lequel est présent une fosse. Cette fosse est située au  $pk = 2$  m et ses dimensions sont 3 m de largeur et 0,15 m de profondeur.

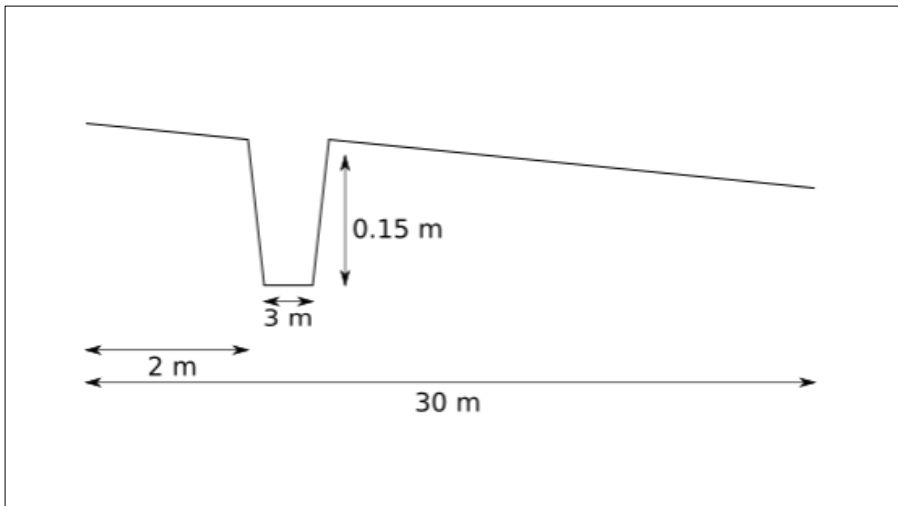


Figure 28 : Schéma du canal, profil en long

Tableau 7 : Résumé des paramètres et conditions des simulations

| Conditions initiales |           | Conditions aux limites |           |                           | $\alpha_{Han}$ (m) | $\Delta x$ (m) | Strickler K ( $m^{1/3}/s$ ) | Pente I (m/m) | Sédiments            |          |
|----------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------|---------------|----------------------|----------|
| Q ( $m^3/s$ )        | Qs (kg/s) | Q ( $m^3/s$ )          | Qs (kg/s) | Niveau d'eau à l'aval (m) |                    |                |                             |               | d <sub>50</sub> (mm) | $\sigma$ |
| 0,09945              | 0,02      | 0,09945                | 0,02      | 0,39                      | 0,4                | 0,5            | 46                          | 0,001517      | 0,16                 | 1,6      |

Pour cette simulation, la capacité solide a été calculée avec la formule de Meyer-Peter et Müller. Le temps de simulation est de 7,5 heures.

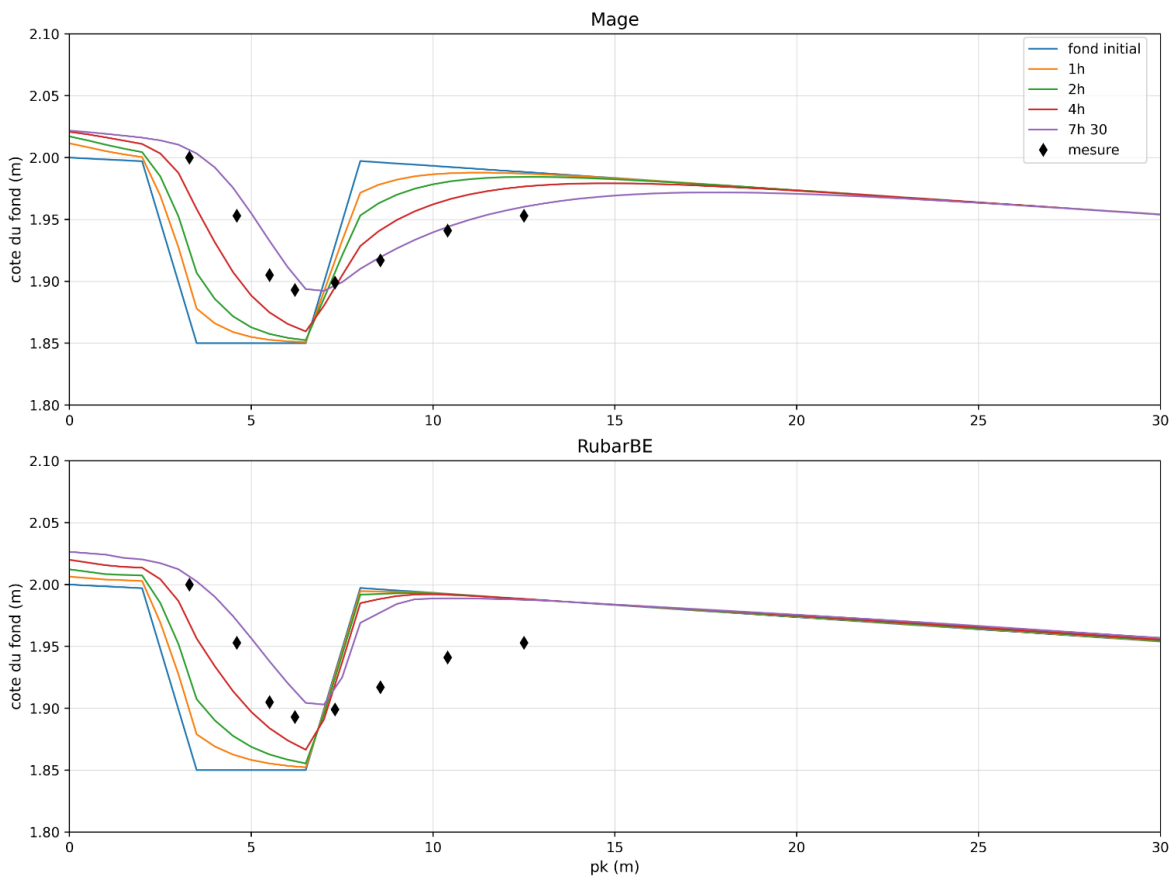


Figure 29 : Évolution du profil en long par Mage et RubarBE

Les résultats obtenus par Mage et RubarBE sont conformes aux attentes, on observe un dépôt progressif dans la fosse ainsi qu'une érosion progressive à l'aval.

Les résultats obtenus sont également proches des mesures de laboratoire. On constate cependant qu'une nouvelle fois, la simulation Mage semble produire plus de diffusion numérique que la simulation RubarBE.

### 2.5.3. Conclusion sur les tests de validation

L'objectif de ces tests de validation était d'évaluer la performance du module charriage et évolution des fonds de Mage en comparaison avec RubarBE et un cas expérimental. On a pu constater que le code répondait de manière cohérente face aux différentes géométries proposées, et que les résultats obtenus étaient satisfaisants.

De plus, il a pu être vérifié par des études de sensibilités que l'état final atteint était bien indépendant du pas de discrétisation spatiale et de la distance de chargement.

## 2.6. Charriage sur cas réels

Étant donné que le module de charriage et évolution des fonds de Mage a produit des résultats satisfaisants pour les cas-tests de validation, il a également été testé sur des cas réels. La simulation de l'évolution des fonds sur des biefs du modèle du Rhône a été réalisée.

### 2.6.1. Bief de Gier à Vaugris

Pour commencer, il a été choisi de simuler le bief entre Gier et Vaugris, car il s'agit d'un bief qui ne présente pas d'ouvrages ou de particularités. La simulation a été réalisée sur une durée de 10 ans en utilisant l'hydrogramme de 2008 à 2018 comme condition à la limite amont liquide.

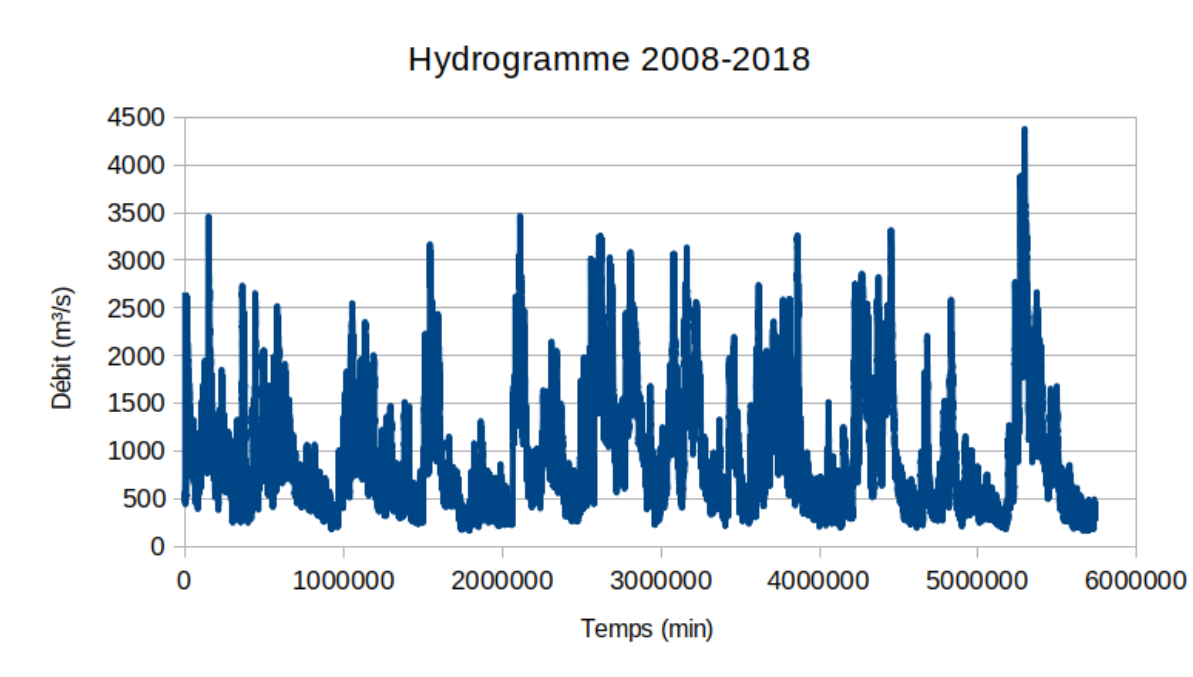


Figure 30 : Hydrogramme de 2008 à 2018 à Gier

Tableau 8 : Résumé des paramètres et conditions de la simulation

| Conditions aux limites |           |                           | $\alpha_{Han}(m)$ | Sédiments            |          |
|------------------------|-----------|---------------------------|-------------------|----------------------|----------|
| Q (m <sup>3</sup> /s)  | Qs (kg/s) | Niveau d'eau à l'aval (m) |                   | D <sub>50</sub> (mm) | $\sigma$ |
| Hydrogramme            | 0         | 145                       | 0                 | 1                    | 1        |

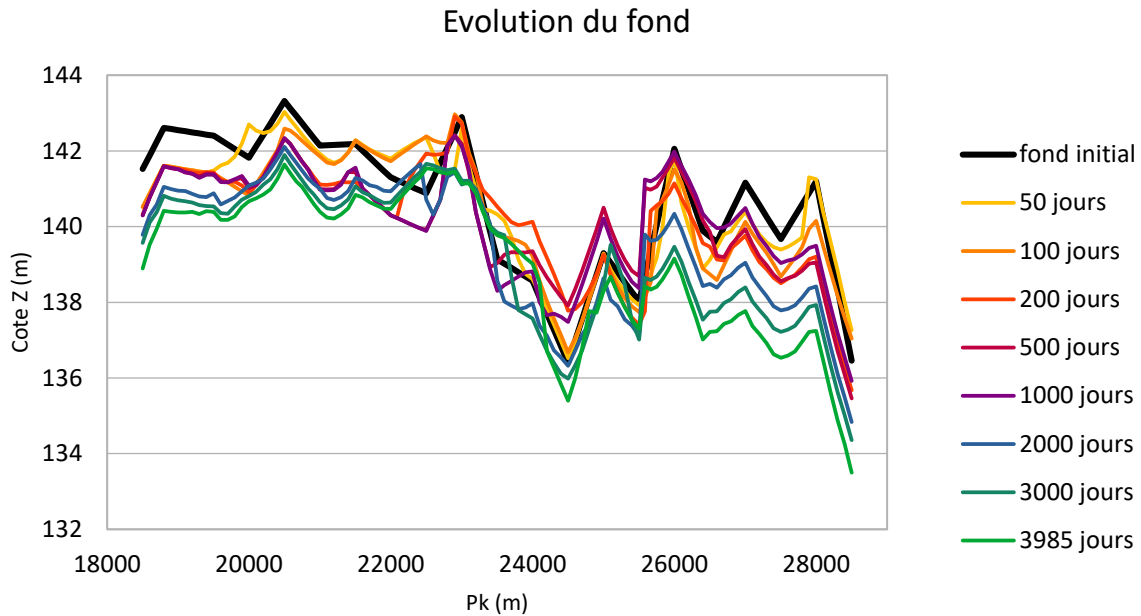


Figure 31 : Évolution du profil en long par Mage

Les résultats obtenus montrent une évolution du fond importante avec beaucoup d'érosion à l'aval, ce qui semble peu réaliste. Toutefois, cela peut s'expliquer par la manière dont a été définis la granulométrie dans cette simulation, en effet le diamètre médian sur le Rhône est plus important que celui qui a été choisi ici.

Par ailleurs le temps nécessaire à cette simulation de 10 ans a été de 19 minutes. Le code remplit bien ses objectifs en termes de rapidité de calcul.

### 2.6.2. Barrage de Vaugris

Le comportement du code face à un ouvrage a ensuite été testé. Pour cela, il a été choisi de modéliser le barrage de Vaugris étant donné qu'il ne possède pas de canal de dérivation, il y a donc un seul bief à modéliser.

La simulation a été réalisée sur un an avec comme condition à la limite amont l'hydrogramme de 2017.

Tableau 9 : Résumé des paramètres et conditions de la simulation

| Conditions aux limites |           |                           | $\alpha_{Han}(m)$ | Sédiments            |          |
|------------------------|-----------|---------------------------|-------------------|----------------------|----------|
| Q (m <sup>3</sup> /s)  | Qs (kg/s) | Niveau d'eau à l'aval (m) |                   | D <sub>50</sub> (mm) | $\sigma$ |
| Hydrogramme            | 0         | 145,36                    | 0                 | 1                    | 1        |



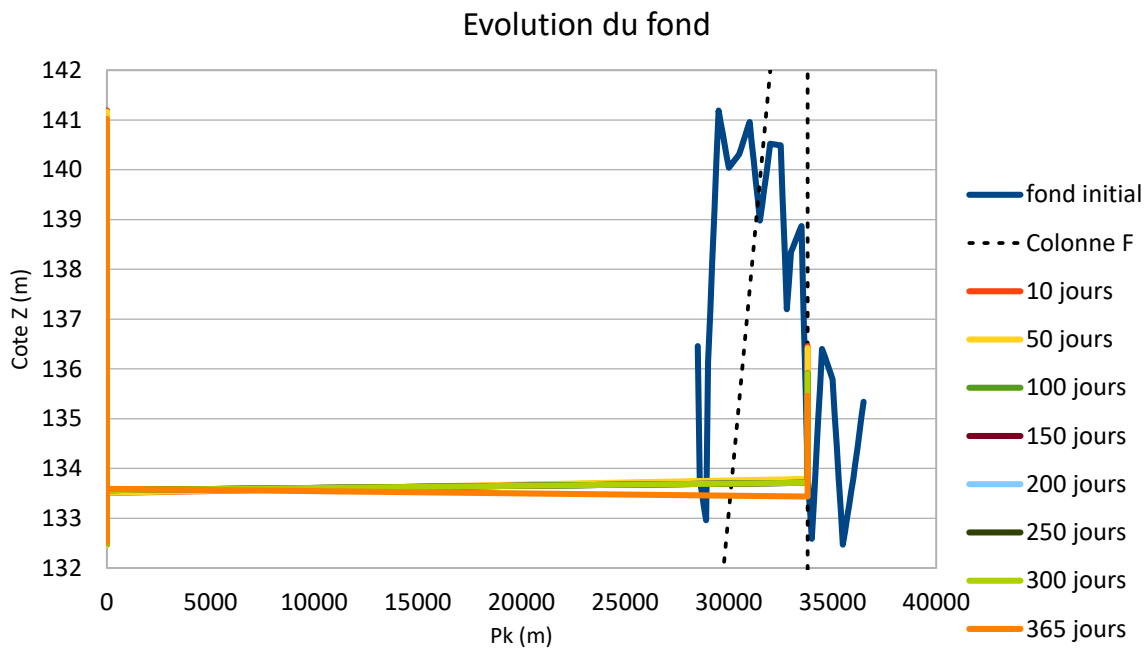


Figure 32 : Évolution du profil en long par Mage

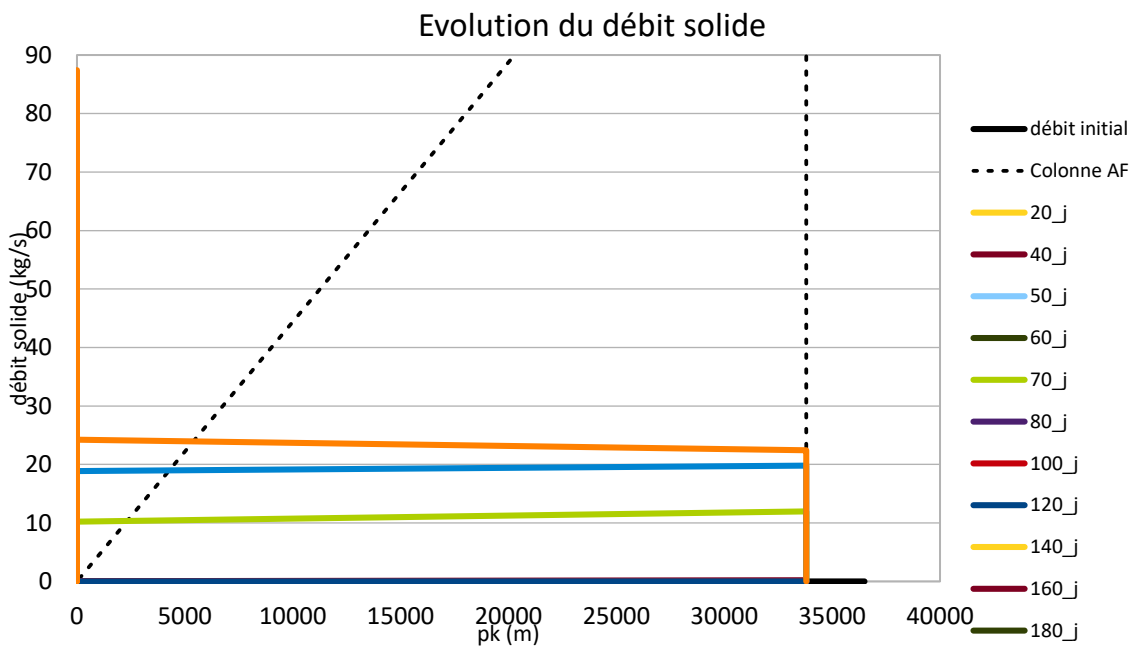


Figure 33 : Évolution du débit solide

On constate cette fois-ci beaucoup moins d'évolution du fond, ce qui semble plus réaliste. Du plus, le code a le comportement attendu au niveau du barrage, on peut voir figure 17 que le débit solide est nul au niveau du barrage (en pointillé sur la figure). Le barrage bloque donc bien les sédiments.

## 2.7. Autres développements

- Couplage fort Adis-TS - Mage-8 : Au printemps 2018 la CNR a accueilli un stagiaire pour travailler sur une inter-comparaison de codes de calcul pour le transport de sédiments fins en suspension avec évolution des fonds. Lors de ce stage quelques bugs ont été mis en évidence et ont été corrigés.

- Amélioration de la robustesse d'Adis-TS : bilan de masse, schémas numériques alternatifs.

## 2.8. Perspectives

### 2.8.1. Développements en cours

Les améliorations en cours d'implémentation ou prévues en 2021 dans le module de charriage de Mage-8 sont :

- La modélisation de l'influence des ouvrages en travers. Les ouvrages de type seuil, déversoir ou barrage sont considérés comme opaques au charriage (ils ne laissent rien passer), tandis que les vannes de fond sont considérées comme transparentes au charriage (elles laissent tout passer).
- La prise en compte d'une couche active superficielle qui n'est pas la première couche sédimentaire mais une fine tranche de celle-ci pour éviter que les opérations de mixage et démixage ne remodelent la première couche sur toute son épaisseur.
- Une méthode moins grossière de modification de la géométrie.

### 2.8.2. Tests et simulations

- Simuler avec Mage-8 des biefs déjà simulés dans le cadre de l'OSR par le Cerege et comparer avec les résultats obtenus avec Basement 1D.
- Modélisation sur des tronçons plus complexes avec difffluence / confluence, ouvrages, données sédimentaires réelles, etc.

## 3. COLLABORATION AUTOUR DE LA MODELISATION

### 3.1. Réunions d'échanges et projets communs

Une mise en relation des modèles numériques développés au sein de l'IRSN et de Irstea fut initiée lors de la première réunion de travail en février 2019. Les minutes de la réunion de travail OSR modélisation sont fournies en Annexe 3.

L'objectif de la réunion fut d'établir des échanges entre les deux organismes (IRSN et Irstea) sur les modèles qu'ils utilisent pour simuler le transfert d'eau et de MES dans le cadre de l'OSR : modèles "de crise" STERNE (Golfe du Lion) et Casteaur (hydro-sédimentaire 1D, radio-nucléides), modèles Mage et Adis-TS (hydro-sédimentaire et morphodynamique) et leur application au Rhône du lac Léman à la mer Méditerranée dans le cadre de l'OSR.

De prometteuses pistes de comparaison et échanges autour de Casteaur et Mage-Adis-TS ont été prévues, notamment dans le cadre de la thèse d'Adrien Delaval. Il pourrait utiliser le modèle OSR du Rhône et comparer avec l'approche hydraulique simplifiée de Casteaur pour évaluer l'impact des approximations. Des premiers échanges ont eu lieu concernant des données d'entrées du modèle du Rhône développé par Irstea (coefficient de rugosité, conditions aux limites hydrauliques) pour l'IRSN.

Des échanges méthodologiques mutuels seraient intéressants, notamment pour développer les simulations des processus chimiques (partition, etc.) dans Adis-TS en s'inspirant des options plus avancées de Casteaur. L'application de Mage-Adis-TS (en régime transitoire) sur des géométries simplifiées par biefs de type Casteaur pourrait être comparée aux résultats de Casteaur sur un même site, par exemple un bief aménagé du Rhône.

Une réunion plus large, étendue aux modélisateurs des autres partenaires de l'OSR (notamment CNR), a été organisée en septembre 2019.

Des projets d'actions communes avec d'autres partenaires pour intégrer les modèles du bassin versant au Golfe du Lion ont été proposées pour financement par l'Agence de l'Eau (action ContinuumMES) et l'ANR (proposition ANR Continuum). L'action ContinuumMES a été acceptée par l'Agence de l'Eau et va pouvoir a

démarré en octobre 2020 avec le recrutement d'un CDD de 12 mois. Il s'agit de chaîner les 3 modèles J2000 Rhône (hydrologie distribuée sur le bassin versant), OSR 1D (Rhône du Léman à la mer) et MARS3D-MUSTANG (Golfe du Lion, Ifremer), et d'évaluer des scénarios de long-terme sur les flux d'eau et de MES. La proposition ANR Continuum n'a en revanche pas passé la 1<sup>ère</sup> phase de sélection pour la deuxième année consécutive. Une réunion avec les partenaires a permis de dresser une liste d'améliorations pour resoumettre une proposition pour 2022.

### 3.2. Formation et appui aux actions OSR

Outre les appuis par téléphone et courrier électronique, on peut noter les actions de formation et appui suivantes pour différents partenaires et actions de l'OSR5.

- Appui au stage d'Emilio Corrales Lalinde (CNR, 2018). Encadrants : Thierry Frénaud pour CNR, Éric Barthélémy pour INP Grenoble. Sessions de formation à PamHy-Mage et Adis-TS : 5 et 16 avril 2018 (2 1/2 journées).
- Appui au postdoc d'Alyssa Serlet (Cerege). Journée formation Pamhyr-Mage appliqué au modèle du Rhône 29/07/2019. Échanges réguliers par mail ou visio depuis cette formation.
- Appui à la thèse de Mathieu Lucas (INRAE). Demi-journée formation Pamhyr-Mage appliqué au modèle du Rhône, secteur Beaucaire 23/01/2020, échanges réguliers.
- Appui à la thèse de Nicolas Noclin (ENTPE). Journées et demi-journées de formation Pamhyr-Mage appliqué au modèle du Rhône, secteur PDR 22/01/2020, 06/02/2020, 03/03/2020, échanges réguliers et ateliers de travail.
- Démo du logiciel modeleur-secma par André Paquier 13/02/2020 avec Mathieu, Nicolas et Laura.
- Appui à la thèse d'Adrien Laval. Point Pamhyr-Mage pour prise en main du modèle Rhône lors des journées modélisation, échanges par courriel.

## 4. REFERENCES

Andriès E., Camenen B., Faure J.-B., Launay M., and Le Coz J. (2012). Modélisation hydro-sédimentaire du site de Miribel-Jonage à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS, Rapport scientifique, Irstea Lyon-Villeurbanne.

Andriès E., Camenen B., Faure J.-B., Le Coz J., and Launay M. (2012). Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS, Rapport scientifique, Irstea Lyon-Villeurbanne.

Camenen B., Andriès E., Faure J.-B., de Linares M., Gandilhon F., and Raccasi G. (2013). Experimental and numerical study of long term sedimentation in a secondary channel : example of the Beurre island on the Rhône river, France. In *ISRS Kyoto*, Japan.

Corrales Lalinde E. (2018). Transport sédimentaire en suspension, Rapport de stage, CNR Lyon.

Dugué V., Walter C., Andriès E., Launay M., Le Coz J., Camenen B., and Faure J.-B. (2015). Accounting for hydropower schemes' operation rules in the 1D hydrodynamic modeling of the Rhône River from Lake Geneva to the Mediterranean Sea, 36th IAHR 2015 World Congress, The Hague, The Netherlands.

Dugué V., Le Coz J., Camenen B., Faure J.-B., Walter C., Andriès E., and Launay M. (2015). A 1-D hydro-sedimentary numerical model to improve the understanding of suspended particulate matters and contaminant fluxes in the Rhône River, *IS Rivers 2015*, Lyon, France.

- Elder J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 5(4), 544-560.
- Fischer H. (1975). Discussion of simple method for predicting dispersion in stream by R. S. McQuivey and T. N. Keefer, *Journal of Environmental Engineering Division*, 101(3), 453-455.
- Guertault L. (2015). Evaluation des processus hydro-sédimentaires d'une retenue de forme allongée : application à la retenue de Génissiat sur le Haut-Rhône. Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France.
- Guertault, L., B. Camenen, C. Peteuil, A. Paquier, and J.-B. Faure (2016), One-dimensional modeling of suspended sediment dynamics in dam reservoirs, *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 142(10), doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001157.
- Iwasa Y., and Aya S. (1991). Predicting longitudinal dispersion coefficient in open channel flows. *International Symposium on Environmental Hydraulics*, Hong-Kong, China.
- Koussis A., and Rodriguez-Mirasol J. (1998). Hydraulic estimation of dispersion coefficient for streams. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 124(3),317-320.
- 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, France.
- Launay M., Le Coz J., Camenen B., Walter C., Angot H., Dramais G., Faure J.-B., Coquery M. (2015). Calibrating pollutant dispersion in 1-D hydraulic models of river networks, *Journal of Hydro-environment Research*, 9, pp 120-132.
- Launay M., Dugué V., Faure J.-B., Coquery M., Camenen B. and Le Coz J. (2019), Numerical modelling of the suspended particulate matter dynamics in a regulated river network, *Science of the Total Environment*, Volume 665, pp 591-605.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Bouriscaud, R. (2014). "Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves : a Bayesian approach", *Journal of Hydrology*, Volume 509, pp 573-587.
- Liu H. (1977). Predicting dispersion coefficient of streams. *Journal of Environmental Engineering Division*, 103(1), 59-69.
- Negrello, P., Menu, S. and Reynaud, S. (2012). Evolution de la consigne de chasse des ouvrages de la Basse Isère – Analyses complémentaires de la modélisation hydrosédimentaire du bief Rhône. Rapport technique EDF/CNR.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2013). Suivi scientifique des opérations de chasses sur le Haut-Rhône de juin 2012. Rapport technique. Livrable OSR3.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2015). Modélisation hydro-sédimentaire 1-D du Rhône de Lyon à la mer Méditerranée – Bilan 2014. Rapport technique. Livrable OSR3.
- Observatoire des Sédiments du Rhône (2017). Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône – Action V2. Rapport technique. Livrable OSR4.
- Pouchoulin S., Mignot E., Rivière N., Le Coz J., Numerical simulations on mixing of passive scalars in river confluences. *River Flow 2018*, Volume 40, 05019.
- 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*, Volume 658, pp 457-473.

Rathbun, R. E., and C. E. Rostad (2004), Lateral mixing in the Mississippi River below the confluence with the Ohio River, *Water Resour. Res.*, 40, W05207, doi:10.1029/2003WR002381.

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*, Volume 540, pp 1002-1015.

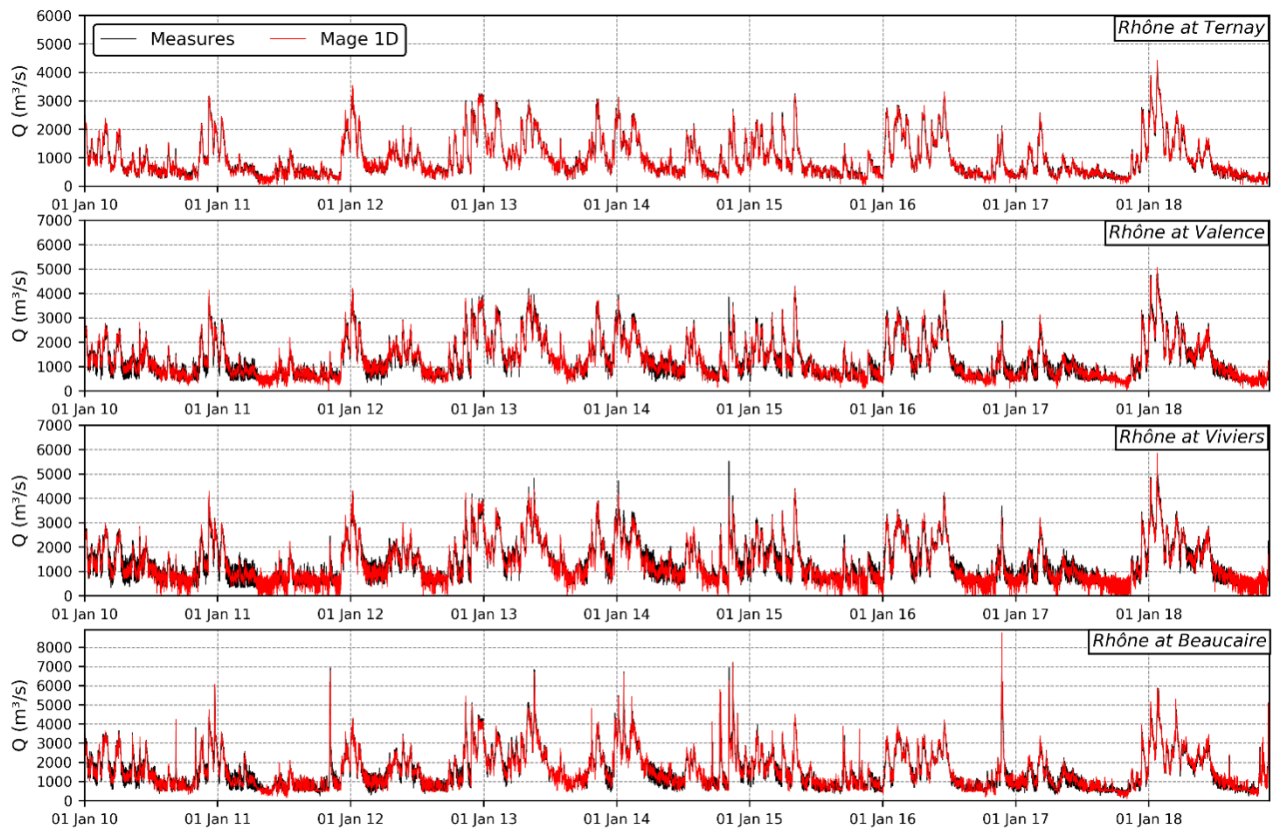
Seo I., and Cheong T. (1998). Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams. *Journal of Hydraulic Engineeringf ASCE* ; 124(1), pp 25-32.

Yotsukura, N., and E. D. Cobb (1972), *Transverse diffusion of solutes in natural streams*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 582-C.

## 5. ANNEXES

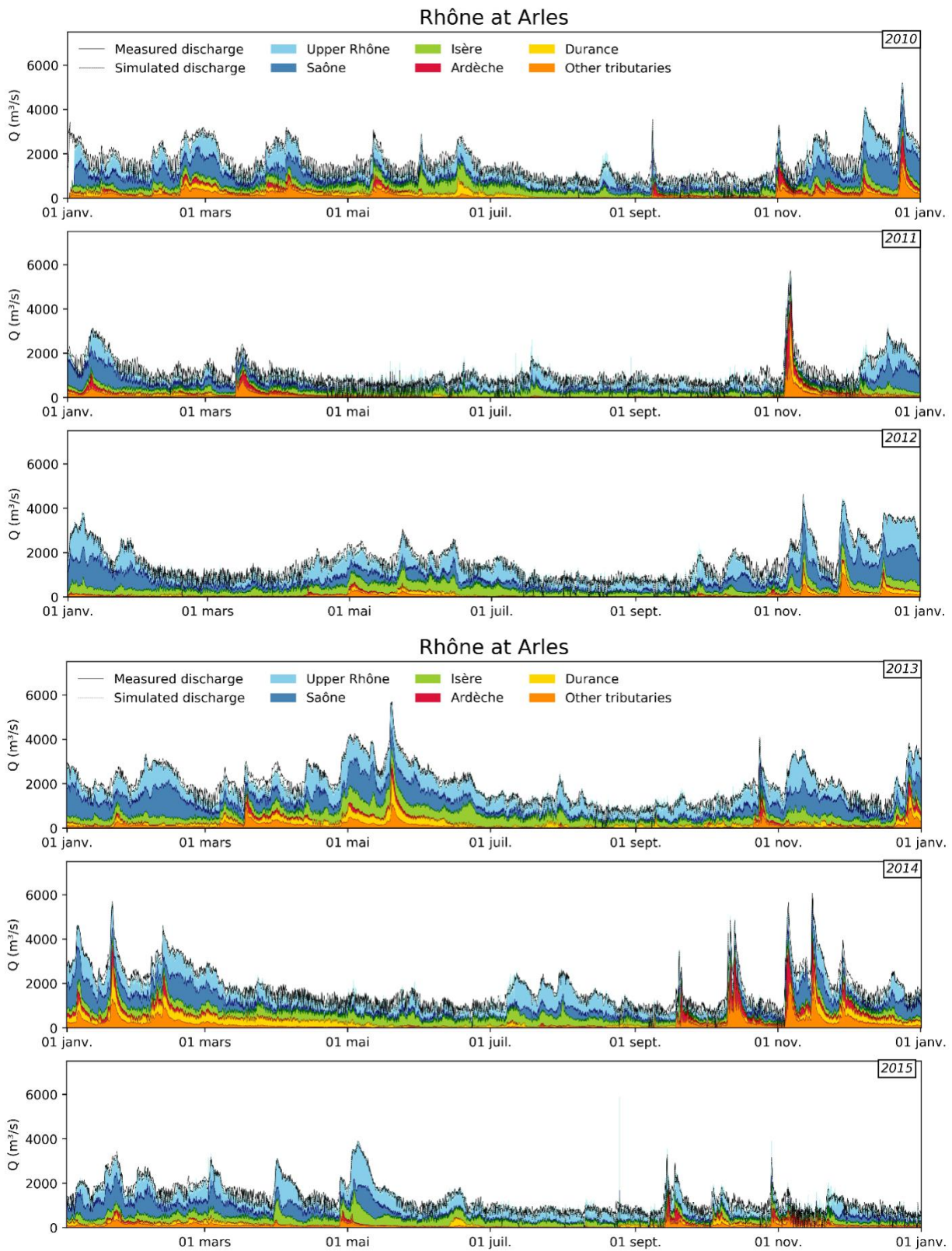
### 5.1 Annexe 1

Comparaison des débits mesurés et calculés par Mage 1D aux stations de Ternay, Valence, Viviers et Beaucaire entre 2010 et 2018.

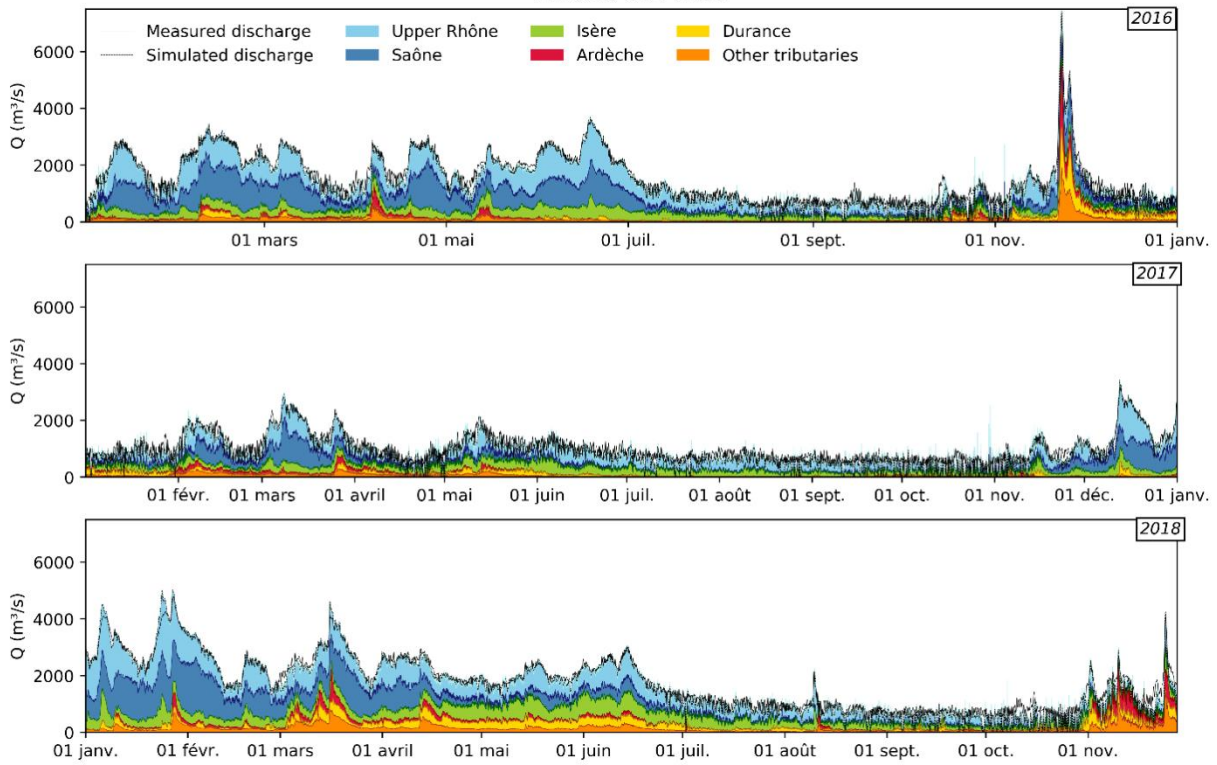


## 5.2. Annexe 2

### Décomposition des hydrogrammes à Arles entre 2010 et 2018



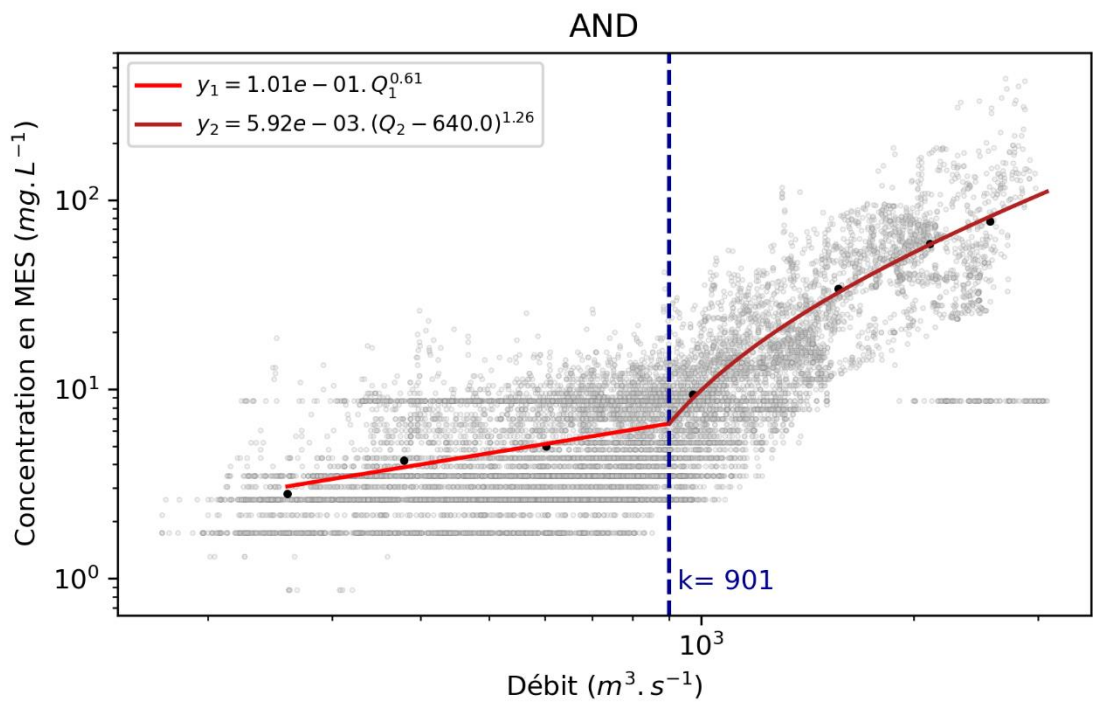
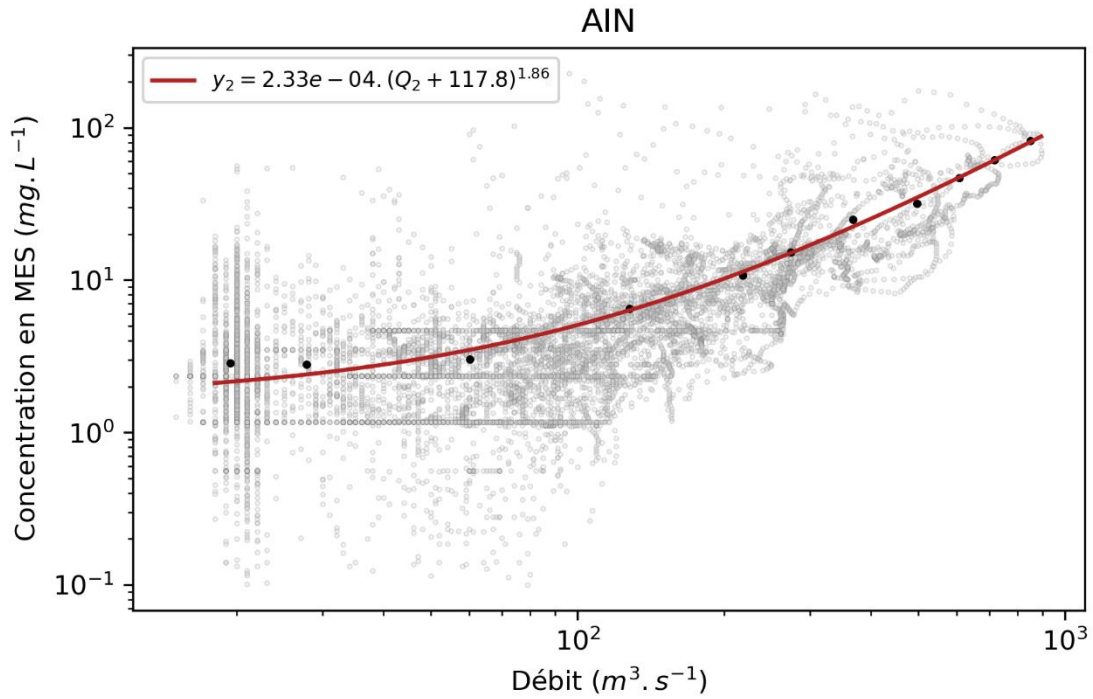
### Rhône at Arles

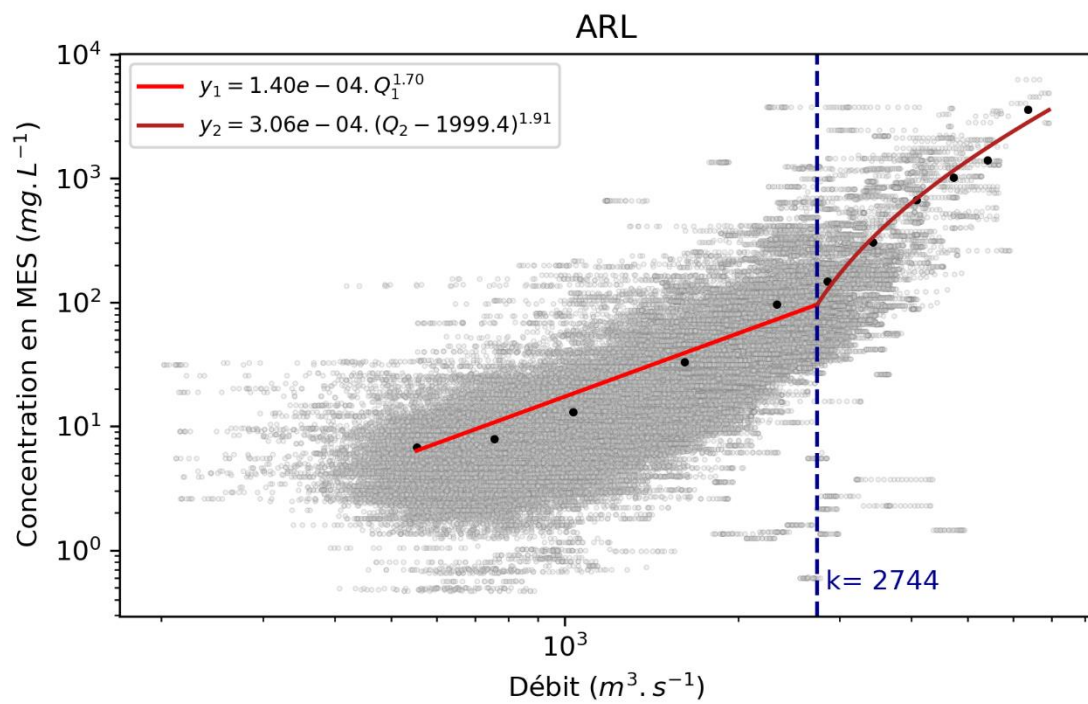
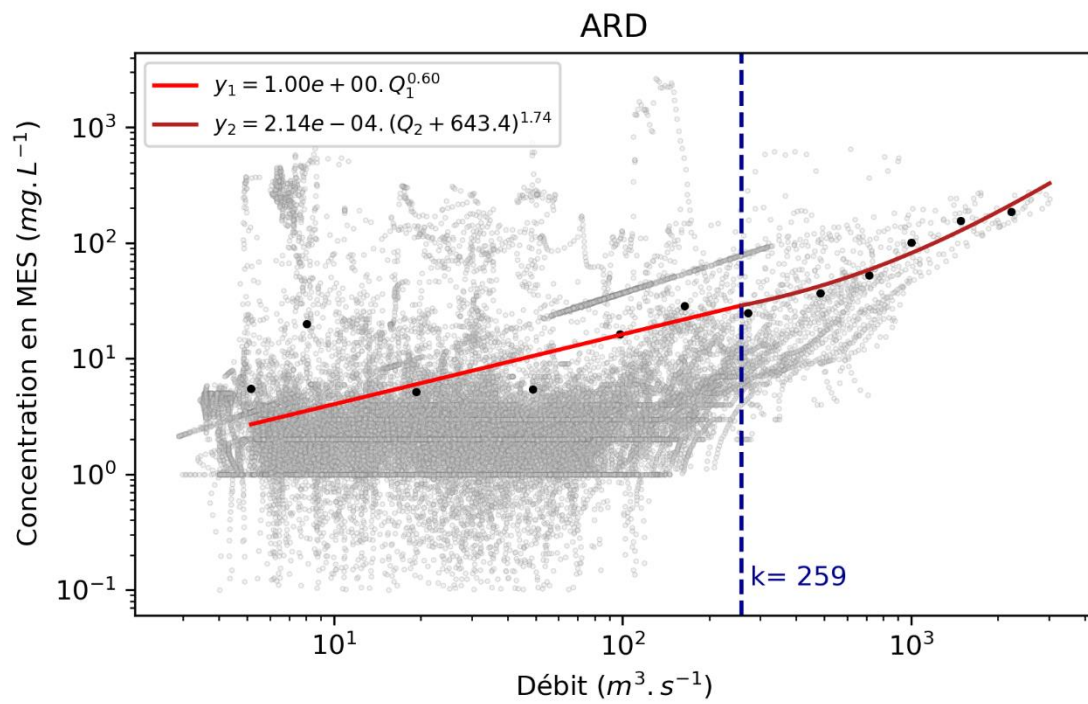


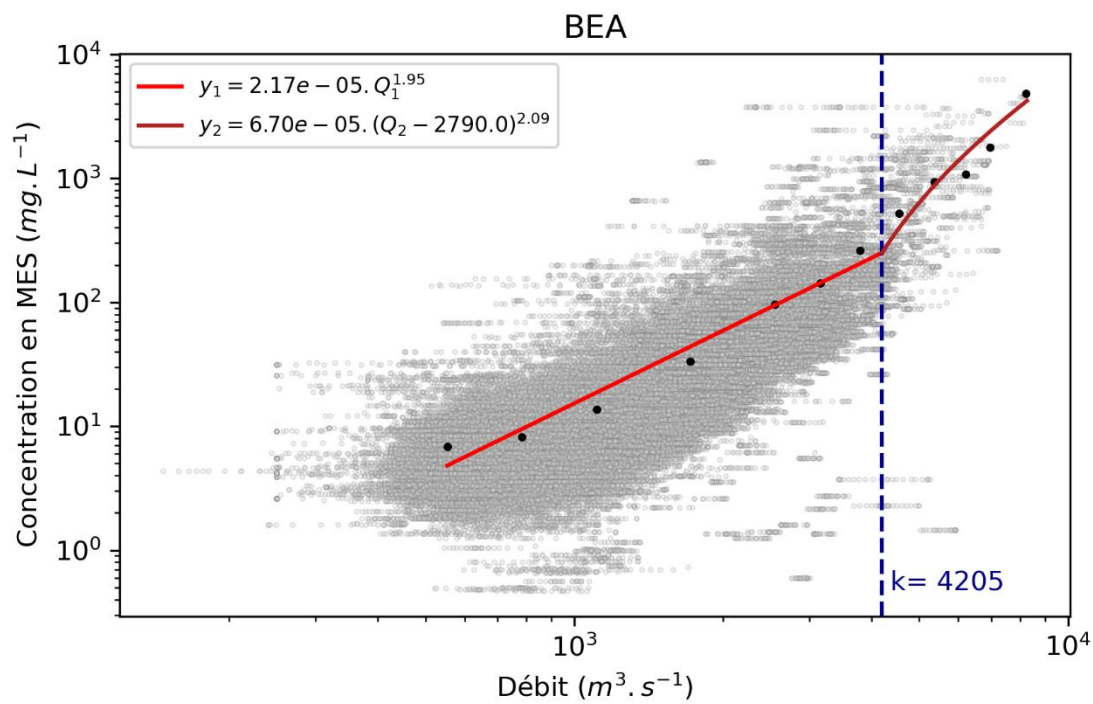
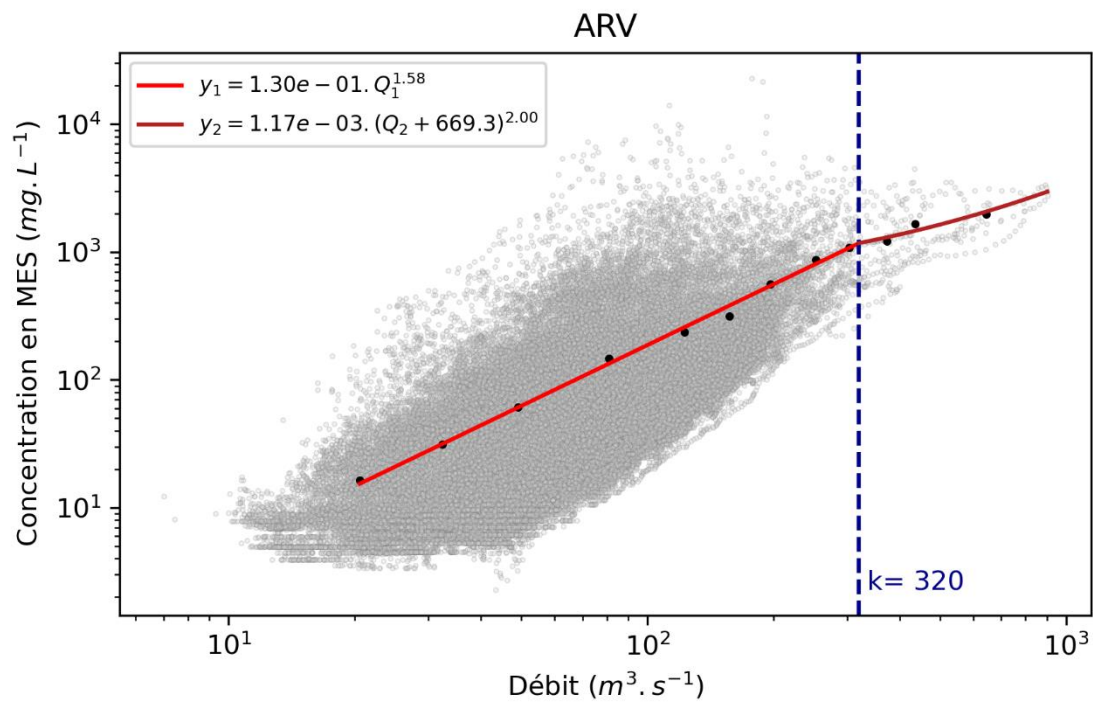


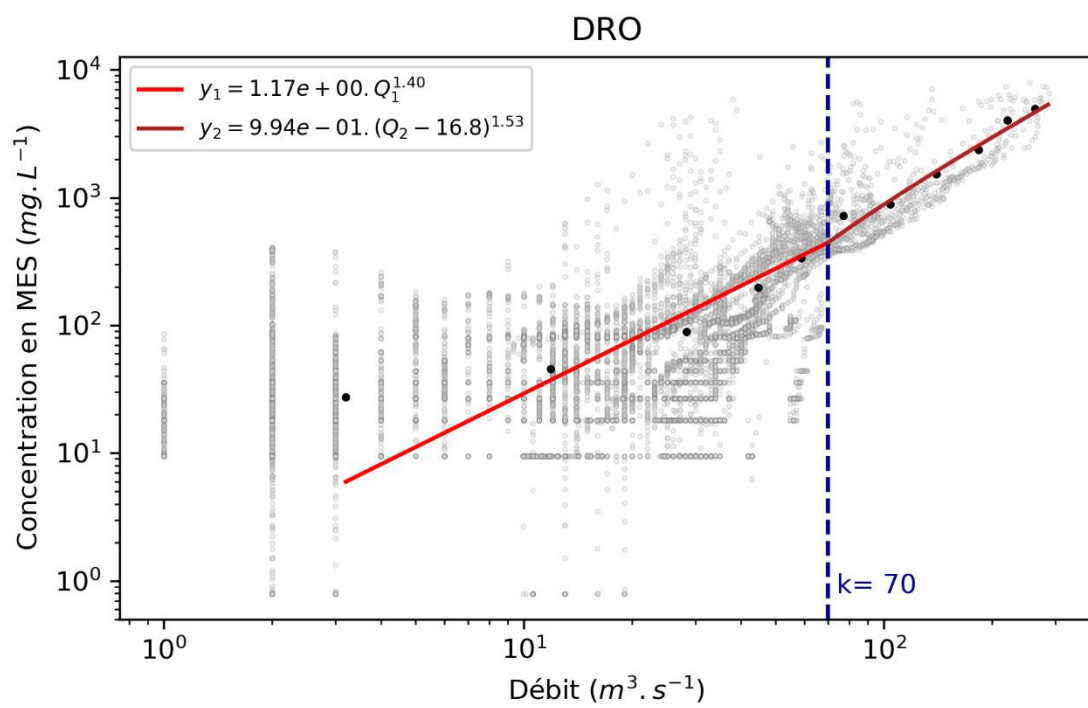
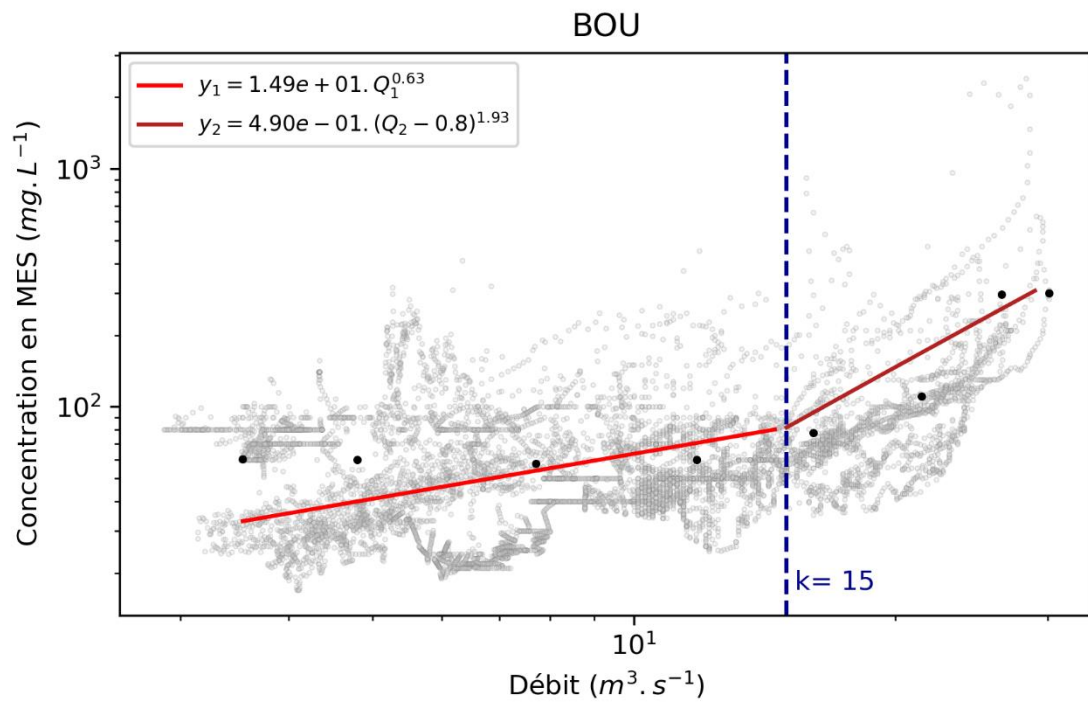
### 5.3. Annexe 3

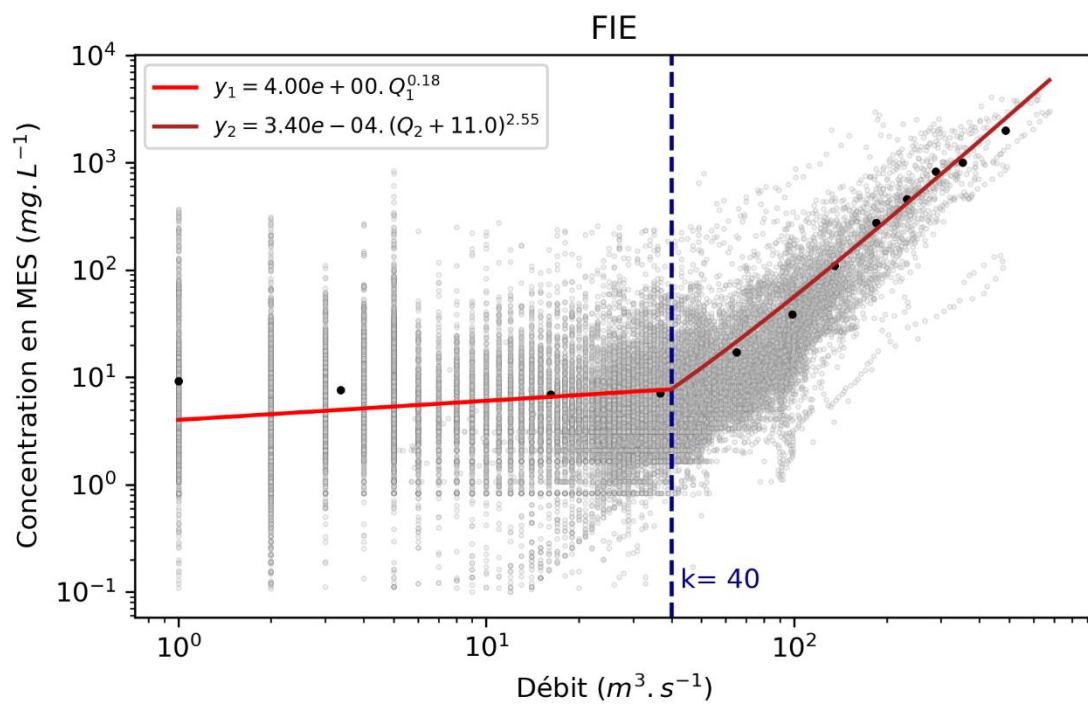
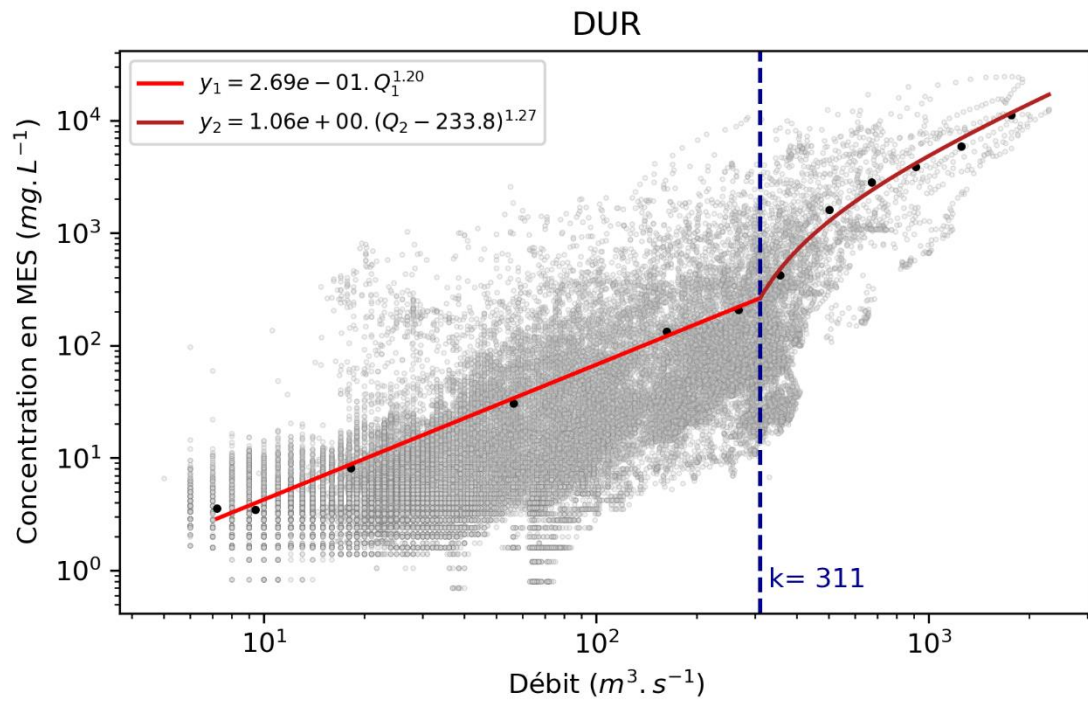
Relations entre le débit et les concentrations en MES pour les stations affluents du Rhône et quelques stations du Rhône.

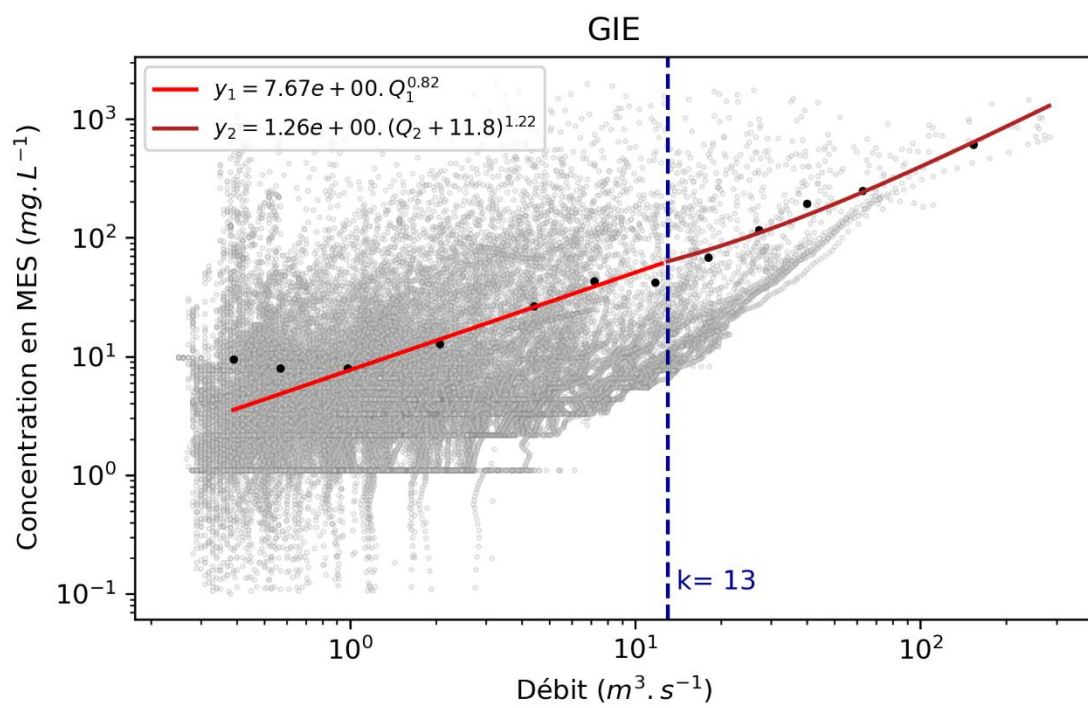
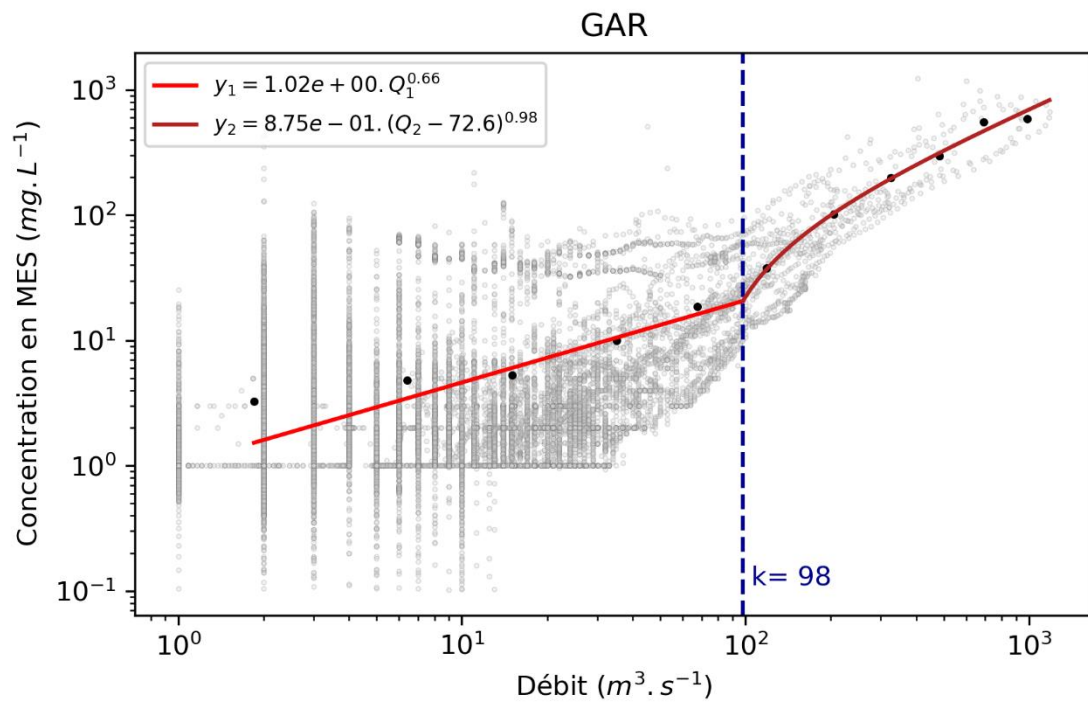


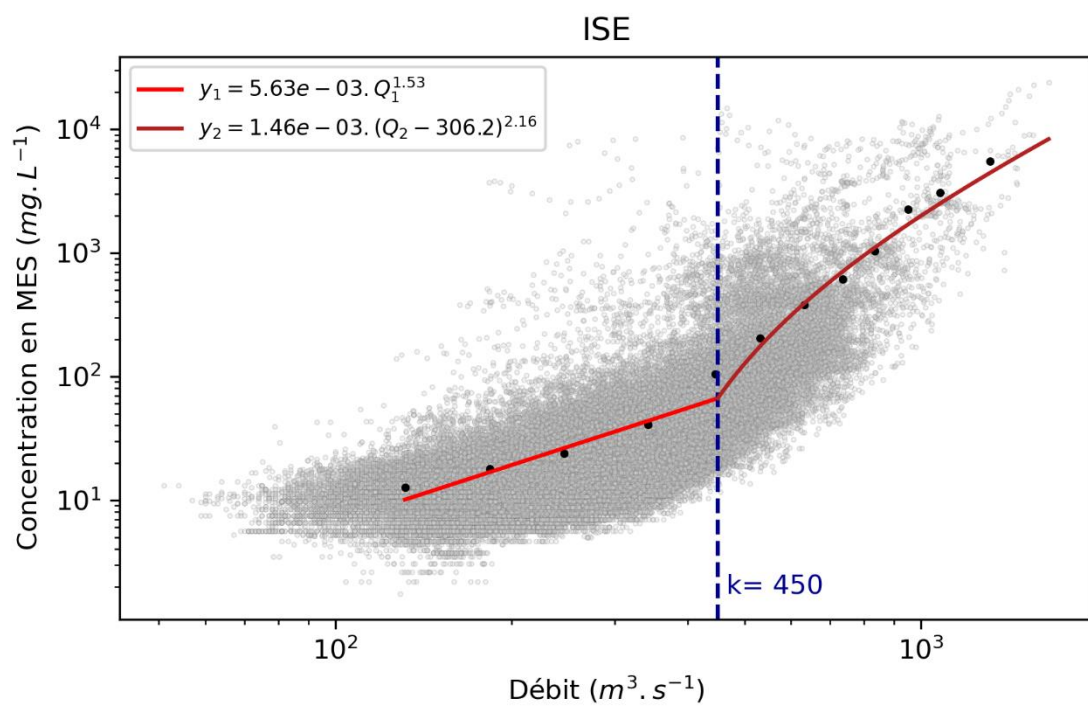
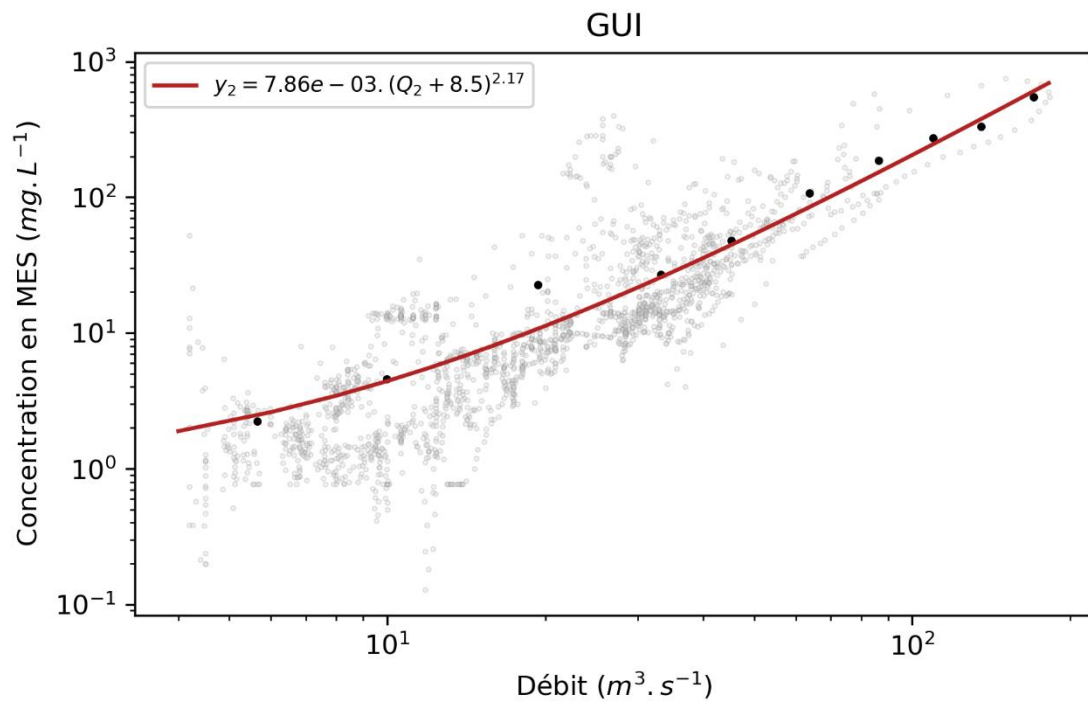


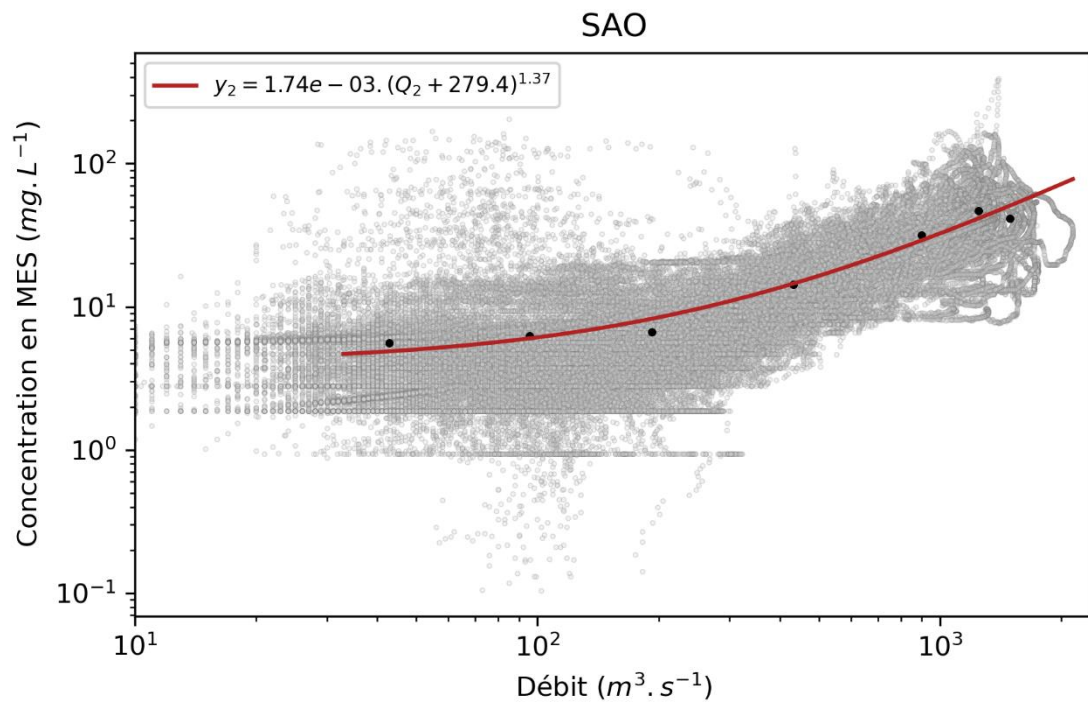
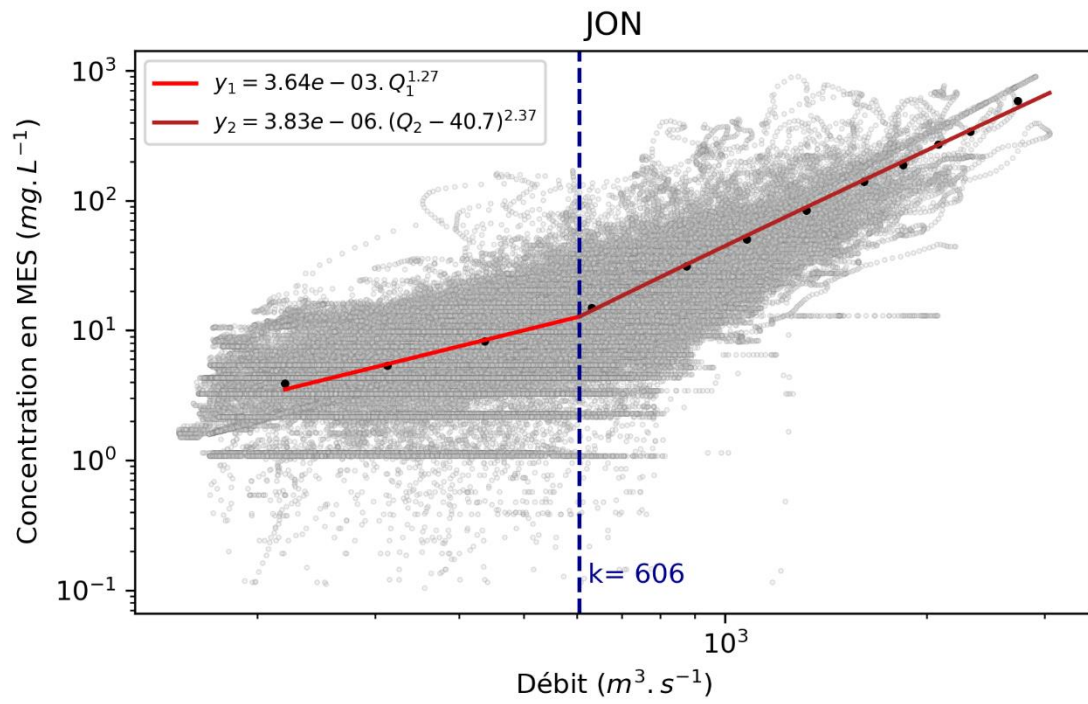














## 5.4. Annexe 4

### Minutes Réunion OSR modélisation

7 février 2019

Irstea - Lyon

Présents IRSN : *O.Radakovitch, C. Duffa, P.Boyer, A. Delaval*

Présents IRSTEA : *J. Le Coz, B. Camenen, JB. Faure, L. Troudet*

#### 1) Tour de table avec présentation de chacun

**OR** refait un point sur l'objectif de la réunion : échanges à faire entre les deux organismes sur les modèles qu'ils utilisent pour simuler le transfert d'eau et de Matières en Suspension dans le cadre de l'OSR. Cette réunion est prévue comme une tâche de l'action D1 de l'OSR 5.

**CD** décrit ce qu'est le modèle STERNE (IRSN). Il s'agit d'un modèle implémenté au centre de crise IRSN et qui vise à greffer un module simulant le devenir des radionucléides dissous en mer sur la base de sortie d'un autre modèle qui traite de l'hydrodynamique. Previmer avait été utilisé jusqu'ici mais il est arrêté et on s'est tourné vers le SHOM pour nous fournir les prochaines sorties hydro. Le SHOM utilise le modèle HYCOM (résolution de 1,7 km). Emprise du modèle : toute la méditerranée occidentale (résolution 1,7 km) avec des zooms à faire sur des zones sensibles (delta du Rhône, rade de Toulon).

**AD** : décrit son sujet de thèse (modélisation du transfert de radionucléides dans un continuum bassin versant-mer) et le besoin de prendre en compte la désorption à l'embouchure. Les sorties de CASTEAUR seront à prendre en considération dans Sterne.

**JB** : développeur des modèles Mage et Adis-TS. Mage : Réseau ramifié, grands domaines, ouvrages éventuellement mobiles/réglables. Adis et Adis-TS (version sédimentaire) récupèrent les lignes d'eau calculées par Mage et font respectivement du transport de polluant et de sédiments. L'implémentation du charriage et de l'évolution des fonds dans Adis-TS est en cours. Maintenant il y a des couplages entre Adis-TS et Mage : Adis-TS modifie le lit de la rivière par dépôt-érosion et relance les calculs de Mage. Objectif : simulation sur grand domaine et longue durée (typiquement : le Rhône pendant 100 ans).

Il existe une application en temps réel (modèle Rosaly) faite par Burgeap pour les champs captants de l'agglomération lyonnaise opérés par Veolia pour le compte de la Métropole de Lyon. Ce bureau d'étude utilise ce modèle pour simuler le Rhône entre le lac Léman et Lyon et couple ceci avec la nappe de Miribel Jonage. Rosaly est dédié à la prévision de la distribution d'un polluant dissous ou particulaire. Il y a un accord entre Burgeap et Irstea et ils s'échangent les infos lorsqu'ils arrivent à avancer sur des paramètres.

Adis-TS (OSR) est développé en open source, la version de Mage développée actuellement est aussi open source dans le cadre d'un projet ANR. Il y a aussi une interface graphique open source (Pamhyr).

**LT** : nouvelle en CDD sur les missions Irstea de l'action D1. Elle a travaillé sur la modélisation continue pluri-annuelle : 2010 à 2018.

**BC** : travaille sur le charriage, la suspension, la mise en place et le développement d'Adis-TS avec André Paquier (charriage et évolution des fonds, en s'inspirant des options du modèle 1D Rubarbe d'Irstea). Ces processus seront implémentés dans Adis-TS et le modèle du Rhône dans le cadre de l'OSR.

## 2) Présentation du modèle CASTEAUR (P. Boyer)

Outil pour la crise, très simple et robuste, utilisable sur tous les cours d'eau. Ce qui est recherché en priorité c'est la propagation des débits avec l'hypothèse que le bon mélange est vérifié. Les rejets diffus peuvent être pris en compte (apports BV, dépôt d'origine atmosphérique...), et il contient un modèle sédimentaire et un modèle de chaîne trophique. Les biefs sont à section trapézoïdale sans débordement ni casier et l'hydraulique est modélisée à chaque instant en régime quasi-permanent : successions d'états stationnaires.

Il contient un modèle sédimentaire à 3 couches : une interface peu cohésive qui est à l'équilibre avec la colonne d'eau. Au-dessous il y a une couche active cohésive qui continue de diffuser vers la colonne d'eau (zone oxygène), et au-dessous une couche passive, que seule l'érosion peut remobiliser.

Le taux d'érosion reste empirique et doit être calibré à partir de relations charge-débit, et il n'y a pas de modification de la géométrie du lit.

*Question de BC sur le fait que la représentation des couches ne se retrouve vraiment que dans les barrages. Expérience d'Adis-TS : les lits mineurs et moyens sont séparés, les échanges sont seulement sur le lit moyen (pas le lit mineur).*

Le stock de sédiment change mais pas la géométrie. Echelle de temps recherchée : de l'heure, au jour, voire jusqu'à 50 ans.

La partie sédiment est éliminée pour une simulation en situation de crise. En crise la démarche est en effet très conservatrice pour aller en premier chercher des valeurs seuils.

Le Kd est variable en fonction de la granulométrie des classes de particules considérées.

L'outil est repris pour travailler sur des réseaux géographiques géoréférencés pour pouvoir mieux prendre en compte les dépôts atmosphériques en cas d'accident (CASTEAURx). Il ne contient pas de modèles hydrologiques de BV.

Intérêt du modèle : on peut faire des statistiques.

Dans Adis-TS le polluant solide est fixé sur un certain type de particules (granulo). Discussion sur le besoin ou pas d'intégrer un Kd dans Adis. Irstea gère avec des particules de même taille qui peuvent avoir différents teneurs, alors que Casteaur à une concentration par taille granulométrique.

### **Présentation Thèse Adrien Delaval : hydrogrammes du Rhône.**

Essai de CASTEAUR sur quelques années hydrologiques. 38 biefs sur le Rhône de Bugey jusqu'à la confluence. Les apports des affluents ont été rentrés avec les chroniques de BDOH pour l'essentiel, sur l'année 2015. Les relations données-sortie modèle sont bonnes à Lyon et Valence mais pas à Arles où des écarts parfois de deux jours apparaissent sur les montées de crue. Ce point devrait être amélioré avec CASTEAURx qui permettra d'intégrer les différentes branches du Rhône et les barrages.

Irstea confirme que cela pourrait être dû aux éclusées. En crue, les barrages sont ouverts sur les tronçons court-circuités et la propagation est ralentie (créant ainsi un décalage entre la réalité et le modèle). Le fait que l'on n'ait pas ce décalage avant Arles est peut-être dû au fait qu'en amont la propagation moyenne dans les deux branches du Rhône (vieux Rhône et Rhône court-circuité) doit être proche de la propagation combinée, les canaux et Vieux-Rhône n'ayant pas des différences de longueur aussi fortes que sur les aménagements de l'aval du Rhône.

Problème avec les ouvrages, la répartition de débit à l'amont dépend de la sortie.

**PB** : il faut modifier le modèle pour prendre en compte un réseau hydrographique et mieux modéliser les lignes d'eau, notamment en tenant compte des hauteurs d'eau imposées à l'aval.

**JBF** : pourquoi on ne couplerait pas directement avec Mage ? Le modèle construit avec Mage contient tous les 21 aménagements du Rhône avec les règles des barrages.

**PB** : on est en train de finir la partie réseau et la partie hydro simplifiée. A l'issue je serais intéressé pour coupler avec le modèle existant avec Mage.

**JBF** dit que l'IRSN peut effectivement intégrer Mage, d'autant plus que cet organisme a acheté la licence, et que Mage est maintenant gratuit et bientôt open-source. La question est de savoir si on fait tourner Mage en parallèle ou si on récupère ses sorties. On peut aussi utiliser Mage en spécifiant les tronçons sous des formes simplifiées (rectangulaire, trapézoïdale...), ce qui serait très pratique et proche de l'approche CASTEAUR.

**Proposition de PB** : on commence par faire un couplage simple Mage-CASTEAURx, et pour ceci je vais récupérer des fichiers de Mage pour tester la faisabilité de leur lecture par CASTEAUR.

**JBF** : je peux fournir des routines de lecture qui permettent d'aller plus vite.

Coefficient de dispersion = relation empirique, Irstea privilégie la formule d'Iwasa et Aya après essai de traçage à la rhodamine sur le Rhône à Lyon (Launay et al., 2015, JHER).

PB dit qu'il serait bien d'avoir les données on-line des débits. Il propose que l'on pourrait aussi avoir un modèle qui tourne en permanence et en temps-réel, ce qui serait l'idéal pour la crise. IRSTEA est aussi intéressé pour contribuer à cela, même si une telle application opérationnelle va au-delà de leurs missions de recherche.

### 3) Présentation de ADIS, modèle 1D hydrosédimentaire (L. Troudet)

Le modèle est décomposé entre bas et haut Rhône. Le barrage de Génissiat est encore à intégrer (en hydraulique c'est OK mais en sédiment c'est pas encore bon, trop de variabilité possible en MES sur les 60m de profondeur de la retenue).

Modèle lancé de Lyon à la Méditerranée. Une cote imposée à Petite Abbaye et Grand Boisviel en Camargue, où il y a des limnigraphes CNR.

Les ouvrages ont tous des fonctionnements inclus avec deux types de lois automatiques, ou paramétrage avec enregistrements temporel des niveaux aux points de réglage des aménagements.

Se reporter à son ppt si besoin.

### 4) Perspectives-axes de collaborations

- Réflexion sur couplage simplifié Mage-CASTEAUR sur le Rhône à mettre en route (**Boyer, Faure, Troudet doivent en discuter**)

- faire une comparaison CASTEAURx-Mage-Adis pour évaluer l'impact des simplifications

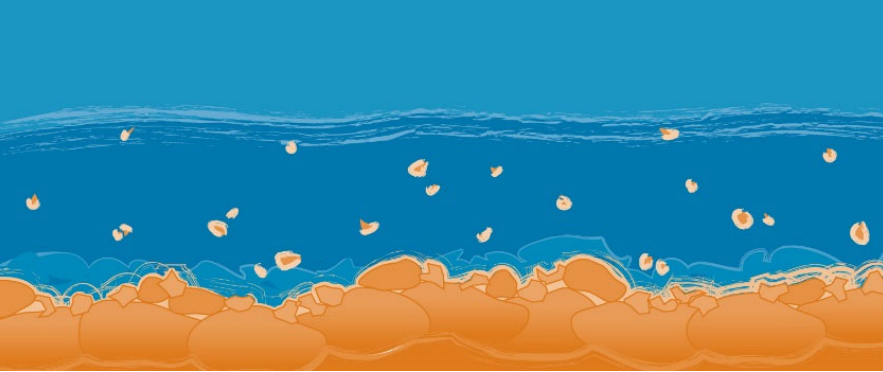
- Avoir une réflexion sur la gestion des concentrations en contaminants chimiques (Kd simple ?), à calculer en post-traitement de l'hydraulique ?

- Réunion OSR plus générale à faire avec Ifremer (Verney, Fusch, Pairaud), CNR (S. Reynaud) et EDF (Kamal El Kadi, Magali Jodeau) et autres, de la même manière que l'atelier OSR de 2016. **©érôme lancera un doodle.**

- Plus urgent : projet agence à déposer par Irstea, et/ou à la zabr. Irstea doit donner des idées à l'agence pour début mars dans le cadre de son accord cadre. Ils veulent coupler leur modèle distribué du Rhône avec le modèle hydraulique du Rhône et le modèle Ifremer du Golfe du Lion. PB : cela rentre pile poil avec le projet que l'on a pour le centre de crise.

- Projet d'une application du modèle qui tourne en temps réel : idée à faire circuler entre nous et qui mérite réflexion et association avec partenaires opérationnels (cf. gestion de crise, Dreal de bassin).

- Projet d'une ANR Continuum : modélisation numérique intégrée du continuum BV-GOL. Intéressés potentiels: IRSTEA, LMFA/INSA, IFREMER, IRSN, IGE, CNR, EDF ?



# Observatoire des Sédiments du Rhône

Plan  
Rhône  
Saône

RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE  
Liberté  
Égalité  
Fraternité

agence  
de l'eau  
RHÔNE MÉDITERRANÉE  
CORSE  
établissement public de l'État

AVEC LE SOUTIEN DE L'UNION EUROPÉENNE

L'EUROPE S'ENGAGE  
pour le Rhône  
et la Saône  
avec le FEDER

UNION EUROPÉENNE

CAR

EDF

La Région  
Occitanie  
Pyrénées - Méditerranée

RÉGION  
SUD  
PROVENCE  
ALPES  
CÔTE D'AZUR

La Région  
Auvergne-Rhône-Alpes

cnrs

EVS  
Environnement  
Vie Société

cerege  
CENTRE EUROPÉEN  
DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT  
DES GÉOCHIMIES DE L'ENVIRONNEMENT

INRAE

ENTPE  
L'école de l'aménagement durable des territoires

IRSN  
INSTITUT  
DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Ifremer

mio  
Mediterranean Institute  
of Oceanography

ZA  
Zone  
Atelier  
LTER FRANCE BASSIN DU RHÔNE

Ohm  
Observatoire Hommes-milieu - Vallée du Rhône

LabEx  
DRIHM

cnrs

INVESTISSEMENTS  
D'AVENIR

Observatoire des Sédiments du Rhône

GRAIE – OHM Vallée du Rhône

66 bd Niels Bohr – CS 52132

69603 Villeurbanne Cedex

[www.graie.org/osr/](http://www.graie.org/osr/)

Contact :

[bertrand.morandi@graie.org](mailto:bertrand.morandi@graie.org)