



HAL
open science

Etude des transferts de sédiments fins dans le système Rhône: L'île du Beurre

B. Camenen, E. Andries, J.B. Faure, M. de Linares, F. Gandilhon, G. Raccasi

► **To cite this version:**

B. Camenen, E. Andries, J.B. Faure, M. de Linares, F. Gandilhon, et al.. Etude des transferts de sédiments fins dans le système Rhône: L'île du Beurre. [Rapport de recherche] irstea. 2012, pp.39. hal-02597877

HAL Id: hal-02597877

<https://hal.inrae.fr/hal-02597877v1>

Submitted on 15 May 2020

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.



Etude des transferts de sédiments fins dans le système Rhône

L'île du Beurre

B. Camenen, E. Andries, J.-B. Faure (Irstea)
M. de Linares, F. Gandilhon (Artelia Eau & Environnement)
G. Raccasi (Cerege)



Table des matières

1	Présentation du site.....	3
1.1	Localisation.....	3
1.2	Données expérimentales.....	3
1.3	Morphodynamique de l'île du Beurre.....	4
1.3.1	Localisation et qualité des mesures.....	4
1.3.2	Evolutions bathymétriques de la lône du Beurre.....	5
1.4	Caractérisation sédimentaire de l'île du Beurre.....	7
1.5	Hydrologie.....	10
1.6	Concentration en MES.....	11
1.6.1	Mesures disponibles à proximité du site.....	11
1.6.2	Estimation de la concentration à Ternay.....	12
1.6.3	Quantification des flux.....	14
1.6.4	Estimation de la granulométrie des MES.....	16
2	Construction du modèle 1D.....	18
2.1	Géométrie.....	18
2.2	Calage hydraulique du modèle.....	19
2.3	Paramétrisation du modèle sédimentaire.....	20
2.3.1	Caractéristiques sédimentaires.....	20
2.3.2	Coefficients pour la loi de dépôt érosion.....	21
2.3.3	Coefficient de dispersion.....	21
2.3.4	Conditions aux limites et Conditions initiales.....	22
3	Construction du modèle 3D.....	23
3.1	Géométrie.....	23
3.2	Calage hydraulique du modèle.....	24
3.3	Calage du modèle sédimentaire.....	25
4	Analyse de la dynamique sédimentaire de l'île du Beurre.....	27
4.1	Estimation des flux entrants dans les lônes.....	27
4.1.1	Estimation des débits liquides entrants dans les lônes.....	27
4.1.2	Estimation des flux solides entrants dans les lônes.....	28
4.2	Calculs des contraintes dans les lônes.....	30
4.3	Scénario test commun aux modèles 1D et 3D.....	31
4.3.1	Topographie et conditions aux limites.....	31
4.3.2	Résultats du calcul de référence.....	32
4.4	Scénario sur la chronique de débit de 2002 à 2009.....	35
5	Conclusion.....	38
6	Bibliographie.....	39

1 Présentation du site

1.1 Localisation

L'île du Beurre, se trouve à proximité de la ville de Condrieu, à 10 km au sud de Vienne. A ce niveau, le Rhône, d'une largeur moyenne de 200 m, présente deux bras secondaires en rive droite appelés lônes. Ces voies d'eau secondaires délimitent deux îlots : l'île du Beurre et l'île de la Chèvre (Fig. 1). On distingue la grande lône (ou lône de la Chèvre) qui s'étend sur près de 2700 m le long du chenal principal et la petite lône (ou lône du Beurre), qui évolue transversalement au Rhône sur 350 m. Les deux lônes entrent en confluence aux alentours du point kilométrique (PK) 2040 en partant de la limite amont de la grande lône.

C'est un site suivi par le Centre d'Observation de la nature de l'île du Beurre, où de nombreux relevés sont effectués pour connaître la quantité de dépôt ainsi que la composition : plusieurs carottages ont été effectués sur la zone. L'intérêt de cette zone d'étude est donc de recouper les informations entre plusieurs axes du projet Axelera, entre les analyses des carottes et l'étude sédimentaire. Ce travail a ainsi été réalisé en collaboration avec le Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre.

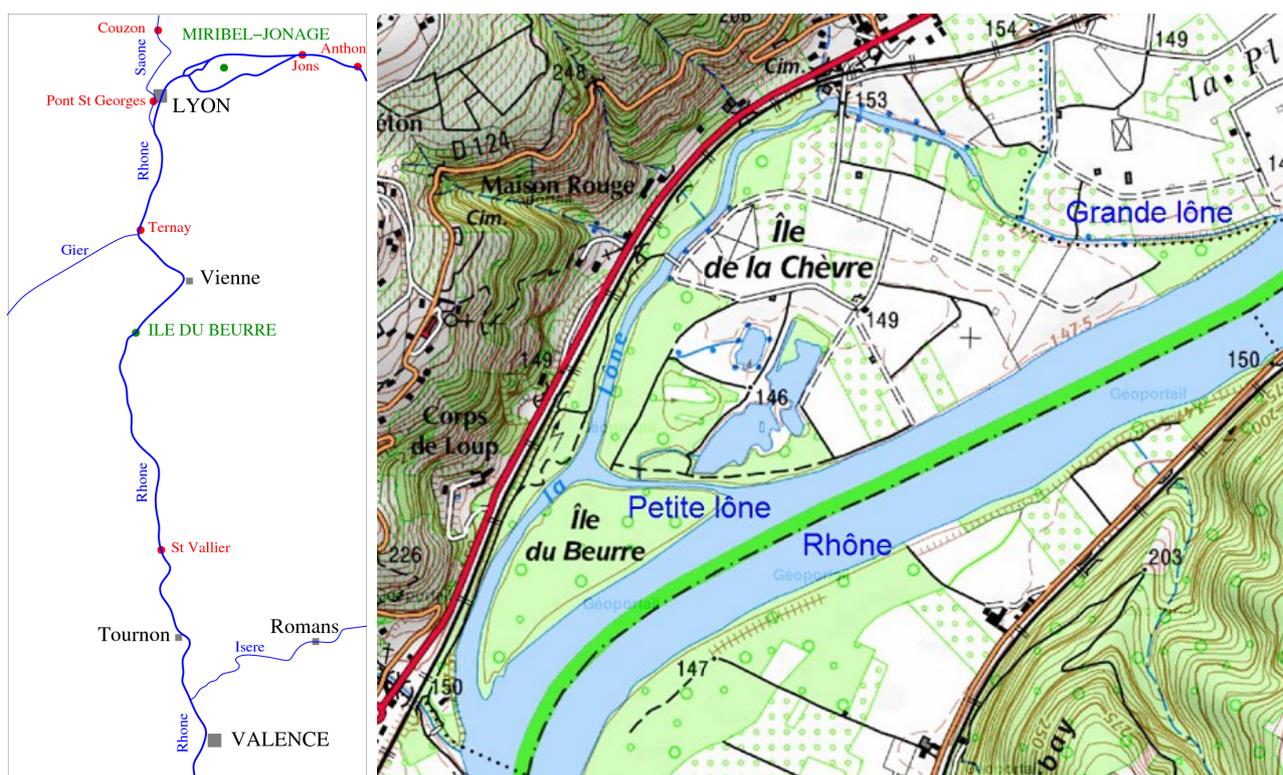


Figure 1: Plan de situation de la lône du Beurre et des stations de mesures hydro-sédimentaire.

1.2 Données expérimentales

Les données bathymétriques proviennent de relevés en travers des lônes effectués par le Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre. Les profils sont relevés à des intervalles d'environ une année, depuis 2002.

Les données disponibles sont :

- la bathymétrie « annuelle » de 2002 à 2009 sur les profils de la petite lône ;

- la bathymétrie des profils amont de la grande lône en 2002, 2004 et 2005 ;
- la bathymétrie des profils aval de la grande lône en 2003, 2004 et 2005 ;
- la bathymétrie des profils sur tout le linéaire de la grande lône en 2009.

En ce qui concerne les données granulométriques, on dispose d'une première série d'échantillons des fonds relevés par les gestionnaires de l'île du Beurre en 2009 et analysés par tamisage ainsi que d'une seconde campagne de mesures menée en mai 2011 par le CEREGE et examinée par granulométrie laser.

1.3 Morphodynamique de l'île du Beurre

1.3.1 Localisation et qualité des mesures

Afin de caractériser les processus sédimentaires propres aux lônes de l'île du Beurre, on s'intéresse dans un premier temps à l'évolution de leurs fonds. Les profils ont été relevés manuellement au niveau de points de repère à l'aide d'un niveau de terrain et d'une sonde. Les points de repère sont matérialisés en rive droite des lônes et localisés à l'aide d'un GPS. La précision de la localisation est estimée à ± 5 m du fait d'un milieu luxuriant. La profondeur est mesurée par rapport à l'altitude du plan d'eau, relevée sur des échelles limnimétriques en chaque point kilométrique (PK) du Rhône. On estime l'erreur spatiale de localisation du profil d'une année sur l'autre à 30 cm, et l'erreur de mesure de la hauteur à 8 cm. La localisation des mesures est illustrée par la figure 2.

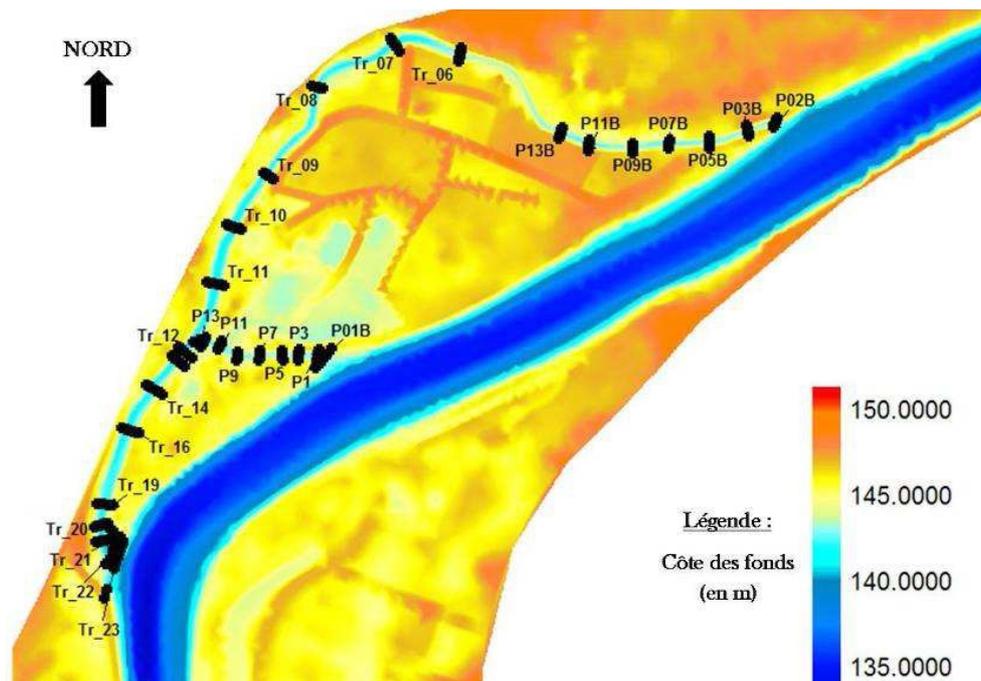


Figure 2: Localisation des profils bathymétriques sur le site de l'île du Beurre.

On appelle la lône de la Chèvre la lône principale qui s'étend du profil P02B au profil Tr_23. La lône du Beurre correspond à la portion qui se développe entre les profils P01B et P13. Les profils de la lône du Beurre ont été échantillonnés annuellement sur l'ensemble de la période 2002-2009. En ce qui concerne la lône de la Chèvre, on dispose de mesures sur une dizaine de profils répartis sur le linéaire du cours d'eau. L'échantillonnage annuel de ces profils est incomplet, en particulier il n'existe pas de données pour les années 2006 et 2007. Les périodes espaçant deux relevés successifs des fonds sont variables et sont approximativement de l'ordre de grandeur d'une année.

1.3.2 Evolutions bathymétriques de la lône du Beurre

Du fait de la disparité temporelle et spatiale des mesures, la morphodynamique de trois zones particulières seulement a pu être étudiée :

- la lône du Beurre amont (transects P01B à P13) ;
- la lône de la Chèvre amont (transects P02B à P13B) ;
- la lône commune aval ((transects TR12 à TR22) .

Les figures 3, 4 et 5 montrent les évolutions de ces trois zones en fonction du temps. Sur les figures 3a, 4a et 5a sont représentées les valeurs du fond du lit moyennes sur chacun des transects. Pour cela, une largeur active a été définie sur chacun de ces transects. Une légère incertitude sur le niveau moyen peut donc provenir du fait que les berges ont été plus ou moins intégrées dans cette bande active. Sur les figures 3b, 4b et 5b sont représentées les variations annuelles des volumes de sédiment sur chacune de ces zones. Ces volumes sont calculés selon l'équation suivante :

$$V = \frac{1}{(T_j - T_{j-1})} \sum (z_{m,i,j} - z_{m,i,j-1}) L_i \Delta x_i \quad (1)$$

où T_j est l'année de mesure, $z_{m,i,j}$ la cote du fond moyenne du transect i l'année j , L_i la largeur de la bande active du transect i , et $\Delta x_i = (x_{i+1} - x_{i-1})/2$ distance longitudinale représentative d'un transect.

Sur la figure 3, on observe nettement que le tronçon de la lône du Beurre amont est en accrétion régulière même si la partie amont de ce tronçon tend légèrement à s'éroder depuis 2007. Globalement, le niveau moyen de la lône s'est élevé d'une cinquantaine de centimètres de 2002 à 2005, puis d'une vingtaine de centimètres de 2005 à 2009. La partie aval de la lône du Beurre semble très peu dynamique depuis 2006. Sur le graphique 3b, nous pouvons observer que l'accrétion était très élevée de 2002 à 2005, quasi nulle de 2005 à 2007, puis relativement faible de 2007 à 2009.

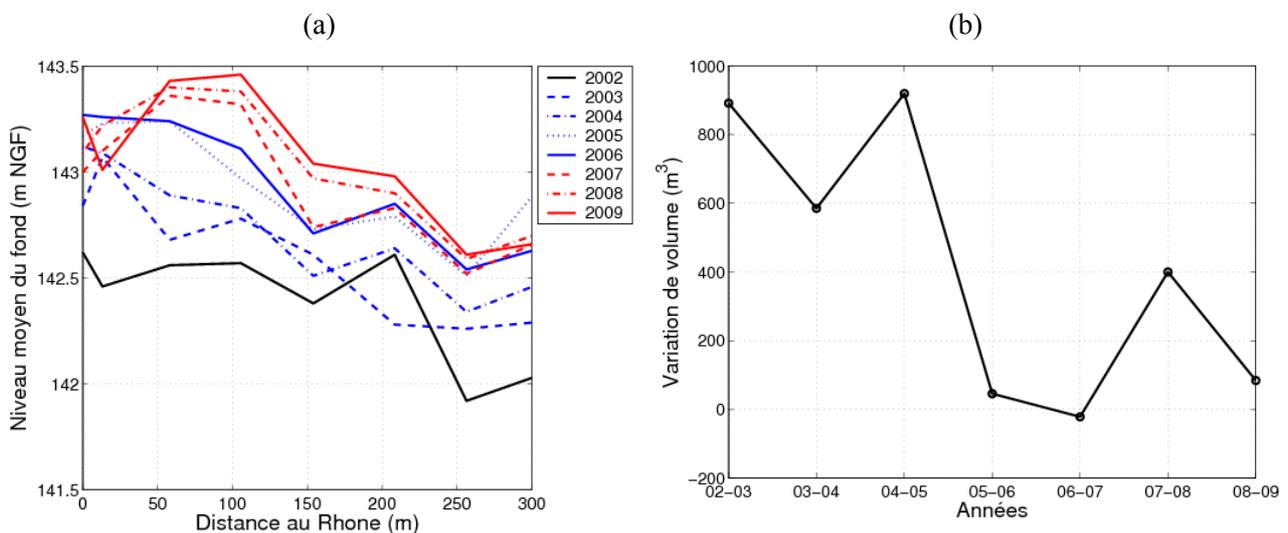


Figure 3: Evolution du niveau moyen du fond de la lône du Beurre amont (a) et variation annuelle des volumes (b).

On trouve des résultats similaires pour l'amont de la lône de la Chèvre (Fig. 4), même si la dynamique reste deux fois plus faible en volume. Cependant de 2004 à 2005, alors qu'une forte accrétion était observée pour la lône du Beurre, une érosion est observée pour la partie amont de la lône de la Chèvre.

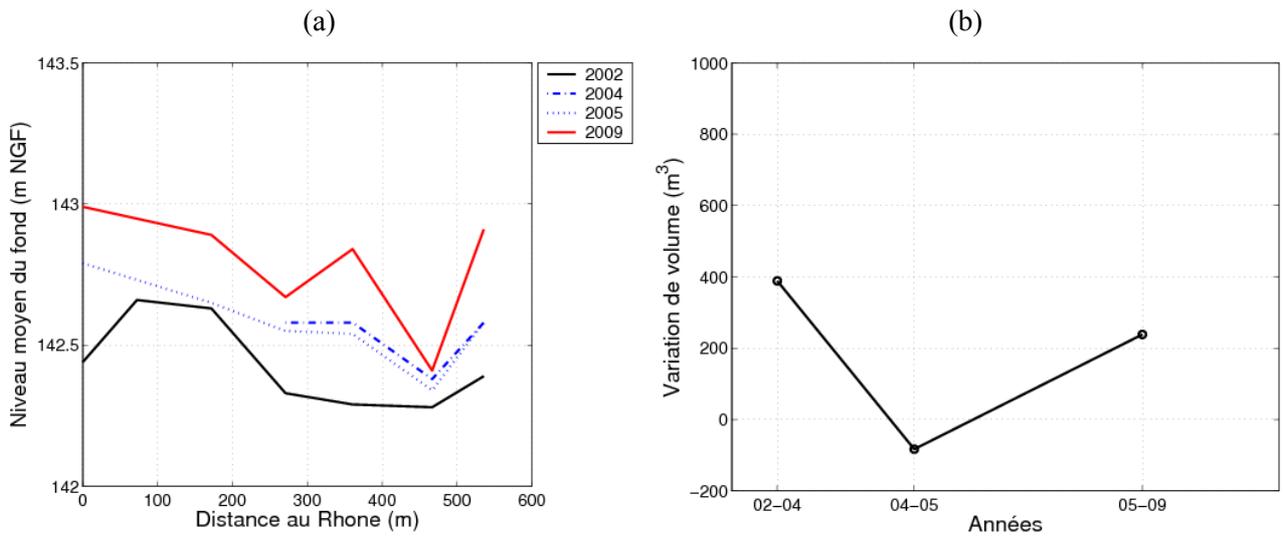


Figure 4: Evolution du niveau moyen du fond de la lône de la Chèvre amont (a) et variation annuelle des volumes (b).

Sur la lône commune (aval), une tendance à l'accrétion est aussi observée. Des réserves peuvent être émises sur le niveau moyen du transect TR20 (80 cm en dessous des autres transects) bien qu'il existe une cohérence d'année en année. Cela pourrait être dû au fait que la bande active de ce transect n'intercepte pas autant de berges que les autres transects. Si les évolutions du niveau moyen du fond sont généralement plus faibles que pour les lônes amont, les évolutions en volume sont aussi importantes que pour la lône du Beurre. Les variations annuelles des volumes indiquent un comportement relativement différent à celui des lônes amont (Fig. 5b). On observe en effet des variations maximales entre 2004 et 2008 au contraire des lônes amont. Cet accrétion plus tardive pourrait être attribuée à un transfert des lônes amont à la lône aval au cours des années 2004 à 2008 alors même que les apports en sédiments sont relativement plus faible depuis la crue de novembre 2002 (cf. paragraphes 1.5 et 4.1).

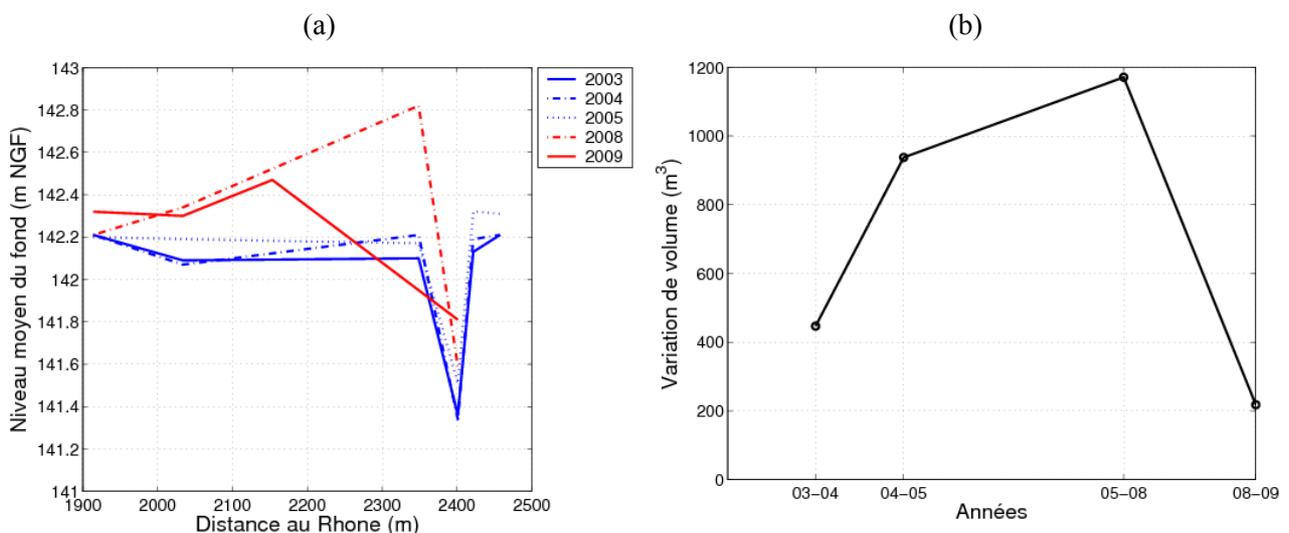


Figure 5: Evolution du niveau moyen du fond de la lône du Beurre amont (a) et variation annuelle des volumes (b).

1.4 Caractérisation sédimentaire de l'île du Beurre

On cherche à présent à préciser la nature des dépôts ayant sédimenté sur le linéaire des lônes de l'île du Beurre. Pour ce faire, on dispose de deux jeux de données granulométriques.

Une première série d'échantillons du fond a été réalisée par des prélèvements à la benne à sédiments puis analysée par tamisage en juillet 2009 par les gestionnaires de l'île du Beurre. L'ensemble des échantillons est préalablement traité chimiquement afin de supprimer la matière organique. Les sédiments ainsi nettoyés sont séchés, pesés puis passés dans une colonne de tamisage à la norme ISO 3310-2. Les masses de granulats retenus par chaque tamis, exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon, donnent les proportions respectives de chaque classe granulométrique.

En mai 2011, le Cerege a procédé à une seconde campagne de prélèvements traités par granulométrie laser. Dans le cadre de la campagne de mesures 2011, des échantillons du fond ont été prélevés à partir de la surface à l'aide d'une benne sur le linéaire des lônes au niveau des profils matérialisés sur la figure 6. Les relevés ont ensuite été analysés par granulométrie laser selon la norme AFNOR X11-667 : chaque échantillon est mis au four à 450°C afin d'éliminer la matière organique, puis on procède à 5 mesures laser (Beckman Coulter LS 230) successives sur le même échantillon et on détermine sa granulométrie en moyennant les résultats obtenus. Cette méthode permet de mesurer la taille des particules dont le diamètre n'excède pas 2 mm et se montre particulièrement adaptée pour caractériser des sédiments relativement fins. La technique laser donnera ainsi des mesures plus précises de la granulométrie du site d'étude que le tamisage, qui ne permet pas de qualifier la fraction de sédiments dont le diamètre est inférieur à 63 µm.

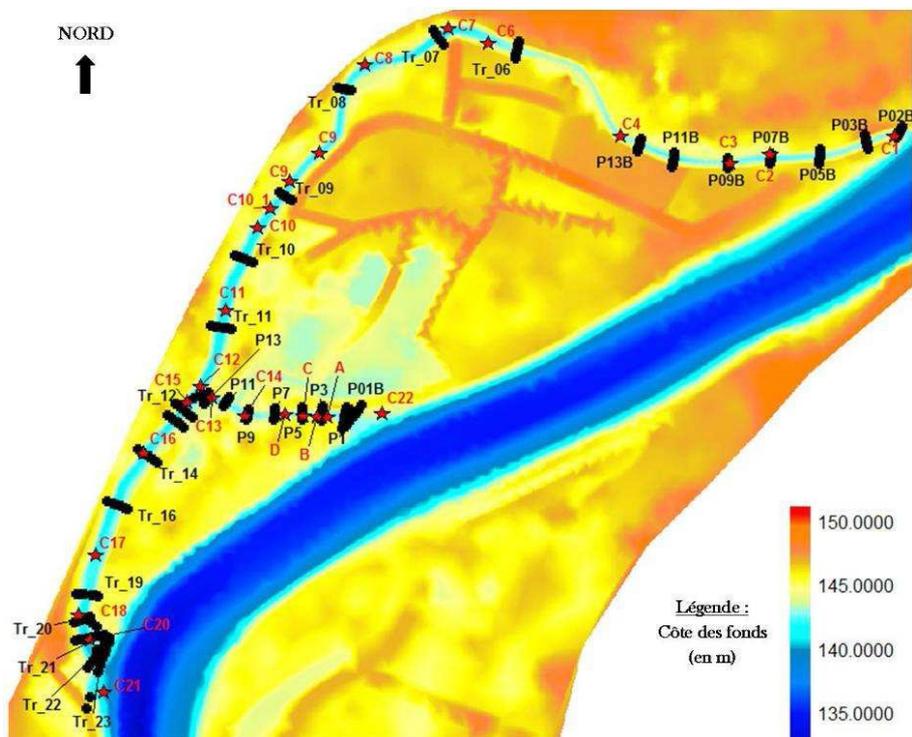


Figure 6: Localisation des mesures granulométriques sur le site de l'île du Beurre.

Les profils bathymétriques et les relevés granulométriques ne coïncident pas exactement. On se propose donc d'adjoindre au profil considéré la granulométrie la plus proche. Dès lors, on peut

évaluer les volumes respectifs de chaque classe de sédiments pour chaque profil et pour la totalité de chacune des lônes. On s'intéresse tout d'abord à l'évolution de la granulométrie sur le linéaire des lônes. On estime au niveau de chaque profil la proportion des différentes classes de sédiments sur les fonds des lônes en 2011 (Fig. 7).

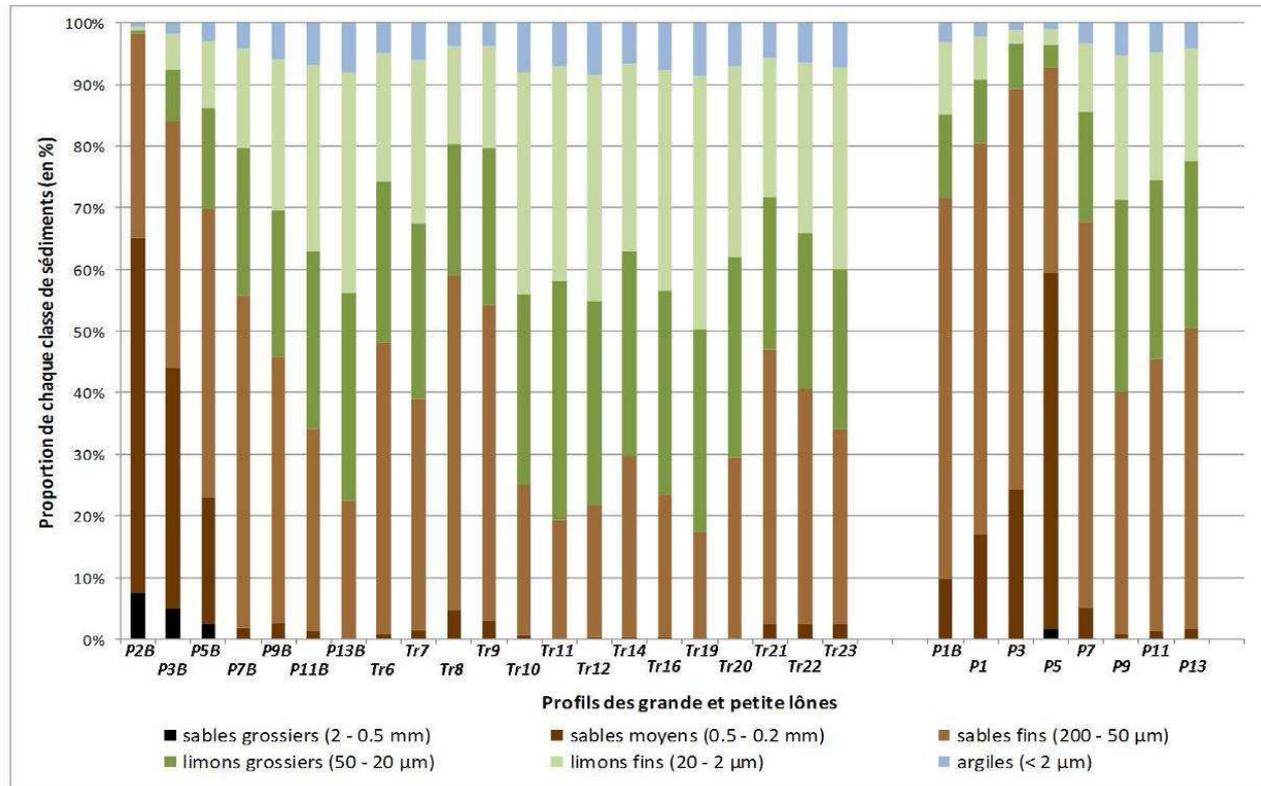


Figure 7: Estimation de la composition des sédiments déposés dans les lônes de l'île du Beurre à partir des mesures de granulométrie laser de 2011.

Sur une distance de 200 mètres environ (profils P2B à P5B), l'entrée de la lône de la Chèvre présente une granulométrie à dominance sableuse : les sables moyens sont prépondérants sur les 100 premiers mètres puis leur proportion diminue au profit des sables fins. On note la présence sensible de sables grossiers sur ce linéaire. A partir du profil P7B, les sables moyens et grossiers ont pratiquement disparu, la proportion en sables fins commence à décroître et les limons deviennent majoritaires. Cette évolution granulométrique se poursuit sur 300 m jusqu'au profil P13B où on dénombre 20% de sables fins, 35% de limons grossiers, 35% de limons fins et 10% d'argiles. Entre les transects Tr_06 et Tr_09, on note une augmentation de la proportion en sables fins. Sur une longueur approximative de 700m, les sédiments de la lône de la Chèvre sont alors à 50% des sables fins et à 50% des limons. Le tronçon suivant se caractérise par une relative homogénéité quant à la granulométrie des fonds. En effet, sur un linéaire de 900m qui rejoint finalement le chenal principal du Rhône, la composition granulométrique des sédiments est approximativement 1/3 de sables fins et 2/3 de limons. La présence d'argiles sur tout le linéaire de la lône de la Chèvre est sensible mais n'excède jamais 10%.

L'entrée de la lône du Beurre quant à elle se montre riche en sables fins et moyens puisqu'ils constituent 70 à 90% des échantillons. Plus précisément, les sables fins dominent la granulométrie des fonds sur une soixantaine de mètres puis la proportion en sables moyens devient majoritaire au niveau du profil P5 (i.e à environ 100 m de l'entrée). Sur la partie aval de la lône du Beurre, les

limons se joignent aux sables fins et la composition des fonds demeure relativement homogène jusqu'à la jonction avec la grande lône. Approximativement, on dénombre 50% de sables fins et 50% de limons et argiles sur cette dernière portion.

Cette répartition granulométriques des sédiments dans les lônes de l'île du Beurre est confirmée par des mesures granulométriques effectuées par tamisage sur ce même site en 2009 (Fig. 8).

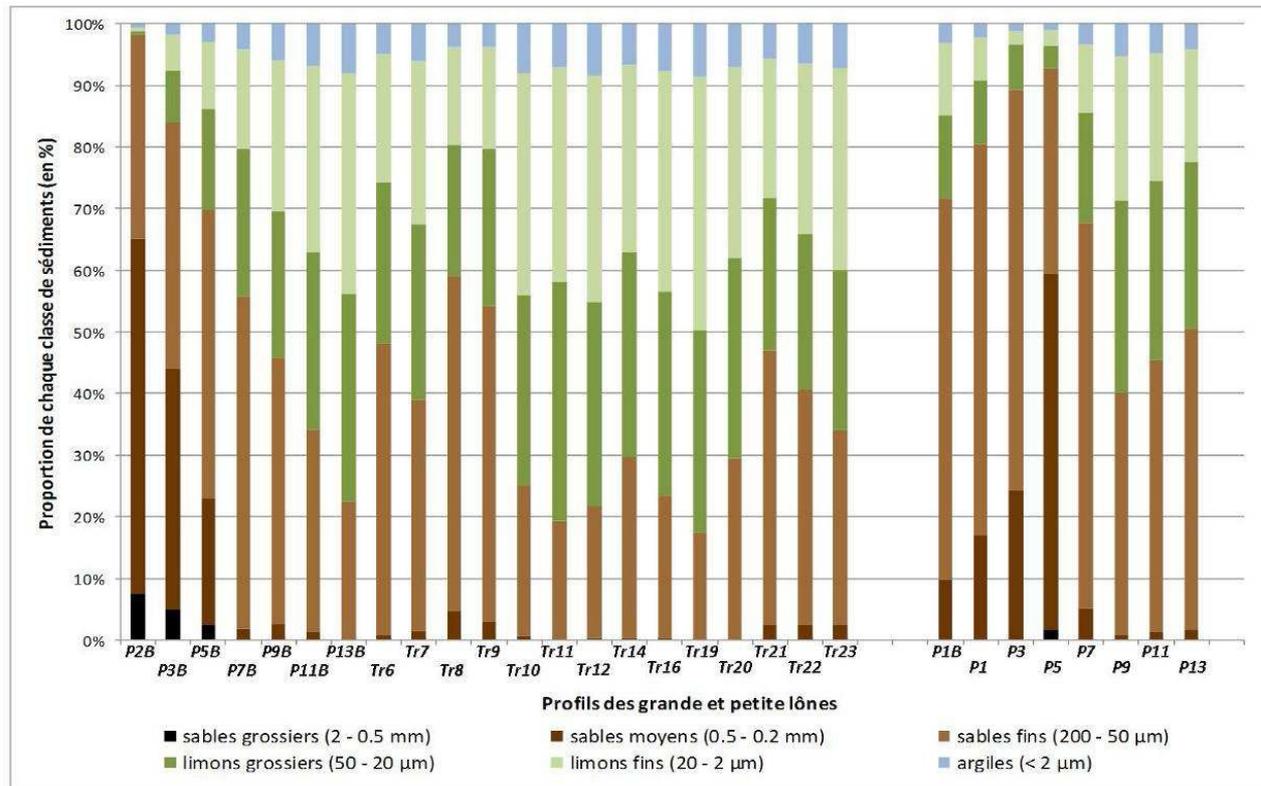


Figure 8: Estimation de la composition des sédiments déposés dans les lônes de l'île du Beurre à partir des mesures de granulométrie par tamisage de 2009.

On constate une forte proportion de sables grossiers à l'entrée de la lône de la Chèvre suivi d'un linéaire dont la composition est largement dominée par les sables fins. Au niveau de certains profils éparpillés sur le linéaire de la grande lône (P07B, P13B, Tr_09, Tr_16 en particulier), on note la présence de proportions importantes en sables moyens (voire grossiers). Ainsi, la répartition granulométrique extrapolée à partir des échantillons tamisés n'est pas toujours conforme à celle déduite des analyses laser. De même, la proportion de sédiments de diamètre inférieur à 63 µm (i.e limons, argiles) est très faible contrairement aux résultats précédents. En ce qui concerne la petite lône, ce sont essentiellement des sables moyens qui sédimentent dans sa partie amont s'étalant sur une centaine de mètres environ. La partie aval en revanche se couvre de sables fins. On relève ici une concordance meilleure avec les mesures laser. D'après l'analyse des résultats, on constate une cohérence globale entre les mesures issues des deux campagnes, les évolutions granulométriques étant similaires sur le linéaire des lônes. Toutefois, il subsiste des différences notables notamment en ce qui concerne la proportion en particules fines, qui apparaît quasiment négligeable dans les mesures effectuées par tamisage. Cette divergence peut notamment être imputée à l'incertitude des granulométries évaluées par tamisage. Par ailleurs, les procédés aboutissant à la destruction de la matière organique des échantillons n'étant pas identiques, il est possible que les méthodes employées interfèrent dans la précision des mesures.

1.5 Hydrologie

Afin de caractériser l'hydrologie du Rhône à Condrieu, on considère les débits relevés à Ternay, station de mesure située à une vingtaine de kilomètres en amont de l'île du Beurre. Entre les deux sites, le Rhône ne reçoit pas d'affluents majeurs, avec les confluences du Gier en rive droite à Givors et de la Gère en rive gauche à Vienne. Le barrage-écluse de Vaugris est situé directement en amont de l'île du Beurre, mais cet ouvrage est construit au fil de l'eau et n'autorise pas une modification importante des débits entre l'amont et l'aval. Ainsi, les débits à Ternay sont représentatifs de l'hydrologie locale.

Les données hydrauliques, à savoir les débits journaliers, sont issus de la base de données de la Banque Hydro. Concernant la station de Ternay, les débits sont disponibles de 1966 à 2009. Les débits caractéristiques de la station sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1: Débits caractéristiques du Rhône à Ternay (Banque Hydro)

Module	$Q_{Mod} = 1040 \text{ m}^3/\text{s}$
Etiage	$Q_{Etiage} = 280 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit maximum mesuré	$Q_{max} = 4780 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit à fréquence biennale	$Q_2 = 3200 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit à fréquence décennale	$Q_{10} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$
Débit à fréquence cinquantennale	$Q_{50} = 5200 \text{ m}^3/\text{s}$

L'étude du site se basant essentiellement sur des données sédimentaires relevées dans les années 2000, on représente sur la figure 9 ci-après les débits journaliers ayant transité à hauteur de Condrieu durant ces périodes.

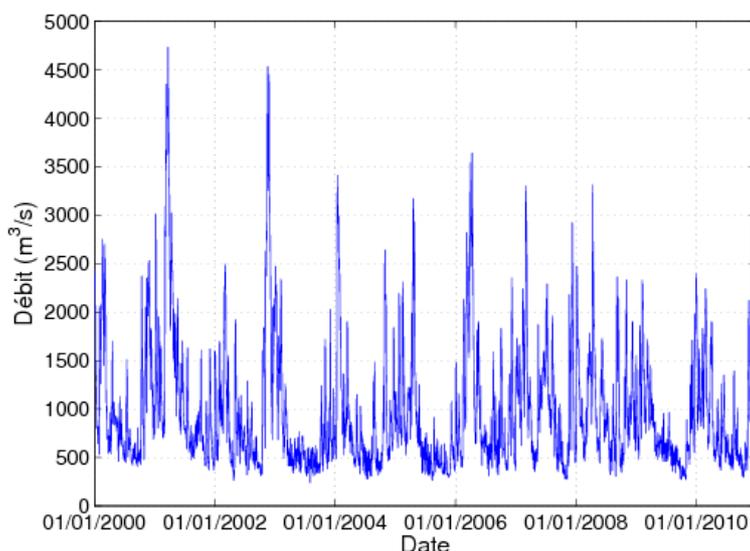


Figure 9: Chronique des débits journaliers à Ternay de 2000 à 2010.

L'hydrologie des années 2001 et 2002 est marquée par de fortes crues occasionnant des débits de plus de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$. Les conditions hydrologiques régnant de 2003 à 2008 sont moins intenses, les périodes de crue sont moins visibles et les débits ne dépassent guère les $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ en crue. Les années 2008 et 2009 apparaissent particulièrement faibles du point de vue hydrologique puisqu'aucun pic de crue ne se dessine et que les débits sont tous inférieurs à $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. Le tableau

2 montre aussi que les principales crues sont toutes des crues hivernales. Trois crues se distinguent au cours de cette décennie de par leur débit de pic et durée : en mars 2001, en novembre 2002, et en avril 2006.

Tableau 2: Caractéristiques des crues supérieures à 3000m³/s observées à Ternay entre les années 2000 et 2010.

Date	Q_{max} (m ³ /s)	Durée (jours)
Janvier 2001	3010	1
Mars 2001	4730	26
Avril 2001	3020	1
Novembre 2002	4530	17
Janvier 2004	3410	6
Avril 2005	3170	3
Avril 2006	3540	17
Mars 2007	3300	3
Avril 2008	3310	2
Décembre 2010	3060	1

1.6 Concentration en MES

1.6.1 Mesures disponibles à proximité du site

Les données disponibles de mesures de MES sur le Rhône sont malheureusement assez peu nombreuses. Nous ne disposons que de celles de l'agence de l'eau RMC qui ne procèdent à des mesures que ponctuellement à raison d'un prélèvement par mois environ. Ces mesures sont effectuées par les délégations de l'agence de l'eau RMC qui, sur une station donnée, procèdent à des prélèvements en rive gauche, en rive droite et au centre du cours d'eau, à environ 50 cm sous la surface de l'eau. Les prélèvements sont ensuite mélangés puis analysés à l'aide d'un filtre en fibre de verre (norme NF EN 872) [source agence de l'Eau RMC, Organisation du système d'information sur l'état des milieux]. Les matières solides retenues par le filtre sont pesées et connaissant le volume initial du prélèvement, la concentration en MES de l'échantillon en est déduite. Ainsi, les mesures de MES existantes sur les stations encadrant le site de l'île du Beurre s'étalent sur les périodes :

- Chasse-sur-Rhône (Ternay) : 1970 à 2010
- Saint-Vallier : 1971 à 2010

Il est à noter qu'un turbidimètre est présent sur le site de Ternay depuis quelques années mais nous n'avons pas réussi à obtenir les données. Cependant, cet appareil sature à de faibles concentrations et il est apparu que les concentrations n'étaient pas homogènes sur la section du fait d'un mélange que partiel entre le Rhône et la Saône en amont (Le Coz et al., 2011).

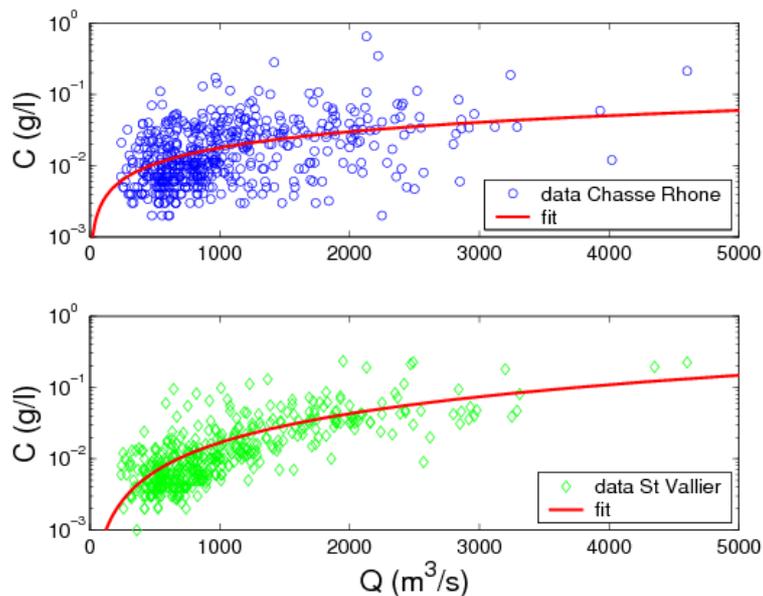


Figure 10: Relation entre les mesures de concentrations à Chasse sur Rhône et Saint Vallier et le débit à Ternay.

On cherche à déterminer dans la section d'étude une loi de correspondance entre le débit et la concentration en MES par une relation en loi de puissance de la forme:

$$C = aQ^b \quad (2)$$

avec C la concentration en MES en g/l, Q le débit total en m^3/s , a et b des coefficients empiriques dépendant des caractéristiques propres du bassin et du potentiel de remise en suspension dans la rivière.

En se basant sur les données de concentration de Chasse sur Rhône et Saint Vallier et les débits mesurés à Ternay, il est possible de déterminer les coefficients a et b :

- Chasse sur Rhône: $a = 10^{-4}$, $b = 0,75$ ($R^2 = 0,07$)
- Saint Vallier: $a = 1,5 \cdot 10^{-6}$, $b = 1,35$ ($R^2 = 0,44$)

Les corrélations obtenues sont faibles, particulièrement pour les mesures à Chasse sur Rhône. Ceci peut être dû à un mauvais mélange sur le site de Chasse sur Rhône mais aussi au manque de données pour les concentrations fortes. Une station turbidimétrique sur le site de Saint Vallier envisagée dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) devrait permettre d'améliorer ces résultats.

1.6.2 Estimation de la concentration à Ternay

Afin de proposer une estimations moins incertaine des concentrations sur Ternay, une étude est proposée en se basant sur les flux de MES mesurés sur la Saône et sur la Rhône au niveau de Lyon. Des données de débit horaire utilisées pour cette étude ont été récupérées sur la Banque Hydro aux stations d'Anthon (CNR, Rhône) et Couzon (CNR, Saône). Les données de MES utilisées correspondent à des mesures de turbidité réalisées par l'Irstea sur les sites de Jons (Rhône) et passerelle Saint Georges (Saône à Lyon). Ces données s'étalent sur les périodes suivantes :

- Anthon (Rhône) : débit horaire Q de 1979 à 2011
- Couzon (Saône) : débit horaire Q de 1981 à 2011
- Jons (Rhône) : concentration C tous les 30 mn de septembre 2010 à décembre 2011
- Saint Georges (Saône) : concentration C tous les 2 mn de septembre 2009 à novembre 2010 (chronique non complète)

Pour chacune de ces stations, les concentrations sont présentés en fonction des débits en se basant

sur des moyennes horaires et des moyennes journalières (figure 11). Il est à noter que les moyennes journalières permettent de lisser les résultats mais ne peuvent prendre en compte des phénomènes ponctuels tel que les éclusés. De la même manière que sur le site de Ternay, il est possible de déterminer les coefficients a et b d'une loi puissance entre la concentration en MES et le débit pour le Rhône en amont de Lyon et la Saône à Lyon (figure 11) :

- Rhône: $a=2 \cdot 10^{-9}$, $b=2,5$ ($R^2=0,34$ en horaire et $R^2=0,57$ en journalier)
- Saône: $a=3 \cdot 10^{-5}$, $b=1,1$ ($R^2=0,81$ en horaire et $R^2=0,82$ en journalier)

Les résultats obtenus sont bien meilleurs que ceux liés à la station de Ternay, en particulier pour la Saône. Si les débits observés sont du même ordre de grandeur sur la Saône et sur le Rhône, les concentrations sur le Rhône peuvent être bien plus fortes lors des crues alors qu'elles sont très faibles pendant l'étiage.

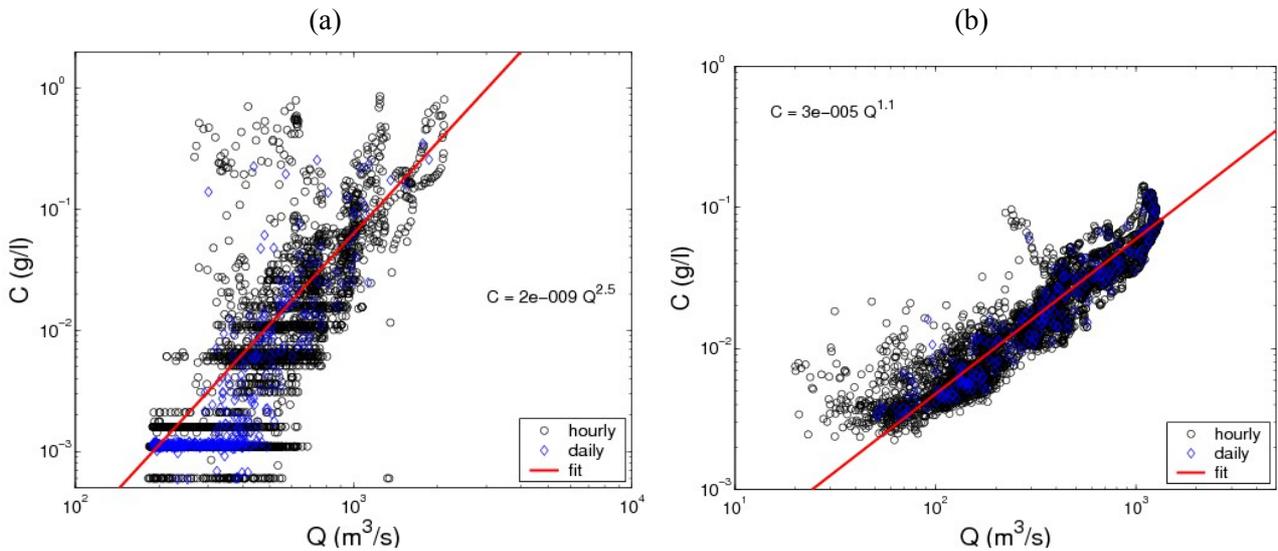


Figure 11: Relation entre les mesures de concentrations et débit sur le Rhône en amont de Lyon (a) et sur la Saône à Lyon (b).

Il est possible d'estimer les concentrations après la confluence entre le Saône et le Rhône en se basant sur les flux et en supposant correct les droites de régression proposées plus haut :

$$C = C_{Sa\hat{o}ne} \frac{Q_{Sa\hat{o}ne}}{Q_{Sa\hat{o}ne} + Q_{Rh\hat{o}ne}} + C_{Rh\hat{o}ne} \frac{Q_{Rh\hat{o}ne}}{Q_{Sa\hat{o}ne} + Q_{Rh\hat{o}ne}} = \frac{3 \cdot 10^{-5} Q_{Sa\hat{o}ne}^{2,1}}{Q_{Sa\hat{o}ne} + Q_{Rh\hat{o}ne}} + \frac{2 \cdot 10^{-9} Q_{Rh\hat{o}ne}^{3,5}}{Q_{Sa\hat{o}ne} + Q_{Rh\hat{o}ne}} \quad (3)$$

En faisant varier les débits de la Saône et du Rhône de 1 à 5000 m³/s tout en supposant que les débits des deux rivières ne diffèrent pas plus d'un facteur 5 (relative concomitance des crues et étiages), il est possible de créer un nuage de points correspondant à la concentration potentielle à Ternay (en gris sur la figure 12).

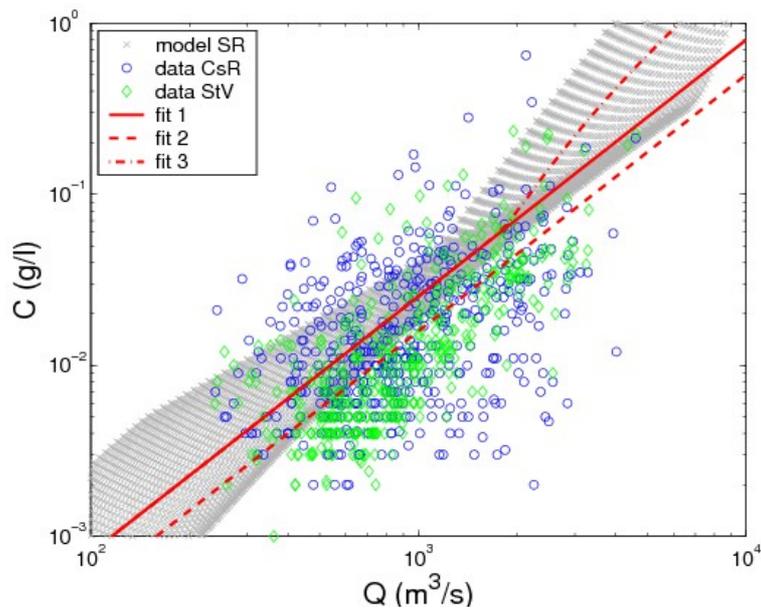


Figure 12: Relation entre les mesures de concentrations à Chasse sur Rhône et Saint Vallier et le débit à Ternay, rajout des données issues du modèle Saône-Rhône.

Trois relations sont ainsi proposées pour estimer les concentrations à Ternay en fonction du débit :

$$C = 8 \cdot 10^{-7} Q^{1,5} \quad (4)$$

$$C = 5 \cdot 10^{-7} Q^{1,5} \quad (5)$$

$$C = 8 \cdot 10^{-7} Q^{1,5} + 210^{-6} (Q - 1750)^{1,5} \quad (6)$$

L'équation 3 correspond au meilleur fit obtenu en tenant compte du modèle Saône-Rhône (avec $R^2 = -0,09$ pour les données de Chasse sur Rhône et $R^2 = 0,22$ pour les données de Saint Vallier). Même si les R^2 par rapport au données expérimentales sont moins bons, cette équation donne a priori une meilleure tendance que celles proposées précédemment. L'équation 4 donne une estimation plus faible par rapport au modèle Saône-Rhône mais plus en adéquation avec le jeu de données expérimentales ($R^2 = 0,08$ pour les données de Chasse sur Rhône et $R^2 = 0,45$ pour les données de Saint Vallier). Enfin, l'équation 5 est une extension de l'équation 3 en tenant compte du fait que le Rhône apporte des concentrations plus élevées en crue.

1.6.3 Quantification des flux

Afin de quantifier les flux annuels de MES transitant au niveau de Ternay, le transport en MES a été évalué pour chacune des classes de débit en fonction des lois empiriques $C(Q)$ présentées précédemment et de la fréquence d'occurrence de chacun de ces débits.

Tableau 3: Quantification des flux annuels en MES par classe de débit et pour la période 2000-2010 selon les hypothèses de loi $C(Q)$.

Q	f	M1 (Eq. 3)		M2 (Eq. 4)		M3 (Eq. 5)	
(m ³ /s)	(%)	(Mt)	(%)	(Mt)	(%)	(Mt)	(%)
0-200	0,01	0,00	0	0,00	0	0,00	0
200-600	29,4	0,02	1	0,01	1	0,02	1
600-1000	33,7	0,15	9	0,10	9	0,15	7
1000-1400	15,1	0,19	12	0,12	12	0,19	9
1400-1800	8,9	0,13	14	0,14	14	0,23	11
1800-2200	5,7	0,16	16	0,16	16	0,29	13
2200-2600	3,5	0,15	15	0,15	15	0,34	15
2600-3000	1,8	0,19	12	0,12	12	0,31	14
3000-3400	1,1	0,17	10	0,10	10	0,30	14
3400-3800	0,45	0,09	5	0,06	5	0,17	8
3800-4200	0,18	0,05	3	0,03	3	0,10	4
4200-4600	0,10	0,03	2	0,02	2	0,07	3
4600-5000	0,02	0,008	0,5	0,004	0,5	0,02	0,08
Flux annuel		1,64	100	1,02	100	2,17	100
Total 2000-2010		16,24		10,15		21,63	

Il apparaît sur le tableau 3 et sur la figure 13 que si le débit le plus souvent observé est d'environ 400 m³/s, le débit induisant le plus fort transport en MES est de 2000 m³/s, bien que sa fréquence d'occurrence soit 5 fois plus faible. Selon le choix de la loi empirique $C(Q)$, l'estimation du flux annuel en MES à Ternay varie de 1 à 2 millions de tonnes par an. L'équation 5 supposant des concentrations plus fortes que pour l'équation 3 pour des débits supérieurs à 1750 m³/s induit au final une augmentation des flux annuels de plus de 30%. Vu le manque de données pour les forts débits, nous pouvons en déduire une très fortes incertitudes sur les flux annuels moyens.

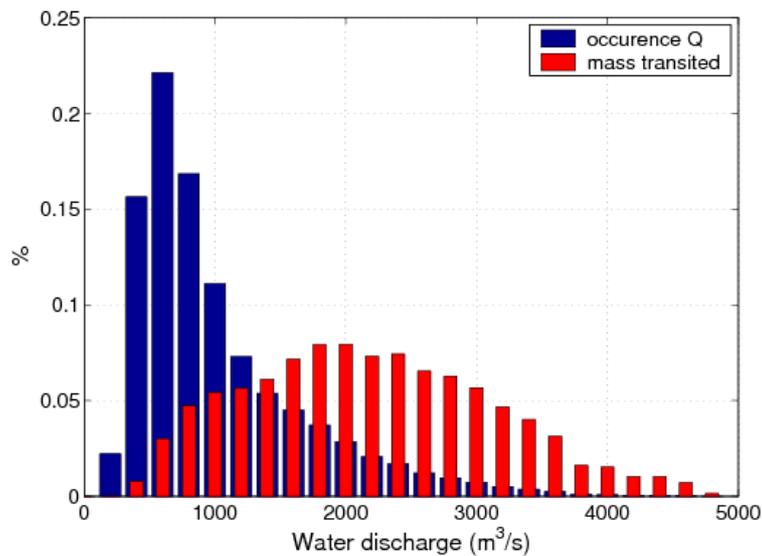


Figure 13: Fréquence d'occurrence du débit à Ternay et pourcentage du transit annuel en MES selon les mêmes classes de débit en prenant la lois empiriques $C(Q)$ donnée par l'équation 1.

Cette première approche présente une évolution relativement cohérente des relations MES / débit sur le cours du Rhône. Elle gagnerait à être développée par l'utilisation de données supplémentaires validées en particulier en période de crue. Il apparaît en effet que le bon mélange en travers de la section au niveau de Ternay est incertain. Une station turbidimétrique sur le site de Saint Vallier envisagée dans le cadre de l'Observatoire des Sédiments du Rhône (OSR) devrait permettre de mieux répondre à ces attentes. De plus, les mesures de MES étant ponctuelles et généralement effectuées en surface uniquement, la question se pose aussi de l'extrapolation à l'ensemble de la colonne d'eau et de la section.

1.6.4 Estimation de la granulométrie des MES

Sur la base d'analyses de mesures réalisée en 1956-57 sur le Rhône aval, la Sogréah (2000) donne une composition granulométrique moyenne (Tab. 4).

Tableau 4: Composition granulométrique des MES sur le Rhône à Beaucaire

Nature des sédiments	Diamètre d	Proportion dans les MES
Argile	$d < 5 \mu\text{m}$	10%
Limons	$5 \leq d < 50 \mu\text{m}$	75%
Sables très fins	$50 \leq d < 100 \mu\text{m}$	10%
Sables fins	$100 \leq d < 200 \mu\text{m}$	5%

L'étude Sogréah (2000) montre que la proportion des argiles diminue avec le débit : elle passe de 25% pour les crues inférieures à 2000 m³/s à seulement 5% pour les crues entre 4000 et 5000 m³/s. Au contraire, la classe des limons (diamètre de grain compris entre 10 et 35 μm) augmente avec le débit. En ce qui concerne les sables, il ne semble pas y avoir de tendance particulière. Cependant la faible quantité de données que Sogréah possédait pour les forts débits ne permet pas de conclure sur la proportion des sables en fonction des débits. La logique voudrait que la proportion de sable en transport en suspension augmente avec le débit.

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR, 2009) a pris des échantillons de MES en plusieurs

endroits pendant la chasse des barrages du Haut-Rhône de 2003. La Figure 14 représente la courbe granulométrique réalisée sur les MES prélevées à Jons au cours de cette chasse. Les valeurs remarquables que l'on déduit de ces mesures sont assez similaires à celles obtenues par la Sogréah (2000), à l'exception des sables dont la proportion est plus faible à Jons :

- plus de 90 % des MES correspondent à des argiles et des limons ($d < 50 \mu\text{m}$),
- le diamètre médian des MES est environ $8 \mu\text{m}$.

	%
Argiles ($0 - 2 \mu\text{m}$)	13,1
Limons fins ($2 - 20 \mu\text{m}$)	61,9
Limons grossiers ($20 - 50 \mu\text{m}$)	19,3
Sables fins ($50 - 200 \mu\text{m}$)	5,1
Sables grossiers ($200 - 2000 \mu\text{m}$)	0,6
total	100

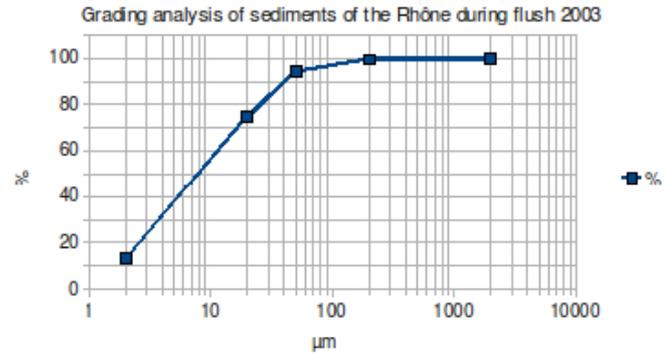


Figure 14 : Distribution granulométrique des MES à Jons lors de la chasse de 2003 (données CNR)

Sachant qu'il existe de nombreux apports (Isère, Durance, etc.) pouvant modifier la granulométrie observée à la station de Beaucaire, nous préférons utiliser les données de Jons pour nos simulations. Même si l'apport de la Saône n'est pas négligeable, il a été vu précédemment que les apports du Rhône prédominent dans le cas de crues (Figs. 11 et 12). Dans nos simulations, nous avons donc utilisé 3 classes de sédiments ayant le diamètre moyen suivant :

- $d = 8 \mu\text{m}$, qui correspond à 65% des sédiments en suspension observés à Jons,
- $d = 20 \mu\text{m}$, qui correspond à 25% des sédiments en suspension observés à Jons,
- $d = 50 \mu\text{m}$, qui correspond à 10% des sédiments en suspension observés à Jons.

On effectue ensuite une combinaison des résultats de dépôt pour calculer le résultat correspondant à un mélange de ces 3 classes comprenant 65% de sédiments avec $d = 8 \mu\text{m}$, 25% de sédiments avec $d = 20 \mu\text{m}$, et 10% de sédiments avec $d = 50 \mu\text{m}$, soit :

$$M_{\text{dépôt}} = 0,65 M_{\text{dépôt } 8\mu\text{m}} + 0,25 M_{\text{dépôt } 20\mu\text{m}} + 0,10 M_{\text{dépôt } 50\mu\text{m}} \quad (7)$$

2 Construction du modèle 1D

2.1 Géométrie

La géométrie du modèle 1D se base sur le modèle du Rhône global (Andries et al., 2012) complétée par les données locales apportées par le Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre. Le domaine d'intérêt de l'étude couvre la zone entourant l'île du Beurre et l'île de la Chèvre. L'emprise du modèle a été définie à l'amont par la station de Ternay (TRN) et à l'aval par le barrage de Saint Pierre de Boeuf (Fig. 15) sur un linéaire d'environ 36 km. Le modèle englobe ainsi la totalité du domaine d'intérêt et s'étend vers l'amont et vers l'aval jusqu'à des secteurs où les conditions aux limites (débits, niveaux d'eau, courants) sont connues. Il est à noter que le barrage de Vaugris correspondrait plus logiquement à la limite amont effective du modèle du fait de la présence d'ouvrage. Cependant, comme les données hydrauliques et sédimentaires sont mesurées (ou estimées) à Ternay, le limite amont du modèle a été prolongée jusqu'à Ternay. Le modèle ne pouvant reproduire exactement la gestion des ouvrages, il s'en suit une relative incertitude sur l'amont du barrage de Vaugris, en particulier dans le cas de gestions exceptionnelles comme l'ouverture d'un barrage.

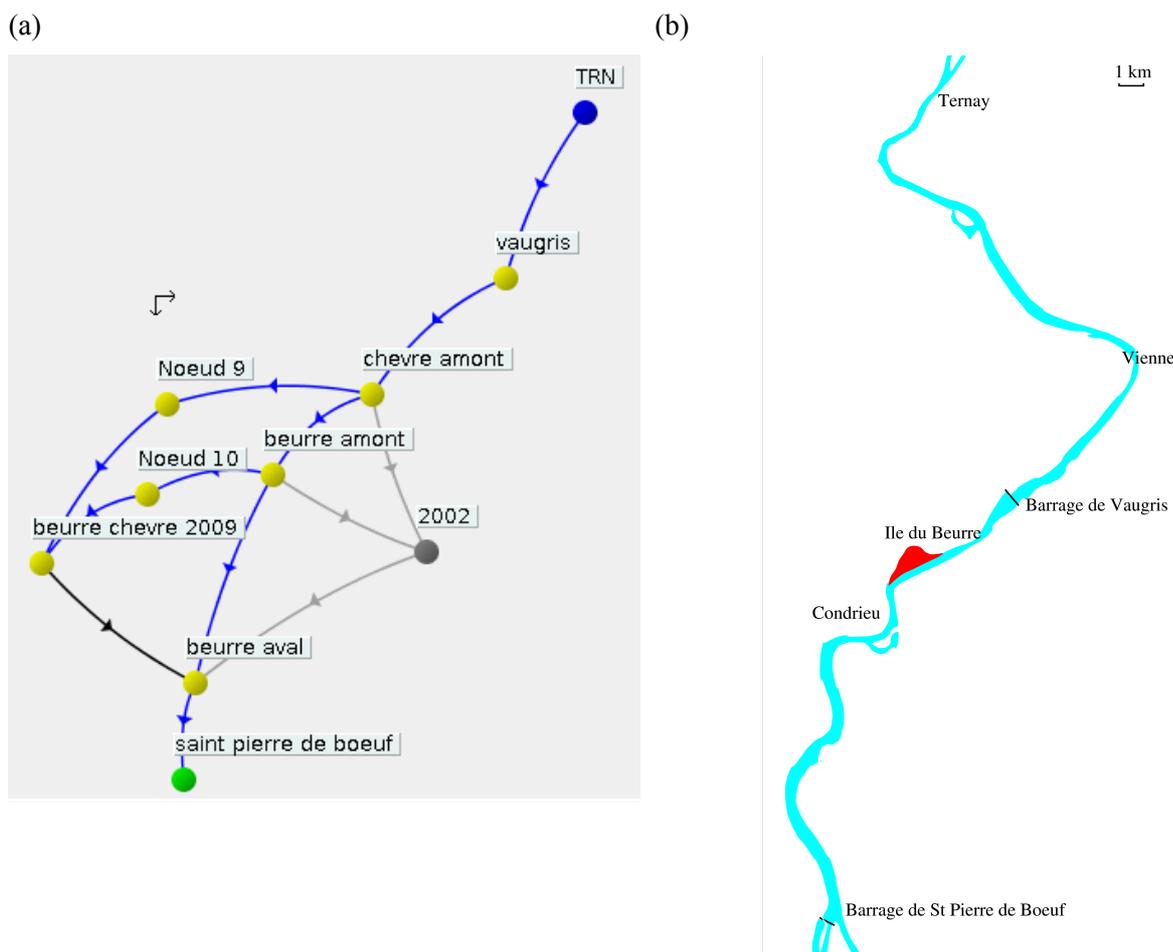


Figure 15: Schématisation du modèle maillé sous Pamhyr (a) et carte correspondante à l'emprise du modèle, Géoportail (b).

Deux topographies différentes ont été utilisées pour la zone d'intérêt (îles du Beurre et de la

Chèvre) : celle de 2002 juste après les travaux de dragage et celle de 2009. Les relevés en travers des lônes effectués par le Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre ne couvrant que les chenaux, le modèle a été complété plus grossièrement en intégrant le lit majeur à partir de points IGN.

2.2 Calage hydraulique du modèle

La figure 16 indique la condition à la limite aval imposé à St Pierre de Boeuf (loi de tarage $Q(z_w)$). Une chronique de débit peut être imposée en condition amont à Ternay (cf. Fig. 9).

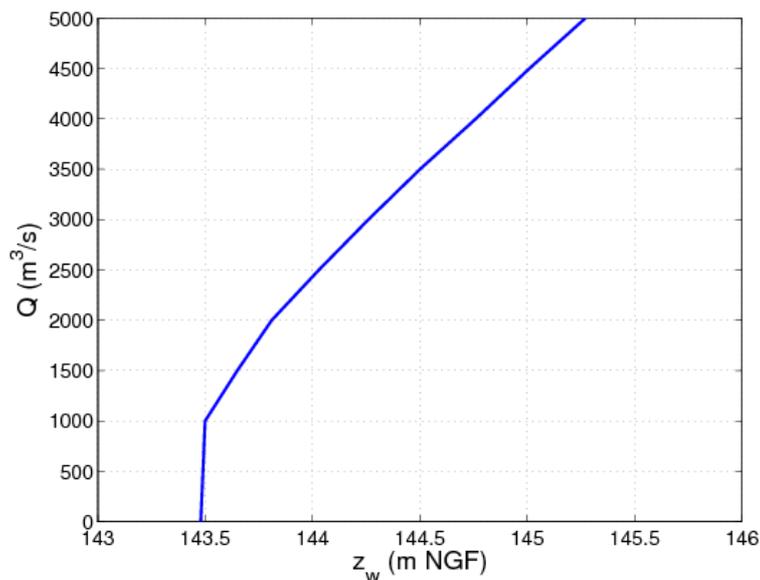


Figure 16: Condition à la limite aval à St Pierre de Boeuf.

Les données hydrologiques (débits en crue et niveaux d'eau associés) des frontières du modèle proviennent des résultats du diagnostic hydraulique du bief du péage de Roussillon, réalisé par la CNR dans le cadre de l'étude globale Rhône en 2002. Le calage du modèle hydraulique consiste dans le cas d'une modélisation 1D à corriger les coefficients de Strickler du lit mineur (associé ici au chenal principal) et du lit majeur (associé ici au lit moyen, incluant donc berges, îles et autre zone végétalisée) afin d'observer une cohérence entre les lignes d'eau modélisées pour plusieurs débits et les lignes d'eau mesurées. Les résultats sont présentés dans la figure 17 et le tableau 5 obtenus pour un Strickler de $30 m^{1/3}/s$ dans le chenal principal et de $15 m^{1/3}/s$ en lit moyen. Les résultats sont bons pour les crues très importantes ($Q > 3000 m^3/s$). Il apparaît par contre que le modèle tend à surestimer les niveaux en particulier pour les débits plus faibles, une erreur atteignant 50cm en moyenne pour la ligne d'eau à $2200 m^3/s$. Ceci est sans doute dû à l'influence plus importante des niveaux d'eau aval pour ces débits plus faibles sachant que le niveau d'eau à St Pierre de Boeuf n'est ici qu'approximé selon les règles de gestion des ouvrages CNR. On observe en effet une ligne d'eau mesurée à $1020 m^3/s$ en dessous de la ligne d'eau mesurée à $900 m^3/s$. Ces incertitudes peuvent aussi être attribuées à la topographie utilisée (datant des années 2000) qui est plus récente que les lignes d'eau mesurées (années 1980). Nous considérerons donc ce calage des Strickler correct même si des améliorations locales peuvent encore être réalisées. Il est tout de même à noter que ces incertitudes peuvent induire des erreurs supplémentaires sur les débits entrants dans les lônes.

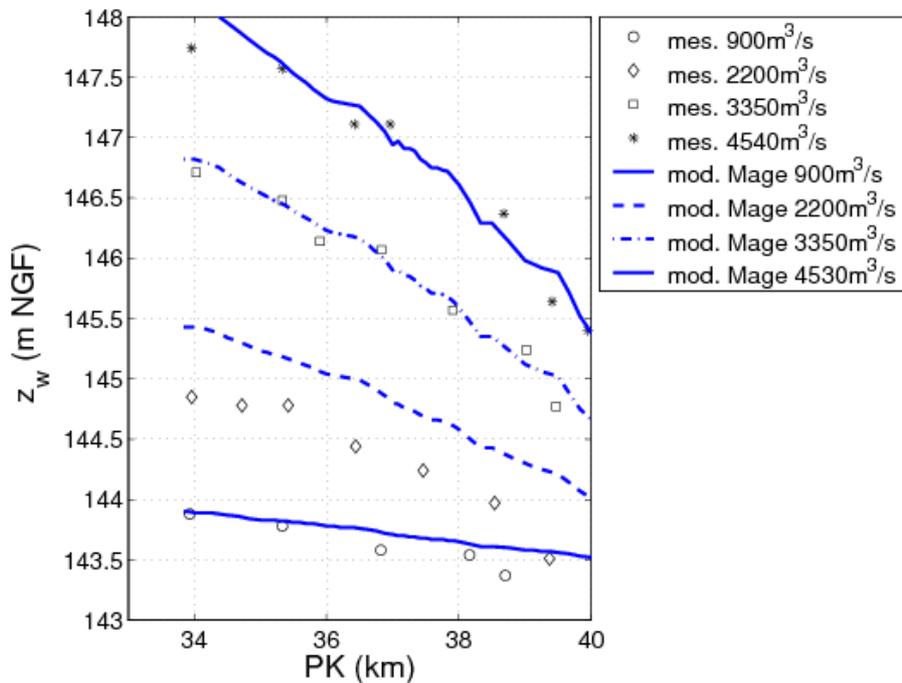


Figure 17: Condition à la limite aval à St Pierre de Boeuf à l'aide du modèle Mage.

Tableau 5: Résultat sur le calage des lignes d'eau avec le modèle Mage.

Débit (m ³ /s)	Année mesure	Erreur moyenne (m)	Déviatoin standart (m)
900	1981	0,10	0,06
1020	1987	0,44	0,20
2200	1990	0,48	0,16
3350	1983	0,03	0,04
4540	1983	0,04	0,06

2.3 Paramétrisation du modèle sédimentaire

2.3.1 Caractéristiques sédimentaires

La paramétrisation du modèle sédimentaire a été réalisée de la même manière que pour les simulation du Haut-Rhône et du site pilote de Miribel- Jonage (Andries et al., 2012a et b). Les principales caractéristiques retenues sont indiquées dans le tableau 6. Comme indiqué dans la première partie de ce document, par défaut de données précises sur la granulométrie des sédiments, les caractéristiques simplifiées des sédiments mesurés à Jons sont utilisées pour les simulations sur le site pilote de la lône du Beurre.

Tableau 6: Caractéristiques des sédiments du Rhône à Jons utilisés pour la modélisation.

Diamètre	Pourcentage masse	Type	Vitesse de chute (m/s)	Porosité des dépôts associés	Masse volumique
8 μm	65%	6 (limons, vases)	3,6 10^{-5} m/s	0.5	2650 g/l
20 μm	25%	6 (limons, vases)	2.3 10^{-4} m/s	0.5	2650 g/l
50 μm	10%	3 (sable naturel)	2.1 10^{-3} m/s	0.5	2650 g/l

2.3.2 Coefficients pour la loi de dépôt érosion

La loi de dépôt érosion utilisée dans Adis-TS est décrite dans le rapport Axelera Andries et al., 2012. En première approximation, on suppose le dépôt uniforme sur le lit majeur et le lit mineur. Les taux de dépôt et d'érosion de l'équation peuvent être estimés ensemble comme suit :

$$(P-D)W = a_{PD} e_{disp,m} (C_{eq,m} - C) \frac{W_s}{H_m} W_m + a_{PD} e_{disp,M} (C_{eq,M} - C) \frac{W_s}{H_M} W_M \quad (8)$$

où a_{PD} est un coefficient de calage, $e_{disp,m/M}$ un coefficient indiquant la disponibilité de dépôt dans le canal ($e_{disp,m/M} = 0$ si il y a érosion et si $M_{fs,m/M} = 0$; $e_{disp,m/M} = 1$ sinon), $C_{eq,m/M}$ la concentration d'équilibre, W_s la vitesse de chute du sédiment, $H_{m/M}$ la profondeur moyenne dans le lit mineur / lit majeur et $W_{m/M}$ est la largeur mouillée du lit mineur / lit majeur. On considère ici la concentration C homogène dans toute la section. Finalement :

- il y a érosion si la concentration d'équilibre C_{eq} est supérieur à la moyenne de la concentration C calculée grâce au modèle ;
- il y a dépôt si $C_{eq} < C$.

La concentration d'équilibre dans les lits mineur et majeur $C_{eq,m/M}$ peut être estimée en fonction de la contrainte de cisaillement $\tau_{m/M}$ calculée par le modèle (basé sur Partheniades, 1965) :

$$C_{eq,m/M} = a_c \left(\frac{\tau_{m/M}}{\tau_{cr}} - 1 \right)^{b_c} \quad (9)$$

où a_c et b_c sont des paramètres de calage ($b_c = 1$ comme première approximation, cf. Camenen, 2011).

Il est à noter que plus le coefficient a_{pd} est choisi grand, plus la quantité de dépôt ou érosion est importante (cf. Eq. 8). De même, plus le coefficient a_c est petit, plus le dépôt est favorisé par rapport à l'érosion (cf. Eq. 9).

Voici les caractéristiques des trois coefficients à fixer dans le cadre de la modélisation :

- $a_{pd} = 0,1$: coefficient de la loi de dépôt-érosion,
- $a_c = 0,001$: coefficient de la loi pour la concentration à l'équilibre ; homogène à une concentration
- $b_c = 1$: exposant de la loi pour la concentration à l'équilibre.

Les valeurs données ici sont issues d'un premier calage réalisé sur une chasse des barrages de l'Arc en Maurienne. Une validation plus rigoureuse serait nécessaire mais nécessite un jeu de données (topographiques et sédimentaires) très détaillé en temps et dans l'espace. Des améliorations sont donc toujours possibles même si les premiers résultats obtenus restent tout à fait cohérents.

2.3.3 Coefficient de dispersion

Il est possible d'utiliser quatre méthodes différentes d'évaluation des coefficients de dispersion dans Adis-TS. On peut utiliser différentes méthodes pour chacune des parties du modèle au cours d'une même simulation. Chaque méthode utilise un coefficient de proportionnalité qui sert de coefficient de calage. Les trois premières méthodes proposées consistent en application de formules semi-empiriques : Elder (1959), Fischer (1967) et Iwasa & Aya (1991). Chacune de ces formules peut

s'écrire de la forme suivante (Camenen, 2011) :

$$\frac{D_f}{H_{m/M} U_{*m/M}} = a \left(\frac{U_{m/M}}{U_{*m/M}} \right)^b \left(\frac{W_{m/M}}{H_{m/M}} \right)^c \quad (10)$$

où a , b et c sont des paramètres de calage variant selon les auteurs, $U_{m/M}$ la vitesse moyenne dans le lit mineur / lit majeur, $U_{*m/M}$ la vitesse de frottement dans le lit mineur / lit majeur ($U_{*m/M} = \sqrt{\tau_{m/M} / \rho}$).

Tableau 7: Coefficients a , b et c pour les formules du coefficients de dispersion.

Formules	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Elder (1959)	100	0	0
Fisher (1967)	0,011	2,0	2,0
Iwasa & Aya (1991)	2	0	1,5

La quatrième méthode utilise un coefficient de dispersion constant. Dans ce cas, le coefficient de dispersion est la valeur fournie par l'utilisateur, il ne dépend d'aucune variable provenant des conditions d'écoulement. Le coefficient de dispersion final est toujours la somme du coefficient de diffusion moléculaire (fixé à 10^{-6} m²/s) et du coefficient fourni par la formule de calcul choisie.

Nous avons utilisé sur ce modèle la méthode par défaut, soit celle de Elder. Encore une fois, seules des mesures de dispersion sur le site spécifique permettraient de valider ou non l'une ou l'autres des formules.

2.3.4 Conditions aux limites et Conditions initiales

Dans le cas des nœuds amont du modèle, une concentration en fonction du temps a été définie pour condition à la limite amont telle que définie au paragraphe 1.6. La condition à la limite aval (sortie) est une condition de type Neumann homogènes qui ne requiert aucune donnée.

Les conditions initiales définissent l'état initial pour chaque classe de sédiments. L'état initial comprend la concentration en tout point du réseau et les masses déposées au fond. Pour les simulations présentées dans ce document, les dépôts et concentrations initiaux sont pris nuls.

3 Construction du modèle 3D

3.1 Géométrie

Le domaine d'intérêt de l'étude couvre la zone entourant l'île du Beurre et l'île de la Chèvre. L'emprise du modèle a été définie à l'amont à partir d'une section du Rhône située directement à l'aval de la retenue de Vaugris et à l'aval par le pont de Condrieu (Fig. 18). Le modèle englobe ainsi la totalité du domaine d'intérêt et s'étend vers l'amont et vers l'aval jusqu'à des secteurs où les conditions aux limites (débits, niveaux d'eau, courants) sont relativement connues. Les données hydrologiques (débits en crue et niveaux d'eau associés) des frontières du modèle proviennent des résultats du diagnostic hydraulique du bief du péage de Roussillon, réalisé par la CNR dans le cadre de l'étude globale Rhône en 2002. Les limites latérales du modèle ont été définies de manière à couvrir a priori l'ensemble de la zone inondable en crue historique. Ainsi, en rive droite, la plaine en aval d'Ampuis, l'île du Beurre et l'île de la Chèvre sont inondables en crue, de même pour la plaine de Condrieu, qui malgré la présence de digues insubmersibles est inondée par l'aval. En rive gauche, les inondations affectent la plaine de Gerbay. La définition de l'emprise latérale du domaine se base sur l'étude globale Rhône (CNR, 2002).

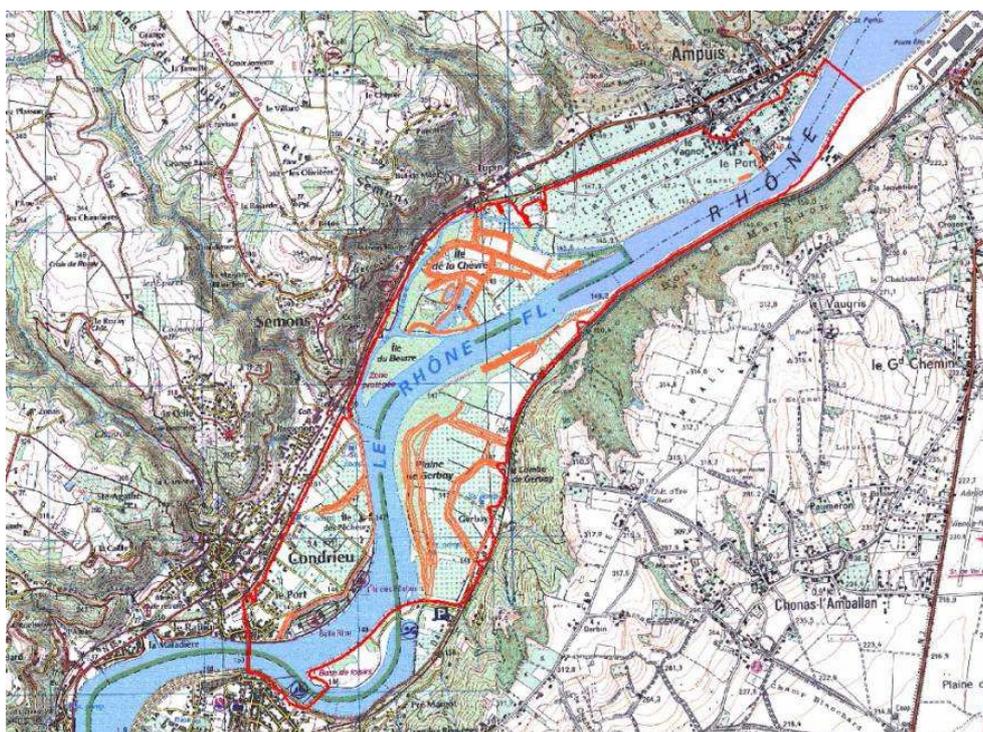


Figure 18: Emprise du modèle (en rouge) et principaux éléments structurants (en orange).

Le modèle ainsi défini couvre environ 6 km du linéaire du Rhône. Il est conditionné par différents éléments structurants : des voies ferrées sur la plaine de Gerbay, des routes en remblai, des digues sur la plaine de Condrieu. La topographie du modèle est basée sur les relevés bathymétriques effectués en 2009. Ce choix se justifie par le fait que l'année 2009 présente la seule bathymétrie complète des îles de l'île du Beurre. Afin de représenter avec fidélité les détails topographiques du site, on génère un maillage avec des éléments finis triangulaires, de taille et de forme variables. Ainsi, la taille des mailles imposée dans le lit du Rhône et dans les plaines inondables est grossière, de l'ordre de 300 m. Des raffinements locaux du maillage sont effectués au niveau des berges du

Rhône (75 m), des infrastructures (45 m) et surtout dans les lônes. La taille des mailles dans les lônes évoluent donc entre 12 m pour la portion la plus étroite et 30 m. La figure illustre le compromis adopté au niveau de l'île du Beurre.

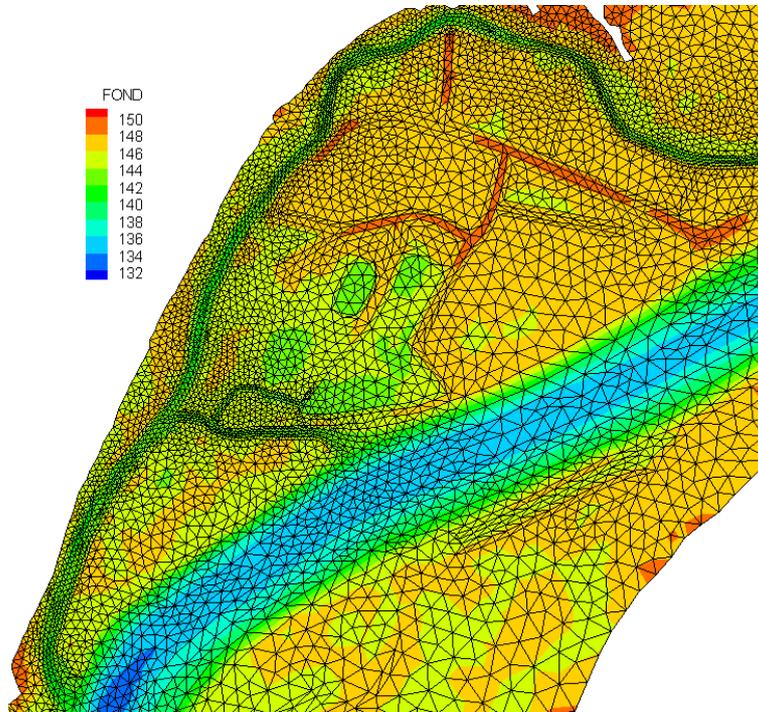


Figure 19: Maillage et topographie du modèle 2D sous Telemac – Vue locale au niveau de l'île du Beurre

Des difficultés notables sont apparues lors du maillage des profils en travers des lônes. En effet, en raison de contraintes liées à la résolution numérique, les berges ne doivent pas présenter une pente trop forte. Les sections en travers des lônes ont donc fait l'objet de simplification afin d'adoucir l'inclinaison de leurs berges. Systématiquement, on a cherché à conserver la section équivalente mais cela n'a pas toujours été possible. Ainsi plusieurs profils modélisés ont été élargis par rapport à la réalité. Le maillage bidimensionnel construit pour le site de l'île du Beurre compte 16129 éléments pour 8254 noeuds. Le nombre de plans choisis pour décrire la verticale est de 10, nombre assurant une bonne résolution des profils verticaux de concentration en sédiments d'après les tests effectués par Le Normant (1995). Le maillage tridimensionnel comporte par conséquent 82540 noeuds qui définissent 145161 éléments. La modélisation de l'écoulement au niveau des frontières obéit aux conditions suivantes :

- A la limite amont du modèle, la valeur du débit est imposée sur la largeur du Rhône (paroi liquide). Une rampe de débits est instaurée pour que l'initialisation du modèle ne soit pas trop brutale : le débit augmentera progressivement dans les premiers pas de temps jusqu'à atteindre la valeur souhaitée puis restera constant sur toute la durée de la simulation.
- A la limite aval, la hauteur d'eau est imposée et le débit s'écoule librement. Afin de définir une hauteur à l'aval en accord avec le débit imposé à l'amont, une loi de tarage est imposée à partir des relevés de débits et de niveaux d'eau entre les retenues de Vaugris et de Saint-Pierre de Boeuf (CNR, 2002).

3.2 Calage hydraulique du modèle

Le calage constitue une étape fondamentale pour la qualité du modèle et la validité des résultats ultérieurs. Il consiste à étalonner certains paramètres ajustables afin d'obtenir une concordance

entre les simulations et la réalité mesurée. Dans notre cas, le calage hydraulique consiste à reproduire des écoulements naturels observés par ajustement de la rugosité du lit et des terrains alentours. La rugosité des fonds est modélisée par la loi de frottement de Nikuradse. Les éléments de calage représentatifs des écoulements passés sont les débits et lignes d'eau relevés lors des périodes de crues entre les retenues de Vaugris et de Saint-Pierre de Boeuf (CNR, 2002).

Le coefficient de rugosité est imposé en fonction du type de terrain considéré (lit du fleuve, plaine alluviale,...). Le coefficient de Nikuradse est ensuite ajusté au niveau de chaque zone par la réalisation d'essais successifs visant à reproduire au mieux les événements retenus pour le calage. Le coefficient de Nikuradse a finalement été fixé à 0.15 m dans le lit mineur et à 0.35 m dans le lit majeur, soit une valeur du coefficient de Strickler égale à environ à 35 m^{1/3}/s et 28 m^{1/3}/s, respectivement.

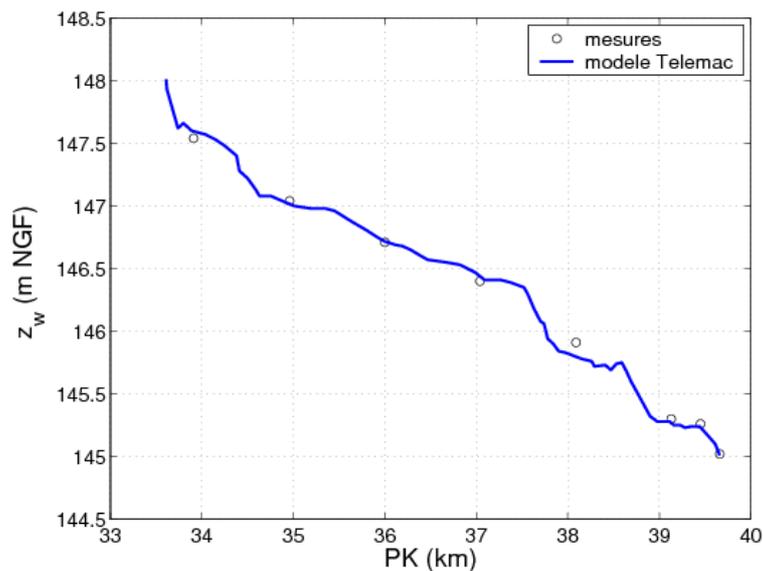


Figure 20: Comparaison de la ligne d'eau du Rhône calculée par le modèle avec les mesures expérimentales pour un débit de 4625 m³/s (les PK sont comptés croissant vers l'aval avec pour origine Lyon).

3.3 Calage du modèle sédimentaire

Le modèle Telemac3D résout l'équation de transport-diffusion 3D des sédiments où les termes sources $D-E$ correspondent à des termes d'échange de sédiments entre la colonne d'eau et le lit. Ils sont modélisés par les lois de dépôt et érosion.

Pour l'érosion, une loi de Partheniades (1965) est adaptée aux sédiments cohésifs :

$$E = M \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} - 1 \right) \quad (11)$$

avec E le taux d'érosion (en kg/m²/s), $M = 2,410^{-4}$ kg/m²/s le coefficient d'érosion, τ la contrainte hydrodynamique (N/m²), et τ_{cr} la contrainte critique d'érosion ($\tau_{cr} = 0,24$ N/m² pour des matériaux silteux comme observés dans les lônes).

Le terme de dépôt est égal à la concentration en sédiment dans l'eau au niveau du plan du fond multipliée par la vitesse de chute du sédiment :

$$D = W_c C_b \quad (12)$$

avec D le taux de dépôts (en kg/m²/s), W_c a vitesse de chute des sédiments (en m/s), et C_b la concentration des sédiments au pied de la colonne d'eau (en kg/m³). Une vitesse de chute des

sédiments de $3,610^{-4}$ m/s est imposée pour le modèle 3D, ce qui correspond approximativement à la vitesse de chute du diamètre médian (limon, cf. Tab. 6).

4 Analyse de la dynamique sédimentaire de l'île du Beurre

4.1 Estimation des flux entrants dans les lônes

4.1.1 Estimation des débits liquides entrants dans les lônes

Pour chacun des modèles 1D et 3D, la répartition des débits dans les lônes a été calculée en fonction du débit dans le Rhône (Fig. 21). Pour le modèle 3D (Telemac), les débits entrant au niveau des lônes sont estimés à partir de l'intégration des vitesses sur la verticale sur les sections d'entrée des l'ne du Beurre et de la Chèvre, respectivement. Dans le cas du modèle 1D, cette répartition s'obtient directement. Des différences importantes apparaissent entre les deux modèles. Si les deux modèles indiquent des débits de mise en eau des lônes similaires ($Q < 1000 \text{ m}^3/\text{s}$), les débits entrants dans les lônes sont ensuite bien plus forts pour le modèle 1D, d'environ 25% pour la lône du Beurre (Fig. 21a) et d'un facteur 2,5 pour la lône de la Chèvre (Fig. 21b). Ceci peut partiellement s'expliquer du fait des hypothèses de répartition des débits dans le modèle 1D qui est principalement déterminé géométriquement en fonction des sections mouillées du Rhône avant diffluence, des lônes et du Rhône après diffluence en supposant les vitesses homogènes sur les section. Le modèle 1D ne prends pas en compte le fait que l'angle d'attaque du courant dans les lônes, ni de la vitesse d'entrée du courant dans la lône qui peut être différente de la vitesse moyenne de la section amont. Sur ce point, le modèle 3D est sensé donner des résultats plus proches de la réalité même si ce dernier peut être plus sensible au variations topographiques locales. Il faut cependant rappeler qu'aucun des modèles n'est ici proprement validé du fait de l'absence de données expérimentale. Le calage des frottements, pris légèrement différent pour chacun des modèles (cf. paragraphes 2.2 et 3.2) peut aussi légèrement influencer les résultats.

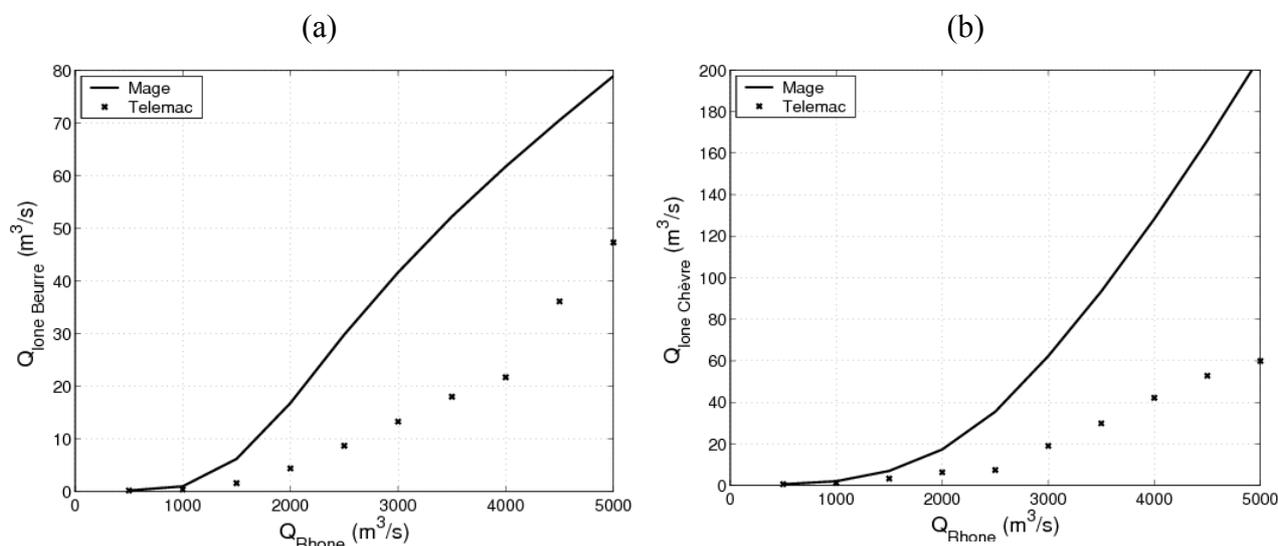


Figure 21: Evolution des débits entrants dans la lône de la Chèvre (a) et la lône du Beurre (b) en fonction des débits transitant dans le Rhône.

Les débits entrants dans la grande lône majorent les flux circulant dans la lône du Beurre. L'accroissement du débit dans le Rhône n'entraîne pas une augmentation équivalente du flux transitant dans les lônes. Les débits circulant dans le chenal principal et dans les lônes n'évoluent donc pas linéairement mais semble davantage dériver d'une relation de loi puissance.

4.1.2 Estimation des flux solides entrants dans les lômes

A l'aide des estimations des débits entrants dans chacune des lômes, il est possible d'estimer les flux moyens annuels transitant dans chacune des lômes en fonctions des apports amont (cf. Tab. 3). La quantité de sédiments transitant dans les lômes correspond approximativement à un centième des flux transitant dans le Rhône. En utilisant l'équation 5 pour l'estimation des concentrations à Ternay et la modélisation 1D, on peut ainsi estimer à 200000 tonnes et 300000 tonnes les transits en MES dans les lômes du Beurre et de la Chèvre, respectivement. Ce transit correspond donc au potentiel de dépôt maximum dans les lômes. Si la répartition des débits obtenues avec le modèle Telemac3D est utilisée, ces valeurs chutent à 60000 et 90000, respectivement.

Tableau 8: Quantification des flux annuels en MES par classe de débit et pour la période 2000-2010 dans chacune des lômes en utilisant la loi définie par l'équation 5 et la modélisation 1D.

Q (m ³ /s)	f (%)	M3 (Eq. 5)		Lôme Beurre		Lôme Chèvre	
		(mt)	(%)	(mt)	(%)	(mt)	(%)
0-200	0,01	0	0	0,0	0	0	0
200-600	29,4	20	1	0,0	0	0	0
600-1000	33,7	150	7	0,1	0,3	0	0,7
1000-1400	15,1	190	9	0,5	3	0,4	1
1400-1800	8,9	230	11	1,2	6	1,3	4
1800-2200	5,7	290	13	2,0	11	2,7	9
2200-2600	3,5	340	15	2,9	16	4,4	14
2600-3000	1,8	310	14	3,1	17	5,3	17
3000-3400	1,1	300	14	3,5	19	6,3	21
3400-3800	0,45	170	8	2,2	12	4,4	14
3800-4200	0,18	100	4	1,4	7	2,9	9
4200-4600	0,10	70	3	1,1	6	2,4	8
4600-5000	0,02	20	0,08	0,3	2	0,7	2
Flux annuel		2170	100	1,02	100	3,1	100
Total 2000-2010		21630		184		320	

De la même manière que pour les débits et concentrations (voir Fig. 13), il est possible de regarder la fréquence d'occurrence des transits de MES dans la lôme du Beurre par rapport au transit total dans le Rhône. Si le pic d'occurrence des débits est à 600 m³/s, le pic d'occurrence des MES dans le Rhône se situe à 2400 m³/s, et le pic d'occurrence des MES dans la lôme du Beurre se situe approximativement à 3000 m³/s. Encore une fois, ces résultats, même s'ils indiquent une bonne estimation de la réalité, restent entachés d'une forte incertitude.

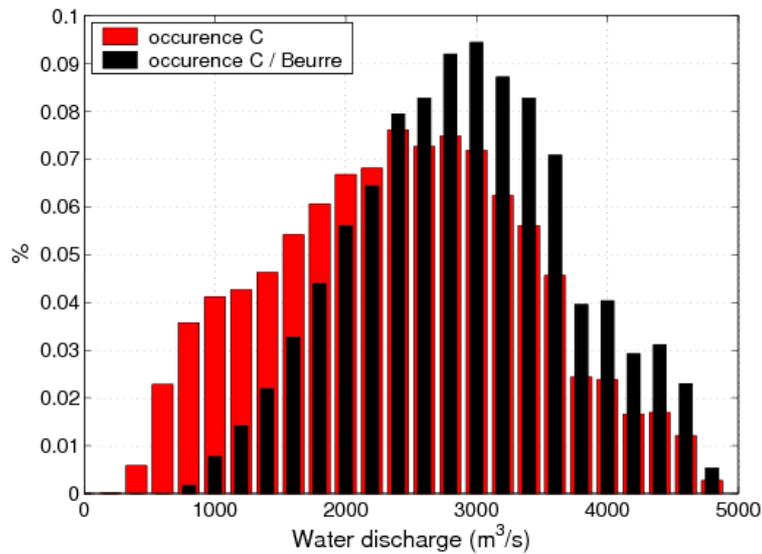


Figure 22: Fréquence d'occurrence du transit annuel en MES dans le Rhône et dans la lône du Beurre selon les mêmes classes de débit en prenant la loi empirique $C(Q)$ donnée par l'équation 5 et les répartition de débits données par Mage.

Les flux annuels transitant dans la lône du Beurre sont indiqués Fig. 23. Il apparaît que les années 2001, 2002, et 2006 sont les plus importantes en terme d'apport. Ceci peut facilement s'expliquer du fait des crues importantes qui ont eu lieu ces années là (cf. Fig. 9 et Tab. 2). Il apparaît en effet que les crues du Rhône supérieures à 3000 m³/s représente 50 % du transit en MES dans la lône du Beurre.

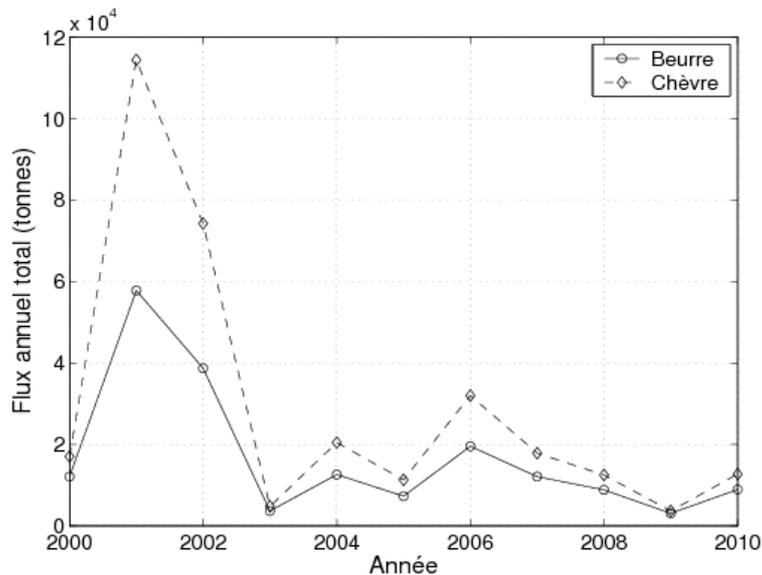


Figure 23: Flux annuel transitant par les lônes du Beurre et de la Chèvre en prenant la loi empirique $C(Q)$ donnée par l'équation 5 et les répartition de débits données par Mage.

Une comparaison plus détaillée est proposée sur la figure où sont représenté sur le même graphique les masses annuels de dépôts sur la lône du Beurre amont estimés à partir des relevés bathymétriques (cf. figure 2) et les flux transitant dans la lône. Pour estimés les masses déposées à

partir des volumes, l'équation suivante est utilisée :

$$M = \rho_s (1 - p) V \quad (13)$$

avec $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique des sédiments et $p = 0,4$ la porosité. Il apparaît clairement qu'environ 10 % des sédiments transitant dans la lône se dépose. Un point intéressant est que les deux années avec un apport important de MES (2002 et 2006 du fait des crues de novembre 2002 et avril 2006) n'induisent pas nécessairement de très forts dépôts. Ceci pourrait s'expliquer par des vitesses et contraintes plus fortes dans la lône, induisant ainsi des dépôts plus limités, voire même de la reprise.

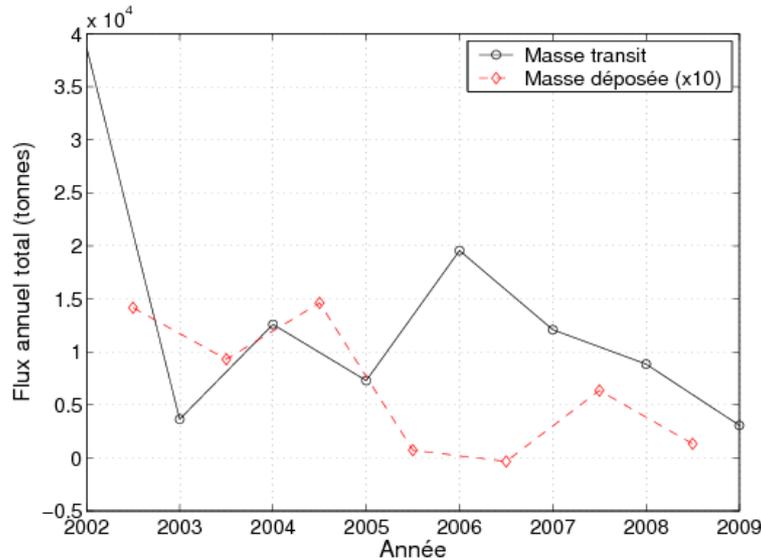


Figure 24: Flux annuel transitant par la lône du Beurre en prenant la loi empirique $C(Q)$ donnée par l'équation 5 et les répartition de débits données par Mage et masses déposées annuellement dans la lône sur la période de 2002 à 2009.

4.2 Calculs des contraintes dans les lônes

De la même manière que pour l'estimation des flux solides entrants, il est possible de calculer les contraintes moyennes au fond en fonction du débit du Rhône. La contrainte moyenne au fond s'exprime selon l'équation suivante :

$$\tau = \frac{\rho g}{K^2 H^{1/3}} U^2 \quad (14)$$

avec $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'eau, K le coefficient de Strickler ($K = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ dans notre cas), et H et V les hauteurs et vitesses moyennes sur la section (aussi moyennées sur chacun des tronçon dans notre cas).

Les contraintes de cisaillement au fond sont présentées Fig. 25 en fonction du débit transitant dans le Rhône. Comme pour le modèle Telemac3D (De Linares et al., 2012), les contraintes dans la lône de la Chèvre apparaissent plus élevées que dans la lône du Beurre et globalement croissante en fonction du débit entrant dans la lône, soit croissant en fonction du débit transitant dans le Rhône. Les calculs issus du modèle semblent cependant surestimé les contraintes par rapport au modèle 3D. Les contraintes de cisaillement au fond observées dans la lône de la Chèvre et surtout dans la lône commune semblent trop élevées. Même si le modèle Telemac3D induit des débits plus faibles dans les lônes que le modèle Mage pour un même débit dans le Rhône, les valeurs de contraintes obtenues par le modèle Mage sont beaucoup plus élevées que celles de Telemac3D. Le rapport peut

atteindre la valeur 5 concernant la lône commune. Pour un débit supérieur à $2000\text{m}^3/\text{s}$, nous observons cependant des contraintes qui diminuent légèrement avec le débit dans le cas de la lône du Beurre. Ceci peut correspondre à l'effet de la confluence des lônes qui peut influencer sur les hauteurs et vitesses de la lône du Beurre en créant un remous. Si l'on considère un seuil d'érosion des sables égale à $0,4\text{ Pa}$ et un seuil d'érosion des vases égale à $0,25\text{ Pa}$, ces calculs nous indiquent que la lône commune, puis la lône de la Chèvre seraient plus sensibles à l'érosion que la lône du Beurre. Une quantité importante de dépôts a été observée dans la lône commune ; nous pouvons donc penser que les contraintes devraient être plus faibles sur cette partie de l'île du Beurre afin de permettre les dépôts.

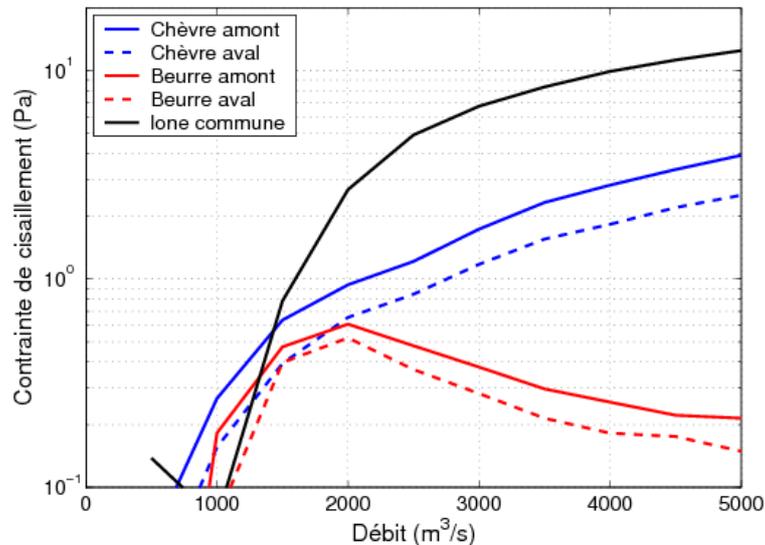


Figure 25: Evolution des contraintes dans les différents tronçons homogène de l'île du Beurre en fonction des débits transitant dans le Rhône.

4.3 Scénario test commun aux modèles 1D et 3D

4.3.1 Topographie et conditions aux limites

La topographie utilisée pour ce test est celle de 2009 (la plus complète pour le modèle 3D). Dans le cas du modèle 3D, un maillage de 3 à 5m dans les lônes est utilisé sans représenter le lit majeur et avec des fonds initiaux non-érodables. Pour le modèle 1D, les deux lônes amont (Chèvre, Beurre) sont divisés en deux tronçons (au PK 0,600 pour la lône de la Chèvre et au PK 0,156 pour la lône du Beurre) alors que la lône aval commune est conservée en un unique tronçon.

Les conditions aux limites amont sont données par un débit variable représentant une crue théorique symétrique (Fig. 26). Cet hydrogramme est construit à partir de la courbe des débits classés sur la base des débits fournis par la Banque Hydro pour les années 2002-2009. Il dure une La condition à la limite aval est prise similaire pour les deux modèles (courbe de tarage présentée Fig. 16).

Pour les concentrations en entrée du modèle, les équation 4, 5 et 6 ont été testées avec le modèle 1D alors que seule l'équation 4 a été testée avec le modèle 3D.

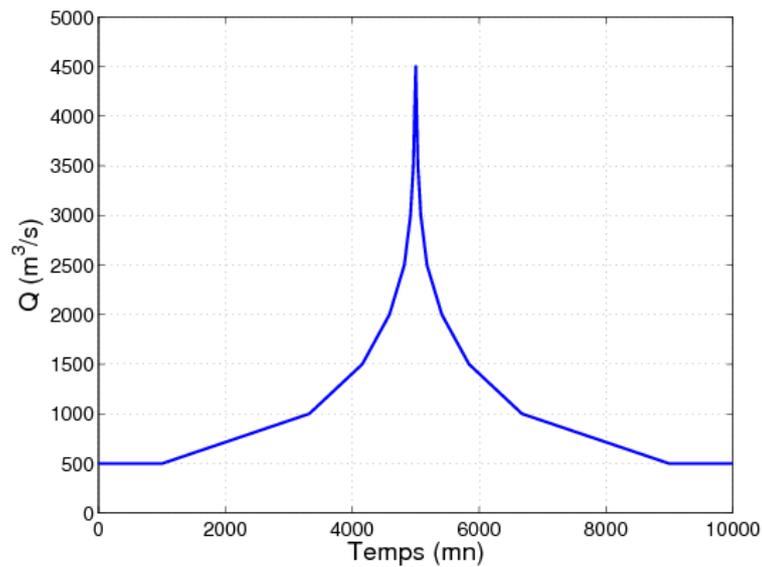


Figure 26: Conditions à la limite amont du modèle.

4.3.2 Résultats du calcul de référence

De manière à disposer d'évolutions bathymétriques annuelles simulées comparables avec les évolutions issues des mesures de terrain (présentées au paragraphe 4.5.1), les évolutions bathymétriques simulées à la fin du calcul sont multipliées par un facteur 50 correspondant au rapport entre la durée d'une année et la durée du scénario hydrologique utilisé pour les calculs. Les résultats du calcul avec le modèle Telemac3D (Fig. 27) indiquent un dépôt annuel moyen de l'ordre de dix centimètres sur la lône du Beurre, d'environ 5 centimètres sur la partie amont de la lône de la Chèvre, et de deux-trois centimètre sur la lône commune. Ceci est tout à fait cohérent avec les observations faites (cf. paragraphe 1.3.2) quoique légèrement sous-estimé pour la lône commune. Il apparaît aussi que les quantité de dépôts observées les plus importantes se localisent sur les marges du Rhône, en particulier en rive droite le long de la lône du Beurre. Ceci n'est pas vérifié par les mesures mais peut s'expliquer du fait que la modélisation n'incluait pas la reprise de sédiments par sapement de berges. Or ce phénomène peut être important dans ce cas.

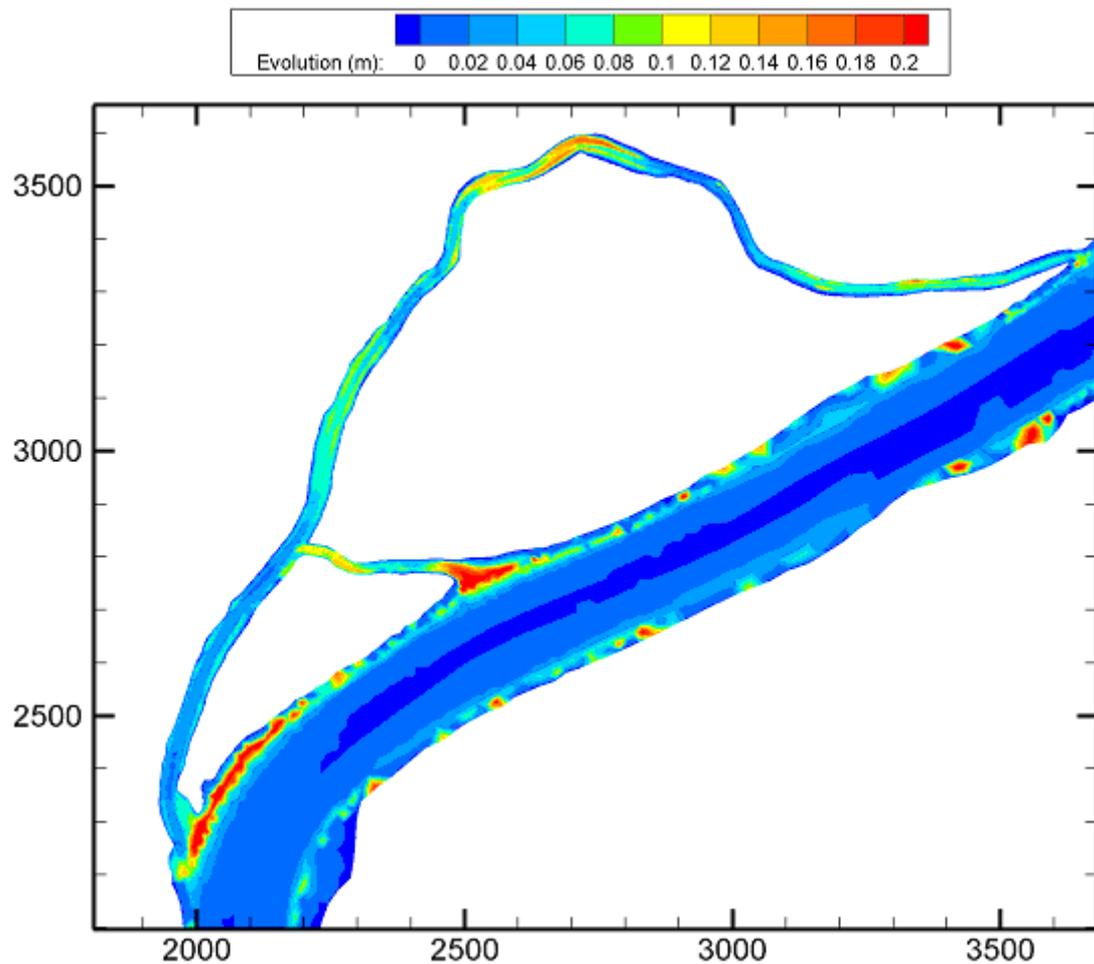


Figure 27: Evolution des fonds obtenue avec le modèle Telemac3D

Il apparaît sur la figure 28 que le dépôt se produit principalement pour les débits moyens et les crues modérées (entre $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3000 \text{ m}^3/\text{s}$), et la tendance globale sur l'ensemble du système des lônes est à l'érosion pour les débits les plus forts. Il peut y avoir érosion localement mais dépôt ailleurs dans le système entraîne une tendance globale au dépôt. Pour caractériser cela, le système des lônes a été découpé en 5 zones. On voit ainsi nettement que c'est l'amont de la grande lône qui est la zone la plus sensible à l'érosion. De Linares et al. (2012) ont aussi montré que la relation débit – taux de dépôt n'est pas univoque : il y a érosion en montée de crue à partir d'environ $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce taux d'érosion chute ensuite car la disponibilité de sédiments érodables (qui se sont déposés précédemment) baisse, jusqu'à ce que l'on se retrouve en situation de dépôt.

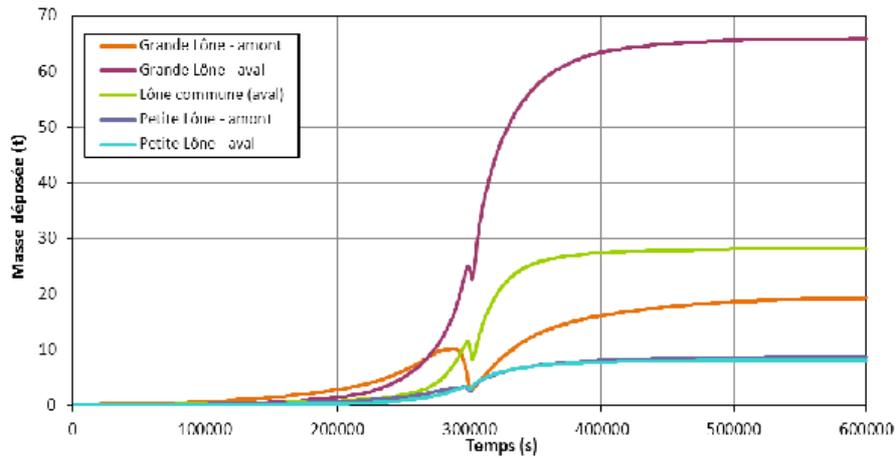


Figure 28: Evolution des dépôts sur les différentes lônes en fonction du temps obtenue avec le modèle Telemac3D.

Pour la modélisation unidimensionnel, plusieurs calculs ont été réalisés afin de tester l'impact des coefficients a_{pd} et a_c sur les quantités de matériaux déposés dans les lônes. Le tableau 9 indique les quantités de sédiments (en tonnes) déposés dans les différentes parties de l'île du Beurre en fonction du choix de ces coefficients. Plus le coefficient a_{pd} est choisi grand, plus la quantité de dépôt ou érosion est importante ; plus le coefficient a_c est petit, plus le dépôt est favorisé par rapport à l'érosion. Si les relations ne sont pas linéaires et peuvent varier selon les biefs, nous observons un comportement tout à fait cohérent (Tab. 9). A titre comparatif avec le modèle Telemac3D, sachant que pour ces calculs les évolutions simulées ont été multipliées par 50 pour avoir une idée des évolutions annuelles, le modèle 1D tend à déposer 10 fois plus que le modèle 3D. Si l'on considère les mesures annuelles réalisées sur la lône du Beurre (cf. Fig. 24), la masse moyenne des sédiments déposées sur la lône pendant une année est de 650 tonnes. Il semble donc que les résultats les plus proches de la réalité et les plus cohérents avec la répartition observées avec le modèle Telemac3C sont obtenus avec les coefficients $a_{pd}=0,2$ et $a_c=5 \cdot 10^{-4}$ g/l.

Tableau 9: Résultats obtenus sur la quantité de sédiments déposés sur la lône du Beurre en fonction des coefficients a_{pd} et a_c (pour comparaison, les résultats avec le modèle Telemac3D est donné en dernière ligne).

Coef. a_{pd}	Coef. a_c	Dépôts lône Chèvre amont (tonnes)	Dépôts lône Chèvre aval (tonnes)	Dépôts lône Beurre amont (tonnes)	Dépôts lône Beurre aval (tonnes)	Dépôts lône commune (tonnes)
0,1	$1 \cdot 10^{-3}$	7,6	14,9	1,4	1,7	2,6
0,2	$5 \cdot 10^{-4}$	17,9	26,6	6,7	7,9	5,6
1	$1 \cdot 10^{-4}$	55,7	58,2	28,4	28,8	13,3
Telemac3D		19	66	9	8	28

La figure 29 présente pour chacune des classes de sédiments les quantités déposés sur les différents tronçons du modèle. Il apparaît clairement que la classe la plus fine ($d=8 \mu\text{m}$) bien que représentation 65 % des MES en masse ne représente plus de 10 % des dépôts en masse.

Globalement, les dépôts sont composés à part à peu près égale de sédiments correspondant aux deux classes les plus grossières, soit $d = 20 \mu\text{m}$ et $d = 50 \mu\text{m}$. Ces résultats sont tout à fait cohérents avec les mesures réalisées sur la lône du Beurre (cf. Figs. 7 Et 8) bien que la part des sédiments très fins ($d = 8 \mu\text{m}$) et celle des sables ($d = 50 \mu\text{m}$) semblent sous-représentées par rapport aux limons ($d = 20 \mu\text{m}$). Sur la figure 29a, on peut noter qu'une masse non négligeable des MES s'est déposée sur le bief amont au modèle, représentant au finale les plus forts dépôts sur le modèle. Ces dépôts correspondent a priori aux zones où l'écoulement est plus lent du fait des ouvrages (amont du barrage de Vaugris par exemple). Comme indiqué sur la figure 29a, en regardant les masses déposées par unité de surface, ces valeurs apparaissent bien plus faibles que sur l'île du Beurre. Les résultats de répartition des dépôts obtenus sur l'île du Beurre apparaissent tout à fait cohérent à l'exception de la lône commune où les dépôts semblent faibles par rapport aux autres sections (voir aussi le tableau 9).

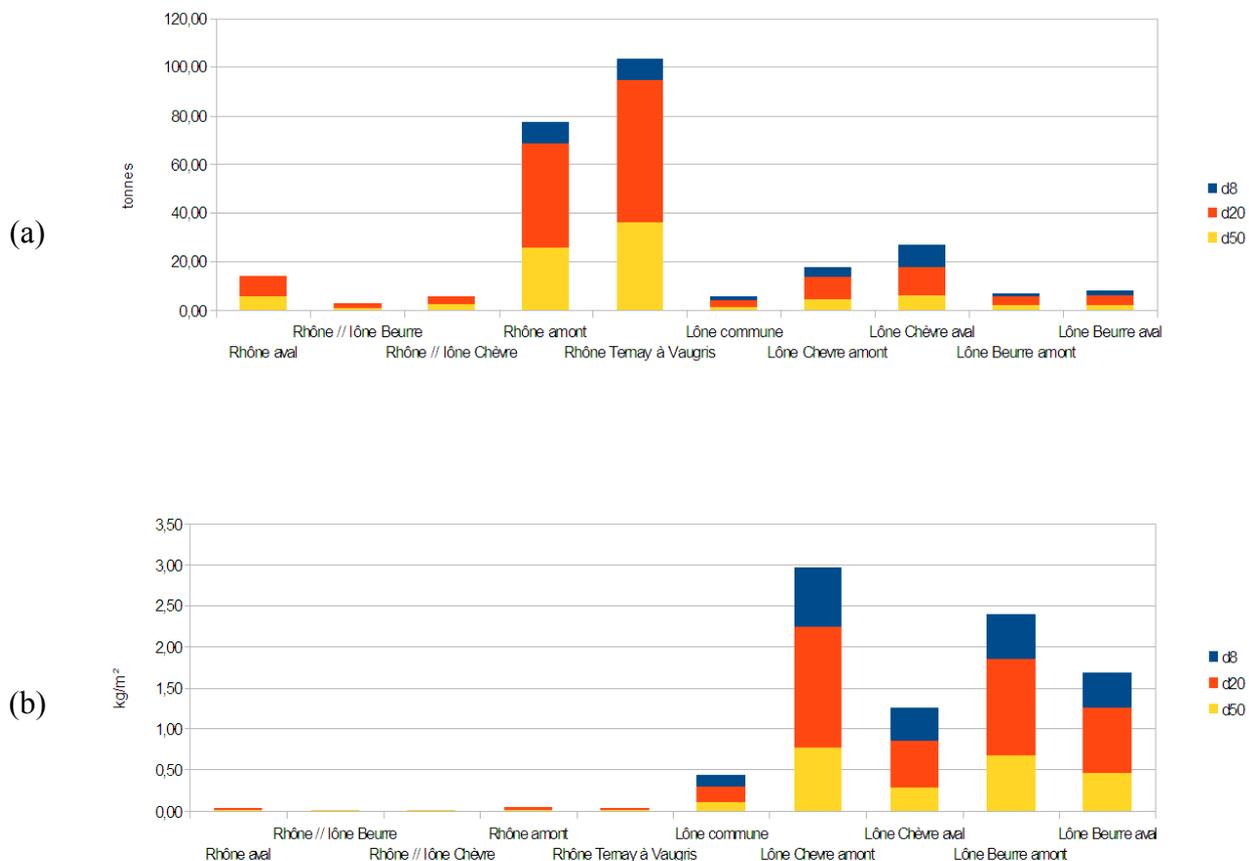


Figure 29: Evolution spatiales des dépôts après la chronique de référence sur les différents tronçons du modèle en fonction de la taille des particules obtenue avec le modèle Mage-AdisTS avec les coefficients $a_{pd} = 0,2$ et $a_c = 5 \cdot 10^{-4} \text{ g/l}$ (a : masse totale, b:masse par unité de surface).

4.4 Scénario sur la chronique de débit de 2002 à 2009

Un calcul a été réalisé sur l'ensemble de la chronique de 2002 à 2009 (cf. Fig. 9) afin de vérifier les capacités du modèle à reproduire des résultats sur une longue chronique. Les paramètres du modèle ont été pris identiques aux calculs de référence avec les coefficients $a_{pd} = 0,2$ et $a_c = 5 \cdot 10^{-4} \text{ g/l}$ en partant de la topographie de 2002. Les résultats des dépôts sur les différents biefs du modèle sont

présentés sur la figure 30 et le tableau 10. Comme les biefs de la lône de la Chèvre et de la lône du Beurre n'ont pas été découpés en deux biefs pour le modèle avec topographie de 2002, les valeurs sont indiqués directement pour l'ensemble des deux lônes respectivement. D'un point de vue qualitatif (répartition des dépôts dans les lônes, répartition des dépôts pour chacune des classes de sédiment), les résultats sont tout à fait similaires. D'un point de vue quantitatif, sachant que la simulation de référence est basée sur une courbe des débits classés, il est possible d'estimer les évolutions à plus long terme en multipliant par un coefficient. Sachant que la simulation de référence dure environ 7 jours, les résultats sur 8 ans peuvent ainsi être estimés en multipliant les évolutions après 7 jours par le coefficient $365/7 \times 8 = 420$. Les résultats des deux simulations diffèrent légèrement avec des valeurs issues de la chronique de 2002 à 2008 50 % plus faibles que celles issues du calcul de référence.

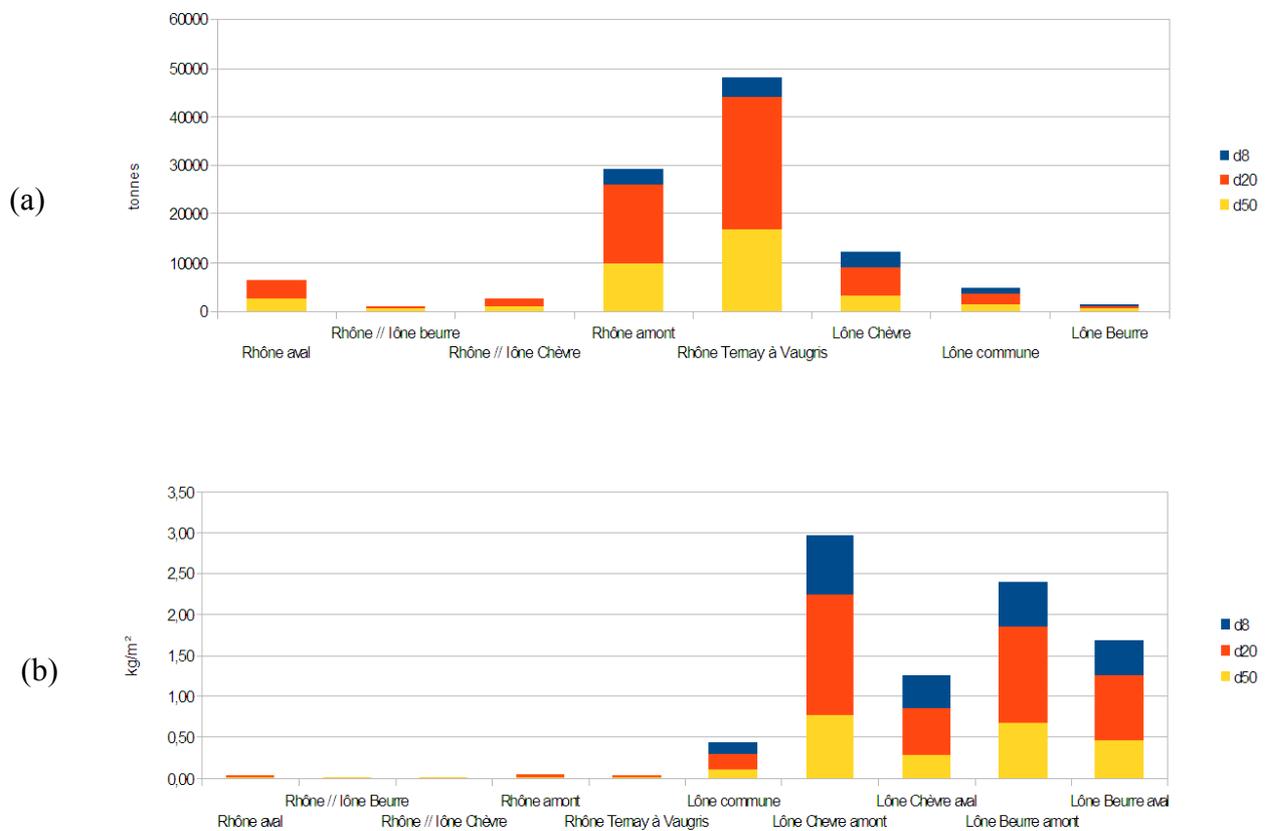


Figure 30: Evolution spatiales des dépôts après 8 années de chronique sur les différents tronçons du modèle en fonction de la taille des particules obtenue avec le modèle Mage-AdisTS avec les coefficients $a_{pd}=0,2$ et $a_c=5 \cdot 10^{-4}$ g/l (a : masse totale, b:masse par unité de surface).

Le tableau 10 indique une comparaison des résultats des simulations avec Mage et Adis-TS avec les mesures réalisées (cf. paragraphe 1.3.2). Le modèle donne des résultats très encourageants par rapport aux mesures car ils sont du même ordre de grandeur. Sachant que le choix des coefficients a_{pd} et a_c influent de façon non-négligeable les résultats (cf. Tab. 9), un calage plus précis de ces paramètres pourrait permettre d'améliorer les résultats. Il faut cependant à noter que les résultats sont meilleurs pour la lône du Beurre que pour la lône commune aval. Ceci peut s'expliquer du fait que le modèle tend à surestimer les contraintes de cisaillement pour la lône aval (cf. paragraphe

4.2), impliquant sans doute une certaine limitation des dépôts dans ce bief. Les mesures indiquent cependant de forts dépôts sur la lône commune.

Tableau 10: Résultats obtenus sur la quantité de sédiments déposés sur les différents bras de l'île du Beurre pour les 8 années de chronique (Eq. 5 pour le calcul des concentrations, $a_{pd}=0,2$ et $a_c=5 \cdot 10^{-4}$ g/l).

Calcul	Dépôts lône Chèvre (tonnes)	Dépôts lône Beurre (tonnes)	Dépôts lône commune (tonnes)
Calcul référence sur 8 ans	18700	6150	2350
Chronique de 2002 à 2009	12250	4700	1300
Mesures	-	7700	7350

La figure 31 montre les évolutions mesurées et modélisées des dépôts sur la lône du Beurre et la lône commune. Nous retrouvons bien les résultats précédents, soit une estimation moyenne plus proche de la réalité pour la lône du Beurre. Il apparaît cependant que le modèle est moins sensible à l'hydrologie, et à la reprise des sédiments que ce que nous pouvons observer en nature. Ainsi, alors que les évolutions annuelles dans la lône du Beurre varient de 0 à 2500 tonnes déposées en nature, le modèle indique des variations de 300 à 1000 tonnes déposées par an.

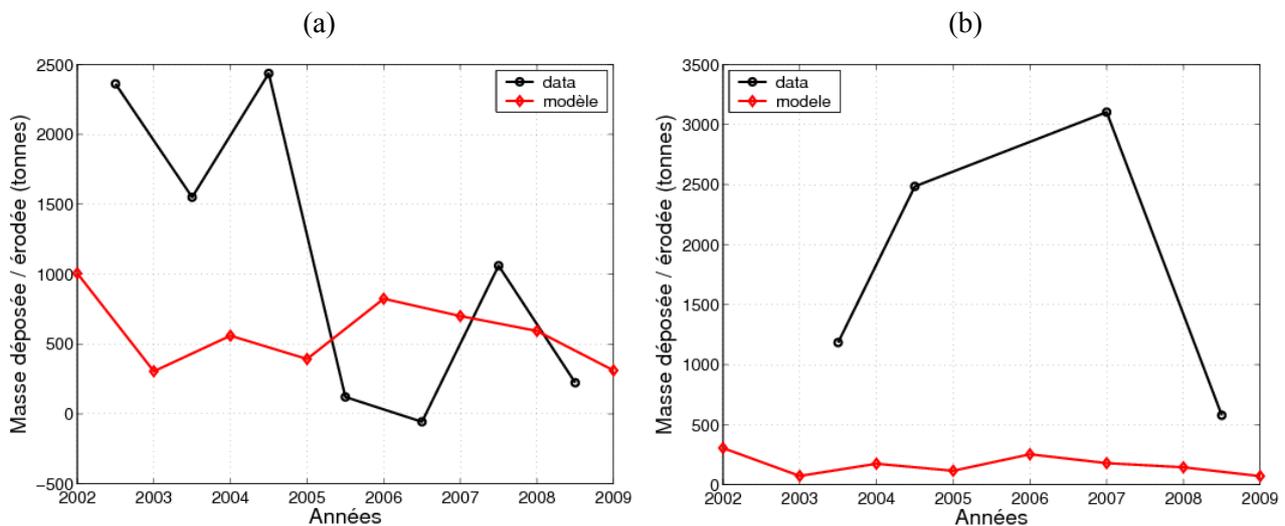


Figure 31: Evolution des dépôts/érosions mesurées et déposées dans la lône du Beurre amont (a) et dans la lône commune (b).

5 Conclusion

Les travaux présentés dans ce rapport ont consisté en l'analyse d'un système de lônes en accrétion typique du Rhône: la lône du Beurre. Cette étude a été réalisée avec partir des données expérimentales à disposition et avec l'aide d'une modélisation numérique uni-dimensionnelle (Adis-TS) et tri-dimensionnelle (Telemac3D). L'objectif de ces simulations est de pouvoir simuler le comportement des marges alluviales du Rhône à deux échelles (détaillée sur l'échelle de l'événement avec le modèle 3D, et plus grossière mais à l'échelle de la décennie avec le modèle 1D).

Le travail sur la modélisation proprement dite a permis de valider la possibilité des outils à reproduire un comportement cohérent des lônes d'un point de vue hydrosédimentaire et à apporter ainsi une meilleure compréhension de la dynamique des lônes. Il reste cependant encore de nombreuses incertitudes dans l'estimation quantitatives des évolutions morphologiques, en partie liée aux incertitudes propres aux données expérimentales.

Les différentes analyses de données et résultats de calcul présentés dans ce rapport seront repris et analysés dans le livrable "aide à la décision" (de Linares et al., 2012) afin d'être mis en perspective par rapport à la problématique de gestion du stock de sédiments pollués au PCB du Rhône.

6 Bibliographie

- Andries, E., Faure, J.B. & Camenen, B. (2012a). Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS. Rapport Axelera
- Andries, E., Faure, J.B. & Camenen, B. (2012b). Modélisation hydro-sédimentaire du site de Miribel-Jonage à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS. Rapport Axelera
- CNR (2001). *Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône - la dynamique fluviale du Rhône*. Rapport technique, Compagnie Nationale du Rhône.
- De Linares, M., Faure, J.B., Gandillon, F. & Camenen, B. (2012). Aide à la décision. Rapport Axelera.
- De Linares, M. & Gandillon, F. (2012). Etude des transferts de sédiments fins dans le système Rhône : modélisation fine sur deux sites pilotes. Rapport Axelera-Artelia N°1741264-R1.
- Hydratec-Sogréah-Minéa (2001). *Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône : Étude du transport solide (Synthèse de première étape)*. Rapport technique, IRS.
- Le Coz, J., Launay, M., Lagouy, M., Coquery & M., Angot, H. (2011) *Eléments de réponse aux questions de l'Agence de l'EAU RM&C concernant l'acquisition d'une centrifugeuse fixe pour équiper la station de mesure du Rhône à Jons*. Note interne Irstea.
- Le Normant, C. (1995) Modélisation numérique tridimensionnelle des processus de transport des sédiments cohésifs en environnement estuarienne. *Thèse de Doctorat*, Institut Polytechnique de Toulouse, France, 236 p.
- Partheniades, E. (1965). Erosion and Deposition of Cohesive Soils. *Journal of Hydraulics Division* 91:105-139.
- Sogréah (2000). *Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône : Étude du transport solide (Diagnostic de l'état actuel, calculs de transport solide)*. Rapport technique, IRS.