

Cette opération est cofinancée par l'Union européenne. L'Europe s'engage sur le bassin de la Loire avec le Fonds Européen de Développement Régional.

**MAITRISE D'OEUVRE POUR LE PROGRAMME DE RÉÉQUILIBRAGE
DU LIT DE LA LOIRE ENTRE LES PONTS-DE-CÉ ET NANTES**

LOT 1 AMÉNAGEMENT DE BELLEVUE

ETUDES SUR MODELE PHYSIQUE

LIVRABLE 21 : ETALONNAGE ET PROGRAMME D'ESSAI



MODIFICATIONS ET MISES À JOUR

Indice d'évolution	Date de version	Modification / commentaires	Faite par
0a	25/01/2017	Première version	Roux/Alliau/Flohr
1a	16/02/2017	Extraction du chapitre 5 «Programme d'essai » du LIV10	Roux/Alliau/Flohr
1b	17/08/2017	Version complète avec intégration de l'addendum Essai en canal vitré	Roux/Alliau/Flohr
1c	30/08/2017	Intégration remarques VISA LOIRE-LOT 1-VISA-LIV21-MP-PROGRAMME-D-ESSAI-v1c	Roux/Alliau/Flohr
2a	27/10/2017	2 ^{ème} émission	AMO/MOA

Informations qualité

Opération	Marché de maîtrise d'œuvre pour la mise en œuvre du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes
Mission	Maitrise d'œuvre
Titre du document	Livrable 21 : ETALONNAGE ET PROGRAMME D'ESSAI
Date	Octobre 2017
N° SCORE	WAMC013FLG

Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
0a	25/01/2017	ROUX / ALLIAU	FLOHR
1a	16/02/2017	ROUX / ALLIAU	FLOHR
1b	17/08/2017	ROUX / ALLIAU	FLOHR
1c	30/08/2017	ROUX / ALLIAU	FLOHR
2a	27/10/2017		AMO/MOA

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Commentaires / Envoyé le :
Mme PERARD M PICHON	VNF	30/10/2017, déposé dans l'onglet livrable sous serveur ftp
M PEETERS M CORTIER	HYDRATEC	

Sommaire

1. OBJET	6
1.1. CONTEXTE	6
1.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DU MODÈLE PHYSIQUE	6
2. MODÈLE HYBRIDE	7
2.1. HYBRIDATION : ÉLÉMENTS DE JUSTIFICATION	7
2.2. LES COMPOSANTES EN JEU	7
2.2.1. MODÈLE 1D GLOBAL HYDRARIV	7
2.2.2. MODÈLE 2D LOCAL TELEMAR-2D	8
2.2.3. MODÈLE PHYSIQUE	9
3. CONDITIONNEMENT AUX LIMITES	10
3.1. PK61.3 (AVAL) : COURBE D'ÉQUIVALENCE EN TRANSPORT SOLIDE	10
3.2. PK64.95 (AMONT) : APPROCHE STATISTIQUE DES DÉBITS	11
3.3. PK64.95 (AMONT) : LOI DE TRANSPORT ISSUE DES MESURES IN SITU	12
3.4. PK64.95 (AMONT) : CHAMPS DE VITESSE EN ENTRÉE	14
3.4.1. DONNÉES D'ENTRÉE	14
3.4.2. RÉSULTATS	15
4. ÉTALONNAGE DES INSTRUMENTS DE MESURE	18
4.1. CAPTEURS DE NIVEAU À ULTRASON	18
4.2. ALIMENTATION EN DÉBIT LIQUIDE	19
4.3. ALIMENTATION EN DÉBIT SOLIDE	19
4.4. MESURE DE DÉBIT LIQUIDE EN AVAL	21
4.5. MESURE DU DÉBIT SOLIDE EN AVAL	22
5. CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX	23
5.1. GRANULOMÉTRIE	23
5.2. DENSITÉ	25
6. ÉTALONNAGE DES MATERIAUX	26
6.1. RAPPEL DES BIAIS IDENTIFIÉS	26
6.2. OBJECTIF DES ESSAIS EN CANAL VITRÉ	26
6.3. MODE DE TRANSPORT	26
6.4. OBSERVATION DU SEUIL DE MISE EN MOUVEMENT DES MATÉRIAUX DE FONDS	27
6.4.1. THÉORIE DE LA CONTRAINTE CRITIQUE ET SON UTILISATION DANS LA FORMULE MEYER-PETER ET MULLER	27

6.4.2.	LES MESURES EN CANAL VITRÉ	27
6.5.	FACIÈS DU FOND	28
6.6.	RUGOSITÉ DU MATÉRIAU	29
6.7.	CAPACITÉ DE TRANSPORT	31

7. PROGRAMME D'ESSAIS **33**

7.1.	LISTE DES ESSAIS DE PRÉ-CALAGE ET CALAGE	34
7.2.	ESSAIS DE CALAGE	35
7.3.	ÉTATS DE RÉFÉRENCE À 15 ANS	36
7.4.	PLANNING PRÉVISIONNEL DES ESSAIS	36

8. ANNEXES **38**

8.1.	PLAN D'INSTRUMENTATION	38
8.2.	PROCOLE D'ESSAI EN CANAL VITRÉ	39
8.2.1.	GÉOMÉTRIE DU SYSTÈME	39
8.2.2.	CHOIX DES CONDITIONS AUX LIMITES CIBLES	40
8.2.3.	PRÉPARATION DES MATÉRIEAUX	40
8.2.4.	TYPES D'ESSAIS	40

Figures

Figure 1 :	Composantes du modèle hybride et zone d'influence tidale	9
Figure 2 :	Principes de calcul de la courbe de tarage synthétique sur modèle 1D	10
Figure 3 :	Courbe de tarage synthétique au PK58	11
Figure 4 :	Répartition des débits liquides BP/BS.....	12
Figure 5 :	Loi de transport calculée par TELEMATC aux frontières du MP	13
Figure 6 :	Champ des vitesses moyennes en entrée du bras principal pour des débits variant entre 500 et 3 500 m ³ /s	14
Figure 7 :	Champ des vitesses moyennes en entrée du bras secondaire pour des débits variant entre 1 500 et 3 500 m ³ /s.....	15
Figure 8 :	Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – Q _{BP} = 500 m ³ /s.....	16
Figure 9 :	Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – Q _{BP} = 850 m ³ /s	16
Figure 10 :	Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – Q _{BP} = 1 416 m ³ /s.....	17
Figure 11 :	Synthèse des profils de vitesse en entrée du modèle physique obtenus après mise en place des grilles	17
Figure 12 :	Graphique représentant la droite de régression h =f(i) pour le capteur L05 du chariot	18
Figure 13 :	Courbe de fonctionnement des pompes Seepex	20
Figure 14 :	Courbe d'étalonnage du débit en fonction de la hauteur d'eau sur le seuil principal	21

Figure 15 : Courbe granulométrique de la fraction 1-2 mm	23
Figure 16 : Courbe granulométrique de la fraction 2-4 mm	24
Figure 17-Courbe granulométrique du mélange 25/75 %	24
Figure 18 : Photographie latérale du canal vitré (essai 5) – déplacement de particules charriés au fond.....	27
Figure 19 : Évolution de τ° en fonction du débit liquide	28
Figure 20 : Valeurs caractéristiques pour la formation des dunes (source : Ramette)	28
Figure 21 : Photographies a) et b) des dunes dans le canal vitré, et relevé laser des dunes c).....	29
Figure 22 : Photo du canal vitré après l'essai 3	31
Figure 23 : Courbes granulométriques (essais en canal vitré)	32
Figure 24 : Courbe de débits classés sur la période de calage sédimentaire (2009-2013) ...	33
Figure 25 : Conditions d'essai pour l'évènement de calage (nature) avec 70% de la loi de transport nominale.....	35
Figure 26 : Conditions d'essai pour l'évènement de calage (modèle) avec 70% de la loi de transport.....	35
Figure 27 : Conditions d'essai pour l'évènement de référence (nature) avec 70% de la loi de transport nominale.....	36
Figure 28 : Conditions d'essai pour l'évènement de référence (modèle) avec 70% de la loi de transport.....	36
Figure 29- Photographie des installations du canal vitré.....	39

1. OBJET

1.1. Contexte

Le groupement EGIS – CNR a en charge la mission de Maitrise d'œuvre pour le lot 1 de l'opération « Rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes, soit Maitrise d'Ouvrage VNF (marché n° 16 21 I 072.0 du 23/08/2016). Le lot 1 concerne l'aménagement de Bellevue situé vers le PK63 de la Loire.

La tranche Conditionnelle n°1 Élément de Mission 8 (modèle physique) a été notifiée le 15 novembre 2016 pour une durée prévisionnelle de 18 mois.

La liste des livrables de cette phase est la suivante :

- LIV10 : conception du modèle physique de la Loire transmis le 16 février 2017;
- LIV21 : étalonnage et programme d'essais, dont une première version a été transmise également en février 2017 ;
- LIV11 : calage hydro-sédimentaire et définition de l'état de référence, à venir d'ici la fin d'année 2017 ;
- LIV12 : définition de l'état projet, pour les études en phase AVP (niveau APD).

Le présent document constitue le livrable LIV21.

1.1. Rappel des objectifs du modèle physique

Le modèle physique doit permettre d'appréhender à l'échelle des aménagements projetés la dynamique sédimentaire de la Loire en situation actuelle et pour différentes configurations d'aménagement. Ce modèle physique permettra d'optimiser les performances recherchées par les travaux en termes de remous solide, dans le respect des exigences demandées par les partenaires du programme en terme environnemental, d'usages et de maîtrise des inondations.

Les objectifs principaux seront donc de:

- vérifier l'impact sédimentaire de l'aménagement de Bellevue sur un horizon de 15 ans **en termes de tendance morphologique** ;
- définir la configuration ou les configurations possibles des aménagements permettant de répondre à l'objectif de création d'un remous solide, tout en respectant les contraintes du site (navigation actuelle sur le fleuve, circulation piscicole, maintien des fonctionnalités des bras secondaires de l'île Clémentine et du bras du Thouaré connectés à l'aménagement...),
- vérifier la loi de perte de charge nécessaire pour créer les conditions de dépôt solide des matériaux en amont pour les débits morphogènes dominants ;
- vérifier que l'aménagement proposé ne génère pas de survitesses trop importantes au droit des piles du pont de Bellevue, ce qui pourrait provoquer potentiellement des affouillements.

Le modèle physique constituera également un **outil de communication** à l'attention des partenaires, des représentants des usagers, des professionnels et des associations de riverains, afin de faciliter l'adhésion au projet. Afin d'optimiser les études sur modèle physique celui-ci sera couplé avec le modèle numérique 2D hydro-sédimentaire.

2. MODÈLE HYBRIDE

2.1. Hybridation : éléments de justification

Avant d'indiquer le programme d'essais spécifiques à la modélisation physique, il est indispensable de décrire la méthodologie d'ensemble, qui repose sur un modèle hybride, à savoir l'utilisation couplée de modèles numériques et physique.

Nous le verrons dans les paragraphes qui suivent, la modélisation hybride ou modélisation par emboîtement de modèles est la seule réponse méthodologique pertinente actuellement vis-à-vis de la variabilité des questions posées. Il ne peut exister un et un seul modèle sur le secteur de Bellevue, ceci est d'autant plus vrai qu'il est sous **influence tidale majeure**.

- Le conditionnement aux limites du modèle physique ne peut être autonome : la relation Q/Z à la frontière amont au PK65 n'est pas univoque car elle dépend fortement du niveau de mer. Le modèle physique nécessite la connaissance des écoulements aux différents points d'injection (bras de Thouaré et de Loire). La loi de transport dans le domaine physique est vérifiée à partir des calculs réalisés au PK64 par le modèle 2D et la condition aval synthétique éventuellement ajustée. Les essais seront de type « événement synthétique ».
- Le conditionnement aux limites du modèle local 2D ne peut être autonome pour la même raison que précédemment, au PK73. La loi de transport est étalonnée à partir des mesures *in situ* au PK73 (Cf. LIV22 Mesures de transport solide). Il permet cependant de préciser les conditions aux limites du modèle physique (en termes hydrauliques et de capacité de transport de sable) et de tester différents aménagements à long terme (de 10 à 50 ans). Ce modèle est le seul outil local en capacité de simuler des chroniques réelles longues.
- Le conditionnement aux limites du modèle global Hydrariv est autonome puisque les conditions hydrauliques à la frontière amont sont indépendantes de l'état de mer (station de Montjean-sur-Loire). Le module de transport solide doit en revanche être à nouveau étalonné en fonction des mesures *in situ* (c'est-à-dire convergence des flux solides entre les mesures, les calculs 2D et Hydrariv).

En conséquence, le modèle hybride repose sur l'emboîtement chronologique théorique suivant : modèle 1D global vers 2D local vers modèle physique. Nous verrons par la suite que l'aspect sédimentaire complexifie les échanges entre numérique et physique.

2.2. Les composantes en jeu

2.2.1. Modèle 1D global Hydrariv

Le modèle Hydrariv a été développé par Hydratec au cours des études de définition du programme d'aménagement de la Loire, dont la dernière version date de 2015. Il couvre un linéaire de 100 km entre Ponts-de-Cé et le Pellerin. La condition limite amont est de type $Q(t)$ Loire à Montjean et $Q_s(t)$ associé. Le point d'influence maximal de la marée est Ancenis, la condition amont n'est donc pas influencée par la marée.

Le modèle est construit à partir du modèle numérique de terrain unifié de 2009/2010. Il a été calé en régime permanent en ligne d'eau par 3 événements en 2011 et 2012 (150, 900 et 2300 m^3/s) pour des coefficients de marées de vives eaux (114, 96 et 91). L'alimentation des différents bras a été calée à partir des données de jaugeage ADCP. Les scénarios

hydrauliques de référence considèrent une condition aval synthétique à la station du Pellerin de type Z(t), ne représentant pas les cycles journaliers de marée.

Le module sédimentaire a été utilisé pour prédire les fonds sur une chronique hydrologique de 75 ans représentant une hydraulique moyenne (à partir de la chronique 1965-2005) mais **n'a pas fait l'objet de calage sédimentaire spécifique**. Les apports solides amont ont été évalués par la formule de Meyer-Peter Muller pour un sable de diamètre médian 1.2 mm.

Notons que le modèle Hydrariv sera utilisé par EGIS dans le cadre des études d'impacts, uniquement sur le volet hydrodynamique. Hydratec, AMO, conserve une mission de simulation hydro-sédimentaire pour vérifier que les projets qui seront développés dans le cadre des 3 lots sont conformes au programme global.

2.2.2. Modèle 2D local TELEMAC-2D

CNR réalise le modèle TELEMAC-2D sur environ 15 km entre les PK73 et PK58. Le calage de la partie hydrodynamique se fait sur 6 lignes d'eau (dont 1 utilisées par Hydratec en 2013), ainsi que sur 1 jaugeage ADCP.

L'objectif premier (chronologiquement parlant) du modèle hydrodynamique est de réaliser des itérations de dimensionnement sur 3 solutions d'aménagement pour converger vers une unique solution qui alimentera la phase AVP.

Compte tenu de l'influence de la marée dans le domaine 2D, Hydratec a fourni les conditions aux limites en régime transitoire pour tous les événements de calage, c'est-à-dire aux PK58 et PK73 en Q(t) et Z(t). Le calage a permis de déterminer une rugosité des fonds (et par conséquent une méthode de calcul de la contrainte de cisaillement) : loi de Strickler variable en fonction du débit.

La gamme de débit à investiguer est de [300-3500] m³/s, avec possibilité de fournir des courbes Z/Q jusqu'au plein bord (entre la voie ferrée en RD et la levée de la Divatte en RG, pour Q >> 3500 m³/s) pour détecter des impacts en crue.

La phase de calage hydro-sédimentaire (Cf. LIV6 calage du modèle numérique) a été effectuée par analyse bathymétrique entre 2 campagnes espacées de 1308 jours et grâce aux mesures *in situ* de flux de sable. Le code a permis une étude paramétrique sur le type de loi de transport solide ainsi que différents paramètres intrinsèques à ces lois (étendue granulométrique, valeur de contrainte critique de cisaillement et constante de la formule MPM par exemple). L'objectif hydro-sédimentaire sera d'étudier le domaine à 15 et 50 ans en état actuel et en état aménagé.

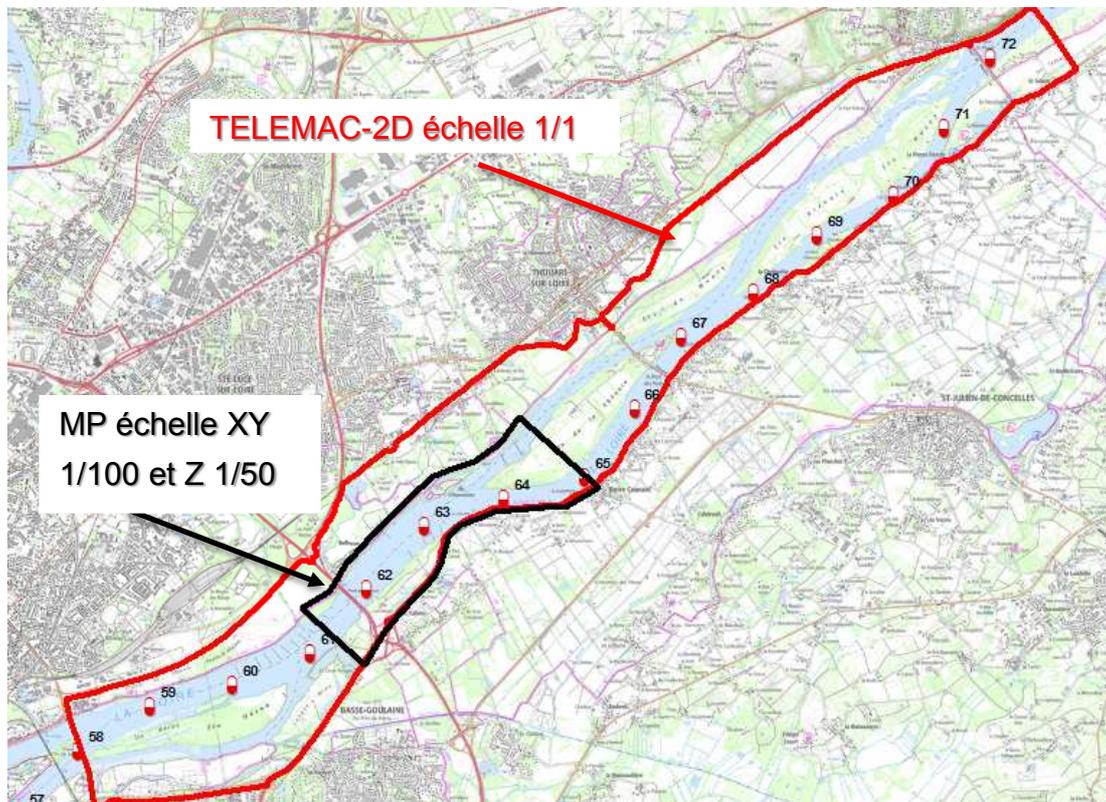
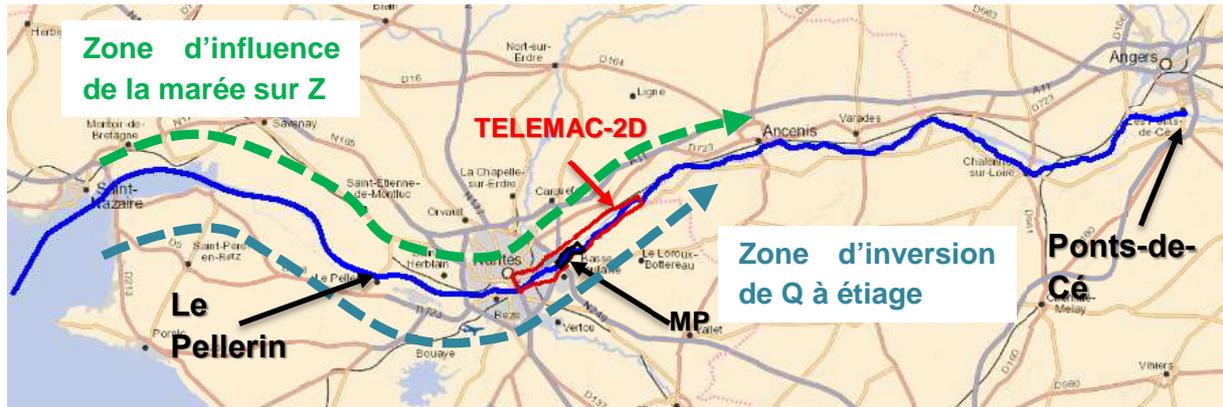


Figure 1 : Composantes du modèle hybride et zone d'influence tidale

2.2.3. Modèle physique

Le modèle physique est à fond mobile, d'échelle 1/100 en XY, 1/50 en Z et en distorsion de densité 1/33. L'échelle des temps sédimentaires est d'environ 1/1320. La gamme de débit à investiguer est [250-3500] m³/s sur la base des débits classés (Cf. LIV10 rapport de conception).

Étant donné les limitations de conditionnement indiquées pour le modèle physique, seule l'imposition d'une courbe de tarage synthétique équivalente en transport solide est réalisable. Il faut ainsi imposer un évènement « synthétique » Q_{liq} à Montjean-sur-Loire au PK64.95 et Z_{tarage} au PK61.3. Un chapitre de ce rapport décrit exhaustivement ce principe.

3. CONDITIONNEMENT AUX LIMITES

3.1. PK61.3 (aval) : courbe d'équivalence en transport solide

Le cycle des marées en période de vives eaux peut se faire sentir jusqu'en amont d'Ancenis. Cette influence se traduit pour un débit donné et pour un observateur se situant en un point donné du fleuve, par une variation des cotes d'eau au cours de la marée avec une diminution des pentes hydrauliques, durant le flot et une augmentation durant le jusant. On observe également sur une distance plus ou moins importante en fonction du coefficient de la marée, une inversion du courant du fleuve durant le flot. Compte tenu de cette contrainte et des objectifs de simulations à 75 ans, Hydratec a été amené à proposer dans le cadre de ses études pour le GIP Loire Estuaire, une courbe de tarage d'équivalence en transport solide. Autrement dit, la courbe Q/Z est censée être équivalente en termes de volume de sables transportés pendant des cycles réels de marée.

Cette courbe a été définie à partir de la méthode suivante :

- Calcul des courbes $Q_s = f(Q_{liq})$ à la station du Pellerin pour différentes cotes de marée comprises entre -5.0 et 1.5 m IGN69 ;
- Calcul pour différents débits en Loire compris entre 200 et 6000 m³/s du débit solide moyen transitant à la station du Pellerin au cours d'un cycle de marée de moyennes eaux (coefficient 70).
- Définition des points d'intersection des courbes calculées pour différentes cotes en Loire avec la courbe $Q_s = f(Q_{liq})$ calculé pour un cycle de marée de moyennes eaux.
- Reconstitution de la courbe $Z(Q_{liq})$ au Pellerin constitué par les points précédemment définis.

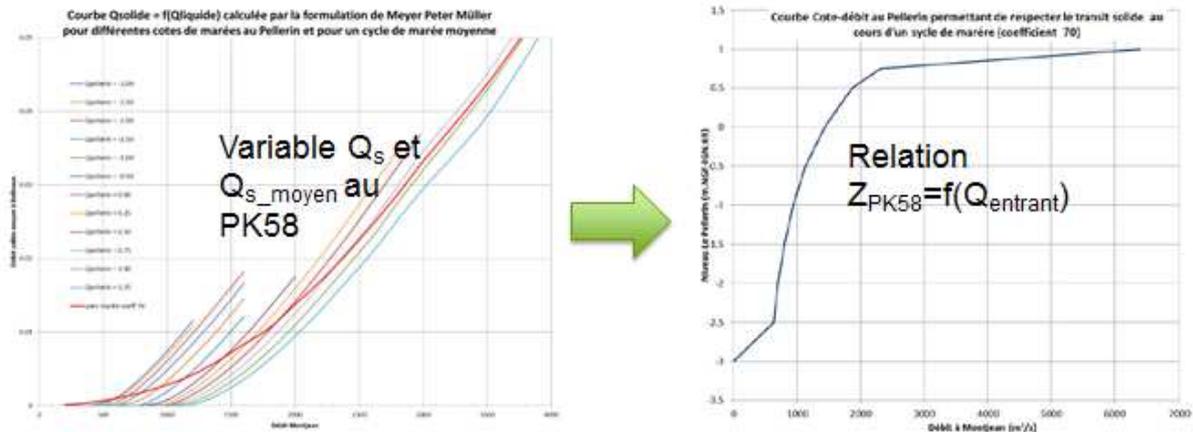


Figure 2 : Principes de calcul de la courbe de tarage synthétique sur modèle 1D

Sur ce principe, CNR a demandé à Hydratec de fournir la relation $Z=f(Q_{liq})$ non pas à la station du Pellerin mais au droit de Bellevue (PK61.3) en intégrant un recalage sédimentaire d'Hydrariv (calage sur la base des mesures *in situ*). Cette condition a été reconstituée en aval des aménagements potentiels. Nous verrons par la suite pendant la phase de calage que cette courbe sera ajustée (en Z) de façon à satisfaire les réelles conditions de transport de sable (début de transport notamment).

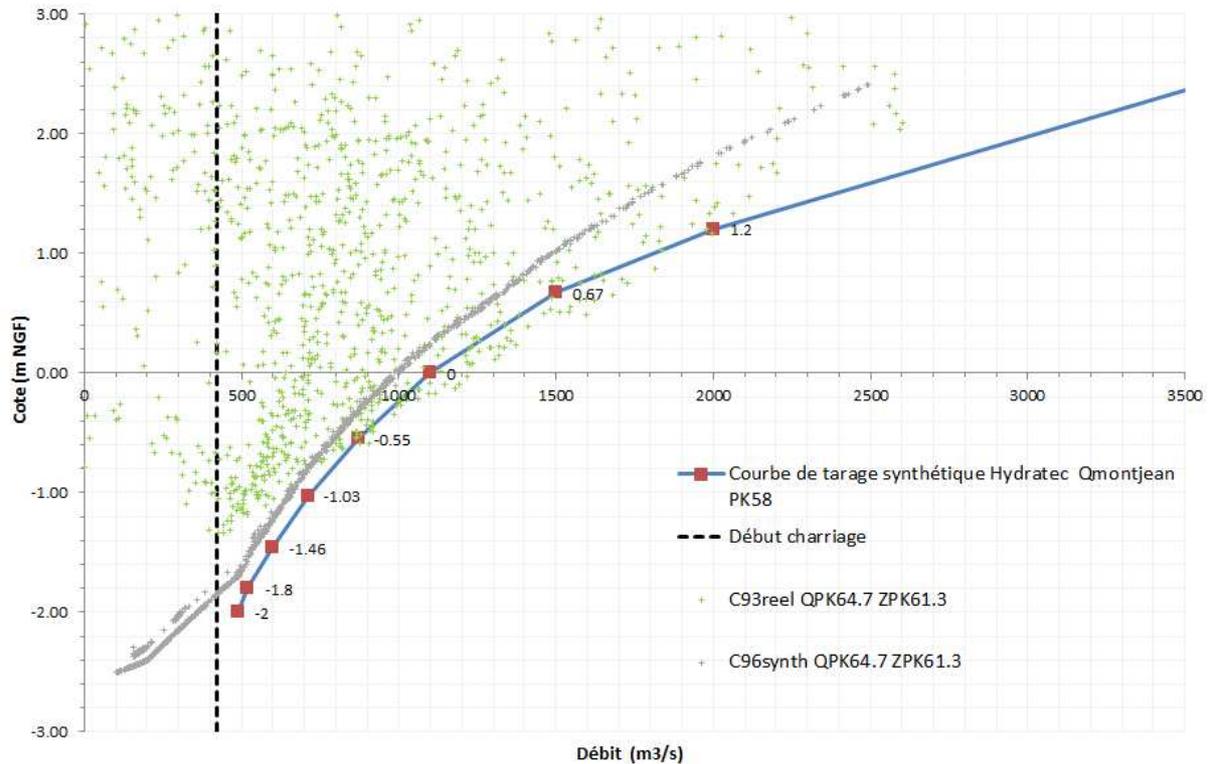


Figure 3 : Courbe de tarage synthétique au PK58

Une analyse spécifique de cette hypothèse de conditionnement a été réalisée par modélisation numérique (Cf. LIV6) et montre que **l'imposition synthétique en aval** n'est valable que dans le domaine du modèle physique, à la stricte condition d'être ajustée par les essais (phase de calage) de façon à reproduire fidèlement le transport de sable en Loire.

3.2. PK64.95 (amont) : approche statistique des débits

Deux points fondamentaux sur la partie aval du modèle guident le choix de la représentation des débits en amont :

- Le temps sédimentaire du modèle physique ne permet pas de représenter les cycles de marées ;
- L'imposition d'une courbe synthétique équivalente en transport solide permet d'envisager une relation univoque entre $Q_{PK64.95}$ et $Z_{PK61.3}$.

Il a donc été nécessaire d'envisager une approche statistique ou synthétique des débits sur la base de l'hydrologie réelle de l'évènement de calage (2009-2013 soit 3,5 ans) : méthodes des débits classés, débits moyens mensuels, chronique simplifiée... Initialement les débits classés avaient été choisis comme base pour représenter de manière simplifiée les volumes hydrauliques et sédimentaires du modèle. Cette méthode nous permettait de décomposer la série en palier tout en conservant les volumes transitant de manière précise.

Suite au Comité Scientifique de mars 2017, il a été décidé de porter une attention particulière aux alternances de débits entre crue et étiage pour améliorer théoriquement le comportement morphologique.

Une analyse spécifique de cette hypothèse de conditionnement en débit a été réalisée par

modélisation numérique (Cf. LIV6) et présentée en Comité Scientifique en juin 2017 et montre que **l'imposition de débits moyens mensuels** (i.e. variations saisonnières), à la stricte condition que l'évènement à simplifier (l'évènement de calage) soit statistiquement représentatif, produit des effets sédimentaires très proches d'un conditionnement réel en débit.

Grâce à la modélisation 2D, la répartition des débits entre le Bras Principal (BP) et Bras Secondaire (BS ou bras de Thouaré) est connue.

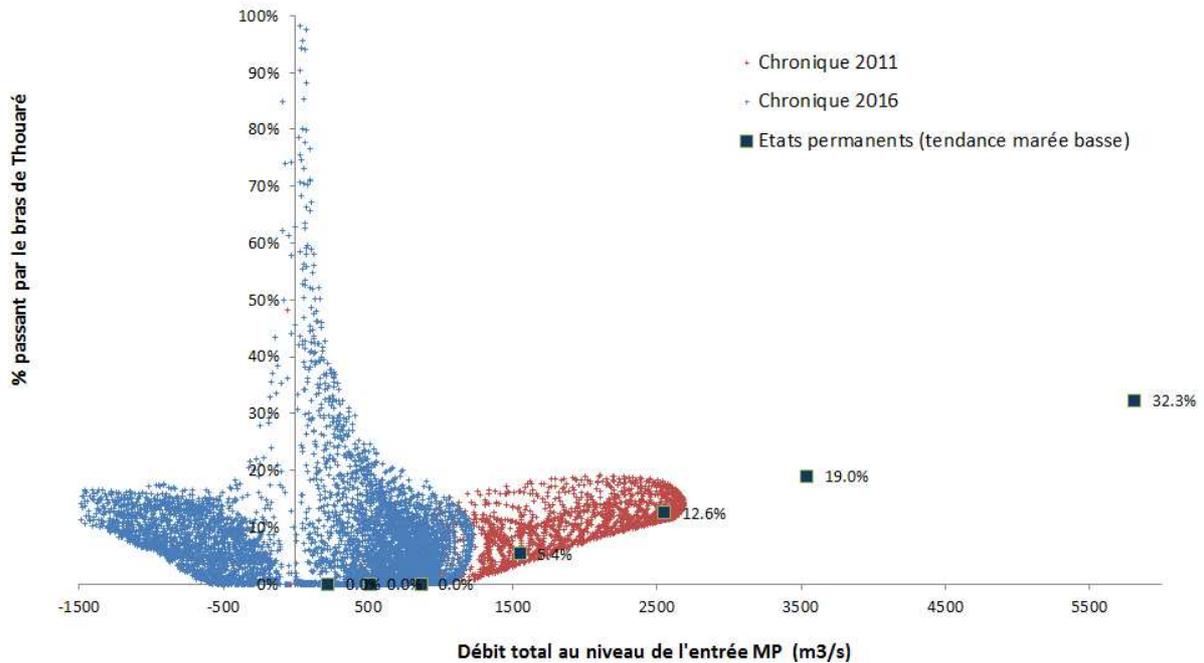


Figure 4 : Répartition des débits liquides BP/BS

3.3. PK64.95 (amont) : loi de transport issue des mesures in situ

La phase de calage du modèle physique permettra d'affiner ce point et d'étudier la sensibilité à cette hypothèse. À ce stade, il est choisi d'utiliser la loi de transport calculée par modélisation 2D au PK64.95, elle-même calée à partir des mesures sédimentaires au PK73 (Cf. LIV6). La masse volumique du sable est de 2650 kg/m^3 .

Le débit solide est présenté sous forme massique (kg/s) ou volumique (m^3/s) sans tenir compte des vides.

On parlera alors de loi de transport nominale.

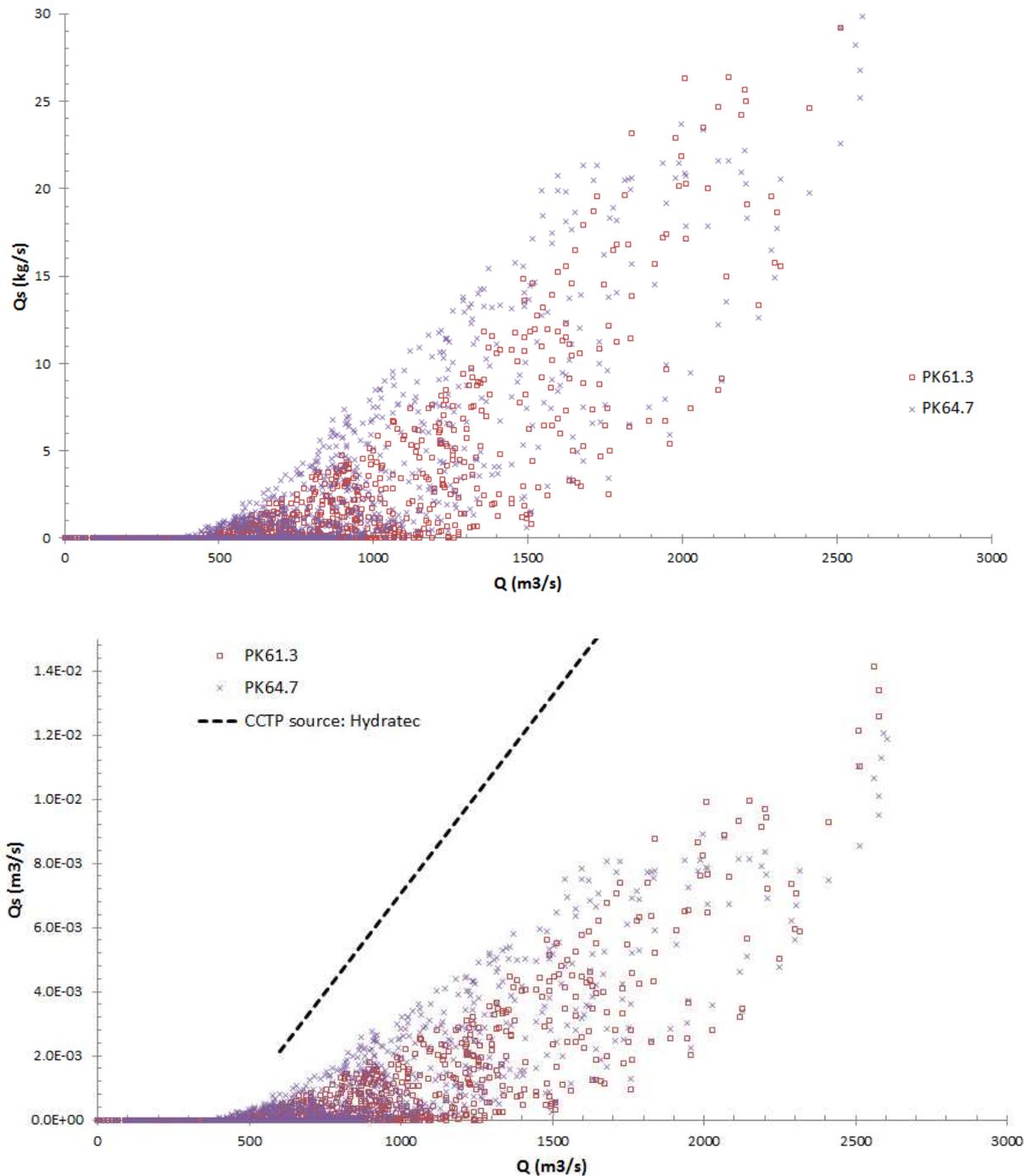


Figure 5 : Loi de transport calculée par TELEMAC aux frontières du MP

Le débit de début de transport est d'environ 420 m³/s. On constate un léger amortissement de la capacité de transport depuis l'amont vers l'aval sur environ 3 km. Le nuage de point correspond à l'évènement de calage 2009-2013, c'est pourquoi pour un même débit liquide, le transport varie en fonction de la cote à la sortie du modèle.

Si l'on considère **70% de la courbe enveloppe supérieure du nuage de point**, le transport de sable annuel est de l'ordre de 110 000 tonnes ce qui est conforme avec les mesures *in situ*. Cette hypothèse sera prise par défaut lors des essais de calage et pourra être ajustée par la suite. L'étude de sensibilité reposera sur l'application du %.

3.4. PK64.95 (amont) : champs de vitesse en entrée

3.4.1. Données d'entrée

Le calage du champ de vitesse en entrée du modèle s'effectue sur la base des vitesses calculées par le modèle numérique TELEMAC au PK 64.95 du bras principal. Les champs de vitesse calculés par le modèle numérique sont présentés sur la Figure 6, le bras principal et sur la Figure 7 pour le bras secondaire.

Le modèle n'étant pas à fond fixe, l'objectif du calage n'est toutefois pas de reproduire finement le champ de vitesse en entrée mais de retrouver la tendance du profil de vitesse dans la section d'entrée du modèle physique afin notamment de satisfaire les conditions d'entraînement des matériaux. Selon le programme d'essais envisagés (modélisation des débits moyens mensuels), il est prévu de réaliser des paliers en régime permanent, pour des débits variant entre 220 à 1 500 m³/s.

Sur le bras principal, on note que la distribution des vitesses est relativement symétrique malgré des vitesses en RD un peu plus faibles qu'en RG pour des débits de la Loire entre 500 et 2 500 m³/s.

Par la suite, il sera présenté un profil de vitesse numérique encadré à +/- 15% pour représenter l'incertitude du modèle.

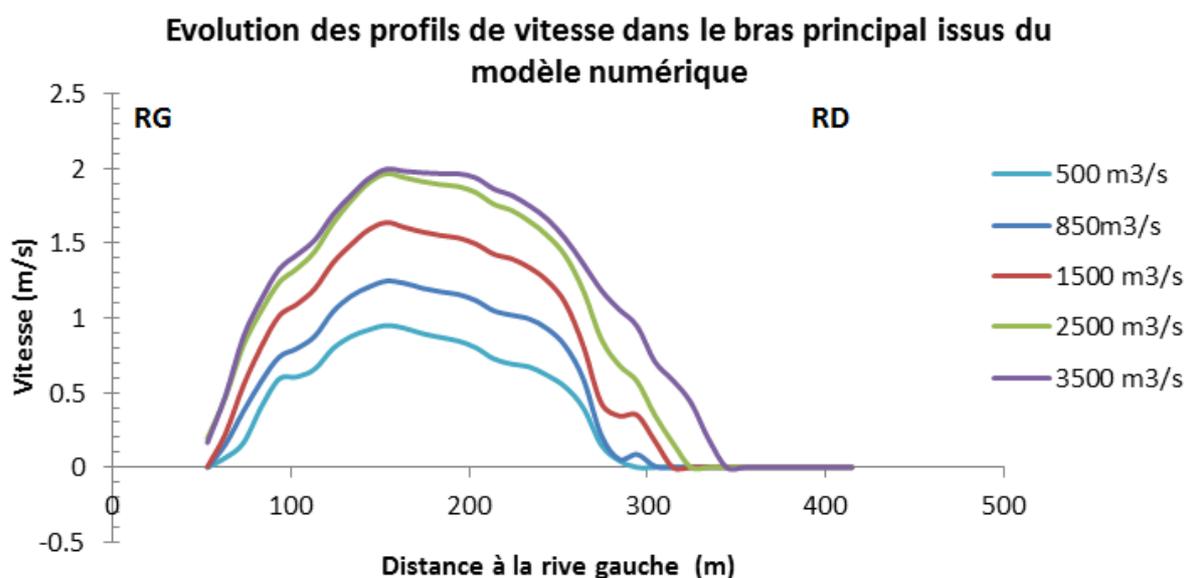


Figure 6 : Champ des vitesses moyennes en entrée du bras principal pour des débits variant entre 500 et 3 500 m³/s

Les profils sont moins réguliers sur le bras secondaire en raison de la faible hauteur d'eau et du lit de sable qui change de forme à chaque crue.

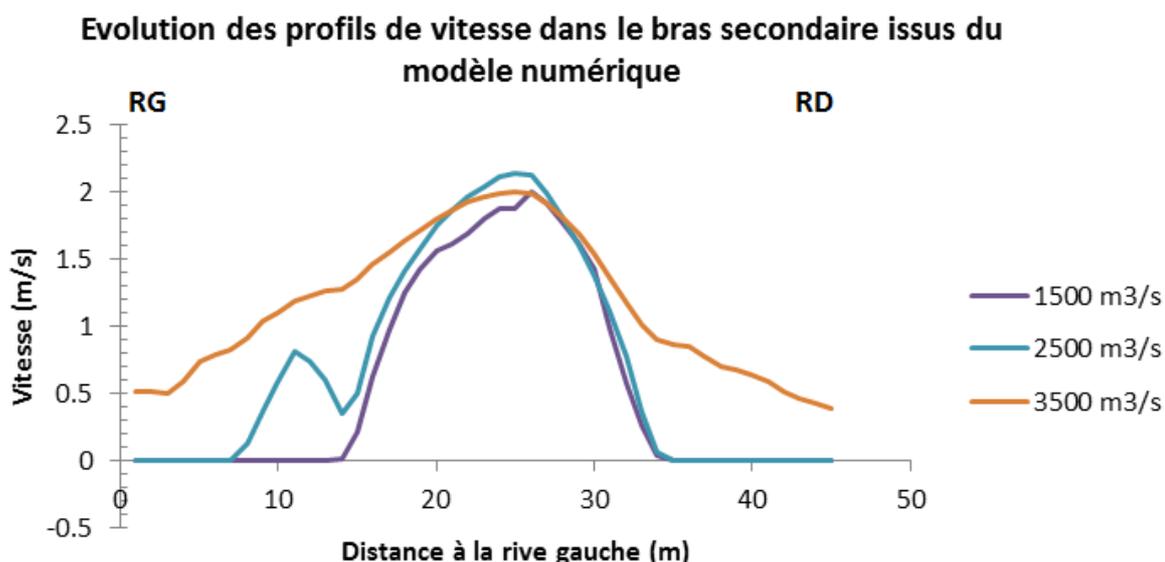


Figure 7 : Champ des vitesses moyennes en entrée du bras secondaire pour des débits variant entre 1 500 et 3 500 m³/s

Le calage a été réalisé sur les trois configurations correspondant à des conditions observées sur site.

Débit total Loire m ³ /s	Débit bras principal m ³ /s	Débit bras secondaire m ³ /s	Cote au PK64.95 m NGF	Cote au PK64.7 amont MP (m NGF)	Cote au PK61.3 m NGF
500	500	0	-0.53	-0.55	-1.01
850	850	0	0.32	0.30	-0.22
1 500	1 416	84	1.43	1.39	0.85

Tableau 1 : Configurations hydrauliques utilisées pour l'étalonnage des vitesses

Les vitesses sont mesurées au PK 64,95 à l'aide d'un micro-moulinet tous les 30 cm sur le modèle (soit 30 m réels), ce qui conduit à un minimum de 8 points de mesure (ce nombre augmente avec le débit), et 6 cm sous la surface du plan d'eau (soit 3 m réels). Dix mesures sont réalisées pour chacun des points, chacune de ces mesures correspondant à une vitesse moyennée sur 10s.

Le calage est effectué de manière itérative, le champ de vitesse étant ajusté par la mise en place de grilles de différents diamètres (0.5 cm, 1 cm, 2.5 cm) et de briques alvéolées.

3.4.2. Résultats

Pour chacun des trois graphiques suivants, la courbe représentant le champ de vitesse obtenu (MP) est annotée des écarts types dus au moulinet.

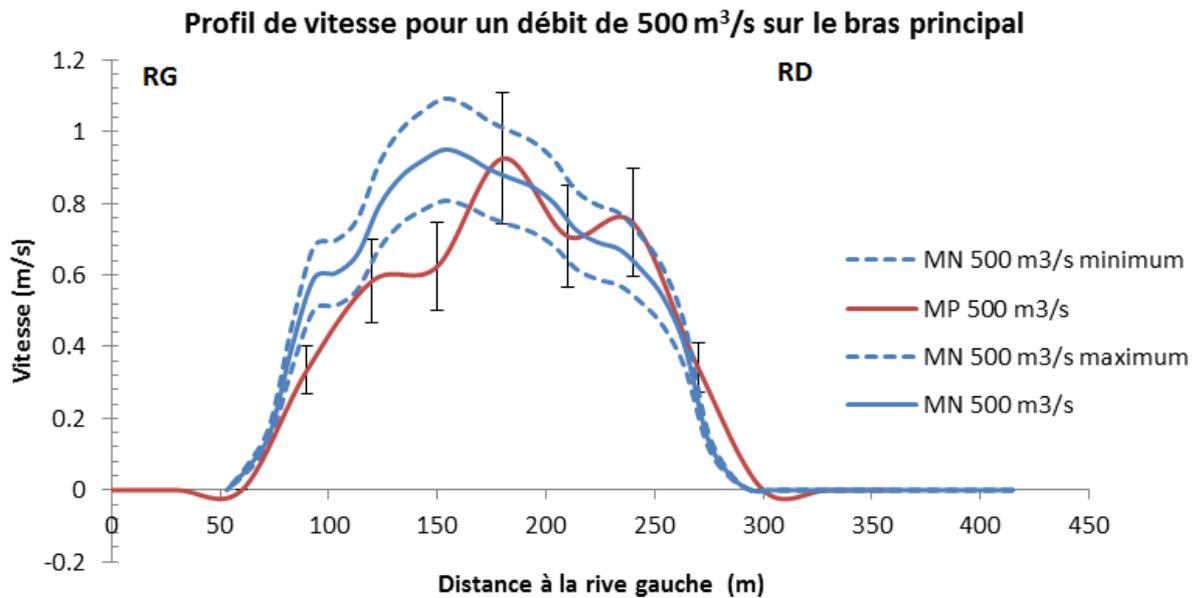


Figure 8 : Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – $Q_{BP} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

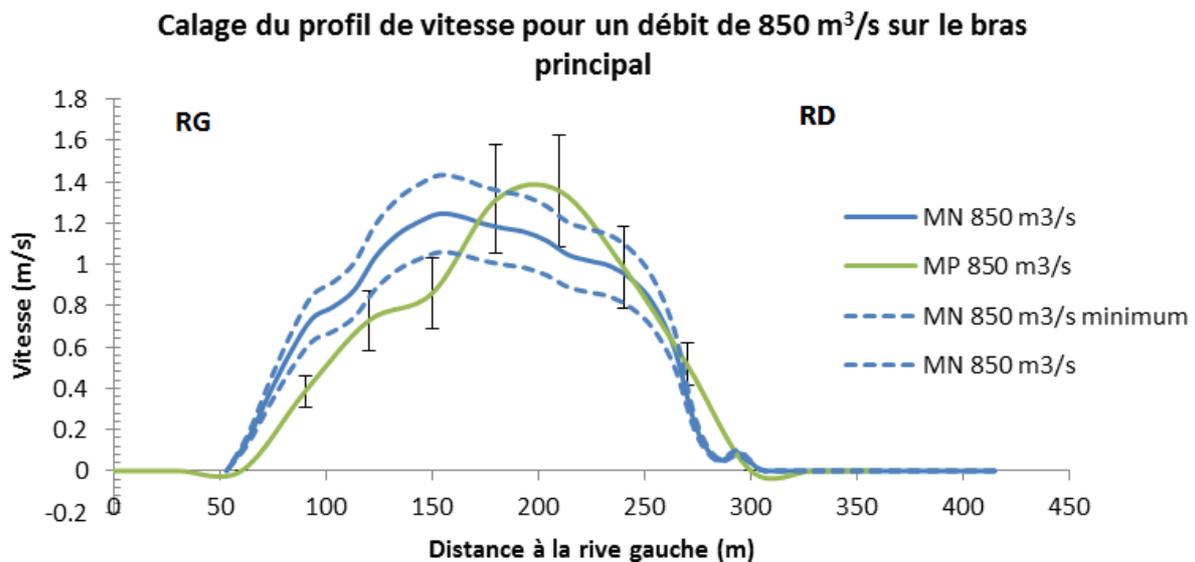


Figure 9 : Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – $Q_{BP} = 850 \text{ m}^3/\text{s}$

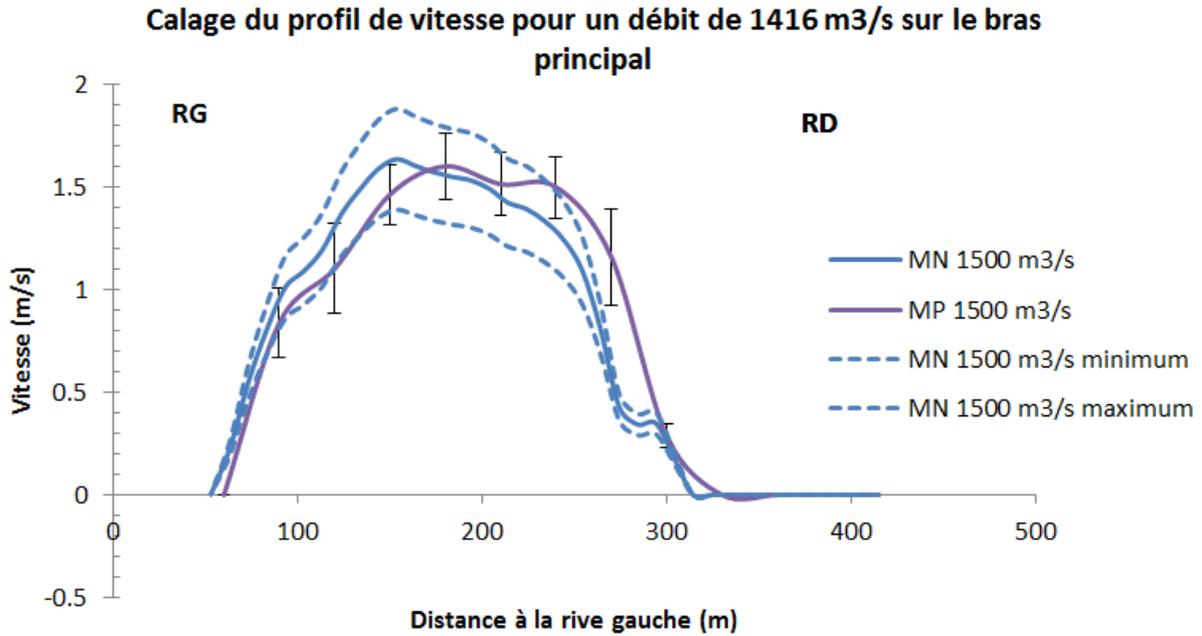


Figure 10 : Comparaison entre le profil de vitesse mesuré sur modèle physique en entrée du modèle et calculé par le modèle numérique – $Q_{BP} = 1\,416\text{ m}^3/\text{s}$

Les profils de vitesse en entrée du modèle sur le bras principal sont globalement conformes aux profils obtenus sur le modèle numérique pour les débits testés malgré un léger déséquilibre entre la rive droite et la rive gauche pour lesquelles on a tendance à observer des vitesses respectivement plus fortes et plus faibles que celles issus du modèle numérique. Les écarts maximum observés restent dans la gamme des 30%. La Figure 11 présente la forme des profils obtenus après mises en place des différentes grilles de réglage.

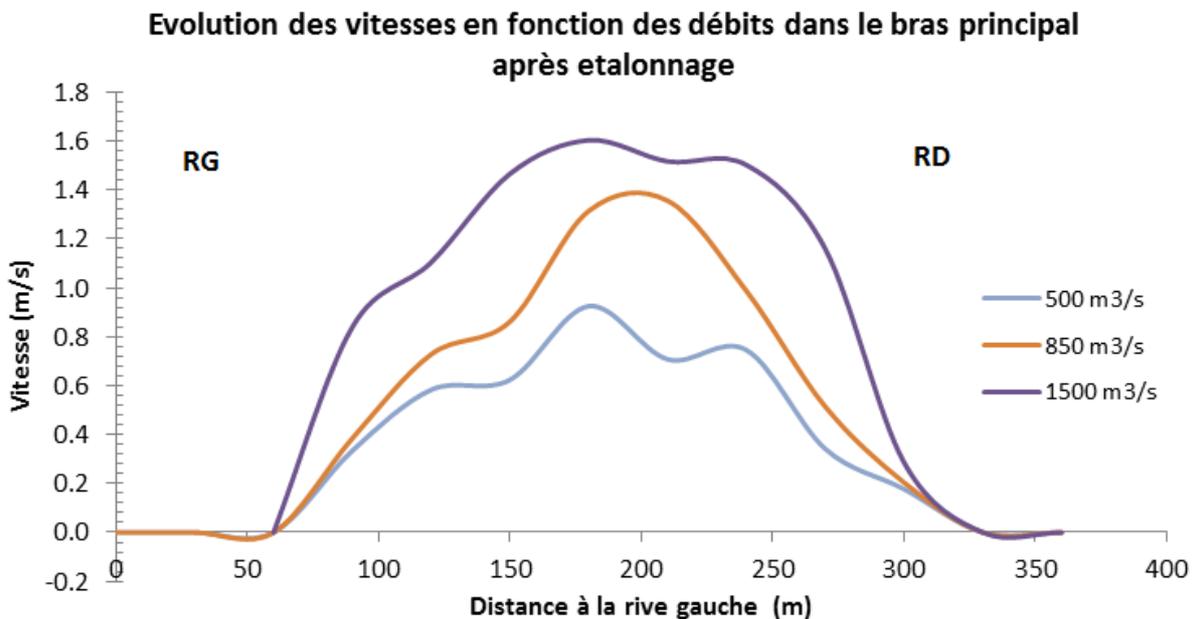


Figure 11 : Synthèse des profils de vitesse en entrée du modèle physique obtenus après mise en place des grilles

Compte tenu de la très faible hauteur d'eau, les vitesses sur le bras secondaire ne sont pas mesurables par micro moulinet ou par un ADV type Vectrino II.

4. ÉTALONNAGE DES INSTRUMENTS DE MESURE

Le plan d'instrumentation, qui a évolué depuis le LIV20 rapport de conception, est annexé au présent rapport.

L'étalonnage des capteurs du modèle physique représente une étape essentielle et incontournable pour garantir la validité des résultats et leur précision.

Cette phase vise à réaliser l'étalonnage :

- des pompes d'injection solide qui permettent l'introduction d'un débit solide en entrée du modèle au PK64.95,
- des systèmes de mesure de niveau d'eau,
- du système de mesure de réglage des volets en aval (PK61.3),
- du système de mesure du débit solide sortant,
- des systèmes de mesure des débits liquides sortants.

4.1. Capteurs de niveau à ultrason

Les capteurs de niveau à ultrason sont étalonnés à l'aide de cales dont les hauteurs sont préalablement calibrées à l'aide d'un pied à coulisse.

Le protocole d'étalonnage de ces capteurs consiste à :

- Mesurer le point de référence du modèle (-13 m NGF) à l'aide d'une mire numérique qui permet de relier les mesures en mm des hauteurs entre les cales et le capteur US à une cote en m NGF,
- Mettre en place une série de cales sous chaque capteur afin de réaliser des mesures sur une dizaine de points permettant de couvrir la gamme de hauteurs d'eau attendues au cours des essais,
- Tracer les points $Z = f(i)$ afin de déterminer la loi de régression qui permettra de calculer la cote du plan d'eau à partir de l'intensité du signal au cours des essais.

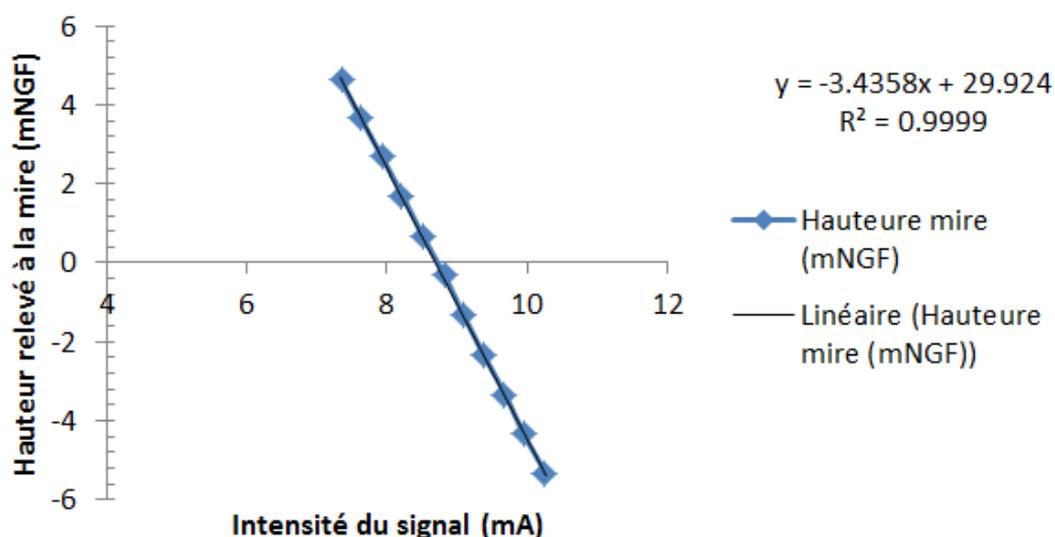


Figure 12 : Graphique représentant la droite de régression $h = f(i)$ pour le capteur L05 du chariot

Lors des essais, la cote fournie par les capteurs US est comparée aux lectures effectuées sur les pointes limnimétriques installées à l'amont et à l'aval du modèle.

4.2. Alimentation en débit liquide

À l'amont le débit liquide est régulé à l'aide de vannes papillons et mesuré par des débitmètres électromagnétiques qui ont été étalonné en laboratoire avant d'être mis en place (précision 0.1% de l'étendue de mesure). Deux conduites de diamètres différents (DN100 et DN200) sont installés sur le bras principal pour permettre un contrôle optimisé du débit liquide. Une seule conduite (DN125) alimente le bras secondaire en raison de la faible plage de débits à couvrir.

4.3. Alimentation en débit solide

L'alimentation en sédiment se fait à l'aide de pompes volumétriques qui permettent une alimentation en matériaux continue et contrôlée. Deux pompes sont assignées à chaque bras pour permettre de couvrir la plage de débits modélisés. On règle leur vitesse de rotation à l'aide d'un variateur de fréquence.

Le Tableau 2 donne une idée de l'ordre de grandeur des débits solides à injecter pour la gamme de débits à tester.

Les débits sédimentaires sont calculés à l'aide de la formule de Meyer Peter et Müller (Cf. paragraphe 3.1).

Débit liquide		Débit solide total		Débit solide BP (BS)	
Nature (m ³ /s)	Modèle (l/s)	Nature (kg/s)	Nature (m ³ /s)	Nature (kg/s)	Modèle (g/s)
220	6.2	0.0	0.00E+00	0	0
500	14.1	0.8	2.92E-04	0.8	0
850	24.0	4.7	1.79E-03	5.0	0
1500	42.4	12.1	4.57E-03	12.2	0.5
2500	70.7	23.5	8.85E-03	21.6	2.9
3500	99.0	34.8	1.31E-02	29.1	7.3

Tableau 2 : Configuration sédimentaire pour le calage

Dans un premier temps on réalise l'étalonnage de chaque pompe fonctionnant de manière isolée pour déterminer la quantité de sédiment distribuée en fonction de la fréquence du variateur de chaque pompe.

Des prélèvements de matériaux ont été réalisés au refoulement des pompes pour:

- Les fréquences minimum, moyenne et maximum des pompes PVE2 et PVE3,
- Les fréquences moyenne et maximum pour la pompe PVE1,
- Les fréquences maximum pour la pompe PVE4.

Chaque échantillonnage est chronométré pour permettre de calculer un débit solide. Après passage au tamis et récupération des sédiments, on pèse et on réalise un séchage des

matériaux à l'étuve (50°C). Pour être considérée comme exploitable, la masse d'un même échantillon ne doit pas varier pendant plus d'une heure. Les pompes PVE1 et PVE2 alimentent le bras principal, les pompes PVE3 et PVE4 alimentent le bras secondaire. Les courbes donnant le débit solide en fonction de la fréquence du variateur de la pompe sont présentées sur la Figure 13 ci-dessous :

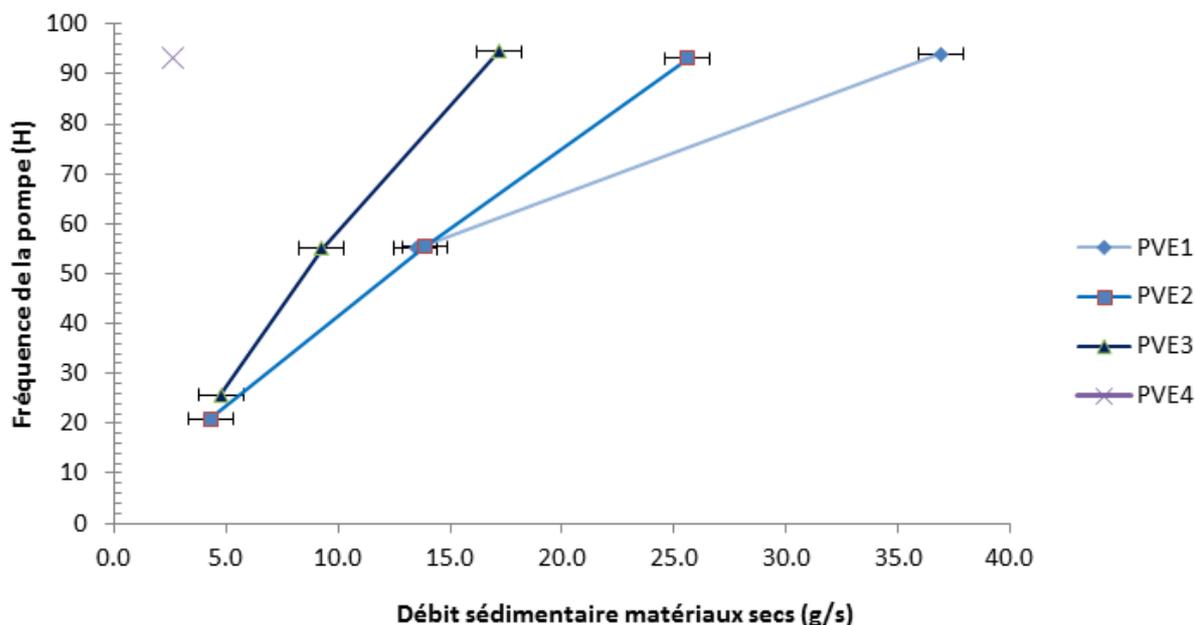


Figure 13 : Courbe de fonctionnement des pompes Seepex

Les pompes permettent d'injecter des débits solides entre 4.3 à 36.3 g/s sur le bras principal et entre 2.6 à 17.2 g/s sur le bras secondaire. Le Tableau 3 ci-dessous détaille les fréquences de réglage envisagées pour chaque pompe dans le cas de l'essai d'étalonnage. Les débits liquides correspondent aux débits moyens mensuels.

Q (m3/s)	Qs_BP	Qs_BS	Bras principal		Bras secondaire	
	en g/s	en g/s	N° pompe	Fréquence pompe	N° pompe	Fréquence pompe
1 440	11.6	0.4	PVE2	46.3	PVE4	Inj manuelle ou 30
1 255	9.6	0.2	PVE2	39.5		Injection manuelle
935	5.9	0.1	PVE2	27.1		Injection manuelle
647	2.6	0				
415	0	0				
527	1.1	0				
279	0	0				
178	0	0				
194	0	0				
292	0	0				
500	0.8	0				
1 210	9.0	0.2	PVE2	37.7		Injection manuelle

Tableau 3 : Tableau de configurations sédimentaires envisagées pour les essais de référence

Une injection manuelle est envisagée dans le cas pour lesquels le débit sédimentaire a injecté est inférieur à la capacité minimum des pompes. Cette alternative conduit à injecter au maximum 9 kg par heure.

4.4. Mesure de débit liquide en aval

La mesure des débits liquides sortant du modèle est réalisée à l'aide de deux seuils jaugeurs :

- Un seuil rectangulaire pour le débit mesuré à l'aval des volets (flux principal),
- Un seuil triangulaire pour le débit prélevé avec les matériaux et filtré par le tamis vibrant (flux secondaire).

L'équation de débitance du seuil rectangulaire est de la forme :

$$Q = m L \sqrt{2gh^3}$$

Avec m le coefficient de seuil, L la largeur déversante du seuil et h la hauteur d'eau sur la crête du seuil.

Le protocole d'étalonnage du seuil consiste à :

- Caler un débit en entrée du modèle en régime permanent et le mesurer à l'aide des débitmètres électromagnétiques,
- Une fois que les niveaux d'eau sont stabilisés dans le modèle, mesurer la hauteur d'eau sur le seuil à l'aide du capteur US,
- Tracer les points $Q = f(h^{\frac{3}{2}})$ afin de déterminer la loi de régression qui permettra de calculer le débit déversé à partir de la mesure de la hauteur d'eau au cours des essais. Cette loi nécessite une droite passant par l'origine, le débit étant nul pour une hauteur d'eau nulle sur le seuil.

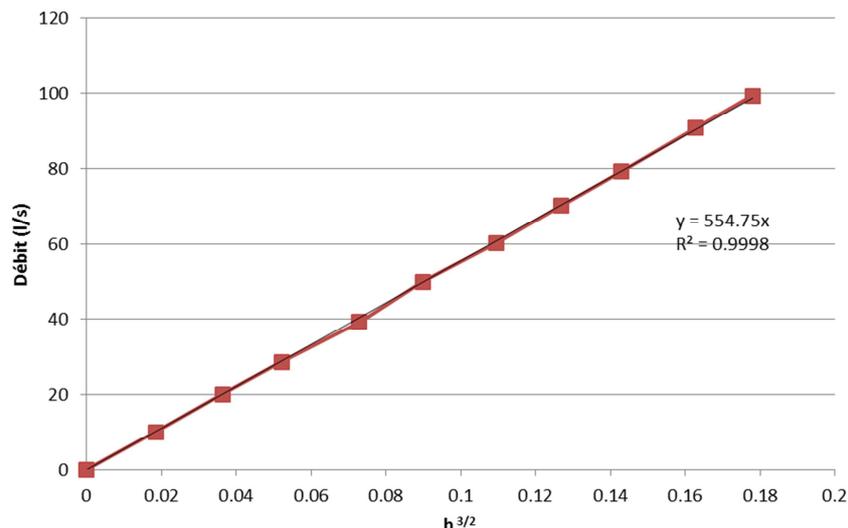


Figure 14 : Courbe d'étalonnage du débit en fonction de la hauteur d'eau sur le seuil principal

L'équation de débitance du seuil triangulaire est de la forme :

$$Q = m L \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g} h^{5/2}$$

Avec m le coefficient de seuil, L la largeur déversante du seuil, α l'angle d'ouverture du seuil et h la hauteur d'eau sur la crête du seuil.

Le protocole d'étalonnage du seuil consiste à :

- Caler un débit en entrée du modèle en régime permanent et le mesurer à l'aide des débitmètres électromagnétiques,
- Une fois que les niveaux d'eau sont stabilisés dans le modèle, mesurer la hauteur d'eau sur le seuil principal à l'aide du capteur US et en déduire le débit sortant.
- Mesurer la hauteur d'eau sur le seuil triangulaire à l'aide du capteur US puis tracer les points $Q = f(h^{5/2})$ afin de déterminer la loi de régression qui permettra de calculer le débit déversé à partir de la mesure de la hauteur d'eau au cours des essais. Cette loi nécessite une droite passant par l'origine, le débit étant nul pour une hauteur d'eau nulle sur le seuil.

4.5. Mesure du débit solide en aval

Les matériaux sortant du modèle sont récupérés à l'aide de deux techniques :

- Une partie des matériaux est charriée vers une fosse de récupération (collecteur) située à l'amont des volets de réglage du niveau. Elle est aspirée à l'aide de pompe et renvoyée sur un tamis vibrant qui permet de séparer l'eau et les matériaux. Ces derniers sont rejetés dans un bac installé sur une balance ce qui permet de mesurer un poids cumulé et de déterminer un débit solide en temps réel;
- Une autre partie reste en suspension dans l'écoulement et est déversée sur les volets de réglage du niveau. Elle est récupérée par des tamis fixes, collectée en fin d'essai et pesée.

En fin d'essai, le cumul des poids des matériaux récupérés par le tamis vibrant et par les tamis fixe permet de déterminer un débit solide moyen sur la durée de l'essai.

Ce procédé de mesure ne nécessite pas de réaliser un étalonnage à part pour la balance.

5. CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX

Les matériaux ont été livrés dans 22 big-bag de 1T chacun, 6 sacs contenant des matériaux de classe granulométrique 2-4 mm (n° 1 à 6) et 16 sacs contenant des matériaux de classe granulométrique 1-2 mm (n°7 à 22).

Le matériau mis en place dans le modèle est un mélange mécanique des 2 classes granulométriques, il est composé de 25% de matériaux 2-4 mm et 75% de matériaux de classe 1-2 mm. Afin de valider les matériaux reçus, il a été nécessaire de contrôler que la granulométrie des deux classes et du mélange ainsi que la densité étaient conformes à la demande.

5.1. Granulométrie

Les matériaux de chaque sac ont fait l'objet d'une analyse granulométrique. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une sonde à grain en perforant les sacs à différentes hauteurs.

L'analyse granulométrique est réalisée sur un échantillon de 200 grammes. Ce dernier est passé à travers différents tamis de 5, 2.5, 1.2, 0.63, 0.315, 0.16, 0.08 mm.

Les Figure 15 et Figure 16 présentent les résultats des granulométries pour chaque échantillon et les valeurs enveloppes (bornes supérieure et inférieure) qui définissent un fuseau acceptable pour les granulométries des matériaux livrés par le fournisseur. On constate :

- que les courbes granulométriques de chaque échantillon sont relativement homogènes pour chacune des deux classes,
- que ces granulométries sont dans la tranche haute du fuseau souhaité.

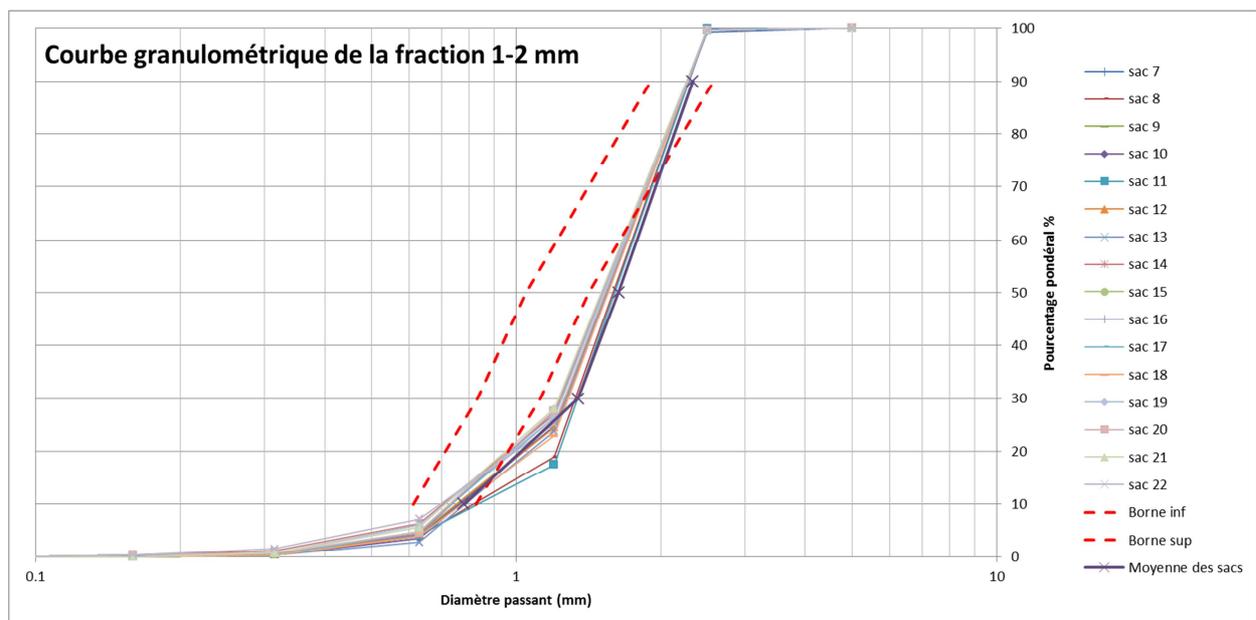


Figure 15 : Courbe granulométrique de la fraction 1-2 mm

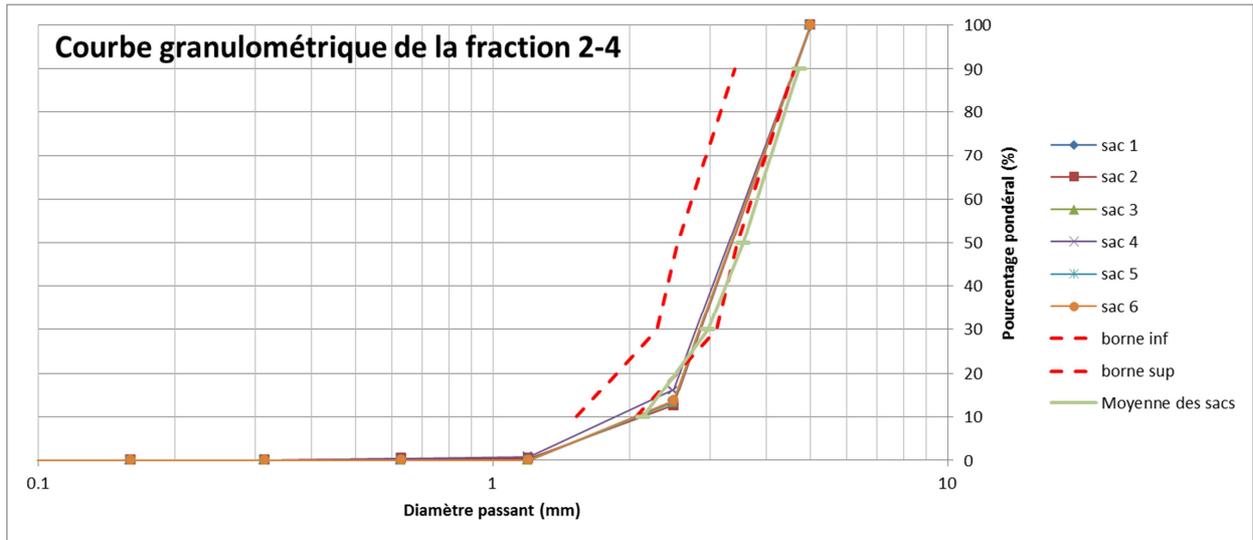


Figure 16 : Courbe granulométrique de la fraction 2-4 mm

Des granulométries ont été effectuées après réalisation du mélange à 25/75 % afin de caractériser le matériau qui sera effectivement mis en place dans le modèle. Les résultats sont présentés sur la Figure 17. On constate que les courbes résultantes sont parfaitement comprises dans le fuseau attendu ce qui permet de valider le mélange final.

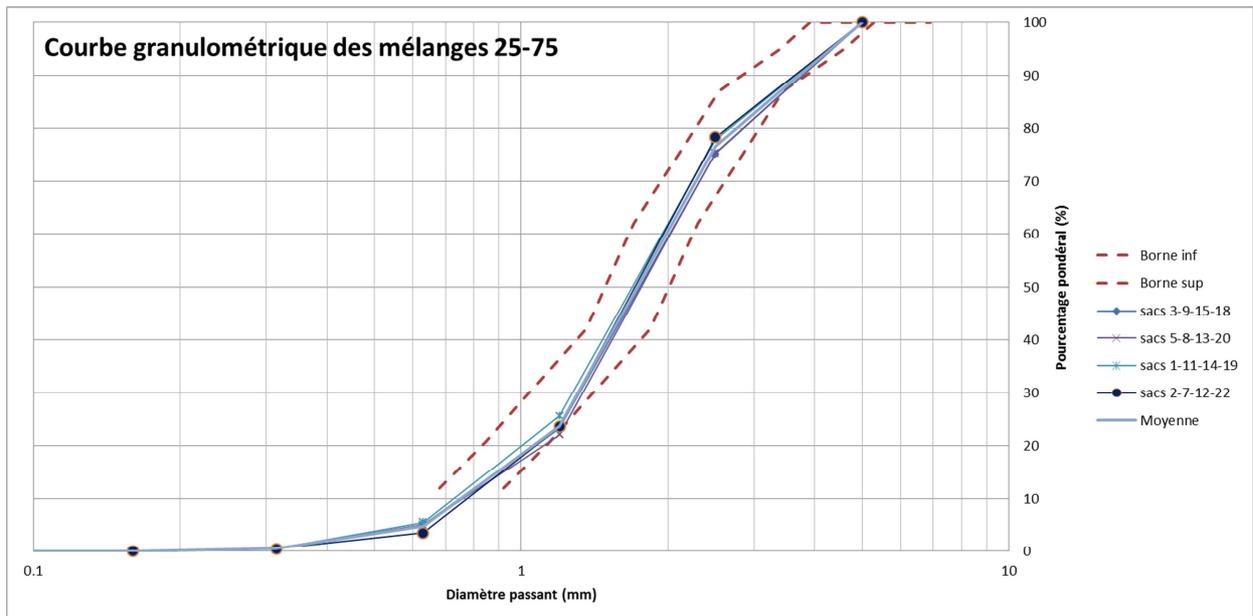


Figure 17-Courbe granulométrique du mélange 25/75 %

5.2. Densité

Les mesures de densité ont été effectuées selon la méthode du pycnomètre.

Le protocole de mesure est le suivant :

- Le pycnomètre est pesé à sec, sa masse est notée M_0 ;
- Le pycnomètre est rempli d'eau jusqu'à une marque de référence et pesé, sa masse est notée M_1 ;
- Une masse de matériaux M_{mat} est pesée et introduite dans le pycnomètre qui est pesé, la masse résultante est notée M_3 ;
- Le pycnomètre avec les matériaux est rempli d'eau jusqu'à une marque de référence et est pesé, la masse résultante est notée M_2

La densité est alors calculée par la formule suivante :

$$D = \frac{(M_2 - M_0) * 0.998596}{(M_1 - M_0) - (M_3 - M_2)}$$

La densité est réalisée pour 3 échantillons de chaque gamme granulométrique mouillée au tensio-actif. La densité moyenne ainsi obtenue est de 1.09, ce qui correspond à la borne haute fixée (+5%).

6. ÉTALONNAGE DES MATERIAUX

6.1. Rappel des biais identifiés

Le modèle physique avec distorsion verticale et distorsion de densité des matériaux, présente un certain nombre de biais, qui sont explicités dans le rapport de conception (Cf. LIV10). Les conséquences potentielles en sont :

- pertes de charge produites par frottements sur les matériaux de fond : probablement surestimées, il faut quantifier ces biais vis à vis objectifs de l'étude,
- loi de transport solide ou respect de la similitude de Shields : il est crucial de déterminer si les hypothèses liées à la conception du modèle physique (distorsion de densité des matériaux notamment) sont conformes avec les réels processus physiques du transport de sable par charriage (vérification a posteriori de la similitude de Shields).

Les biais du modèle physique doivent être cernés et estimés quantitativement à partir d'essais préliminaires réalisés en canal vitré.

6.2. Objectif des essais en canal vitré

Afin d'apprécier le comportement physique des matériaux choisis, des essais en canal vitré de largeur 2 m sur une longueur de 10 m sont initiés pour différentes configurations hydrauliques identiques à celle de l'échelle du modèle principal : soit horizontalement 1/100 et verticalement 1/50. Les constats déduits des débits et des vitesses seront en conséquence identiques à ceux à venir sur le modèle.

Les essais ont consisté à faire des observations sur l'entraînement des particules (du début d'entraînement équivalent au τ_c jusqu'au phénomène de charriage généralisé) pour différents tirants d'eau (de 9 à 20 cm) et différentes vitesses (de 1 à 30 cm/s mesurée au vélocimètre à effet Doppler ou micro-moulinet). La pente de ligne d'eau a été mesurée systématiquement de façon à apprécier l'effet de frottement (rugosité) généré par la couche de matériau mobile (d'épaisseur 3 cm).

Les principaux objectifs de l'étude du comportement des sédiments en canal vitré sont donc :

- L'observation du mouvement des sédiments et du mode de déplacement en fonction du débit en particulier la détermination de la contrainte critique de début d'entraînement,
- L'observation du faciès de charriage (dunes) et la formation éventuelle de rides,
- La mesure de la pente de ligne d'eau pour un régime uniforme et le calcul de la rugosité du matériau utilisé,
- La caractérisation de la loi de charriage envisagée.

6.3. Mode de transport

La première vérification consiste à observer le mode de transport des matériaux en polystyrène sur les essais en canal vitré. Les observations montrent que la majorité des particules sont **transportées par charriage** (saltation et roulement). La fraction la plus fine de la courbe granulométrique peut être soumise à suspension, mais de façon non

quantifiable.

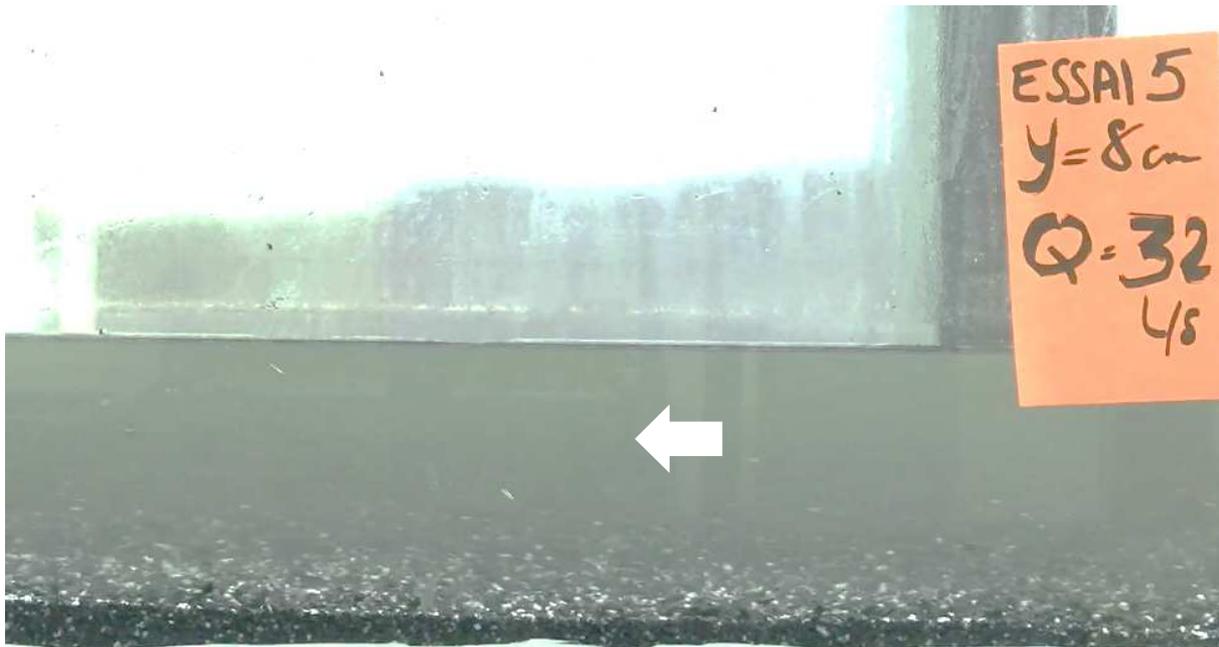


Figure 18 : Photographie latérale du canal vitré (essai 5) – déplacement de particules charriées au fond.

6.4. Observation du seuil de mise en mouvement des matériaux de fonds

6.4.1. Théorie de la contrainte critique et son utilisation dans la formule Meyer-Peter et Muller

Le déplacement des sédiments dépend des forces et contraintes qui leurs sont appliquées. Le transport sédimentaire peut être approché par différente formule empirique notamment celle de Meyer-Peter & Muller qui donne la capacité de transport solide par charriage, lorsque les sédiments ont une taille uniforme. Ainsi la formule est :

$$q_s = 8\sqrt{g} \frac{\rho_s \cdot g}{\sqrt{\rho_f \cdot g - 1}} (\beta \cdot \tau^* - 0.047)^{3/2} \cdot d^{3/2}$$

Avec $\tau^* = \tau / (\rho_s - \rho_f)gD$ le paramètre de Shields,

τ_{cr} est la contrainte à partir de laquelle les sédiments se mettent en mouvement,

Et $\beta = (0.06/\tau^* + 0.41 \cdot \tau^*)^{15/16}$ un paramètre adimensionnel dépendant du coefficient de Strickler (rugosité).

Usuellement la valeur du τ_{cr} est prise égale à 0.047 à l'échelle nature.

6.4.2. Les mesures en canal vitré

Le début d'entraînement des matériaux correspond à la contrainte critique théorique τ_{cr} de début d'entraînement comme visible sur le graphique suivant qui présente la valeur du débit

liquide en fonction de la contrainte critique adimensionnelle, calculée à partir de la formulation de Manning-Strickler.

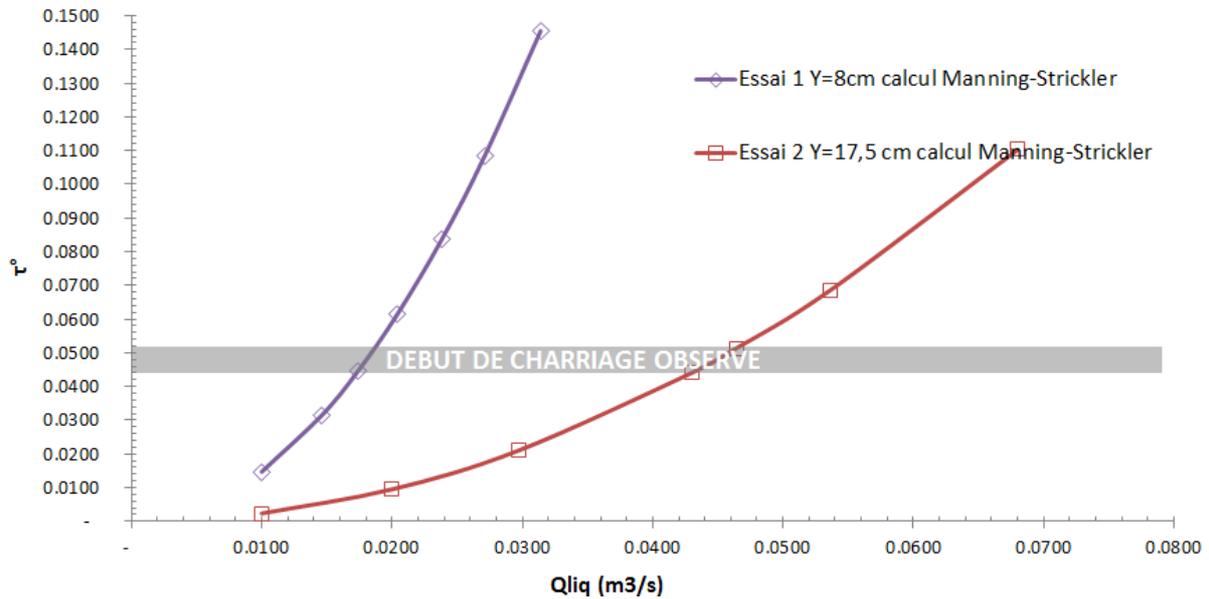


Figure 19 : Évolution de τ° en fonction du débit liquide

Le début d'entraînement observé correspond à des valeurs très proches de la littérature (valeur moyenne de 0.048), soit 0.047. Le matériau en polystyrène choisi pour le modèle physique de la Loire, malgré la distorsion de densité, se comporte identiquement au sable de Loire. **La similitude de Shields est respectée pour le point d'origine du transport solide** (seuil de mise en mouvement).

6.5. Faciès du fond

D'après les données relatives au charriage des matériaux dans le lit de la Loire et aux lois de similitudes retenues (similitude de Shields), on s'attend à voir la formation de dune dans le canal vitré sous certaines conditions hydrauliques.

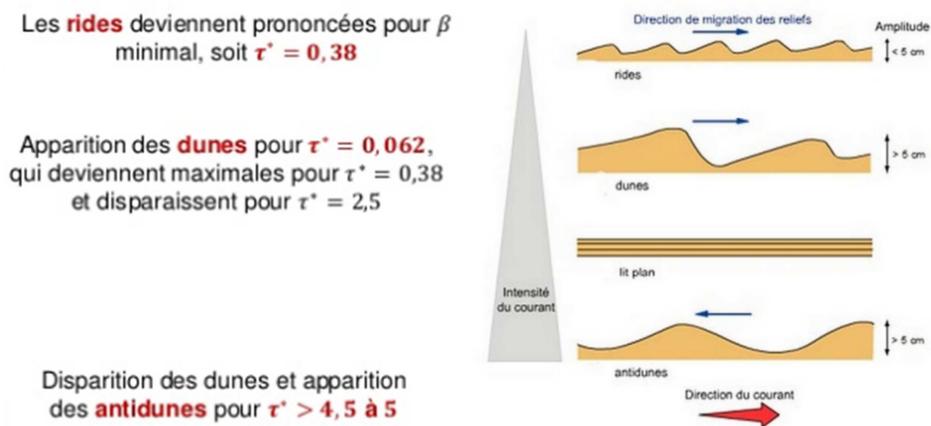


Figure 20 : Valeurs caractéristiques pour la formation des dunes (source : Ramette)

Un essai a été réalisé en imposant une valeur de τ° de 0.41, soit la contrainte d'amplitude théorique maximale des dunes. Les observations montrent la formation de dunes dans le canal vitré, d'une amplitude pluri-décimétrique à l'échelle nature, ce qui semble parfaitement cohérent.

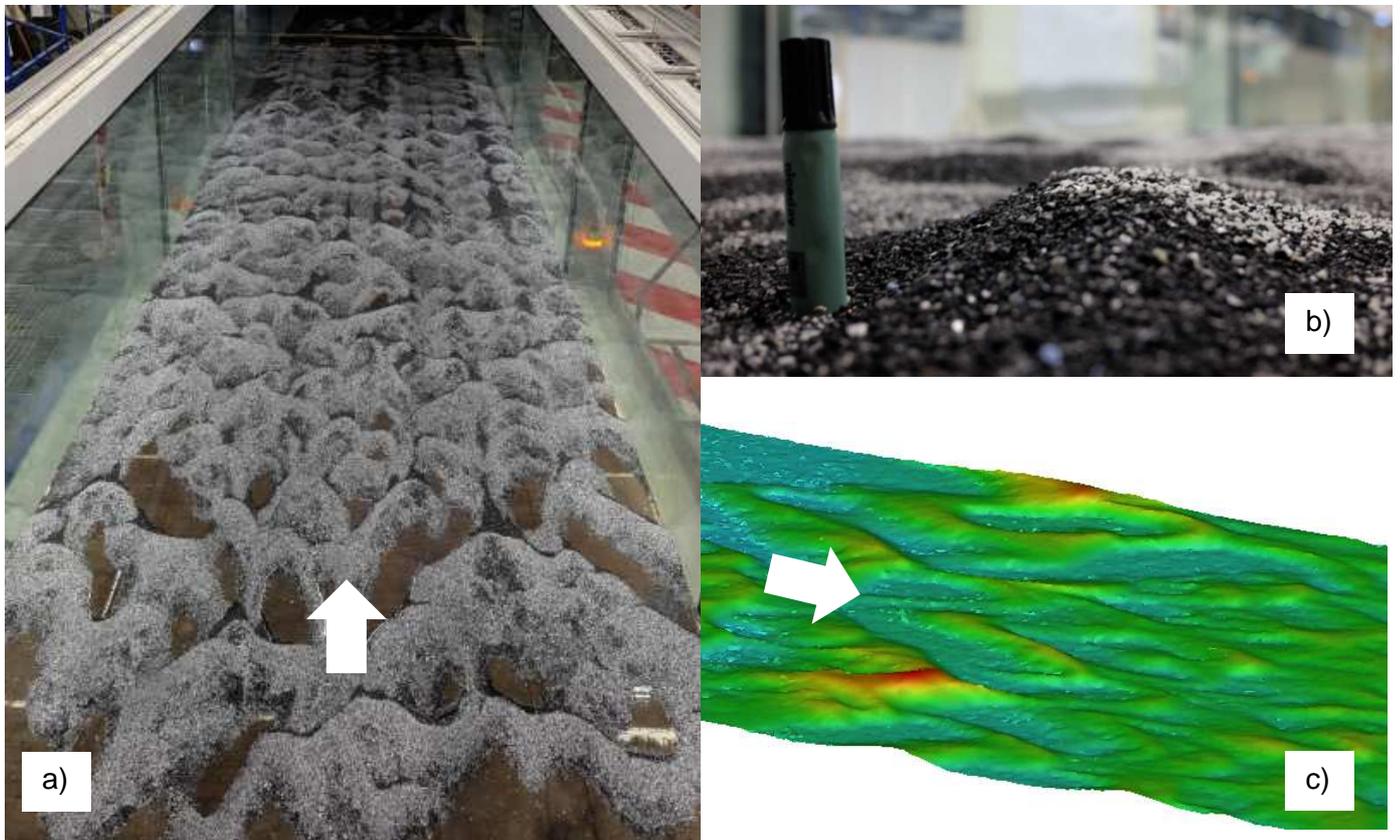


Figure 21 : Photographies a) et b) des dunes dans le canal vitré, et relevé laser des dunes c).

Le faciès lié au déplacement des grains de type sable (dunes) est respecté. *A priori*, l'amplitude des dunes sera plus faible dans le modèle physique Loire ($\tau^\circ \ll 0.41$).

Les matériaux choisis selon les règles de similitude de Shields (avec distorsion géométrique et de densité) **répondent de façon similaire au sable** en nature en termes de faciès de transport.

6.6. Rugosité du matériau

Compte tenu de la distorsion de densité, les matériaux mis en œuvre sur le modèle physique sont plus gros que les matériaux réels. Il est donc nécessaire de déterminer la rugosité des matériaux mis en place (rugosité combinée de peau) et de la comparer avec celle du lit de la Loire afin d'évaluer le biais introduit par l'utilisation de matériaux.

Les Tableau 4 et Tableau 5 de résultats montrent que si le débit et la vitesse sont stables, ce n'est pas le cas de la hauteur moyenne donnée par les US, la précision de ces derniers ne semble pas correspondre à la précision dont la pente de ligne d'eau aurait besoin. On relève une différence de l'ordre de 4 mm entre les deux capteurs et entre les profils (dû à la sensibilité des capteurs), ainsi les pentes sont approximatives, et de valeurs trop faibles pour être représentatives du réel effet de rugosité.

Le coefficient K peut aussi être calculé à partir du débit et de la hauteur d'eau, cette valeur est plus précise (en blanc), on retrouve ainsi le **coefficient de peau $K_p=61.40$** déterminé initialement par la granulométrie des sédiments d'après la formule suivante.

$$Kp = \frac{21}{d_{50}^{\frac{1}{6}}}$$

Q (l/s)	10.2		20.2		29.7		52.8	
US	1	9	1	9	1	9	1	9
Vmoyenne (cm/s)	2.9		5.8		8.4		15.1	
Hmoy (cm)	17.6	17.2	17.4	17.0	17.6	17.2	17.5	17.1
J (%)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	0.01
K calculé avec τ_c (non composé)	62.6		62.8		61.7		61.0	
Transport sédimentaire	Pas de transport		Pas de transport		Début de charriage		Charriage généralisé	

Tableau 4 : Résultats de l'essai 1 pour une hauteur d'eau visée de 18 cm

Q(l/s)	10.2		20.2		31.2	
US	1	9	1	9	1	9
Vmoyenne (cm/s)	6.1		12.1		18.6	
Hmoy (cm)	8.4	7.8	8.4	7.8	8.4	7.9
J (%)	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
K calculé avec τ_c (non composé)	60.1		58.8		58.8	
Transport sédimentaire	Pas de transport		Charriage		Charriage généralisé	

Tableau 5 : Résultat de l'essai 2 pour une hauteur d'eau visée de 8 cm

Ces résultats des essais en canal vitré sont en conformité avec le Strickler théorique calculé à partir de la similitude de Shields ($K = 64$).

En considérant le cas théorique d'un régime uniforme, le modèle conduirait donc à surestimer les hauteurs d'eau par rapport à un écoulement réel. Cette surestimation ne résulte toutefois que de la rugosité de peau (Strickler de grain) et ne prend pas en compte les effets des macro-rugosités (effet des dunes ou des irrégularités locales par exemple).

Afin de quantifier le biais généré sur la « sur-rugosité » du modèle par la distorsion de densité des matériaux et la distorsion géométrique du modèle (Cf. paragraphe 2.3.4 « Biais dû à la trop forte rugosité des matériaux de fond » du LIV10 rapport de conception), il est proposé de réaliser un essai spécifique pour mesurer la ligne d'eau obtenue, et ainsi la comparer avec un événement de ligne d'eau réel.

6.7. Capacité de transport

Deux essais ont été réalisés pour quantifier des valeurs de transport solide selon un temps d'exposition de 1h30 à 2h mais un seul essai s'est avéré exploitable. Les échelles de similitude du modèle Loire sont appliquées ici, à titre indicatif.

Temps	0:00		0:16		01:05	
Q nat m ³ /s (mod l/s)	1 040 (29.4)		1 000 (28.3)		983 (27.8)	
N° de capteur US	1	9	1	9	1	9
Vmoy nat m/s (mod cm/s)	1.22 (17.2)		1.24 (17.6)		1.23 (17.4)	
Hmoy nat m (mod cm)	4.25 (8.5)	3.95 (7.9)	6.7 (13.4)	4.0 (8.0)	9.85 (19.7)	4.0 (8.0)

Tableau 6 : Résultats de l'essai 3 pour un débit fixe visé de 30L/s et une hauteur d'eau fixe visé de 8 cm

Concernant le débit solide moyen pendant l'essai, la **valeur obtenue est proche à 12%** des quantités théoriques déterminées à partir de la loi de transport calculée le modèle 2D (70%, cf. 3.1).

	Modèle	Nature	Théorie	
Débit liquide (m ³ /s)	0.029	1025		
Durée de l'essai (j hh mm)	01:38	76 jours et 08:33		
Débit solide instantané (m ³ /s)	7.26E-06	2.54E-03	l/min	kg/s
Débit solide instantané (kg/s)	7.91E-03	6.73	0.40	0.0070
Volume solide (kg)	39.4	4.42E+07		35.06
Densité (kg/m ³)	1 090.00	2 650.00		
Taux d'abattement sur loi TS		70%		

Tableau 7 : Résultat des quantités sédimentaires récupérées dans les bacs après l'essai 3

Visuellement, durant ces essais, on remarque qu'il existe un tri granulométrique des sédiments lors du charriage. Les zones de différentes granulométrie sont facilement repérables car elles sont de couleurs différentes : les parties claires correspondent aux éléments de granulométrie plus importante et les noires aux sédiments les plus fins.



Figure 22 : Photo du canal vitré après l'essai 3

Des tests de granulométrie et de densité complémentaires sont donc effectués pour observer les influences de cette ségrégation. D'après la courbe ci-après, on a bien un tri granulométrique au niveau du lit et des sédiments charriés. Comme on peut s'y attendre, les éléments les plus fins sont charriés en premier et on les retrouve dans les collecteurs aval (bacs), leurs courbes granulométriques se trouvent dans le bas du fuseau.

D'un point de vue granulométrique les sédiments récupérés dans la zone claire (de la photo ci-avant) sont dans la partie haute du fuseau cible alors que ceux de la zone foncée sont semblables à ceux retrouvés dans les bacs. Ces variations sont naturelles et observables *in situ*.

Courbe granulométrique du mélange après essai en canal vitré

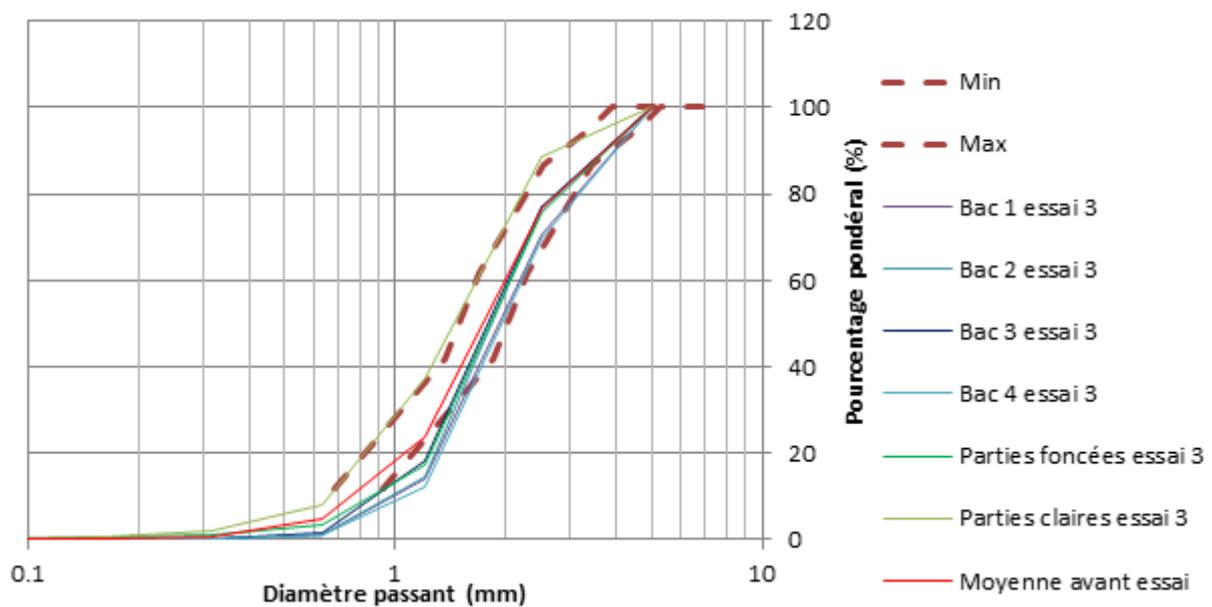


Figure 23 : Courbes granulométriques (essais en canal vitré)

7. PROGRAMME D'ESSAIS

Il faut distinguer trois types d'essai sur le modèle physique.

- La première catégorie concerne le **pré-calage sédimentaire** de façon à reproduire fidèlement le transport solide de sable en Loire. Pour ce faire, il est nécessaire de confirmer les observations faites en canal vitré (début du processus de charriage par exemple) et d'ajuster la courbe synthétique aval à appliquer au PK61.3.
- La seconde catégorie concerne le **calage sédimentaire** sur la base d'un évènement de 1308 jours (2009-2013) sur lequel deux bathymétries aux bornes sont connues.

Comme indiqué dans le paragraphe 3.2, la chronique réelle en débit ou en cote ne peut être utilisée ici. On observe par exemple que la moyenne des variations inter-journalières est de l'ordre de 40 m³/s mais que la variation sur 24h peut atteindre 530 m³/s sur certains pics de crue. En tenant compte de l'échelle des temps sédimentaires (1/1320), la variation journalière est inaccessible pour le modèle physique. Il est proposé de reclasser la chronique en gamme de débit par un temps d'application (*i.e.* une courbe de débits classés). On constate alors que la période disponible pour le calage est représentative de l'hydrologie qui servira de base à nos scénarios de référence (cf. graphique ci-dessous).

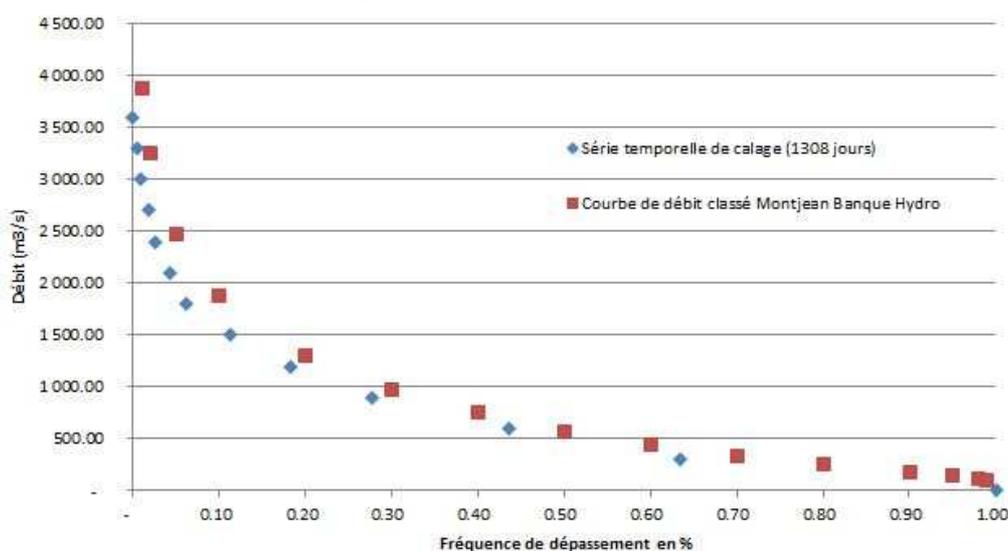


Figure 24 : Courbe de débits classés sur la période de calage sédimentaire (2009-2013)

- L'étape finale consiste à réaliser des **essais de référence** en situation actuelle et aménagée sur un horizon de 15 ans.

Rappelons que le chapitre 3 détaille les conditions aux limites.

7.1. Liste des essais de pré-calage et calage

La liste des essais prévisionnels est disponible dans le tableau suivant, et sera soumise à évolution en fonction des résultats partiels de chacun des essais, de façon à satisfaire pleinement les objectifs de l'étude sédimentaire.

Nom de l'essai	Type	Descriptif	Objectif attendu
ESSAI1_MEE	Mise en eau	Remplissage par aval	Après mise en place des matériaux, mise en eau jusqu'à la cote 6 m NGF, Ajustement morphologique à mesurer
ESSAI4_PCAL_ETI	Pré-Calage	Débit étiage (250 m ³ /s)	Vérification absence de transport, stabilité morphologique
ESSAI5_PCAL_Z1	Pré-Calage	Débit début entrainement théorique (450 m ³ /s)	Ajustement Z au début d'entraînement local et global (conformité aux essais CV et loi de transport)
ESSAI2_PCAL_MOD	Pré-Calage	Débit module (850 m ³ /s)	Ajustement Z (conformité à loi de transport)
ESSAI3_PCAL_2MOD	Pré-Calage	Débit 2xmodule (1700 m ³ /s)	Ajustement Z (conformité à loi de transport)
ESSAI6_PCAL_Z2	Pré-Calage	Débit (850 m ³ /s)	Ajustement Z (conformité à loi de transport)
ESSAI7_PCAL_Z3	Pré-Calage	Débit (1500 m ³ /s)	Ajustement Z (conformité à loi de transport)
ESSAI8_PCAL_Z4	Pré-Calage	Débit (3500 m ³ /s)	Ajustement Z (conformité à loi de transport)
ESSAI9_PCAL_RUG	Pré-Calage	Débit [400-600] m ³ /s)	Estimation du biais lié à la rugosité
ND	Calage	Période 2009-2013 synthétique (T3X) avec Qs entrant 70% loi transport	Calage sédimentaire en 7 paliers de 2h
ND	Calage	Période 2009-2013 synthétique (T3X) avec Qs entrant 70% loi transport et correction compacité	Calage sédimentaire en 7 paliers de 1.8h
ND	Calage/Étude Sensibilité	Période 2009-2013 synthétique (T3X) avec Qs entrant 150% loi transport et correction compacité	Calage sédimentaire en 7 paliers de 1.8h
ND	Calage/Étude Sensibilité	Épisode de crue (850 à 3500 m ³ /s)	Ajustement morphologique en période de crue (environ 1 mois)

Tableau 8 : Liste des essais de pré-calage et calage

7.2. Essais de calage

Les conditions de l'essai de calage sont les suivantes.

	réel					
	Q[m ³ /s]	Qs [kg/s]	durée réelle [ans]	durée réelle [jours]	poids solide [t]	volume solide [m ³]
Janvier	1440	11.429	0.31	112	110 206	41 587
Février	1255	9.329	0.28	101	81 250	30 660
Mars	935	5.710	0.31	112	55 055	20 775
Avril	647	2.446	0.30	108	22 820	8 611
Juin	527	1.077	0.30	108	10 047	3 791
Novembre	500	0.777	0.30	108	7 253	2 737
Décembre	1210	8.826	0.31	112	85 106	32 116
-			3.6	1 314	371 737	140 278

Figure 25 : Conditions d'essai pour l'évènement de calage (nature) avec 70% de la loi de transport nominale.

À l'échelle nature (ou réelle), la représentation de l'évènement des 3,6 ans sous forme de débits moyens mensuels conduit à un volume solide de 140 278 m³ soit environ 39 000 m³/an ou environ 103 000 t/an. L'essai inclut donc 7 paliers de débits différents, il n'est pas prévu de simuler les débits inférieurs au seuil de transport (<420 m³/s). Notons par ailleurs d'un essai aura été réalisé en deçà de ce seuil pour vérifier l'absence de transport.

Modèle									
QTOT [l/s]	QBP [l/s]	QBS [l/s]	QsTOT [g/s]	QsBP [g/s]	QsBS [g/s]	durée modèle [h]	durée modèle correction compacité 10% [h]	durée modèle sans correction compacité [hh:mm:ss]	poids total [kg]
40.7	39.5	122%	12.0	11.6	0.4	2.0	1.8	2:01:45	87
35.5	34.8	71%	9.8	9.6	0.2	1.8	1.6	01:49:58	64
26.5	26.2	26%	6.0	5.9	0.1	2.0	1.8	02:01:45	44
18.3	18.3	0%	2.6	2.6	0.0	2.0	1.8	01:57:49	18
14.9	14.9	0.0	1.1	1.1	0.0	2.0	1.8	01:57:49	8
14.2	14.2	0.0	0.8	0.8	0.0	2.0	1.8	01:57:49	6
34.2	33.5	0.7	9.2	9.0	0.2	2.0	1.8	02:01:45	67
			12	g/s		22	20	max	87

Figure 26 : Conditions d'essai pour l'évènement de calage (modèle) avec 70% de la loi de transport.

Le temps simulé cumulé sera d'environ 13h50, par palier de débit. Entre chaque palier de débit, le transport sera figé par imposition d'un niveau d'eau horizontal, de façon à réaliser les mesures de bathymétrie et divers contrôles (bilan des débits solides entrant et sortant).

Un essai de sensibilité à la loi de transport solide pourra être réalisé, en prenant par exemple 150% de la loi de transport nominale, soit un équivalent de 221 000 t/an.

7.3. États de référence à 15 ans

L'objectif de cette série d'essais est de reconstituer le fonctionnement sédimentaire de la situation actuelle et projet pour l'ensemble des débits morphogènes sur un horizon de 15 ans. Les conditions de l'essai de référence sont les suivantes.

	réel					
	Q[m ³ /s]	Qs [kg/s]	durée réelle [ans]	durée réelle [jours]	poids solide [t]	volume solide [m ³]
Janvier	1440	11.429	1.27	465.00	459 191	173 280
Février	1255	9.329	1.15	420.00	338 540	127 751
Mars	935	5.710	1.27	465.00	229 394	86 564
Avril	647	2.446	1.23	450.00	95 085	35 881
Juin	527	1.077	1.23	450.00	41 864	15 798
Novembre	500	0.777	1.23	450.00	30 219	11 403
Décembre	1210	8.826	1.27	465.00	354 609	133 815
- paliers			15.0	5 475	1 548 902	584 491

Figure 27 : Conditions d'essai pour l'évènement de référence (nature) avec 70% de la loi de transport nominale.

À l'échelle nature (ou réelle), la représentation des 15 ans sous forme de débits moyens mensuels conduit à un volume solide de 584 491m³ soit environ 39 000 m³/an ou environ 103 000 t/an. L'essai inclut donc 7 paliers de débits différents, il n'est pas prévu de simuler les débits inférieurs au seuil de transport (<420 m³/s). Notons par ailleurs d'un essai aura été réalisé en deçà de ce seuil pour vérifier l'absence de transport.

Modèle									
QTOT [l/s]	QBP [l/s]	QBS [l/s]	QsTOT [g/s]	QsBP [g/s]	QsBS [g/s]	durée modèle [h]	durée modèle correction compacité 10% [h]	durée modèle sans correction compacité [hh:mm:ss]	poids total [kg]
40.7	39.5	-	12.0	11.6	-	8.5	7.6	8:27:16	364
35.5	34.8	-	9.8	9.6	-	7.6	6.9	07:38:11	268
26.5	26.2	-	6.0	5.9	-	8.5	7.6	08:27:16	182
18.3	18.3	0.0	2.6	2.6	0.0	8.2	7.4	08:10:55	75
14.9	14.9	0.0	1.1	1.1	0.0	8.2	7.4	08:10:55	33
14.2	14.2	0.0	0.8	0.8	0.0	8.2	7.4	08:10:55	24
34.2	33.5	0.7	9.2	9.0	0.2	8.5	7.6	08:27:16	281
			12	g/s		91	82	max	281

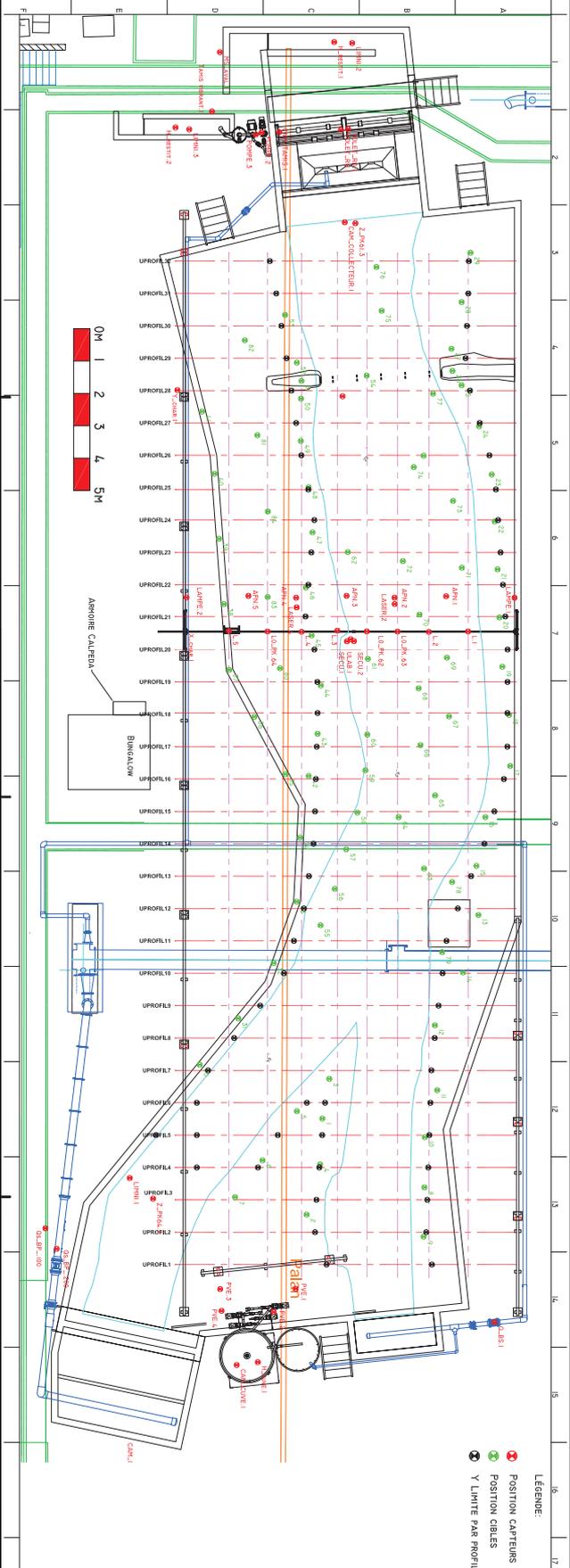
Figure 28 : Conditions d'essai pour l'évènement de référence (modèle) avec 70% de la loi de transport.

Le temps simulé cumulé sera d'environ 57h30, par palier de débit. Entre chaque palier de débit, le transport sera figé par imposition d'un niveau d'eau horizontal, de façon à réaliser les mesures de bathymétrie et divers contrôles (bilan des débits solides entrant et sortant).

7.4. Planning prévisionnel des essais

Les essais se dérouleront de la manière suivant (planning indicatif à ce jour et suivant la date de validation de ce présent rapport) :

- Calage du modèle sédimentaire (aout à octobre 2017) ;
- Essai de référence en état actuel (octobre à décembre 2017) ;
- Essai de référence en état projet : 2018.



LEGENDE:
 ● POSITION CABLEURS
 ● POSITION CIBLES
 — Y LIMITE PAR PROFIL

AMENAGEMENT DE
 LA LOIRE
 REEQUILIBRAGE DU LIT DE LA LOIRE ENTRE
 LES PONTS DE CE ET NANTES

MODELE PHYSIQUE
 PLAN D'INSTRUMENTATION
 VUE EN PLAN

 <p>COMITE NATIONAL DU RIVIERE</p>	
<p>UNITE D'ETUDE ET DE RECHERCHE EN HYDRAULIQUE</p>	
<p>100000, 100000, 100000</p>	
<p>1.1011.001PLMO.0160</p>	
<p>B</p>	

8. ANNEXES

8.1. Plan d'instrumentation

8.2. Protocole d'essai en canal vitré

8.2.1. Géométrie du système

Le canal vitré du laboratoire CNR a les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 15 m ;
- Largeur : 2 m ;
- Hauteur : 1 m ;
- Pente nulle ;
- Régulation par volet aval.

Il est proposé d'aménager l'intérieur du canal afin de placer une surface d'environ 10 m² de matériaux mobiles. Les convergents et divergents permettent d'assurer une transition sans perte de charge supplémentaire.

Un chariot mobile motorisé dans les 3 axes, portant des sondes de niveaux (capteurs US), sonar (Ultralab) et vélocimètre Doppler (Vectrino II) est déployé.

La zone de récupération de sédiment, en partie aval du tapis de matériaux mobile, est compartimentée en plusieurs bacs pour faciliter leur extraction. Le dimensionnement des bacs s'est fait sur la quantité théorique de sédiment transporté par l'essai fixe à débit maximum. Les bacs sont lestés pour ne pas flotter.

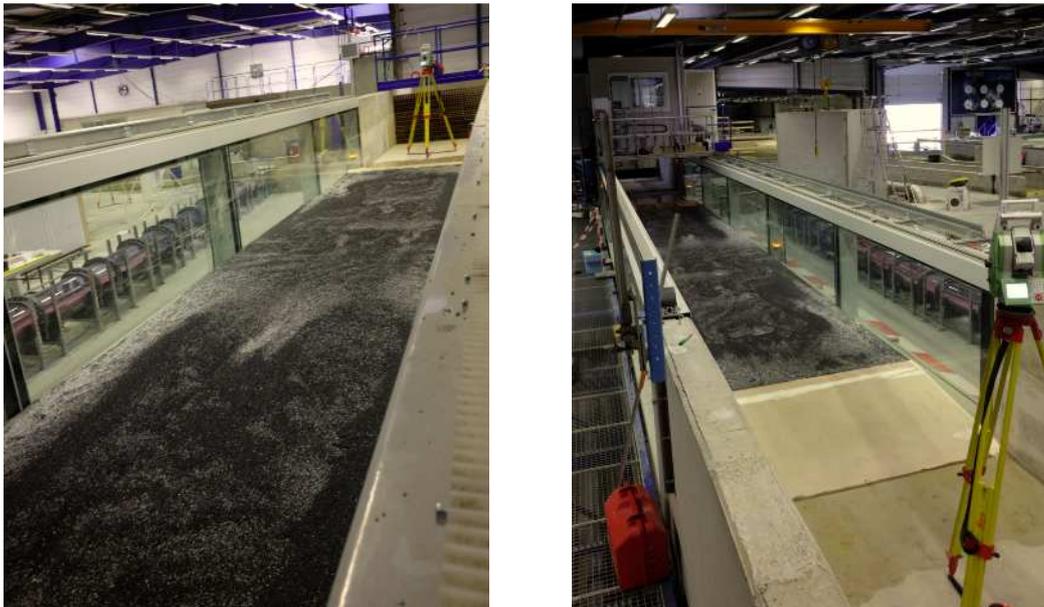


Figure 29- Photographie des installations du canal vitré

L'épaisseur de matériaux mobiles est fixée à 3 cm. Aucune alimentation solide en amont.

Les mesures réalisées sont les suivantes :

- Suivi vidéo de chaque essai (chaque débit différent) en vue de côté (trépied à quelques centimètres du sol) ;
- Relevé topographique du matériau mobile par tachéomètre laser (MS50) ;
- Suivi hauteur d'eau (sonde US) en début et fin de chaque essais ;

- Mesure de la vitesse d'écoulement à différentes profondeurs et différentes positions en travers par Vectrino II ou micromoulinet;
- Pesée des matériaux dans les bacs de récupération après certains essais (pesée à sec) pour quantifier la loi de transport solide.

8.2.2. Choix des conditions aux limites cibles

À partir de couples débit/hauteur d'eau extraits de simulation du modèle numérique, on calcule les couples Q/Y à tester au cours des essais réalisés sur le canal.

Échelle 1/1						
Q (m ³ /s)	V min (m/s)	Y min (m)	V max (m/s)	Y max (m)	Largeur mouillée (m)	q (m ³ /s/m)
220	0.1	0.5	0.4	4.3	245	0.90
850	0.3	0.5	1	5.6	290	2.93
3500	0.3	0.5	1.9	9	517	6.77

Tableau 9-Couple débit hauteur extrait du modèle numérique 2D à l'échelle nature

Par transposition selon les échelles du modèle :

Canal vitré						
Q (L/s)	V min (cm/s)	Y min (cm)	V max (cm/s)	Y max (cm)	Largeur mouillée (m)	q (L/s/m)
5.08	1.00	1.00	5.91	8.60	2.00	2.54
16.58	1.00	1.00	14.80	11.20	2.00	8.29
38.30	1.00	1.00	21.28	18.00	2.00	19.15

Tableau 10- Couple débit hauteur extrait du modèle numérique 2D à l'échelle du canal vitré

8.2.3. Préparation des matériaux

Les matériaux sont au préalable mouillés et lavés des fractions les plus fines (qui resteront en suspension) avec ajout de tensio-actif. Il faut ainsi préparer environ 500 kg pour une surface de 10 m².

Une fois installé dans le canal vitré, il est nécessaire de pulvériser régulièrement de l'eau additionnée de tension actif, y compris à la mise en eau.

Positionner un filtre fin en aval des volets pour récupérer les éventuels flottants.

8.2.4. Types d'essais

2 séries d'essais ont été réalisées:

- **Essais pour la détermination de la contrainte d'entraînement**

Une première série d'essai est faite en augmentant progressivement la contrainte et en observant le comportement des matériaux. Aucune mesure de débit solide n'est réalisée au cours de cette série. Mesures de la ligne d'eau et mesure de vitesse (Micro-moulinet). On veut ainsi obtenir la contrainte d'entraînement pour différente hauteur d'eau. Dans le cadre de ces premiers essais, les sédiments ne sont pas récupérés à l'aval.

La mise en eau du canal se fait par l'aval avec un débit très faible, lors de la mise en eau des pompes, les premiers débits doivent être inférieurs à 10 L/s.

Le tirant d'eau est fixé par essai. Les volets fonctionnent en régulation fonction du débit liquide croissant. Attention à surveiller les effets sinusoïdaux de la régulation sur la vitesse d'écoulement au niveau du tapis de matériaux mobiles.

Viennent ensuite la mise en marche de la caméra et le réglage du premier palier de débit. Chaque palier dure environ 5 minutes. Après vérification des débits entrants on mesure la vitesse en quelques points au 1/3 supérieur de la colonne d'eau et la surface libre par profils en long US, puis on réalise des photos vu du dessus et de côté et on note les observations visuelles et techniques. L'essai se poursuit (augmentation du débit liquide) ainsi jusqu'à atteindre le débit de charriage généralisé.

On enchaîne les essais 3, 2 et 1 dans l'ordre indiqué (hauteur d'eau décroissante).

À la fin de l'essai, on arrête les pompes et on relève les volets au maximum, puis on vidange le canal très lentement et on récupère les données enregistrées (vitesses, hauteurs, débits, photos et films).

- **Essais pour la quantification du débit solide**

Une seconde série d'états permanents (couple Q/Y à sélectionner) sans injection de matériaux et mesure du débit solide afin de « mesurer » la loi de transport solide. Cet essai consiste à quantifier les sédiments transportés. Les débits utilisés pour ce dernier sont déterminés à partir des premiers essais.

Préparation identique aux essais précédents. On fait un relevé MS50 (tachéomètre laser) du fond mobile du canal. La mise en eau du canal se fait par l'amont et l'aval avec un débit très faible, lors de la mise en eau des pompes, les premiers débits doivent être inférieurs à 10 L/s.

Viennent ensuite la vérification du débit entrant et la mise en marche de la caméra pour toute la durée de l'essai.

Durant l'essai on mesure les vitesses, hauteurs et débits sont relevés toutes les 5 minutes environ et des photos (vue du dessus et de côté) sont réalisées. Le temps maximum de l'essai correspond environ au temps de remplissage du bac. Durant la durée de l'essai on note les observations visuelles et techniques.

À la fin de l'essai, on arrête très progressivement les pompes afin de ne pas générer d'instabilités, puis on arrête le film puis on relève les volets au max.

Enfin on vidange l'eau très lentement. Puis on récupère les données enregistrées (vitesses, hauteurs, débits, photos et films). On réalise un levé au MS50 du fond du canal puis on récupère les bacs de matériaux, on filtre, sèche, pèse et réalise la granulométrie des sédiments des bacs.

Réalisation de 2 essais successifs pour 2 couples de Y/Q déterminés par les essais de début d'entraînement (choix selon atteinte du charriage généralisé).