



HAL
open science

Diagnostic sédimentaire de la Loire en amont de Nantes par modélisation physique à fond mobile et analyse dynamique des dunes en similitude de Shields

Léa Parelle

► **To cite this version:**

Léa Parelle. Diagnostic sédimentaire de la Loire en amont de Nantes par modélisation physique à fond mobile et analyse dynamique des dunes en similitude de Shields. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-03546101

HAL Id: dumas-03546101

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03546101v1>

Submitted on 27 Jan 2022

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.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Diagnostic sédimentaire de la Loire en amont de Nantes par
modélisation physique à fond mobile et analyse dynamique des
dunes en similitude de Shields**



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES

Spécialisation Hydrosystèmes – Eaux superficielles

Août 2018

Léa Parelle
Promotion Freiburg

Référente école : Emilie Beaulieu
Tuteur de stage : Damien Alliau

Remerciements

Avant de rentrer dans l'univers fascinant de la Loire, je souhaite remercier les personnes qui m'ont accompagné durant ces six mois de stage.

Je tiens à remercier Damien Alliau pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce modèle physique si unique. La Loire n'a pas de secret pour lui, et il a su me les partager avec beaucoup de pédagogie. Son écoute, ses précieux conseils et sa confiance ont fait grandir l'étudiante que je suis en une jeune ingénieure. Merci de m'avoir ouvert à de nouvelles connaissances et compétences de M. Douglas et ses filtres à la LSPIV, en passant par les empreintes de main sur la plage de la Loire ...

Je remercie Emilie Beaulieu pour son écoute et sa disponibilité tout au long de mon aventure ligérienne. Bien qu'elles soient séparées par des centaines de kilomètres, la Loire l'a déjà conquis à Nantes.

Je remercie également Sébastien Roux de m'avoir ouvert les portes du savoir sur les lois de similitude. Grâce à lui, j'ai gravi petit à petit sur les échelles, et j'avoue que la Loire est encore plus belle d'en haut.

Merci à Frédéric Begeot pour sa fidèle compagnie au cours des essais, de nombreuses conversations enrichissantes aussi bien sur les capteurs que sur la vie.

Merci à Hendrik Stoter de m'avoir initié à la photogrammétrie et la topographie. Je le remercie pour sa bonne humeur et ses conseils toujours pertinents qui m'ont aidé à avancer.

Merci à Carole Wirz et Axelle Faure pour leurs explications et leurs aides précieuses sur le modèle numérique.

Merci énormément à la famille CACOH de m'avoir accueilli aussi chaleureusement pendant ces six mois. Merci pour les rires chaque jour, les conseils qui me serviront aujourd'hui et demain, et votre sens du partage technique, humain et culinaire.

Ce stage symbolise la fin de mes études. Ainsi je voudrais remercier ceux qui m'ont accompagné pendant ces années.

Merci à ma famille, et particulièrement mes parents, qui m'ont toujours soutenu dans mes choix. Ce mémoire les dépasse peut-être mais je sais qu'il représente pour eux l'aboutissement de quelque chose de grand.

Merci à Houette, mon équilibre équin.

Résumé

Diagnostic sédimentaire de la Loire en amont de Nantes par modélisation physique à fond mobile et analyse dynamique des dunes en similitude de Shields

Le Plan Loire IV a pour ambition de rééquilibrer morphologiquement le lit de la Loire. Dans ce cadre, Voies Navigables de France, en tant que maître d'ouvrage, coordonne plusieurs projets, parmi eux la création d'un aménagement en amont de Nantes. Le modèle physique, proposé par CNR & Egis, a pour but d'étudier l'efficacité de cet ouvrage.

Le modèle physique est en similitude de Froude et de Shields ce qui permet d'obtenir des conditions hydrauliques et de transports sédimentaires analogues entre le modèle et la réalité. Des essais en état actuel de la Loire sont réalisés en vue d'une comparaison ultérieure avec les essais en état de projet. Cette première phase, constituée de 52 essais, a permis d'établir un diagnostic sédimentaire sur une durée de 15 ans. Un engraissement naturel de la Loire s'établit sur cette période, cependant cette tendance est à relativiser puisque le lit de la Loire oscille autour d'un point d'équilibre, notamment pour le flux sédimentaire.

Lors des essais, des dunes sont observées ; il s'agit de formes sédimentaires communes sur la Loire. Pour chaque essai, la photogrammétrie et le traitement d'images par méthode LSPIV ont permis d'extraire respectivement la hauteur et la longueur, et la vitesse de migration de ces formes. La géométrie et la dynamique des dunes formées sur le modèle physique sont comparables aux mesures observées sur la Loire. La similitude de Shields entraîne ainsi une bonne représentation de la morphologie et des vitesses de déplacement des dunes réelles sur le modèle physique.

Les essais en état actuel représentent une banque de données suffisamment riche et précise, constituant ainsi des points de référence en vue de la seconde phase d'essai en état projet avec l'aménagement.

Abstract

Sedimentary diagnosis of the Loire River upstream Nantes by physical modelling with movable bed and dynamic analysis of dunes in Shields similitudes

The Loire IV plan targets to recover the morphological balance of the Loire River bed. Voies Navigables de France, who is the client, manages several projects in this context, among which the design and construction of a hydraulic structure upstream Nantes. The physical model study, carried out by CNR & Egis, aims at assessing the structure efficiency.

The Froude and Shields similitudes, used in the physical model, lead to the same hydraulics and sediment transport conditions between model and prototype. A first set of tests has been performed implementing the existing conditions of the Loire River, in order to compare their results with the second set of tests carried out in the future project conditions. The sedimentary diagnosis over 15 years was achieved with the 52 simulations done during the first stage of the study. A natural deposit is observed, however this result should be considered with care since it could be the result of the river bed fluctuation around an equilibrium point following the sediment flow variation.

During simulations, the development of sand dunes was observed. These morphological shapes are common in the Loire River. For each simulation, height, length and migration speed of dunes have been assessed thanks to photogrammetry and image processing with LSPIV method. Dunes geometry and dynamics are similar on the model and in the reality. Thus, Shields similitude allows to obtain a very good representation of the real geometrics and dynamics characteristics of dunes in the physical model.

Simulations for existing conditions have provided an abundant and informative data base, which will be used as reference in the second stage of simulations, when testing the foreseen hydraulic structure.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIERES	5
TABLE DES FIGURES	7
TABLES DES TABLEAUX	8
SYMBOLES ET ABREVIATIONS	9
INTRODUCTION : DE LA LOIRE AU LABORATOIRE	11
CHAPITRE 1 : LE MODELE HYBRIDE : DU NUMERIQUE AU PHYSIQUE	15
1. MODELE HYDRO-SEDIMENTAIRE 2D	15
1.1. CALAGE SUR UNE PERIODE DE 3,6 ANS	15
1.2. CONDITIONS AUX LIMITES	15
1.3. PRINCIPALES CONCLUSIONS DU CALAGE	16
2. MODELE PHYSIQUE A FOND MOBILE	16
2.1. LOIS DE SIMILITUDE	16
2.1.1. Loi de similitude hydraulique : similitude de Froude	16
2.1.2. Loi de similitude sédimentaire : similitude de Shields	16
2.1.3. Choix de l'échelle géométrique	18
2.2. INCERTITUDES DU MODELE PHYSIQUE	19
2.2.1. Effet de la viscosité	19
2.2.2. Incertitude due à la distorsion verticale	19
2.2.3. Incertitude due à la trop forte rugosité des matériaux de fond	19
2.3. CARACTERISTIQUES DU MODELE ET OUTILS DE MESURE	20
3. CONCLUSION	21
CHAPITRE 2 : DIAGNOSTIC SEDIMENTAIRE DE LA LOIRE	23
1. CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE PHYSIQUE	23
1.1. CONDITIONS HYDRAULIQUES AMONT	23
1.2. CONDITIONS HYDRAULIQUES AVAL : COURBE D'EQUIVALENCE EN DEBIT SOLIDE	24
1.3. CONDITIONS SEDIMENTAIRES AMONT : LOI DE TRANSPORT SOLIDE ISSUE DES MESURES <i>IN SITU</i>	24

1.4.	PLAGES DE DEBITS ETUDIES POUR LE MODELE PHYSIQUE	24
2.	CALAGE DU MODELE PHYSIQUE SUR LES BATHYMETRIES REALISEES ENTRE 2009 ET 2013	25
2.1.	ESSAIS REALISEES POUR LE CALAGE 2009-2013	25
2.2.	BILAN VOLUMIQUE NET	26
2.3.	COMPARAISON DES BATHYMETRIES	26
2.4.	CONCLUSION DU CALAGE	27
3.	PREVISIONS A 15 ANS EN ETAT ACTUEL DE LA LOIRE	27
3.1.	EVOLUTION DE LA BATHYMETRIE	27
3.2.	BILANS VOLUMIQUES	28
3.2.1.	Bilans volumiques intra-essai	28
3.2.2.	Bilans volumiques inter-essai	29
3.3.	FLUX SEDIMENTAIRES	30
3.4.	PERSPECTIVE POUR L'ETAT DE PROJET	32
4.	CONCLUSION	32

CHAPITRE 3 : DYNAMIQUE ET MORPHOLOGIE DES DUNES **33**

1.	CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES DUNES A PARTIR DE BATHYMETRIES D'ESSAIS EN LABORATOIRE	33
1.1.	METHODOLOGIE	33
1.1.1.	Gamme des débits investigués	33
1.1.2.	Mesures des caractéristiques par profil en long de la bathymétrie	33
1.1.3.	Représentativité géométrique des dunes présentes sur le MNT	34
1.2.	ANALYSE QUANTITATIVE DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DES DUNES	36
1.2.1.	Variabilité spatiale et entre essais de même type	36
1.2.2.	Caractérisation des formes sédimentaires observées en laboratoire	37
1.2.3.	Comparaison avec les caractéristiques en nature	38
1.2.4.	Comparaison entre type d'essai	40
1.2.5.	Corrélation entre les caractéristiques physiques et les conditions hydrauliques	41
2.	VITESSES DE MIGRATION DES DUNES PAR METHODE LARGE SCALE PARTICULE IMAGE VELOCIMETRY (LSPIV)	44
2.1.	METHODOLOGIE	44
2.1.1.	Données à disposition	44
2.2.2.	Traitement LSPIV	45
2.2.3.	Similitude temporelle	46
2.2.4.	Représentativité temporelle	47
2.2.5.	Représentativité spatiale des vitesses calculées	48
2.2.6.	Représentativité du pas de temps d'échantillonnage	50
2.3.	ANALYSE QUANTITATIVE DES VITESSES DE MIGRATION	50
2.3.1.	Gamme de débit investiguée	50
2.3.2.	Résultats et critiques	50
2.4.	COMPLEMENTS DU DIAGNOSTIC SEDIMENTAIRE PAR L'ANALYSE DES DUNES	51
2.4.1.	Temps de parcours des dunes et effets sur le bilan massique	51
2.4.2.	Estimation du débit solide charrié par les dunes	53
3.	PERSPECTIVES	55
4.	CONCLUSION SUR LES DUNES	56

Table des figures

Figure 1: Emprise des modèles numérique et physique sur la Loire	12
Figure 2: Similitude de Shields : paramètre de Shields critique en fonction du diamètre particulaire	17
Figure 3: Diagramme adimensionnel de Shields	18
Figure 4: Boîte d'injection solide amont (gauche) et vue globale sur le modèle physique depuis l'aval (droite).....	20
Figure 5: Chariot mobile sur le bras principal	21
Figure 6: Chronique de débits réels 2009-2013 et chronique de débits moyens mensuels T3X (station de Montjean).....	23
Figure 7: Débits solides et liquides classés (d'après la <i>Banque Hydro</i> , station de Montjean)	25
Figure 8: Comparaison des bathymétries observées sur la Loire (2009-2013) et sur le modèle.....	26
Figure 9: Différence entre la bathymétrie finale et initiale (essai 46 - essai 40).....	28
Figure 10: Bilan volumique cumulé intra-essai	28
Figure 11: Bilan volumique cumulé après chaque type d'essai	29
Figure 12: Comparaison des flux sédimentaires et hydrauliques	31
Figure 13: Différence entre le flux solide entrant et sortant au cours du cycle d'essai.....	31
Figure 14: Profils en long du MNT (amont, milieu et aval) et mesures des caractéristiques d'un groupe de dunes	34
Figure 15: Mesures directes des longueurs et des hauteurs de dunes sur le modèle (essai 52, milieu)	34
Figure 16: Identification des dunes modèle / MNT (essai 52, aval)	35
Figure 17: Comparaison des caractéristiques mesurées (dunes de l'essai 52)	35
Figure 18: Variabilité des caractéristiques spatiales et inter-essais (Février $Q_L = 1255 \text{ m}^3/\text{s Nat}$)	36
Figure 19: Caractéristiques des dunes pour les types d'essais morphogènes	37
Figure 20: Paramètres de <i>steepness</i> associés aux dunes des essais sur le modèle physique.....	38
Figure 21: Comparaison de la géométrie des dunes réelles et observées en laboratoire.....	39
Figure 22: Comparaison de l'état de développement des dunes modèles et réelles	40
Figure 23: Evolution du <i>steepness</i> en fonction du débit liquide et de la profondeur d'eau	41
Figure 24: Comparaison de la courbe relative aux hauteurs de dune (Yalin, 1964) aux dunes du modèle.....	42
Figure 25: Comparaison de la courbe relative aux longueurs de dune (Yalin, 1964) aux dunes du modèle.....	43
Figure 26: Prise de vue des vidéos et des timelapse sur le modèle	44
Figure 27: Extraits des timelapses « aval » et « milieu », à pas de temps 5 min	45
Figure 28: Exemple d'orthorectification avec 7 GRP (croix rouge) (essai37)	46

Figure 29: Paramètres de calcul : aire d'interrogation (vert), aire de recherche (bleu) et grille de calcul (points rouges) (essai 46)	46
Figure 30: Paramètre de Shields en fonction du diamètre particulaire pour 3 cas : valeurs réelles de la Loire, valeurs cibles modèle et valeurs observées sur le modèle	47
Figure 31: Vitesses moyennes des dunes au cours d'un essai	48
Figure 32: Calcul des vitesses sur l'ensemble du lit actif (gauche) et suivi de dune n°2 (droite) de la vidéo 1	49
Figure 33: Vitesses moyennes des dunes modèles (bleu) et dunes réelles (rouge) en fonction du débit liquide	51
Figure 34: Influence du temps de traversée dans le bilan massique instantané cumulé	52
Figure 35: Calage du paramètre de β	54
Figure 36: Estimation du taux de transport total par charriage à partir des dunes	55
Figure 37: Mise en place de l'ouvrage sur le modèle	58

Tables des tableaux

Tableau 1: Bilan des échelles pour le modèle physique de la Loire	19
Tableau 2: Essais de la phase de calage	25
Tableau 3: Cycle d'essais réalisés pour les prévisions à 15 ans	27
Tableau 4: Débits liquides correspondant aux types d'essais sélectionnés	33
Tableau 5: Vitesse moyenne des dunes à partir des séquences vidéo (essai 52)	49
Tableau 6: Vitesse moyenne à partir des vidéos et du timelapse (essai 52)	50
Tableau 7: Temps de parcours moyen des dunes par type d'essai	52

Symboles et abréviations

AMOA : Assistant à maître d'ouvrage

CACOH : Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques

CNR : Compagnie Nationale du Rhône

GRP : Ground Reference Point

ips : image par seconde

LSPIV : Large Scale Particle Image Velocimetry

MNT : Modèle numérique de terrain

PK : Point kilométrique

VNF : Voies Navigables de France

Ech_V : échelle des vitesses

Ech_J : échelle des pentes

Ech_H : échelle verticale

Ech_L : échelle horizontale

Ech_G : échelle géométrique

Ech_ε : échelle des densités relatives

Ech_{TH} : échelle du temps hydraulique

Ech_{TS} : échelle du temps sédimentaire

Ech_Q : échelle des débits liquides

Ech_{QS} : échelle des débits solides volumiques

$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$: nombre de Froude

$Re = \frac{4Vh}{\nu}$: nombre de Reynolds

V : vitesse de l'écoulement (m/s)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

h : hauteur d'eau de l'écoulement (m)

ν : viscosité cinématique de l'eau (m²/s) environ 10⁻⁶

ρ : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

ρ_s : masse volumique du matériaux (kg/m^3)

R_h : rayon hydraulique (m)

J : pente de la ligne d'énergie

d_{50} : diamètre médian des matériaux (mm)

$\gamma_s = (\rho_s - \rho) g$: poids volumique apparent du matériau ($\text{kg/m}^2/\text{s}^2$)

ε : densité relative $(\rho_s - \rho) / \rho$ (-)

$u_* = (\tau_0 / \rho)^{0.5}$: vitesse de cisaillement (m/s)

$\tau_0 = \rho g R_h J$: contrainte de cisaillement (N/m^2)

$D^* = d_{50} \left(\frac{\gamma_s}{\rho v^2} \right)^{\frac{1}{3}}$: diamètre particulaire

$Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu}$: nombre de Reynolds particulaire (-)

$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g d_{50}}$: paramètre de mobilité (-)

τ_{*c} : paramètre de mobilité critique de début d'entraînement (-)

i : pente du fond

L : longueur d'une dune (entre deux crêtes successives) (m)

H : hauteur d'une dune (m)

h_{eau} : profondeur d'eau (m)

h_c : profondeur d'eau critique (m)

τ_c : contrainte tractrice critique (N/m^2)

H/L : paramètre de steepness (-)

Les annotations Mod et Nat font références respectivement au modèle et à la nature (ou prototype) :
exemple : 14,5 m/j_Nat.

Introduction : de la Loire au laboratoire

Les extractions de sable en lit mineur de la Loire jusqu'en 1993 ont provoqué un déficit en sédiments entraînant une érosion progressive et régressive (*Dambre 1996, Nabet 2013*). La présence d'épis dans le bras principal pour favoriser la navigation a empêché toute possibilité d'érosion latérale. La seule voie pour tendre à un équilibre hydro-sédimentaire est donc l'érosion du lit ce qui a conduit à l'incision de la Loire (*Poligot-Pitsch et al. 2014, Nabet 2013, Latapie 2011*). *Poligot-Pitsch et al. (2014)* ont par ailleurs montré un exhaussement du lit depuis 2003, soit environ une décennie après l'arrêt des extractions, néanmoins celui-ci reste faible par rapport à l'état antérieur de la Loire. A l'étiage, l'abaissement de la ligne d'eau provoqué par l'incision a séparé certaines annexes fluviales de la Loire, représentant des niches écologiques importantes. La déconnexion des annexes et l'évolution du fonctionnement hydraulique ont fortement perturbé les espèces vivantes dans le milieu (disparition des zones de fraies, diminution des échanges avec les berges) et l'utilisation du fleuve (difficulté de navigation, modification des prises d'eau potable due à l'avancement du front de salinité). Les changements géomorphologiques de la Loire ne n'ont pas été sans conséquence sur l'écosystème présent.

Le retour à un fonctionnement plus équilibré de la Loire est l'un des enjeux du plan Loire IV (2015-2020). Dans le cadre de ce projet, Voies Navigables de France (VNF) doit, en tant que maître d'ouvrage, proposer des travaux répondant aux objectifs. Parmi les trois lots proposés au marché public par VNF, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et Egis Eau se sont vus confiés la maîtrise d'œuvre sur le lot n°1, le plus en aval et sujet à la marée, correspondant à la mise en œuvre du programme de rééquilibrage du lit de la Loire entre les Ponts-de-Cé et Nantes. VNF souhaite réaliser un aménagement sur le secteur de Bellevue, à l'entrée de l'agglomération nantaise, visant à créer une perte de charge d'environ un mètre pour des débits morphogènes. Ce projet de grande envergure, environ 20 M€ pour le seul ouvrage de Bellevue, est soutenu financièrement par de nombreux acteurs : la Région des Pays de la Loire, le Fond Européen de Développement Régional et l'Agence de l'Eau Loire Bretagne. Des enjeux écologiques, techniques, économiques et politiques sont à considérer.

Le projet est constitué de deux grandes phases. Une phase d'études et de procédures réglementaires répartie sur 36 mois de 2016 à 2019, puis une phase de travaux de 2019 à 2022 pour une période de 36 mois. En phase de conception, phase dans lequel s'inscrit le stage, un modèle hybride est proposé afin de réaliser une étude complète et précise de l'état actuel de la Loire et de l'état de projet avec aménagement. Le modèle numérique s'étend sur un linéaire de 15 km au niveau de Mauves-sur-Loire (PK 72,8) jusqu'à la diffluence de l'île Beaulieu (PK 58) tandis que l'emprise du modèle physique est comprise entre l'amont de la confluence avec le bras de Thouaré (PK 65) et l'aval du bras de l'île Héron (PK 61,3) (Figure 1).

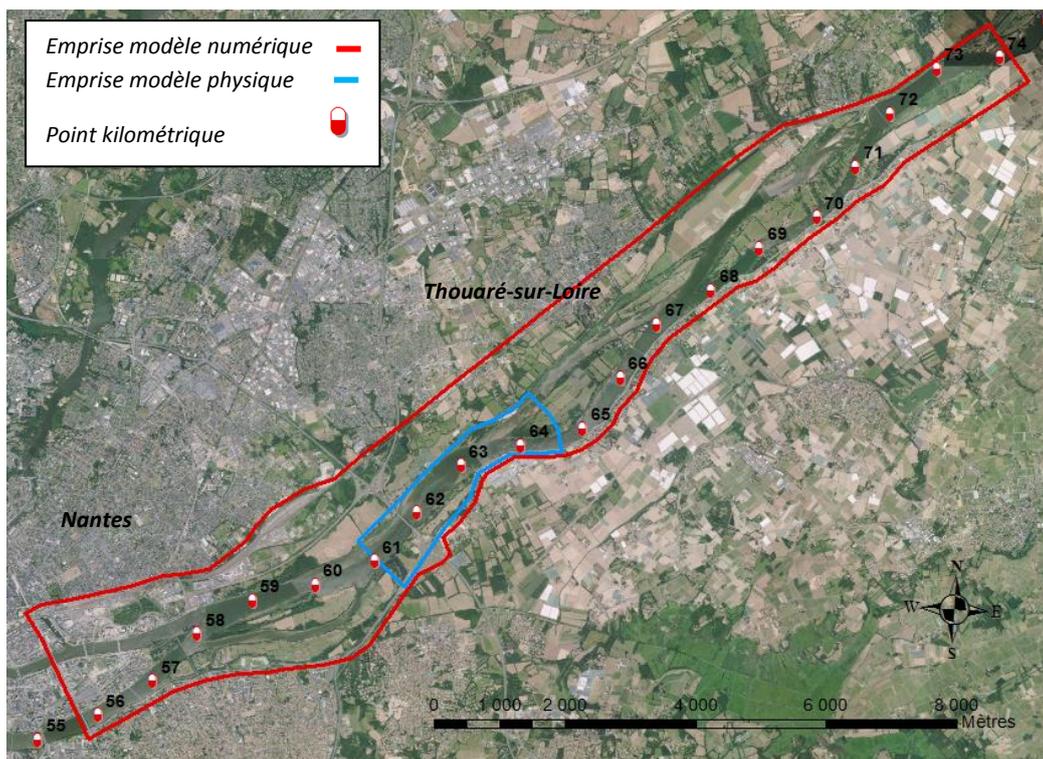


Figure 1: Emprise des modèles numérique et physique sur la Loire

Problématiques

La première phase d'essai en état actuel de la Loire sur le modèle physique constitue une quantité de données suffisante pour dresser le diagnostic sédimentaire de la Loire. Plusieurs questions se posent dans cette partie :

- Quel est le fonctionnement sédimentaire de la Loire ? L'équilibre sédimentaire est-il établi ?
- Quelles sont les prévisions morphologiques à moyen terme (15 ans) en état de référence (sans aménagement) ? Sont-ils cohérents avec les simulations numériques ?
- De quelles manières le modèle physique entraîne-t-il des incertitudes dans les résultats obtenus ?

L'étude des dunes a pour objectif de compléter l'analyse sur le transport solide de la Loire et d'approfondir la connaissance sur la dynamique et la morphologie du lit sur un modèle en similitude de Shields. De nombreuses questions se posent :

- Les dunes observées sur le modèle physique sont-elles similaires aux dunes de la Loire en termes de vitesse de migration et de géométrie ?
- De quelles manières les hypothèses et similitudes du modèle peuvent-elles influencer les dunes ?

Éléments de chronologie

Le stage s'est déroulé pendant 6 mois, de février à août 2018. La première partie était principalement axée sur la participation, d'abord, puis le co-pilotage des essais, pour ensuite réaliser

le traitement des différentes mesures (essai 37 à 52). Le diagnostic sédimentaire à horizon 15 ans s'est construit à la fin de cette partie. Dans la seconde moitié du stage, le diagnostic a pu être approfondi par l'analyse des dunes. Suite à la formation sur le logiciel Fudaa-LSPIV (par Irstea) et à la rencontre avec l'Université de Tours, les travaux sur les vitesses des dunes ont pu avancer rapidement. Dans un second temps, l'extraction des hauteurs et des longueurs des dunes a permis de parachever l'analyse sur les dunes. En fin de stage, une prise de recul sur les travaux déjà effectués a conduit à l'ajout de parties complémentaires et essentielles à la cohérence générale du document, comme l'estimation du débit solide unitaire.

Bien que les simulations numériques et la phase de calage ne se soient pas réalisées pendant le stage. Il apparaît essentiel de les présenter pour améliorer la compréhension générale du rapport. L'accès aux résultats de la phase de calage a permis de construire le début du diagnostic sédimentaire. Le calage est une étape cruciale pour la validation des hypothèses.

Chapitre 1 : Le modèle hybride : du numérique au physique

L'intérêt du modèle hybride est de proposer deux types de modélisation possédant chacun leurs avantages. La modélisation numérique eulérienne à l'échelle 1 : 1 permet de calculer un grand nombre de simulations : des prévisions de court (3 ans) à long terme (50 ans) et des simulations pour différents état projet. Le modèle numérique a également fourni des résultats essentiels dans l'élaboration des courbes de tarage des conditions limites du modèle physique. Le modèle physique, que l'on pourrait qualifier de modélisation lagrangienne par rapport à son alter-égo numérique, permet quant à lui d'apprécier le transport solide directement lors des essais, et en particulier pour des zones plus locales.

L'objet de ce chapitre, outre de présenter le modèle physique qui est le centre de gravité du stage, est de donner quelques clés de lecture sur l'ensemble des outils utilisés dans cadre de cette étude.

1. Modèle hydro-sédimentaire 2D

Le modèle numérique choisi est le couplage de deux systèmes : TELEMAC-2D (partie hydraulique) et Sisyphe (partie sédimentaire). L'emprise du modèle numérique est supérieure à celle du modèle physique (Figure 1).

A quoi sert le modèle numérique ?

- Simulations des débits solides au PK 64,7 afin d'établir la courbe de tarage sédimentaire (condition amont du modèle physique) ;
- Comparaison du flux solide simulés avec les mesures *in situ* ;
- Comparaison des bilans volumiques avec le modèle physique ;
- Prévisions à long terme 10 ans et 50 ans.

1.1. Calage sur une période de 3,6 ans

Le calage du modèle numérique se base sur trois critères pour retrouver les mesures bathymétriques effectuées entre 2009 et 2013 : l'évolution en volumes des sédiments, l'évolution spatiale des dépôts et érosions et les flux solides. Le conditionnement hydraulique utilisé lors du calage est la chronique 2009-2013 de la station de Montjean-sur-Loire. Le transport solide est calculé à partir de la formule de Meyer-Peter et Müller dont les paramètres ont été ajustés sur des mesures *in situ*. La phase de calage a permis d'obtenir une convergence du modèle numérique en termes de tendance sédimentaire et de capacité de transport par rapport aux données réelles issues des mesures effectuées.

1.2. Conditions aux limites

Le modèle numérique utilise des conditions en cote en aval issues de chroniques extraites du modèle global 1D fournies par Hydratec (AMOA), et basées sur des conditions réelles. Le grand intérêt du modèle 1D est de couvrir plus de 100 km de Loire, depuis l'amont non influencé par la marée jusqu'à l'océan Atlantique. Pour les différentes simulations, les conditions hydrauliques à l'amont sont définies à partir des chroniques marégraphiques et hydrométriques. Le débit solide entrant est quant à lui calculé à partir de la formule de Meyer-Peter et Müller.

1.3. Principales conclusions du calage

Le bilan volumique obtenu entre les bathymétries de 2009 et 2013 est de + 250 000 m³, ce qui est proche des estimations de terrain. De plus, la capacité moyenne de transport du modèle est analogue à celle estimée par les mesures *in situ*. Le modèle numérique calé semble ainsi en mesure de simuler des prévisions à plus long termes (10 – 50 ans). L'engraissement naturel de la Loire, visible sur la période de calage, sera à étudier sur ces plus grands horizons. Qui plus est, le modèle 2D a été en capacité de propager une courbe de tarage sédimentaire jusqu'aux frontières du modèle physique

2. Modèle physique à fond mobile

2.1. Lois de similitude

La conception d'un modèle physique se base sur des notions complexes mais essentielles pour une représentation fidèle de la réalité. Deux similitudes fondamentales se distinguent : les lois de similitude hydraulique pour reproduire la dynamique de l'écoulement et les lois de similitude sédimentaire pour respecter la mise en mouvement et les conditions de transport des sédiments. Pour un modèle hydraulique, la constante de gravité, la masse volumique de l'eau et la viscosité cinématique sont constantes entre le modèle et le prototype.

2.1.1. Loi de similitude hydraulique : similitude de Froude

Le nombre de Froude est un nombre adimensionnel représentant le rapport entre les forces d'inertie et potentielle du fluide. Dans un modèle à surface libre, ces forces sont prépondérantes. Il est donc cohérent d'utiliser ce paramètre pour reproduire la dynamique de l'écoulement. La similitude de Froude consiste à conserver le nombre de Froude modèle égale au nombre de Froude prototype. L'utilisation de cette similitude se fait sous la condition d'un nombre de Reynolds supérieur à 4000.

Soit le nombre de Froude $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$, la similitude hydraulique s'écrit : $\frac{Fr_{Mod}}{Fr_{Nat}} = 1$

Les échelles hydrauliques principales sont les suivantes (Peakall, 1996):

- Condition de Froude : $Ech_V = Ech_H^{1/2}$
- Echelle des débits liquides : $Ech_Q = Ech_H^{3/2} Ech_L$
- Echelle des temps hydrauliques : $Ech_{TH} = Ech_H^{-1/2} Ech_L$

2.1.2. Loi de similitude sédimentaire : similitude de Shields

Dans un modèle à fond mobile, les mouvements du fluide et des matériaux sont interdépendants. Pour étudier le transport solide sur le modèle physique, il est nécessaire de recourir non seulement à une similitude de Froude mais aussi à une similitude sédimentaire. L'intérêt se portera uniquement sur le transport par charriage.

Comme le modèle est à fond mobile et que le nombre de Reynolds est supérieur à 4000, il convient de respecter la similitude des forces tractrices par rapport aux forces tractrices critiques (mouvement, stabilité), soit le même paramètre de Shields (τ^*) entre le modèle et la réalité. Ce paramètre représente le rapport entre la contrainte de cisaillement exercée par le fluide sur les sédiments et le poids submergé des matériaux. Le respect de la similitude Shields permet d'assurer

une mise en mouvement des sédiments et des conditions de transport sédimentaire analogues entre le modèle physique et la nature.

Soit le paramètre de Shields $\tau^* = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho) g d_{50}}$, la similitude sédimentaire s'écrit : $\frac{\tau_{Mod}^*}{\tau_{Nat}^*} = 1$

Pour un fleuve, le rayon hydraulique est considéré suffisamment large pour faire l'approximation suivante : $R_h \approx h$. Avec les notations d'échelle, la similitude de Shields s'exprime par : $Ech_H Ech_j = Ech_\varepsilon Ech_{d50}$

Pour le modèle physique de la Loire une distorsion de densité était nécessaire sinon l'échelle des diamètres aurait été égale à l'échelle verticale. Or le diamètre médian du secteur de Bellevue est de l'ordre de 1mm, par conséquent sans distorsion de densité le diamètre médian du matériau du modèle aurait été trop fin, ce qui aurait rendu les matériaux cohésifs. Il a fallu jouer à la fois sur la distorsion de densité et la distorsion verticale, pour obtenir une taille suffisante des matériaux sur le modèle et garantir la formation des dunes, mode de charriage principal sur le secteur étudié. La densité choisie pour le modèle est plus faible que celle du prototype :

Caractéristiques des matériaux utilisés : $\rho_s = 1050 \text{ kg/m}^3$ et $d_{50} = 1,32 \text{ mm}$

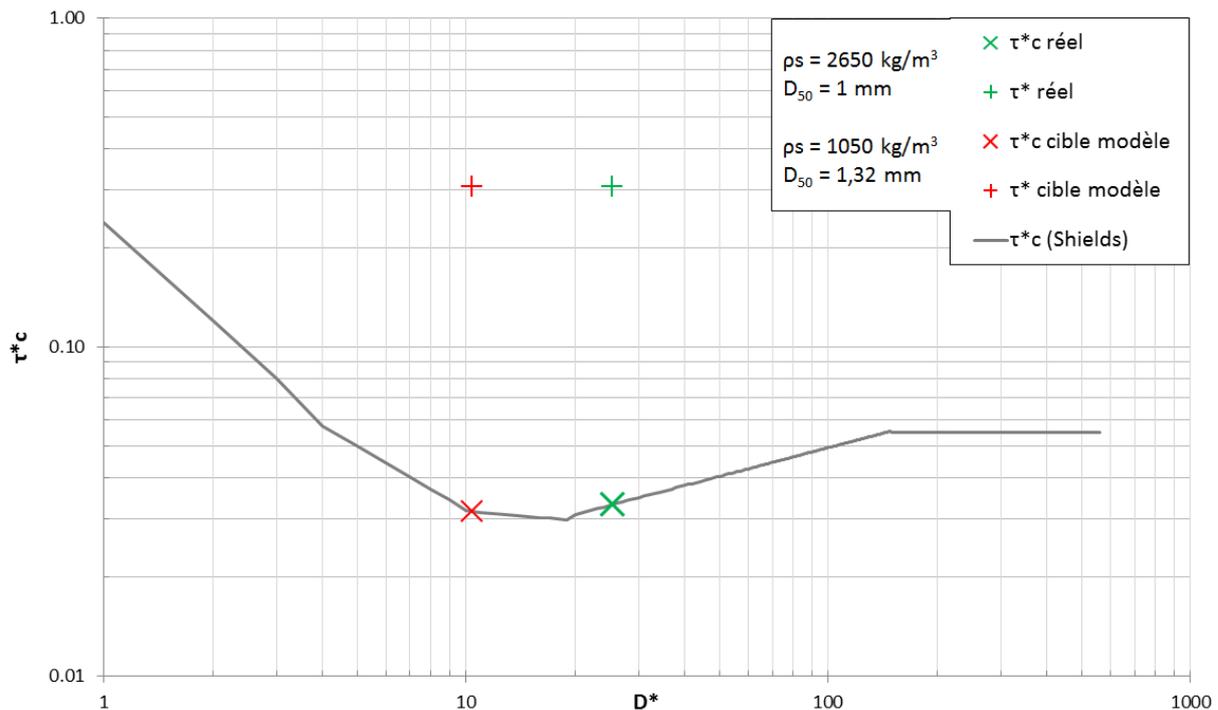


Figure 2: Similitude de Shields : paramètre de Shields critique en fonction du diamètre particulaire

Une représentation correcte des phénomènes hydro-sédimentaires repose sur l'aspect qualitatif des modes de charriage. Sur la Loire, le sable est transporté essentiellement en présence de dunes. Selon *Ramette (1981)*, le maximum des dunes est atteint pour un $\tau^* = 0,4$, c'est pourquoi la valeur cible modèle est proche de cette valeur. De plus, les dunes augmentent très fortement la rugosité, jusqu'à la doubler pour $\tau^* = 0,4$. Il est donc impératif de bien respecter le même τ^* entre modèle physique et nature pour tenir compte de l'effet de la rugosité provoqué par les dunes (Figure 2). Il faut également veiller à limiter l'apparition de rides perturbatrices sur le modèle. Ces rides introduisent des pertes de charge supplémentaires et perturbent le mode de transport. Le diamètre

particulaire modèle doit être supérieur à 10 pour éviter l'apparition de rides perturbatrices (d^* sur la Figure 3).

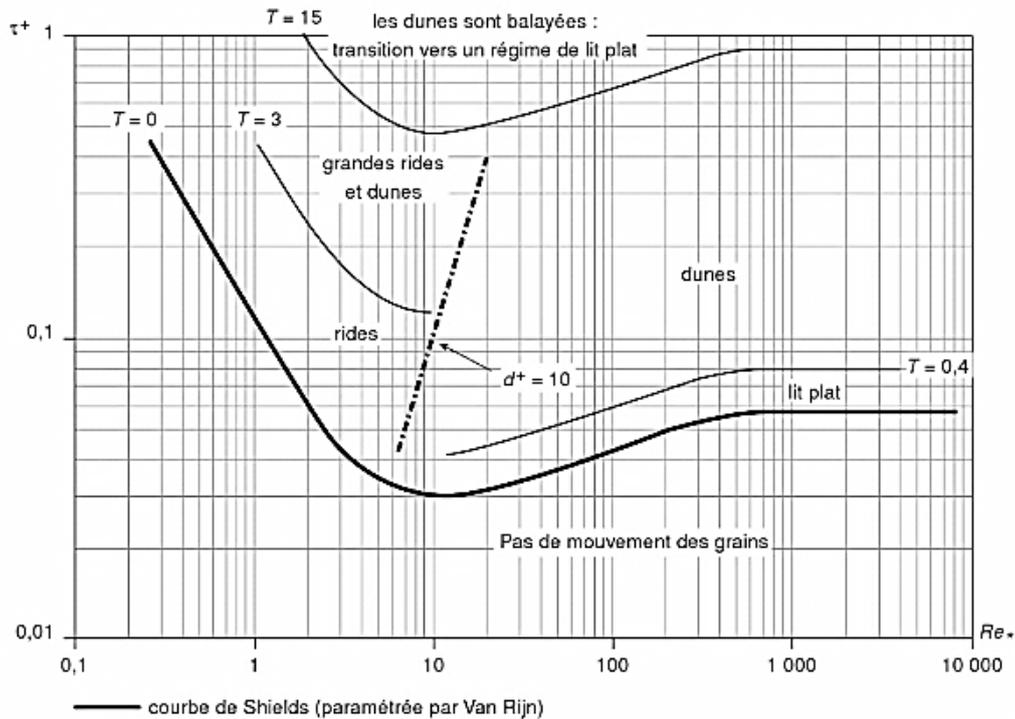


Figure 3: Diagramme adimensionnel de Shields

Les échelles sédimentaires principales sont les suivantes (Peakall, 1996) :

- Condition sur le transport solide (Shields) : $Ech_{d_{50}} Ech_{\epsilon} = Ech_H^2 Ech_L^{-1}$
- Echelle de temps sédimentaire : $Ech_{TS} = Ech_{\epsilon} Ech_L^{5/2} Ech_H^{-2}$
- Echelle de débit solide volumique : $Ech_{Q_S} = Ech_H^3 Ech_L^{-1/2} Ech_{\epsilon}^{-1}$

2.1.3. Choix de l'échelle géométrique

La similitude géométrique correspond au rapport des dimensions horizontale et verticale entre le modèle et la réalité. Une échelle horizontale de $1/100^{\text{ème}}$ a été choisie pour des raisons d'installation du modèle dans le hall du laboratoire et de respect de certaines conditions (nombre de Reynolds). Une distorsion verticale était indispensable pour obtenir des hauteurs d'eau suffisamment haute pour étudier correctement le transport solide (notamment pour les mesures) et pour obtenir un diamètre médian convenable. L'échelle verticale est établie au $1/50^{\text{ème}}$.

Une fois les échelles géométriques déterminées, toutes les échelles qui découlent des similitudes sont calculées (Tableau 1).

Echelle horizontale	1/100
Echelle verticale	1/50
Echelle sur la pente	1/0,5
Echelle de densité relative	1/33
Echelle de granulométrie sur le d_{50}	1/0,8
Echelle de transport solide	1/12500

Echelle de temps sédimentaire	1/1320
Echelle de temps hydraulique	1/14
Echelle de débit hydraulique	1/35355
Echelle du nombre de Shields	1/1
ρ_s modèle (kg/m ³)	1050
d_{50} modèle (mm)	1,32
D^* modèle	10,4
Re (h=3m)	4466
Re* (h=3m)	18,7

Tableau 1: Bilan des échelles pour le modèle physique de la Loire

2.2. Incertitudes du modèle physique

La distorsion verticale et la distorsion de densité introduisent des incertitudes dans le modèle physique. La comparaison des résultats obtenus par le modèle physique avec les résultats issus du modèle numérique pourront permettre d'évaluer les incertitudes du modèle physique. La compréhension et l'estimation de ces incertitudes seront capitales dans l'interprétation des résultats.

2.2.1. Effet de la viscosité

La viscosité de l'eau ν intervient dans l'expression du diamètre particulaire et dans le nombre de Reynolds. Or, la viscosité de l'eau double quand la température passe de 20 à 0°C (*Colby et Scott, 1965*). La charge sédimentaire tend à augmenter lors que la température décroît (*Tyrrell, 2015*). Plus particulièrement, *Colby et Scott (1965)* a montré que l'effet de la variation de température est surtout remarquable pour des diamètres compris entre 0,125 - 0,2 mm en raison de la modification de la distribution verticale des matières en suspension. Un suivi de la température a été effectué lors des périodes hivernales où les températures extérieures étaient les plus basses (de -10 à 5°C). L'effet de la température extérieure sur l'eau du réservoir utilisé pour les essais n'est pas marqué, aucune corrélation n'a pu être établie entre la température de l'eau et l'évolution du flux solide pour un même type d'essai.

2.2.2. Incertitude due à la distorsion verticale

La distorsion verticale affecte les écoulements tridimensionnels. Elle est acceptable pour toutes les zones de plage de dépôt mais elle ne l'est pas pour les zones des ouvrages ou des épis. Il faudra donc être vigilant dans les interprétations de ces zones. De plus, il est important de rappeler ici que l'objectif du modèle physique est de déterminer la tendance de l'ensemble et non de porter l'intérêt sur des points locaux. Pour une simulation correcte des ouvrages, un modèle au 1/30 environ, sans distorsion verticale aurait été nécessaire, soit une taille de modèle trop importante pour le laboratoire.

2.2.3. Incertitude due à la trop forte rugosité des matériaux de fond

La distorsion de densité et la distorsion d'échelle verticale génèrent une distorsion de rugosité des matériaux du fond (*Heller, 2011*). Les pertes de charge linéaires sont surestimées par rapport à la réalité en raison de la taille relativement importante des matériaux par rapport à l'échelle géométrie du modèle. Compte tenu de la très faible pente de ligne d'eau (~0,2m/km en Loire) dans le canal vitré cette incertitude n'a pas pu être quantifié. Cependant, la phase de test en canal vitré a pu vérifier que les matériaux étaient bien transportés par charriage, que les conditions de mise en mouvement étaient bien respecter et que les dunes étaient bien formées. De plus, les lignes d'eau relevées sur le

modèle sont comparables avec les mesures observées sur la Loire. La contribution des pertes de charge singulière liées à l'aménagement sera prépondérante que celle des pertes de charge linéaires par frottement, ces dernières peuvent donc être négligées.

2.3. Caractéristiques du modèle et outils de mesure

Pour rappel, le modèle physique représente une section de 3,5 km de la Loire entre le PK 65 et le PK 61,5 (Figure 1). Le modèle a été conçu avec une échelle horizontale au 1/100^{ème} et une échelle verticale au 1/50^{ème}. Le matériau choisi pour le modèle est le polystyrène avec une masse volumique 1050 kg/m³ et un diamètre médian de 1,32 mm.

Les échelles des temps hydrauliques et sédimentaires impliquent une accélération des phénomènes lors des essais. À titre d'exemple, 7 heures d'essai du modèle représente un peu plus d'une année dans la réalité et 3 500 m³/s nature est modélisé par un débit d'environ 100 L/s modèle.

Un bassin d'alimentation en eau est installé à l'amont du bras principal (3 x 5m), deux débitmètres électromagnétiques permettent d'imposer les conditions hydrauliques à l'amont (PK 64,7). Lors des essais le bras de Thouaré (bras secondaire) n'était pas alimenté ni en eau ni en matériaux car ses effets hydrauliques et sédimentaires sont négligeables par rapport au bras principal, excepté pour l'événement de crue. L'apport des matériaux se réalise dans un injecteur pourvu de 3 exutoires immergés pour une répartition optimale sur la largeur active (Figure 4). Deux systèmes ont été utilisés:

- Injection manuelle à l'aide de seaux toutes les 5 minutes (essai 35 à essai 48)
- Injection automatique à l'aide d'une vis d'Archimède (essai 49 à jusqu'aux essais en état projet)



Figure 4: Boite d'injection solide amont (gauche) et vue globale sur le modèle physique depuis l'aval (droite)

A l'aval, des volets réglables permettent d'évacuer l'eau et d'imposer les conditions hydrauliques (PK 61,3). Ces volets sont équipés d'une grille permettant de récupérer les matériaux passant par les volets. Un bassin est également présent à l'aval (8 x 4m), le débit sortant est calculé à l'aide d'un seuil normalisé calibré. A l'amont des volets se trouvent trois petites fosses dans le fond

du lit. Les matériaux charriés y tombent puis sont aspirés jusqu'au tamis vibrant où ils sont centrifugés puis mesurés de manière continue à l'aide d'une balance.

Un chariot mobile présent sur le bras principal est équipé de différents instruments de mesures permettant des acquisitions pendant ou après l'essai (Figure 5) :

- 8 capteurs ultrasons (sonde Micro-Sonic) mesurent les cotes de la surface de l'eau pendant l'essai avec une précision de $\pm 0,5\text{mm}$. Deux pointes limnimétriques installées au PK 64,7 et au PK 61,3 permettent de calibrer les capteurs ultrasons et de surveiller une dérive éventuelle de ces derniers.
- Un système Ultralab doté d'un capteur de type sonar enregistre les fonds en fin d'essai. Il permet d'obtenir des profils bathymétriques.
- 5 appareils photo utilisés pour la photogrammétrie. Un second chariot manuel présent sur le bras amont, est quant à lui pourvu de 3 appareils photo. La photogrammétrie permet de déterminer le relief du fond en 3 dimensions grâce aux différentes prises de vue capturées par les appareils photos.



Figure 5: Chariot mobile sur le bras principal

3. Conclusion

Le modèle physique à fond mobile de la Loire à distorsion verticale et de densité en similitude de Froude et de Shields est remarquable par sa complexité et les différents dispositifs de mesure. En plus d'une représentation géométrique fidèle du site d'étude, les conditions hydrauliques, imposées par la similitude de Froude, et les conditions sédimentaires, imposées par la similitude de Shields, sont réunies afin de créer un transport solide analogue à celui de la Loire. Le choix judicieux des deux distorsions ont abouti à l'utilisation d'un matériau adapté et vérifiant plusieurs contraintes comme le diamètre particulaire et le nombre de Reynold particulaire. Ainsi, le modèle physique est une imbrication de nombreuses contraintes qui ensemble, forment un tout cohérent. En plus d'une bonne conception, le modèle de la Loire est pourvu de plusieurs systèmes de mesure adaptés. Parmi eux, le chariot mobile est un outil indispensable pour les acquisitions du bras principal inaccessible pendant les essais. Il permet notamment de réaliser la photogrammétrie, technique qu'il a fallu adapter pour un modèle en eau 24/24h. D'autre part, les résultats numériques issus du calage (2009-2013) et des prévisions à 10 ans en état actuel serviront de points de comparaison pour le programme d'essais prévu sur le modèle physique.

Chapitre 2 : Diagnostic sédimentaire de la Loire

Le diagnostic sédimentaire permet d'évaluer les caractéristiques sédimentaires actuelles de la Loire. En raison des diverses incertitudes énoncées dans le chapitre 1, la précision quantitative n'est pas l'objectif principal de ce diagnostic. C'est plutôt les aspects qualitatifs et les tendances sédimentaires qui seront retenus dans l'appréciation des résultats du modèle physique par rapport aux résultats numériques.

1. Conditions aux limites du modèle physique

Afin de comprendre les résultats des essais réalisés, il est crucial de présenter succinctement la méthodologie employée pour conditionner le modèle physique.

1.1. Conditions hydrauliques amont

Contrairement au modèle numérique, le débit imposé à l'amont du modèle physique est synthétique et correspond à une séquence annuelle de débits moyens mensuels. Cette pseudo-chronique est issue de l'analyse statistique de la station de Montjean-sur-Loire entre 2009 et 2013, et représente les débits moyens mensuels ordonnés de telle manière à cumuler par mois des cycles annuels (Figure 6). C'est le modèle numérique qui a permis de valider la méthode de conditionnement hydraulique amont du modèle physique.

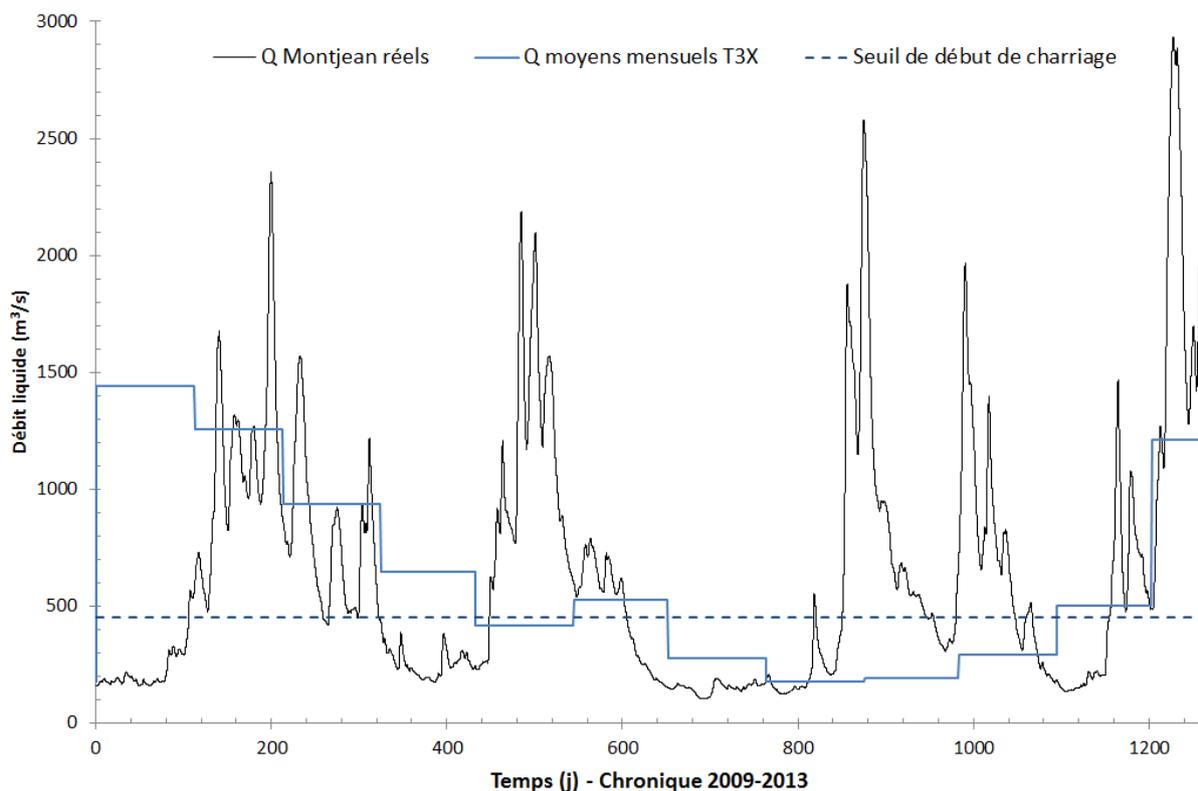


Figure 6: Chronique de débits réels 2009-2013 et chronique de débits moyens mensuels T3X (station de Montjean)

L'hydrogramme à la station de Montjean décrit un cycle annuel de variation de débit, en calculant les débits moyens mensuels la variation annuelle reste visible sur un cycle d'essai (Figure 6).

1.2. Conditions hydrauliques aval : courbe d'équivalence en débit solide

Compte tenu de l'échelle des temps sédimentaires, il est impossible de modéliser l'effet de la marée dans le modèle physique (un cycle de marée de 12h représente moins d'une minute sur le modèle). Il est donc nécessaire de recourir à une courbe synthétique en cote aval. La courbe synthétique tient compte de l'effet de la marée en générant le même volume de sable charrié pendant un cycle de marée sur une durée correspondante.

Tout d'abord, les débits solides sont calculés en fonction du débit liquide pour différentes cotes de marée au PK 58 : $Q_S = f(Q_L)$. Ensuite, le débit solide moyen pendant un cycle de marée a été déterminé pour différents débits liquides de la station de Montjean-sur-Loire : $Q_{S_{moy}} = f(Q_L)$. La courbe synthétique en cote aval au PK 58 est construite à partir des points d'intersection entre les courbes calculées pour les différentes cotes aval et la courbe $Q_{S_{moy}} = f(Q_L)$ pour un cycle de marée tel que $Q_S = Q_{S_{moy}} : Z_{PK58} = f(Q_L)$ (Annexe 1). Une simulation 2D a permis d'extraire la courbe de tarage aval au PK 61,3, limite aval du modèle physique : $Z_{PK61,3} = f(Q_L)$.

1.3. Conditions sédimentaires amont : loi de transport solide issue des mesures *in situ*

Des mesures de terrain ont été réalisées en janvier et avril 2017 au PK 72,7 pour quantifier le transport solide de la Loire par charriage et par suspension en basse et pleine mer. Ces mesures sédimentaires ont permis de caler sur le modèle numérique les paramètres dans l'équation *Meyer-Peter et Müller (1948)*, l'objectif étant de retrouver des débits solides identiques aux mesures réalisées au niveau du PK 72.

Une fois le calage effectué, la modélisation numérique a permis d'obtenir une loi de transport solide calculée au PK 65 (amont du modèle physique) : $Q_S = f(Q_L)$. Le modèle numérique calcule plusieurs débits solides pour un débit liquide donnée en raison de l'effet de la marée (chronique Z_{aval} réelle). En choisissant une courbe de tarage à 70 % de l'enveloppe supérieure (Annexe 2), le volume annuel calculé à partir des débits classés d'une chronique réelle s'élève à 110 000 t ce qui est proche des 105 000 t simulé par le modèle numérique.

Les phases de pré-calage et de calage du modèle physique ont permis de régler les courbes de tarages amont et aval établies précédemment.

1.4. Plages de débits étudiés pour le modèle physique

Il n'est pas nécessaire de simuler tous les mois de l'année. En effet, les mois de mai, juillet, août, septembre et octobre ont un débit moyen mensuel faible (de 194 à 415 m³/s) pour lesquels le débit solide associé est très faible voire nul. Le transport solide est donc négligeable pour ces mois par rapport au flux solide observé sur le restant de l'année (Figure 7). D'autre part, le débit solide lors des crues est important. Ces événements, certes morphogènes, restent tout de même rares. Deux essais représentant une crue ($Q = 2500 \text{ m}^3/\text{s}$) ont été simulés.

La plage de débits liquides retenus prend en compte des débits liquides pour laquelle les débits solides sont visibles et fréquents. Les essais simulés représentent les mois de janvier, février, mars, avril, juin, novembre et décembre sur une plage de 500 à 1440 m³/s.

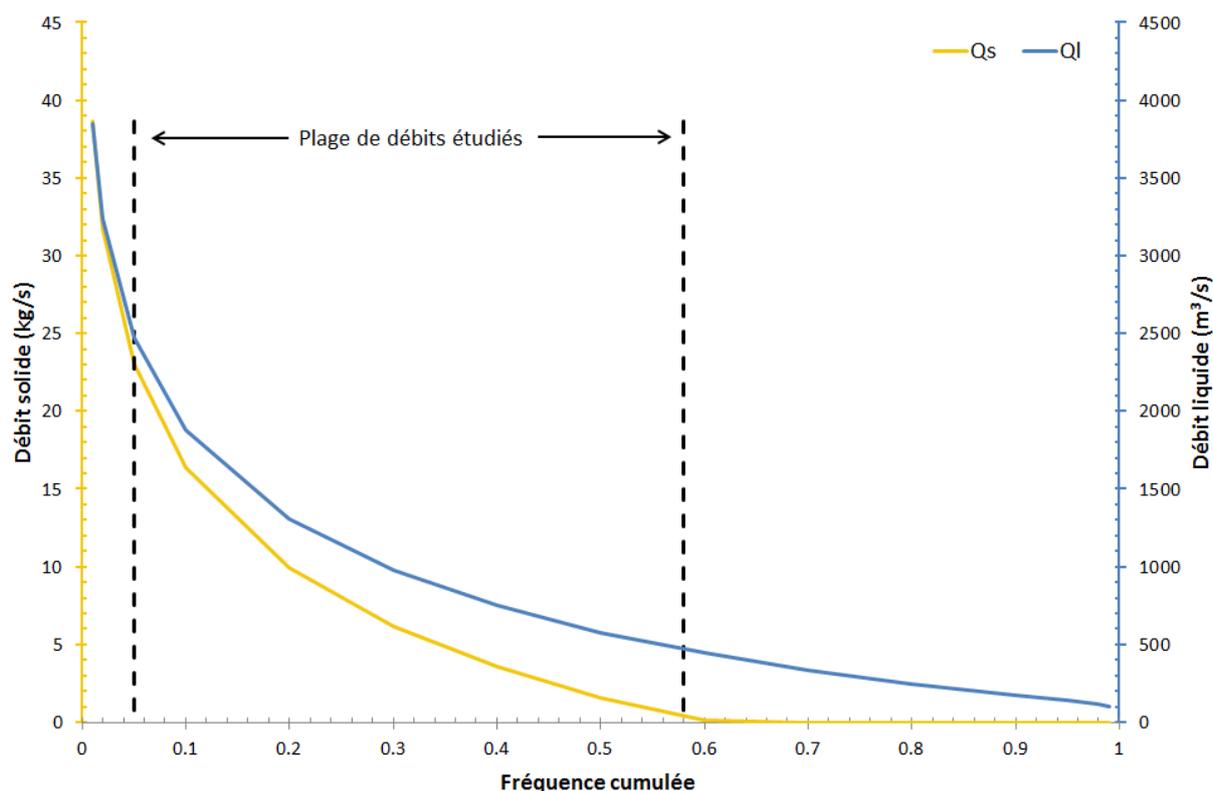


Figure 7: Débits solides et liquides classés (d'après la Banque Hydro, station de Montjean)

La fréquence d'occurrence moyenne et les débits solides associés non négligeables qualifient les débits liquides retenus comme des débits morphogènes et représentatifs des conditions hydrauliques et sédimentaires moyennes de la Loire.

2. Calage du modèle physique sur les bathymétries réalisées entre 2009 et 2013

La phase de calage a pour objectif de vérifier que les tendances naturelles observées sur les bathymétries réalisées entre 2009 et 2013 (3,6 ans) se retrouvent dans le modèle physique.

2.1. Essais réalisés pour le calage 2009-2013

Les essais réalisés pour la phase de calage sont les suivants :

Valeurs natures	Q_l PK64,7 (m^3/s)	Z PK61,3 (mNGF)	Q_s entrant (kg/s)	Q_s sortant (kg/s)	Bilan volumique net (m^3)
ESSAI20_CAL_T3XJANV2	1 440	0.92	11.06	9.65	9 943
ESSAI21_CAL_T3XFEV1	1 246	0.52	9.33	7.16	11 163
ESSAI22_CAL_T3XMARS1	928	- 0.19	5.50	3.72	9 204
ESSAI23_CAL_T3XAVR1	650	- 1.12	2.45	1.07	6 434
ESSAI24_CAL_T3XMAI1	411	- 1.09	-	-	-
ESSAI25_CAL_T3XJUN1	531	- 1.08	1.08		3 877
ESSAI26_CAL_T3XNOV1	499	- 1.12	0.78	0.23	2 479
ESSAI27_CAL_T3XDEC1	1 218	0.49	8.53	7.28	8 307

Tableau 2: Essais de la phase de calage

Il est à noter que dans l'essai de mai correspondant à un débit liquide de $411 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q_s entrant nul), le transport solide était très faible ce qui valide le choix de la plage de débits étudiés (cf. paragraphe 1.4, chapitre 2). Chaque essai dure 2h, ce qui correspond à 110 jours dans la réalité. En comptant les mois où le transport solide est nul, le cycle d'essai permet de modéliser les 3,6 années (2009-2013).

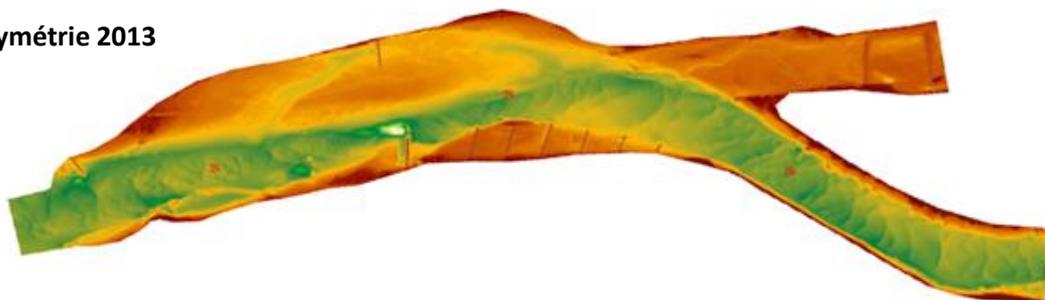
2.2. Bilan volumique net

Le bilan volumique estimé à partir des mesures bathymétriques réelles entre 2009-2013 est un bilan positif de $+ 97\,000 \text{ m}^3$. Les essais réalisés sur le modèle physique pour le calage 2009-2013 représentent un bilan volumique net de $+ 51\,000 \text{ m}^3$, soit un peu plus de la moitié du volume observé sur la Loire. En revanche, la tendance au dépôt est marquée sur le modèle physique comme sur la Loire.

2.3. Comparaison des bathymétries

La photogrammétrie permet d'obtenir une bathymétrie de l'état final d'un essai facilitant ainsi la visualisation des zones de dépôt ou d'érosion. Les bathymétries réelles de 2013 et la bathymétrie modèle finale de la phase de calage peuvent être comparées.

Bathymétrie 2013



Bathymétrie en fin de calage

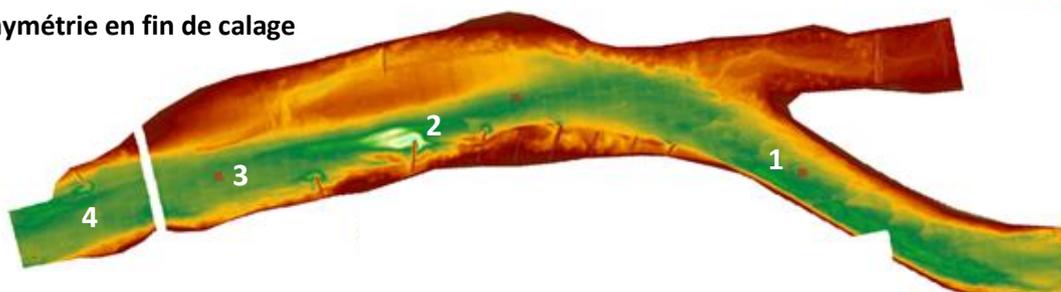


Figure 8: Comparaison des bathymétries observées sur la Loire (2009-2013) et sur le modèle

Dans manière plus locale sur le lit, des similitudes se retrouvent au bout des 3,6 ans entre la réalité et le modèle physique :

- Le bras amont est identifié comme une zone de dépôt préférentielle avec la présence de nombreuses dunes (Figure 8, [1]).
- Malgré les écoulements tridimensionnels (peu adaptés pour un modèle physique à distorsion verticale) au niveau des épis, la fosse d'affouillement est bien représentée par le modèle physique et semble pérenne. Un dépôt marqué apparaît en amont de cette fosse, ce qui laisse penser que l'affouillement régule le transport solide à ce niveau (Figure 8, [2]).

- La zone en amont du pont de Bellevue présente des dunes visibles sur les deux bathymétries (Figure 8, [3]).
- La présence marquée des dunes à l'aval se retrouvent à la fois dans le modèle physique et sur la Loire (Figure 8, [4]).

2.4. Conclusion du calage

La présence de formes sédimentaires et de zones particulières locales d'érosion ou de dépôt (fosse, épis) observées en fin de calage représentent assez fidèlement l'évolution de la bathymétrie entre 2009-2013 sur la Loire. De plus, les conditions aux limites amont et aval issues des courbes de tarage permettent de produire un bilan volumique de $+51\,000\text{ m}^3$ sur 3,6 ans, ce qui traduit un engraissement du lit. La tendance sédimentaire est analogue à la réalité ($+97\,000\text{ m}^3$), ce qui valide la phase de calage. Ainsi, le modèle physique est bien représentatif de la réalité, une prévision à moyen terme (15 ans) peut donc être envisagée.

3. Prévisions à 15 ans en état actuel de la Loire

La phase d'essais en état actuel de la Loire s'est déroulée sur plus de 3 mois avec 16 essais effectués. Les essais 40 (mars) à 46 (février) seront étudiés afin d'analyser un cycle complet d'essai. En comptant les mois où le transport par charriage est nul, le cycle d'essai permet de modéliser un période de 15 ans.

Valeurs natures	Q_L PK64,7 (m^3/s)	Z PK61,3 (mNGF)	Q_S entrant (kg/s)
ESSAI40_EI_T3XMARS1	929	- 0.18	5.75
ESSAI41_EI_T3XAVR1	648	- 1.05	2.46
ESSAI42_EI_T3XJUN1	522	- 1.09	1.09
ESSAI43_EI_T3XNOV1	497	- 1.11	0.78
ESSAI44_EI_T3XDEC1	1 206	0.42	8.90
ESSAI45_EI_T3XJANV1	1 425	0.90	11.51
ESSAI46_EI_T3XFEV1	1 260	0.53	9.29

Tableau 3: Cycle d'essais réalisés pour les prévisions à 15 ans

3.1. Evolution de la bathymétrie

La différence des bathymétries entre l'essai 40 et 46 représente l'évolution des fonds sur une durée de 15 ans. La largeur et le fond du lit restent globalement les mêmes au bout des 15 ans. Deux zones attirent l'attention :

- Au niveau du point d'injection amont, les matériaux mettent un certain temps avant d'être mis en mouvement (un seau toutes les 5 min). Le dépôt visible dans le bras amont n'est donc pas représentatif de l'évolution réelle de la bathymétrie à cet endroit (Figure 9, [1]).
- Le comblement de la fosse est très marqué au bout de 15 ans. Cependant, cette observation est à modérée car les écoulements hélicoïdaux provoqués par les épis représentent des biais dans le modèle (paragraphe 2.2.2, chapitre 1), d'autant plus que la durée d'essai est longue (Figure 9, [2]).

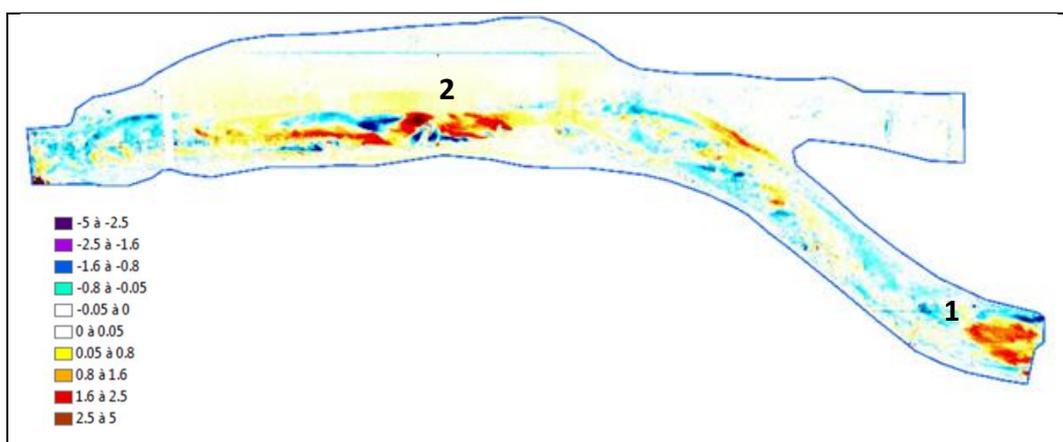


Figure 9: Différence entre la bathymétrie finale et initiale (essai 46 - essai 40)

3.2. Bilans volumiques

L'analyse volumique des essais 40 à 46 se divise en deux parties. Le bilan volumique cumulé intra-essai a été calculé dans le but de montrer des évolutions particulières du bilan volumique au cours d'un essai et non se restreindre au bilan final. Alors que le bilan volumique cumulé inter-essai a pour objectif de montrer l'interdépendance des essais.

3.2.1. Bilans volumiques intra-essai

Le bilan massique instantané est calculé en soustrayant chaque seconde la masse entrante (fixée par la condition limite amont) et la masse mesurée sortante. Ce bilan est ensuite cumulé sur toute la durée de l'essai. La masse mesurée à l'aval est une masse de matériaux mouillés, il faut donc y appliquer un taux d'humidité. Ce taux est déterminé pour chaque essai à l'aide de deux prélèvements pendant l'essai. La conversion du bilan massique en bilan volumique permet de mieux visualiser et comparer les valeurs numériques (Figure 10).

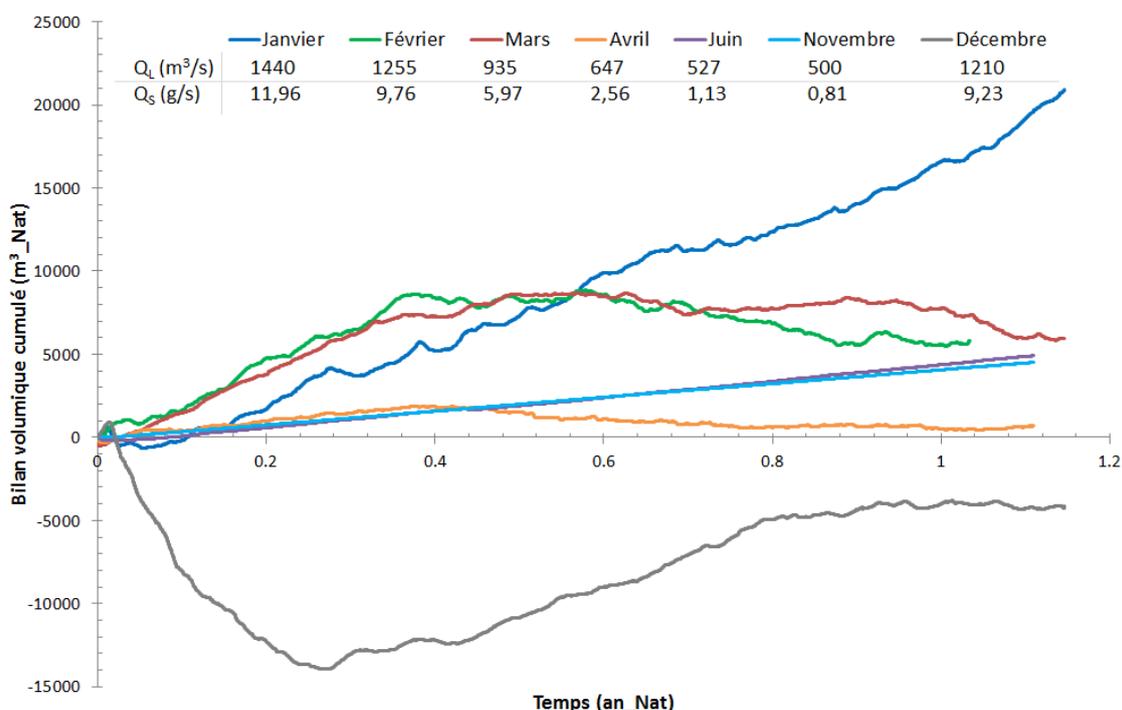


Figure 10: Bilan volumique cumulé intra-essai

La courbe du bilan volumique cumulé est variable selon les essais. Pour les essais de type juin et novembre où les débits sont les plus faibles, le bilan volumique cumulé est quasiment linéaire. Le transport solide y est très faible, le charriage continu des matériaux et la faible présence de dunes peuvent expliquer cette linéarité. De la même façon, les matériaux s'accumulent dans l'essai de type janvier mais de manière plus marquée, le lit présente de nombreuses dunes importantes.

D'autre part, les essais de type février, mars et avril se comportent de manière similaire. Leur bilan volumique cumulé augmente jusqu'au premier tiers de l'essai puis décroît légèrement. Sur ce premier tiers, le modèle accumule les matériaux injectés, puis à un certain seuil le modèle semble atteindre un équilibre.

Le comportement de l'essai de décembre est différent des autres essais. Dans le premier tiers de l'essai, le bilan volumique cumulé est négatif : le modèle semble évacuer d'abord une partie des matériaux présents au début de l'essai. Ensuite, ce bilan croît jusqu'à atteindre un palier d'équilibre. La variation du bilan volumique cumulé pour cet essai est la plus marquée et elle s'oppose à celle décrite pour les essais de février, mars et avril. Des séries d'essais complémentaires correspondant au cycle d'essais étudiés précédemment auraient permis de comparer les résultats et de construire une analyse plus solide, notamment pour des variations particulières comme celle de l'essai de type décembre. Cependant, en raison du temps imparti de l'étude, la réalisation de cycles supplémentaires ne peut pas être envisagée.

3.2.2. Bilans volumiques inter-essai

Après avoir étudié le bilan volumique par essai, l'analyse s'est poursuivie sur une échelle plus globale. Cette fois, le bilan volumique final est cumulé par type d'essai afin d'observer les variations de ce bilan sur un cycle d'essai.

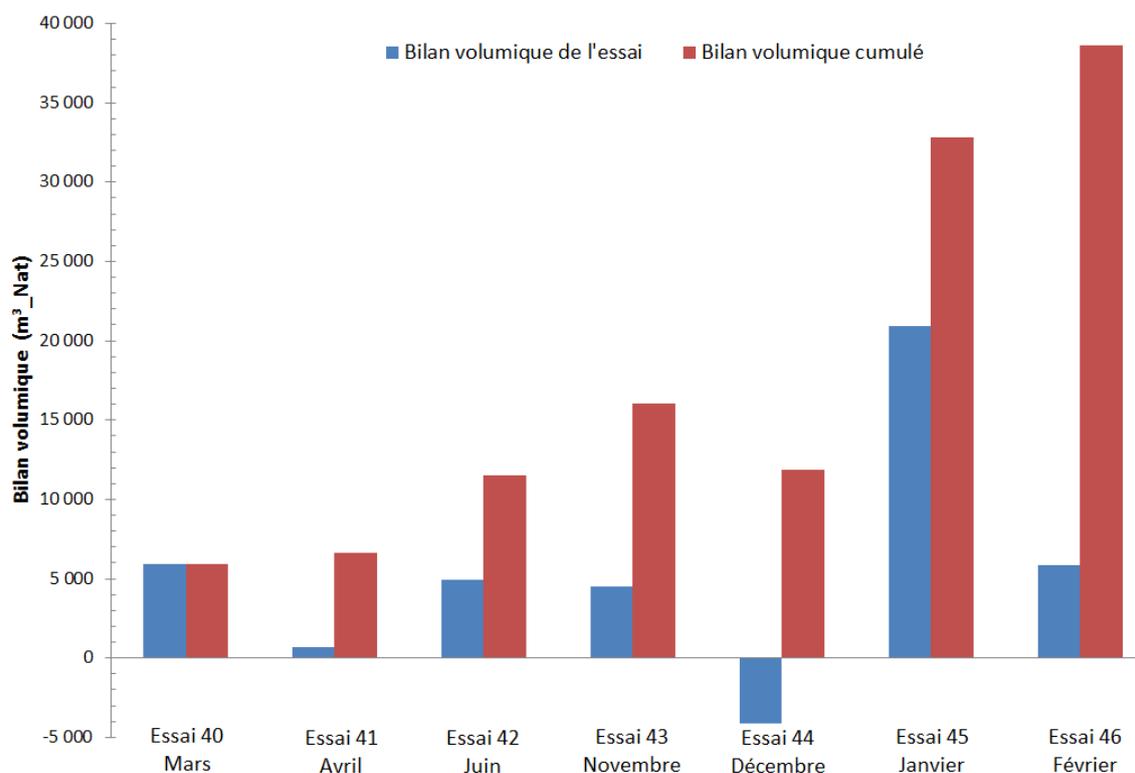


Figure 11: Bilan volumique cumulé après chaque type d'essai

Tout d'abord, les types d'essais de mars à novembre ont individuellement des bilans volumiques relativement faibles (615 à 5 900 m³). Cependant, la suite de ces essais produit un bilan volumique cumulé représentant un peu moins de la moitié du bilan volumique total sur l'ensemble du cycle (Figure 11). Ainsi, les débits proches du débit médian (935 m³/s) jouent un rôle important dans la tendance à l'engraissement observée.

L'inversion de tendance visible pour l'essai de décembre s'explique par le bilan volumique négatif de l'essai de décembre (Figure 10). Le bilan volumique après l'essai de décembre est similaire à celui de juin, l'essai de décembre a en quelque sorte évacué le volume stocké par l'essai de novembre. La moitié du bilan volumique totale est produit par l'essai de janvier. L'essai de janvier joue un grand rôle en terme sédimentaire dans le cycle d'essai.

Le bilan volumique total à la fin du cycle d'essai représentant 15 années s'élève à + 39 000 m³. Le modèle numérique a simulé 10 ans d'une chronique réelle de la station de Montjean, le bilan volumique à 10 ans est de - 11 000 m³. Ces prévisions à moyen terme sont intéressantes à comparer aux bilans volumiques calculés sur 3,6 ans (modèle : + 51 000 m³ et numérique : + 97 000 m³). Le bilan volumique n'est pas linéaire par rapport à la période étudiée. Les bilans calculés pour les prévisions à 10 et 15 ans sont inférieures de ceux calculés pour 3,6 ans. Le comportement général du bilan volumique à moyen terme est similaire pour les deux modèles.

La Figure 11 montre la dépendance d'un essai par rapport aux essais précédents. Par exemple, les essais de décembre et de février qui ont des conditions hydrauliques similaires (respectivement 1210 et 1255 m³/s) montrent des variations totalement différentes (Figure 10). L'essai de décembre semble avoir lessivé une partie du volume stocké par les essais précédents de mars à novembre. Le bilan volumique cumulé après l'essai de novembre (16 000 m³) est à comparer avec le bilan volumique instantané cumulé au tiers de l'essai de décembre (-13 800 m³). En d'autres termes, au cours de l'essai de décembre, le bilan volumique cumulé devient quasiment nul. L'essai de décembre joue un rôle dans l'érosion du lit alors que l'essai de janvier est quant à lui efficace dans l'engraissement du lit. Une notion supplémentaire va permettre d'approfondir l'analyse des variations du bilan volumique dans le paragraphe 2.4.1 du chapitre 3.

3.3. Flux sédimentaires

Dans un premier temps, le flux sédimentaire va être comparé par rapport au flux hydraulique. Le but est de montrer que le flux sédimentaire décrit des variations analogues aux flux hydrauliques au cours du temps. Le débit solide aval moyen a été calculé pour chaque essai afin d'obtenir un débit solide mensuel moyen (Figure 12).

Les débits solides aval mensuels moyens suivent les mêmes tendances que les paliers de débits liquides. Les flux sont assez faibles pour les périodes d'étiages et relativement élevés pour les mois d'hiver. D'autre part, la Figure 12 montre que le signal instantané moyen du débit solide aval semble décrire une oscillation sur l'ensemble des essais. Cependant, cette oscillation n'apparaît pas pour juin et novembre.

Dans un second temps, une autre analyse a permis de montrer les changements de comportement dans un même essai. Un changement de comportement signifie passer d'une phase de dépôt à une phase d'érosion (ou inversement). La différence entre le débit solide entrant et le

débit solide sortant est calculée au cours des essais (Figure 13). Quand cette différence est supérieure / inférieure à 0, cela signifie que l'essai est sur une phase de dépôt / d'érosion.

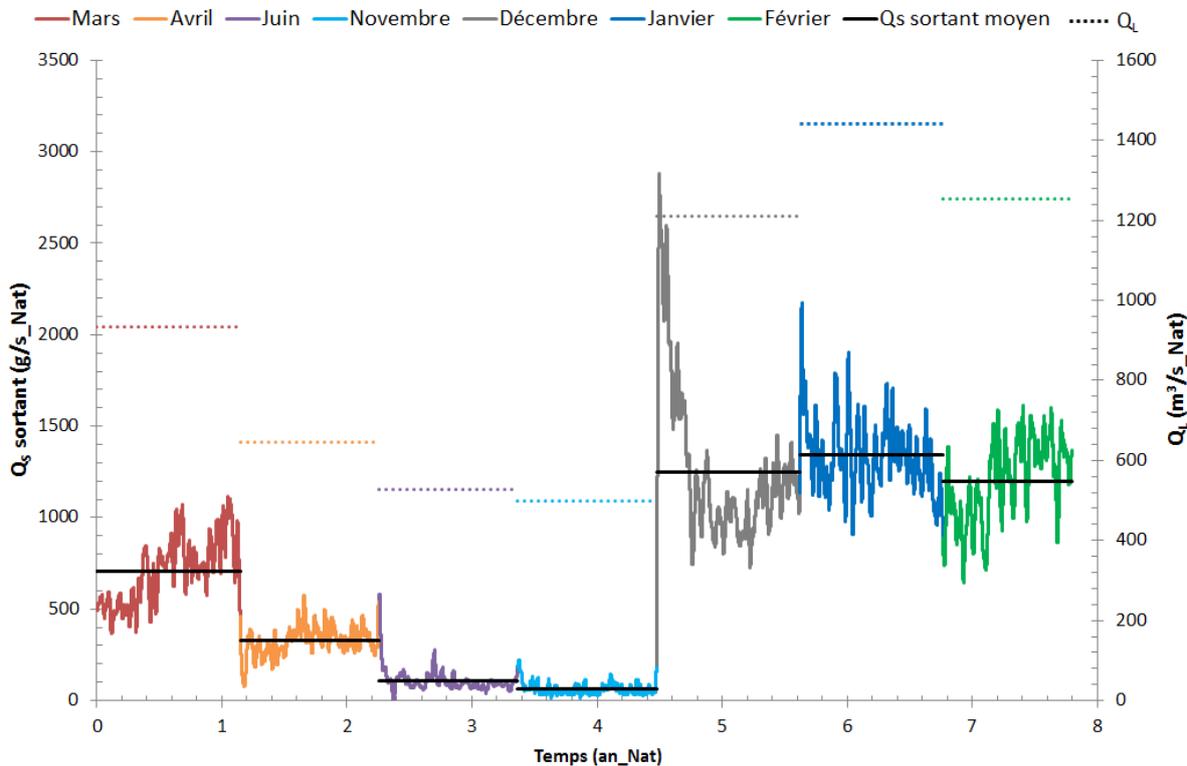


Figure 12: Comparaison des flux sédimentaires et hydrauliques

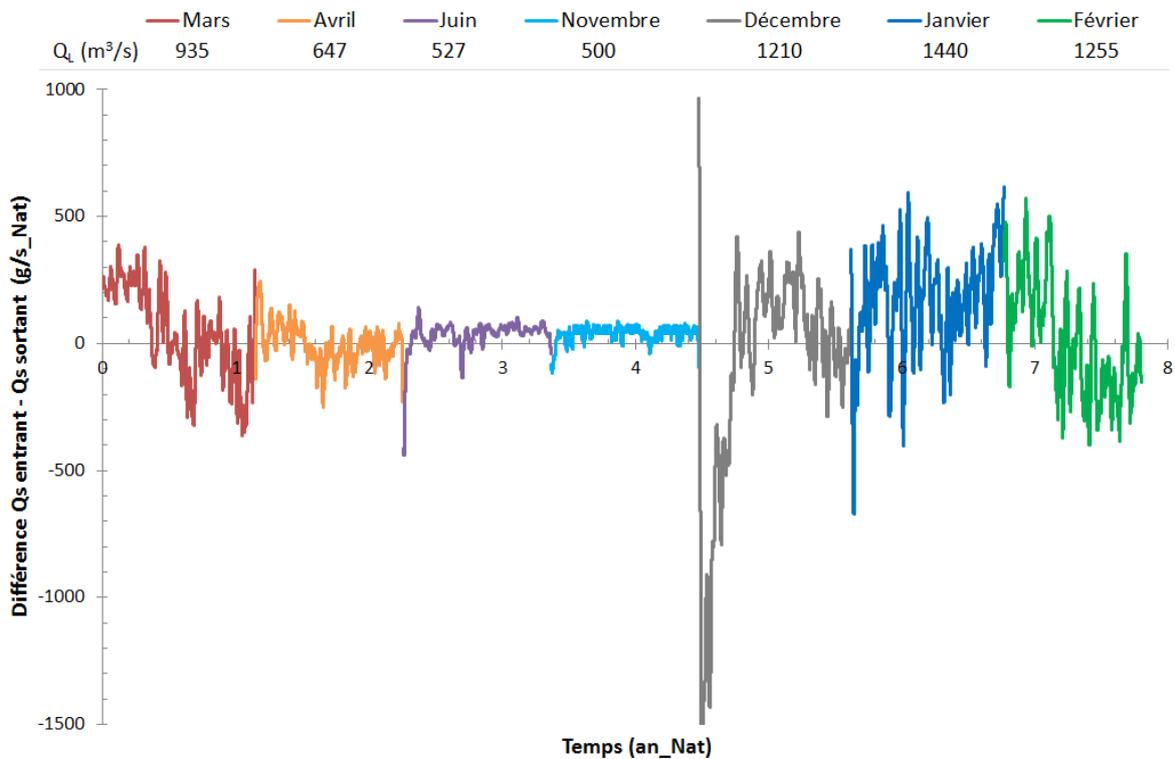


Figure 13: Différence entre le flux solide entrant et sortant au cours du cycle d'essai

Excepté pour les essais aux faibles débits (juin et novembre), la différence entre le débit entrant et sortant alterne de manière périodique entre une différence positive ou négative au sein d'un même essai. C'est-à-dire qu'au sein d'un même essai, le transport solide passe d'une phase de dépôt à une phase d'érosion (et inversement). Ce comportement est visible pour des débits moyens/élevés ($> 600 \text{ m}^3/\text{s}$). En effet, plus le débit liquide est important, plus l'amplitude du signal de la différence des flux est grande et donc les variations du signal sont plus marquées. Cette dernière remarque peut expliquer pourquoi l'oscillation du signal n'est pas visible pour les essais de juin et novembre.

De plus, la série d'essai permet de visualiser une certaine périodicité des variations entre les essais. La différence entre le flux entrant et sortant oscille autour du zéro, ainsi pour les prévisions à 15 ans, le transport solide dans le modèle paraît globalement en équilibre.

3.4. Perspective pour l'état de projet

Les caractéristiques des essais envisagés devront être identiques aux essais de références pour pouvoir comparer des essais aux conditions limites identiques. Cependant, des essais complémentaires pourront être effectués en tenant compte des actions en amont du secteur étudié, notamment l'augmentation de l'apport solide suite à la remobilisation des sédiments (lot n°2 et 3 proposés par VNF).

De plus, il paraît important de réaliser un cycle d'essais similaire à celui effectué pour les états de référence. En effet, il a été montré que l'interdépendance des essais pouvait jouer un rôle sur le bilan volumique net et le flux sédimentaire. Réaliser la même succession d'essais (de mars à février), c'est assurer une comparaison juste entre l'état de référence et l'état projet.

4. Conclusion

Les essais réalisés pour les prévisions à 15 ans en état actuel de la Loire représentent une banque de données suffisamment complète et représentative pour établir un diagnostic solide en vue d'une comparaison avec les essais à différents états de projet. Le flux sédimentaire sortant et l'évolution des fonds sont similaires entre le calage et les prévisions à 15 ans, le modèle ne semble pas dévier au cours du temps ce qui est encourageant pour la dernière phase d'essai.

Les essais de prévisions à 15 ans ont abouti à un bilan volumique de $+39\,000 \text{ m}^3$, ce qui est relativement faible vis-à-vis du volume déposé sur 3,6 ans (calage : $+51\,000 \text{ m}^3$). Les modèles numérique et physique convergent vers la même conclusion. Une légère tendance à l'engraissement est observée. Cependant La Loire semble osciller autour d'un point d'équilibre, ce point est notamment observé pour le flux solide.

De plus, le modèle physique vient corroborer et approfondir les résultats numériques en fournissant des informations inédites et capitales pour le dimensionnement de l'ouvrage à venir. Par exemple, la formation et le suivi des dunes est impossible avec un modèle numérique 2D. L'approche lagrangienne permet de suivre de manière continue le charriage, par saltation ou sous forme de dune, processus réalisé naturellement contrairement au modèle numérique où le transport solide est approché par des équations théoriques. En ce sens, le modèle physique donne un aspect beaucoup plus qualitatif que le modèle numérique.

Chapitre 3 : Dynamique et morphologie des dunes

Les essais réalisés au CACOH ont fourni un grand nombre de données exploitables concernant le charriage par dunes sur la Loire. En vue de compléter le diagnostic réalisé au chapitre 2 et de confirmer une fois de plus la bonne représentativité du modèle, les formes sédimentaires observées ont été analysées d'un point de vue statique et dynamique.

1. Caractéristiques géométriques des dunes à partir de bathymétries d'essais en laboratoire

A chaque fin d'essai, une bathymétrie complète a été systématiquement acquise (soit un jeu de 52 bathymétries) avec une précision de l'ordre de quelques millimètres. Il convient donc, dans un premier temps, d'extraire et de comparer ces mesures laboratoires aux bathymétries réelles effectuées en 2010, 2013 et 2017. Ensuite, il s'agit de comparer les mesures ligériennes à des formules générales empiriques.

1.1. Méthodologie

1.1.1. Gamme des débits investigués

Six types d'essais ont été choisis pour l'analyse des dunes : les mois de janvier, février, mars, avril et décembre, et un événement de crue. Rappelons qu'en deçà de $450 \text{ m}^3/\text{s}$, aucun transport solide n'est constaté dans le domaine physique. Pour une même période type, plusieurs essais sont disponibles.

Période type	Q_L ($\text{m}^3/\text{s}_{\text{Nat}}$)	Q_s entrant ($\text{kg}/\text{s}_{\text{Nat}}$)	Q_s moyen sortant ($\text{kg}/\text{s}_{\text{Nat}}$)	Nombre d'essais
Janvier	1440	11,43	12,04	10
Février	1255	9,33	8,98	6
Mars	935	5,71	5,28	3
Avril	647	2,45	1,77	2
Décembre	1210	8,83	9,61	1
Crue	2500	23,45	24,33	2

Tableau 4: Débits liquides correspondant aux types d'essais sélectionnés

1.1.2. Mesures des caractéristiques par profil en long de la bathymétrie

La photogrammétrie effectuée à chaque fin d'essai permet de générer un modèle numérique de terrain (MNT) représentant l'état final des fonds du modèle physique (cf. paragraphe 2.3, chapitre 1). Étant donné le régime d'écoulement permanent pour chaque essai, les conditions locales sont jugées globalement identiques pendant l'essai. Ainsi, l'état des fonds acquis par photogrammétrie apparaît représentatif des fonds au cours d'un essai, la géométrie des dunes présentes à l'état final est alors supposée similaire aux dunes observées pendant l'essai. En choisissant une échelle d'analyse adaptée, il est assez facile de repérer les dunes présentes sur le MNT. Les dunes se forment principalement sur 3 zones : dans le bras amont, entre la fosse et le pont de Bellevue et en aval du pont. Ces zones sont nommées respectivement amont, milieu et aval (Figure 14). Pour chaque essai sélectionné, des profils en long sont tracés sur les zones identifiées. Dans certains cas, 2 à 3 profils peuvent être tracés pour une même zone.

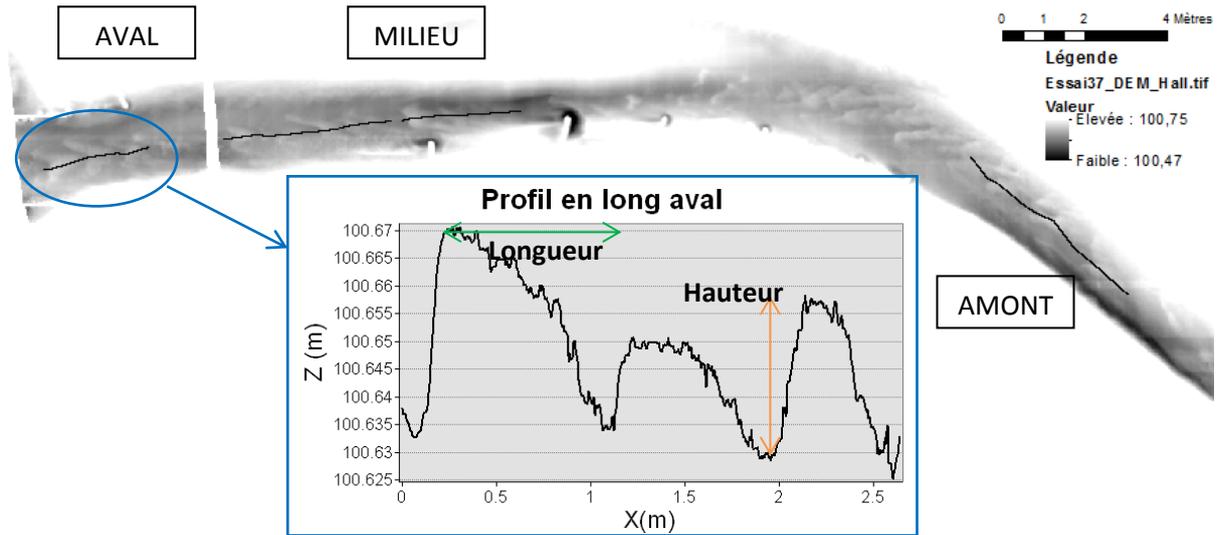


Figure 14: Profils en long du MNT (amont, milieu et aval) et mesures des caractéristiques d'un groupe de dunes

La hauteur est définie par la différence entre le sommet de la crête et le fond du lit. Tandis que la longueur représente l'espace entre deux dunes consécutives (distance entre deux sommets de crête).

L'échelle géométrique verticale prédomine au sein de l'écoulement. Bien que le modèle soit distordu, l'écoulement naturel de l'eau n'est pas affecté par la distorsion. Ainsi, les dunes, formées par les conditions de l'écoulement, sont liées à une unique échelle géométrique. La conversion des mesures modèles s'opère donc à l'aide de l'échelle verticale (1/50). Le traitement de la bathymétrie sur 24 essais a permis de déterminer la hauteur et la longueur de 230 dunes et 111 dunes avec uniquement la hauteur, soit un total de 341 dunes traitées.

1.1.3. Représentativité géométrique des dunes présentes sur le MNT

L'objectif de ce paragraphe est de montrer que le MNT généré par la photogrammétrie représente de manière fidèle l'état des fonds, et plus particulièrement les dunes. La mise à sec du modèle à la suite de l'essai 52 (fin des essais en état de référence) a permis de mesurer directement à l'aide d'un mètre la hauteur et la longueur des dunes préalablement identifiées sur le modèle.



Figure 15: Mesures directes des longueurs et des hauteurs de dunes sur le modèle (essai 52, milieu)

Ensuite, l'enjeu a été de retrouver les dunes mesurées sur le MNT pour en extraire les caractéristiques grâce aux profils en long tracés.

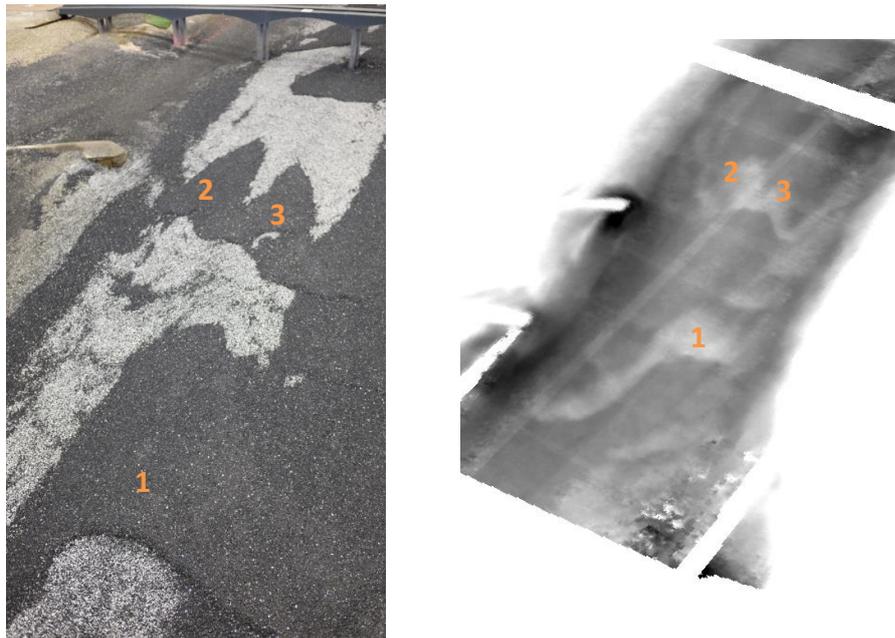


Figure 16: Identification des dunes modèle / MNT (essai 52, aval)

Quinze dunes ont été mesurées sur le modèle. Ces mêmes dunes ont été identifiées et mesurées sous SIG.

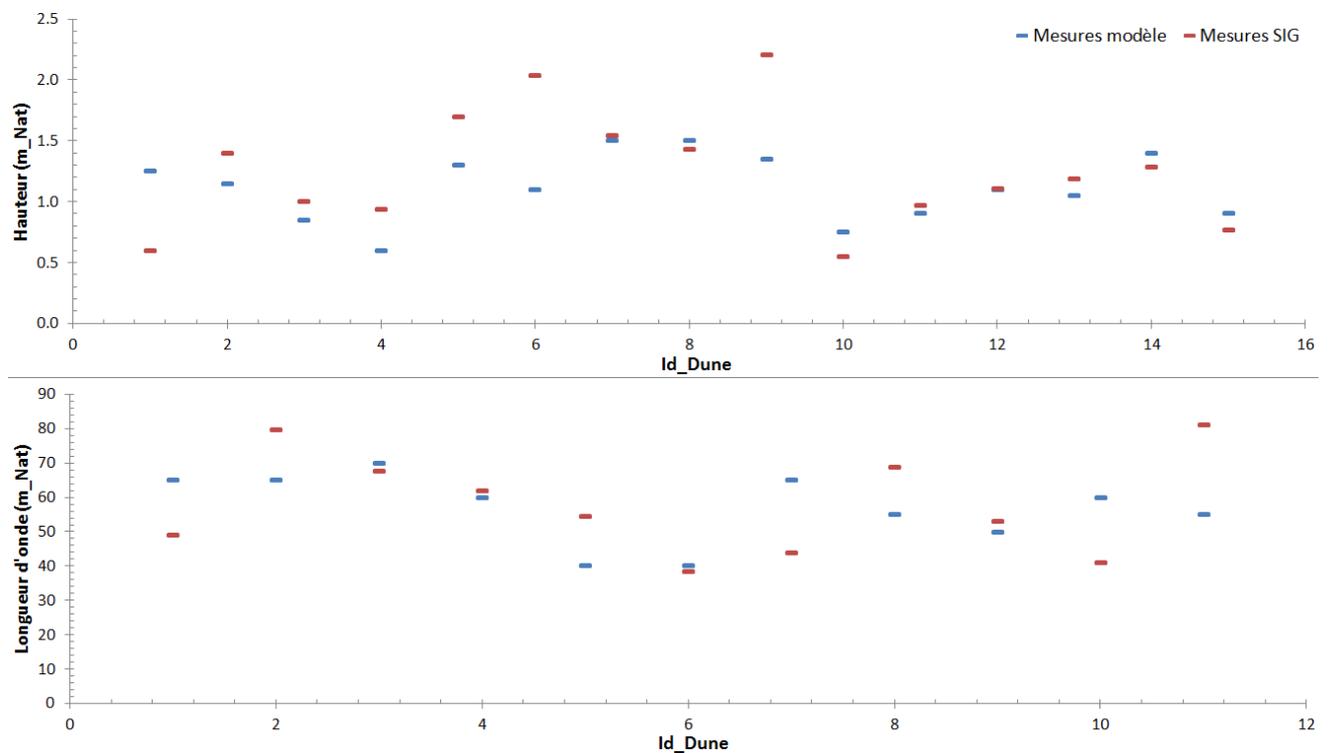


Figure 17: Comparaison des caractéristiques mesurées (dunes de l'essai 52)

L'écart moyen des hauteurs mesurées est de 0,3 m_Nat soit 0,6 cm_Mod. L'écart moyen des longueurs mesurées s'élève à 7,5 m_Nat, soit 15 cm_Mod. Dans la plupart des cas, la mesure SIG est soit proche ou soit supérieure à la mesure modèle (sauf pour la première dune où la mesure SIG peut

être sous-estimée car la crête de la dune était située à la limite du MNT). En effet, les mesures directes à l'aide de règle peuvent sous-estimer légèrement les caractéristiques des dunes en raison notamment de l'incertitude liée à la lecture de la mesure correspondant au sommet de la crête.

La détermination des caractéristiques via SIG semblent globalement correspondre aux mesures réalisées sur le modèle. La méthode de mesure bathymétrique sous SIG apparaît être une méthode fiable et adaptée pour mesurer la géométrie des dunes. Un nombre conséquent de dunes peut être traité rapidement de manière assez précise (incertitude de la photogrammétrie +/- 3mm), de plus les crêtes et les suites de dunes sont facilement repérables. Dans la suite du chapitre, les caractéristiques géométriques des dunes sont mesurées par la méthode d'extraction des profils en long sous SIG.

1.2. Analyse quantitative des caractéristiques géométriques des dunes

1.2.1. Variabilité spatiale et entre essais de même type

Tout d'abord, il est intéressant de comparer les caractéristiques des dunes sur les 3 zones principales (amont, milieu et aval) au sein d'un même essai. Les dimensions géométriques des dunes sont très variables sur chaque secteur et cette variabilité se retrouve sur l'ensemble des essais (Figure 18). Il n'y a donc pas de distinction géométrique particulière pour un secteur donné. Ainsi, les dunes formées sur les zones amont, milieu et aval peuvent être rassemblées pour représenter un essai.

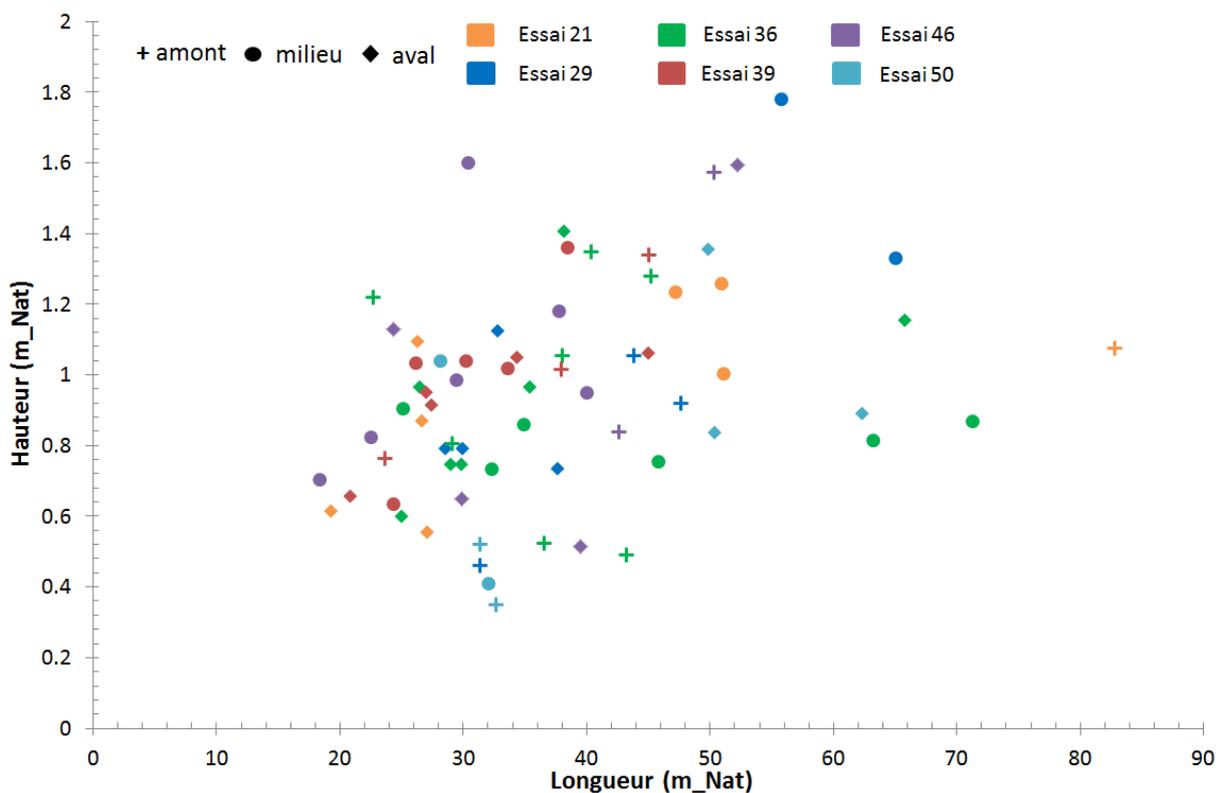


Figure 18: Variabilité des caractéristiques spatiales et inter-essais (Février $Q_l = 1255 \text{ m}^3/\text{s Nat}$)

D'autre part, la Figure 18 montre que les dunes formées sur les six essais de type février sont semblables en termes de géométrie et de variabilité. Les mêmes observations sont constatées pour

les autres type d'essai. Ainsi, un type d'essai, lié à des conditions hydrauliques et sédimentaires spécifiques, produit une catégorie de dunes similaires à chaque essai.

1.2.2. Caractérisation des formes sédimentaires observées en laboratoire

- **Classifications**

Les caractéristiques des dunes des essais étudiés sont regroupées dans la Figure 19. A première vue, les hauteurs et les longueurs des dunes observées ne semblent pas spécifiques à un type d'essai donné. La plage de variabilité des caractéristiques est étendue pour chaque type d'essai, il est donc difficile de tirer une conclusion concernant une éventuelle corrélation entre les caractéristiques et le type d'essai. Cependant, l'ensemble des caractéristiques obtenues permettent qualifier la classe de dunes observées.

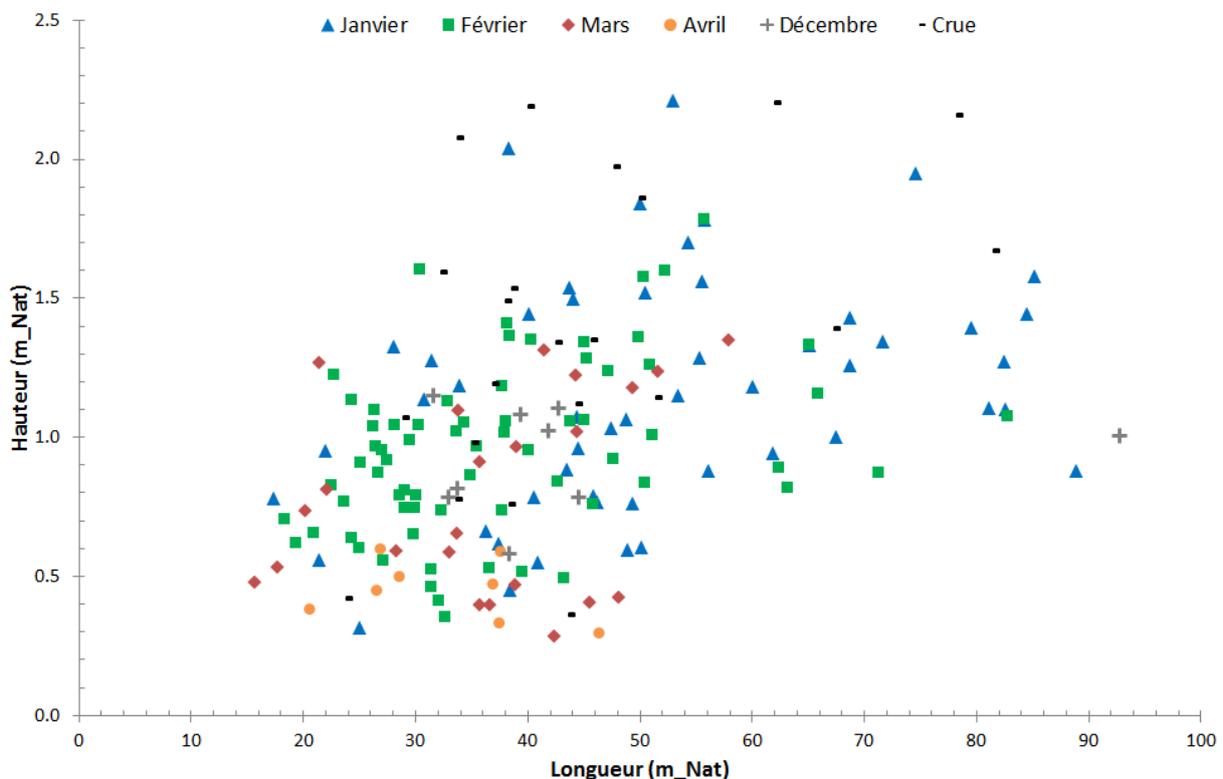


Figure 19: Caractéristiques des dunes pour les types d'essais morphogènes

Une première classification établie par *Jackson (1975)* regroupe les formes sédimentaires de fonds en 3 catégories définies par 5 paramètres : la hauteur, la largeur et la longueur d'une dune, la longueur d'onde entre deux dunes et la période d'existence. Dans notre modèle il est difficile de mesurer la durée d'existence d'une dune, néanmoins il est assez facile de se rendre compte que les autres paramètres sont bien supérieurs au diamètre médian, que la hauteur de dunes est inférieure à l'épaisseur de matériaux mobilisable et que l'espacement entre deux dunes (longueur d'onde) est de l'ordre de grandeur de la longueur de la dune. Les dunes observées appartiennent toutes à la **catégorie méso-forme** définie par *Jackson (1975)*.

Ashley (1990) propose une autre classification, plus précise et basée sur les caractéristiques géométriques d'une dune (hauteur et longueur) valable pour des dunes en équilibre. D'après cette classification, la majorité des **dunes observées sont qualifiées de large** ($H = 0,75 - 5$ m et $L = 10 - 100$

m). En revanche, certaines dunes sont à cheval sur deux catégories et ne peuvent pas être caractérisées, la hauteur est inférieure à 0,75 m mais la longueur reste compris dans l'intervalle. La classification d'*Ashley (1990)* montre une limite pour les dunes dont l'équilibre n'est pas atteint (cas sur la Loire et sur le modèle, notion développée dans le paragraphe suivant).

Malgré le non-équilibre des dunes observées sur le modèle et sur la Loire, les deux classifications permettent d'apprécier globalement le type de dunes rencontrées. **Le modèle physique reproduit ainsi des méso-formes, et plus précisément des dunes dites larges.**

- **Paramètre de steepness**

Le paramètre de *steepness* défini par H/L (adimensionnel) représente la pente de la dune. Une dune est considérée à l'équilibre, c'est-à-dire à son développement optimal, lorsque ce paramètre est égal à 0,06.

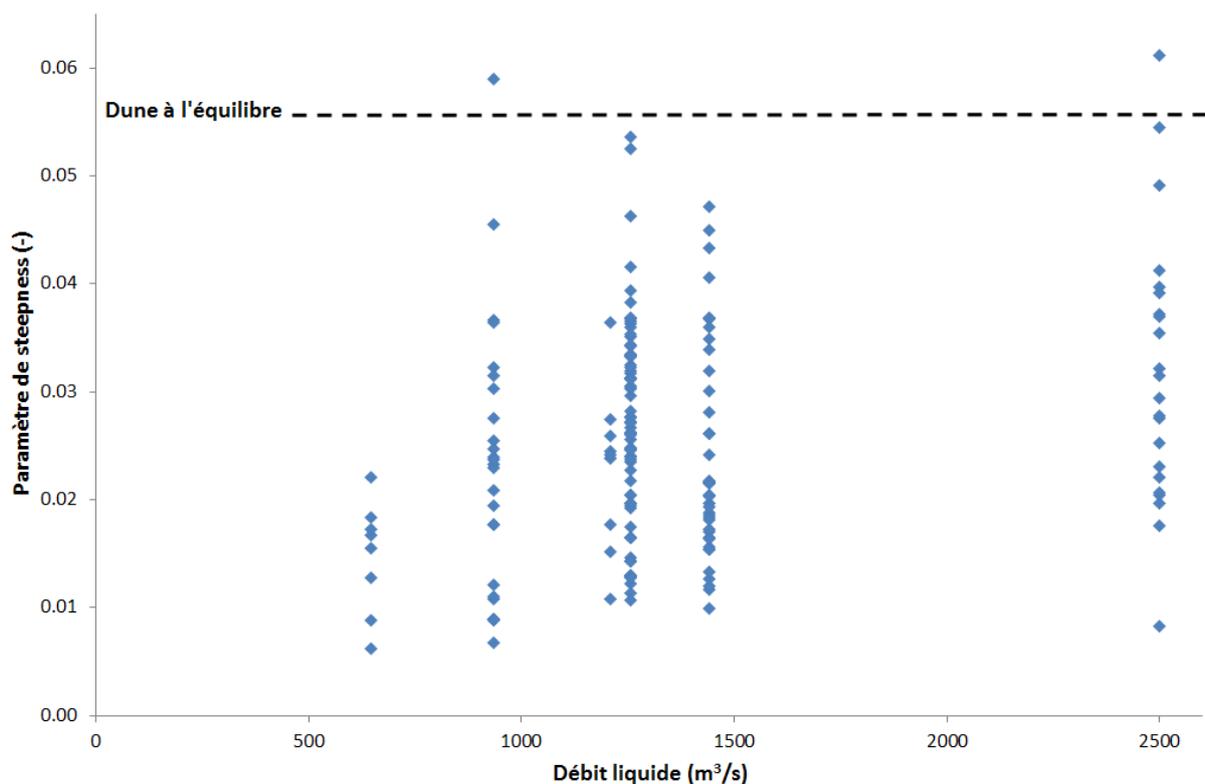


Figure 20: Paramètres de *steepness* associés aux dunes des essais sur le modèle physique

Les dunes mesurées sur le modèle ont un paramètre de *steepness* inférieure à 0,06, elles ne sont pas en équilibre (Figure 20). *Moatar et Dupont (2016)* mentionnent que le paramètre de *steepness* « est très souvent inférieur à 0,06 » sur la Loire. Le non – équilibre des dunes semble donc respecté sur le modèle physique. La comparaison avec les dunes issues des bathymétries réelles permettront d'approfondir ce constat.

1.2.3. Comparaison avec les caractéristiques en nature

Les bathymétries réelles relevées en 2010, 2013 et 2017 recouvrent le site d'étude. L'extraction des caractéristiques des dunes sur les MNT correspondant aux bathymétries suit la méthodologie décrite au paragraphe 1.1.2, chapitre 3. Connaître les caractéristiques des dunes

réelles présentes sur le secteur de Bellevue est capitale, elles représentent des points de comparaisons essentielles à la poursuite de l'étude.

La classe des formes sédimentaires visibles sur les bathymétries s'apparente majoritairement à des dunes dites larges selon la classification d'*Ashley (1990)*. Premier constat, les formes sédimentaires observées sur le modèle et dans la réalité appartiennent à la même classe.

De plus, la géométrie des dunes formées lors des essais est similaire aux dunes réelles en termes de hauteur et de longueur (Figure 21). En d'autres termes, les dunes formées sur le modèle physique sont représentatives de la réalité, et ce de manière très précise. Des longueurs supérieures à 100 m sont observées dans la réalité, contrairement au modèle physique. Les dunes relatives à ces longueurs sont peu nombreuses 8 sur un total de 125 dunes traitées et n'appartiennent à aucune catégorie de forme décrite par *Ashley (1990)* (hauteurs (dunes larges) et longueurs (dunes très larges)). Il est assez difficile de déterminer si ces dunes sont présentes des particularités (ex : bancs de sables, zones de dépôt liées à un point particulier du fond (roche, végétaux)) ou si le modèle n'est pas capable de reproduire de telles formes de dunes.

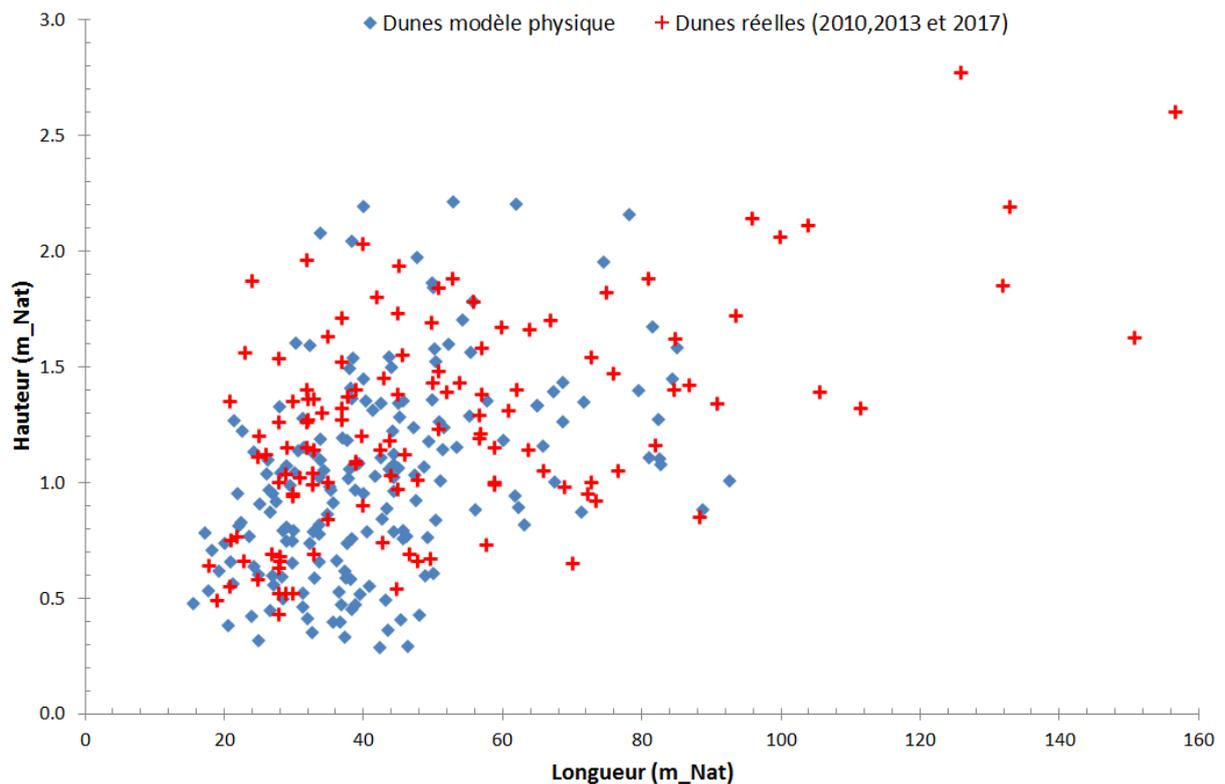


Figure 21: Comparaison de la géométrie des dunes réelles et observées en laboratoire

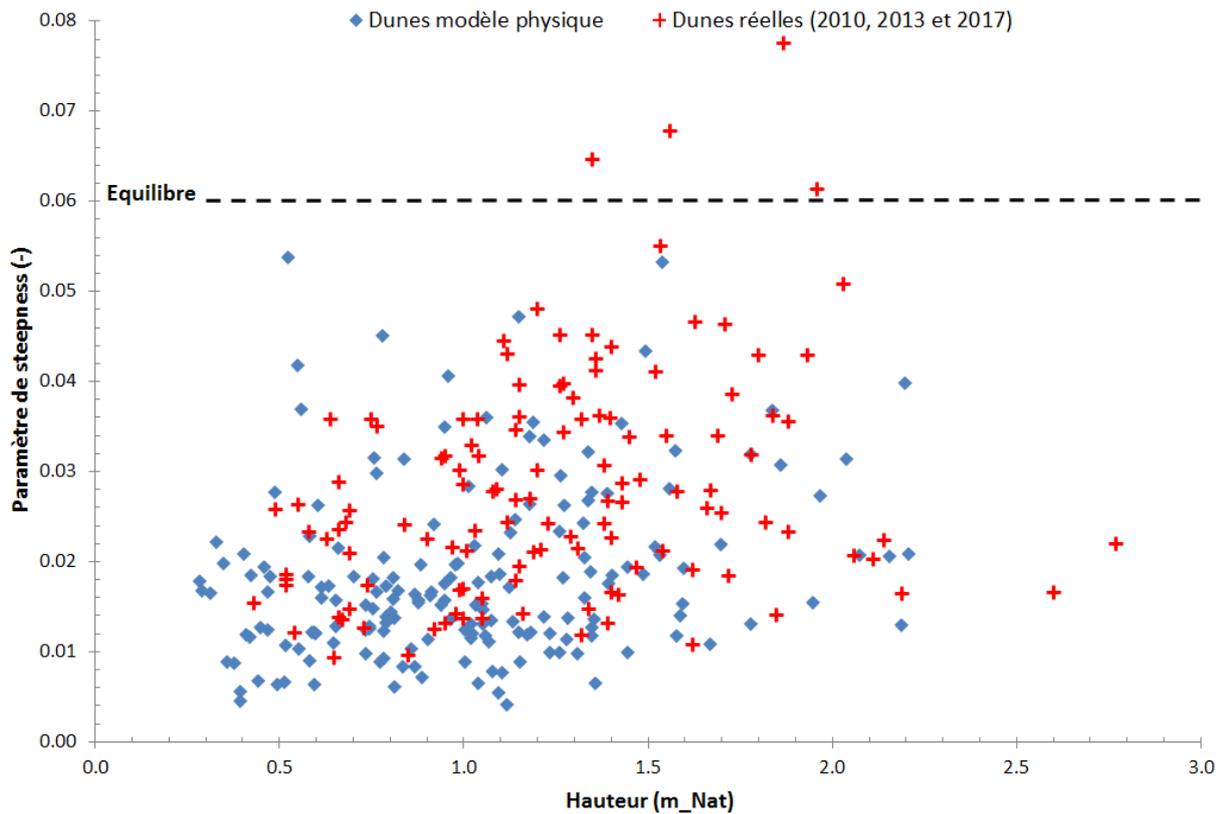


Figure 22: Comparaison de l'état de développement des dunes modèles et réelles

Les dunes formées lors des essais ont un état de développement correspondant à celui des dunes réelles (Figure 22). Les quatre dunes au-delà de la limite d'équilibre ne sont pas représentatives de l'ensemble des dunes rencontrées sur la Loire, 121 dunes réelles n'atteignent pas l'équilibre. Les valeurs du paramètre de *steepness* sont très proches entre le modèle et la réalité, il est à noter tout de même que les dunes du modèle semblent un peu moins développées qu'en réalité ($H/L < 0,01$). Les faibles hauteurs d'eau liées à l'échelle géométrique peuvent limiter le développement des dunes.

1.2.4. Comparaison entre type d'essai

Il a été montré dans le paragraphe 1.2.1 (chapitre 3) que des essais de même type forment les mêmes dunes. L'objectif ici est de montrer une éventuelle corrélation entre le type d'essai et les caractéristiques des dunes observées. Pour se faire, le paramètre de *steepness* a été étudié en fonction du débit liquide correspondant à un type d'essai (Figure 23).

Une moyenne du paramètre de *steepness* est calculée pour chaque type d'essai. Premier constat, le paramètre de *steepness* tend à augmenter avec le débit liquide. La géométrie des dunes semble donc dépendre aux conditions hydrauliques. Pour aller plus loin dans le raisonnement, il est intéressant d'étudier l'évolution de l'équilibre par rapport à la profondeur d'eau moyenne liquide (Figure 23).

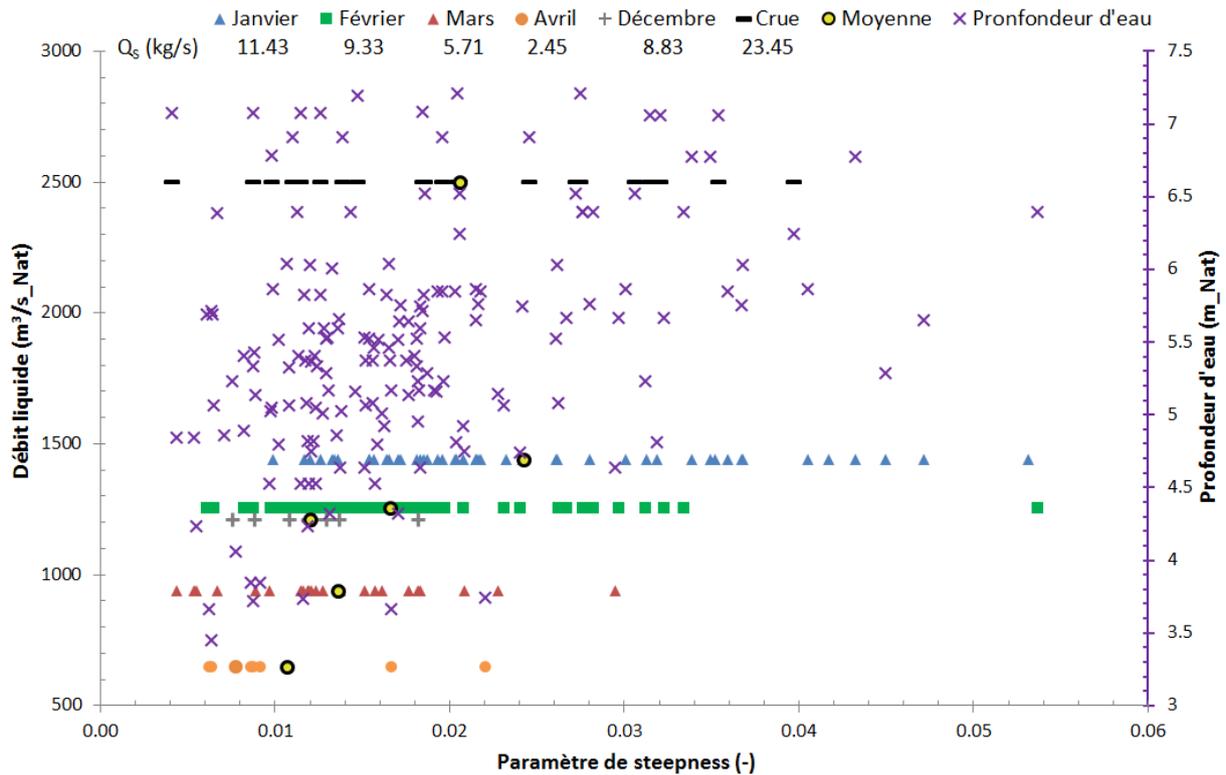


Figure 23: Evolution du steepness en fonction du débit liquide et de la profondeur d'eau

Le comportement du paramètre H/L apparaît davantage corrélé à la profondeur d'eau moyenne qu'au débit liquide. Néanmoins, au vu de la Figure 23, cette dépendance n'est pas marquée, mais l'évolution globale tend à traduire une relation possible entre la géométrie des dunes et la profondeur d'eau. La confrontation de nos mesures par des formules empiriques générales reliant la hauteur de dune à la profondeur d'eau permet de mieux évaluer cette corrélation.

1.2.5. Corrélation entre les caractéristiques physiques et les conditions hydrauliques

- **Hauteurs de dunes**

Dans ces travaux, *Yalin (1964)* a établi une relation entre la hauteur de dune et la profondeur d'eau.

$$\frac{H}{h_c} = \frac{1}{6} \left(\frac{h_{eau}}{h_c} - 1 \right)$$

Avec H la hauteur de dune (m), h_{eau} la profondeur d'eau (m) et h_c la hauteur d'eau critique (m) définie par la relation suivante (*Yalin, 1964*) : $\frac{\tau_0}{\tau_c} = \frac{h_{eau}}{h_c}$

Le calcul du paramètre τ_0 , contrainte de cisaillement totale ($N.m^{-2}$), le rayon hydraulique est approximé à la hauteur d'eau (rivière large) et la pente d'énergie est approchée par la pente de la ligne d'eau, en absence de perte de charge singulière. Quant au τ_c , il correspond à la contrainte tractrice critique ($N.m^{-2}$), calculée à partir du nombre de Shields critique.

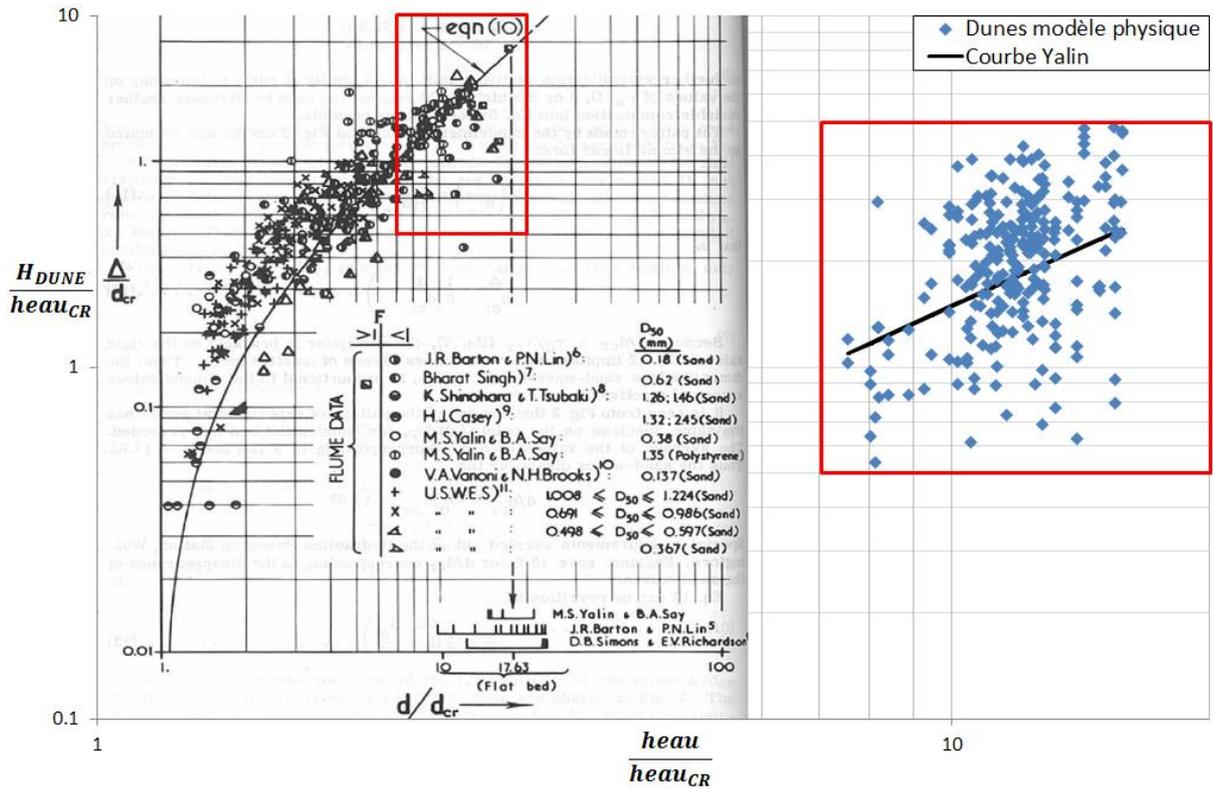


Figure 24: Comparaison de la courbe relative aux hauteurs de dune (Yalin, 1964) aux dunes du modèle

Les hauteurs des dunes sont très variables des conditions hydrauliques données (cf. paragraphe 1.2.1, chapitre 3). C'est pourquoi les points relatifs aux dunes du modèle apparaissent très dispersés autour de la courbe de Yalin. Or, cette variabilité est aussi visible sur le graphique de Yalin, notamment pour les points en-dessus de la courbe pour lesquelles les écarts sont similaires à ceux observés pour le modèle. En revanche, peu de dunes se situent au-dessus de la courbe sur le graphique de Yalin alors que pour les mesures du modèle la dispersion est encore plus importante pour ces points en raison de l'échelle logarithmique.

- **Longueurs de dune**

Yalin (1964) a également mis en relation la longueur de dune et la profondeur d'eau. Pour un écoulement turbulent, Yalin a établi la relation suivante :

$$\frac{h_{eau}}{d_{50}} \sqrt{\frac{L}{d_{50}}} = 2,25 \left(\frac{h_{eau}}{d_{50}} \right)^{3/2}$$

Avec L la longueur de dune (m), h_{eau} la profondeur d'eau (m) et d_{50} le diamètre médian (1 mm)

Yalin a construit sa relation en s'appuyant sur des dunes pour lesquelles les ordonnées sont comprises en 10^2 et 10^7 . Or, les dunes étudiées sur le modèle sont associées à une ordonnée d'environ 10^6 (pour des abscisses comprises entre 10^3 et 10^4), valeur pour laquelle Yalin n'a étudié aucune dune (Figure 25). Il est donc difficile de comparer la variabilité de ces points pour cette partie du graphique. Néanmoins, en tenant compte de l'échelle logarithmique, il est possible d'estimer la dispersion des points par rapport à la courbe en s'intéressant à la dispersion pour $10^2 < X < 10^3$ et $10^4 < X < 10^5$ sur le graphique de Yalin, intervalles qui entourent le graphique lié au modèle. Pour les

abscisses inférieures à 10^3 , la dispersion maximale rencontrée par Yalin est de l'ordre de 10^4 , et pour des abscisses supérieures à 10^4 , cette dispersion est proche de 10^7 . Ainsi, l'estimation de la dispersion de Yalin pour des points comprises pour $10^3 < X < 10^4$ est de l'ordre de 10^5 , ce qui est similaire à la variabilité des points calculés pour le modèle par rapport à la courbe de Yalin. De ce fait, les longueurs mesurées sur le modèle physique suivent bien la relation de Yalin avec une dispersion acceptable autour de la courbe.

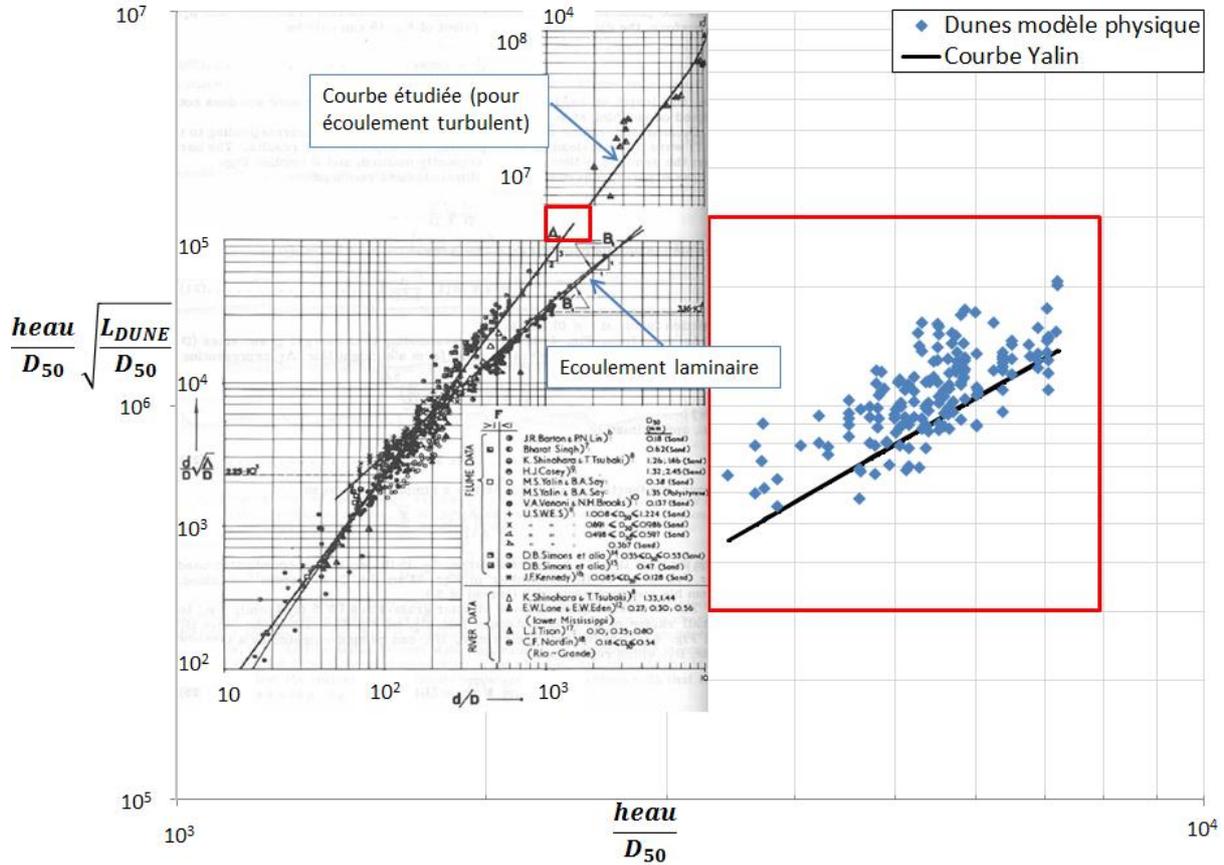


Figure 25: Comparaison de la courbe relative aux longueurs de dune (Yalin, 1964) aux dunes du modèle

Les équations de Yalin (1964) reliant la hauteur et la longueur des dunes à la profondeur d'eau ont été établies à partir d'une grande diversité de dunes (type de sédiment, cours d'eau différent, etc.). Elles permettent d'estimer les caractéristiques des dunes pour des profondeurs d'eau connues. Dans les travaux réalisés sur les dunes, les relations établies par Yalin permettent de prendre du recul sur les mesures laboratoire et de les analyser dans une approche plus générale.

2. Vitesses de migration des dunes par méthode Large Scale Particule Image Velocimetry (LSPIV)

L'objectif de cette partie est de mesurer sur le modèle physique à fond mobile la vitesse de migration des dunes puis d'en déduire les vitesses en nature par similitude. Une comparaison sera faite avec la littérature scientifique pour vérifier la similitude dynamique des dunes, en particulier en contexte ligérien. Cette analyse a pour but d'approfondir la connaissance de la similitude de Shields dans la dynamique des formes de fond en laboratoire.

Les vitesses des dunes ont été calculées par le logiciel Fudaa-LSPIV à partir des séquences d'images acquises lors des essais. Ces derniers, au nombre total de 52, constituent une base de données suffisamment riche et exploitable pour garantir une analyse solide de l'étude. La durée des essais oscille entre 110 et 450 jours en nature, ce qui est amplement suffisamment pour visualiser la propagation de structures de fond.

2.1. Méthodologie

2.1.1. Données à disposition

Des acquisitions d'image à fréquence régulière (3 ou 5 min) ont été réalisées sur chacun des 52 essais en deux postes : « aval » et « milieu ». Ponctuellement, des acquisitions vidéo ont été prises lors des essais 51 et 52 (20 images par seconde (ips)).

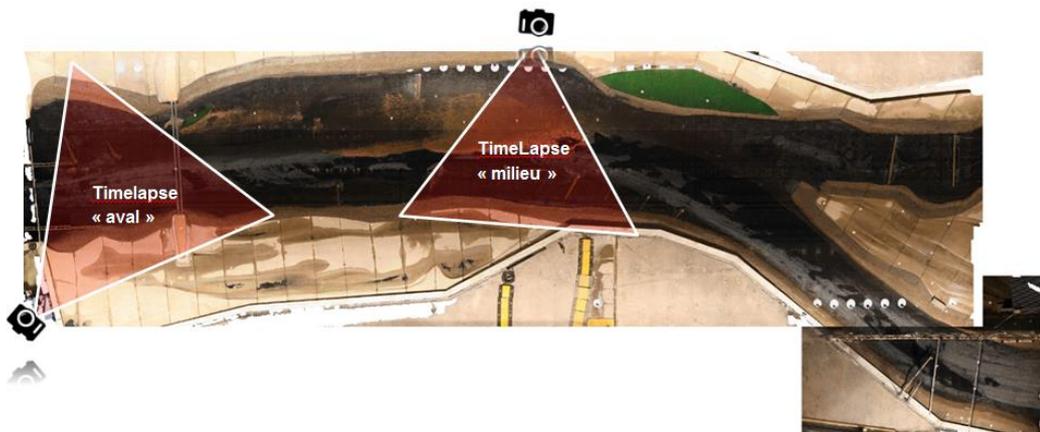


Figure 26: Prise de vue des vidéos et des timelapse sur le modèle

Les nombreux reflets sur les timelapses « milieu » perturbent le calcul des vitesses par le logiciel. Des reflets sont également présents en aval mais ceux-ci sont parallèles aux déplacements des formes et biaisent beaucoup moins le calcul. Ainsi, dans la suite du chapitre, seuls les prises de vue « aval » seront présentées.

Ci-dessous, quelques extraits des enregistrements :

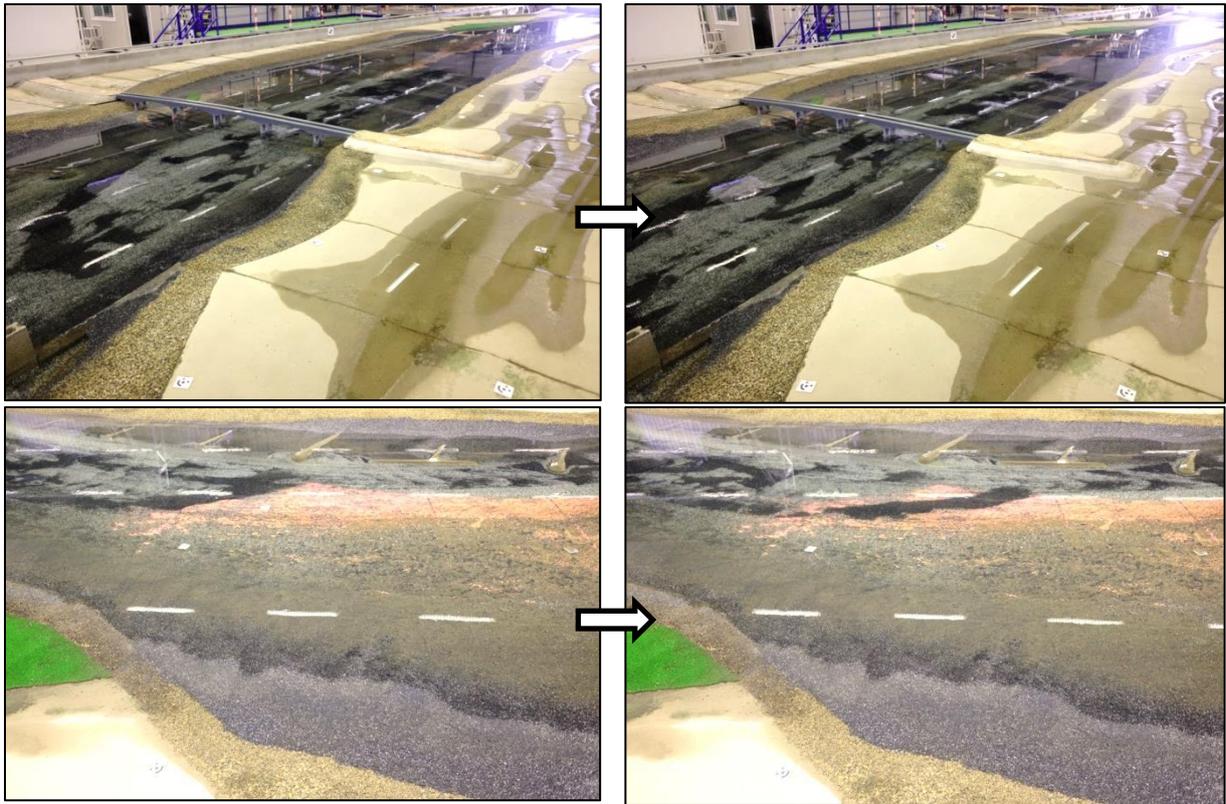


Figure 27: Extraits des timelapses « aval » et « milieu », à pas de temps 5 min

2.2.2. Traitement LSPIV

La méthode LSPIV est une technique principalement utilisée pour l'hydrométrie. Cette méthode non-intrusive est appréciée pour la simplicité d'acquisition des données de base. En effet, la mesure est réalisée à partir d'une séquence d'images échantillonnées à partir d'une vidéo ou d'une prise à intervalle régulier (timelapse). Le principe de la mesure se base sur le déplacement d'un motif (appelé aire d'interrogation) dans une zone de recherche (appelée aire de recherche). Les limites de l'aire de recherche sont définies en tenant compte du sens de l'écoulement et des vitesses maximales. Dans le modèle physique étudié, une séparation colorimétrique naturelle des matériaux s'établit au fond du lit laissant apparaître des formes noires (dunes) sur un fond blanc. Il devient alors assez aisé de suivre le déplacement d'une forme au cours du temps.

Pour des prises de vue obliques, une orthorectification est obligatoire pour mesurer correctement le déplacement d'un motif. Cette étape consiste à repérer dans une image des points de référence aux coordonnées connues (appelés Ground Reference Points (GRP)). Ces points, au minimum de 6, doivent être identiques sur l'ensemble de la séquence d'image. Une prise de vue fixe est donc indispensable. Les cibles géo-référencées sur le modèle physique sont présentes sur chacune des séries d'image et permettent d'atteindre le nombre de GRP requis pour l'étape d'orthorectification (Figure 28).

Ainsi, par son principe de fonctionnement, la technique LSPIV peut être applicable à différents champs d'application, tel que le transport solide par charriage. L'étude aura pour but de montrer que la mesure LSPIV est une technique valable et efficace pour le suivi de dunes en laboratoire.



Figure 28: Exemple d'orthorectification avec 7 GRP (croix rouge) (essai37)

Les paramètres de calculs définis ci-dessous dépendent du type d'essai étudié, notamment pour la dimension de l'aire de recherche (Figure 29) :

- Résolution : 0,01 m/pixel
- Aire d'interrogation : 30 pixels (0,3 m_Mod)
- Aire de recherche :
 - vitesse latérale maximale : 0,002 m/s_Mod (13 m/j_Nat)
 - vitesse maximale vers l'aval : 0,004 à 0,01 m/s_Mod (26 à 65 m/j_Nat)
 - vitesse vers l'amont : 0 m/s_Mod
- Grille : définie manuellement pour chaque essai en tenant compte de la vitesse maximale de déplacement vers l'aval : entre 225 et 1414 points de calculs.

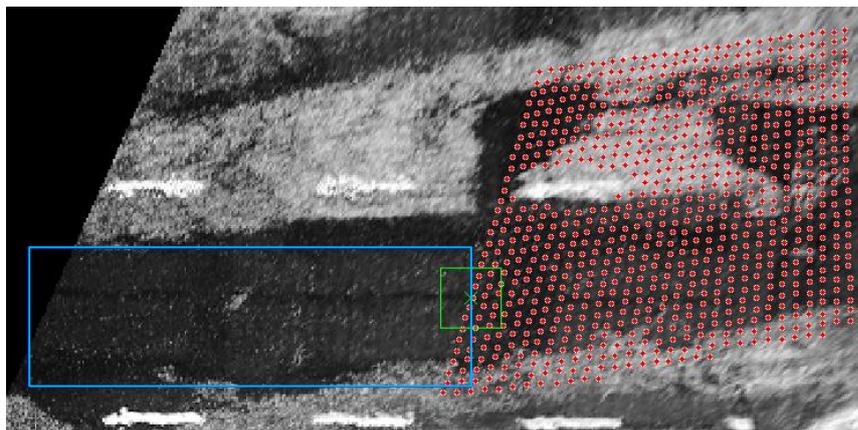


Figure 29: Paramètres de calcul : aire d'interrogation (vert), aire de recherche (bleu) et grille de calcul (points rouges) (essai 46)

2.2.3. Similitude temporelle

Les vitesses calculées sous Fudaa-LSPIV correspondent aux vitesses observées sur le modèle physique. Une transformation de ces valeurs à partir des lois de similitudes est nécessaire pour obtenir des vitesses nature.

Les dunes se déplacent dans le plan horizontal, la distance de déplacement est donc soumise à l'échelle horizontale de 1/100. Le temps de parcours de la dune est quant à lui associé à l'échelle des temps sédimentaires (1/1320). La conversion effectuée est donc la suivante :

$$V_{Nat}(m/j) = \frac{V_{Mod}(m/s) * 100 * 3600 * 24}{1320}$$

La similitude de Shields assure une mise en mouvement identique entre le modèle et la réalité. Cependant, la dispersion de la densité des matériaux de 1,05 à 1,09 et du diamètre médian du matériau de 1,32 à 1,90 mm a été observée au fil des essais, entraînant une diminution du paramètre de mobilité (τ^*). En revanche les paramètres de mobilité critique (τ_c^*) restent similaires. La similitude de Shields, qui avait initialement été vérifiée lors d'essais spécifiques en canal vitré, est donc assurée malgré l'évolution du matériau.

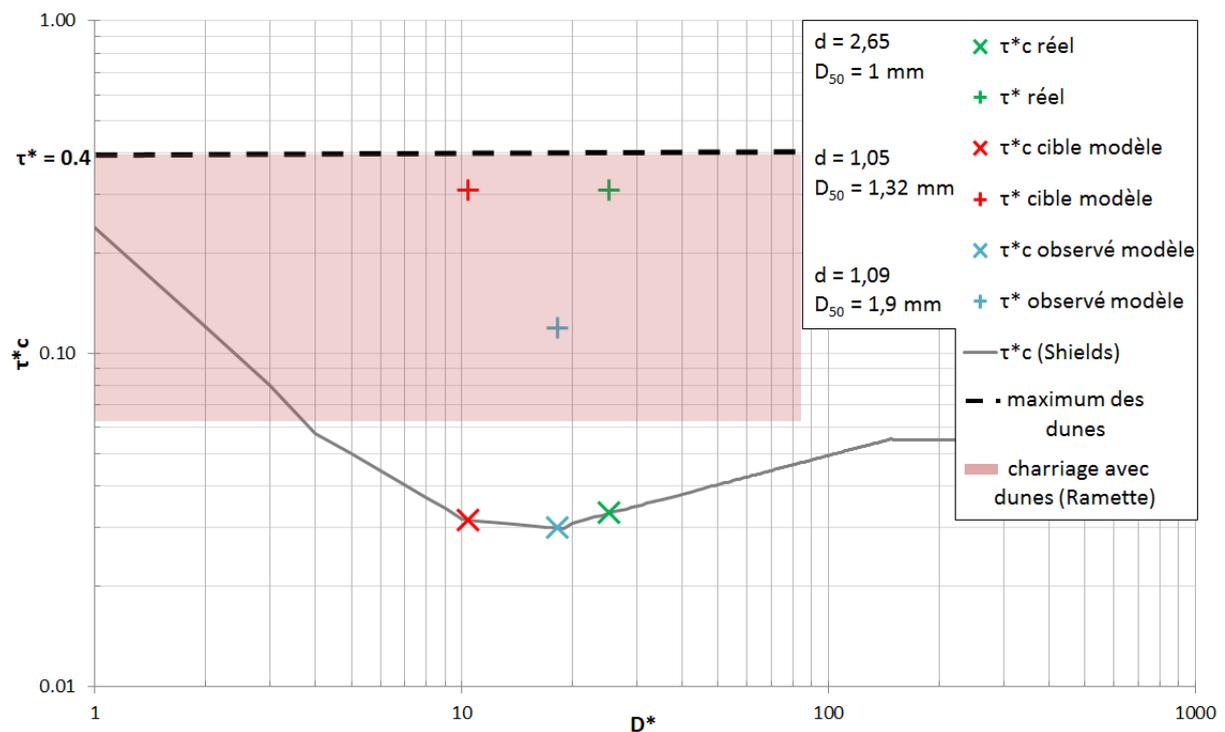


Figure 30: Paramètre de Shields en fonction du diamètre particulaire pour 3 cas : valeurs réelles de la Loire, valeurs cibles modèle et valeurs observées sur le modèle

D'après l'abaque de *Ramette (1981)*, le maximum de dunes apparaît pour $\tau^* = 0,4$. La diminution de ce paramètre dans le modèle modifie le transport par charriage, mais cet écart reste acceptable : pour $0,062 < \tau^* < 0,4$ le charriage reste sous forme de dunes (*Ramette, 1981*). Cette différence dans le respect du τ^* peut entraîner un biais dans la forme des dunes. De plus, le diamètre particulaire reste supérieure à 10 ce qui limite l'apparition de rides perturbatrices.

2.2.4. Représentativité temporelle

Il est intéressant de suivre les vitesses des dunes au cours du temps pour observer un comportement particulier pendant un essai. Six séquences d'images ont été analysées pour les types d'essai de janvier et février. Les essais sont représentés à la suite pour faciliter la lecture (Figure 31). L'écart temporel entre chaque vitesse correspond à l'intervalle de temps de la prise de vue (dépendant de l'essai). Une séquence d'image acquise pendant 200 minutes représente environ 45%

de la durée des essais, ainsi les vitesses calculées à partir de ces séquences d'images sont représentatives de l'essai.

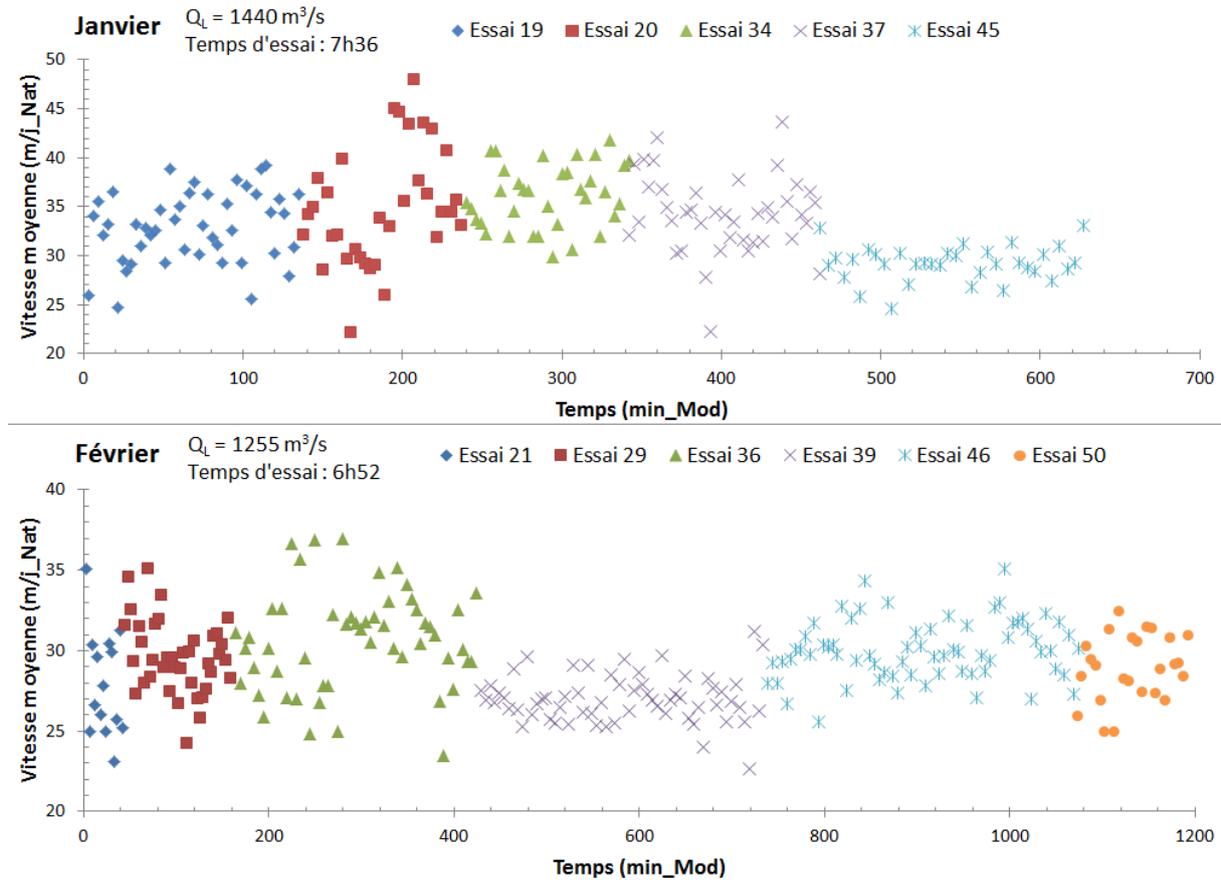


Figure 31: Vitesses moyennes des dunes au cours d'un essai

La moyenne des vitesses obtenues pour les essais de type janvier et février sont respectivement $33,5 \pm 4,5$ m/s et $29,1 \pm 2,6$ m/s, l'écart-type permet d'apprécier la faible variabilité. Aucune variation particulière de la vitesse n'est observée au cours d'un essai. La vitesse moyenne des dunes semble être constante dans le temps. Ainsi, le calcul des vitesses peut être réalisé sur n'importe quelle séquence du timelapse.

2.2.5. Représentativité spatiale des vitesses calculées

Avant d'exploiter un échantillon conséquent d'essais, il a fallu s'assurer que la vitesse de déplacement du fond sur une zone d'acquisition était représentative de la vitesse de migration d'une dune. Deux vidéos ont été acquises sur la partie aval du modèle physique pendant une durée totale 15 min, à 20 images par seconde.

Tout d'abord, une séquence d'image est extraite avec un échantillonnage toutes les 20 secondes sur 8 min de la vidéo 1 et 12 min pour la vidéo 2. Les vitesses de déplacement des formes sont calculées à partir d'une grille de calcul définie sur la totalité du lit actif sous le logiciel Fudaa-LSPIV.

D'autre part, 2 ou 3 dunes différentes ont été suivies à la fois dans la période d'échantillonnage de la vidéo (8 et 12 min) et en dehors de cette période (durée totale des vidéos 15 min) (Tableau 5). Une grille de calcul est définie sur le déplacement complet de la dune, un champ de

vecteur vitesse est obtenu comme précédemment. Cependant, pour suivre le déplacement d'une dune particulière, un suivi image par image est nécessaire afin de filtrer les vecteurs vitesses non représentatifs de la dune étudiée (Figure 32).

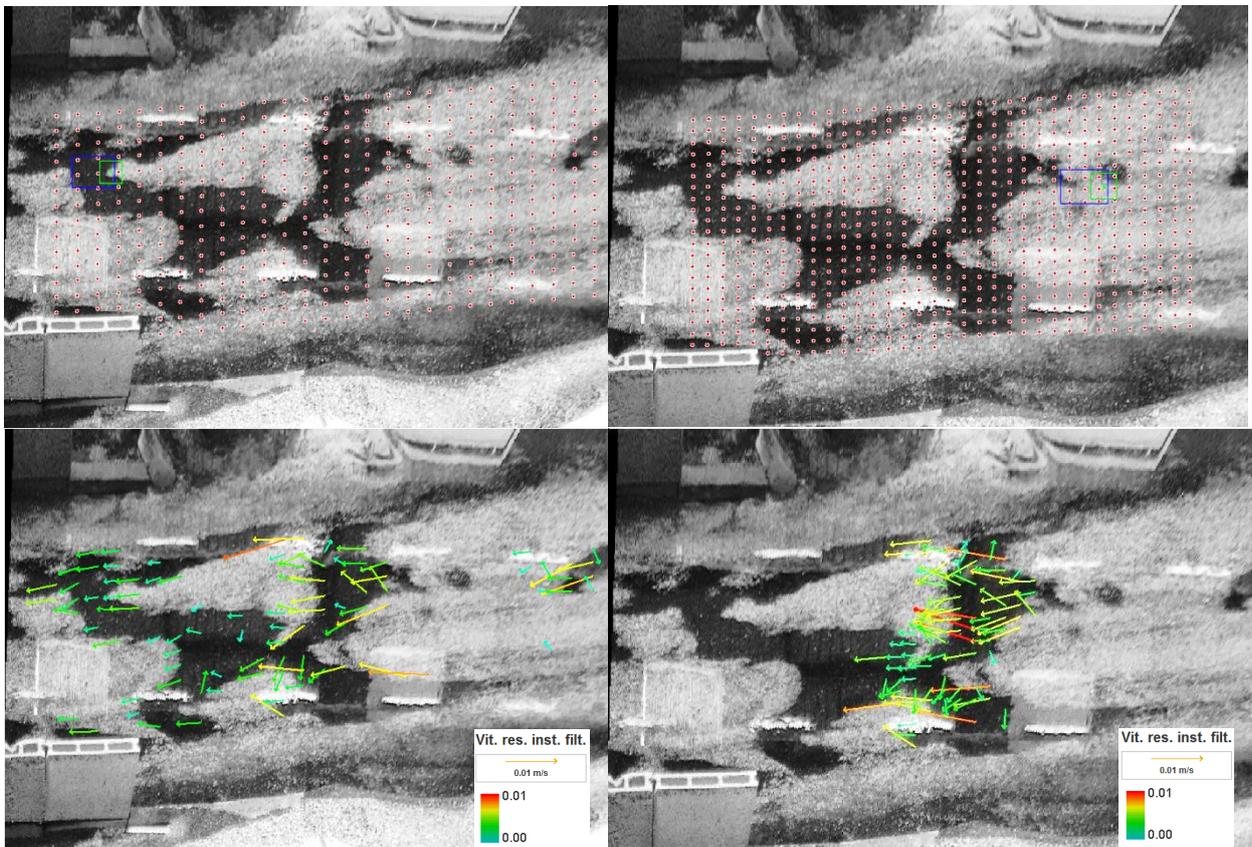


Figure 32: Calcul des vitesses sur l'ensemble du lit actif (gauche) et suivi de dune n°2 (droite) de la vidéo 1

Ainsi, un champ de vecteurs vitesses est calculé pour chaque couple d'images des séquences décrites précédemment. Puis, l'ensemble des vitesses est moyenné sur la séquence entière d'image. Ainsi, pour les calculs sur le lit actif complet, une vitesse moyenne est obtenue pour l'ensemble des formes en mouvement tandis que pour les calculs avec un suivi particulier, la vitesse moyenne est associée à la dune étudiée. L'objectif est de comparer un calcul basé sur le déplacement de l'ensemble des formes du lit et un calcul basé uniquement sur le mouvement d'une dune pour pouvoir vérifier la représentativité des vitesses du lit actif et valider l'utilisation d'une grille de calcul définie sur l'ensemble du lit actif pour les calculs suivants.

	Période d'échantillonnage	Vitesse moyenne (m/j_Nat)
Vidéo 1 (toutes formes)	0 à 8 min	37,4
Suivi de dune n°1	0 à 8 min	36,6
Suivi de dune n°2	8 à 14 min	34,7
Suivi de dune n°3	8 à 14 min	38,6
Vidéo 2 (toutes formes)	0 à 12 min	32,6
Suivi de dune n°1	0 à 9 min	35,7
Suivi de dune n°2	6 à 14 min	35,1

Tableau 5: Vitesse moyenne des dunes à partir des séquences vidéo (essai 52)

Le calcul des vitesses de déplacement du fond semble être représentatif de la vitesse des dunes au cours d'un essai. Par la suite, les vitesses des dunes seront calculées à partir de la grille de calcul définie sur l'ensemble du lit actif, méthode de traitement précis et le plus efficace.

2.2.6. Représentativité du pas de temps d'échantillonnage

L'échantillonnage des vidéos permet de suivre le déplacement d'une dune de manière précise (échantillonnage à 20 images par seconde) mais sur une durée d'acquisition courte (inférieure à 15 min). Cependant, les timelapses acquis pendant les essais ont un intervalle de 2 à 5 min (2,8 et 4,6 jours nature) et enregistrent l'avancée des formes sur une durée supérieure à 1 heure. L'objectif est ici de comparer des calculs effectués à partir des deux paramétrages d'acquisition, ce qui revient à comparer des calculs de vitesses à partir de 2 séquences d'images à intervalle d'échantillonnage différents ($3,33 \cdot 10^{-3}$ ips vs 20 ips).

Vitesse moyenne (m/j_Nat)	
Vidéo 0750	37,4
Vidéo 0749	32,6
Timelapse	33,7

Tableau 6: Vitesse moyenne à partir des vidéos et du timelapse (essai 52)

La vitesse de déplacement des dunes calculée à partir du timelapse de l'essai 52 est comprise entre les deux vitesses moyennes déterminées à partir des deux séquences vidéo (Tableau 6). La prise de d'image à intervalle de 5 min permet de calculer des vitesses représentatives des dunes sur le modèle. Ainsi, l'utilisation du timelapse est justifiée pour calculer la vitesse de déplacement des dunes au cours d'un essai.

2.3. Analyse quantitative des vitesses de migration

2.3.1. Gamme de débit investiguée

Les prises d'image à l'aval du pont de Bellevue ont été sélectionnées pour 20 essais qui couvrent une gamme de débit de 647 à 2 500 m^3/s , c'est-à-dire la majorité des débits morphogènes de Loire (cf. paragraphe 1.4, chapitre 2)

Les six types d'essais choisis pour l'analyse dynamique des dunes sont les mêmes que pour la mesure des caractéristiques géométriques (seulement 6 essais retenus pour le type janvier) (paragraphe 1.1.1., chapitre 3).

2.3.2. Résultats et critiques

Pour chaque timelapse, une séquence d'image est préalablement sélectionnée de manière à réduire le temps de calcul (100 images maximum) et vérifier que le déplacement des dunes soit visible et exploitable.

Pour un couple d'images, une vitesse est calculée à chaque point de calcul de la grille. L'ensemble des vitesses est moyenné : cette vitesse moyenne est associée à chaque couple d'images du timelapse. La variabilité de ces vitesses au cours du timelapse est représentée par les intervalles en noir sur la Figure 33, cet intervalle correspond à l'écart-type. Enfin, la vitesse moyenne du timelapse est calculée à partir des vitesses précédemment obtenues pour chaque couple d'images.

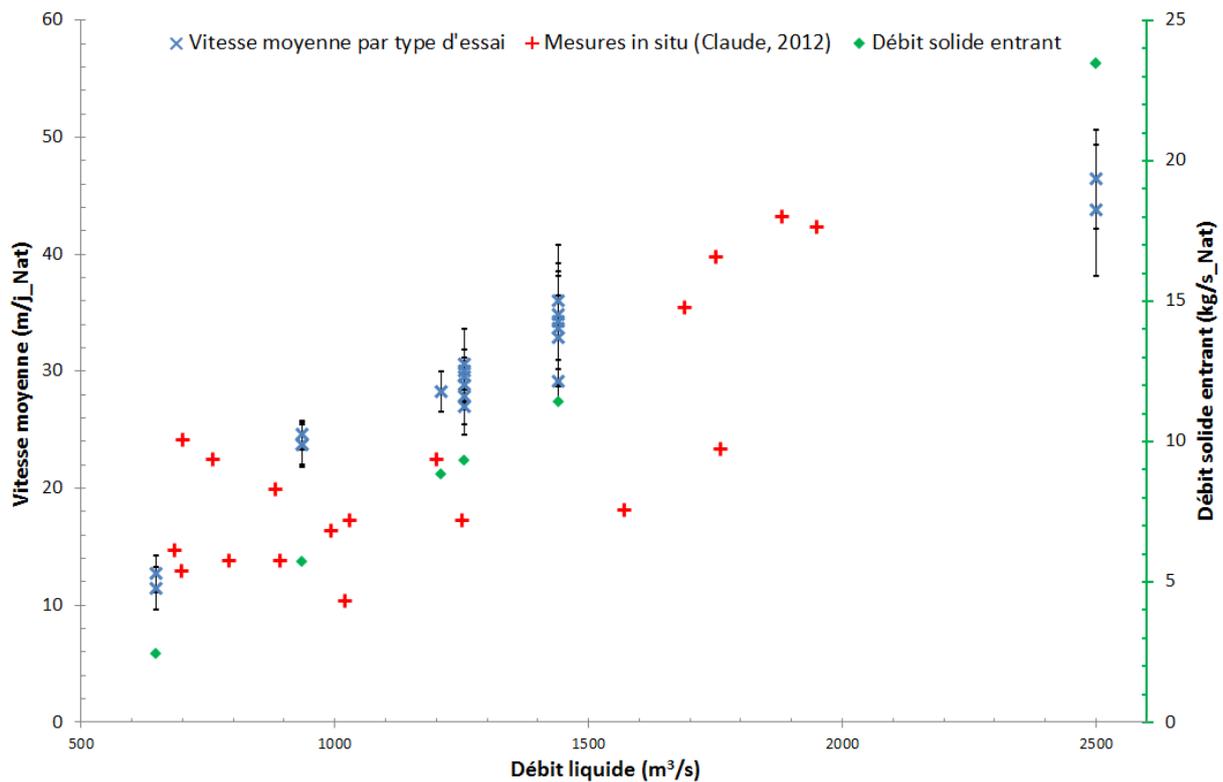


Figure 33: Vitesses moyennes des dunes modèles (bleu) et dunes réelles (rouge) en fonction du débit liquide

Premier constat, la vitesse de migration des dunes tend à croître avec le débit liquide d'un facteur 4 sur la gamme de débit étudiée. La variation des vitesses en fonction du débit liquide est analogue à celle du débit solide entrant, une corrélation entre les différents types d'essai apparaît. Plus la vitesse est élevée, plus l'apport sédimentaire est important. L'autre constat important est que les vitesses calculées pour un même type d'essai présentent une variabilité restreinte ce qui permet de consolider l'analyse. La dynamique des dunes intra-essai semble donc être un équilibre entre l'apport sédimentaire et les conditions hydrauliques.

Claude (2012) a étudié les dunes de la Loire sur le secteur de Bréhémont, secteur en amont de notre zone d'étude. Les vitesses de migration des dunes mesurées sur le terrain sont proches des valeurs déterminées sur le modèle notamment pour les débits inférieurs à 1200 m³/s. Par extrapolation, les vitesses pour des débits supérieurs à 1500 m³/s semblent suivre la même tendance. En revanche, pour les essais (1200 < Q_L < 1500 m³/s) les vitesses calculées sur le modèle semblent légèrement supérieures à celles rencontrées dans la réalité (+10 à 15 m/j_Nat). Cependant, des écarts comparables se retrouvent au sein même des mesures *in situ*. Des données de terrain supplémentaires permettraient de consolider l'analyse. De manière globale, les vitesses de dunes présentes sur le modèle se trouvent relativement proches des mesures effectuées par *Claude (2012)*.

2.4. Compléments du diagnostic sédimentaire par l'analyse des dunes

2.4.1. Temps de parcours des dunes et effets sur le bilan massique

Suite aux vitesses calculées, il est possible de déterminer le temps de parcours moyen des dunes sur l'emprise du modèle physique. La distance de parcours considérée est de 3,4 km (PK 64,7 – PK 61,3). Le Tableau 7 présente le temps de parcours moyen des types d'essai, moyenne effectuée sur les essais où la vitesse de migration a été calculée (paragraphe 2.3.2, chapitre 3).

Temps de parcours moyen sur 3,5 km (j_Nat)	
Janvier	105
Février	121
Mars	145
Avril	289
Décembre	124
Crue	78

Tableau 7: Temps de parcours moyen des dunes par type d'essai

Le temps de parcours des dunes est toujours inférieur à la durée totale de l'essai simulé (min 377 j_Nat). Ainsi, les dunes formées suite lors des premières injections solides ont le temps de traverser toute l'emprise du modèle. Le bilan volumique instantané cumulé calculé dans le diagnostic sédimentaire (chapitre 2) évolue en fonction du temps, il paraît intéressant d'identifier le temps de traversée sur les courbes déjà déterminées. En tenant compte des essais étudiés dans le diagnostic et les essais exploitables pour le calcul des vitesses des dunes, cinq essais ont pu être analysés : essai 40 (mars), essai 41 (avril), essai 44 (décembre), essai 45 (janvier) et essai 46 (février). Les temps de traversée minimal et maximal ont été calculés avec l'écart-type associé à la vitesse des dunes pour l'essai considéré.

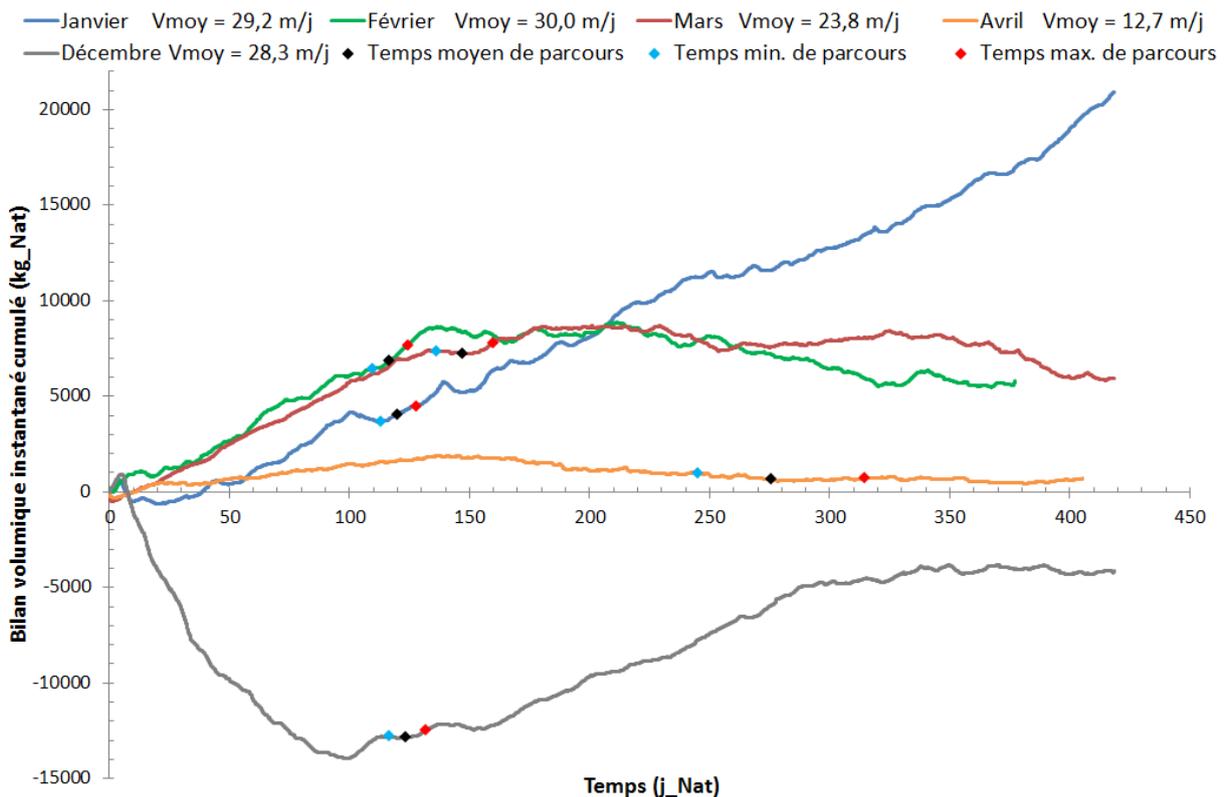


Figure 34: Influence du temps de traversée dans le bilan massique instantané cumulé

Pour les essais de mars et février, les dunes formées à la suite de la première injection ($t = 0$) sont évacuées à l'aval au moment où le bilan volumique change de tendance. Cette observation est aussi valable pour l'essai de décembre où la tendance du bilan volumique est inversée. Tout porte à croire que, pendant ce début d'essai ($t < t_{\text{TRAVERSEE}}$), les dunes produites par l'essai précédent sont

évacuées dans un premier temps, puis à $t > t_{\text{TRAVERSEE}}$, les dunes formées par l'injection solide à l'amont se retrouvent à l'aval et sont évacuées.

L'essai précédent mars est un essai de type février (essai 39) et l'essai de janvier (essai 45) précède celui de février. Les essais de mars et février suivent tous les deux des essais pour lesquelles les apports solides et les conditions hydrauliques étaient supérieures, où les dunes formées représentent une charge sédimentaire supérieure à celle requise pour l'équilibre sédimentaire. Dans un premier temps, du dépôt s'installe car l'injection ajoutée aux dunes fournissent suffisamment de matériaux. Une fois que les dunes de l'essai précédent sont évacuées, le modèle semble tendre vers un équilibre, les dunes formées suite aux premières injections se retrouvent à l'aval. A $t > t_{\text{TRAVERSEE}}$, la formation et le charriage des dunes sont conditionnés seulement par les conditions amont de l'essai en cours.

Par contre, l'essai de décembre est quant à lui précédé par un essai de type novembre (plus petit débit simulé). Or, il a été montré qu'entre les essais 40 et 43 (de mars à novembre), le bilan volumique ne cessait d'augmenter, les matériaux, certes injectés en petite quantité (0,78 à 5,71 kg/s_Nat), s'accumulaient dans le modèle. Le changement de variation du bilan volumique au cours de l'essai de décembre peut être l'évacuation de cette accumulation. Une fois la totalité des dunes formées par les essais précédents évacuée, l'essai de décembre tend à retrouver un état d'équilibre.

Le temps de parcours des dunes a donc un effet sur les variations du bilan volumique, en plus du charriage continu, les charges sédimentaires associées aux dunes jouent donc un rôle important dans le transport solide. Il a également été montré que le transport solide pouvait être influencé par les conditions hydrauliques et sédimentaires antérieures, et notamment par les formes de fonds qu'elles produisent.

2.4.2. Estimation du débit solide charrié par les dunes

Les dunes participent fortement à la charge sédimentaire totale transportée. Le flux de sédiments peut être estimée par le calcul du taux de transport total ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) qui est défini par *Simons et al. (1965)*:

$$q_{SDUNE} = \rho_s \phi \beta V H$$

Avec : ρ_s la masse volumique (2650 kg/m^3) ϕ la porosité du sédiment (0,4 pour le sable), β le coefficient du taux de charriage, V et H respectivement la vitesse et la hauteur des dunes.

Pour chaque essai, une vitesse moyenne des dunes a été déterminée (cf. paragraphe 2.3.2, chapitre 3), alors qu'une hauteur est liée à une dune. Pour des raisons de cohérence, les hauteurs de dunes ont été moyennées pour chaque essai afin d'estimer les débits solides moyens charriés associés à un débit liquide donné.

- **Calage de l'équation**

Le paramètre β dépend d'un facteur de forme correspondant au rapport de la surface, selon un plan horizontal, des dunes observées à celle des dunes triangulaires idéales. Ce facteur est difficile à calculer expérimentalement, il a donc été choisi de caler le coefficient β . Le diagnostic sédimentaire établi dans le chapitre 2 à montrer que le flux sédimentaire oscille autour d'un équilibre. L'objectif du calage est donc d'obtenir des débits solides calculés par l'équation de *Simons* qui soient proches des débits solides entrants connus et fixes pour chaque essai.

Les conditions limites solides amont sont des débits solides (Q_s) exprimés en $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\text{Nat}$, il faut donc calculer le débit solide entrant unitaire (q_s), en divisant Q_s par la largeur active. L'estimation de cette largeur n'est pas à négliger car le débit solide unitaire en dépend, d'autant plus que ces débits seront les points de références pour le calage du paramètre β . Compte tenu des différentes variations du lit actif et des observations sur le modèle, il a été choisi de considérer une largeur active moyenne située au niveau du pont de Bellevue de 80 m_{Nat}. Il aurait fallu lors de chaque essai, mesurer la largeur active sur différents points du modèle pour être plus précis.

Les débits solides unitaires calculés avec différentes valeurs de β (0,25; 0,3; 0,35 et 0,4) sont rassemblés dans la Figure 35. Pour $\beta = 0,35$, l'écart quadratique moyen entre les débits solides estimés et les débits entrants est le plus faible (0,003). Une variation de 10 % sur la largeur active pour le calcul du débit solide entrant induit un écart sur le β de $\pm 0,05$, il faut donc rester vigilant sur le choix du β . Les valeurs β de *Claude (2012)* sont comprises entre 0,44 et 0,66, et sont analogues à d'autres auteurs (*Gaeuman et Jacobson 2007, Van der Berg 1987*). Le β retenu suite au calage semble être légèrement sous-estimé par rapport aux valeurs rencontrées dans la littérature scientifique, sa valeur (0,35) reste néanmoins proche de la plus faible valeur obtenue par *Claude (0,44)*. Ainsi, l'équation de *Simons* a été utilisée pour estimer le débit solide unitaire avec $\beta = 0,35$.

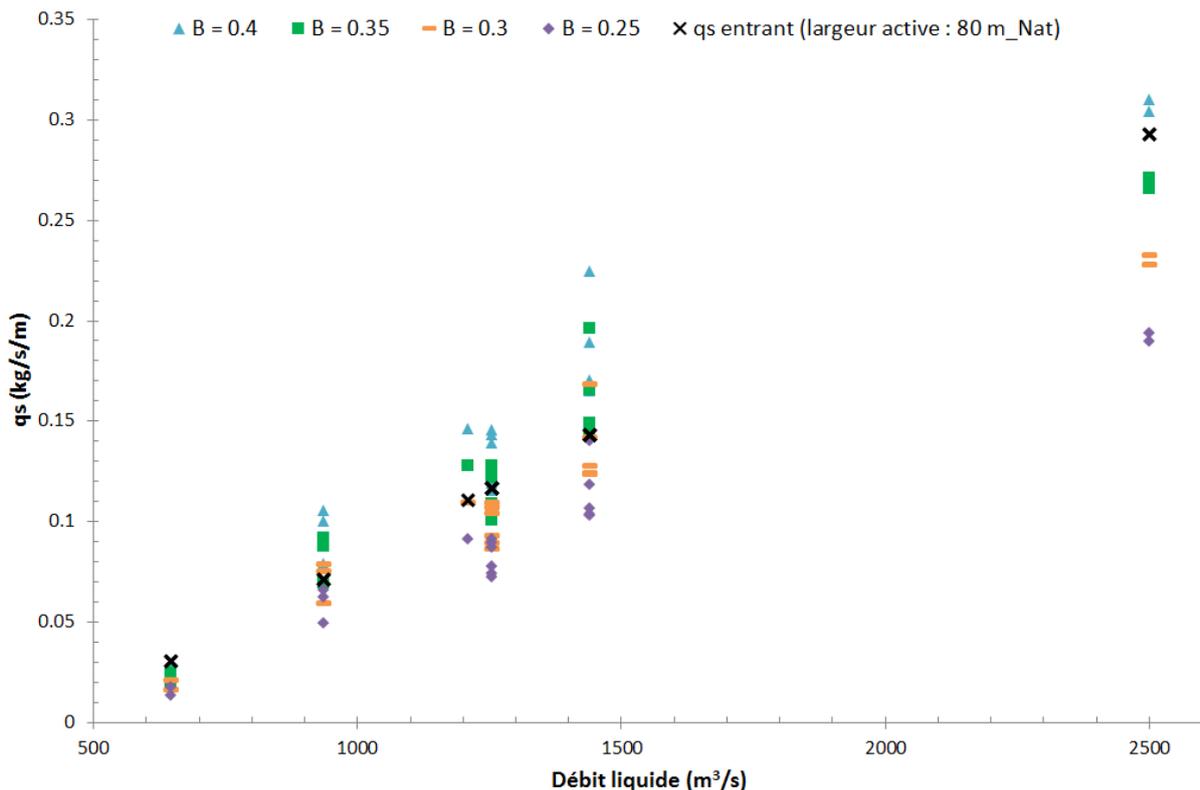


Figure 35: Calage du paramètre de β

- **Comparaison des résultats**

Le débit solide par mètre de largeur est calculé pour chaque type d'essai pour lesquelles les dunes ont été étudiées. Les résultats ont pu être comparés aux mesures *in situ* réalisées par *Claude (2012)* et par la CNR en janvier et avril 2017. La courbe de tarage amont avec une loi de transport

solide à 70%, utilisée pour déterminer les conditions limites sédimentaires en amont, est également ajoutée sur la Figure 36.

Les taux de transport solide total déterminés suite à l'analyse des dunes sont proches des mesures *in situ*. Les taux calculés pour un débit liquide de 647 m³/s sont identiques aux taux mesurés d'après les prélèvements de terrain de 2017 pour des débits analogues. Pour des débits plus élevés (800 < Q_L < 2000), les taux déterminés par Claude sont similaires aux taux estimés par les dunes du modèle.

La méthode de calcul du taux de transport solide total par les dunes apparaît comme une méthode adaptée à l'estimation de ce taux suite à la concordance des résultats avec les différentes mesures réelles sur la Loire. La détermination du paramètre β n'est pas un point à négliger. Les débits solides unitaires entrant, points de référence lors du calage, ont été calculés avec une largeur moyenne active estimée à partir d'observations sur le modèle physique. Des mesures précises, sur chaque essai, de cette largeur aurait permis de calculer précisément le taux de charriage entrant.

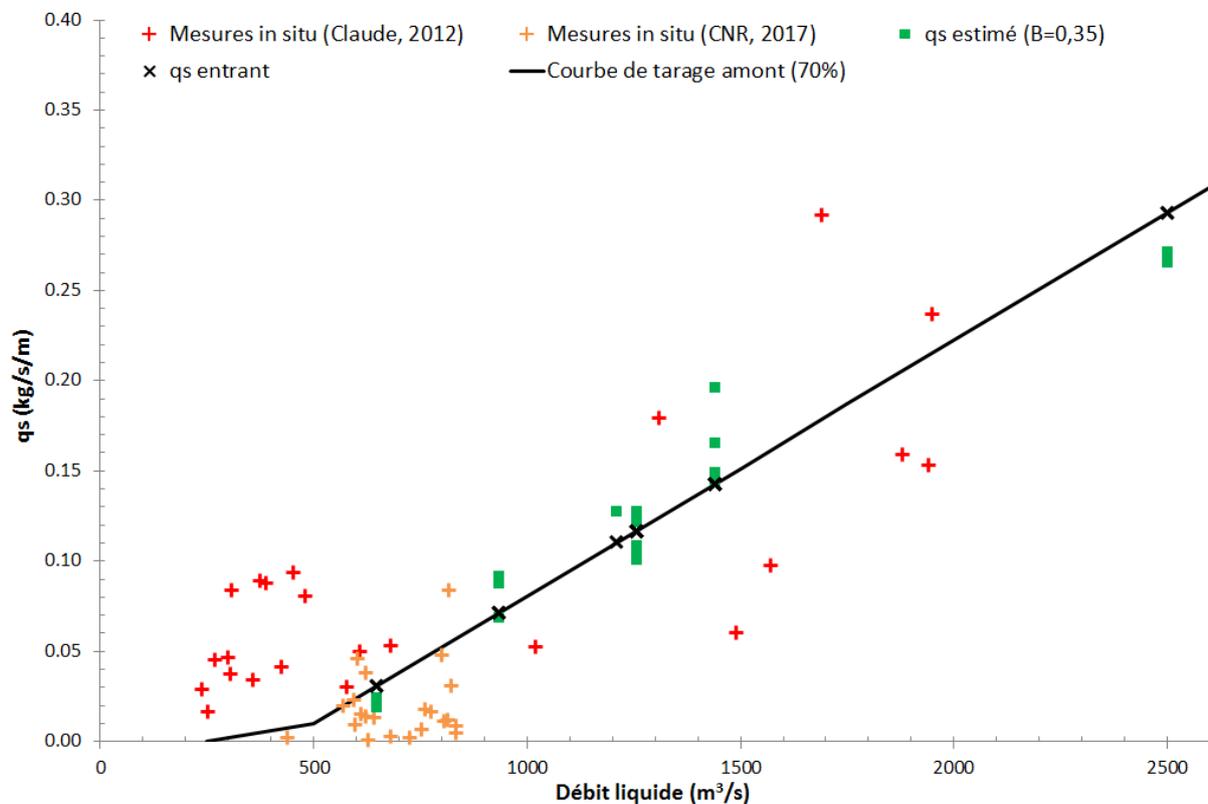


Figure 36: Estimation du taux de transport total par charriage à partir des dunes

Les mesures *in situ* effectuées par prélèvement montrent une grande variabilité pour un débit donné. Tout l'intérêt d'estimer le débit solide par le suivi de dunes est de compléter des mesures réalisées avec des techniques traditionnelles aussi bien sur le terrain que sur des modèles physiques.

3. Perspectives

Les mesures relatives à la géométrie des dunes ne sont, pour le moment, connues qu'en statique et à l'état final des essais en laboratoire. Il serait intéressant de mesurer ses caractéristiques

au cours des essais, ce qui permettrait d'en connaître d'avantage sur l'évolution géométrique des dunes d'un point de vue temporelle et de fournir une quantité de dunes mesurées plus importante.

C'est pourquoi dans les essais suivants, il serait judicieux de suivre les dunes par une mesure dynamique des fonds à l'aide deux sondeurs bathymétriques statiques (type sonar comme le sondeur Ultralab) alignés dans le sens de l'écoulement dans une zone propice à la formation des dunes (ex : amont ou aval du pont). La distance entre les deux capteurs est fixée. La mesure des fonds horodatée va permettre de connaître le temps de parcours de la dune par différence de détection d'un sondeur à l'autre. La distance et le temps ainsi connus permettront d'accéder à la vitesse de déplacement de la dune. L'acquisition de la mesure est prévue pour suivre plusieurs dunes successives afin de mesurer les caractéristiques géométriques. Cette méthode permettra donc de déterminer la hauteur, la longueur d'ondes des dunes et la vitesse au cours de l'essai et à différents endroits du modèle. L'hypothèse considérant la géométrie des dunes de l'état final égale à la géométrie des dunes au cours de l'essai pourra être vérifiée.

D'autre part, la quantification de transport solide par charriage réalisée par la «*dune tracking method*» décrite par *Claude (2012)* est non-intrusive et paraît plus adaptée qu'une méthode traditionnelle de prélèvement (ex : BTMA) pour un modèle physique et pour les mesures de terrain. Cependant, l'estimation du charriage par cette voie nécessite une connaissance complète et précise des dunes (dynamique et morphologie) qui pourra être connue via des capteurs de type sonar.

4. Conclusion sur les dunes

Malgré la faible quantité de données existantes sur les dunes de la Loire, les vitesses déterminées par *Claude (2012)* sur le secteur de Bréhémont et les bathymétries réelles au niveau de Bellevue représentent des points de comparaison essentiels qui ont permis d'établir une analyse juste et cohérente des dunes observées lors des essais en laboratoire. Une prise de hauteur est cruciale sur des mesures expérimentales, les équations de *Yalin (1964)* ont permis de comparer les dunes du modèle à des relations générales. Plusieurs conclusions sont à tirer de ce chapitre :

- La morphologie (hauteur et longueur) des dunes sur le modèle physique est identique à la géométrie des dunes réelles sur le même secteur. De plus, il a été montré une corrélation entre leurs caractéristiques et les profondeurs d'eau par application des équations de *Yalin (1964)*.
- Les vitesses de déplacement des dunes au cours des essais correspondent à la dynamique des dunes suivies sur la Loire.
- L'équilibre, ou l'état de développement des dunes, est similaire entre le modèle et la réalité.

Conclusions générales et perspectives

Durant la phase d'étude en état actuel de la Loire, le modèle physique a fourni des informations riches et cruciales. L'objectif principal de ce modèle est de reproduire des aspects qualitatifs utiles pour établir le diagnostic sédimentaire. Dans une certaine mesure, il complète son rôle initial en offrant des données quantitatives sur les dunes.

Cependant, il faut garder à l'esprit qu'un modèle a pour but d'approcher la réalité, et non de reproduire à l'identique la réalité. Le modèle physique introduit, de par sa conception et sa construction, des incertitudes. Par exemple : les écoulements tridimensionnels ne sont pas adaptés pour un modèle en distorsion verticale, bien que les évolutions du lit au niveau des épis soient bien représentées, en particulier pour la fosse.

Le diagnostic sédimentaire a été construit à partir de résultats issus des 18 essais de prévision à 15 ans réalisés sur le modèle physique. Les simulations numériques pour des prévisions à 10 ans ont permis de compléter les résultats en laboratoire. Les deux modèles convergent vers la même conclusion, ce qui est rassurant. La tendance sédimentaire en état actuel de la Loire sur 15 ans se définit par un engraissement. Cependant, cette tendance est à relativiser puisque la Loire semble osciller autour d'un équilibre sédimentaire. Il est intéressant de se demander si cette tendance va se poursuivre à plus long terme, les prochains résultats du modèle numérique à horizon 50 ans permettront de répondre à cette question. Le modèle physique apporte des informations complémentaires par rapport au modèle numérique, consolidant le calage et le diagnostic. Le fond du lit évolue peu au cours des 15 années, notamment visible par la pérennité de la fosse et la présence marquée de dunes au niveau du pont de Bellevue et près de la confluence avec le bras de Thouaré.

L'analyse des dunes formées sur le modèle physique a complété et approfondi le diagnostic sédimentaire réalisé. Les conditions de mise en mouvement et de transport solide produites par la similitude de Shields ont permis de reproduire un charriage par dunes, ce qui donne déjà un premier résultat qualitatif. L'extraction des caractéristiques géométriques et le calcul des vitesses de déplacement constituent un ensemble de données quantitatives. La comparaison de ces résultats avec des mesures réelles de dunes effectuées sur la Loire ont permis de vérifier et valider la bonne représentativité de la morphologie et de la dynamique des dunes sur le modèle physique de la Loire. Dans une approche plus générale, des équations empiriques ont montré que la morphologie des dunes observées était en partie liée à la hauteur d'eau et que ces dunes relatives à la Loire sont similaires à d'autres dunes pour une hauteur d'eau spécifique. D'autre part, la connaissance des dunes a abouti au calcul des taux de charriage qui sont cohérents vis-à-vis des apports solides entrants. Le calcul du taux de charriage, se basant uniquement sur les dunes, semble bien estimer le débit solide unitaire. En vue de compléter des mesures de débit solide, il semble judicieux de réaliser un suivi de dunes, par la méthode des « *dune tracking* ». L'application peut être envisagée sur modèle physique ou en complément des mesures traditionnelles sur des sites de mesures.

La première phase d'essai sur le modèle physique permet de définir plusieurs perspectives pour l'état projet. En premier lieu, l'enjeu sera de comparer, entre l'état actuel de référence et l'état projet, une série identique d'essais. Pour cela, il conviendra alors de réaliser un cycle d'essai de mars

à février. De plus, l'évolution des apports solides entrant, liée aux projets dirigés par VNF en amont du site de Bellevue sera à considérer. Compte tenu de la perte de charge créée par l'ouvrage, les aspects hydrauliques seront tout aussi importants que les aspects sédimentaires :

- La mise en place de l'aménagement a pour objectif de favoriser un dépôt régressif vers l'amont. Il serait alors intéressant de suivre et quantifier l'évolution du remous solide (volume déposé, temps estimé pour un retour à une pente d'équilibre). L'implantation du seuil va potentiellement engendrer une érosion progressive à l'aval de l'ouvrage, l'évolution de cette érosion sera à déterminer (volume et impact sur l'aval). D'autres questions se posent : comment évolue le flux sédimentaire ? l'équilibre existe-il toujours ? Les dunes sont-elles toujours présentes étant donné le dépôt favorisé par le seuil ?
Le traitement et l'analyse des MNT produits par la photogrammétrie à la fin de chaque essai permettront de répondre en partie à ces questions.
- De nombreuses évolutions hydrauliques sont attendues entre l'état de référence et l'état projet. Il apparaît nécessaire de déterminer avec précision la ligne d'eau en état projet afin d'estimer la perte de charge créée par l'ouvrage, point important du cahier des charges. De plus, il faudra se demander si l'augmentation des hauteurs d'eau prévue par l'ouvrage répond correctement aux attentes du maître d'ouvrage, notamment sur le fond rocheux. D'autres questions se posent : est-il possible de qualifier la dangerosité des ressauts hydrauliques provoqués par l'aménagement ? Suite à la déviation du lit sur le fond rocheux, l'écoulement transversal prévu en aval du toit représente-il un danger pour la navigation ?
Les capteurs ultrasons présents sur le chariot apporteront en partie les réponses à ces questions. Des simulations avec le pilotage d'une maquette de bateau sur le modèle physique pourront également estimer le niveau de dangerosité pour la navigation.

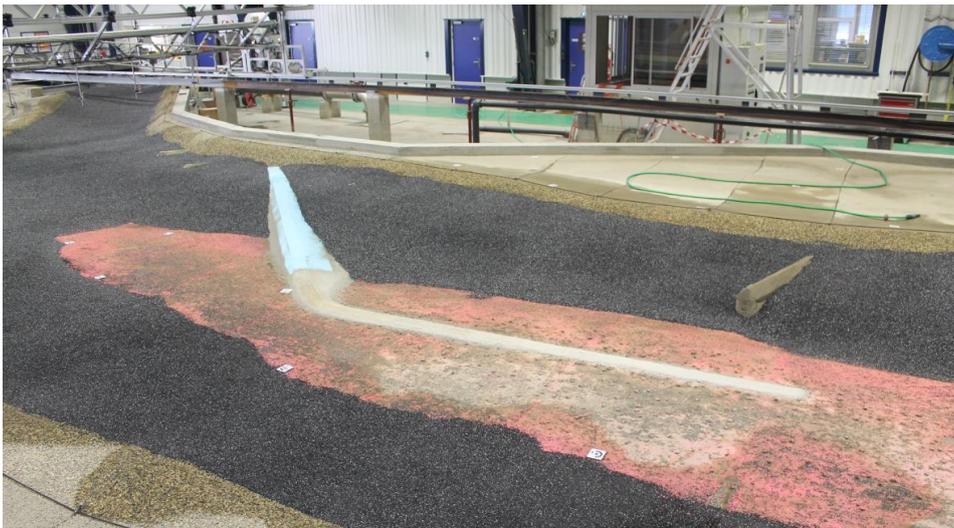


Figure 37: Mise en place de l'ouvrage sur le modèle

Bibliographie

- ASHLEY G.M. **Classification of large-scale subaqueous bedforms : a new look at an old problem. SEPM bedforms and bedding structures.** Journal of sedimentary petrology, 1990, vol.60, n°1, p. 160-172
- CLAUDE N. **Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France).** Thèse de Doctorat, Sciences de la Terre – Sédimentologie fluviatile, Université François-Rabelais de Tours, 2012. 394 p.
- COLBY B.R., SCOTT C.H. **Effects of water temperature on the discharge of bed material.** Washington, United States Government Printing Office, 1965. 25 p. (Geological Survey professional paper)
- DAMBRE J.L. **Les extractions de matériaux dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire et de ses affluents.** La Houille Blanche, 1996, n°6-7, p. 108-113
- GAEUMAN D., JACOBSON R.B. **Field assessment of alternative bed-load transport estimators.** Journal of Hydraulic Engineering, 2007, vol.133, n°12, p.1319-1328
- HELLER V. **Scale effects in physical hydraulic engineering models.** Journal of Hydraulic Research, 2011, vol. 49, n°3, p. 293-306
- JACKSON R.G.II. **Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow.** Geological Society of America Bulletin, 1975, vol.86, p.1523-1533
- LATAPIE A. **Modélisation de l'évolution morphologique d'un lit alluvial : application à la Loire moyenne.** Thèse de Doctorat, Science de la Terre et de l'Environnement, Université François Rabelais, 2011, 277 p.
- MEYER-PETER E., MÜLLER R. **Formulas for bed load transport.** In 2nd IAHSR meeting, Stockholm, 1948.
- MOATAR F., DUPONT N. (coord.). **La Loire fluviale et estuarienne. Un milieu en évolution.** Editions Quae, 2016. 319 p. ISBN978-2-7592-2401-2
- NABET F. **Etude du réajustement du lit actif en Loire moyenne, bilan géomorphologique et diagnostic du fonctionnement des chenaux secondaires en vue d'une gestion raisonnée.** Thèse de Doctorat, Géographie et Aménagement, Université Paris I Panthéon Sorbonne, 2013. 408 p.
- PEAKALL J., ASHWORTH P., BEST J. **Physical Modelling in fluvial Geomorphology: Principles, Applications and Unresolved Issues** In Rhodes B.L., Thorn C.E. The Scientific Nature of Geomorphology. John Wiley & Sons Inc, 1996. Chapitre 9. p 221-253. ISBN 0-471-96811-0
- POLIGOT-PITSCH S., GEFFRAY G., PICHON N. **Contribution de l'hydrométrie au suivi de l'évolution du lit de la Loire aval.** La Houille Blanche, 2014, n°5, p. 24-30
- RAMETTE M. **Guide d'Hydraulique Fluviale.** Chatou, Département L.N.H. - EDF, 1981. p.22
- SIMONS D.B., RICHARDSON E.V., NORDIN C.F. **Bedload equation for ripples and dunes.** Washington, US Geological Survey Professional Paper 462-H, 1965. 13p.

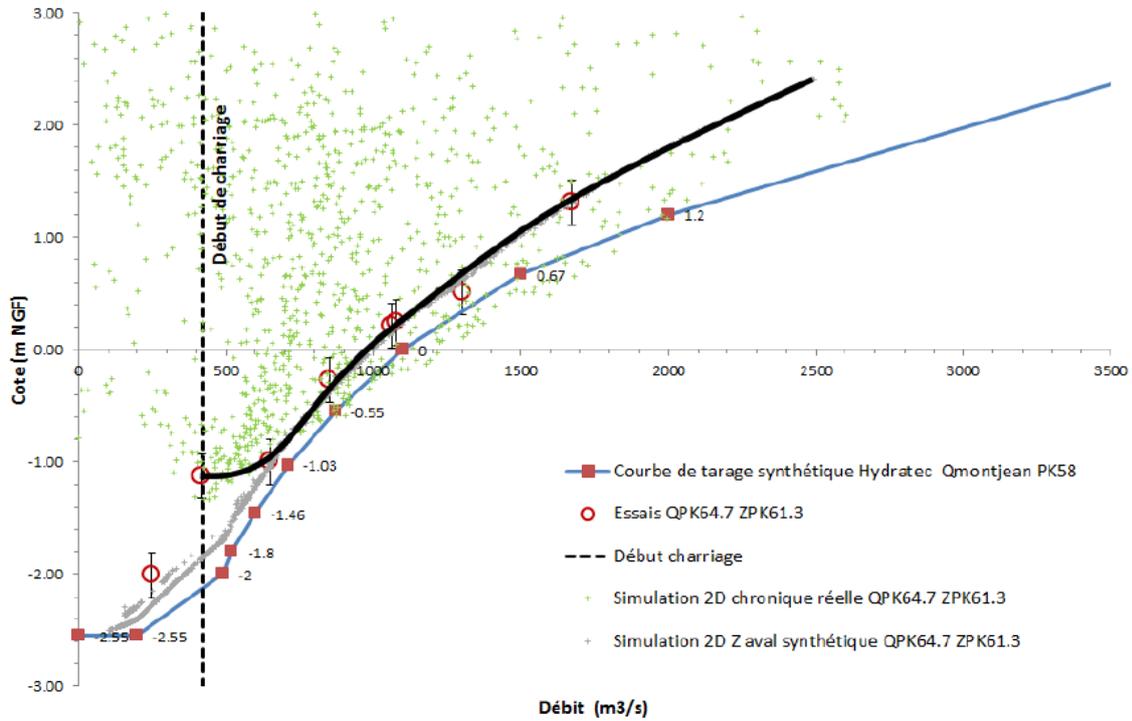
TYRRELL J. **The effect of water temperature on in-stream sediment concentration and transport rate.** Master of Science in Civil Engineering, Michigan Technological University, 2015. 58 p.

VAN DEN BERG J.H., 1987. **Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments.** Sedimentology, 1987,n°34, p.681–698

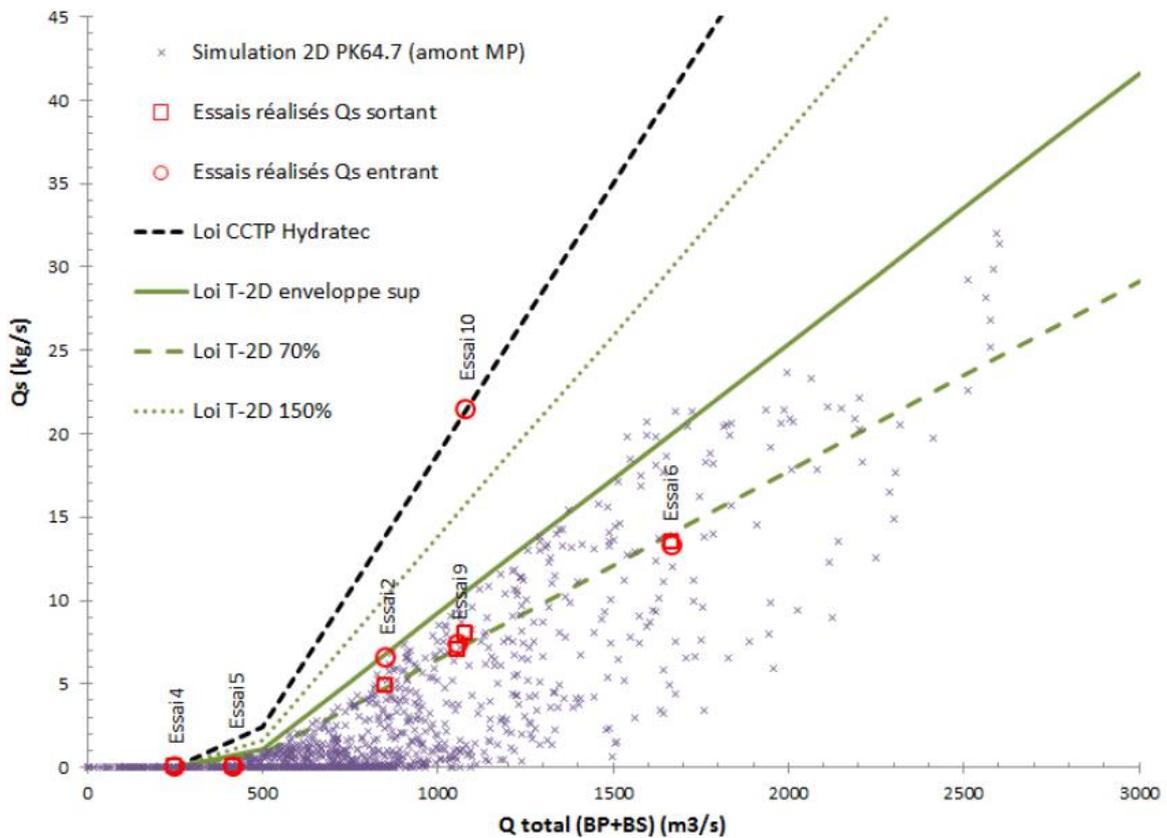
YALIN M.S. **Geometrical properties of sand waves.** Journal of Hydraulics Division, 1964, vol.90, n°5, p. 105-119

Annexes

Annexe 1: Courbe de tarage synthétique de la cote aval issu de la *Note d'avancement : étude du conditionnement aux limites*



Annexe 2: Courbe de tarage sédimentaire issu de la *Note d'avancement : étude du conditionnement aux limites*



Amour, Loire et beauté

La Loire m'a emporté sur ses flots dès mon arrivée. Je participais à l'essai du jour, essai n°37, sans savoir que 15 autres suivraient.

J'ai passé des heures à te bichonner, te nourrir de polystyrène, te surveiller d'un œil. Je te remercie d'avoir été indulgente à mes débuts, ce n'était pas facile d'être river-sitter. Et puis, j'ai appris et j'ai compris beaucoup de choses sur toi grâce à tes papas.

On a tiré le meilleur de toi, exploité des capacités. Bref, on t'a poussé au-delà de tes limites. Tu es une véritable athlète avec une énergie débordante, une vraie force de la nature. A l'arrivée, tes résultats étaient remarquables, on y a même pu lire ton avenir. Dans 15 ans, certes, tu auras un peu grossi, tu seras un peu ridée, la vie quoi ! Mais ne t'inquiète pas, ton fond n'aura pas changé, en équilibre sur tes deux rives tu resteras fidèle à toi-même, charmante et paisible comme toujours. Et moi dans 15 ans je serai quoi ?

A ce stade de l'histoire, tu as déjà une vie bien remplie, 52 essais à ton actif. Tu en as rassemblé des gens, des jeunes et des « vieux », des femmes et des hommes, des constructeurs, des techniciens et des ingénieurs, tous émerveillés par ta splendeur. Bien malgré toi, tu as dû te reposer, si longtemps, que j'ai même dû tirer d'autres plans sur la comète Loire. Au revoir l'étude sur l'implantation d'enrochements dans ton artère. En revanche, j'ai eu la chance de découvrir une autre facette de toi, plus mystérieuse mais tellement passionnante.

Tes petites formes que tu cachais pour paraître plus mince (pourtant je t'avais dit mollo sur le polystyrène), représentent tellement de choses dont tu n'as même pas conscience. Assume-les, tu es magnifique. Regarde comment tu danses avec elles sur le tempo de l'eau, c'est la réalité !

Ô petite Loire, je t'ai vu toute nue. Sans eau, sans matériaux, rien ! J'en ai même rougi. Et puis, on t'a refait une petite beauté, toute lisse, sans ride prête à vivre une autre phase de ta vie. Maintenant tu files le parfait amour avec Monsieur Le Seuil. De nouvelles aventures en perspective !

J'emporte avec moi nos souvenirs. Prends soin de tes papas, ne les fais pas trop courir, eux aussi ils commencent à vieillir. Continue à faire rêver les gens, à leur faire dire des histoires, à leur raconter ton histoire.

« On ne renonce jamais aux modèles physiques vous savez, ça fait 500 ans que les humains tentent de comprendre les modèles physiques. Chaque humain recommence avec chaque modèle, le même travail, les mêmes calculs, difficiles et indéchiffrables. 500 ans qu'on se questionne à coup de Pourquoi ? Comment ? 500 ans qu'on cherche pendant des heures, qu'on invente des ordinateurs, des modèles numériques, et pourtant on continue à construire des modèles physiques... »

Adapté du film Danse avec lui

Merci à toi, petite Loire.