



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Effets de la suspension sur la morphologie des dunes subaquatiques en système sablo- graveleux :

Etude in situ à Saint-Mathurin-sur-Loire



2017-2018

Directeur de recherche
Rodrigues Stéphane

Birault Marie

Effets de la suspension sur la morphologie des dunes subaquatiques en système sablo-graveleux :

Etude in situ à Saint-Mathurin-sur-Loire

**Directeur de recherche
Stéphane Rodrigues**

2017-2018

Marie BIRAULT

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

FORMATION PAR LA RECHERCHE, PROJET DE FIN D'ETUDES EN GENIE DE L'AMENAGEMENT ET DE L'ENVIRONNEMENT

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :
Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :
Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Monsieur Rodrigues Stéphane, enseignant chercheur au sein de Polytech Tours, ainsi que Monsieur Le Guern Jules, doctorant pour le tutorat de ce projet.

SOMMAIRE

Avertissement	iii
Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement.....	iv
Remerciements	v
Sommaire	1
Introduction et hypothèses.....	2
I. Rappels	4
I.1. Les différentes formes de lit en système fluvial.....	4
I.1.1. Les modes de transport de sédiment impliqués dans la migration des corps sédimentaires	4
I.1.2. Les dunes subaquatiques, dynamique et morphologie	5
I.1.3. Les barres sédimentaires, dynamique, morphologie et nomenclature	9
I.2. Contexte et Objectifs.....	12
II. Matériels et Méthodes.....	14
II.1. Lieu d'études	15
II.2. Mesure des profil de vitesses et des débits	15
II.3. Mesure du transport solide.....	15
II.3.1. Mesure du transport par charriage	16
II.3.2. Mesure du transport par suspension	17
II.4. Relevés bathymétriques	17
II.5. Dunes Tracking Method (DTM)	17
II.6. Analyse en Composantes Principales (ACP)	20
III. Résultats	21
IV. Discussion	26
IV.1. Approche méthodologique générale et base de données.....	26
IV.2. Transport en suspension et morphologie des dunes	27
IV.3. Transport en suspension et célérité des dunes	29
Conclusion	30
Annexes	31
Index.....	33
Table des figures.....	34
Bibliographie.....	35
Webographie.....	37

INTRODUCTION ET HYPOTHESES

En système fluvial, les grains constituant la charge de fond transitent au sein des chenaux. Les variations de flux de sédiments associées créent et modifient des structures sédimentaires migrantes, aussi appelées formes du lit. Elles sont regroupées en trois catégories principales ; les microformes, les mésoformes et les macroformes.

La forme et la structure sédimentaire des formes du lit s'adaptent et répondent aux variations hydrosédimentaires de leur environnement. En retour, les corps sédimentaires sont une source de rugosité et de résistance à l'écoulement. Ils influencent par conséquent la hauteur d'eau (Simons & Richardson, 1966). Il n'est aussi pas rare que les formes du lit se superposent. Les formes secondaires se développent là où les conditions d'écoulement sont appropriées (Ashley, 1990). Ainsi, la grande diversité des formes du lit et des formes superposées, rencontrées en conditions naturelles, reflète la variété des conditions d'écoulement et leur variations (Ashley, 1990).

Les connaissances sur les formes du lit sont essentielles au sein des systèmes fluviaux dans la prédiction du niveau d'eau et donc dans la prévention des inondations mais également pour garder les rivières navigables. Elles peuvent en effet générer des problèmes pour la navigation et influencent l'érosion des berges (Crosato, 2015). La gestion des formes du lit a donc une place à part entière dans le domaine de l'ingénierie des rivières.

Ce projet de fin d'études, dans son ensemble, s'intéresse à deux types de corps sédimentaires, les dunes subaquatiques et les barres sédimentaires qui sont ubiquistes au sein des cours d'eau sableux et sablo-graveleux. Les dunes subaquatiques, aussi appelées mégarides font parties des mésoformes d'après la classification de Jackson (1975). Leur hauteur dépend premièrement de la profondeur du chenal et, dans un second temps de l'apport en sédiment. Les barres sédimentaires, qui font parties des macroformes, sont des formes du lit de plus grande taille que les dunes. Elles ont des longueurs du même ordre de grandeur que la largeur du chenal et des hauteurs comparables à la profondeur d'eau (Jackson, 1975).

Les objectifs de la première partie de ce Projet de Fin d'Etudes, réalisée au premier semestre étaient ; (1) de comprendre les interactions entre les barres et les dunes en termes de résistance à l'écoulement, rehausse de la ligne d'eau et taux de transport solide, et (2) d'appréhender le rôle de la suspension dans la dynamique des barres sédimentaires et des dunes subaquatiques. Pour ce faire, une analyse bibliographique a été réalisée. Elle a notamment permis de mettre en avant le rôle de la suspension sur la dynamique des dunes subaquatiques. En effet, il s'est avéré que le transport par suspension, influence la morphologie (notamment la pente d'abris) mais aussi la dynamique des dunes (Johns *et al.*, 1990; Kostaschuk *et al.*, 2008). En effet, lorsque la charge en suspension est associée à des vitesses d'écoulement importantes, elle génère, dans un premier temps, des dunes aplaties et plus symétriques et dans un second temps, elle favorise l'évolution des dunes en lit plan de haut niveau énergétique.

Ces résultats sont issus majoritairement d'études in situ en système sableux et non sablo-graveleux. La deuxième partie de ce projet, présentée ci-après, a donc pour but de vérifier si ces effets sont identiques ou non en systèmes sablo-graveleux. Pour cela, nous utiliserons les données issues de trois campagnes de mesures réalisées à Saint-Mathurin sur Loire en novembre 2016, mars et mai 2017.

Nos hypothèses concernant les effets de la suspension sur la dynamique des dunes en systèmes sablo-graveleux sont les suivantes :

- (1) Le transport en suspension, lorsqu'il est important modifie la morphologie des dunes notamment en diminuant leur *steepness* et l'angle de leur pente d'abris.

- (2) Le transport en suspension modifie l'asymétrie des dunes. Ces dernières étant plus symétriques lorsque le transport en suspension est important et majoritaire.
- (3) Le transport en suspension impacte la vitesse de migration des dunes. Lorsque la part de sédiment transportés par suspension est importante, la vitesse de migration des dunes est augmentée.

Ce rapport, qui en est la synthèse, s'articule selon les quatre parties suivantes ; (1) Rappels de la première partie, (2) Matériels et Méthodes, (3) Résultats, (4) Discussion.

I. RAPPELS

Pour une meilleure compréhension de ce PFE, des éléments expliqués dans la première partie de celui-ci, réalisée au premier semestre sont rappelés ci-après.

I.1. LES DIFFERENTES FORMES DE LIT EN SYSTEME FLUVIATILE

Les corps sédimentaires sont regroupés en trois catégories (Jackson, 1975) selon leur amplitude et leur longueur d'onde. On retrouve ainsi, dans l'ordre croissant ; les microformes, les mésoformes et enfin, les macroformes. Ces formes du lit (à l'exception des anti-dunes), sont progradantes, c'est-à-dire, qu'elles se déplacent dans le sens du courant.

Elles répondent aux variations ponctuelles ou à long terme des conditions d'écoulement (Ashley, 1990). Par conséquent, leur forme et leur structure sédimentaire reflètent les conditions hydrauliques (hauteur d'eau, effets de turbulence, intensité et direction des vecteurs de vitesse) et sédimentaires (taille de grains, disponibilité en sédiments du milieu) qui prévalaient lors de leur formation. Leur géométrie dépend également de la structure du lit (Rodrigues, 2014). En retour, elles influencent l'écoulement et le transport de sédiments (Simons & Richardson, 1966).

L'occurrence et la géométrie des microformes sont gouvernées par les caractéristiques de la couche limite (taille des grains et nombre de Reynolds). Elles se forment en réponse aux turbulences ou aux fluctuations éphémères du régime d'écoulement au sein de cette dernière (Jackson, 1975). Ces petites formes du lit ont en général des temps de vie plus courts que la durée des événements qui sont à leur origine (Jackson, 1975) et ne mesurent que quelques centimètres de haut. On retrouve notamment dans cette catégorie les rides (*ripples*) et les lits plans (*plane bed*). Les mésoformes sont, quant à elles, contrôlées par l'épaisseur de la couche limite ou bien la hauteur d'eau et ont des tailles plus importantes que les microformes (Tableau 1). On retrouve dans ce groupe les dunes, qui sont ubiquistes au sein des systèmes fluviaux sableux et sablo-graveleux. Enfin, les macroformes sont représentées par les barres et les alternances seuils-mouilles. Ce sont les seuls corps sédimentaires qui ne sont pas transverses au courant.

Cette première partie présente les différents modes de transport de sédiment impliqués dans la dynamique des formes du lit en système fluvial mais aussi les dunes subaquatiques et les barres sédimentaires, sujets clés de ce Projet de Fin d'Etudes.

I.1.1. LES MODES DE TRANSPORT DE SEDIMENT IMPLIQUES DANS LA MIGRATION DES CORPS SEDIMENTAIRES

Le transport de sédiment est divisé en trois catégories ; le transport en solution, le transport en suspension et enfin, le transport de fond (charriage) (Figure 1) (Univ-Lyon, 2017, Naqshand, 2014). Le mode de transport de sédiment dépend des caractéristiques des éléments (taille, forme, densité), des caractéristiques du fluide (vitesse, viscosité) et de l'écoulement (pente et profondeur) (Univ-Lyon, 2017).

La première catégorie (transport en solution) correspond à la charge dissoute (ions) et correspond aux grains de sédiments plus fins ($<0.062\text{mm}$) (Kostaschuk, 2005) que ceux trouvés dans le lit du cours d'eau (Einstein, 1950). Ils sont transportés complètement par suspension (Gomez, 1991).

Le transport en suspension et de fond représentent les flux solides. Les matériaux transportés par suspension se déplacent au sein de la colonne d'eau sans jamais toucher le fond du lit (Naqshband, 2014). Ils correspondent à des matériaux fins et de légère densité. Le charriage concerne la fraction

la plus grossière de matériaux du lit (Claude, 2012). Ces derniers peuvent se déplacer par saltation, roulement ou encore glissement.

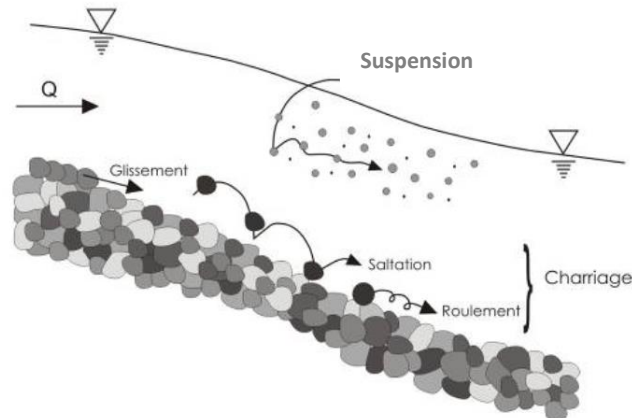


Figure 1 : Schéma des différents modes de transport des sédiments au sein d'un chenal (Univ-Lyon, 2017)

Le transport par suspension et le transport de fond dépendent des caractéristiques de l'écoulement telles que le débit, la vitesse du courant, ou encore la contrainte de cisaillement (Gomez, 1991). Ils ont un rôle clé au sein des rivières et affectent la morphologie des chenaux dont la morphologie des dunes (Kostaschuk, 2005) et des bancs alluviaux. Ces corps sédimentaires impactent, eux, en retour les taux de transport de sédiment (Hassan, 1992; Jerolmack et Mohrig, 2005). Par exemple, plus la rugosité du lit augmente, plus le transport de la charge de fond diminue (Hassan, 1992).

I.1.2. LES DUNES SUBAQUATIQUES, DYNAMIQUE ET MORPHOLOGIE

Les dunes subaquatiques, aussi appelées mégarides, font, d'après la définition de Jackson (1975), parties de mésoformes. Elles se forment pour des taux de transport de sédiment et des gammes de vitesses supérieures à celles des microformes et lorsque les grains de sédiment ont un diamètre supérieur à 0,1 mm (Rodrigues, *et al.*, 2016). Elles sont influencées par la partie turbulente de la couche pour des écoulements sous-critiques, c'est-à-dire, avec un nombre de Froude inférieur à 1 (Rodrigues, *et al.*, 2016).

MORPHOLOGIE GENERALE DES DUNES

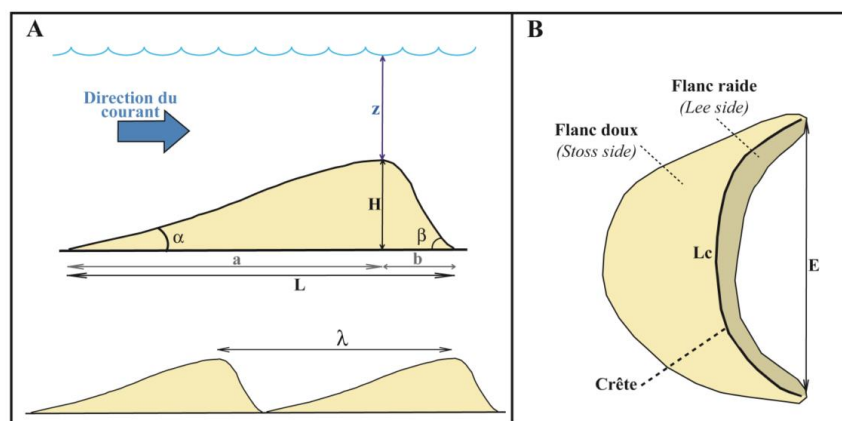


Figure 2 : Caractéristiques morphologiques des dunes. A – Dune vue en coupe verticale. B – Dune vue de dessus.
L et λ : Largeur et longueur d'onde de la dune. H : Amplitude. α et β : Angles du flanc doux et raide. a et b : Longueurs projetées des flancs doux et raide. z : Profondeur du sommet de la dune. Lc : Longueur réelle de la crête. E : Extension latérale de la crête. (Ferret, 2011)

Les dunes subaquatiques sont des structures transverses (Ferret, 2011). Elles peuvent exister de manière isolée ou s'articuler sous la forme de champ de dunes. Elles présentent une face d'érosion (ou flanc doux) à l'amont et une face de dépôt (aussi appelée face d'abris ou flanc raide) à l'aval (Figure 2). Le flanc raide est alors orienté dans la direction du courant majoritaire. Il est le siège d'avalanches sableuses qui permettent la migration de la dune (Ferret, 2011)

On les caractérise via leur largeur (L), leur longueur d'onde (λ), leur hauteur (H) ou encore leurs angles de pente (α et β) (Figure 2) (Ferret, 2011).

DIMENSION ET FORMATION DES DUNES

D'après Allen (1982) les dunes subaquatiques mesurent plus de 0,6 m de long et plus de 0,04 m de haut. Ces limites correspondent aux dimensions minimum des dunes. En effet, leur longueur d'onde peut varier entre quelques centimètres et plusieurs centaines de mètres et leur hauteur de crête entre 6 cm et plusieurs mètres. Il a cependant été démontré que la définition d'Allen (1982) est trop restrictive. D'une part, elle ne prend pas en compte les dunes embryonnaires (en formation) ou en déclin, qui sont de plus petite taille. D'autre part, la géométrie des dunes est proportionnelle à la profondeur d'eau du chenal, ainsi dans les eaux peu profondes, on peut retrouver des dunes avec des hauteurs inférieures à 0,04 m (Bridge, 2003).

La formation des dunes et leur forme sont régulées en premier lieu par la hauteur d'eau du chenal et, dans un second temps, par l'apport en sédiment. En effet, les hauteurs et longueurs des dunes augmentent généralement avec la profondeur d'eau. Par conséquent, leur dimensions varient dans l'espace et dans le temps au cours de leur durée de vie. Il a été démontré qu'en moyenne la hauteur des dunes vaut 1/6 de la profondeur d'eau (d) (Yalin, 1964).

$$(1) \quad d = 6H \text{ (Yalin, 1964)}$$

$$(2) \quad d = 11,6H^{0,84}$$

Avec $0,1 \text{ m} < d < 100 \text{ m}$ (Allen, 1970)

De plus, la hauteur des dunes (H) est également corrélée à leur longueur (L). Ashley (1990) a notamment proposé la relation ci-dessous.

$$(3) \quad H = 0,0677L^{0,8089} \text{ (Ashley, 1990)}$$

Le paramètre *steepness*, correspondant au rapport entre la hauteur de dune et sa longueur (H/L) est souvent utilisé pour caractériser les dunes et leur état d'équilibre. Lorsqu'il est inférieur à 0,06, les dunes sont considérées comme en recherche d'équilibre (Rodrigues, 2014).

Les avis divergent concernant la valeur des dunes à l'équilibre Van Rijn (1984) a proposé $L/H=7,3$ à partir d'expériences en laboratoire avec des nombres de Froude élevés. Julien et Klaassen (1995) ont, eux, proposé, à partir d'expériences en rivière naturelle et avec des nombres de Froude peu élevés que $L/H = 6,5$. Enfin, d'après Bridge, les dunes sont à équilibre lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 10.

Fredsøe (1981) et Van Rijn (1985) in (Kostaschuk et Best, 2005) ont trouvé que le paramètre *steepness* augmente jusqu'à une valeur critique de la contrainte de cisaillement, et diminue ensuite pour des contraintes plus grandes.

En réponse aux variations des conditions hydrauliques (périodes de crues par exemple) la géométrie et dynamique des dunes varient constamment. Cependant, ces dernières ne s'adaptent pas instantanément aux conditions hydrauliques mais après un temps de latence.

DUNES SYMETRIQUES ET ASYMETRIQUES

On distingue les dunes symétriques des dunes asymétriques (Figure 3). Les dunes symétriques ont des faces d'érosion et de dépôt de longueurs similaires, des pentes douces ($<14^\circ$) (Kostaschuk, 2005), des crêtes arrondies et une *steepness* faible. Les zones de séparation/décélération des écoulements sont intermittentes voir absentes. A l'inverse, les dunes asymétriques ont des faces d'érosion avec des pentes fortes ($>25^\circ$) (Kostaschuk, 2005) et des faces d'abris courtes et pentues avec des zones bien développées de séparation des flux et des *steepness* importantes (Kostaschuk, 2005). Elles peuvent également avoir des formes du lit superposées au niveau de leur zone d'érosion.

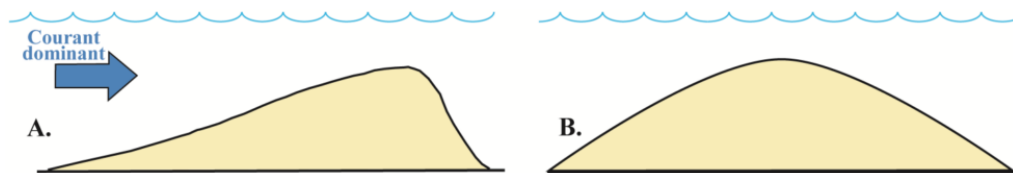


Figure 3 : A. Dune asymétrique ; B. Dune symétrique. (Ferret, 2011)

D'après Villard et Kostaschuk (1998), les dunes symétriques sont des formes en équilibre dans des conditions fortes de courant. Les dunes asymétriques seraient alors des transitions entre les dunes symétriques et les petites dunes superspoées. Elles sont en équilibre pour des vitesses de courant et des conditions de transport plus faibles.

DUNES 2D ET DUNES 3D

On distingue deux types de dunes, les dunes dites 2D et les dunes 3D. Les dunes 2D ont une stratification oblique planaire et ont une crête linéaire parallèle à l'écoulement (Figure 4) alors que les dunes 3D ont une stratification incurvée ou en auge (Figure 5). Pour une taille de sédiment donnée, les dunes 2D se forment à des vitesses de courant moins fortes que les dunes 3D (Ashley, 1990).

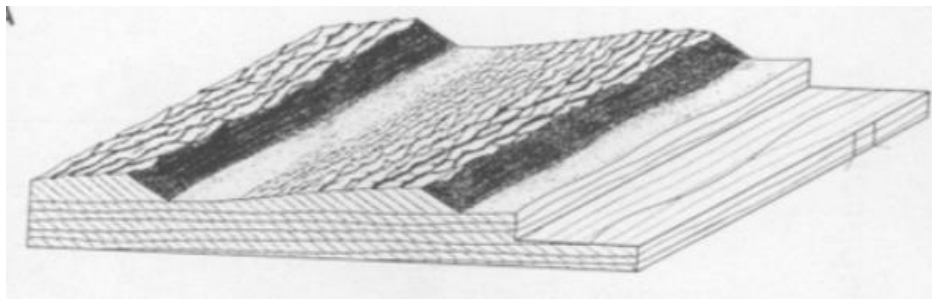


Figure 4 : Schéma d'une dune bidimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990)

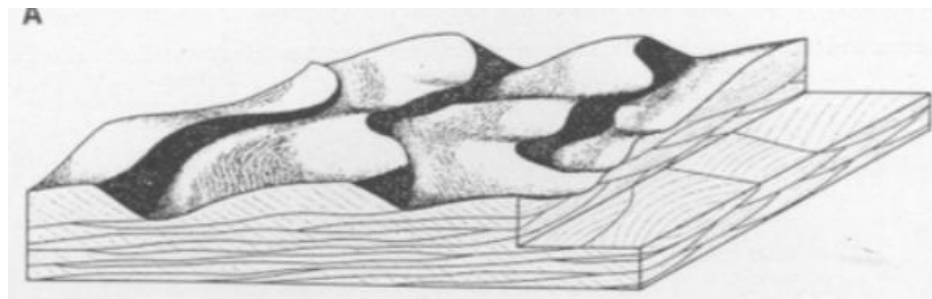


Figure 5 : Schéma d'une dune tridimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990)

MECANISMES DYNAMIQUES

Les mégarides migrent dans la direction du courant le plus fort. Leur vitesse de migration est variable, mais peut dépasser quelques dizaines de mètres par jour. Ce serait le charriage qui serait responsable de l'érosion continue et du dépôt de sédiment le long des dunes migratrices (Naqshband, 2014). Les phénomènes d'avalanche permettent, eux, l'évolution des dunes. En effet, les sédiments transportés jusqu'à la crête se déposent dans la partie supérieure de la face d'abris (Ferret, 2011). Par la suite, une partie de ces éléments peuvent glisser en bas de la pente d'abris. Ils participent ainsi à sa propagation (Berné *et al.*, 1989) *in* (Ferret, 2011). Enfin, des sédiments fins peuvent être remis en suspension lors de ce phénomène d'avalanche (Ferret, 2011).

Le taux de migration (c) des dunes est très variable. Il est en général compris entre 0,5 et 1 et dépend de taux de transport moyen de sédiment ainsi que de la hauteur de dune.

$$(4) \quad c = \frac{i_c}{H\varepsilon} = \frac{2i_m}{H\varepsilon}$$

Avec :

i_c : Transport volumétrique de sédiment moyen au niveau des crêtes des dunes

i_m : Transport volumétrique de sédiment moyen des dunes triangulaires

H : Hauteur moyenne de la dune

ε : Concentration moyenne en sédiment (1-porosité)

Etant donné que le taux de transport de sédiment dépend de la contrainte de cisaillement du lit et la hauteur de dune de la profondeur du chenal, la vitesse de migration des dunes augmente théoriquement avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement. Lorsque le transport de sédiment reste constant, la vitesse de migration des dunes diminue avec la hauteur de celles-ci. Ainsi, plus elle est épaisse, plus elle se déplace lentement. Cependant, cela n'est pas toujours le cas, puisque le transport de sédiment peut varier en fonction des conditions locales de dunes (Bridge, 2003).

IMPACTS DES DUNES SUR L'ÉCOULEMENT

Les dunes subaquatiques forment la principale source de rugosité du lit d'un cours d'eau. Via leurs morphologies, elles modifient les hauteurs d'eau, les écoulements, les profils de vitesses (Ferret, 2011) et par conséquent les processus d'érosion et de dépôt (Naqshband, 2014). La vitesse près du fond au niveau de la face d'érosion augmente dû à la diminution de la hauteur d'eau. À l'inverse, au niveau de la face d'abris, la vitesse de l'écoulement diminue (Ferret, 2011). La contrainte de cisaillement est donc plus importante au niveau de la face d'érosion ce qui résulte en une augmentation du transport sédimentaire vers la crête de dune. Les processus inverses s'appliquent au niveau de la face d'abris, ce qui peut générer un dépôt sédimentaire important (Ferret, 2011). Cette morphologie induit (pour les dunes asymétriques majoritairement), une séparation des écoulements (ou décélération) au niveau de la face de dépôt. L'intensité de ce phénomène dépend de la pente de cette dernière et crée des macro turbulences impactant le transport sédimentaire (Best, 2005) *in* (Ferret, 2011).

La formation des dunes a un effet rétroactif sur les écoulements et leur dynamique via l'augmentation de la résistance du lit (Rodrigues, 2014). Ce phénomène a été approximé par Van Rijn (1984) :

$$(5) \quad k_{dunes} = 1,1\gamma H(1 - e^{\frac{-25H}{\lambda}})$$

Avec γ : paramètre de forme des dunes
H : hauteur de dune
 λ : Longueur d'onde de dune

INTERACTIONS DUNES/DUNES ET FORMES DU LIT SUPERPOSEES

Les dunes exercent également des influences les unes sur les autres (Jerolmack et Mohrig, 2005). Les travaux de Jerolmack et Mohrig (2005) in situ et en laboratoire ont montré que ces formes du lit s'ajustent certes par apport aux conditions hydrauliques mais également vis-à-vis de leur concentration et de leur disposition les unes par rapport aux autres.

Il n'est aussi pas rare que des formes du lit secondaires (dunes ou rides) se développent sur le dos des dunes. Ces formes superposées permettent la croissance et le déclin des dunes en réponse aux changements de débit et de hauteur d'eau (Kleinhans, *et al.*, 2002). Elles modifient également la géométrie de la forme hôte, sa vitesse de migration et la séparation des écoulements qui en résulte. Enfin, elles impactent l'écoulement en augmentant la rugosité du lit (Van Rijn, 1994).

LES LITS PLANS DE HAUT NIVEAU ENERGETIQUE

Dans des conditions sous critiques ($F < 1$), lorsque la contrainte de cisaillement du lit et les taux de transport augmentent, les dunes et les rides sont transformées en lit plan de haut niveau énergétique (Bridge, 2003). Ces formes du lit ne sont pas complètement plates. On retrouve à leur surface des petites « vagues » (plus ou moins asymétriques) de quelques centimètres de haut (Bridge, 2003). Les ratios hauteur/longueur sont similaires à ceux des dunes, suggérant, que ces vaguelettes sont des dunes naissantes qui ne peuvent pas se développer (Bridge, 2003). Le transport de sédiment associé aux lits plans de haut niveau est remarquable et serait à l'origine de leur existence (Bridge, 2003).

I.1.3. LES BARRES SEDIMENTAIRES, DYNAMIQUE, MORPHOLOGIE ET NOMENCLATURE

Les barres sédimentaires, aussi appelées bancs alluviaux sont des formes du lit de plus grande taille que les dunes. Elles ont des longueurs du même ordre de grandeur que la largeur du chenal et des hauteurs comparables à la profondeur d'eau (Jackson, 1975). Leur hauteur est également liée à l'épaisseur de la couche limite (Rodrigues, 2014) qui dans le cas des rivières peu profondes, s'exprime sur l'ensemble de la colonne d'eau. A l'inverse des îles, les bancs alluviaux ne sont pas végétalisés et sont submergés au débit de plein bord (Bridge, 1993). Les barres sédimentaires peuvent cependant se transformer en île. Outre leur rôle dans la dynamique fluviale, elles servent de zone d'habitat, de reproduction ou encore d'abris pour de nombreuses espèces végétales et animales (Rodrigues *et al.*, 2016).

MORPHOLOGIE

Les bancs alluviaux consistent en une succession de trous d'érosion (*pool*) assez profond et de front de dépôt (*front bar*). Les front de barres sont diagonaux et ont des pentes assez raides (Crosato, 2015) (Figure 8). Les trous d'érosion sont présents à l'aval de chaque front et le long des berges du chenal (Figure 6). Elles sont suivies par des zones de radiers doux en aval. (Seminara et Tubino, 1989).

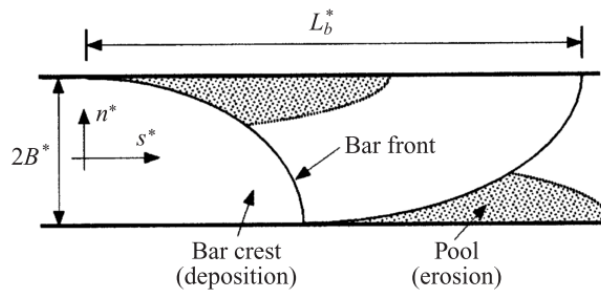


Figure 6 : Caractéristiques morphologiques des barres sédimentaires. L_b . Longueur de la barre. $2B$. largeur de la barre (Lanzoni et Tubino, 1999)

MIGRATION

La migration des barres s'effectue via des processus d'érosion au niveau des têtes de barres et le dépôt de sédiment au niveau de la queue de barre (Ashworth, *et al.* 2000). Les vitesses de migration des bancs alluviaux sont plus lentes que les vitesses moyennes d'écoulement et dépendent de l'hydrologie du chenal. Elles influencent la dynamique des écoulements, qui, par effet rétroactif impactent leur migration (Rodrigues, 2014). Ces vitesses peuvent atteindre plusieurs mètres par jour pendant les crues et décroissent considérablement pendant la décrue (Rodrigues *et al.*, 2015). Par exemple, Rodrigues *et al.*, (2015) ont mesuré une vitesse de migration maximale pour une barre alterne, au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France), de 6,6 m par jour. Quant à leur direction de migration, elle est régulée par la direction des berges et l'évolution longitudinale du ratio d'aspect (Rodrigues, *et al.*, 2016).

TYPES DE BARRES ET CLASSIFICATION

Une première classification, basée sur les processus hydrauliques et les forçages géométriques distingue les barres libres, également appelées barres migrantes, et les barres forcées dites barres non migrantes. Les barres migrantes correspondent à une déformation du lit, sans changement de direction des berges. Elles sont le résultat d'une instabilité morphodynamique causée par un écoulement sur un lit déformable (Tubino, 1991) *in* (Claude, 2012). A l'inverse, les barres forcées se développent suite à une discontinuité dans la géométrie du chenal (méandres, élargissement, seuil, épi, rétrécissement) ou bien suite à une perturbation de l'écoulement (seuils) qui engendre un dépôt préférentiel de sédiment (Claude, 2012). Elles génèrent une séparation de l'écoulement, et donc une perte d'énergie qui favorise le dépôt de sédiment. Il est possible que ces deux types de barres coexistent au sein d'un même chenal (Rodrigues, 2014).

La nomenclature des barres dépend de leur position dans le chenal et de critères sédimentaires. On distingue ainsi les barres unitaires et les barres composées (Bridge, 2003). Les barres unitaires correspondent plus ou moins aux barres libres et sont associées à des dépôts simples alors que les barres composées, qui correspondent plus ou moins à des barres forcées, résultent de la fusion de barres unitaires. Ces dernières sont plus pérennes (Rodrigues, 2014). Dans certains cas, on peut rencontrer des barres alternes, qui comme leur nom le définit, sont disposées en quinconce dans le chenal. Elles apparaissent la plus part du temps après des travaux d'aménagement fluviaux (endiguements, rectification du chenal, curage).

MODE DES BARRES SEDIMENTAIRES

Les barres sédimentaires peuvent avoir différentes configurations appelées modes de barre. Elle dépend du ratio d'aspect (Rodrigues *et al.*, 2016) qui correspond au rapport entre la largeur du chenal et sa profondeur moyenne.

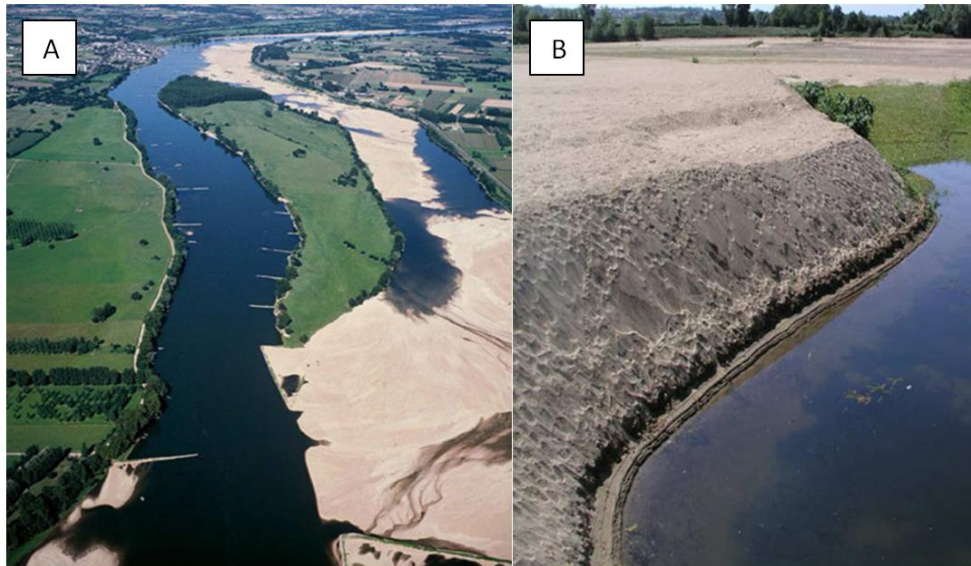


Figure 7 : A. Photographie arienne de barres alternées au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France). B. Zone de dépôt (*bar crest*) d'une barre alterne (1,5m de hauteur) pendant une période d'étiage au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France) (modifié d'après Rodrigues et al, 2015)

Un ratio d'aspect faible génère une configuration simple (de mode 1), correspondant aux barres alternées (Figure 8). Un ratio d'aspect plus important (chenal plus large et moins profond) est associé à un mode supérieur à 2 et à une configuration multiple. Cela génère des cours d'eau en tresse pour les barres libres et des cours d'eau méandriformes pour les barres forcées. Pour des valeurs intermédiaires (mode 2), des barres doubles se forment telles que les barres centrales (de mi-chenal). Les barres de mi-chenal sont des accumulations de sédiments qui ne sont pas rattachés aux berges du cours d'eau. Elles sont omniprésentes au sein des rivières en tresse (McIelland *et al.*, 1990). Enfin, une valeur inférieure au ratio d'aspect critique (chenal étroit et profond) empêche la formation de ces dernières, qui trop instables ne peuvent pas se développer.

Les dynamiques hydro-sédimentaires et la résistance des berges affectent le ratio d'aspect, génèrent des variations de largeur de chenal (Claude, 2012) et par conséquent influencent la configuration des barres. Ces dernières, en retour, modifient localement le tracé des berges, la forme en plan du cours d'eau (Claude, 2012) et donc le style fluvial de la rivière.

I.2. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Ce Projet de Fin d'Etudes a été divisé en deux parties. En effet, un état de l'art a été réalisé au premier semestre. Ce dernier avait pour but de comprendre les interactions entre les barres et les dunes subaquatiques en termes de résistance à l'écoulement, rehausse de la ligne d'eau et taux de transport solide mais également d'appréhender le rôle de la suspension dans la dynamique des barres sédimentaires et des dunes subaquatiques.

La seconde partie, réalisée au deuxième semestre et présentée ci-après, est plus appliquée. Cette dernière avait pour objectif de tester les hypothèses découlant de l'état de l'art concernant le rôle de suspension dans la dynamique des dunes subaquatiques. Ce rapport en est la synthèse.

RESUME DE L'ETAT DE L'ART

Pour commencer, l'état de l'art, réalisé au premier semestre a permis de mettre en avant diverses interactions entre les barres et les dunes. D'une part, l'amalgamation des dunes serait le mécanisme clé permettant le développement des barres sédimentaires. D'autre part, lorsque les dunes sont superposées sur les dos des barres sédimentaires, l'apport en sédiment et sa disponibilité seraient les variables qui gouvernent en premier lieu la taille des dunes. La hauteur d'eau devenant ainsi une variable secondaire. Ces variables auraient aussi le rôle de facteur limitant. Cependant les avis divergent quant à l'origine des sédiments utilisés par les dunes pour leur développement. Certains soutiennent que les dunes utilisent l'apport sédimentaire du chenal et d'autres concluent qu'elles croissent grâce aux sédiments préalablement stockés dans la barre hôte. Enfin, les études concernant les dunes et leurs impacts pendant les inondations sont récentes. En effet, elles augmentent la rugosité du lit, génèrent une résistance à l'écoulement et donc influencent la hauteur d'eau. Il se pourrait fortement que ces phénomènes soient amplifiés lorsqu'elles sont superposées. Pourtant, aucune étude, d'après cet état de l'art, ne s'intéresse pour l'instant aux effets sur la hauteur d'eau générés par les dunes superposées.

Ensuite ces recherches ont permis de mettre en avant que la suspension impacte la morphologie des barres sédimentaires. Elle a également des effets stabilisant et déstabilisant. Elle induirait notamment la suppression des barres alternes et favoriseraient le développement de modes plus haut, pour des valeurs de ratio d'aspect assez faibles

Enfin, concernant le rôle de la suspension sur la dynamique des dunes subaquatiques, il s'est avéré que le transport de sédiment affecte le profil des dunes et en particulier leur *steepness* et l'angle de leur pente d'abris. Lorsque le transport de sédiment par suspension est dominant, les sédiments sont déposés sur la face d'abris et dans le creux de dune. Par conséquent, la *steepness* de la dune et son angle de pente d'abris diminuent et les dunes sont plus symétriques. Ensuite, une contrainte de cisaillement importante peut causer une érosion de la crête et réduire la hauteur de dune. L'augmentation de la concentration en sédiments près du lit dans la zone de séparation/déclaration des écoulements peut supprimer les turbulences et diminuer également la hauteur de dune. Pour des intensités plus fortes de vitesse d'écoulement et charge en suspension, les dunes sont délavées et laissent place à des lits plans de haut niveau énergétique.

Lors de cette première partie, nous avons mis en avant que les dunes, sous toutes leurs formes, ont été largement étudiées. Moins d'intérêt a cependant été porté sur les barres sédimentaires et les effets de la suspension sur ces dernières. Les travaux sur interactions barres/dunes semblent également incomplets et peu nombreux. En effet, peu d'études s'intéressent exclusivement aux interactions barres/dunes. La plupart du temps, c'est l'étude de l'une ou de l'autre de ces formes du lit qui permet de mettre en avant une interaction. Pourtant l'impact des dunes et de celles superposées sur la hauteur d'eau est avéré. Les inondations sont de plus en plus fréquentes

aujourd'hui et s'amplifieront demain. Il est donc nécessaire d'intégrer l'impact de formes du lit dans la prévision et la prévention des inondations.

Enfin, une multitude de travaux s'intéressent aux dunes et aux effets de la suspension sur ces dernières. Les méthodes sont multiples (in situ, en canal artificiel, via des modèles numériques et mathématiques) et les résultats coïncident et se complètent. Cependant, les travaux in situ ont été réalisés en système sableux (fleuves Columbia, Fraser ou la rivière Jamuna) et non en système sablo-graveleux. Quant aux travaux en canaux artificiels, ils ont été majoritairement réalisés lorsque l'un des modes de transport de sédiment était largement majoritaire.

OBJECTIFS

La seconde partie de ce Projet de Fin d'études a donc pour objectif d'étudier les effets de la suspension in situ au sein d'un cours d'eau sablo-graveleux tel que la Loire et donc d'analyser davantage le rôle de la suspension sur la dynamique des mégarides.

L'objectif principale est donc de tester les hypothèses suivantes concernant les effets de la suspension sur la dynamique des dunes en systèmes sablo-graveleux :

- (1) Le transport en suspension, lorsqu'il est important modifie la morphologie des dunes notamment en diminuant leur *steepness* et l'angle de leur pente d'abris.
- (2) En présence de transport en suspension, les dunes sont plus symétriques.
- (3) Le transport en suspension impacte la vitesse de migration des dunes. Lorsque la part de sédiment transporté par suspension est importante, la vitesse de migration des dunes est diminuée.

D'après les travaux de Kostaschuk, 2005, on considèrera dans la suite de ce mémoire que la part de sédiments transportés par suspension (q_s) est importante par rapport aux transport de fond (q_b) lors que $3 < q_s/q_b < 7$ et majoritaire lorsque $q_s/q_b > 7$.

II. MATERIELS ET METHODES

Dans le cadre de ce mémoire nous étudierons les données récoltées en Loire moyenne à Saint-Mathurin-sur-Loire. Elles sont issues de trois campagnes de mesures réalisées en novembre 2016, mars et mai 2017. Nous disposons ainsi des données suivantes (Figure 8):

- La structure des écoulements sur plusieurs profils transversaux obtenus avec un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP)
- Le transport solide (TS)
 - o La partie charriée a été obtenue par *Bedload Transport Meter Arnhem* (BTMA)
 - o Le transport par suspension a été échantillonné avec une bouteille de prélèvement NISKIN
- L'évolution morphologique du lit a été suivie par ADP et échosondeur bathymétrique
- La morphologie des dunes a été obtenue par *Dune Tracking Method* (DTM).

Afin de vérifier nos hypothèses, les données ci-dessus ont été traitées avec XLstats notamment via une Analyse en Composantes Principales (ACP) et des corrélations linéaires.

Dans le cadre de cette étude nous travaillerons sur trois campagnes de 4 jours de mesures qui ont été réalisées du 28/11/16 au 01/12/16, du 27/03/17 au 30/03/17 et enfin du 15/05/17 au 18/05/17 (Figure 8). Ces dernières ont été réalisées en décrue (campagne 1) et en crue (campagne 2 et 3). Nous nous concentrerons sur les données issues de la verticale V1 (Figure 8).

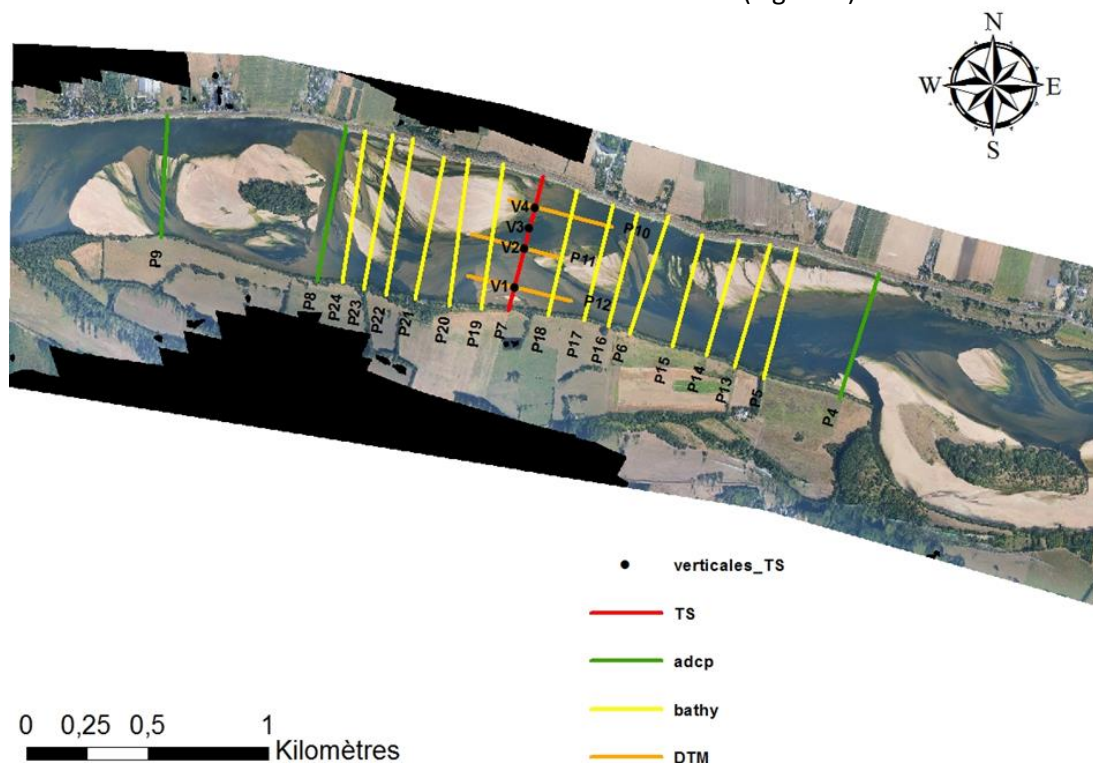


Figure 8 : Localisation des verticales et des différentes techniques de mesures utilisées (Le Guern)

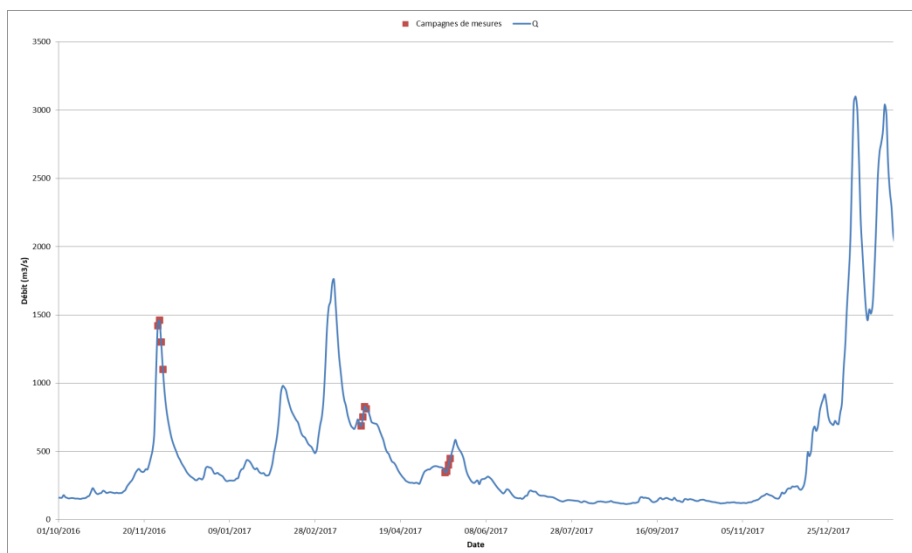


Figure 9 : Hydrogramme de la station de jaugeage à Saumur et localisation des campagnes de mesures réalisées.

II.1. LIEU D'ETUDES

La Loire est le plus long fleuve de France avec une longueur totale de 1020 km (Claude, 2012). Ce dernier a un bassin versant de 117000km². Le lieu d'études se situe en Loire aval, à proximité de Saint-Mathurin-sur-Loire (Maine-et-Loire), situé à environ 25 km au sud-est d'Angers.

II.2. MESURE DES PROFIL DE VITESSES ET DES DEBITS

La structure des écoulements a été caractérisée à l'aide d'un Acoustic Doppler Profiler (ADP), *Riversurveyor* M9 (Sontek) (Claude, 2012). Cet appareil permet de mesurer le profil vertical des vitesses 3D et d'obtenir ensuite le débit (Le Coz, Larrarte, et Sayssset, 2009). Des mesures ont été effectuées à 20%, 40%, 60%, et 80% de la profondeur totale ainsi qu'au niveau du fond. Cet outil dispose de « deux jeux de quatre faisceaux avec des fréquences distinctes » respectivement de 3MHz et 1MHz et également d'un échosondeur basse fréquence de 0,5MHz qui permet de déterminer la profondeur d'eau (Claude, 2012). Toutes les données relevées sont géoréférencées.

NB : Les ADP reposent sur le principe de l'effet Doppler. C'est-à-dire qu'une onde ultrasonore est émise et est ensuite réfléchi soit par le fond de la rivière soit par les particules en suspension dans l'eau. Elle revient donc ensuite au capteur avec une fréquence différente de celle émise au départ. La différence des fréquences dépend du vecteur de vitesse du diffuseur qui a réfléchi l'onde (Rousseau, Girard, et Barthelemy, 2009).

II.3. MESURE DU TRANSPORT SOLIDE

Les mesures du transport solide ont été réalisées sur un maillage couvrant un profil en travers sur lequel on a réalisé des verticales de mesures (CETMEF, 2011). Ces dernières sont disposées de façon à caractériser au mieux le transport solide de la section. Sur chaque vertical il a été réalisé :

- Des prélèvements au BTMA
- Des prélèvements à la bouteille de NISKIN

II.3.1. MESURE DU TRANSPORT PAR CHARRIAGE

Les mesures du transport par charriage ont été réalisées avec un BTMA (*Bedload Transport Meter Arnhem*) à partir d'un bateau (12m) sur 4 verticales (V1, V2, V3, V4) le long d'une section transversale du fleuve (Figure 8). Il a été réalisé à chaque fois, dans la mesure du possible, 10 répliques par jour. Le BTMA a une ouverture de 0,05m de haut et 0,085m de large (Figure 10). Les mailles du filet sont de 0,3 m (Claude, 2012).

Le BTMA permet de mesurer le transport par charriage. Cependant, il est fort probable que certains éléments, transportés par saltation soient pris en compte. Ce dernier est disposé au fond du lit, pendant un temps de mesure de 2 minutes et permet ainsi de piéger les sédiments au sein de l'appareil de mesure. Une fois que la durée de l'échantillonnage est terminée, il est remonté et vidé de son contenu. Le volume de sédiments piégé est ensuite quantifié (CETMEF, 2011). En connaissant le volume de sédiment piégés et la durée du piégeage, on peut ensuite déterminer le flux de sédiment charrié.



Figure 10 : Déploiement du BTMA et récupération de l'échantillon (CETMEF, 2011)

Tel que nous l'avons dit précédemment, le transport des sédiments s'effectue également via les formes du lit. C'est pourquoi le transport de fond et son intensité peut varier considérablement. Il est donc nécessaire d'effectuer plusieurs répliques de mesures sur chaque verticale (CETMEF, 2011).

Le taux de sédiments charriés estimé par le BTMA représente en général entre 30% et 50% du taux de transport réel (Eijkinkamps, 2003 in Claude, 2012). Ainsi, un facteur de calibration est appliqué afin de s'approcher au mieux de transport réel, via la formule suivante :

$$(6) \quad qb_{BTMA} = \rho_s \varepsilon \alpha V/b$$

Avec

qb_{BTMA} : transport de sédiment par charriage unitaire ($kg.s^{-1}.m^{-1}$)

ρ_s : masse volumétrique de sédiment ($2650 \text{ kg}.m^{-3}$)

ε : concentration en sédiment (1-porosité) $\sim 0,65$

α : facteur de piégeage (≈ 2)

V : volume de sédiment piégé sur une verticale (m^3)

b : largeur de l'ouverture de l'échantillonneur (ici, 0.085m)

La formule précédente (6) , permet d'estimer le débit solide unitaire. Il faut ensuite intégrer celui-ci sur toute la section afin de déterminer le débit solide total. Pour cela, on applique la formule suivante :

$$(7) \quad Qb_{BTMA} = \sum qbi \cdot Wi$$

Avec :

Qb_{BTMA} : débit solide total ($kg.s^{-1}$)

qbi : débit solide unitaire sur une verticale

Wi : largeur de la section



Figure 11 : Echantillonneur d'eau NISKIN (Maritech, 2017)

II.3.2. MESURE DU TRANSPORT PAR SUSPENSION

La bouteille NISKIN permet de mesurer les matières en suspension. C'est une bouteille à clapets à large ouverture (Ifremer, 2009). Elle peut être descendue à n'importe quelle profondeur souhaitée au sein de la colonne d'eau et est déclenchée avec un messenger (Martitech, 2017). Dans le cadre de ce projet, des prélèvements ont été réalisés en surface, au milieu de la colonne d'eau et au fond. Elle permet de prélever un volume d'eau donné et de quantifier par la suite les sédiments piégés. L'échantillon d'eau est ensuite filtré puis, le filtre est pesé avant et après séchage.

II.4. RELEVES BATHYMETRIQUES

Les relevés bathymétriques ont été réalisés selon des profils parallèles aux berges (Figure 8) via l'utilisation d'un mon faisceau tritech PA500. Le lit de la rivière est scanné avec des fauchées égales à trois fois la profondeur d'eau (Claude, 2012). Les données brutes ont été traitées ensuite avec le logiciel Hypack. « Les points bruts sont filtrés afin de supprimer les données statistiquement aberrantes et les points traités sont épurés » (Claude, 2012). Les mesures bathymétriques permettent de caractériser les évolutions journalières hydrauliques au cours de la journée de campagne.

II.5. DUNES TRACKING METHOD (DTM)

CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES DUNES

Le DTM (Dune Tracking Method) permet d'étudier la morphologie des formes du lit, leur vitesse de migration mais également le transport de fond associé (Claude, 2012). Plusieurs profils du lit longitudinaux sont donc réalisés successivement (Boiten, 2005). Afin d'avoir un taux de transport représentatif, de nombreux répliques sont nécessaires.

Cette technique permet de déterminer différents paramètres morphologiques des dunes tels que (Figure 12):

- Hauteur des dunes (H_{trotr} et H_{trto})
- Longueur des dunes (L_{tops} et $L_{throughs}$)
- Longueur de la face d'abris (L_{downs})
- Pente de la zone d'abris ($slope_l$)
- Longueur de la face d'érosion (L_{ups})
- Pente de la zone d'érosion ($slope_s$)
- Leur asymétrie ($asym$)
- La célérité des dunes (c), définie comme la distance parcourue par une dune entre deux sondages. Ce paramètre est obtenu divisant la distance parcourue par une dune entre deux levées bathymétriques consécutives, par l'intervalle de temps entre ces deux levées.

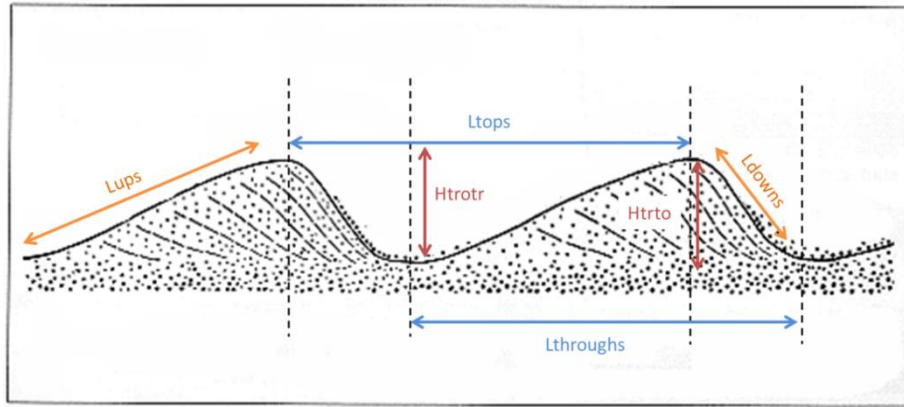


Figure 12 : Schéma des différents paramètres morphologiques déterminés par DTM (Dune Tracking Method)

Les pentes des faces d'érosion et d'abris sont calculées à partir des formules suivantes :

$$(8) \text{ slope}_s = \frac{H_{trto}}{L_{ups}}$$

$$(9) \text{ slope}_l = \frac{H_{trort}}{L_{downs}}$$

Avec :

Htrto : Hauteur entre la crête et le creux situé en aval

Htrort : Hauteur entre le creux et la crête en aval

L'asymétrie des dunes est calculée de la façon suivante :

$$(10) \text{ Asym} = \frac{L_{ups} - L_{downs}}{L_{ups} + L_{downs}}$$

Soit, lorsque

- Asym < 0 ; Lups < Ldowns
- Asym > 0 ; Lups > Ldowns
- Asym = 0 ; Lups = Ldowns ; dune symétrique

DETERMINATION DU TAUX DE TRANSPORT PAR CHARRIAGE ASSOCIE AUX DUNES

Le taux de transport par charriage, lié à la migration des formes du lit peut être quantifié en utilisant l'équation suivante (Villard and Church, 2003 in (Claude, 2012))

$$(11) qb_{DTM} = \rho_s \varepsilon \beta c H$$

Avec :

qb_{DTM} : Le taux de transport par charriage ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$) participant à la migration de la forme

c : Vitesse de migration de dune (m.s^{-1})

H: Hauteur de dune (m)

ρ_s : Masse volumique des sédiments (2650 kg.m^{-3})

ε : Concentration en sédiment (1-porosité)

β : Coefficient de charriage (ce dernier varie entre 0,46 et 0,56 en fonction de la forme des dunes). Le coefficient de charriage permet incorporer la fraction de sédiment qui est bypass  et qui ne contribue pas   la migration des formes de lit

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE CHARRIAGE

Le coefficient de charriage est égal à 0,5 lorsque celles-ci sont triangulaires (Gaeuman et Jacobson, 2007 in Claude, 2012). Il peut premièrement être calculé à partir de la formule suivante :

$$(12) \beta = 0,5F$$

Avec :

F : facteur de forme, qui est égal au rapport entre la section transversale d'une dune et celle d'une dune triangulaire de même longueur et hauteur (Wilbers, 2004) :

D'après Wilbers (2004), le coefficient de charriage peut être calculé de la façon suivante (Wilbers, 2004) :

$$(14) \beta = \frac{q_{bBTMA}}{Hc}$$

Avec :

H: hauteur de dune (m)

qbDTMA : taux de transport par charriage unitaire (m²/s) estimé par BTMA

c : taux de migration (m/s)

VITESSE DE CISAILLEMENT U^*

La vitesse de cisaillement d'un fluide est définie par la formule suivante (Pattison, 2011):

$$(15) u^* = \frac{\tau}{\rho}$$

Avec :

τ : contrainte de cisaillement (N.m⁻¹)

ρ : masse volumique de l'eau (1000kg.m⁻³)

Il existe également une relation entre la vitesse de l'écoulement dans la couche limite et la vitesse de cisaillement, soit (Pattison, 2011):

$$(16) u = \frac{u^*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Avec :

z_0 : *roughness length* (longueur de rugosité) (m)

K : constance de Von Karman (=0,04)

u : vitesse d'écoulement

CONTRAINTES DE CISAILLEMENT

La contrainte de cisaillement totale du lit τ (N.m⁻¹) est donnée par la formule suivante (Claude, 2012) :

$$(18) \tau = \rho u^*{}^2$$

ρ : masse volumique de l'eau (1000kg.m⁻³)

U^* : vitesse de cisaillement

II.6. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

L'Analyse en Composante Principale (ACP) est un outil statistique exploratoire qui permet de comparer un grand nombre de paramètres les uns avec les autres (xlstat, 2017) et de résumer facilement l'information. C'est une méthode d'analyse de données quantitatives multivariées.

Dans notre cas, cette analyse nous permet d'identifier quelles sont les variables qui sont corrélées et notamment quelles sont celles qui influent le plus sur la morphologie des dunes. Cependant, cette méthode ne permet pas de tester des hypothèses. C'est pourquoi nous l'utiliserons avant d'effectuer des régressions linéaires.

Cette méthode présente cependant des limites. En effet, l'Analyse en Composante Principale est une méthode de projection. Par conséquent, des informations peuvent être perdues ou erronées (xlstat, 2017). L'ACP sera réalisé avec le module XLSTAT implémenté dans EXCEL.

Les résultats de l'ACP sont rendus sous un graphique appelé « cercle des corrélations ». Ce dernier représente la projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions formé par les deux premiers facteurs (xlstat, 2017). On interprétera les résultats du graphique de la façon suivante (xlstat, 2017):

- Les variables proches les unes des autres (r proche de 1) sont significativement positivement corrélées
- Les variables symétriquement opposées sont significativement négativement corrélées (r proche de -1)
- Les variables orthogonales les unes par rapport aux autres sont significativement non corrélées.

Un second graphique permet de représenter des groupes d'individus sur une carte à deux dimensions. Dans le cadre de ce PFE, nous ne l'utiliserons pas.

III. RESULTATS

Les trois campagnes de mesures ont été réalisées dans des conditions hydrauliques et sédimentaires différentes. La campagne 1 a été réalisée pendant le décrue (Figure 9) et le transport par suspension était important voir majoritaire (Figure 13). Les deux autres campagnes ont été réalisées avant le pic de crue. Le transport en suspension y était majoritaire uniquement le dernier jour de la campagne 3.

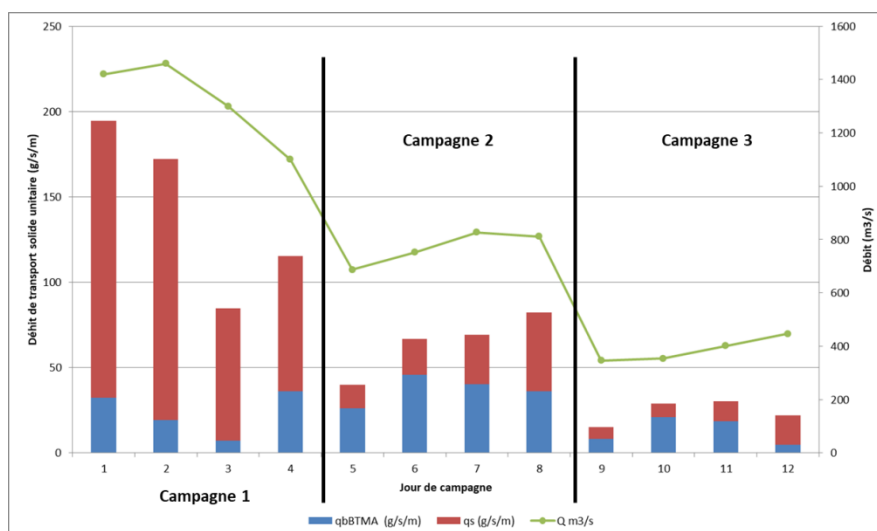


Figure 13 : Débit hydraulique, taux de transport de fond unitaire et taux de transport par suspension unitaire lors des trois campagnes de mesures. La campagne 1 s'est déroulée du 28 novembre 2016 au 01 décembre 2016, la campagne 2 s'est déroulée du 27 mars 2017 au 30 mars 2017 et enfin la campagne 3 s'est déroulée du 15 mai 2017 au 18 mai 2018

Rappel – Hypothèse 1 :

En système sablo-graveleux, le transport en suspension, lorsqu'il est important ($3 < q_s/q_b < 7$), modifie la morphologie des dunes notamment en diminuant leur steepness et leur pente d'abris.

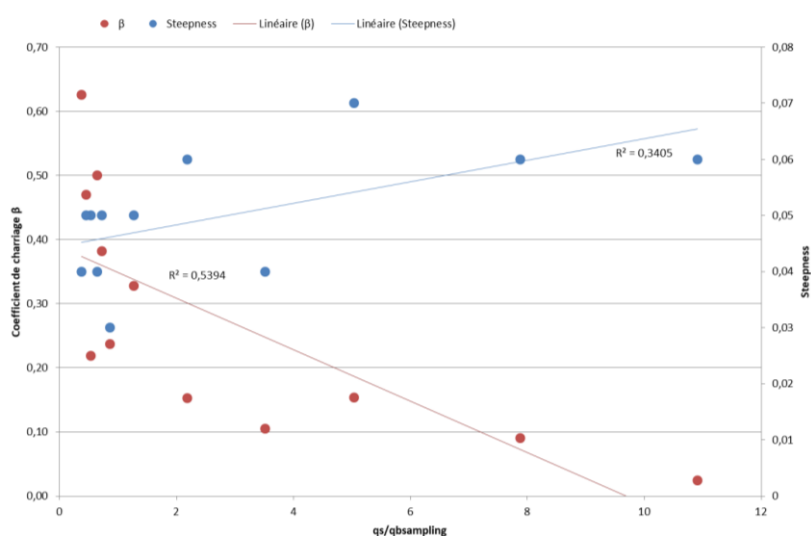


Figure 14 : Evolution de la morphologie des dunes (steepness et coefficient de charriage β) en fonction du type de transport majoritaire

Nos travaux ont permis de mettre en avant que l'augmentation du transport par suspension (q_s/q_b) explique, d'après ces données, 34% de l'augmentation de la *steepness* des dunes (Figure 14), qui s'explique par une augmentation de la hauteur des dunes plus importante que l'augmentation de leur longueur d'onde (Figure 16). Cependant, le rapport q_s/q_b explique 32% de la variation de la longueur d'onde et seulement 19% de la variation de la hauteur (Figure 16). C'est en effet davantage la profondeur d'eau et le débit qui explique la variation de hauteur des dunes. Ces paramètres expliquant respectivement 76% et 88% de la variation de la *steepness* (Figure 15).

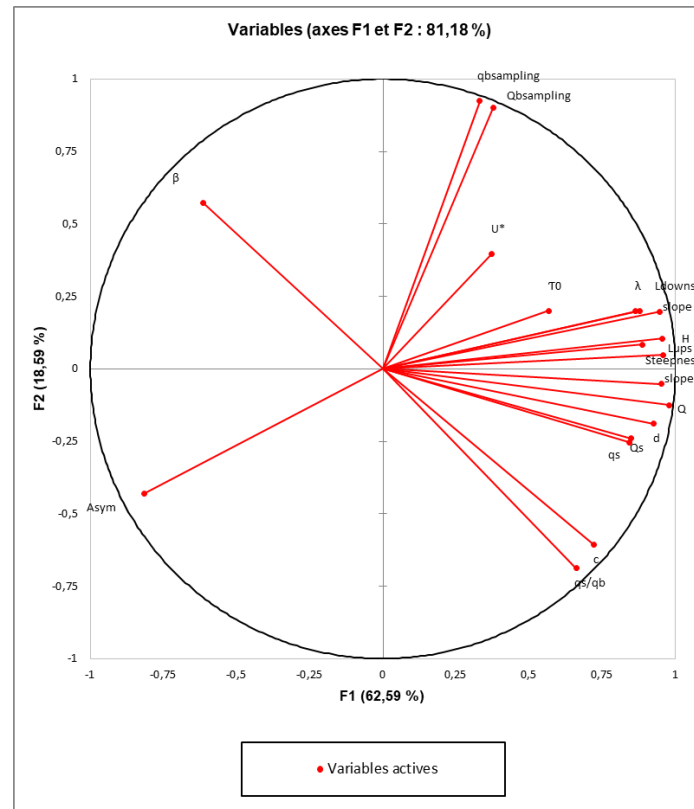


Figure 15 : Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

Concernant, le coefficient de charriage, β , celui-ci diminue avec l'augmentation du rapport q_s/q_b signifiant que moins de sédiments sont by-passés par les dunes. Les dunes formant un triangle parfait ($\beta=0.5$), se rencontrent lorsque le transport de fond est largement majoritaire, c'est-à-dire lorsque $q_s/q_b < 3$ (Figure 14).

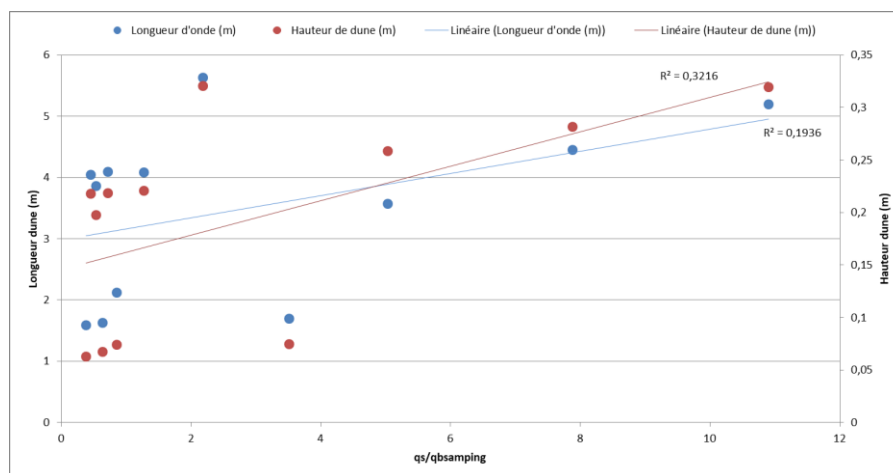


Figure 16 : Evolution de la hauteur et la longueur d'onde des dunes en fonction du type de transport

Lorsque le transport par suspension devient important et majoritaire, les pentes d'abris et d'érosion augmentent (Figure 17). Le transport par suspension a plus d'influence sur la face d'abris que sur la face d'érosion. En effet, le rapport qs/qb explique 44,78% de la variation de la pente d'abris et seulement 23,34% de la variation de la pente d'érosion.

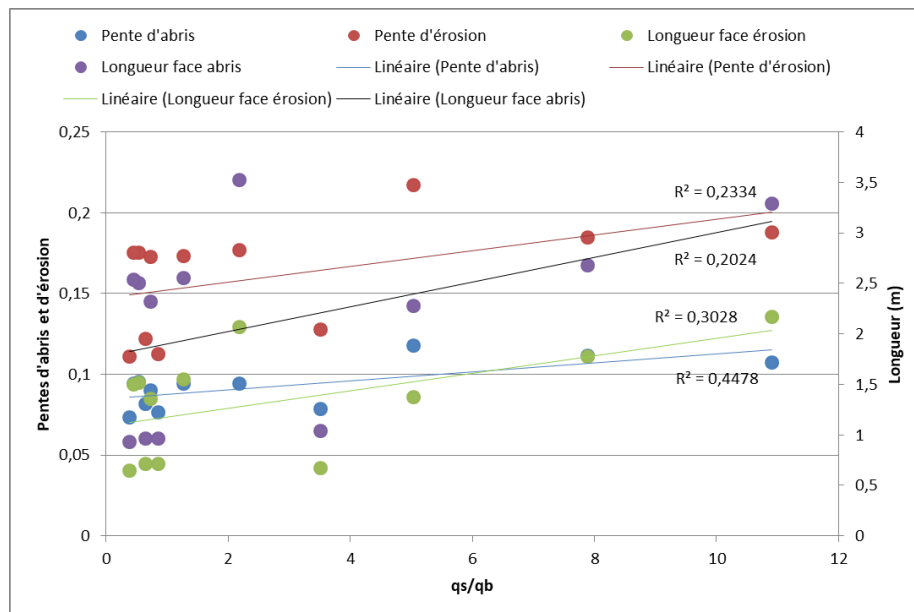


Figure 17 : Evolution des pentes d'abris et d'érosion en fonction du transport solide (rapport qs/qb)

Pour conclure, d'après les données exploitées ici, le transport par suspension en système sablo-graveleux, lorsqu'il est important, modifie la morphologie des dunes notamment en augmentant leur *steepness* et leur pente d'abris. Enfin, la morphologie des dunes ne dépend pas du transport de fond (Figure 15)

Rappel – Hypothèse 2 :

Le transport en suspension génère des dunes plus symétriques

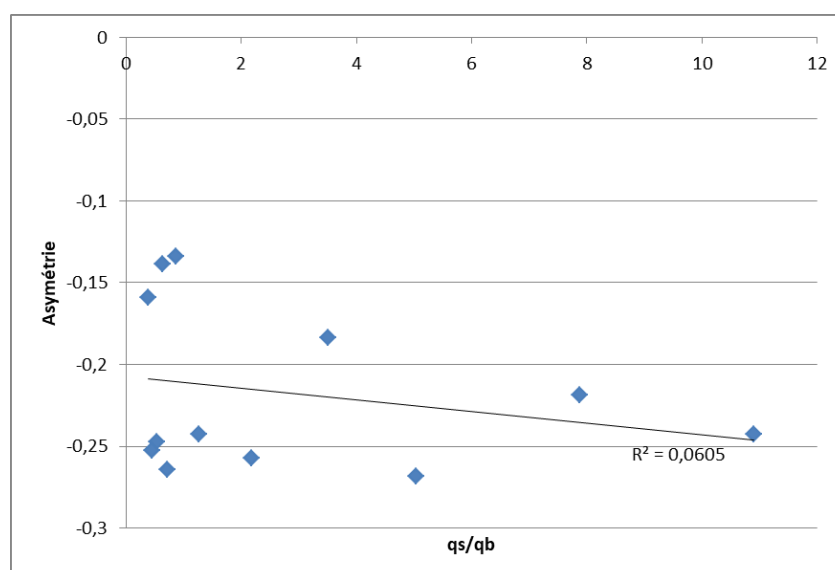


Figure 18 : Asymétrie des dunes en fonction du rapport qs/qb au cours des trois campagnes de mesures

D'après nos données, l'asymétrie des dunes n'est pas corrélée au rapport q_s/q_b . (Figure 18, Figure 15). Ce paramètre n'est corrélé significativement avec aucun autre paramètre (ACP, Figure 15).

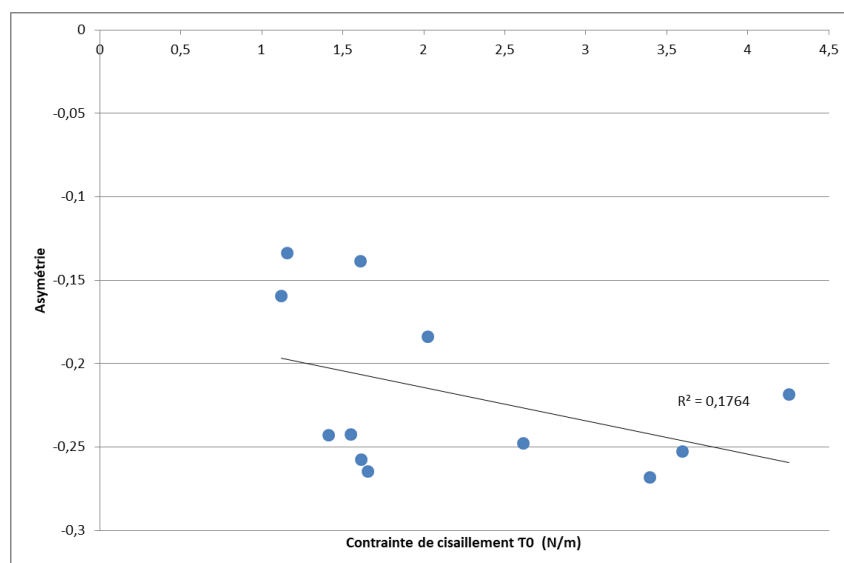


Figure 19 : Evolution de l'asymétrie des dunes en fonction de la contrainte de cisaillement

La contrainte de cisaillement explique 17,64% de la variation de l'asymétrie des dunes. Le coefficient de détermination reste faible, mais il semblerait que plus la contrainte de cisaillement est importante, moins les dunes sont symétriques.

Rappel – Hypothèse 3:

Le transport en suspension impacte la vitesse de migration des dunes. Lorsque la part de sédiment transporté par suspension est importante, la vitesse de migration des dunes augmente.

La deuxième hypothèse est, d'après nos données, vérifiée. Le rapport q_s/q_b explique 76,98% de la variation de la célérité des dunes (Figure 20). Ce paramètre augmente lorsque le transport par suspension augmente.

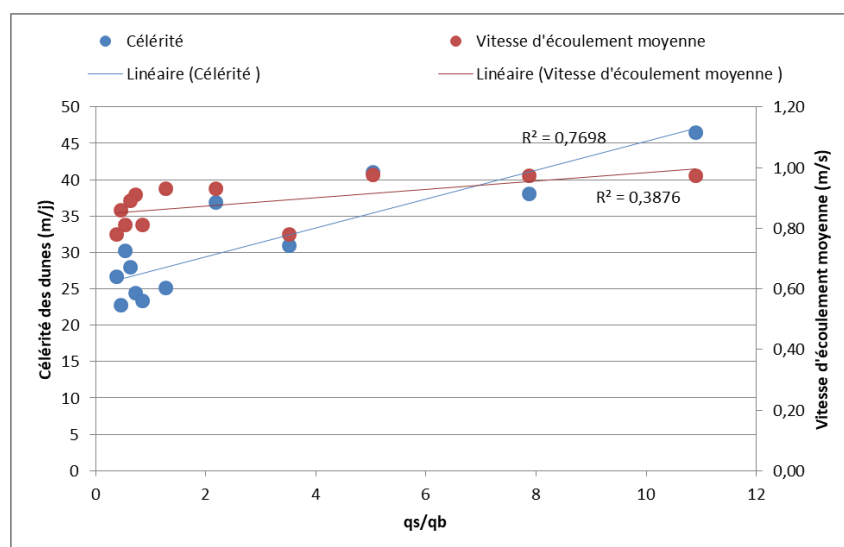


Figure 20 : Evolution de la célérité des dunes en fonction de la part de sédiments charriés et transportés par suspension

Finalement, les conclusions de Kostacshuk concernant les effets du transport en suspension sur la morphologie des dunes en système sableux ne sont pas vérifiées ici en système sablo-graveleux. Nous n'avons pas décelé une diminution la steepness et de la pente d'abris lorsque le transport en suspension est important. Il en est de même pour la symétrie des dunes. En effet, ces dernières semblent plus symétriques lorsque le transport par charriage est majoritaire. Seules les conclusions de Kostacshuk concernant la célérité des dunes sont vérifiées. D'après nos données, les dunes ont une vitesse de migration qui augmente lorsque le transport par suspension augmente également. Cependant, aucune des corrélations n'est significative d'un point de vue statistiques. Les conclusions sont uniquement des tendances générales visuelles.

IV. DISCUSSION

IV.1. APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE ET BASE DE DONNEES

Premièrement, il faut noter que je n'ai pas participé aux mesures in situ réalisées à Saint-Mathurin. La description du matériel et des méthodes utilisées, dans la partie III est donc inspirée majoritairement de la thèse de Nicolas Claude (2012). Ce dernier a effectué sa thèse sur les processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse (Loire) au sein de l'Université de Tours. Les méthodes et le matériel qu'il a utilisé est proche de celui qui a été utilisé lors des mesures in situ faites à Saint-Mathurin-sur-Loire. Cependant, il est tout de même possible que les techniques décrites ici ne correspondent pas totalement à ce qui a été réalisé.

Deuxièmement, ce Projet de Fin d'Etudes ne s'est intéressé qu'aux données issues de la verticale V1 (Figure 8) issues des trois premières campagnes de mesures. Ce qui correspond d'un point de vue statistiques à 12 observations par variable. Cette population reste faible pour effectuer des corrélations et des tests statistiques représentatifs de la réalité, d'autant plus que nous étudions ici, des processus naturels et in situ. Cela pourrait expliquer qu'aucun de nos résultats n'est significatif. De plus, le transport solide et la *steepness* des dunes (entre autres) suivent des hystérèses au cours des crues (Claude, 2012). « C'est-à-dire que pour un débit donné, les taux de transport solides sont différents avant et après le pic de crue » (Claude, 2012). Il existe donc plusieurs conditions sédimentaires possibles et plusieurs morphologies correspondantes pour un débit donné. Il est ainsi d'autant plus difficile d'avoir des corrélations linéaires parfaites et significatives. En outre, deux campagnes sur 3 ont été réalisées en crue et lorsque le transport par suspension n'était pas important. Etant donné notre jeu de données, peu fourni, cela a pu influencer fortement nos corrélations.

Les dunes s'adaptent morphologiquement aux conditions hydrauliques et sédimentaires de leur milieu après un temps de latence. Ce dernier a été estimé à 2-3 jours par Claude (2012) en Loire moyenne. Les campagnes de mesures ont été réalisées à chaque fois sur 4 jours consécutifs. C'est-à-dire que les dunes traquées les deux premiers jours de campagne correspondent à des conditions hydrauliques et sédimentaires antérieures à celle-ci. Cela pourrait expliquer nos faibles coefficients de corrélations puisque pour chaque campagne on pourrait associer réellement au maximum les morphologies des dunes des jours 3 et 4 aux caractéristiques hydrauliques et sédimentaires des jours 1 et 2, soit 50% des données au mieux. Il pourrait être donc nécessaire d'augmenter la durée des campagnes. Les campagnes de mesures demandent beaucoup d'organisation, de matériels et de moyens humains et il est compréhensible que cela n'est pas possible dans la plupart des cas.

De plus, le taux de transport par charriage participant à la migration de la forme (qb_{DTM}) estimé par *Dune Tracking Method* (DTM) n'a pas pu être estimé convenablement. En effet, il est calculé notamment à partir du coefficient de charriage (β) (Equation 11). Hors, le paramètre β est estimé lui, à partir du transport de fond estimé par BTMA (Equation 14). Ainsi, le transport de fond estimé par DTM équivaut plus ou moins au transport de fond estimé par BTMA. Seules la concentration en sédiments (ϵ) et la masse volumique de sédiment (ρ_s) sont incorporées. Un test t de Student a notamment confirmé qu'il n'y avait pas de différences statistiquement parlant ($p\text{-value} > 5\%$) entre les taux de transport de fond estimé par BTMA et DTM. C'est pourquoi nous n'avons utilisé qu'une seule de ces variables.

$$(11) qb_{DTM} = \rho_s \epsilon \beta c H$$

$$(14) \beta = \frac{qb_{BTMA}}{Hc}$$

Soit

$$(21) qb_{BTMA} = \beta Hc$$

Et donc

$$(22) qb_{BTMA} \approx qb_{DTM}$$

Il se peut également que les débits estimés par BTMA soient biaisés. Le charriage correspond au déplacement de sédiment sur le fond du lit de la rivière par glissement, roulement ou saltation. Dans notre cas, il est difficile de savoir si les estimations du transport de fond par le BTMA contiennent totalement, partiellement ou nullement la saltation. La part de saltation piégée pouvant d'autant plus changer d'une mesure à l'autre. Il est donc probable que les taux de transport soient surestimés ou sous-estimés. Cela impacte ainsi le rapport q_s/q_b . De plus, le coefficient de charriage est calculé à partir des taux de transport de fond estimé par BTMA. Ce dernier peut donc être également biaisé et non représentatif de la réalité.

Concernant le transport par suspension, nous avons utilisé ici des taux de transport calculés sur l'ensemble de la colonne d'eau. Les dunes subaquatiques sont davantage influencées par le transport par suspension présent près du lit. Il serait donc intéressant d'étudier uniquement ce paramètre. En effet, ce n'est pas parce que le transport par suspension est plus important que le transport de fond sur l'ensemble de la colonne d'eau que cela est le cas au niveau du lit.

L'ADP présente également quelques limites. En effet celui-ci ne peut pas effectuer des mesures sur l'ensemble de la colonne d'eau. Ces limites sont appelées « zones mortes ». Elles correspondent aux premiers centimètres de la surface (60-70cm), au fond (à partir de 40 cm du fond) et sur les rives de la rivière (ense3, 2017).

Enfin, l'ensemble de cette études s'est basée sur le rapport q_s/q_b défini par Kostaschuk (2005) en rivière sableuse. Pour rappel, celui-ci avait déterminé que le transport en suspension était important lorsque $3 < q_s/q_b < 7$ et majoritaire lorsque $q_s/q_b > 7$. Ces rapports sont finalement à prendre avec précautions. D'une part ses travaux ont été réalisés à partir de données provenant de divers cours d'eau (Fraser, Rhin, Paraná) présentant des conditions hydrauliques et sédimentaires qui leurs sont propres et qui sont issues de divers articles et auteurs. Ainsi, les techniques de mesures utilisées sont différentes et des erreurs de mesures ou de modélisations peuvent être présentes. D'autre part, Kostaschuk (2005) a travaillé en rivière sableuse. Nous étudions ici, la Loire, qui est une rivière sablo-graveleuse. Les processus sédimentaires sont donc différents et le transport en suspension pourrait être déterminé comme important ou majoritaire pour des rapports q_s/q_b différents.

IV.2. TRANSPORT EN SUSPENSION ET MORPHOLOGIE DES DUNES

Tout d'abord, dans cette partie nous avons utilisé la *steepness* des dunes et le coefficient de charriage β afin de caractériser la morphologie des dunes. Bien que la *steepness* d'une dune soit un paramètre parlant morphologiquement et visuellement il n'en est pas de même pour le coefficient de charriage. En effet, on sait qu'un coefficient de charriage de 0,5 correspond à des dunes triangulaires parfaites (formant un triangle équilatéral en coupe longitudinale). Il est cependant beaucoup plus difficile de savoir qu'elle est la morphologie d'une dune ayant par exemple un coefficient de charriage de 0,2 ou de 0,7. L'utilisation de ce paramètre n'est donc pas idéale. De plus, ce dernier est calculé à partir du taux de transport de fond déterminé par BTMA. Ce taux, comme expliqué précédemment pouvait être biaisé. Enfin, aucun auteur ne semble s'entendre sur les valeurs moyenne de ce coefficient (Claude, 2012; Frings et Kleinhans 2008; Van der Berg, 1987; Villard et Church, 2003).

Deuxièmement, d'après nos données, l'augmentation du transport en suspension modifie effectivement la morphologie des dunes. Bien que nos coefficients de détermination soient faibles et nos corrélations non significatives, la tendance générale montre une augmentation de la *steepness* (hauteur et longueur) en fonction du rapport q_s/q_b . Cela est contradictoire avec les conclusions tirées par Kostaschuk (2005) démontrant qu'un taux important de transport par suspension générerait une diminution de la *steepness* des dunes notamment via l'augmentation de la longueur d'onde des dunes. Dans notre cas, ce paramètre augmente également mais de façon moins importante que la hauteur des dunes. C'est pourquoi nous avons une *steepness* qui croît.

En effet, pour rappel, de nombreux auteurs ont démontré qu'en système sableux, lorsque le transport en suspension est important, les sédiments sont déposés dans le creux de dune. Cela a pour effet d'augmenter la longueur de la face d'abris mais également de diminuer sa pente (Johns *et al.*, 1990). Ici, nous avons cependant trouvé que l'angle de la pente d'abris augmente également. On peut supposer que contrairement en système sableux, moins de grains sont by-passés, notamment à cause de leur taille plus importante et continuent de tomber par avalanche et maintiennent une pente d'abris forte.

L'augmentation de la hauteur de dune peut être expliquée premièrement par les travaux de Johns *et al.* (1990). Ces derniers ont démontré mathématiquement en système sableux, que le transport en suspension, lorsqu'il est majoritaire, affute et rehausse la crête de dune. En effet, il est nécessaire de rappeler qu'une charge importante de sédiment en suspension, seule, n'induit pas un aplatissement des dunes. C'est cette dernière, couplée à une contrainte de cisaillement importante qui génèreraient en plus, une diminution de la hauteur de crête de dune (Kostaschuk, 2005). On peut donc supposer qu'ici que les vitesses d'écoulement et/ou la contrainte de cisaillement n'étaient pas assez importante pour générer un aplatissement de la crête de dune. D'autant plus qu'en système sablo-graveleux certaines particules ont des tailles et des densités plus importantes. Par conséquent la vitesse du courant minimum permettant de transporter la partie graveleuse (grains de plus de 2mm de diamètre) doit être plus importante. La part graveleuse pourrait amoindrir les effets de la suspension sur les dunes subaquatiques.

Deuxièmement, d'après Kostaschuk (2005), une augmentation de la *steepness* peut aussi refléter une augmentation de la profondeur du creux dans la zone de séparation/décélération des écoulements et/ou une augmentation associée de la hauteur de dune et de l'angle de la face d'abris quand la contrainte de cisaillement est forte. Ce phénomène apparaîtrait en système sableux uniquement quand la suspension est largement majoritaire. Ce qui était le cas lors de la première campagne. On peut supposer que nos données ne représentent pas assez l'ensemble des conditions sédimentaires et notamment lorsque le transport en suspension est seulement important et non majoritaire. Il nous manquerait donc une étape. Il est cependant difficile de savoir à partir de quel seuil, on peut considérer qu'une contrainte de cisaillement est qualifiée de « forte ». Dans notre cas, la contrainte de cisaillement explique 43% de la variation de l'angle de la face d'abris (Annexe 1).

Enfin, on peut également émettre l'hypothèse que les effets de la suspension sont amoindris par les conditions hydrauliques. Il est important de rappeler que la forme des dunes est régulée dans un premier temps, par la hauteur d'eau et dans un second temps par l'apport sédimentaire du chenal. Ainsi, l'augmentation de la *steepness* visualisée sur nos données peut aussi être due aux modifications des conditions d'écoulement. L'impact de la suspension passant donc au second plan. Dans notre cas, la profondeur d'eau explique 76% de la variation de la *steepness*. Ce paramètre expliquant d'avantage la variation de la *steepness* que le rapport q_s/q_b .

Enfin, la première campagne de mesure a été réalisée lors de la décrue. D'après Claude (2012) « le temps de latence entre la variation du débit et la taille des dunes se traduit généralement par une croissance au cours de la décrue de leur *steepness* [...] » On peut donc supposer que l'augmentation de la *steepness* observée ici, traduit ce phénomène. L'augmentation de la *steepness* de dunes génère

une augmentation de la rugosité hydraulique qui se résulte en une diminution de l'énergie disponible pour le transport des particules. On peut donc émettre l'hypothèse que dans ce cas-ci la contrainte de cisaillement étant réduite, les dunes crêtes de dunes ne peuvent pas réduite.

Le fait que l'augmentation du transport par suspension ne génère pas des plus symétriques, comme démontré par de nombreux auteurs donc Kostaschuk (2005) peut s'expliquer par les mêmes raisons explicitées ci-dessous concernant la *steepness* des dunes. Les paramètres morphologiques des dunes étant tous corrélés les uns aux autres (Figure 15).

IV.3. TRANSPORT EN SUSPENSION ET CELERITE DES DUNES

D'après nos données, la vitesse de migration des dunes augmente lorsque le transport par suspension augmente également. Malgré l'insuffisance de nos données, le coefficient de détermination reste malgré tout correct (0,7707) même si ne permet pas de mettre en évidence une corrélation positive significative entre la célérité des dunes et le rapport q_s/q_b . Ces résultats sont tout de même, dans leur ensemble en concordance avec les conclusions tirées par Johns *et al.* (1990) de leurs modèles mathématiques en système sableux. Ces derniers suggèrent que pour des vitesses d'écoulements modérées que les vitesses de migration des dunes sont plus importantes lorsque les sédiments sont transportés majoritairement par suspension que lorsqu'ils sont transportés par charriage. On peut tout de même se demander ce que « vitesses modérées » signifie dans la réalité. Dans notre cas ici, les vitesses d'écoulement varient entre 0,78m/s et 0,98 m/s.

Il est également possible que la célérité des dunes uniquement car les vitesses d'écoulement le sont également (Bridge, 2003). Des vitesses d'écoulement plus importantes générant un transport en suspension plus important.

On pourrait donc supposer que malgré la présence probable d'erreurs de mesures ou de calculs, nos données et nos résultats reflètent tout de même la réalité. A l'inverse, on ne peut pas considérer cela comme une preuve irréfutable.

CONCLUSION

L'objectif principal de cette deuxième partie de mon Projet de Fin d'Etudes était d'étudier les effets de la suspension sur les dunes subaquatiques, in situ et en système sablo-graveleux. Nos hypothèses, basées sur ce qui a été observé en système sableux, étaient les suivantes :

- (1) Le transport en suspension, lorsqu'il est important modifie la morphologie des dunes notamment en diminuant leur *steepness* et l'angle de leur pente d'abris.
- (2) En présence de transport en suspension, les dunes sont plus symétriques.
- (3) Le transport en suspension impacte la vitesse de migration des dunes. Lorsque la part de sédiment transporté par suspension est importante, la vitesse de migration des dunes est diminuée.

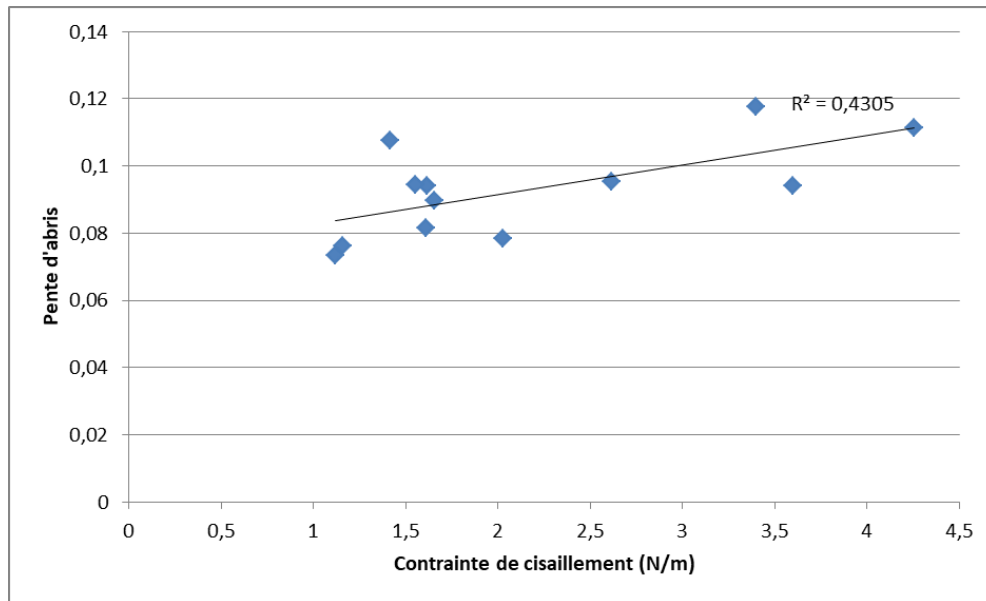
Nos résultats ont mis en évidence, entre autres, une augmentation de la *steepness* et de la pente d'abris des dunes lorsque le transport par suspension était important et majoritaire. Les dunes n'étant pas pour autant plus symétriques. Seule l'hypothèse 3 est en concordance avec ce que nous avons observé. D'après nos données, il y a en effet une diminution de la vitesse de migration des dunes lorsque le transport en suspension augmente.

Le nombre de données traitées ici semblent insuffisant pour représenter au mieux la réalité et une large gamme de conditions hydrauliques et sédimentaires. En effet, nous disposons uniquement de 12 observations par variables. De plus, les campagnes de mesures ont été réalisées sur 4 jours à chaque fois. Les dunes s'adaptent morphologiquement aux conditions du milieu après un temps de latence estimé entre 2 et 3 jours en Loire moyenne. Il pourrait donc être judicieux d'augmenter la durée des campagnes des mesures. Enfin, il existe quelques incertitudes sur la qualité des données notamment les mesures du transport solide au BTMA qui peuvent être biaisées avec la saltation ou encore concernant le coefficient de charriage des dunes. Enfin, l'ensemble ce mémoire s'est basé sur des faits observés et étudiés en système sableux, à défaut de travaux réalisés en système sablo-graveleux. Cela pourrait expliquer en plus, pourquoi nos observations diffèrent de celles faites en systèmes sableux. En effet, les deux systèmes présentent une granulométrie et des processus sédimentaires différents.

In situ et en système sablo-graveleux, les processus régulant la morphologie des dunes et les effets du transport en suspension sur ces dernières semblent beaucoup plus complexes. Premièrement, il se pourrait que la charge graveleuse et donc le transport de fond en système sablo-graveleux amoindrisse les effets de la suspension sur les formes du lit. Par exemple, la densité des grains étant plus importante, il faut plus d'énergie pour les déplacer et aplatir les crêtes de dunes. La charge graveleuse permettrait de maintenir les crêtes et dunes et réduirait le dépôt au sein de leur creux. Deuxièmement, il est également fort probable que les conditions hydrauliques (profondeur d'eau et débit notamment) influencent davantage la morphologie des dunes. Les effets de la suspension sur ces dernières passant au second plan. D'où la complexité des études in situ ayant des conditions hydrauliques très changeantes. Enfin, il est également probable que les dunes étudiées ici soient superposées sur des barres sédimentaires. Cette association pouvant également influencer la morphologie des dunes mais aussi l'apport et la disponibilité en sédiment.

Finalement, les processus régissant la morphologie des dunes en système sablo-graveleux semblent complexes et impliquent de nombreux paramètres. Il est donc important d'avoir un jeu de données complet et représentant de multiples conditions hydrauliques et sédimentaires. Il semblerait malgré tout que les effets de la suspension soient différents en système sablo-graveleux qu'en système sableux. Cet aspect est toujours à étudier et de nombreux processus restent encore inexpliqués.

ANNEXES



Annexe 1 : Evolution de le pente de la face d'abris en fonction de la contrainte de cisaillement

Date	qbsampling (g/m/s)	Qbsampling (kg/s)	qs (g/m/s)	Qs (kg/s)	qs/qb	H (m)	c (m/s)	β	Q (m³/s)	d (m)	λ	Steepness	T ₀ (mm)	U*	lups (m)	ldowns (m)	slope l (m)	slope s (m)	Asym
28/11/2016	32,23	5293,16	162,31	26654,78	5,04	0,26	0,00	0,15	1420,00	3,00	3,57	0,07	3,40	4,70	1,37	2,27	0,12	0,22	-0,27
29/11/2016	19,37	3192,89	152,70	25166,93	7,88	0,28	0,00	0,09	1460,00	3,20	4,45	0,06	4,26	6,03	1,78	2,68	0,11	0,18	-0,22
30/11/2016	7,12	1172,07	77,69	12782,00	10,91	0,32	0,00	0,02	1300,00	3,30	5,20	0,06	1,42	3,13	2,17	3,29	0,11	0,19	-0,24
01/12/2016	36,25	5953,98	79,10	12990,30	2,18	0,32	0,00	0,15	1100,00	2,70	5,63	0,06	1,62	4,00	2,07	3,52	0,09	0,18	-0,26
27/03/2017	26,04	3987,21	14,00	2132,45	0,54	0,20	0,00	0,22	687,00	1,30	3,86	0,05	2,62	5,11	1,51	2,50	0,10	0,18	-0,25
28/03/2017	45,90	7026,66	21,00	3174,83	0,46	0,22	0,00	0,47	752,00	1,60	4,04	0,05	3,60	6,00	1,50	2,54	0,09	0,18	-0,25
29/03/2017	40,19	6152,50	29,00	4502,76	0,72	0,22	0,00	0,38	827,00	1,80	4,10	0,05	1,65	4,07	1,36	2,32	0,09	0,17	-0,26
30/03/2017	36,14	5513,50	46,00	6949,30	1,27	0,22	0,00	0,33	812,00	2,70	4,08	0,05	1,55	3,94	1,55	2,56	0,09	0,17	-0,24
15/05/2017	8,15	1243,62	7,00	1119,99	0,86	0,07	0,00	0,24	346,00	0,90	2,11	0,03	1,16	3,40	0,72	0,97	0,08	0,11	-0,13
16/05/2017	20,93	3192,76	7,94	1362,43	0,38	0,06	0,00	0,63	354,00	1,10	1,59	0,04	1,12	3,35	0,65	0,93	0,07	0,11	-0,16
17/05/2017	18,51	2824,75	11,83	2030,20	0,64	0,07	0,00	0,50	401,00	1,00	1,62	0,04	1,61	4,01	0,72	0,96	0,08	0,12	-0,14
18/05/2017	4,86	740,98	17,06	2929,30	3,51	0,07	0,00	0,11	447,00	1,30	1,70	0,04	2,03	4,50	0,67	1,03	0,08	0,13	-0,18

Annexe 2 : jeu de donnée utilisé

INDEX

Asym : Asymétrie des dunes
b : Largeur de l'ouverture de l'échantillonneur
c : Vitesse de migration de dune
Cb : Concentration moyenne en sédiment (1-porosité)
d : Profondeur d'eau
F : Facteur de forme
g : Constante gravitationnelle
H : Hauteur moyenne de la dune
Htrort : Hauteur entre le creux et la crête en aval
Htrto : Hauteur entre la crête et le creux situé en aval
ic : Transport volumétrique de sédiment moyen au niveau des crêtes des dunes
im : Transport volumétrique de sédiment moyen des dunes triangulaires
K : Constance de Von Karman
L : Longueur de dune
Ldowns : Longueur de la face d'abris
Lups : Longueur de la face d'érosion
Qb : Débit solide total
qbDTM : Taux de transport par charriage participant à la migration de la forme estimé par DTM
qbDTMA : Taux de transport par charriage unitaire estimé par BTMA
qbi : Débit solide unitaire sur une verticale
qbSampling : Transport de sédiment par charriage unitaire
S : Gradient d'énergie ou pente de la ligne d'eau
Slope_l : Pente de la zone d'abris
Slope_s : Pente de la zone d'érosion
u : Vitesse d'écoulement
U* : Vitesse de cisaillement
V : Volume de sédiment piégé sur une verticale
Vd : Volume de la dune
Wi : Largeur de la section
Z0 : Roughness length (longueur de rugosité)
 α : Facteur de piégeage
 β : Coefficient de charriage
 γ : Paramètre de forme des dunes
 ε : Concentration en sédiment (1-porosité)
 λ : Longueur d'onde de dune
 ρ_s : Masse volumétrique de sédiment
 ρ : Masse volumique de l'eau
 τ : Contrainte de cisaillement
 τ' : Contrainte de cisaillement de grain
 τ'' : Contrainte de cisaillement associée aux formes du lit

TABLE DES FIGURES

Figure 2 : Schéma des différents modes de transport des sédiments au sein d'un chenal (Univ-Lyon, 2017).....	5
Figure 3 : Caractéristiques morphologiques des dunes. A – Dune vue en coupe verticale. B – Dune vue de dessus.....	5
Figure 4 : A. Dune asymétrique ; B. Dune symétrique. (Ferret, 2011).....	7
Figure 5 : Schéma d'une dune bidimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990).....	7
Figure 6 : Schéma d'une dune tridimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990).....	7
Figure 7 : Caractéristiques morphologiques des barres sédimentaires. Lb. Longueur de la barre. 2B. largeur de la barre (Lanzoni et Tubino, 1999).....	10
Figure 8 : A. Photographie arienne de barres alternes au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France). B. Zone de dépôt (<i>bar crest</i>) d'une barre alterne (1,5m de hauteur) pendant une période d'étiage au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France) (modifié d'après Rodrigues et al, 2015).....	11
Figure 8 : Localisation des verticales et de différentes techniques de mesures utilisées (Le Guern)...	14
Figure 9 : Hydrogramme de la station de jaugeage à Saumur et localisation des campagnes de mesures réalisées.....	15
Figure 10 : Déploiement du BTMA et récupération de l'échantillon (CETMEF, 2011).....	16
Figure 11 : Echantillonneur d'eau NISKIN (Maritech ,2017)	17
Figure 12 : Schéma des différents paramètres morphologiques déterminés par DTM (Dune Ttracking Method).....	18
Figure 13 : Débit hydraulique, taux de transport de fond unitaire et taux de transport par suspension unitaire lors des trois campagnes de mesures. La campagne 1 s'est déroulée du 28 novembre 2016 au 01 décembre 2016, la campagne 2 s'est déroulée du 27 mars 2017 au 30 mars 2017 et enfin la campagne 3 s'est déroulée du 15 mai 2017 au 18 mai 2018.....	21
Figure 14 : Evolution de la morphologie des dunes (<i>steepness</i> et coefficient de charriage β) en fonction du type de transport majoritaire	21
Figure 15 : Résultats de l'Analyse en Composantes Principales	22
Figure 16 : Evolution de la hauteur et la longueur d'onde des dunes en fonction du type de transport	22
Figure 19 : Evolution des pentes d'abris et d'érosion en fonction du transport solide (rapport q_s/q_b)	23
Figure 20 : Asymétrie des dunes en fonction du rapport q_s/q_b au cours des trois campagnes de mesures	23
Figure 21 : Evolution de l'asymétrie des dunes en fonction de la contrainte de cisaillement	24
Figure 22 : Evolution de la célérité des dunes en fonction de la part de sédiments charriés et transportés par suspension.....	24
Figure 21 : Diagramme de Hjulstrom (Univ-Lyon2, 2017).....	Erreur ! Signet non défini.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, G. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London.
- Allen, G. (1982). Sedimentary structures: Their character and physical basis, Volume I. *Developments in Sedimentology*, 30.
- Ashley, G. M. (1990). Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem-SEPM Bedforms and Bedding Structures. *Journal of Sedimentary Research*, 60(1), 160–172. <https://doi.org/10.2110/jsr.60.160>
- Ashworth, P. J., Best, J. L., & Bristow, C. S. (2000). Morphological evolution and dynamics of a large , sand braid - bar , Jamuna River , Bangladesh. *Sedimentology*, 47(MAY), 533–555. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00305.x>
- Berné, S., Allen, G., Auffret, J. P., Chamley, H., Durand, J. W., & Weber, O. (1989). Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles. *Bull. Soc. Géol.*, 6, 1145–1160.
- Best, J. (2005). The fluid dynamics of river dunes: A review and some future research directions. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(4), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2004JF000218>
- Boiten, W. (2005). *Hydrometry: IHE Deflt Lecture Note*. (T. Francis, Ed.). A.A. Balkema Publishers, a member of Swets and Zeitlinger Publisher.
- Bridge, J. S. (1993). The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. *Geological Society, London, Special Publications*, 75(1), 13–71. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1993.075.01.02>
- Bridge, J. S. (2003). *Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record*. Blackwell Publishing company.
- CETMEF. (2011). Méthodologie de mesure du transport solide en Loire Historique des versions du document. Retrieved from <http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2009/03/lhb2009035/lhb2009035.html>
- Christophe Rousseau, Frederic Girard, & Eric Barthelemy. (2009). Mesures par ADCP (Station Hydrométrique ENSE3 Campus), 2006.
- Claude, N. (2012). *Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablo-graveleuse: influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France)*. François Rabelais.
- Coz, J. Le, Larrarte, F., & Sayssset, G. (2009). Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (aDcp) en France: application aux cours d'eau et aux réseaux urbains. *La Houille Blanche*, 115–122. Retrieved from <http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2009/03/lhb2009035/lhb2009035.html>
- Crosato, A. (2015). Effects of suspended sediment on river bars, (August), 1–4.
- Eijkkelkamps. (2003). Bedload Transport Meter Arnhem, 8.
- Einstein, H. A. (1950). The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. *Soil Conservation Service*, (1026), 1–31.
- Ferret, Y. (2011). *Morphodynamique des dunes sous-marines en contexte de plate-forme mégatidale (Manche orientale). Approche multi-échelles sapo-temporelles*. Rouen.
- Fredsøe, J. (1981). Unsteady flow in straight alluvial streams. Part 2. Transition from dunes to plane bed. *Journal of Fluid Mechanics*, 102(February), 431–435. <https://doi.org/10.1017/S0022112081002723>
- Frings, R. M., & Kleinhans, M. G. (2008). Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology*, 55, 1145–1171.
- Gaeuman, D., & Jacobson, R. B. (2007). Field assessment of alternative bed-load transport estimators. *Hydraul. Eng.*, (133), 1319.
- Gomez, B. (1991). Bedload transport. *Earth-Science Reviews*, 31(2), 89–132. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(91\)90017-A](https://doi.org/10.1016/0012-8252(91)90017-A)
- Hassan. (1992). The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers, 17, 535–538.

- Jackson. (1975). Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced By shearing flow, (51104), 1523–1533. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1975\)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1975)86<1523:HAAAUM>2.0.CO;2)
- Jerolmack, D., & Mohrig, D. (2005). Interactions between bed forms: Topography, turbulence, and transport. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(2), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2004JF000126>
- Kleinbans, M. G., Wilbers, A. W. E., De Swaaf, A., & Van den Berg, J. H. (2002). Sediment supply-limited bedforms in sand-gravel bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 72(5), 629–640. <https://doi.org/10.1306/030702720629>
- Kostaschuk, R. (2005). Sediment transport mechanics and subaqueous dune morphology. In G. P. and M. H. Garcia (Ed.), *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics* (pp. 795–801).
- Kostaschuk, R., & Best, J. (2005). Response of sand dunes to variations in tidal flow: Fraser Estuary, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(4), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004JF000176>
- Lanzoni, S., & Tubino, M. (1999). Grain sorting and bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 393, 149–174. <https://doi.org/10.1017/S0022112099005583>
- McLelland, S. J., Ashworth, P. J., Best, J. L., Roden, J., & Klaassen, G. J. (1990). Flow Structure and Transport of Sand-Grade Suspended Sediment around an Evolving Braid Bar, Jamuna River, Bangladesh. *Fluvial Sedimentology* VI, (1990), 43–57. <https://doi.org/10.1002/9781444304213.ch4>
- Naqshband, S. (2014). *Morphodynamics of river dunes: Suspended sediment transport along mobile dunes and dune development towards Upper Stage Plane Bed*. <https://doi.org/10.3990/1.9789036538138>
- Rodrigues, S. (2014). *Habilitation à diriger des recherches - Dynamique hydrosédimentaires des cours d'eau à charge sablo-graveleuse: processus & archivage*.
- Rodrigues, S., Le Hir, P., Moatar, F., & Claude, N. (2016). Transferts de particules dans le continuum fluvio-estuarien. In Synthèse (Ed.), *La Loire fluviale et estuarienne - Un milieu en évolution* (Quae, pp. 85–121).
- Rodrigues, S., Mosselman, E., Claude, N., Wintenberger, C. L., & Juge, P. (2015). Alternate bars in a sandy gravel bed river: Generation, migration and interactions with superimposed dunes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(5), 610–628. <https://doi.org/10.1002/esp.3657>
- Seminara, G., & Tubino, M. (1989). Alternate Bars and Meandering: Free, Forced and Mixed Interactions. *River Meandering*, 12, 267–320. <https://doi.org/10.1029/WM012p0267>
- Simons, D. B., & Richardson, E. V. (1966). *Resistance to Flow in Alluvial Channels*. (U. S. G. P. Office, Ed.). Washington: Physiographic and Hydraulic Studies of Rivers Geological Survey Professional Paper 422-J.
- Tubino, M. (1991). Growth of alternate bars in unsteady flow. *Water Resour. Res.*, 27, 37–52.
- Van der Berg, J. H. (1987). Bedform migration and bed-load transport in some rivers and tidal environments. *Sedimentology*, 34, 681–698.
- van Rijn, L. C. (1985). Sediment Transport: Part I-III. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), 1431–1754.
- van Rijn, L. C. (1994). Principles of Fluid Flow and Surface Waves in Rivers, Estuaries, Seas and Oceans. *Aqua Publication*, (Edition), 8.73-8.92. Retrieved from <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b17133-158>
- Villard, P. V., & Church, M. (2003). Dunes and associated sand transport in a tidally influenced sandbed channel: Fraser River, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40, 115–130.
- Wilbers, A. W. E. (2004). *The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes* (Vol. Netherland).
- Yalin, M. S. (1964). Geometrical properties of sand waves. *Hydraul. Div., ASCE*, 90, 105–119.

WEBOGRAPHIE

Ancey, C. (2017). Chapitre 5: écoulements à surface libre – Mécanique des fluides. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne [en ligne]. Disponible sur : <http://lhe.epfl.ch/cours/bachelor/slides/chapitre5.pdf>

Futura-sciences – Convection [en ligne]. Disponible sur : <http://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-convection-1662/>

Maritech – Echantillonneurs d'eau NISKIN [en ligne]. Disponible sur : <http://www.maritech.fr/produit-echantillonneurs-d-039-eau-niskin-13.html>

Pattison, M.J. – Friction velocity [en ligne]. Disponible sur : <http://www.thermopedia.com/content/790/>

Univ-Lyon – Le transport de sédiment [en ligne]. Disponible sur : http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins_d&part=154405

Directeur de recherche :

Birault Marie

Rodrigues Stéphane

**Projet de Fin d'Etudes
DA5
2017-2018**

Effets de la suspension sur la morphologie des dunes subaquatiques en système sablo-graveleux : Etude in situ à Saint-Mathurin-sur-Loire

Résumé :

La deuxième partie de ce projet de fin d'études avait pour objectif d'étudier les effets de la suspension sur les dunes subaquatiques, en système sablo-graveleux et in situ. Les données traitées dans le cadre de ce mémoire proviennent de Saint-Mathurin-sur-Loire et de campagnes de mesures réalisées en novembre 2016, mars 2017 et mai 2017. Un état de l'art avait été réalisé au premier semestre. Ce dernier avait permis de montrer qu'en système sableux, le transport en suspension influençait la morphologie des dunes notamment en diminuant leur *steepness*, leur pente d'abris et en les rendant plus symétriques. Notre étude ici a montré que lorsque le transport en suspension était important et majoritaire, la *steepness* des dunes et leur pente d'abris augmentait et qu'aucune corrélation n'existait entre la symétrie des dunes et ce paramètre. Seule l'hypothèse sur la célérité des dunes a été vérifiée.

Les effets de la suspension, in situ et en systèmes sablo-graveleux semblent complexes et différents de ceux en système sableux. En effet, il est probable que la charge graveleuse et le transport de fond amoindrissent son impact. De plus, les conditions hydrauliques gouvernent dans un premier lieu la morphologie des dunes. Les effets de la suspension passant au second plan.

Tous les résultats ici sont à prendre avec modération. D'une part, le jeu de données utilisé semble insuffisant pour représenter la réalité et l'ensemble des conditions hydrauliques et sédimentaires. De plus, aucune des corrélations n'est significative. En outre, les données utilisées peuvent être biaisées, notamment les mesures aux BTMA.

Mots Clés : dune subaquatiques, transport sédimentaire, charge de fond, suspension, *steepness*