



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

Barres sédimentaires et dunes subaquatiques en systèmes fluviatiles sablo-graveleux :

Interactions et rôle de la suspension dans leur dynamique



2017-2018

Directeur de recherche
Rodrigues Stéphane

Birault Marie

**Barres sédimentaires et dunes
subaquatiques :
Interactions et rôle de la suspension dans
leur dynamique**

**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 problématique	2
I. Les différentes formes du lit en système fluvial	3
I.1. Les modes de transport de sédiment impliqués dans la migration des corps sédimentaires ..	4
I.2. Les dunes subaquatiques, dynamique et morphologie	5
I.3. Les barres sédimentaires, dynamique, morphologie et nomenclature	9
II. Processus d'interactions entre dunes subaquatiques et barres sédimentaires	12
II.1 La fusion des dunes, catalyseur pour le développement des barres sédimentaires	12
II.2. L'apport en sédiment et sa disponibilité, paramètres clés gouvernant la taille des dunes superposées.....	13
II.3. Résistance hydraulique et rehausse de la ligne d'eau engendrées par les dunes superposées	15
II.3.1. Impacts sur la hauteur d'eau lors des inondations	15
II.3.2. Impacts sur la migration des barres hôtes	15
III. Impact de la suspension sur les corps sédimentaires	17
III.1. Effets de la suspension sur la morphologie et la dynamique des dunes	17
III.1.1. La suspension à l'origine des dunes symétriques et de leur aplatissement	17
III.1.2 Transition des dunes en lits plans de haut niveau énergétique.....	20
III.2 Effets de la suspension sur la morphologie et la stabilité des barres sédimentaires	22
III.2.1. Suspension et variations morphologiques des barres sédimentaires.....	22
III.2.2. Les effets stabilisants et déstabilisants de la suspension sur les barres sédimentaires	22
IV. Synthèse	24
IV.1. Interactions dunes subaquatiques et barres sédimentaires.....	24
IV.2. Impacts de la suspension dans la dynamique des dunes subaquatiques	25
IV.3. Impacts de la suspension dans la dynamique des barres sédimentaires	26
Conclusion	27
Index.....	28
Table des figures.....	29
Table des tableaux.....	29
Bibliographie.....	30
Webographie.....	34

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

En système fluvial, les grains constituant la charge de fond transitent au fond 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 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 mémoire s'intéresse principalement 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 ce Projet de Fin d'Etudes sont ; (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 au premier semestre. Ce rapport, qui en est la synthèse, s'articule selon les quatre parties suivantes ; (1) Les différentes formes du lit en système fluvial, (2) Processus d'interactions entre dunes subaquatiques et barres sédimentaires, (3) Impact de la suspension sur les corps sédimentaires, (4) Synthèse. Le second semestre consistera en une recherche appliquée portant sur le même sujet.

I. LES DIFFERENTES FORMES DU 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).

Tableau 1 : Classification des corps sédimentaires en fonction de leur dimensions (Ashley, 1990; Berné et al., 1989) in (Ferret, 2011)

	Corps sédimentaires transversaux					
Corps sédimentaires	Rides	Dunes				Banc
		petites	moyennes	grandes	très grandes (géantes)	
Direction de la crête par rapport au courant	Perpendiculaire	Perpendiculaire	Perpendiculaire	Perpendiculaire	Perpendiculaire	Parallèle
Amplitude (m)	< 0,06	0,06 - 0,25	0,25 - 0,5	0,5 - 3	> 3	> 10
Longueur d'onde (m)	< 0,6	0,6 - 5	5 - 10	10 - 100	> 100	>1000

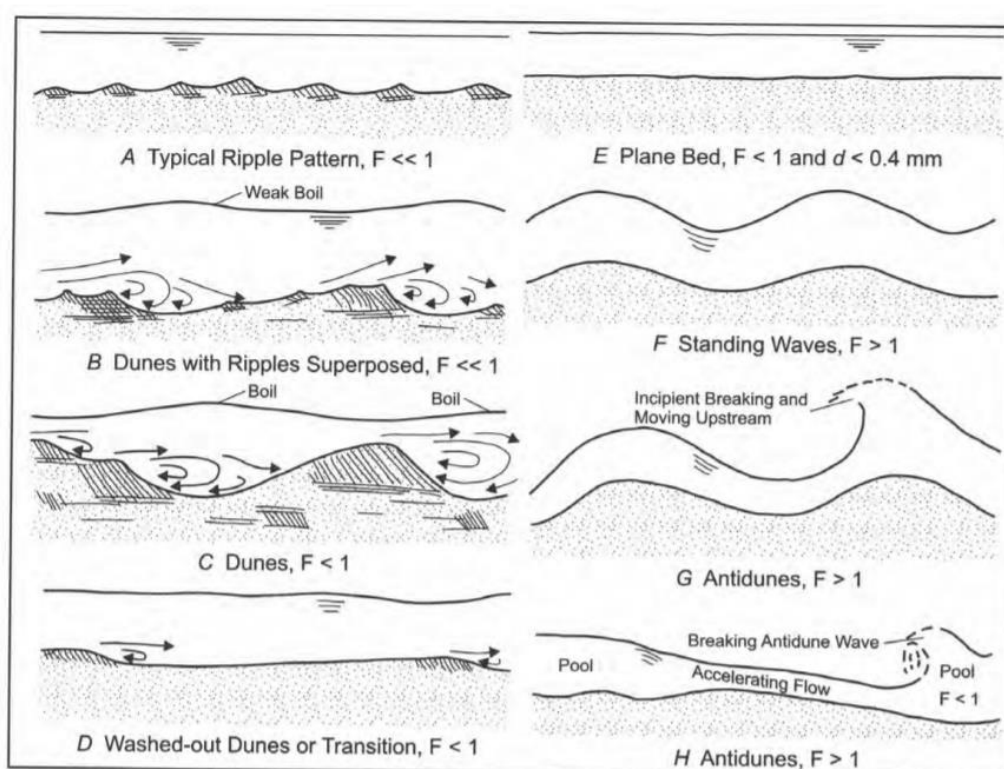


Figure 1: Morphologie des différents corps sédimentaires du lit (Ancy, 2017)

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*) (Figure 1). 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 (Figure 1), 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 (Figure 1). Ce sont les seuls corps sédimentaires qui ne sont pas transverses au courant (Tableau 1).

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. 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 2) (Univ-Lyon, 2017, Naqshband, 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.

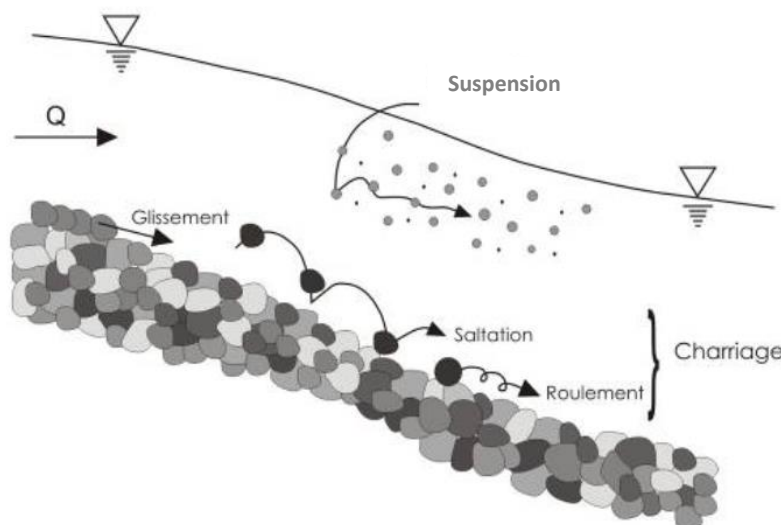


Figure 2 : Schéma des différents modes de transport des sédiments au sein d'un chenal (Univ-Lyon, 2017)

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.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 grammes 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

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 3). 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 3) (Ferret, 2011).

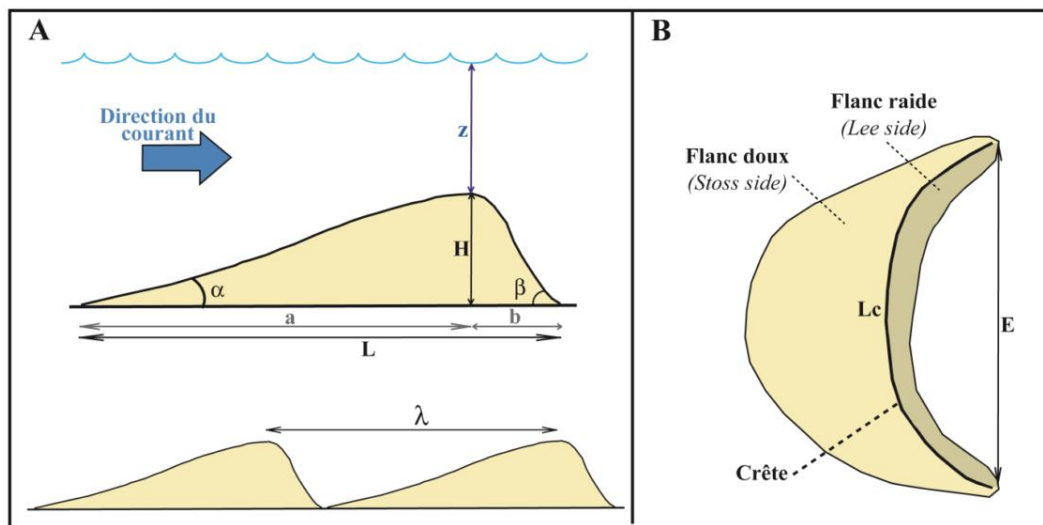


Figure 3 : Caractéristiques morphologiques des dunes. A – Dune vue en coupe verticale. B – Dune vue de dessus.
 L et λ : Largeur et longueur d'onde de la dune. H : Amplitude. α et β : Angles du flanc doux et raide. a et b : Longueurs projetées des flancs doux et raide. z : Profondeur du sommet de la dune. L_c : Longueur réelle de la crête. E : Extension latérale de la crête. (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 dépend de 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 nombre de Froude élevés. Julien et Klaassen (1995) ont, eux, proposé, à partir d'expériences en rivière naturelle et avec des nombre 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 4). 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.

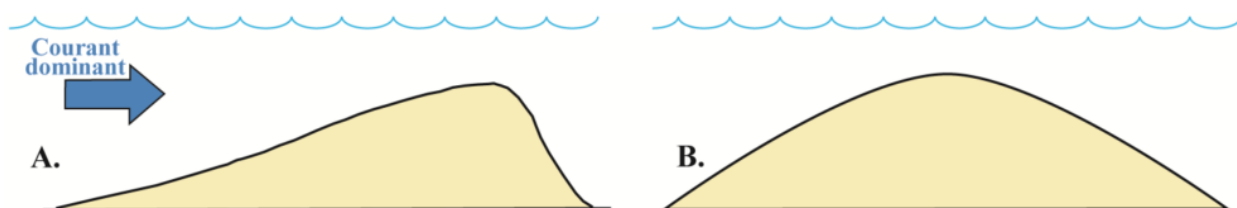


Figure 4 : A. Dune asymétrique ; B. Dune symétrique. (Ferret, 2011)

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 5) alors que les dunes 3D ont une stratification incurvée ou en auges (Figure 6). Pour une taille de sédiment donnée, les dunes 2D se forment à des vitesses de courant moins fortes que les dunes 3D (Ashley, 1990).

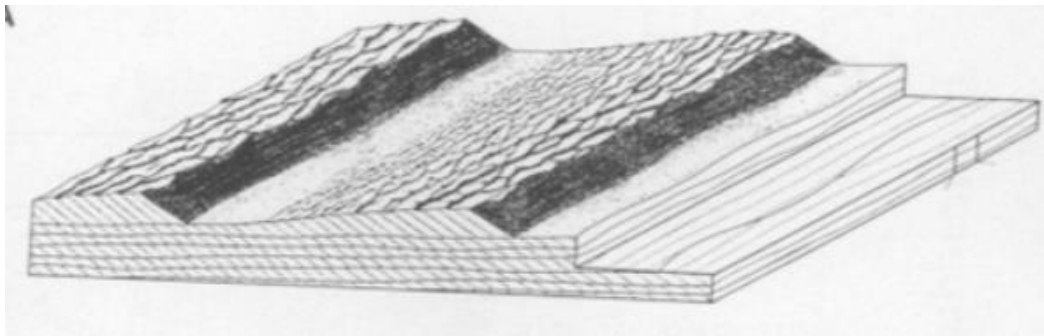


Figure 5 : Schéma d'une dune bidimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990)

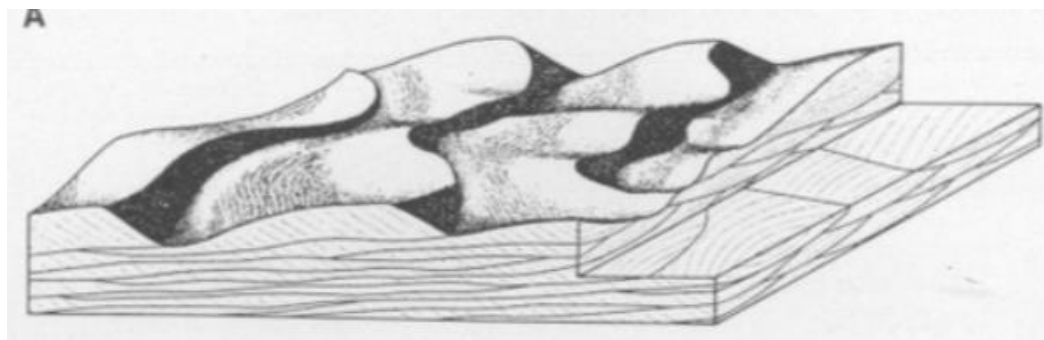


Figure 6 : Schéma d'une dune tridimensionnelle. Le courant va de gauche à droite (Ashley, 1990)

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 (Naqshand, 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.

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

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

C_b : 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) :

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

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 rapport 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 de sont pas complètement plates (Figure 1). 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.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 7). Elles sont suivies par des zones de radiers doux en aval. (Seminara et Tubino, 1989).

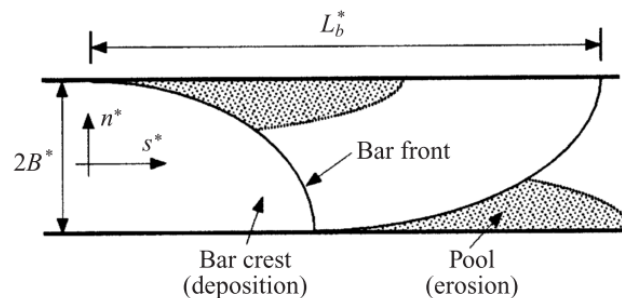


Figure 7 : Caractéristiques morphologiques des barres sédimentaires. L_b . Longueur de la barre. $2B$. largeur de la barre (Lanzoni et Tubino, 1999)

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.

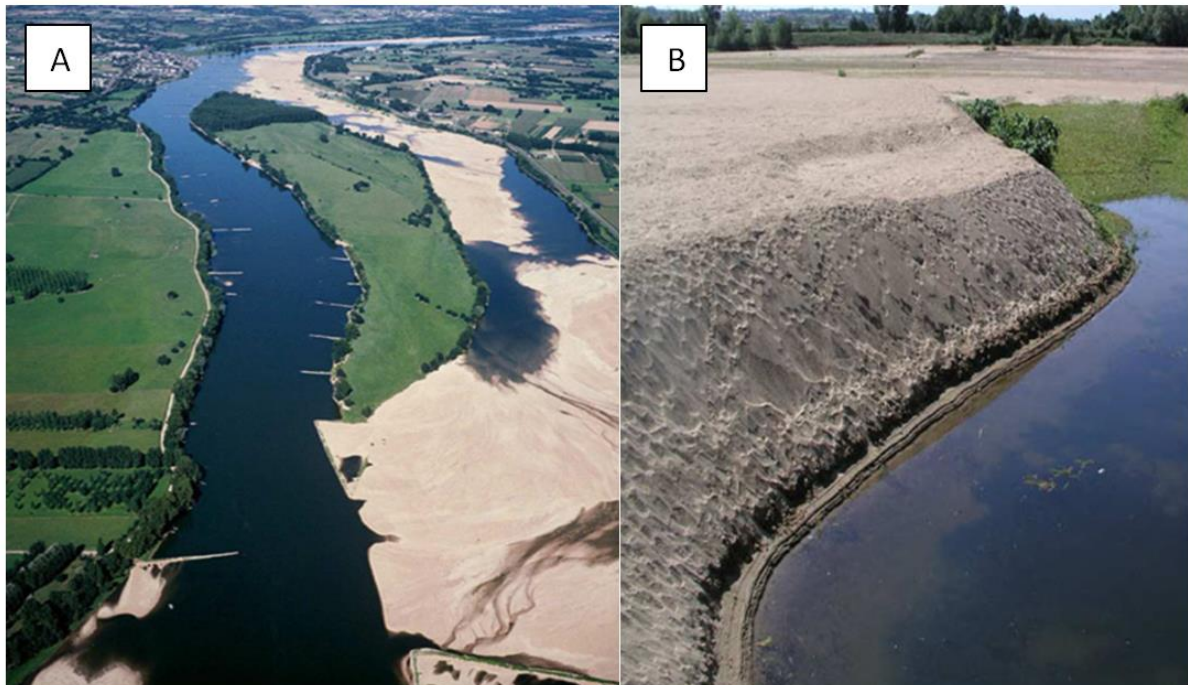


Figure 8 : A. Photographie aérienne de barres alternes au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France). B. Zone de dépôt (*bar crest*) d'une barre alterne (1,5m de hauteur) pendant une période d'étiage au sein d'un chenal secondaire de la Loire (France) (modifié d'après Rodrigues et al, 2015)

Un ratio d'aspect faible génère une configuration simple (de mode 1), correspondant aux barres alternes (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 (Mclelland *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.

II. PROCESSUS D'INTERACTIONS ENTRE DUNES SUBAQUATIQUES ET BARRES SEDIMENTAIRES

Les variations des conditions d'écoulement génèrent des changements temporels dans la géométrie des formes du lit. Il est ainsi fréquent que des formes du lit se superposent les unes sur les autres. Un bon nombre d'études concernent les formes superposées sur les flancs doux des dunes subaquatiques. Elles augmentent notamment la rugosité, modifient les dynamiques de transport de sédiment, contrôlent les processus de fusion et de séparation des écoulements, altèrent la géométrie de la zone d'abris de la forme hôte ou encore changent les structures sédimentaires internes (Reesink, *et al.*, 2014). Cependant, moins d'intérêt a été porté quant aux formes secondaires superposées sur les barres sédimentaires, association qui est fréquente au sein des cours d'eau sablo-graveleux (Rodrigues, 2014).

Les formes superposées interagissent avec les formes hôtes (Bridge, 2003) et leurs vitesses de migration sont généralement supérieures (Reesink et Bridge, 2009). Les macroformes influencent la couche limite et la résistance du lit à l'écoulement et, par rétroaction, le développement de mésoformes superposées comme les dunes (Rodrigues *et al.*, 2016). D'après les expérimentations des Mclelland *et al.* (1990) en rivière naturelle sableuse, ce serait les variations de hauteur d'eau, lors des pics de crues, qui permettraient la migration des dunes au sommet des barres. Ces dernières s'installeraient ensuite durablement suite à la diminution des vitesses d'écoulement ou de la contrainte de cisaillement. La migration des dunes superposées permettant ensuite la migration des barres.

Cette partie tend à faire un état de l'art des différents processus d'interactions existants entre les dunes et les barres sédimentaires qu'elles soient superposées ou non en termes de transport de sédiment, résistance hydraulique et rehausse de la ligne d'eau.

II.1 LA FUSION DES DUNES, CATALYSEUR POUR LE DEVELOPPEMENT DES BARRES SEDIMENTAIRES

L'amalgamation des dunes serait un catalyseur pour le développement des barres sédimentaires (Ashworth, *et al.*, 2000; Best, *et al.*, 2003). Ashworth *et al.* (2000) et Best *et al.*, (2003) ont analysé, la structure sédimentaire, la création, l'évolution ainsi que la préservation d'une barre de mi chenal au sein de la rivière sableuse Jamuna (Bengladesh). Leurs études ont notamment montré que les dunes améliorent le développement des barres, mais également leur évolution. Elles seraient le mécanisme clé pour l'initiation et développement des bancs alluviaux. En effet, il s'est avéré que la fusion de dunes et le développement d'un front de dune d'accrétion permet la création du noyau initial de la barre (Figure 9.2 et Figure 9.3). La croissance des bancs alluviaux s'effectue ensuite principalement grâce la propagation en aval de la face d'abris des dunes.

Mais, la superposition des dunes, postérieure à l'initiation de la barre, permet son développement par accrétion verticale et latérale pendant la décrue (Ashworth, *et al.*, 2000; Best, *et al.*, 2003; Villard et Church, 2005). Les formes du lit ont un rôle notable dans les processus d'aggradation des barres sédimentaires via la migration et la fusion des dunes subaquatiques au niveau des têtes de barres (Mclelland *et al.*, 1990). En retour, les barres influencent également la morphodynamique des dunes en modifiant la distribution des écoulements et du transport solide au sein du chenal (Claude, 2012)

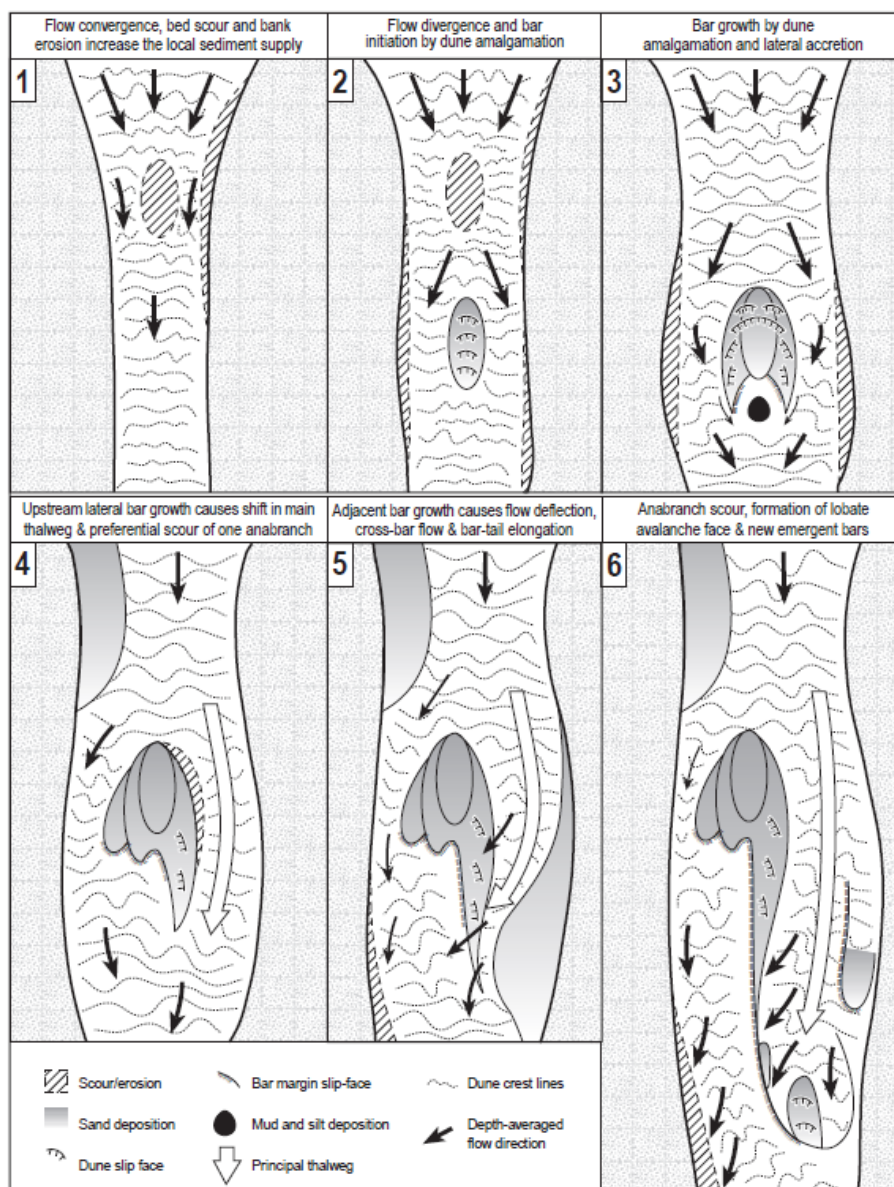


Figure 9 : Résumé des étapes clés d'après Ashworth *et al.*, (2000) impliquées dans l'évolution d'une barre de mi-chenal au sein d'une rivière à fond sableux. L'orientation des dunes et les directions du courant proviennent des données de Roden (1998) et McLelland (1999)

II.2. L'APPORT EN SEDIMENT ET SA DISPONIBILITE, PARAMETRES CLES GOUVERNANT LA TAILLE DES DUNES SUPERPOSEES

Les barres sédimentaires influencent la profondeur d'eau et la disponibilité en sédiment, ce qui impact le développement des dunes (Claude, 2012; Tuijnder 2009).

Les dunes superposées adaptent leur forme, leur taille ou leur vitesse de migration face aux effets de forçage induits pas les macroformes (Mohrig et Smith, 1996). De nombreuses études suggèrent que les plus grandes dunes se situent aux endroits du chenal ayant la plus grande hauteur d'eau. En effet, une diminution de la hauteur d'eau cause une réduction de la couche limite impliquée dans le développement des dunes (Mohrig et Smith, 1996). Ainsi, les hauteurs d'eau diminuées au sommet des barres, engendrent le plus souvent une diminution de la taille des dunes superposées (Ashworth, *et al.*, 2000; Mohrig et Smith, 1996). En outre, pour les mêmes raisons, les dunes superposées au niveau de la queue de la barre sont plus grandes que celles situées à son sommet (Best, *et al.*, 2003)

Cependant, Villard et Church (2005) ainsi que Claude et al. (2012) ont observé, suite à leur travaux sur la rivière Fraser (Canada) et sur la Loire (France) que les dunes superposées sur les barres étaient plus grandes que celles non superposées. De plus, elles ne respectaient pas la définition de Yalin (1964), et les conditions d'équilibre. Ce serait des conditions locales particulières au-dessus de la barre, et en particulier une aggradation persistante, qui, d'après Villard et Church (2005), favoriseraient le développement singulier de ces dunes. La cessation de l'aggradation menant à des dunes plus petites et respectant les conditions de Yalin (1964). Cela suggère que l'apport en sédiment et sa disponibilité peut davantage gouverner la morphodynamique des dunes superposées sur les barres migrantes que la hauteur d'eau (Claude, 2012; Villard et Church, 2005). Wintenberger *et al.*, (2015), via leurs travaux in situ au sein de la Loire (France) sont arrivés à des conclusions similaires. D'après les auteurs, le développement des dunes est influencé, dans l'ordre d'importance, par l'apport en sédiment (phasage, quantité), la taille des grains, la force du courant et, dans une moindre mesure, par la profondeur d'eau. Leur formation serait aussi liée à la disponibilité locale en sédiments.

En effet, les travaux de Claude (2012) au sein de la Loire (France), rivière sablo-graveleuse ont montré que les macroformes « représentent pour les dunes des zones d'approvisionnement sédimentaire privilégiées qui assurent l'alimentation de certains axes de charriage et qui offre une couche active de sédiment conséquente ». Ainsi, la configuration des barres favorise et contrôle le développement des dunes, soit en augmentant localement la disponibilité en sédiment, soit en fournissant une couche active de sédiment importante, soit en intensifiant l'apport sédimentaire en aval de leur position (Claude, 2012). Cependant, les dunes utiliseraient très faiblement les sédiments stockés dans la barre pour leur développement. Elles croitraient uniquement grâce à l'apport sédimentaire du chenal.

Wintenberger *et al.* (2015), via leurs travaux in situ sur une barre forcée de mi-chenal sont arrivés aux conclusions contraires. Ils ont montré que la réponse d'une barre forcée à une crue de grande intensité peut être découpée en cinq phases (phase d'érosion, de gonflement, de construction, de déclin et de remaniement). Au cours de ces cinq phases, l'apport en sédiment varie. C'est notamment lors de la phase d'érosion (première phase) que les dunes superposées se forment. Lors de cette étape, il n'y a pas d'apport de sédiment via le chenal principal. Les dunes se développeraient donc à partir des sédiments stockés préalablement par la barre.

L'apport en sédiment serait également le facteur limitant la croissance des dunes. En effet, les dunes superposées étudiées par Wintenberger *et al.*, (2015) avaient des hauteurs assez faibles malgré une profondeur d'eau importante. Les conditions hydrauliques et la taille des grains étaient, de plus, favorables au développement des dunes. Seul l'apport en sédiment serait responsable de la taille réduite de ces dunes (Wintenberger et al., 2015).

Concernant le taux de transport de sédiment, les travaux de Villard et Church (2005) ont montré que pendant les hauts débits, la plus part du matériel sédimentaire stocké au sein des barres, est transporté en association avec les dunes qui y sont superposées. Premièrement, ils ont estimé que, les taux de transport au sein des dunes superposées étaient similaires à ceux transportés par la barre seule. Deuxièmement, ils ont remarqué que lorsque les dunes déclinaient, davantage de sédiments étaient transportés au sein de la barre. Cependant, ces travaux ont été réalisés au sein de l'estuaire de la rivière Fraser (Colombie Britannique). La zone est donc soumise aux marées et présente des conditions hydrauliques particulières.

Pour finir, l'apport en sédiment et sa disponibilité impactent la morphologie des dunes mais également leur migration. Or, la migration des dunes permet la migration des barres. Ainsi, en retour, ces variations participent significativement à l'évolution morphologique des macroformes (Claude, 2012)

II.3. RESISTANCE HYDRAULIQUE ET REHAUSSE DE LA LIGNE D'EAU ENGENDREES PAR LES DUNES SUPERPOSEES

La résistance à l'écoulement engendrée par les dunes subaquatiques impacte la hauteur d'eau mais également la vitesse de migration des barres hôtes.

II.3.1. IMPACTS SUR LA HAUTEUR D'EAU LORS DES INONDATIONS

La surveillance et la prévision des crues des cours d'eau sont cruciales. Les enjeux sont importants et les dégâts humains et matériels peuvent être considérables en cas d'inondation. C'est pourquoi La précision des modèles de prévision des crues est capitale.

Les formes du lit et notamment les dunes subaquatiques augmentent la rugosité du lit et génèrent une résistance à l'écoulement. Elles influencent ainsi les hauteurs d'eau (Bhattacharya *et al.*, 2013; Warmink, 2015). Cependant, la contribution des dunes à la rehausse de la ligne d'eau est encore incertaine (Warmink, 2015) et n'est pas prise en compte dans les modèles hydrauliques. L'impact des dunes superposées sur les bancs alluviaux sur ce même paramètre l'étant encore moins.

La morphologie des dunes s'adapte en fonction des conditions hydrauliques et selon un temps de latence. Warmink (2014), a montré que la longueur des dunes augmente pendant la crue et la décrue. Ce phénomène est notamment dû à la fusion des formes du lit. La réponse morphologie des dunes lors des crues s'effectue plus rapidement en hauteur qu'en longueur. Cela génère des dunes courtes et hautes pendant le pic de crue. Plus les dunes sont hautes, plus la séparation des écoulements est intense et plus la rugosité du lit et la résistance à l'écoulement est importante (Patel et Kumar, 2013). Ce qui signifie que les dunes amplifient les hauteurs d'eau pendant les crues. On peut ainsi supposer, que lorsqu'elles sont superposées, les dunes augmentent de la même manière la rugosité du lit et la rehausse de la ligne d'eau.

II.3.2. IMPACTS SUR LA MIGRATION DES BARRES HOTES

Premièrement, d'après Villard et Church (2005), les dunes superposées, et en particulier celles disposées sur les crêtes des bancs alluviaux retarderaient l'écoulement, via l'augmentation de la rugosité du lit.

Deuxièmement, les travaux in situ de Rodrigues et al (2015) au sein la Loire (France) sur la formation des barres alternes libres et forcées ont démontré que bien que la vitesse de migration des barres (alternes) est influencée majoritairement par le type d'écoulement (permanent ou non) et leur disposition au sein du chenal, il est fort probable que la dynamique des dunes superposées ait également un impact.

D'après leurs conclusions, ce serait la résistance à l'écoulement générée par celles-ci qui influencerait le plus la vitesse de migration des barres alternes hôtes. En effet, on sait que plus le transport de sédiment est intense, plus la vitesse de migration de la barre est rapide. A l'inverse, plus la profondeur d'eau augmente, moins la barre migre rapidement. Enfin, il a été démontré que plus le débit est important, plus la vitesse de migration des barres l'est également. Les dunes superposées génèrent une résistance hydraulique plus importante et donc la rehausse de la ligne d'eau. D'un côté, une profondeur d'eau plus importante a pour résultat une vitesse de migration plus faible de la barre hôte. D'un autre côté, une augmentation de la profondeur d'eau génère également un transport de sédiment plus intense. Ce qui implique donc des vitesses de migration plus rapides. Ces effets sont amplifiés pendant les crues puisque en réponse à ces évènements, les dunes superposées augmentent rapidement leur hauteur et longueur, la résistance à l'écoulement et par conséquent le transport de sédiment.

Bien qu'il est certain ici que les dunes affectent la vitesse de migration des barres alternes hôtes, il semble difficile de conclure si, au final, la combinaison de ces phénomènes induit une augmentation ou une diminution de la vitesse des macroformes hôtes.

III. IMPACT DE LA SUSPENSION SUR LES CORPS SEDIMENTAIRES

Le rôle de la suspension sur la dynamique des barres sédimentaires et des dunes subaquatiques est souvent négligé. En effet, le transport par charriage est vu, à tort, comme étant le mode de transport de sédiment principal impliqué dans leur dynamique.

III.1. EFFETS DE LA SUSPENSION SUR LA MORPHOLOGIE ET LA DYNAMIQUE DES DUNES

Il s'est avéré que le transport par suspension, près du lit, influence la morphologie (notamment la pente d'abris) mais aussi la dynamique des dunes (Johns *et al.*, 1990; Kostaschuk *et al.*, 2008). Ce dernier aurait également un effet plus important que le transport de fond dans les changements de structure sédimentaires des dunes (Johns *et al.*, 1990).

La charge en suspension, lorsqu'elle associée à des vitesses d'écoulement importantes, génère dans un premier temps, des dunes aplaties et plus symétriques. Dans un second temps, elle favorise l'évolution des dunes en lit plan de haut niveau énergétique.

III.1.1. LA SUSPENSION A L'ORIGINE DES DUNES SYMETRIQUES ET DE LEUR APLATISSEMENT

Fredsøe (1978) est un des premiers à s'intéresser aux effets de la suspension sur la morphologie des dunes subaquatiques. Ses travaux ont notamment montré qu'une augmentation de la force du courant impliquait une plus grande proportion de sédiments transportés par suspension et par conséquent une diminution de la hauteur des dunes. Amsler et Schreider (1999) *in* (Kostaschuk et Best, 2005) ont trouvé que le transport en suspension (lorsqu'il est majoritaire) était associé avec un aplatissement des dunes pendant les crues au sein de la rivière Parana (Argentine). Ces observations coïncident, entre autres, avec celles de Kostaschuk et Villard (1996), Smith et McLean (1977) et Kostaschuk et Best (2005) suggérant que l'augmentation du matériel transporté par suspension par rapport à celui transporté par charriage est associé avec des dunes plus plates (diminution du paramètre *steepness*), plus symétriques, ayant des crêtes arrondies et des angles de pente d'abris plus faibles. Enfin, les travaux de Johns *et al.*, (1990) suggèrent pour des vitesses d'écoulement modérées, les vitesses de migration des dunes seraient plus importantes lorsque les sédiments sont transportés majoritairement par suspension que lorsqu'ils sont transportés par charriage.

Le modèle mathématiques de Johns *et al.* (1990) a permis d'évaluer les contributions du transport de fond et par suspension dans la déformation d'une dune asymétrique. Les résultats obtenus, lorsque le transport par suspension est majoritaire, montrent que l'érosion est plus importante que la déposition de sédiments au niveau de la face érosive (Figure 10b) et inversement au niveau de la face d'abris. Cela se traduit d'une part par un taux de transport par suspension croissant jusqu'en amont de la crête de dune (Figure 10c) puis décroissant à partir de même point. Et, en d'autres termes par un abaissement du lit (érosion du talus) mais aussi par le comblement du creux de dune (Figure 10d). Enfin, ils ont montré que ces phénomènes d'érosion/déposition, lorsque le transport en suspension est majoritaire, affutent et rehaussent la crête de dune.

Par conséquent, une charge importante de sédiment en suspension, seule, n'induit pas un aplatissement des dunes. C'est cette dernière, couplée à des vitesses d'écoulements importants qui génèreraient, en plus, une diminution de la hauteur de crête de dune.

Les auteurs ont également mis en évident que le transport par charriage, lorsqu'il est dominant, induit des crêtes de dunes arrondies. Enfin, pour des parts égales de transport de fond et par suspension, les effets de la suspension sont amoindris.

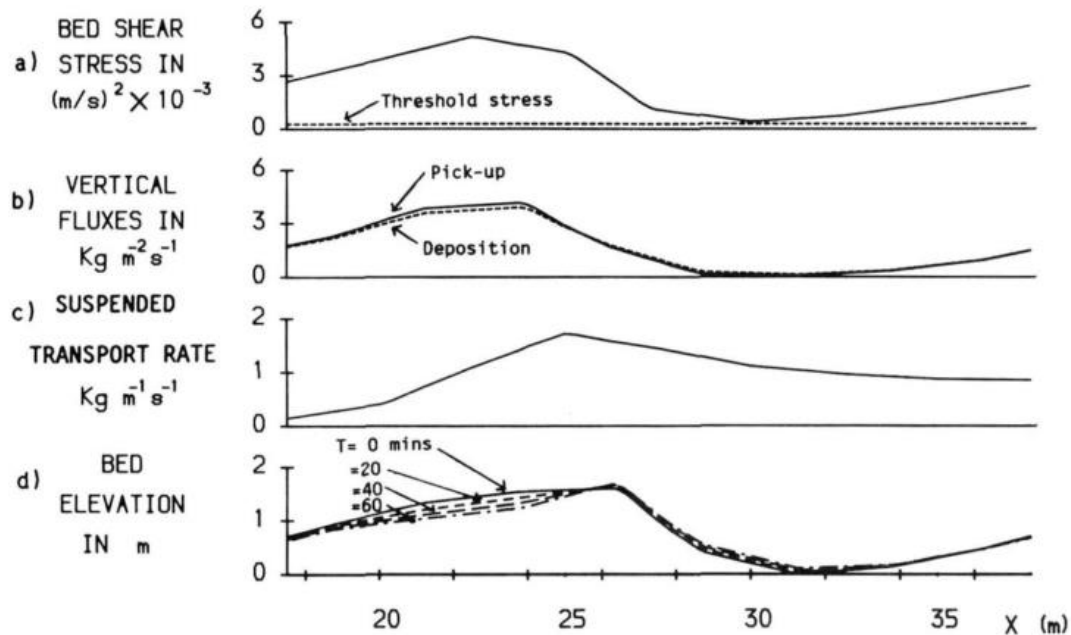


Figure 10 : Valeurs calculées du transport par suspension $u_0=0,75m/s$ (a : Distribution initiale de la contrainte de cisaillement cinématique du lit, b : flux de sédiment vertical initial au niveau du lit, c : débit solide initial en suspension d : Morphologie du lit initial et après évolution) (Johns, *et al.*, 1990)

L'aplatissement des dunes serait due d'une part à la suppression de la turbulence au niveau de la zone de séparation des écoulements et au dépôt des sédiments dans les creux de dunes. D'autre part, moins de matériel sédimentaire serait transporté par charriage, et donc moins de sédiments arriveraient à la crête des dunes et tomberaient par avalanche (Fredse, 1978).

SUPPRESSION DE LA ZONE DE SEPARATION DES ECOULEMENTS

Smith et McLean (1977), ont trouvé, via leurs travaux au sein de la rivière Columbia, que les dunes avec des zones de séparation des écoulements étaient présentes quand le transport de fond était dominant. Ces dernières correspondant aux dunes asymétriques (Lockett, 1983). Les fortes pentes des zones d'abris seraient maintenues grâce à l'avalanche importante des sédiments sur cette dernière (Best, 2002). Pour des conditions de transport inverses (transport par suspension majoritaire), des dunes sans zone de séparation des flux prévalaient (Smith et McLean, 1977). Cela serait dû à la déposition des sédiments en suspension dans le creux des dunes et au niveau de la zone de séparation des flux, produisant des dunes plus symétriques avec des pentes d'abris plus faibles (Best, 2002; Smith et McLean, 1977). Ces dernières étant trop douces pour causer une séparation des écoulements.

Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Roden (1998), au sein de la rivière Jamuna (Bangladesh). L'auteur n'a pas détecté de séparation des écoulements pour les dunes avec des pentes d'abris faibles. Cependant, les dunes qui ne présentent pas de zone de séparation des écoulements sont présentes pour une variété de conditions d'écoulements et de transport (Kostaschuk et Villard, 1996).

Pour les dunes sans zone de séparation des écoulements, cette dernière est remplacée par des régions intermittentes d'inversion des flux (Best, 2002) ou dessus desquelles les vitesses d'écoulement seraient plus importantes et la turbulence plus faible (Kostaschuk, 2000).

DEPOT DE SEDIMENT DANS LE CREUX DES DUNES ET BYPASS

Les travaux en canaux artificiels réalisés par Bartberger et Hand (1988) *in* (Kostaschuk et Best, 2005) ont montré que la déposition est plus importante en aval de la dune, et plus précisément au sein du creux de dune, que sur sa face d'abris. Cela modifie le flanc doux, premièrement en augmentant sa longueur et deuxièmement en diminuant son angle de pente (Kostaschuk et Villard, 1996). Ce qui résulte en une crête de dune plus arrondie et un profil plus symétrique (Bartberger et Hand, 1988) *in* (Kostaschuk et Best, 2005).

D'après Kostaschuk *et al.* (2008), les dunes, en elles-mêmes, via leur morphologie favoriseraient le dépôt des sédiments au pied de leur zone d'abris. Au niveau de la face érosive l'écoulement est forcé, ce qui génère des flux positifs horizontaux et verticaux. A l'inverse, au-dessus du creux de dune et de la zone d'abris, les écoulements sont plus faibles et les flux négatifs, ce qui permet la déposition (Kostaschuk *et al.*, 2009).

Les expérimentations en laboratoire de Mohrig et Smith (1996) et sur le terrain de Kostaschuk *et al.* (2009) ont également permis de mettre en évidence qu'une partie des sédiments en suspension est bippassé et n'est pas déposé sur la face d'abris, mais sont transportés plus loin, au sein du creux de la dune. La part de grains qui est déposée sur le flanc doux et celle qui est bippassée dépend notamment de la gamme de taille des sédiments contenu dans la charge en suspension au niveau de la crête de dune (Mohrig et Smith, 1996).

Par exemple, les mesures de Mohrig et Smith (1996) en canaux artificiels ont montré qu'entre 3% et 60% du sable en suspension transporté au-dessus de dunes totalement développées n'est pas déposé sur la face d'abris et est donc bippassé. Leurs analyses en rivière naturel (rivière du Loup Nord) confirment ce phénomène. En effet, il s'est avéré 45% des sédiments transportés au-dessus de la crête de dune n'étaient pas capturés par la face d'abris, même si 99% des sédiments étaient transportés au sein des deux premiers centimètres au-dessus du lit.

Les travaux plus récents de Kostaschuk *et al.* (2009), au sein de la rivière Parana (Argentine) ont notamment montré que seulement 17% de la charge en suspension transportée au-dessus des dunes était déposée au niveau de la pente d'abris avant d'atteindre le creux. Soit, 83% de sédiments bippassés.

Pour conclure, le transport de sédiment affecte le profil de dunes et en particulier la steepness et l'angle de la pente de dépôt. Les travaux de Kostaschuk (2005), réalisés à partir de données provenant de multiples rivières sableuses (Fraser, Parana, Rhin...) permettent de résumer les différents morphologies des dunes (trois cas principaux) selon de mode de transport de sédiment (de fond et par suspension) et leur concentration. Le transport par suspension (q_s), le transport par charriage (q_b), la concentration des sédiments en suspension (cs) et de fond (cb) ont été estimés en utilisant les modèles de Van Rijn (1984).

- Lorsque le transport par charriage est dominant ($q_s/q_b < 3$ et $cs/cb < 0,0007$), la charge de fond est transportée au sommet et de la dune et s'accumule sur le haut de la face de dépôt. Elle tombe ensuite périodiquement par avalanche en bas de la face d'abris. Ces phénomènes augmentent la hauteur de dune et la *steepness* mais maintiennent aussi des pentes d'abris relativement fortes.
- **Lorsque le transport par suspension devient important ($3 < q_s/q_b < 7$ et $cs/cb > 0,0007$), les sédiments se déposent sur la face d'abris et dans le creux de dune. La *steepness* de la dune et l'angle de la pente d'abris diminuent. Une contrainte de cisaillement importante peut causer une érosion de la crête et réduire la hauteur de dune. L'augmentation de la concentration en sédiment près du lit dans la zone de séparation/déclaration des écoulements peut supprimer les turbulences et diminuer la hauteur de dune.**

- Lorsque le transport par suspension est largement majoritaire ($q_s/q_b > 7$), une augmentation de la steepness peut refléter une augmentation de la profondeur 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.

III.1.2 TRANSITION DES DUNES EN LITS PLANS DE HAUT NIVEAU ENERGETIQUE

On retrouve différentes formes du lit en fonction de l'intensité du régime d'écoulement (Figure 11). Les régimes d'écoulement faibles, avec un nombre de Froude inférieur à 1, permettent, pour des énergies croissantes, le développement des rides de courant, de dunes avec des rides superposées et enfin, de dunes entièrement développées (Naqshband, 2014). Les perturbations à la surface de l'eau sont de faibles amplitudes et sont en déphasage par rapport à la localisation des formes du lit.

Des conditions d'écoulement plus intenses (régimes transitoires), avec un nombre de Froude environ égal à 1 et avec un taux de transport de sédiment important, génèrent le balayement partiel des dunes formées préalablement. Enfin, en régime d'écoulement maximal, avec un nombre de Froude supérieur à 1, les dunes disparaissent entièrement et peuvent laisser place à un litage plan de haut niveau énergétique (*Upper Stage Plan Bed*). Enfin, des régimes d'écoulement croissants permettent le développement d'anti-dunes, et de zones d'alternances seuils mouille (Figure 11).

Tel que décrit précédemment, une concentration importante de sédiments en suspension couplée à des vitesses d'écoulement importantes provoquent des dunes plus symétriques et aplaties. Ces mêmes paramètres, à des intensités encore plus fortes, favoriseraient la transition des dunes en lit plan de haut niveau énergétique (Figure 11) (Johns, *et al.*, 1990; Naqshband, 2014).

C'est plus précisément quand le nombre de Froude augmente (aux alentours de 1) que les dunes sont délavées et évoluent en lit plan de haut niveau énergétique. Cette évolution est contrôlée par les effets de surface libre (viscosité, gravité) et le taux de transport de sédiment en suspension (Naqshband, 2014). Ces deux paramètres sont cruciaux dans la détermination des hauteurs et longueurs des dunes pendant leur transition (Naqshband, 2014).

Pour des écoulements avec des nombres de Froude importants, la transition des dunes en lit plan de haut niveau énergétique se réalise pour des concentrations en sédiments plus faibles que pour les écoulements avec des nombres de Froude bas (Naqshband, 2014).

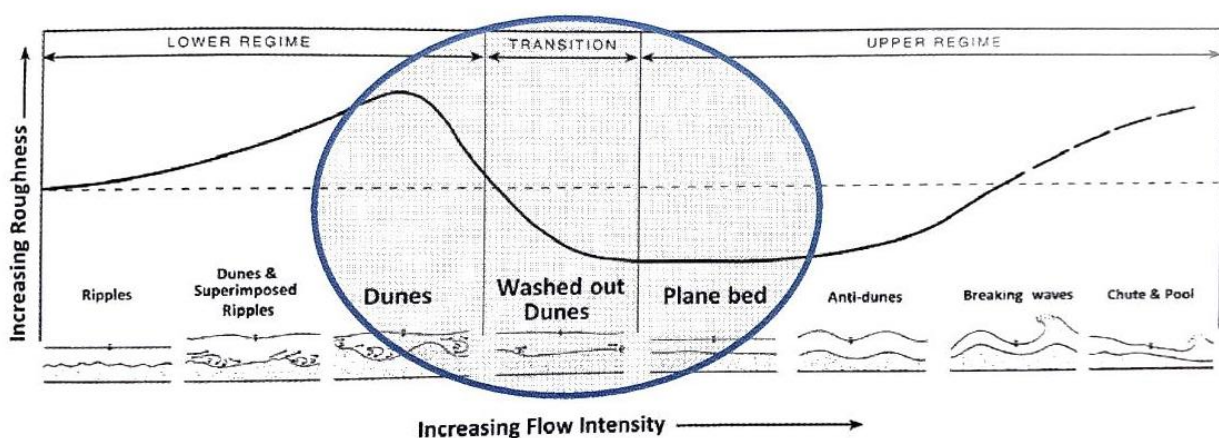


Figure 11 : Formes du lit et évolution de la rugosité du lit en fonction du régime d'écoulement observé pendant les expérimentations de Simons et Richardson (1966), ((Knighton, 1998) in (Naqshband, 2014))

Pendant la transition en lit plan de haut niveau énergétique, les taux de transport par charriage et par suspension augmentent progressivement. Le transport de sédiments en aval du point de rattachement des écoulements est, par la même occasion, renforcé (Bridge et Best, 1988). Simultanément, les écoulements turbulents, présents au sein du creux de dune, diminuent significativement. A l'inverse, les écoulements turbulents horizontaux présents près du lit et sur le dos des dunes croissent jusqu'à la formation complète des lits plans (Bridge et Best, 1988). L'accroissement du transport de sédiments près du point de rattachement apparait suite à la suppression des flux turbulents verticaux résultant de l'augmentation de la concentration en sédiment (Bridge et Best, 1988).

Enfin, les phénomènes de bypass des sédiments en suspension décrits dans la partie précédente joueraient un rôle notable dans l'évolution des dunes en lit plan de haut niveau énergétique (Naqshband, 2014).

III.2 EFFETS DE LA SUSPENSION SUR LA MORPHOLOGIE ET LA STABILITE DES BARRES SEDIMENTAIRES

Tel que pour les dunes, moins d'attention a été portée quant à l'effet de la suspension sur la dynamique et la morphologie des barres sédimentaires. La plus part des théories concernant l'instabilité des barres sont basées sur le transport par charriage. En outre, par rapport aux dunes, moins d'études ont été réalisées., la taille des barres sédimentaires et la complexité de leur étude en laboratoire et in situ étant des freins majeurs (Federici et Seminara, 2006). Cependant, la suspension impacte significativement la morphologie des barres et leur stabilité.

III.2.1. SUSPENSION ET VARIATIONS MORPHOLOGIQUES DES BARRES SEDIMENTAIRES

Crosato (2015) a étudié les effets du transport par charriage et par suspension sur les barres sédimentaires en laboratoires (canaux artificiels) et d'après des modèles mathématiques. Ses travaux ont montré, dans les deux cas, que les barres alternes forcées formées étaient plus aplaties lorsque le transport par suspension était dominant que lorsque le transport par charriage était majoritaire. Cependant, les barres sédimentaires développées, pour ces deux conditions, étaient de même longueur (Crosato, 2015). Ces résultats coïncident avec ceux de Federici et Seminara (2006) et Watanabe et Tubino (1992) in (Crosato, 2015).

D'après les travaux de Tubino, *et al.*, (1999), les barres libres tendent à devenir plus longues et moins larges lorsque la charge en suspension augmente. Cette variation morphologique peut être vue comme un effet stabilisant indirect de la charge en suspension puisque des barres plus longues permettraient le développement des barres libres.

Les barres de mi-chenal tendraient, elles, à s'élargir lorsqu'elle sont associées avec des grandes concentrations de sédiment en suspension au niveau de leurs extrémités morphologiques (McLelland, *et al.*, 1990). Cependant, en présence de grandes concentrations en sédiment en suspension à leur sommet, elles aspireraient alors à l'allonger (McLelland, *et al.*, 1990). Enfin, une concentration importante de sédiment en suspension au niveau de face d'érosion de la barre de mi-chenal étudiée par McLelland, *et al.*, (1990) au sein de la rivière Jamuna (Bengladesh) s'est traduit par le développement de dunes superposées.

III.2.2. LES EFFETS STABILISANTS ET DESTABILISANTS DE LA SUSPENSION SUR LES BARRES SEDIMENTAIRES

Lorsque le transport de fond est dominant, les barres sédimentaires résultent d'une instabilité du fond érodable (Colombini, *et al.*, 1987). L'instabilité des barres sableuses est convective quand les sédiments sont transportés majoritairement par charriage (Federici & Seminara, 2003). Cependant, il s'est avéré que la charge en suspension n'altère pas la nature de l'instabilité de la barre. Elle reste donc convective même quand une part significative des sédiments est transporté par suspension (Federici et Seminara, 2006).

La convection désigne l'ensemble des mouvements internes générés dans une masse fluide (liquide ou gaz) résultant d'une instabilité due à une différence de température ou de densité verticale ou horizontale (Futura-sciences, 2017). Dans le cadre des bancs alluviaux, l'instabilité est dite convective lorsque la perturbation initiale se déplace uniquement vers l'aval, l'écoulement n'est alors par perturbé. L'instabilité est dite absolue quand la perturbation initiale s'étale en aval et en amont et affectant par conséquence l'écoulement (Federici et Seminara, 2006).

Quand le transport de fond est dominant, le ratio d'aspect est le paramètre contrôlant l'instabilité des barres sédimentaires (Duró, *et al.*, 2016) de tel qu'une valeur critique du ratio d'aspect peut être déterminé pour un nombre donné du paramètre de Shield et de rugosité au-dessus de laquelle les barres devraient croître (Lanzoni et Tubino, 1999). Le mode alterne des barres étant le plus instable, les modes plus hauts prévalent pour des valeurs de ratio d'aspect supérieurs à la valeur seuil.

L'effet principal de la charge en suspension est de créer un déphasage entre la perturbation du flux de sédiment et la réponse du lit. Selon l'intensité du déphasage, la charge en suspension peut être stabilisante ou déstabilisante. (Tubino *et al.*, 1999).

EFFETS DESTABILISANTS

La suspension aurait tout de même un effet global déstabilisant. Fredsøe (1978) et Kuroki (1988) *in* (Lanzoni et Tubino, 1999) ont trouvé que le transport en suspension serait déstabilisant pour n'importe quelle valeur du paramètre de Shield. Ce qui favorise le développement des barres. Cela est en contradiction avec les résultats de Tubino *et al.*, (1999), suggérant que la suspension serait déstabilisante uniquement pour de grandes valeurs du paramètre de Shield.

En effet, Tubino *et al.*, (1999), ont étudié les effets de la suspension et du transport de fond sur la formation des barres libres, à l'aide de modèles numériques et mathématiques. Leurs travaux ont mis, premièrement, en évidence qu'une diminution du ratio d'aspect était associée avec une augmentation de la part de sédiment transportée par suspension. Deuxièmement, une augmentation du paramètre de Shield, serait à l'origine de la disparition des valeurs critiques du ratio d'aspect, qui ne serait donc plus le paramètre contrôlant l'instabilité des barres. La suspension induirait donc la suppression des barres alternes et favoriserait le développement de barre de mode plus haut, pour des valeurs relativement faibles de ratio d'aspect (Repetto, *et al.*, 1996) *in* (Lanzoni et Tubino, 1999). Il est probable que la suppression de la valeur critique du ratio d'aspect soit reliée à la diminution de la gravité, qui a un effet stabilisant sur les barres. Ce phénomène ne serait donc pas relié à la charge en suspension (Lanzoni et Tubino, 1999).

Les travaux de Watanabe et Tubino (1992) *in* (Lanzoni et Tubino, 1999) suggèrent que pour une taille de grain donné, un valeur seuil de la contrainte de Shield existe au-dessus de laquelle les perturbations des barres sont supprimées.

EFFETS STABILISANTS

La charge en suspension favorise également la stabilisation des barres libres. Lorsque la part de sédiment transporté par suspension (par rapport à celle de fond) augmente, le taux de croissance de la barre est uniquement déterminé par ce paramètre. Soit, l'instabilité de la barre est diminuée et les perturbations sont moins prononcées (Tubino, *et al.*, 1999). Cet effet serait crucial pour les barres ayant des longueurs d'ondes importantes. De plus, Seminara et Tubino (1989) ont, eux, montré que la déformation du lit est réduite lorsque le transport en suspension est dominant.

IV. SYNTHÈSE

L'objectif de ce mémoire est de faire un état de l'art premièrement sur les interactions entre les bancs alluviaux et les mégarides (en termes de résistance à l'écoulement, rehausse de la ligne d'eau et taux de transport solide) et deuxièmement concernant le rôle de la suspension sur la dynamique de ces corps sédimentaires, au sein des systèmes fluviaux sablo-graveleux. Bien que ce PFE tende à être le plus complet possible, il est probable que certains articles, auteurs ou autres traitant des mêmes sujets ne soient pas cités.

Il s'est avéré que peu d'études ont été, jusqu'ici, réalisées in situ au sein de systèmes sablo-graveleux. De plus, les travaux effectués en canaux artificiels ont été majoritairement réalisés lorsque l'un des modes de transport de sédiment était dominant. Ainsi, peu de données existent lorsque le transport de fond et par suspension sont de parts égales.

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.

IV.1. INTERACTIONS DUNES SUBAQUATIQUES ET BARRES SÉDIMENTAIRES

Finalement, il existe peu de travaux portant spécifiquement sur l'interaction entre les barres et les dunes, que ce soit en termes de résistance à l'écoulement, rehausse de la ligne d'eau ou encore de taux de transport solide. La plus part du temps, c'est l'étude de l'un ou de l'autre de ces corps sédimentaires qui permet de mettre en avant l'existence d'une interaction. Les travaux utilisés dans le cadre de ce mémoire concernant les interactions entre les barres et les dunes ont tous été réalisés in situ. Les expériences en laboratoire sont complexes étant donné la taille non négligeable des bancs alluviaux, leur mise à l'échelle en laboratoire est donc laborieuse.

Bien que la fusion des dunes ait été définie comme catalyseur pour le développement des barres sédimentaires par deux auteurs (Ashworth, *et al.*, 2000; Best *et al.*, 2003), leurs travaux in situ ont été réalisés au sein de la même rivière (Jamuna, Bangladesh), qui, de plus, est une rivière sableuse. Par conséquent, on ne peut pas prétendre que ce phénomène est commun à toutes les rivières à fond de lit sableux et encore moins aux rivières sablo-graveleuses (sujet principal de ce Projet de Fin d'Etudes). De plus, cette particularité a été uniquement observée (et non détaillée ou quantifiée) dans le cadre de recherches portant sur la création et le développement des bancs alluviaux. Les données concernant par exemple le nombre de dunes amalgamées, leurs dimensions, les taux de transport de sédiment associés ou autre sont inexistantes. Il serait par conséquent intéressant de réaliser des travaux portant exclusivement sur ce phénomène.

Claude (2012), Villard et Church (2005) ainsi que Wintenberger *et al.* (2015) suggèrent tous, suite à leurs travaux in situ, que l'apport en sédiment et sa disponibilité gouvernent davantage la morphodynamique des dunes superposées sur les barres migrantes que la hauteur d'eau. Ces conclusions sont avant-gardistes et récentes dans le domaine, la profondeur d'eau ayant toujours été définie comme le paramètre influençant le plus le développement des dunes. De plus, les travaux de Claude (2012) et Wintenberger *et al.* (2015) ont été réalisés au sein du même cours d'eau sablo-graveleux. Quant aux travaux de Villard et Church (2005), ils ont été réalisés au sein de l'estuaire de la rivière Fraser (Colombie Britannique) et donc dans des conditions particulières. En effet, cette rivière présente un lit sableux et est soumise aux marées. Ainsi, des études menant aux mêmes conclusions et réalisées au sein d'autres systèmes fluviaux sablo-graveleux permettraient d'appuyer davantage ce propos. Consciente de la complexité d'étude en laboratoire des barres sédimentaires, il pourrait être tout de même pertinent d'étudier plus scrupuleusement la relation

entre la morphologie des dunes superposées et l'apport en sédiment, sa disponibilité ou encore son transport.

Villard et Church (2005) ont également montré que pendant les hauts débits, la plus part du matériel sédimentaire stocké au sein des barres est transporté en association avec les dunes qui y sont superposées. Encore une fois, ces conclusions ont été tirées de leur étude in situ au sein de l'estuaire de la rivière Fraser. Par conséquent, rien ne prouve que ces processus sont identiques en systèmes fluviatile sablo-graveleux.

Bien que l'effet des dunes sur la hauteur d'eau soit reconnue, les modèles hydrauliques de prévisions des inondations ne prennent pas en compte le rôle joué par les corps sédimentaires et encore moins lorsque ceux-ci sont superposés. Les projets de recherche dans ce domaine sont récents (2013) et concernent pour l'instant uniquement les dunes subaquatiques. Des travaux de recherches concernant les dunes superposées et leurs effets sur la résistance à l'écoulement et la hauteur d'eau sont donc cruciaux, d'autant plus que les inondations sont des problématiques actuelles et futures majeures.

IV.2. IMPACTS DE LA SUSPENSION DANS LA DYNAMIQUE DES DUNES SUBAQUATIQUES

Une multitude de travaux existe quant au rôle de la suspension sur la dynamique des dunes subaquatiques. Qu'importe le type de travaux réalisés (in situ, en canal artificiel ou via des modèles mathématiques) et les diverses techniques de mesures utilisées, les auteurs s'accordent et se complètent quant à l'effet de la suspension sur la dynamique des dunes.

Cependant, les travaux in situ ont été réalisés au sein de cours d'eau à fond sableux tels que les fleuves Columbia, Fraser ou la rivière Jamuna (Bengladesh). Il serait donc judicieux d'étudier les effets de la suspension au sein d'un cours d'eau sablo-graveleux tel que la Loire. Cela permettrait d'analyser davantage le rôle de la suspension sur la dynamique des mégarides et particulièrement lorsque le transport par suspension n'est pas majoritaire. En effet, il est probable que le transport de fond amplifie ou amoindri les effets de la suspension.

Les travaux plus « quantifiés » de Kostaschuk (2005) sont à prendre avec précautions. Premièrement cette étude a été réalisée à partir de données provenant de divers cours d'eau (Fraser, Rhin, Paraná) présentant des conditions hydrauliques et sédimentaires qui leurs sont propres. Deuxièmement, les données 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. En outre, les diverses dunes étudiées présentent une grande variété morphologique (2D, 3D, symétriques, asymétriques, ou présence de formes secondaires superposées). Il pourrait donc être pertinent, dans le cadre d'une étude similaire de différencier les différentes morphologies. Il est en effet possible que les effets de la suspension fluctuent en fonction du type de dune. Enfin, l'aplatissement des dunes pourrait faire l'objet d'une étude à part entière, afin de déterminer si la charge en suspension est le seul paramètre influençant ce processus ou non.

Ce mémoire s'est focalisé sur les effets de la suspension sur la dynamique des dunes subaquatiques mais, d'autres liens existent entre la suspension et les mégarides. Par exemple, les phénomènes de turbulence (éjections, tourbillons) associés aux dunes asymétriques sont responsables de l'augmentation du transport en suspension au-dessus de leurs crêtes (Kostaschuk *et al.*, 2009; Shugar *et al.*, 2010). Quelques auteurs tels que Kostaschuk *et al.* (2009) ou encore Ramirez et Allison (2013) ce sont penchés sur la répartition des sédiments en suspension au-dessus des dunes et des champs dunaires. Ce topic pourrait faire l'objet d'un prochain Projet de Fin d'Etudes.

IV.3. IMPACTS DE LA SUSPENSION DANS LA DYNAMIQUE DES BARRES SEDIMENTAIRES

Le rôle de la suspension sur la dynamique des barres sédimentaires a été, jusque ici, beaucoup moins étudiée que pour les dunes subaquatiques et peu de ressources sont disponibles. Les principaux articles présentent des résultats issus de modèles mathématiques complexes.

Par exemple, Watanabe et Tubino (1992), Federici et Seminara (2006) et Crosato (2015) ont tous montré que la charge en suspension générait un aplatissement des barres sédimentaires. Cependant, Watanabe et Tubino ainsi que Federici et Seminara ont utilisé des modèles mathématiques. De plus, l'article de Watanabe et Tubino est en japonais et par conséquent seul le résumé a pu être exploité dans le cadre de cet état de l'art. Enfin, Crosato (2015) a tiré ses conclusions de travaux en laboratoire sur des barres alternes. Cependant, ils n'ont pas encore été publiés, seul un article de conférence est actuellement disponible. Enfin, concernant l'effet de la suspension sur la variation morphologique des barres à proprement parlé, seuls les travaux de Mclelland *et al.* (1990) ont été réalisés in situ au sein de rivière en tresse Jamuna (Bengladesh).

Les études concernant les effets de la suspension sur la stabilité des barres ont toutes été réalisées via des modèles numériques théoriques. En outre, l'article de Repetto *et al.* (1996) est en Italien et n'a pas pu être exploité entièrement.

Il y a donc un manque significatif de travaux in situ mais également en laboratoire concernant le rôle de la suspension sur les barres sédimentaires. Les études en laboratoires des barres sédimentaires sont coûteuses et complexes, ces dernières nécessitant beaucoup de sédiments pour leur développement. L'envergure des bancs alluviaux étant aussi une contrainte pour leur étude en canaux et in situ.

CONCLUSION

L'objectif premier de ce mémoire était, via un état de l'art, 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. Le second objectif était, quant à lui, d'appréhender le rôle de la suspension dans la dynamique des barres sédimentaires et des dunes subaquatiques.

Pour commencer, cette recherche bibliographique 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.

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. 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.

Enfin, 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.

Finalement peu d'études ont été, jusqu'ici réalisées in situ au sein de systèmes sablo-graveleux. De plus, les travaux effectués en canaux artificiels ont été majoritairement réalisés lorsque l'un des modes de transport de sédiment était fortement dominant. Ainsi, peu de données existent lorsque le transport de fond et par suspension sont de parts égales. 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. 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 les résultats coïncident et se complètent. Les barres ont fait l'objet de beaucoup moins d'intérêt. Les articles les concernant sont peu nombreux et quelque fois complexes ou inexploitable via leur langue de rédaction. Les recherches sur les barres sédimentaires et les interactions barres/dunes sont à approfondir et particulièrement en système sablo-graveleux.

INDEX

λ : Longueur d'onde des dunes

L : Longueur de dune

p : Hauteur d'eau

H : Hauteur de dunes

γ : paramètre de forme des dunes

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

C_b : Concentration moyenne en sédiment (1-porosité)

c : Taux de migration

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Morphologie des différents corps sédimentaires du lit (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)	3
Figure 2 : Schéma des différents modes de transport des sédiments au sein d'un chenal (Univ-Lyon, 2017).....	4
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)	6
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)	9
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)10	
Figure 10 : Résumé des étapes clés d'après Ashworth <i>et al.</i> , (2000) impliquées dans l'évolution d'une barre de mi-chenal au sein d'une rivière à fond sableux. L'orientation des dunes et les directions du courant proviennent des données de Roden (1998) et McLelland (1999)	13
Figure 11 : Valeurs calculées du transport par suspension $u_0=0,75\text{m/s}$ (a : Distribution initiale de la contrainte de cisaillement cinématique du lit, b : flux de sédiment vertical initial au niveau du lit, c :débit solide initial en suspension d : Morphologie du lit initial et après évolution) (Johns, <i>et al.</i> , 1990).....	18
Figure 12 : Formes du lit et évolution de la rugosité du lit en fonction du régime d'écoulement observé pendant les expérimentations de Simons et Richardsons (1966), ((Knighton, 1998) <i>in</i> (Naqshband, 2014)).....	20

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification des corps sédimentaires en fonction de leur dimensions (Ashley, 1990; Berné et al., 1989) <i>in</i> (Ferret, 2011)	3
---	---

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.
- Amsler, M. L., & Schreider, M. I. (1999). Dune height prediction at floods in the Parana River, Argentina. *River Sedimentation*, 615–620.
- 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>
- Bartberger, C., & Hand, B. (1988). Leaside Sediment Fallout Patterns and the Stability of Angular Bedforms. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58, 33–43.
- 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. (2002). An experimental study of turbulent flow over a low-angle dune. *Journal of Geophysical Research*, 107(C9), 3135. <https://doi.org/10.1029/2000JC000294>
- 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>
- Best, J. L., Ashworth, P. J., Bristow, C. S., & Roden, J. (2003). Three-Dimensional Sedimentary Architecture of a Large, Mid-Channel Sand Braid Bar, Jamuna River, Bangladesh. *Journal of Sedimentary Research*, 73(4), 516–530. <https://doi.org/10.1306/010603730516>
- Bhattacharya, B., Shams, M., & Popescu, I. (2013). On the influence of bed forms on flood levels, 12(5), 2151895.
- 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.
- Bridge J. S., & Best, J. L. (1988). Flow, sediment transport and bedform dynamics over the transition from dunes to upper-stage plane beds: implications for the formation of planar laminae. *Sedimentology*, 35(5), 753–763. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1988.tb01249.x>
- 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.

- Colombini, M., Seminara, G., & Tubino, M. (1987). Finite-amplitude alternate bars. *Journal of Fluid Mechanics*, 181(1), 213. <https://doi.org/10.1017/S0022112087002064>
- Crosato, A. (2015). Effects of suspended sediment on river bars, (August), 1–4.
- Duró, G., Crosato, A., & Tassi, P. (2016). Numerical study on river bar response to spatial variations of channel width. *Advances in Water Resources*, 93, 21–38. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.003>
- Einstein, H. A. (1950). The Bed-Load Function for Sediment Transportation in Open Channel Flows. *Soil Conservation Service*, (1026), 1–31.
- Federici, B., & Seminara, G. (2003). On the convective nature of bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 487(June), S0022112003004737. <https://doi.org/10.1017/S0022112003004737>
- Federici, B., & Seminara, G. (2006). Effect of suspended load on sandbar instability. *Water Resources Research*, 42(7), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2005WR004399>
- Ferret, Y. (2011). *Morphodynamique des dunes sous-marines en contexte de plate-forme mégalidale (Manche orientale). Approche multi-échelles sapo-temporelles*. Rouen.
- Fredsøe, J. (1978). Meandering and braiding of rivers. *Journal of Fluid Mechanics*, 84(4), 609. <https://doi.org/10.1017/S0022112078000373>
- 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>
- 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>
- Johns, B., Chesher, T. J., & Soulsby, R. L. (1990). The modelling of sandwave evolution resulting from suspended and bed load transport of sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 28(3), 355–374. <https://doi.org/10.1080/00221689009499075>
- Kleinhans, 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. (2000). A field study of turbulence and sediment dynamics over subaqueous dunes with flow separation. *Sedimentology*, 47(3), 519–531. <https://doi.org/10.1046/j.1365->

- 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>
- Kostaschuk, R., Best, J. L., Parsons, D. R., Lane, S. N., Hardy, R. J., & Orfeo, O. (2008). Suspended sediment transport over a dune, (April), 197–201.
- Kostaschuk, R., Shugar, D. H., Best, J. L., Parsons, D., Lane, S. N., Hardy, R. J., & Orfeo, O. (2009). Suspended sediment transport and deposition over a dune: Rio Parana, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(July), 155–161. <https://doi.org/10.1002/esp>
- Kostaschuk, R., & Villard, P. (1996). Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, 45(1), 849–863. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1996.tb01506.x>
- Lanzoni, S., & Tubino, M. (1999). Grain sorting and bar instability. *Journal of Fluid Mechanics*, 393, 149–174. <https://doi.org/10.1017/S0022112099005583>
- Lockett, S. (1983). Flume Experiments on Bedforms and Structures at the Dune-Bed Transition. In *Modern and Ancient Fluvial Systems*. The International Association of Sedimentologists.
- 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>
- Mohrig, D., & Smith, J. D. (1996). Predicting the migration rates of subaqueous dunes. *Water Resources Research*, 32(10), 3207–3217. <https://doi.org/10.1029/96WR01129>
- 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>
- Patel, M., & Kumar, B. (2013). Resistance predictor with bed forms in alluvial channel. In *International Conference On “Sustainable Innovative Techniques in Civil and Environmental Engineering.”* New Delhi.
- Ramirez, M. T., & Allison, M. A. (2013). Suspension of bed material over sand bars in the Lower Mississippi River and its implications for Mississippi delta environmental restoration. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 1085–1104. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20075>
- Reesink, A. J. H., & Bridge, J. S. (2009). Influence of bedform superimposition and flow unsteadiness on the formation of cross strata in dunes and unit bars - Part 2, further experiments. *Sedimentary Geology*, 222(3–4), 274–300. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.09.014>
- Reesink, A., Parsons, D., & Thomas, R. (2014). Sediment transport and bedform development in the lee of bars: Evidence from fixed and partially-fixed bed experiments. *River Flow 2014*,

- (September), 1179–1186. <https://doi.org/10.1201/b17133-158>
- Repetto, R., Tubino, M., & Zolezzi, G. (1996). Sulla formazione di barre fluviali in granulemetria fine. *XXV Convegnodi Idraulica E Costruzioni Idrauliche, Torino II*, 322–333.
- Roden, J. E. (1998). *The sedimentology and dynamics of mega-dunes, Jamuna river, Bengladesh*. University of Leeds.
- 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.
- Smith, J. D., & McLean, S. R. (1977). Spatially averaged flow over a wavy surface. *Journal of Geophysical Research*, 82(12), 1735. <https://doi.org/10.1029/JC082i012p01735>
- Tubino, M. (1991). Growth of alternate bars in unsteady flow. *Water Resour. Res.*, 27, 37–52.
- Tubino, M., Repetto, R., & Zolezzi, G. (1999). Free bars in rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 37(6), 759–775. <https://doi.org/10.1080/00221689909498510>
- Tuijnder, A. P., Ribberink, J. S., & Hulscher, S. J. M. H. (2009). An experimental study into the geometry of supply-limited dunes. *Sedimentology*, 56(6), 1713–1727. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2009.01054.x>
- 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. (2005). Bar and dune development during a freshet: Fraser River Estuary, British Columbia, Canada. *Sedimentology*, 52(4), 737–756. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2005.00721.x>
- Warmink, J. (2015). Comparison of Two Bed Form Models To Predict Bed Form Roughness for Flood Modelling. *36th IAHR World Congress*, (September), 1–6.

- Warmink, J. J. (2014). Dune dynamics and roughness under gradually varying flood waves, comparing flume and field observations. *Advances in Geosciences*, 39, 115–121. <https://doi.org/10.5194/adgeo-39-115-2014>
- Watanabe, Y., & Tubino, M. (1992). Influence of Bed Load on Suspended Load on Alternate Bar.
- Wintenberger, C. L., Rodrigues, S., Claude, N., Jugé, P., Béhérret, J. G., & Villar, M. (2015). Dynamics of nonmigrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France). *Geomorphology*, 248, 185–204. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.032>
- 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/>
- 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**

Barres sédimentaires et dunes subaquatiques : Interactions et rôle de la suspension dans leur dynamique

Résumé :

Ce projet de Fin d'Etudes avait pour objectif 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 d'appréhender le rôle de la suspension dans la dynamique des barres sédimentaires et des dunes subaquatiques. Il s'est avéré que la fusion des dunes favorise le développement des barres. Lorsque celles-ci sont superposées, c'est l'apport en sédiment et sa disponibilité, et non la profondeur d'eau, qui gouvernent en premier lieu leur morphodynamique. De plus, bien que les dunes augmentent la résistance à l'écoulement et la hauteur d'eau, ces processus ne sont pas encore pris en compte dans la prévision des inondations. Des études sont cependant en cours de réalisation. Le transport par suspension, lorsqu'il est majoritaire génère des dunes plus symétriques et aplaties. Pour des intensités plus fortes de transport et d'écoulement, les dunes sont délavées et transformées en lit plan de haut niveau énergétique. Enfin, le transport par suspension influence également la morphologie des barres et leur stabilité. Peu d'études se portent exclusivement sur les interactions entre les barres et dunes. C'est en général l'étude de l'une ou de l'autre de ces formes du lit qui permet de mettre en avant une interaction. Les dunes subaquatiques ont été largement étudiées via diverses méthodes (in situ, en canal artificiel, théories mathématiques). Les différentes recherches coïncident et se complètent. Ce n'est pas le cas pour les barres sédimentaires, qui ont fait l'objet de moins d'attention. Peu de travaux existent et sont exploitables. Les recherches sur les barres sédimentaires et les interactions barres/dunes sont à approfondir et particulièrement en système sablo-graveleux.

Mots Clés : Barres sédimentaires, dunes subaquatiques, transport de sédiment, suspension, dunes superposées, dunes superposées