

SOMMAIRE

Avertissement	ii
Formation par la recherche.....	iii
Remerciements	iv
Table des tableaux.....	v
Table des figures.....	v
Sommaire	1
I. Introduction et problématique.....	2
II. L'étude des interactions en fonction du domaine d'étude	3
II.1 En domaine fluvial	3
Sédimentologie.....	3
Hydraulique	4
Morphodynamique.....	7
II.2 En domaine marin	8
Zone de déferlement et de haut-fond.....	8
Etude dans une Baie.....	9
Zone deltaïque et estuariennes.....	9
III. Le protocole d'étude des interactions.....	11
III.1 Etude en modèle physique.....	11
III.2 Etude en modèle numérique.....	12
III.3 Observations de terrain.....	12
III.4 Etude théorique.....	13
IV. Les différents types d'interaction observées	14
IV.1 Interactions entre des structures sédimentaires d'échelle similaire	14
IV.2 Interactions entre des structures sédimentaires d'échelle différente	15
Rides - dunes et petites dunes - dunes	17
Interactions méga-rides - dunes et ride - méga-rides.....	19
Interactions avec les barres.....	19
V. Synthèse	20
VI. Conclusion	26
VII. Bibliographie.....	27

I. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Des formes et structures sédimentaires sont observables dans le lit des systèmes fluviaux. Ces formes se créent par le transit des grains qui constituent la charge de fond. On distingue trois types de corps sédimentaires : les microformes de petite taille qui regroupent principalement les rides et méga-rides ; les méso-formes dont la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la profondeur d'eau, qui regroupent les dunes ; et les macro-formes dont les longueurs d'ondes sont du même ordre que la largeur du chenal, regroupant les barres sédimentaires (Jackson, 1975). Une ambiguïté de grandeur peut apparaître entre des grandes dunes et des barres. Les dunes ont une taille qui est fonction de la couche limite turbulente, approximé par la hauteur du cours d'eau, les barres sont quant à elles proportionnelles à la largeur du cours d'eau (Jackson, 1975). En effet les critères de classification selon Jackson (1975) s'appuient principalement sur le régime hydrologique et les conditions au niveau de la couche limite turbulente. A la différence, les critères de classification de Ashley (1990) s'appuient sur la structure des formes et leurs tailles, sur la présence ou non de superposition (si les formes sont simples ou composées), sur la taille des sédiments et enfin sur le comportement de la structure et des caractéristiques d'écoulements.

Ces structures sédimentaires sont des corps dynamiques qui s'adaptent continuellement, de façon plus ou moins rapide, aux variations des conditions hydro-sédimentaires (Reesink et al., 2018)

Généralement les barres sédimentaires servent de substrat pour la migration des formes superposées (Ashley, 1990). De nombreuses études ont montré que les superpositions des formes du lit sont présentes dans la grande majorité des rivières et fleuves indépendamment des variables hydrauliques (Roden, 1998 ; Harbor, 1998 ; Parsons et al., 2005). D'autre part il apparaît que les dunes sont des formes de lit omniprésentes dans les chenaux fluviaux (Best, 2005). Leur présence influence considérablement la nature et l'activité de l'écoulement ainsi que la turbulence et exerce en conséquence un fort contrôle sur l'entraînement, le transport et le dépôt des sédiments (Parson, et al., 2005).

Les formes du lit et les superpositions sont une source de rugosité et entraînent une résistance à l'écoulement (Van Rijn, 1994). Par conséquent ces différentes formes interagissent entre elles, et l'évolution des formes et structures sédimentaires sont influencées par celles présentes en amont.

Il y a une controverse concernant les raisons de l'apparition des superpositions des dunes sédimentaires. Il se pourrait que ce soit le résultat d'un retard dans la migration de certaines dunes ou encore un état d'équilibre des dunes (Gabel, 1993).

La revue bibliographique a été orientée suivant différents axes afin de rendre compte des différentes manières d'appréhender les interactions entre les formes du lit dans la littérature.

Dans un premier temps, il apparaît pertinent de classer les références bibliographiques en fonction des différentes disciplines au travers desquelles ces interactions sont étudiées.

Dans un second temps, il semble opportun d'organiser les publications en fonction du protocole qui permet de rendre compte de ces interactions.

Enfin, le type d'interaction et l'échelle des différentes formes du lit semble un critère essentiel permettant de mettre en lumière d'éventuelles lacunes dans la littérature et de finaliser cette synthèse quantitative.

Ce travail s'intègre dans la thèse de Jules Le Guern dont l'objectif est de comprendre les interactions entre les différentes formes du lit d'un cours d'eau sablo-graveleux. Cette thèse fait partie du projet R-TEMUS (Restauration du lit et Trajectoire Ecologiques, Morphologiques et d'Usages en Basse Loire) financé par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et l'Union Européenne (FEDER).

II. L'ÉTUDE DES INTERACTIONS EN FONCTION DU DOMAINE D'ÉTUDE

Cette première partie a pour but de présenter les principaux domaines d'étude au travers desquels les interactions sont étudiées.

Ces différentes approches (via le domaine du transport sédimentaire, de la sédimentologie, de la morphodynamique, de l'hydrologie, en milieu fluvial ou marin) confèrent des visions particulières à chaque domaine.

Dans cette partie seront uniquement présentés les domaines majoritairement abordés dans la littérature actuelle.

II.1 En domaine fluvial

Sédimentologie

Le domaine de la sédimentologie fluviale regroupe l'étude de l'ensemble des processus d'érosion, de transport, et de dépôt qui interviennent sur les formations sédimentaires (récentes ou passées) au sein des cours d'eau. C'est un domaine qui est de manière homogène à la fois étudié en modélisation physique mais aussi en études sur le terrain. Les auteurs étudient la formation des formes en fonction des apports sédimentaires, ou de la granulométrie ainsi que la structure des formes. Plusieurs techniques sont mises en place comme par exemple le GPR (Ground Penetrating Radar) utilisé par Reesink & Bridge (2011) notamment. Ces écrits étudient la nature et l'influence des sédiments sur la formation des structures sédimentaires. Par exemple Reesink & Bridge (2007) ont montré que les formes de lit superposées les plus hautes présentent des inclusions de graviers dans la stratification, mais les formes de lit superposées les plus petites sont composées de gravier sablonneux. Selon eux, un tri granulométrique se produit lors de la formation des structures sédimentaires (Figure 1).

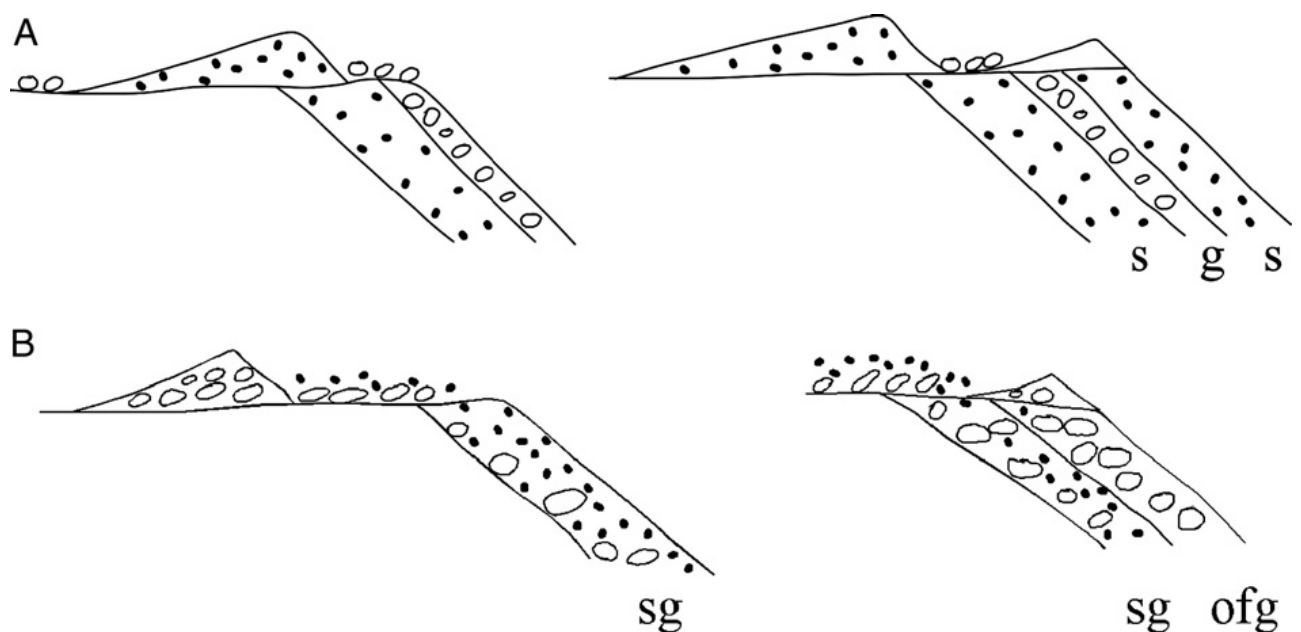


Figure 1 : Tri granulométrique dans les barres unitaires résultant du tri granulométrique des dunes superposées. S : sable, g : gravier, sg : sableux et gravier à structure et ofg : gros gravier (Reesink & Bridge, 2007)

Dans un autre ouvrage, Reesink & Bridge (2009), se sont aussi intéressés au grano-classement des strates. Ils ont déterminé principalement que les formes de lit superposées et l'instabilité à long terme du débit liquide et du transport sédimentaires entraînaient l'apparition de sédiments prétriés au point d'affleurement. (Figure 2).

Le tri vertical des sédiments a aussi été étudié par Kleinhans (2004), ce tri est la cause de l'irrégularité des dunes. En effet il entraîne l'apparition de couches grossières résistantes à l'érosion qui diminuent ou inhibent l'affouillement des dunes. Dans d'autres cas des affouillements profonds apparaissent sur les dunes et une mobilité des sédiments est observée au niveau de ces creux.

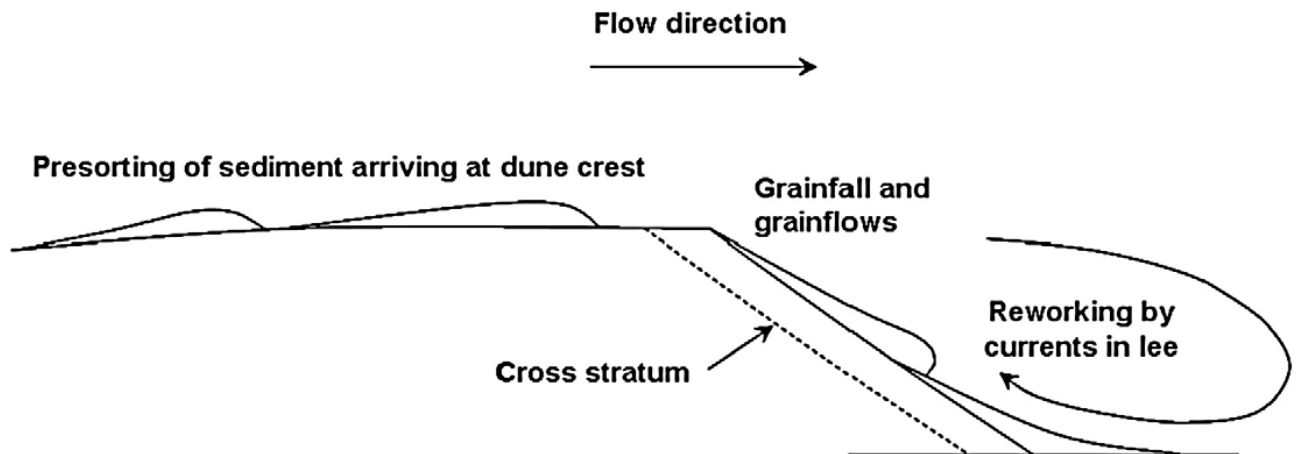


Figure 2 : Facteurs impliqués dans la formation des strates croisées (Reesink & Bridge, 2009)

Une autre approche de l'étude des superpositions des structures sédimentaires a été réalisée par Guy et al., 1966. L'objectif de cette étude était d'obtenir des valeurs moyennes de paramètres de résistance et de transport correspondant à des conditions retrouvées dans les cours d'eau naturels et artificiels. Ils ont observé l'apparition de formes superposées, et celles-ci indépendamment de la taille des grains ou de la largeur du modèle.

De plus il semblerait qu'il y ait une érosion préférentielle et un transport des gros grains sur les faces aval des dunes. Ceci entraîne une ségrégation granulométrique dans les barres transversales (des barres qui sont situées au bord du chenal, qui peuvent s'assimiler à des barres de méandre) sur lesquelles des dunes et des rides se superposent (McCabe & Colin, 1977)

Enfin, d'après Reesink et al. (2014) la superposition des formes de lit se produit lorsque les formes de lit de l'hôte sont longues par rapport à la vitesse au-dessus de la crête.

Hydraulique

L'étude des interactions du point de vue des contraintes du milieu, plus précisément des conditions hydrauliques regroupe les données en lien avec les débits, les hauteurs d'eau et la dynamique des formes sédimentaires en fonctions des conditions hydrologiques

Les formes sédimentaires jouent un rôle dans les écoulements d'un chenal. Par exemple les dunes sont des formes de lit omniprésentes dans les chenaux fluviaux et leur présence influence considérablement la nature de la structure d'écoulement moyenne et turbulente et exerce par conséquent un fort contrôle sur l'entraînement, le transport et le dépôt des sédiments (Parson, et al., 2005).

Best (2005) s'est intéressé aux écoulements à proximité des dunes et des rides. Il a observé des modifications des vitesses d'écoulement (accélération et décélération) au niveau des dunes. Une force s'applique sur la crête de la dune entraînant une traînée de forme qui s'ajoute à la rugosité des grains et à la morphologie de la dune ce qui entraîne enfin une élévation de la résistance à l'écoulement. D'autre part la contrainte de Reynolds est maximale (ce qui implique un charriage plus important et des échanges entre la lame d'eau en aval) lorsqu'il y a superposition de formes sédimentaire (expérience B figure 3).

Des observations similaires ont été réalisées par Reesink & Bridge (2007). Ils ont regardé l'effet de la variation de la vitesse sur la formation de petites dunes (ou rides) en aval d'une barre. Lors que les vitesses sont élevées sur les barres sédimentaires, les grains se déplacent plus aval de la barre que lorsque les vitesses sont plus faibles. Ainsi le dépôt de sédiments se faisant plus loin en aval des barres lors de vitesses importante il apparait que plus la vitesse augmente sur les barres plus les formes sédimentaires (rides et /ou dunes) se forment loin en aval de la barre.

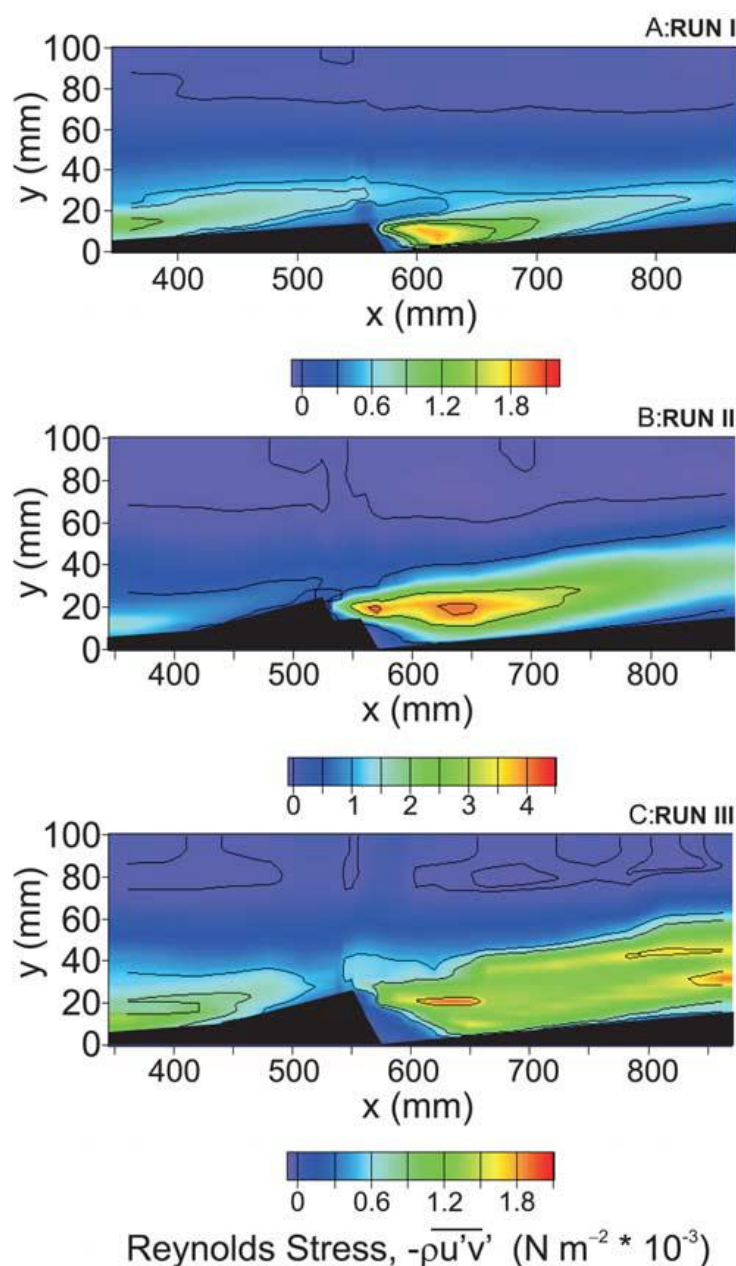


Figure 3 : Evolution de l'intensité de la contrainte de Reynolds en fonction de trois formes de lits : A : rides ; B : rides sur lesquelles sont superposées des plus petites rides ; C : dunes (Best, 2005 ; à partir de Fernandez 2001).

Fourrière et al. (2010) ont étudié la topographie du fond pour visualiser les effets sur les écoulements. Ils ont observé que les méga-dunes se forment lorsque le fond du cours d'eau présente des hétérogénéités, caractérisé par une distribution granulométrique étendue. La formation de rides est contrôlée par la taille des grains du cours d'eau et la formation de dunes par la profondeur d'eau, elle est donc limitée par la surface libre.

Fernandez et al. (2006) ont montré que la fusion des formes de lit qui a lieu lors de crue, induit un état de lit superposé. Ceci provoque une série de changements au niveau de l'écoulement, des contraintes de Reynolds plus élevées, traduisant des écoulements turbulents caractérisés par des échanges dans la lame d'eau de façon latérale, longitudinale et verticale. Ainsi la superposition d'une forme plus petite sur la face aval d'une forme plus grande modifie la structure de l'écoulement sur la face amont par l'interaction des deux couches limites associées à la séparation de l'écoulement (Figure 4).

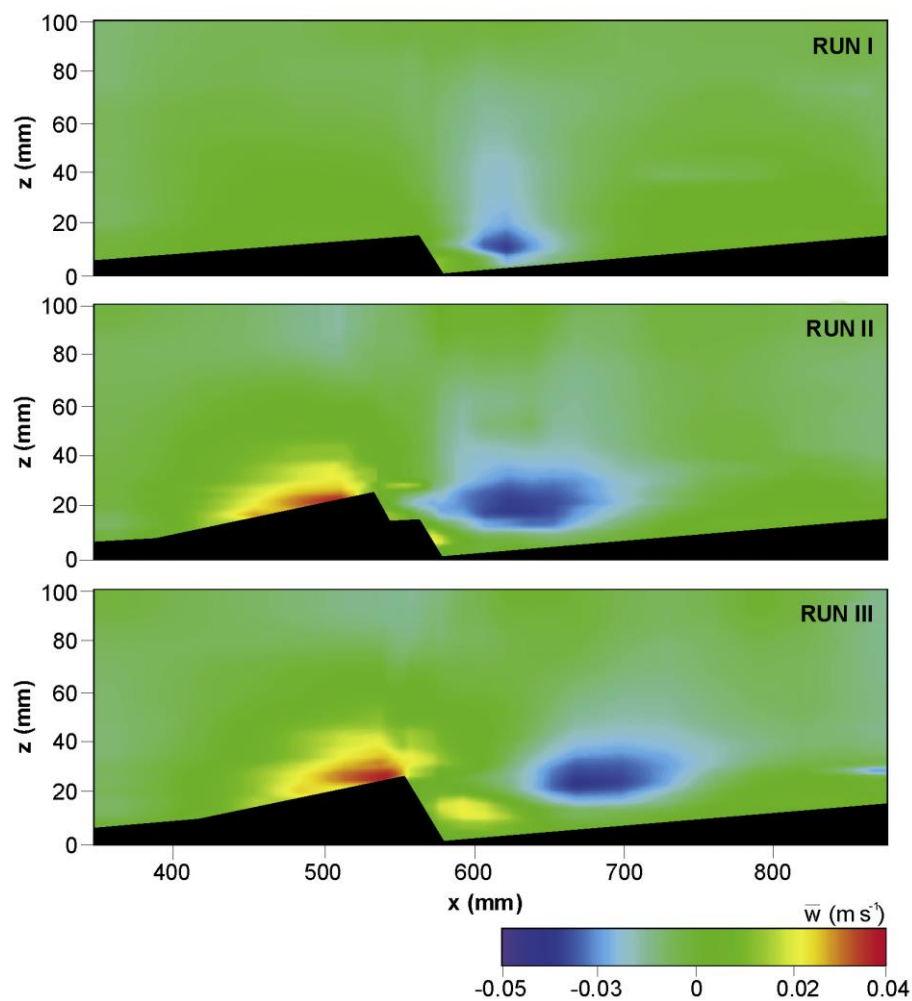


Figure 4 : Influence de la superposition sur les vitesses au niveau de la face amont de la structure hôte (Fernandez, 2006)

Certains auteurs ont étudié les écoulements en lien avec la formation des structures sédimentaires et des superpositions (Venditti & Church, 2005 ; Wilbers & Ten Brinke, 2003 ; Ten Brinke et al., 1999).

Il apparaît que le contrôle de la migration des formes du lit est déterminé par la superposition de plus petites formes sur celles-ci (Venditti & Church, 2005).

D'autre part la migration des dunes n'est pas uniquement influencée par les structures sédimentaires superposées sur celles-ci mais aussi par les phénomènes de crues. A la fin d'une crue, les conditions d'écoulement sur les dunes longues et de faibles hauteurs deviennent favorables pour les dunes plus courtes et plus raides superposées aux dunes longues. Les longues dunes primaires sont entièrement recouvertes de

ces dunes secondaires plus petites. Une fois cela fait, les dunes secondaires en migration représentent toute l'activité de transport de la charge de fond et sont les seules formes qui influencent la rugosité hydraulique (Wilbers & Ten Brinke, 2003). Il semblerait ainsi que la crue soit un facteur influençant l'apparition de petites formes superposées. Cette idée est aussi développée chez Ten Brinke et al. (1999), en effet les variations de débit jouent un rôle dans les hauteurs des grandes et petites dunes. Une réponse s'établit entre le débit et la présence des dunes. Ainsi des structures se superposent lors des épisodes de crues et plus le phénomène de crue est important plus la taille des formes créées sera grande (Ten Brinke et al., 1999).

Morphodynamique

La morphodynamique regroupe l'ensemble des écrits qui s'intéressent à l'influence de la dynamique sédimentaire, des interactions entre le mouvement du lit et du fleuve et à l'impact de la couche laminaire sur la dynamique des structures sédimentaires. D'une manière générale le domaine de la morphodynamique consiste en l'étude de la morphologie du cours d'eau.

Carling et al. (2000) ont observé que les dunes se forment dans des conditions hydrauliques particulières. La réduction de la profondeur au niveau des crêtes des dunes, mais aussi la longueur de déplacement permis par la pente de la dune provoque le développement de dunes secondaires. Il y a donc développement de deux populations de dunes (Figure.5). Des dunes considérées comme petites (1-6m) et des dunes considérées comme grandes (15-65m) (Figure 5).

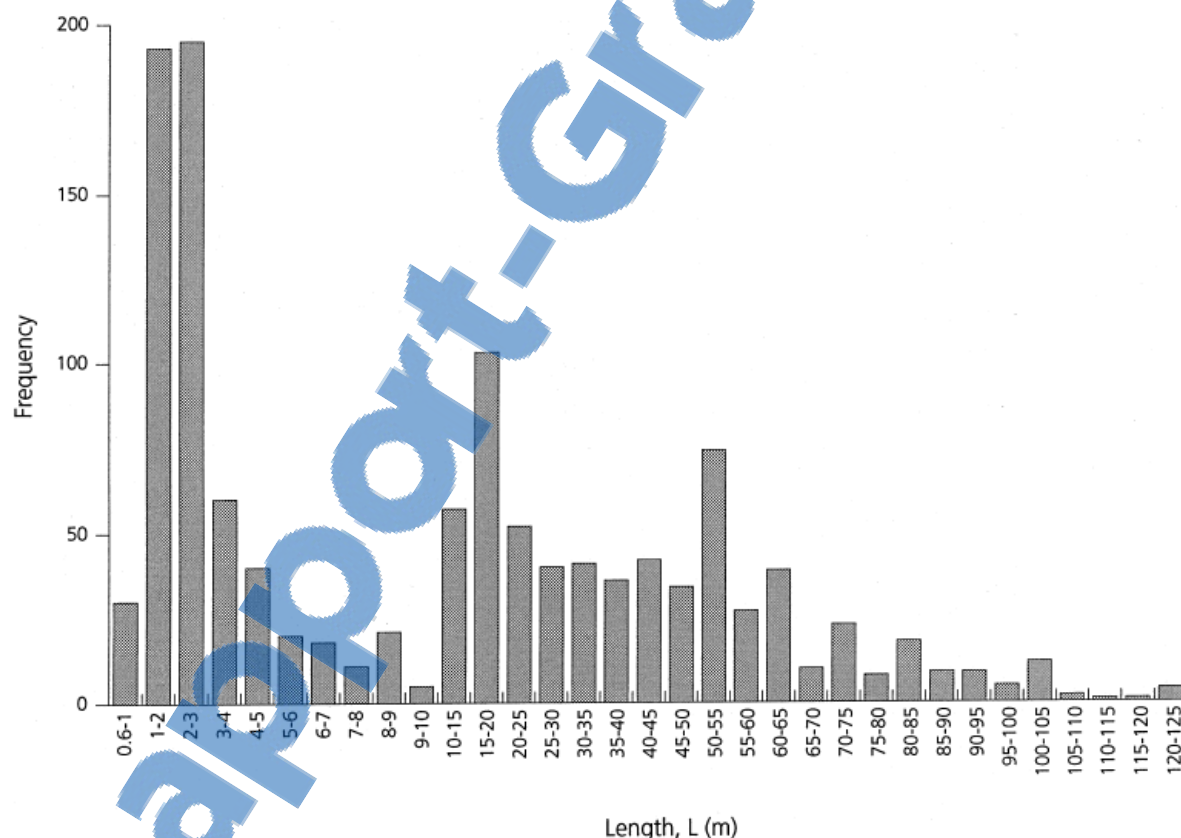


Figure.5 : Histogramme représentant fréquence d'apparition des longueurs des dunes sur le Rhin entre 1991 et 1995 entre les km 505 et 507, (Carling, Golz, Orr, & Radecki-pawlik, 2000)

De nombreuses formes du lit se transforment lorsqu'elles migrent. La vitesse de migration des formes de lit est à peu près inversement proportionnelle à la taille des formes de lit, ainsi les formes de lit plus petites et plus rapides dépassent les formes de lit plus lentes et plus grandes et se fondent dans celles-ci (Kocurek,

Ewing, & Mohrig, 2010). Aussi, lors des migrations des dunes un échange de volume de sédiments s'établit entre les deux formes en mouvements.

D'autre part Jerolmack & Mohrig (2005) ont montré que l'espacement entre les formes sédimentaires joue un rôle dans l'interaction entre ces formes. Dans tous les cas, les formes de lit hautes et raides se déforment rapidement en réponse à l'augmentation de la hauteur d'eau. Le débit imposé et la façon dont les formes de lit sont ajustées sont fortement influencés par l'espacement initial. Les taux de variation de la taille et de la forme du lit sont sensibles à la topographie locale. Ainsi selon Jerolmack & Mohrig (2005), l'interaction entre les formes de lit dépend fortement des variations d'écoulement induites par la topographie et de la taille des grains.

Wilbers (2004) émet l'hypothèse que le développement de petites formes sur des plus grandes peut être dû à la modification de l'écoulement par la plus grande forme, qui augmente la rugosité de fond, de telle manière que des formes plus petites peuvent se développer sur son dessus. Ainsi la forme superposée ne recouvre que la face amont de la plus grande dune.

Dans tous les cas il apparaît que la superposition affecte le développement des dunes, le transport sédimentaire et l'hydraulique à proximité du fond.

II.2 En domaine marin

Bien que le sujet de thèse de Jules LeGuern s'intéresse aux dynamiques fluviales, l'étude des interactions dans le domaine marin est intéressante, car il permet une compréhension plus approfondie de l'origine et des conditions régnants lors de la superposition de grandes formes. C'est une dynamique différente car le fond du lit subit l'influence des vagues et des marées.

Il est à noter que le terme " onde de sable " est couramment utilisé dans ce domaine pour désigner les formes de lit transversales qui sont suffisamment grandes pour que des méga-rides s'y superposent (Dalrymple, 1984). Elles apparaissent abondamment dans les milieux littoraux et les zones tidales. Ces ondes de sable s'apparentent à des rides dans les fleuves, et ce qu'on appelle rides en milieu marin sont des ondes de sable fossilisées.

Un certain nombre d'auteurs se sont intéressés aux dynamiques sédimentaires se produisant en milieu marin. Ils ont pour la majorité étudié les mouvements des formes du lit et les vitesses de déplacement.

En effet, Winter et al., (2008) ont étudié le mouvement des formes du lit. Les plus petites formes changent de position en fonction du courant, tandis que celle sur lesquelles elles sont superposées restent stables. Le mouvement créé par les vagues entraîne une dynamique particulière.

Zone de déferlement et de haut-fond

Miles et al., (2014) ont étudié le développement des structures sédimentaires dans les zones de déferlement et de hauts-fonds d'une plage de sable macro tidale. Ils ont observé que la superposition de rides sur des méga-rides augmente de 35% la rugosité du fond. Ils se sont aussi intéressés à la direction et aux vitesses de migrations des structures. Le taux de migration des structures est lié à la direction du débit et à l'orientation des vagues. Lorsque le débit est dirigé vers le large, dans la zone de déferlement qui crée un contrecourant, la migration des structures est fortement ralentie et inversement lorsque le débit est orienté vers la terre.

Etude dans une Baie

L'influence des méga-rides a aussi été montrée par Dalrymple (1984). Il a étudié l'occurrence et le déplacement des formes du lit en milieu marin (dans une baie). Il a observé l'influence des marées sur les formes sédimentaires et a montré que les méga-rides jouent un rôle central dans la dynamique des migrations des ondes de sables et entraînent une certaine cyclicité de la translation des structures. En effet l'arrivée d'une crête de méga-rides au bord de l'onde de sable provoque une migration rapide vers l'aval.

Rubin & McCulloch (1980) ont étudié dans la baie de San Francisco les conditions de l'existence hydraulique sous lesquelles le lit de la baie existe. Ils ont observé que la configuration du lit en tout point de la baie est fonction de la vitesse locale, de la taille des sédiments et de la profondeur. La superposition des formes entraîne des variations verticales des vitesses. D'autre part ils ont observé que les fluctuations saisonnières et marémotrices de la vitesse sont plus destructrices pour les ondes de sable à grain plus fin, car ces dernières sont stables dans une plage de vitesses relativement étroite. Ils ont aussi comme de nombreux auteurs observés que les rides et les vagues de sable sont couramment superposées aux plus grandes formes de lit. En effet ils expliquent que de petites formes de lit peuvent exister en équilibre sur les formes de lit plus grandes parce que les grandes formes de lit génèrent des couches limites dans lesquelles les petites formes de lit se trouvent localement stable. Enfin ils ont montré que la répartition des petites formes de lit superposées à des formes de lit plus grandes est le reflet des variations latérales et verticales de la vitesse de cisaillement de l'écoulement sur de grandes formes de lit.

Zone deltaïque et estuariennes

Coleman (1968) a étudié le plus grand delta du monde issu de la combinaison du Ganges et du Brahmapoutre. Cette zone est très largement drainée et les rivières sont également fortement chargées en sédiments, transportant environ 13 millions de tonnes de sédiments en suspension par jour pendant les inondations. Le débit important et la forte charge sédimentaire rendent les rivières extrêmement instables et les chenaux migrent constamment latéralement. Dans son ouvrage la création des structures est étudiée lors des forts épisodes de crue. Comme déjà observé par d'autres auteurs (Wilbers & Ten Brinke, 2003 ; Ten Brinke et al., 1999) les grandes barres de sable, situées à la fois au milieu du chenal et latéralement par rapport à la ligne de rive, se forment lors des épisodes de crues. Toutefois à la différence des chenaux, les structures ici ne sont pas détruites lors de la décrue car il y a un apport en sédiment important. D'autre part il y a un déplacement du thalweg lors de la décrue et le banc de sable nouvellement formé reste intact.

L'influence des crues a aussi été étudiée par Villard & Church (2005). Les dunes et les barres sont omniprésentes dans les rivières et les estuaires sablonneux. Ils ont étudié l'influence des crues sur les dépôts sédimentaires, dans la zone deltaïque du Fraser, influencé par les marées semi-diurnes qui ont une amplitude moyenne à l'embouchure de 2.6m (des extrêmes allant jusqu'à 5.4m). Il apparaît une diminution systématique du taux de dépôt pendant la crue, le dépôt le plus rapide se produisant bien avant le pic du débit. Il est intéressant de noter que cela correspond à la période précédant le développement d'un vaste champ de formes de lit. Lors de la décrue ils ont observé que les dunes plus petites se sont déplacées hors du chenal principal de l'autre côté de la barre, remplaçant les dunes plus grandes vers l'aval, et les plus grandes dunes observées dans le chenal ont été superposées sur la barre lors des crues. Ainsi l'hypothèse selon laquelle de grandes dunes se forment en association avec une aggradation persistante repose sur le fait que les dunes associées à la barre restent grandes après le sommet de la crue, tant que le dépôt sur la barre se poursuit (Villard & Church, 2005). Ils ont aussi montré que les sédiments en suspensions sont fonction de la traînée de forme induite par les dunes.

Tableau 1 : Synthèse des interactions observées en fonction du domaine d'étude.

Domaine d'étude

Sédimentologie :

- Le tri granulométrique → différence de rugosité → influence la superposition des formes sédimentaires.
- Taille des grains (donc le type de lit d'une rivière) → influence la nature des formes sédimentaires.

Hydraulique :

- Ecoulements influencés par la nature des structures sédimentaires présentes sur celui-ci.
- Phénomènes de crues → apport sédimentaire → rôle clé dans la superposition des formes.

Morphodynamique :

- Topographie et taille des grains → entraîne des variations d'écoulements.
- Superpositions de structures → affecte le développement des dunes, le transport sédimentaire et l'hydraulique à proximité du fond.

Marin :

- *Marée* → alimente les formes de lit.
- *Vagues* → génèrent des courants → *influencent les vitesses de déplacement des formes.*

III. LE PROTOCOLE D'ETUDE DES INTERACTIONS

Dans cette partie les quatre protocoles d'études employés par les auteurs vont être présentés. L'objectif étant de d'observer si l'étude des superpositions dans la littérature est plus souvent réalisée en laboratoire (modèle physique) ou in-situ.

III.1 Etude en modèle physique

L'approche par un modèle physique correspond à 1/3 des méthodes employées pour l'ensemble de la littérature recensée dans cette étude. Un des avantages à réaliser l'étude des interactions à l'aide d'un modèle physique est de pouvoir faire varier un certain nombre de paramètres. Guy et al., (1966) ont réalisé plusieurs expériences dans un canal de recirculation en faisant varier le diamètre des sédiments (de 0.19mm à 0.54mm) et la largeur du canal (de 0.6m à 2.4m). Cette approche avait pour but de déterminer les effets de la taille des matériaux se trouvant dans le lit, et l'impact des sédiments fins dans l'écoulement sur les variables hydrauliques et de transport. Ainsi une approche par modèle physique permet d'améliorer la compréhension de processus physiques en rivières.

Toutefois il peut y avoir des différences d'échelles entre les modèles physiques et la réalité. En effet il a été démontré par Kleinhans (2004) que la cause des irrégularités des dunes et la rétroaction des sédiments grossiers est en partie liée au contexte expérimental (les conditions d'alimentations ou de recirculation des sédiments). D'autre part d'après Reesink et al., (2014) la compréhension du développement des formes de lit superposées repose sur l'étude du développement des formes de lit sur des lits plats à écoulement uniforme et ne décrit pas adéquatement le développement des formes de lit dans des écoulements nettement non uniformes et dans des zones à circulation secondaire à grande échelle. Aussi dans les résultats de Winter et al., (2008) des calculs préliminaires de morphodynamique montrés sont limités par les coûts de calcul et manquent d'une dynamique de forme de lit réaliste.

Par ailleurs les interactions entre les formes sédimentaires observées sont idéalisées et traitées de manière isolée en comparaison avec les interactions dans un milieu naturel (Kocurek et al., 2010). En effet dans un milieu naturel la configuration est complexe car il y a une mosaïque des formes, des interactions à des étapes de développement variées et des interactions multiples au niveau d'une même forme. Dans certains cas le modèle physique ne permet pas de reproduire les mêmes conditions qu'en rivières naturelles. Dans les expériences de Tuijnder et al., (2009) il n'y a pas eu de variation de la taille des sédiments. Or les dimensions des formes sédimentaires dépendent généralement de la taille des grains. Ainsi cela n'a pas permis de déterminer si la géométrie des formes de lit, lors d'un apport limité en sédiments, dépend du diamètre des grains de la couche immobile.

De plus les conditions d'écoulement en modèle physique sont contrôlées et réalisées en régime permanent. Ainsi les conditions naturelles de crues ayant une influence sur la superposition ne peuvent pas être réellement observées en laboratoire.

Enfin en fonction du phénomène que l'on observe, les applications en milieu naturels sont plus ou moins pertinentes. McCabe et al. (1977) ont étudié les formations des structures sédimentaires au niveau de deltas, Or les observations d'un delta dans un canal artificiel ont peu d'intérêt pour l'étude des deltas naturels. C'est pourquoi cette étude porte sur les conditions présentes sur le dessus du delta qui ne sont pas affectées par les conditions du bassin.

Toutefois les biais de la modélisation physiques peuvent être évités comme le montrent Reesink & Bridge (2007). En effet en raison de la taille des canaux et des coefficients de proportionnalité les expériences en canaux de recirculation peuvent être à échelle réelle. Ainsi le débit, le transport des sédiments et les formes du lit sont représentatifs des cours d'eau naturels avec des profondeurs d'écoulement relativement faibles et un débit sous-critique.

III.2 Etude en modèle numérique

Concernant la modélisation numérique, c'est une méthodologie encore très peu utilisée pour l'étude des interactions. Seulement deux études présentent des modélisations numériques.

La première a été réalisée par Raudkivi & Witte (1990). Ils sont partis de l'équation d'Exner qui montre que la vitesse de translation des formes est inversement proportionnelle à leur taille : $c=q/H$.

Ils ont observé qu'à chaque fois que des formes de lit de hauteurs différentes apparaissent, les plus basses et les plus rapides se heurtent aux plus grandes, c'est-à-dire que les formes doivent fusionner et se rapprocher d'une vitesse de translation minimale. D'autre part l'équilibre en régime permanent n'est possible qu'avec des caractéristiques géométriques similaires de la même hauteur. Le but de cette modélisation était de montrer les effets d'une limitation de la hauteur des formes du lit sur l'écoulement. Le résultat montre que les sédiments qui arrivent de l'amont vers un élément dont la taille est maximale ne peuvent pas être absorbés par la forme et donc les sédiments passent au-dessus de la structure. C'est ce qui crée dans les rivières le transport sédimentaire en suspension.

La deuxième par Winter et al., (2008) consiste en la modélisation du canal de marée de Gradyb avec le logiciel Delft3D-Flow, mis en place pour calculer la dynamique à long terme de la morphologie du lit. Ils ont émis l'hypothèse que les marées entraînent la formation de grandes formes de fond.

III.3 Observations de terrain

L'étude de données de terrain couvre la majorité des études réalisées. Cette approche permet de rendre compte de la réalité du terrain. Avec cette méthode il n'y a pas le biais ou les différences dus aux échelles entre les résultats et la réalité. Toutefois les expérimentations durent en général plus longtemps. Dalrymple (1984) a réalisé des collectes de données sur 5 ans, Carling et al., (2000) ont relevés des données de 1991 à 1995 et Wilbers & Ten Brinke (2003) ont récolté des données de 1980 à 2000. Les paramètres sont aussi plus variables. En effet selon la période de l'année (étiage ou cru) les processus physiques observés sur la rivière ne sont pas les mêmes.

D'autre part l'étude sur le terrain entraîne des difficultés particulières. Harbor (1998) a eu des difficultés dans la mesure de certaines données, à cause notamment de l'espacement entre les formes, difficilement distinguable lorsque l'espacement se rapproche de la longueur d'enregistrement du fathomètre (300-600m). D'autre part il y a une incertitude de 0.15m en ce qui concerne la résolution de la hauteur de la forme.

Enfin en fonction de la largeur du cours d'eau étudié les moyens mis en place pour réaliser les mesures sont variables. Dans des chenaux larges et profonds, des bateaux peuvent être déployés pour réaliser les mesures. Mais dans les chenaux avec une faible profondeur d'eau d'autres moyens sont mis en place (Figure 6)

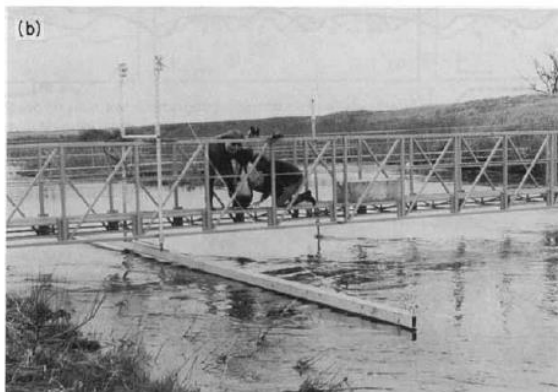


Figure 6 : Photographie des structures de mesures de la profondeur du chenal (Gabel, 1993)

III.4 Etude théorique

L'approche par une étude théorique est moins fréquente.

Une étude théorique sur la formation des dunes et des rides a été réalisée par Richards (1980). Il présente une théorie qui prédit l'apparition de deux modes distincts d'instabilité, avec des longueurs d'onde liées à la rugosité du lit et à la profondeur du chenal. Ces deux modes correspondent à la formation de rides et de dunes respectivement. D'autre part le modèle ainsi créé peut être étendu pour prédire la formation de rides secondaire, dépendant de la rugosité des premières. Son étude suggère que les rides se forment lors d'un mécanisme instable. De cette façon, une hiérarchie des rides peut être établie, chacune augmentant en longueur d'onde jusqu'à ce qu'un facteur limitant tel que la profondeur du flux devienne important.

La formation des barres a été théorisée par Alexandra Crosato. Il existe plusieurs types de barres, les barres forcées, les libres (alternes) et celles qui sont hybrides, entre les deux. La théorie des barres explique le domaine de stabilité des barres. Différentes longueurs d'onde des barres peuvent être instables, mais selon la théorie, la longueur d'onde choisie correspond aux barres ayant le taux de croissance temporelle le plus élevé. Dans les fosses situées entre ces barres, les vitesses d'écoulement et les profondeurs d'eau à proximité des berges sont plus élevées et peuvent donc donner lieu à une érosion localisée des berges, transformant un chenal initialement droit en un chenal sinueux. Ainsi la dynamique des barres contrôle fortement l'évolution du style fluvial d'une rivière (Crosato et Mosselman, 2009)

Enfin la formation des dunes et anti-dunes a été théorisé par Colombini & Stocchino (2008), (2011) et (2012). La présence de formes de lit induit des modifications considérables sur la résistance à l'écoulement dues à la traînée de la forme, de sorte que, même à un débit constant, la pente et la profondeur de l'état d'équilibre final pourraient être considérablement différentes de celles du plan initial. D'autre part ils ont montré que les rides apparaissent pour les valeurs faibles du paramètre de Shields (θ) et du nombre de Reynolds. Et pour les paramètres plus grands de Shields et Reynolds (et donc du nombre de Froude et de la rugosité) les rides sont remplacées par des dunes. Pour des valeurs intermédiaires du paramètre de Shields les deux formes (dunes et rides) peuvent coexister. Lorsque les écoulements sont instables il y a formation des dunes et anti-dunes.

IV. LES DIFFERENTS TYPES D'INTERACTION OBSERVEES

Dans le lit d'un cours d'eau les sédiments sont en mouvements constant, entraînant l'apparition de dunes, rides et barres principalement. Ces formes sédimentaires interagissent entre elles, soit lors de superpositions par un apport sédimentaire sur le dos d'une forme, soit en jouant un rôle sur le développement des formes en aval par modification des écoulements et apport sédimentaire. La forme du lit superposée peut migrer au-dessus de la forme du lit principal, contribuant seulement au transport des sédiments (Reesink et Bridge, 2009). Par ailleurs, les formes de lit superposées peuvent croître, ce qui réduit leur taux de migration (parce que les formes de lit plus grandes migrent plus lentement que les formes de lit plus petites) et elles commencent à éroder la dune sous-jacente, ce qui peut mener à la division (Warmink et al., 2014).

Dans ce rapport les interactions sont classées en deux ordres. Celles dont les dimensions sont similaires. Et celles à échelle différentes comme par exemple les rides (ou petites dunes selon certain auteurs) et les dunes qui sont fréquemment superposées sur les barres.

D'autre part il semblerait que les dimensions des formes de lit dépendent de la granulométrie des sédiments transportés (Tuijnder, Ribberink, & Hulscher, 2009). Ainsi selon le type de rivière étudié les superpositions observés ne sont pas les mêmes.

IV.1 Interactions entre des structures sédimentaires d'échelle similaire

Il existe quatre types d'interactions entre dunes de même tailles, identifiées par Kocurek (2010) : la fusion (*merging*), lorsque deux structures se combinent pour n'en former plus qu'une; la collision décentrée (*off-center collision*), lorsqu'il y a une réorganisation dans laquelle deux dunes se confondent mais entraînent le rejet d'une partie de la dune ; la répulsion de la forme de lit (*bedform repulsion*), se réfère à la fusion de deux lignes de crêtes et enfin la cannibalisation (*cannibalization*), correspond à la destruction complète de la forme en aval (Figure 7).

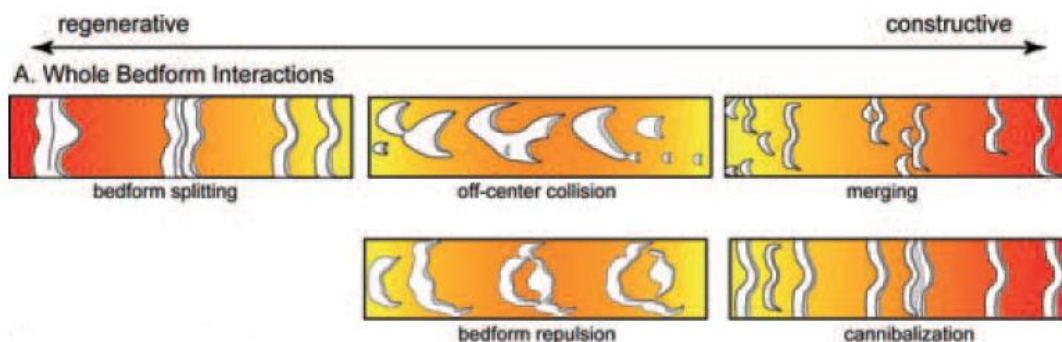


Figure 7 : Les types d'interactions (*merging*, *off-center collision*, *bed form repulsion*, *cannibalization*) identifiées par Kocurek (2010)

Par exemple lorsqu'il y a peu d'érosion, la forme de lit superposée peut fusionner avec la dune sous-jacente) ou s'affaisser sur la face amont et emprisonner les sédiments dans la zone de séparation de l'écoulement, ce qui mène à l'érosion de la dune primaire sous-jacente (Best et al., 2013).

La superposition des formes sédimentaire peut avoir plusieurs origines. Dans son étude Gabel (1993) a observé que la superposition des dunes sur d'autres dunes de même taille apparait lorsqu'il y a un mouvement rapide sur le dos de dunes plus lentes, cette superposition est donc un évènement rapide de courte durée. Cette superposition de dunes à échelle similaire peut aussi apparaitre lors des décrues (Wilbers & Ten Brinke, 2003). En effet ils ont observé que lors de ces périodes il y avait apparition de dunes le long des dunes déjà présentes, dont les longueurs sont identiques à celles déjà présentes.

D'autres auteurs ont étudié l'effet des crues sur les superpositions de dunes.

Harbor (1998) s'est intéressé à la transition entre les dunes de premier ordre (dont le rapport L/H est proche de 20, considéré comme les plus petites dunes) et les dunes plus grandes, appelée composée, dont le rapport L/H est faible. La nomenclature utilisée dans son ouvrage se base sur la classification de (Ashley, 1990), considérant comme dunes toutes les formes supérieures à 1m. Il a observé que certaines dunes de premier ordre se sont superposées à des dunes dites composée, puis des formes de lit plus petites se sont développées par la suite lors de la décrue.

En ce qui concerne la stabilité des formes Wilbers (2004) formule l'hypothèse selon laquelle les dunes superposées sont les formes qui devraient être présentes dans les conditions d'écoulements régnants et que les dunes sur lesquelles elles sont superposées sont des formes reliques des conditions d'écoulements précédents.

IV.2 Interactions entre des structures sédimentaires d'échelle différente

Dans le cas des interactions à différentes échelles, ce seront toujours les formes considérées comme les plus petites qui seront superposée aux plus grandes, l'inverse n'a actuellement pas été observé selon la littérature étudiée dans ce rapport. Les superpositions à différentes échelles sont plus fréquentes que celles à échelle similaire.

La superposition de formes de lit plus petites sur les dunes a été décrite comme un mécanisme de croissance par fusion (Raudkivi et Witte, 1990), menant à la formation d'une grande structure (Figure 8 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), comme un mécanisme de décomposition par cannibalisation (Kleinhans, 2002 ; Martin et Jerolmack, 2013) et comme une caractéristique du rétablissement de la couche limite sur la face amont par Rubin & McCulloch (1980). En effet il a été observé que de nombreuses formes de lits s'accroissent du fait de l'accumulation de plus petites formes. Ces formes de lit embryonnaires se forment continuellement sur le dessus des plus grandes (Reesink & Bridge, 2007), ainsi la superposition des structures sédimentaires est un facteur qui cause l'accroissement des formes sédimentaires.

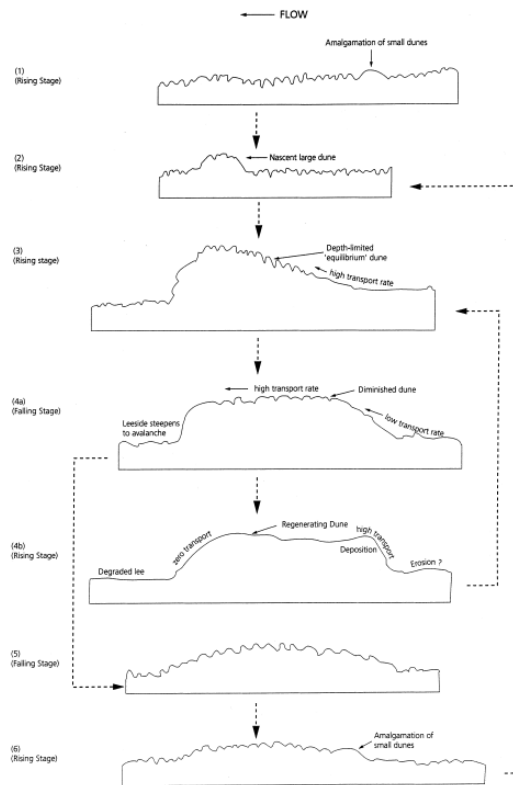


Figure 8 : Modèle conceptuel du développement de grandes dunes dans el Rhin, (Carling, Golz, Orr, & Radecki-pawlik, 2000)

D'autre part la superposition de formes à grande échelle ne semble se produire que dans les cours d'eau qui présentent une grande variation d'échelle (grandes variations du débit) ou lorsqu'il y a des changements hydrologiques relativement importants et rapides (Allen & Collinson, 1974).

De petites formes de lit sont constamment générées, superposées aux plus grandes (Figure 9), en raison des écoulements particuliers produits par les plus grandes formes de lit.

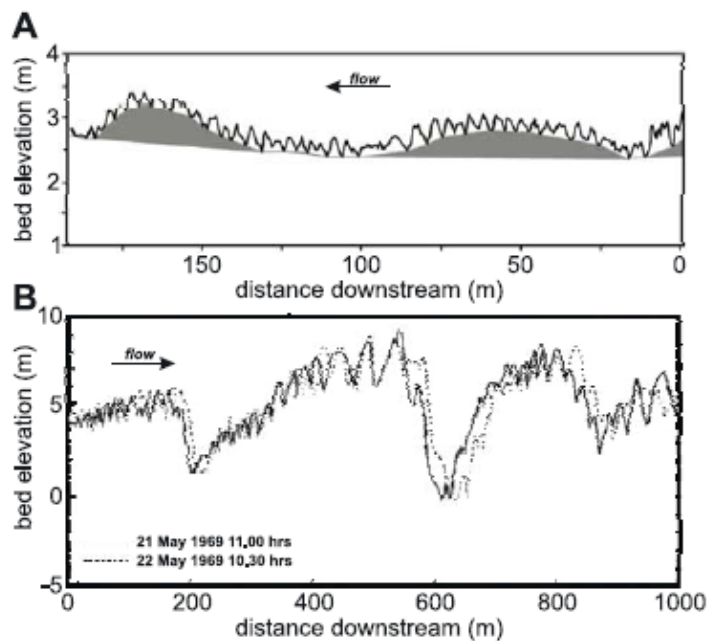


Figure 9 : A : Superposition de petites dunes sur les côtés abrité et sous le vent des dunes, observé sur le Waal (Wilbers & Ten Brinke, 2003); B : Superposition de petites dunes sur de grandes dunes composées dans le fleuve Mississippi (Best, 2005)

Ces formes de lit superposées migrent en aval des plus grandes formes et elles génèrent une rugosité de forme supplémentaire, modifient la dynamique de transport des sédiments, contrôlent la division et la fusion des formes de lit, modifient la géométrie de la face aval de la forme hôte, et enfin modifient les structures sédimentaires qui en résultent (Reesink et al., 2014).

Il existe plusieurs types d'interactions à différentes échelles :

Rides - dunes et petites dunes - dunes

Tout d'abord il y a les interactions entre les rides et les dunes ou petites dunes et dunes, qui sont les plus représentés dans la littérature actuelle. Ces études ont mené à différentes conclusions. Robert (2001) a étudié les phénomènes se produisant au niveau des transitions entre les rides (dont l'ordre de grandeur était de 100mm de hauteur et 10cm de longueur) et les dunes (dont l'ordre de grandeur était de 130mm de hauteur et 30 cm de longueur). Son étude a montré que le nombre de rides superposées sur les dunes augmente avec la vitesse d'écoulement. D'autres auteurs ont montré que le rôle des rides sur le dos des dunes influençait l'écoulement à proximité du fond. En effet Carling et al. (2000) ont mis en évidence que la présence de petites dunes (appelées dunes secondaires) sur la face amont, et sur les pentes douces au niveau de la face aval créent une réduction de la profondeur de l'eau au niveau de la crête de la dune. D'autre part Venditti & Church (2005) ont montré que la superposition des rides sur le dos des dunes est un mécanisme fondamental par lequel les sédiments se déplacent, et est donc un mécanisme primaire de migration des dunes. Ils ont étudié des rides dont la hauteur était 0.1 fois la hauteur des dunes sur lesquelles elles étaient superposées, ces rides migrent de 8 à 10 fois plus vite que les dunes sur lesquelles elles sont superposées et ont des longueurs constantes indépendamment des longueurs des dunes sur lesquelles elles sont superposées et des conditions d'écoulement. Aussi selon Best (2005) l'occurrence des petites dunes ou rides superposées sur les plus grandes joue un rôle dans l'alimentation sédimentaire. L'apport sédimentaire joue aussi un rôle important dans le développement des dunes. En effet Tuijnder et al. (2009) ont observé, en laboratoire, que lorsque qu'il y a un ajout de sédiment, il y a apparition de chevauchement de dunes et le développement de formes de lit secondaires sur les plus grandes dunes. Ainsi l'apparition des superpositions dépend de l'apport en sédiments, s'il y a peu de sédiments disponibles alors la superposition des formes est impossible.

Certains auteurs ((Bennet & Best, 1995) ; (Raudkivi A. J., 1966) ; (Venditti & Church, 2005)) ont étudié ces interactions en fonction de la couche limite. La superposition des rides sur des dunes selon Raudkivi (1966) peut être due au développement de la couche limite. Le développement de ces formes est un processus lent qui nécessite la perturbation du lit du cours d'eau. D'autre part Bennet & Best (1995) ont observé que lorsqu'il y a fusion de deux formes, une ride avec une dune, il y a augmentation de la hauteur de la forme sous-jacente. Ainsi la différence de vitesse au niveau de la couche limite turbulente augmente, ce qui entraîne un charriage des sédiments plus important en aval, favorisant la formation de nouvelles dunes. L'écoulement turbulent généré par la superposition provoque l'apparition de tourbillon pouvant soulever jusqu'à 0.3m, voire plus, la surface de l'eau par rapport à son niveau général (Coleman J. , 1968). D'autre part au niveau des transitions (zone correspondant à l'espacement entre deux formes sédimentaires) entre les dunes il y a une augmentation du cisaillement critique du fond et du transport sédimentaire. Fernandez et al., (2006) ont observé que la superposition d'une ride sur la face amont d'une dune modifie la structure de l'écoulement en aval, dû à l'interaction des deux couches limites associées à la séparation de l'écoulement. Ces observations ont aussi été réalisées par Reesink & Bridge (2007), ils ont observé que les rides qui arrivent au niveau de la crête des dunes affectent la forme et la vitesse de migration sur la face aval de la dune et influencent la nature des dépôts qui s'y produisent.

Une cyclicité dans la superposition des dunes a été expliquée par Reesink & Bridge (2009). Dans des conditions d'écoulements stables ou instables des rides et petites dunes se retrouvent superposées sur le dos de plus grandes dunes. Des formes de lit se développent par la fusion de formes de lit plus petites, et des petites formes de lit embryonnaires se forment continuellement sur le dos des plus grandes. Ces petites formes sont en mouvement continu, et lorsqu'elles arrivent au niveau de la crête de lit hôte, ceci entraîne une modification de la dynamique de l'écoulement. Cette modification est temporaire quand elle ne se produit que lorsque la petite forme est présente au niveau de la crête, et les vitesses de déplacement de ces petites structures sont plus rapides que celles de la structure hôte. D'autre part, comme ce sont les rides qui sont toujours en mouvement, ceux sont-elles qui subissent le charriage et non pas la dune hôte. Enfin la superposition des dunes entraîne une réduction de la pente et donc entraîne une augmentation de l'apport en aval (Figure 10) (au milieu) et une augmentation du cisaillement et de la turbulence (à droite), associée à l'affouillement local et au changement du profil bidimensionnel de la dune.

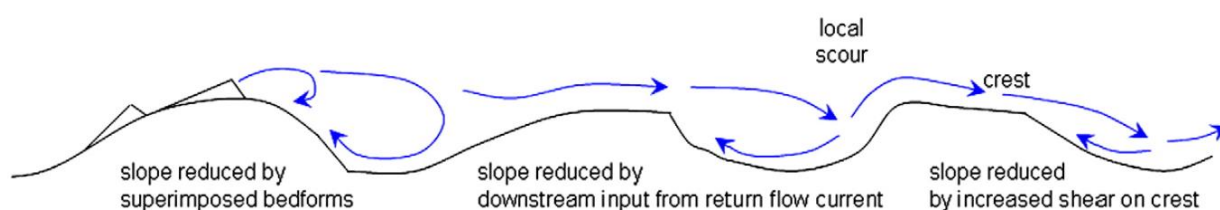


Figure 10 : Modification de la structure des formes en fonction de la superposition des structures (Reesink & Bridge, 2009)

Enfin selon Wilbers (2004) une seule forme de lit peut être stable à un moment t dans certaines conditions. Ainsi il semblerait que les petites dunes (dont les dimensions sont d'environ 1m de haut et 30m de long et qui représentent en général 75% de la dune sur laquelle elles se sont superposées) qui sont superposées sur d'autres sont des vestiges des conditions précédentes d'écoulement. En effet les conditions d'écoulements sont en perpétuel changement au point que les grandes dunes ne peuvent pas rester en place et deviennent alors des vestiges des anciens écoulements et des dunes plus petites se développent alors. Ainsi les dunes plus petites couvrent la totalité des grandes dunes. Une autre explication pourrait être que la plus grande forme altère l'écoulement localement de telle manière que des formes plus petites peuvent se développer sur son dessus dans ce cas la forme superposée ne recouvre que la face aval de la plus grande dune. Dans tous les cas la superposition affecte le développement des dunes, le transport sédimentaire et l'hydraulique à proximité du fond.

Enfin il apparaît une corrélation entre les débits de crue et le développement des interactions. Ten Brinke et al. (1999) ont observé la superposition de petites dunes sur des dunes plus grandes (ils considèrent comme dunes les formes dont le ratio longueur sur hauteur (L/H) est inférieur à 70, dont la hauteur est de 50cm et la longueur de 15m). Ils ont montré que la hauteur à la fois des grandes et des petites dunes augmente avec la diminution du débit (Figure 11).

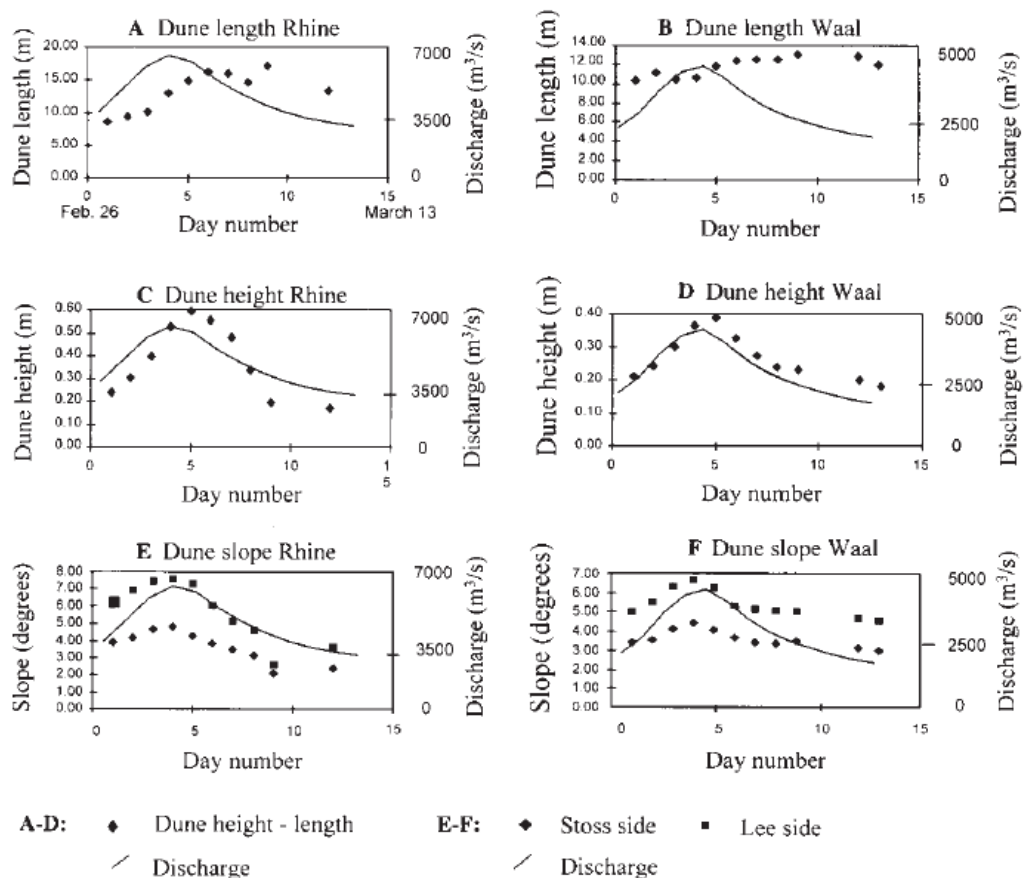


Figure 11 : Corrélation entre les variations de débit et les hauteurs et longueurs des dunes (Ten Brinke et al., 1999)

D'autre part ils ont observé une augmentation de l'étalement des dunes après la baisse du niveau de l'eau : les dunes de la partie sablonneuse ont atteint en moyenne 1,2 m de haut sur 52-59 m de long.

Interactions méga-rides - dunes et ride - méga-rides

D'autres interactions ont lieu entre les méga-rides et les dunes ou les rides et les méga-rides. Ces interactions ont été ici uniquement observées dans le milieu marin par Dalrymple (1984), Miles et al., (2014) et Passchier (2004). Dalrymple (1984) a observé que des méga-rides se produisent sur tout ou sur une partie de chaque dune pendant quelques cycles de marée par mois lunaire. Ces méga-rides jouent un rôle central dans la migration et la formation des dunes en conférant une cyclicité à ces structures.

Interactions avec les barres

Enfin un dernier type d'interaction se fait avec les barres. Celles-ci sont peu étudiées et représentées dans la littérature actuelle. Seulement quatre articles ((Fernandez, Best, & Lopez, 2006) ; (Reesink & Bridge, 2011) ; (Villard & Church, 2005) et (Wintenberger, et al., 2015)) les ont recensées.

L'impact de crues sur la mise en place des structures a été étudié par Villard & Church (2005). Ils ont observé que les plus grandes dunes présentes dans le chenal étaient superposées à des barres lors des épisodes de crues. Lors de la décrue un mécanisme se met en place, des dunes plus petites se superposent aux plus grandes (dont la hauteur vaut 1/6 de la profondeur, et la longueur maximale vaut 6 fois la profondeur), enfin une fois la décrue complètement aboutie les grandes dunes disparaissent complètement laissant place aux dunes plus petites.

La migration des dunes sur les barres a été étudié dans la Loire par Wintenberger et al. (2015). Des dunes de 0.2m de haut, et de trois classes de longueur : 0.5-1m ; 1.5-2m et 2-2.5m, ont été observées sur des barres sédimentaires. Ils ont observé que sur les barres, les dunes ont une longueur de 1 à 10m

V. SYNTHÈSE

D'une manière générale ce sont les dunes et les interactions avec les rides ou des dunes plus petites qui sont majoritairement observées. D'autre part l'approche par une étude du transport sédimentaire est peu représentée. Enfin il semblerait qu'il y ait deux communautés scientifiques. Ceux qui étudient les dunes (majoritairement représenté dans la littérature) et ceux qui s'intéresse plus aux barres. Actuellement il ne semble pas y avoir de connexion entre ces deux approches.

Il faut prendre en compte que certains auteurs n'utilisent pas le même vocabulaire pour désigner les formes sédimentaires. Le nom et les dimensions des formes (quand elles étaient précisées) sont renseignées dans le tableau ci-dessous.

Auteur	Domaine d'étude	Protocole d'étude			Type d'interaction		
			Largeur	Profondeur		Hauteur	Longueur
Bennet & Best (1995)	Hydrologie	Etude en canal de recirculation de 10m de long	0.3 m	0.3 m	Superposition de rides sur des dunes.		
Carling et al., (2000)	Morpho dynamique	Etude du Rhin, entre les km 505 et 507 à proximité de Niederwalluf en Allemagne de 1991 à 1995	500 m	3.5-4 m	Petites dunes sur des plus grandes dunes		
Coleman (1968)	Marin	Observations réalisées sur le Brahmaputra et la baie du Bengale au Bangladesh.	3-9 km	<15 m	Superposition de rides sur la face amont de larges plaines de sables au niveau de la baie, et superposition de mégarides sur des dunes dans le Brahmaputra		
Dalrymple (1984)	Environnement marin ; influence de la marée. Approche géomorphologique.	Etude dans la baie de Fundy. Influence des marée semi-diurne avec une portée moyenne de 11.9m.	4 km	3-14 m	Mégarides/Dunes L'Etudes des formes dans le domaine marin : des ondes de sables ayant des hauteurs de 0.81m et des longueurs de 37.9m, (Dalrymple, 1984).	Onde de sable : 0.81 m	Onde de sable : 37.9 m

Fernandez et al., (2006)	Hydraulique	Modélisation en chambre de verre de 12m de longueur. Expérience sous un écoulement uniforme, continue unidirectionnel, mesure réalisée avec un laser doppler anémomètre (LDA)	0.3 m	0.3 m	Superposition de ride sur la face aval d'une dune.		
Fourrière et al., (2010)	Hydraulique	Etude théorique et modélisation numérique des états de stabilité du lit d'une rivière. Comparaison avec les mesures expérimentales réalisée sur Leyre en France.			Superposition de dunes (d'une longueur d'environ 40cm) sur des méga-dunes (d'une longueur d'environ 3m).		Dune : 40cm Méga-dunes : 3m
Gabel (1993)	Sédimentologie	Etude du fleuve Calamus dans le Nebraska aux Etats-Unis.		0.34 - 0.61 m	Superposition de dunes (de longueur 2m en moyenne) de tailles similaires		Dune : 2m
Guy et al., (1966)	Sédimentologie	Modélisation physique en canal de recirculation de 46m de long. La pente était ajustable de 0 à 1.5%.	2.4 m	0.6 m	Réalisation d'une série d'expériences en faisant varier la taille des sédiments (de 0.19mm à 0.54mm) et la largeur du canal (de 0.6 à 2.4m). Pour chaque expérience ils ont observé la superposition de rides sur des dunes	Ride : < 0.6m	Ride : < 0.06m
Harbor (1998)	Morphodynamique	Donnée de terrains collectées par la Vicksburg District of US Army Corps of Engineers dans le bas Mississippi couvrant une zone de 380km.		16-23 m	Superposition de dunes (considérées comme telles à partir du moment où leur longueur était supérieure à 1m) de tailles similaires. Il s'est basé sur la classification de Ashley (1990) pour caractériser les formes observées.		

Jerolmack & Mohrig (2005)	Sédimentologie	Canal de 10m de long, avec une pente nulle. Les formes de départ avaient toutes la même taille (hauteur de 0.070m et longueur de 0.395m). Du sable est ensuite ajouté une fois l'eau en circulation.	0.16 m	0.25 m	Etude des interactions entre les formes du lit. Elles dépendent des changements d'écoulements induit par la topographie du lit et la taille des grains.		
Kocurek et al., (2010)	Morphodynamique	Leur étude est une combinaison d'observations réalisées en laboratoire et sur le terrain.			Il a identifié 4 types d'interactions ayant lieu entre des formes de même taille : fusion (merging); la collision décentrée (off-center collision); la répulsion de la forme de lit (bedform repulsion) ; la cannibalisation (cannibalization),		
McCabe & Collin (1977)	Sédimentologie	Canal de recirculation d'eau et de sable, de l'université de Kele, d'une longueur de 14m.	0.8 m	0.45 m	Observation de rides d'une hauteur de 6cm et de longueur de 7 à 10cm, superposées à des dunes.	Ride : 6cm	Ride : 7-10cm
Miles et al., (2014)	Marin	Données de terrain réalisées sur la plage de Perranporth (North Cornwall, Angleterre)		5m	Ils ont observé la superposition de rides (20cm de long, 10cm de haut) sur des méga-rides de 1 à 1.8m de long et 30cm de haut.	Ride : 10 cm Méga-ride : 30 cm	Ride : 20 cm Méga-ride : 1 à 1.8 m
Passchier (2004)	Marin	Etude au sud de la baie de la mer du Nord entre les latitudes 52 et 53°N.			Observation de méga-rides (dont la longueur moyenne varie entre 3 à 18m) sur les pentes douces des ondes de sables (dont la longueur est supérieure à 6m).		Méga-ride : 3 à 18 m Onde de sable : >6m

Reesink & Bridge (2011)	Sédimentologie	Etudes sur le terrain, dans la rivière Saskatchewan sud près de Outlook.	0.6 km	0.2 - 0.4m	Observation de rides (18+-6mm de hauteur et 145+-36mm de longueur) sur des barres (d'une longueur comprise entre 1.4m à 4m)	Ride : 18 cm	Ride : 145 cm Barre : 1.4 à 4 m
Reesink & Bridge (2007)	Hydrologie	Canal artificiel, de recirculation de l'eau et des sédiments, d'une longueur de 7.6m	0.61 m	0.4 m	Observation de dunes de 0.05 de hauteur et de 1m de long sur lesquelles des rides de 0.003 à 0.03m de haut et de 0.1 à 0.2m de long y étaient superposée.	Dune : 0.05 m Ride : 0.003 à 0.03 m	Dune : 1 m Ride : 0.1 à 0.2 m
Reesink et al., (2013)	Sédimentologie	Canal de recirculation de 16m de long, avec un D50=239µm	2 m	0.5 m	Développement de petites dunes sur des dunes plus grandes observé à la suite de l'augmentation de la hauteur d'eau.		
Reesink & Bridge (2009)	Sédimentologie	Etude en canal de recirculation de l'eau et des sédiments (jusqu'à 50mm de diamètre) de l'université de Binghamton, d'une longueur de 7.6m.	0.61 m	0.4 m	Superposition de rides et petites dunes sur des dunes plus grandes.		
Rubin & McCulloch (1980)	Marin	Modélisation physique et étude de terrain sur la Baie de San Francisco.			Superposition de dunes sur des ondes de sables faisant varier la hauteur de la forme de 20cm à 8m.		
Ten Brinke et al., (1999)	Hydrologie	Analyses de données mesurées dans le fleuve Rhin-Waal aux Pays-Bas, mesures réalisées sur le Rhin avant la divergence vers le Waal et Ijssel.	260-340 m	5 m	Superposition de petites dunes sur des dunes plus grandes (hauteur de 50cm et longueur de 15m).	Grande dune : 50 cm	Grande dune : 15 m

Tuijnder et al., (2009)	Morphodynamique	Canal de recirculation de 30m de long avec un D50=0.8mm	1 m		Chevauchement de dunes et développement de petites dunes sur des grandes dunes lorsqu'il y a un apport sédimentaire.		
Venditti & Church (2005)	Hydrologie	Canal artificiel de recirculation de 15.2m de long, avec un D50=0.5mm.	1 m	0.3 m	Observation de rides sur des dunes dont les hauteurs valent 0,1 fois la hauteur de la dune sur laquelle elles sont superposées.	Ride : 0.1 x hauteur de la dune sous-jacente	
Villard & Church (2005)	Marin : les chenaux de distribution deltaïques sont influencés par les marées semi-diurnes mixtes qui, à l'embouchure du fleuve, ont une amplitude moyenne de 2.6 m et des extrêmes supérieurs à 5.4 m.	Etude dans le bas Fraser, sur la côte ouest de la British Columbia au Canada. Ce fleuve draine un bassin d'environ 232 000 km ² . Au niveau du delta, les chenaux sont influencés par les marées semi-diurnes, qui ont une amplitude moyenne à l'embouchure du fleuve de 2.6m et pouvant aller jusqu'à 5.4m.			Superposition de grandes dunes (dont la hauteur vaut 1/6 de la profondeur du chenal et la longueur maximale vaut 6 fois la profondeur) sur des barres lors des épisodes de crues. En décrue des dunes plus petites se superposent aux plus grandes.	Grande dune : 1/6 profondeur	Grande dune : 6x la profondeur
Wilbers & Ten Brinke (2003)	Hydrologie	Etude du Rhin et de ses affluents aux Pays-Bas : le Waal, Nederrijn-Lek et IJssel. Des mesures de dunes ont été réalisées entre 1980 et 2000.			Ils ont observé en décrue l'apparition de dunes dans l'allongement des dunes déjà présentes, présentant des longueurs similaires à celles déjà existantes.		
Wilbers (2004)	Morphodynamique	Données de terrain sur le Rhin au Pays-Bas.			Observation de superposition de petites dunes sur des dunes plus grandes d'environ 1m de haut et 30m de long. Ces petites dunes couvrent 75% de la dune sur laquelle elles sont superposées.	Grande dune : 1 m	Grande dune : 30 m

Wintenberger et al., (2015)	Géomorphologie	Etude de la Loire sur le site de Mareau-aux-Prés, à 10km à l'aval d'Orléans.			Observation de la migration des dunes (de 0.2m de haut, et trois classes de longueur : 0.5-1m ; 1.5-2m et 2-2.5m) sur les barres. Ils ont observé que sur les barres, les dunes ont une longueur qui peut varier de 1 à 10m.	Dune : 0.2 m	Dune : 0.5 à 2.5 m
Winter et al., (2008)	Marin	Etude du Gradyb sur une longueur de 500m au niveau de l'embouchure.			Superposition de petites structures sur des ondes de sables possédant des longueur moyenne de 100m et des hauteurs de 3m.	Onde de sable : 3m	Onde de sable : 100m

VI. CONCLUSION

L'objectif de ce rapport était de réaliser une revue quantitative de la littérature concernant les interactions des formes de lit à différentes échelles.

Des méthodes d'études multiples et complémentaires, en laboratoire, sur le terrain, des modèles numériques, et des études théoriques, sont mises en place pour apporter des connaissances sur le sujet. En fonction du domaine d'étude différentes interactions sont observées (Tableau 1).

Les principales formes d'interactions ont lieu entre des rides et des dunes, des dunes et des barres, des dunes de tailles similaires et des dunes et rides avec des méga-rides.

Toutefois il y a une prédominance, dans la littérature, des interactions entre les dunes et des structures plus petites (rides et dunes plus petites). Il y a notamment un manque de connaissances au niveau des interactions entre les dunes et les barres. Nous constatons que peu d'intérêt est accordé à l'étude des barres sédimentaires.

D'une manière générale les superpositions semblent être contrôlées par l'apport en sédiments (ayant lieu généralement pendant les phénomènes de crues). En effet les événements de crues modifient la forme des dunes et provoquent l'apparition de certaines formes.

D'autre part le tri granulométrique qui a lieu dans le lit est un facteur de contrôle dans la formation et l'apparition des dunes. De même les écoulements induits par les formes du lit qui créent une certaine rugosité influencent le développement des structures en aval.

En règle générale la littérature n'est pour le moment pas encore assez développée. En effet il y a des manques à compléter, en ce qui concerne la diversité des interactions, mais aussi au niveau du protocole d'étude, et à l'approche des interactions qui prend rarement en compte le transport sédimentaire.

Ainsi, il pourrait être envisageable de lier les connaissances des dunes éoliennes (mouvements, transport et interaction des dunes éoliennes) avec les dunes subaquatiques. Bien que les fluides mis en mouvement soient différents il y aurait selon Ashley (1990) une certaine ressemblance entre les dunes éoliennes et les formes de lits aquatiques. En effet tout comme les dunes en milieu fluvial, il existe, pour les dunes éoliennes, des interactions entre les hauteurs et les espacements des dunes. Toutefois celles-ci atteignent des hauteurs plus élevées pour un espacement similaire à celui retrouvé en milieu fluvial.

Enfin les connaissances sur les interactions barres sédimentaires/dunes sont à approfondir.

VII. BIBLIOGRAPHIE

- Allen, J. (1978). *Polymodal dune assemblages : an interpretation in terms of dune creation-destruction in periodic flows*. Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Company.
- Allen, J., & Collinson, J. (1974). The superimposition and classification of dunes formed by unidirectional aqueous flows. *Sedimentary Geology*, 169-178.
- Ashley. (1990). Classification of large-scale subaqueous bedforms : a new look at an old problem. *Journal of sedimentary petrology*, 160-172.
- Bennet, S., & Best, J. (1995). *Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes : implications for sediment transport and bedform stability*. Leeds: University of Leeds.
- Best, J. (2005). The fluid dynamics of river dunes : A review and some future research directions. *Journal of geophysical research*.
- Carling, P. A., Williams, J. J., Golz, E., & Kelsey, A. D. (2000). The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine near Mainz, Germany. II. Hydrodynamics and sediment transport . *Sedimentology*, 253-278.
- Carling, P., Golz, E., Orr, H., & Radecki-pawlik, A. (2000). The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. Sedimentology and morphology. *Sedimentology*, 227-252.
- Claude, N., Rodrigues, S., Bustillo, V., Bréhéret, J.-G., Tassi, P., & Jugé, P. (2014). Interactions between flow structure and morphodynamic of bars in a channel expansion/contraction, Loire River, France. *Water Resour. Res.*, 50, doi:10.1002/2013WR015182.
- Coleman, J. (1968). *Brahmaputra river : channel processes and sedimentation*. Amsterdam : Elsevier Publishing Company.
- Coleman, S. E., & Melville, B. W. (1994). Bed-form development. *J. Hydraul. Eng.*
- Dalrymple, R. (1984). Morphology and internal structure of sandwaves in the Bay of Fundy. *Sedimentology*, 365-382.
- Ditchfield, R., & Best, J. (1992). Development of bed features. *J. Hydraul. Eng.*, 647-650.
- Fernandez, R., Best, J., & Lopez, F. (2006). Mean flow, turbulence structure, and bed form superimposition across the ripple-dune transition. *Water resources research* , Vol.42.
- Fourrière, A., Claudin, P., & Andreotti, B. (2010). Bedforms in a turbulent stream : formation of ripples by primary linear instability and dunes by nonlinear pattern coarsening. *Flui Mech.*, 287-328.
- Gabel. (1993). Geometry and kinematics of dunes during steady and unsteady flows in the Calamus River, Nebraska, USA . *Sedimentology*, 237-269.
- Guy, H. P., Simons, D. B., & Richardson, E. V. (1966). *Summary of Alluvial Channel Data From Flume Experiments, 1956-61*. Washington : United states government printing office .

- Harbor, D. (1998). Dynamics of bedforms in the lower Mississippi River. *Journal of sedimentary research* , 750-762.
- Jackson, R. G. (1975). Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow. *Geological Society of America Bulletin*, 1523-1533.
- Jerolmack, D., & Mohrig, D. (2005). Interactions between bed forms : Topography, turbulence and transport. *J. Geophys.Res*, 110, F02014, doi:10.1029/2004JF000126.
- Kleinhans, M. G. (2004). *Experimental dune trough scour in sediment mixtures*. Enschede: Marine Sandwave and River Dune Dynamics.
- Kocurek, G., Ewing, R. C., & Mohrig, D. (2010). How do bedform patterns arise? New views on the role of bedform interactions within a set of boundary conditions. *Earth Surf.Process.Landforms* , 51-63.
- McCabe, P. J., & Colin , J. M. (1977). Formation of reactivation surface within superimposed deltas and bedforms . *Journal of sedimentary petrology* , 707-715.
- Miles , J., Thorpe, A., Russell, P., & Masselink, G. (2014). *Observations of bedforms on a dissipative macrotidal beach*. Berlin: Springer .
- Parson, D. R., Best, J. L., Orfeo, O., Hardy, R. J., Kostaschuk, R., & Lane, S. N. (2005). Morphology and flow fields of three-dimensional dunes, Rop Parana Argentina : Results from simultaneous multibeam echo sounding and acoustic Doppler current profiling. *Journal of geophysical research*, VOL. 110, F04S03, doi:10.1029/2004JF000231,.
- Passchier, S. (2004). *Distribution, geometry and orientation of megascale bedforms on the inner shelf, coast of Holland, 52-53°N, based on echosounder data and side-scan sonar*. Enschede: Marine Sandwave and River Dune Dynamics .
- Raudkivi, A. J. (1966). Bed forms in alluvial channel. *J.Fluid Mech*, 507-514.
- Raudkivi, A. J., & Witte, H. H. (1990). Development of bed features . *J.Hydraul.Eng* , 1063-1079.
- Reesink, A. J., & Bridge , J. (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* , 274-300.
- Reesink, A. J., & Bridge, J. S. (2007). Influence of superimposed bedforms and flow unsteadiness on formation of cross strata in dunes and unit bars . *Sedimentary Geology*, 281-296.
- Reesink, A. J., & Bridge, J. S. (2009). Influence of bedform superimposition and flow unsteadiness on the formation of cross strata in dunes and unit bars - part2, further experiments. *Sedimentary Geology*, 274-300.
- Reesink, A. J., Parsons, D. R., Ashworth, P. J., Best, J. L., Hardy, R. J., Murphy, B. J., . . . Unsworth, C. (2018). The adaptation of dunes to changes in river flow. *Eath-Science Reviews*, 1065-1087.
- Reesink, A., & Bridge, J. (2011). Evidence of bedform superimposition and flow unsteadiness in unit bar deposits, South Saskatchewan River, Canada . *Journal os sedimentary research* .

- 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*.
- Reesink, A., Parsons, D., Ashworth, P., Hardy, R., Best, J., Unsworth, C., . . . Murphy, B. (2013). *The response and hysteresis of alluvial dunes under transient*. Bruges: Marine and River Dune Dynamics .
- Richards, K. J. (1980). The formation of ripples and dunes on an erodible bed. *J.Fluid.Mech*, 597-618.
- Roden, J. E. (1998, August). The Sedimentology and Dynamics of Mega-Dunes, Jamuna River, Bangladesh. Leeds: School of Earth Sciences and School of Geography.
- Rubin, D., & McCulloch, D. (1980). Single and superimposed bedforms : a synthesis of san francisco bay and flume observations . *Sedimentary Geology*, 207-231.
- Smith, D. J., & McLean, S. (1977). Spatially Averaged Flow Over a Wavy Surface. *Journal of geophysical research* , 1735-1746; Vol. 82.
- Ten Brinke, W., Wilbers, A., & Wesseling, C. (1999). Dune growth, decay and migration rates during a large-magnitude flood at a sand and mixed sand–gravel bed in the Dutch Rhine river system. *Spec. Publs int. Ass. Sediment*, 15-32.
- Tuijnder, A. P., Ribberink, J. S., & Hulscher, S. J. (2009). An experimental study into the geometry of supply-limited dunes. *Sedimentology*, 1713-1727.
- Van Rijn, L. C. (1994). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans*. Amsterdam: Aqua Publication.
- Venditti, J. G., & Church, M. (2005). Morphodynamics of small-scale superimposed sand waves over migrating dune bed forms. *Water resources research* , VOL. 41, W10423, doi:10.1029/2004WR003461.
- Villard, P., & Church, M. (2005). Bar and dune development during a freshet: Fraser River Estuary, British Columbia, Canada . *Sedimentology*, 737-756.
- Warmink, J. (2014). *Dune dynamics and roughness under gradually varying flood waves, comparing flume and field observations*. Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.
- Wilbers, A. (2004). *The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes*. Utrecht: Netherlands Geographical Studies.
- Wilbers, A., & Ten Brinke, W. (2003). The response of subaqueous dunes to floods in sand and gravel bed reaches of the Dutch Rhine. *Sedimentology*, 1013-1034.
- Wintenberger, C., Rodrigues, S., Claude, N., Jugé, P., Bréhéret, J.-G., & Villard, M. (2015). Dynamics of nonmigrating mid-channel bar and superimposed dunes in a sandy-gravelly river (Loire River, France). *Elsevier*.
- Winter, C., Vittori, G., Ernstsen, V. B., & Bartholdy, J. (2008). *On the superimposition of bedforms in a tidal channel*. Leeds: Marine and River Dune Dynamics .

Directeur de recherche :
Jules Le Guern

Joséphine Marchesin
PFE/DAE5 - IMA
2018-2019

Titre : Les interactions des formes du lit à différentes échelles : revue quantitative de la littérature. Quel est l'état actuel des connaissances concernant les interactions des différentes formes du lit (dunes, rides, barres), toutes disciplines confondues ?

Résumé :

Ce projet de Fin d'Etudes avait pour objectif de faire un état des lieux de la littérature concernant les interactions entre les formes sédimentaires subaquatiques en systèmes fluviaux et dans le domaine marin. L'objectif était de classer les interactions en fonction du domaine dont elles sont étudiées et du protocole mis en place lors de leur observation.

Quatre domaines de recherches ont été identifiés : sédimentologie, hydrologie, morphologie et le domaine marin.

Les études en laboratoire et in situ sont majoritairement représentées, toutefois deux modèles numériques ont aussi été mis en place, et quatre études théoriques sur la formation des formes sédimentaires ont été réalisées. Il y a une forte prédominance de l'interaction des dunes avec des structures plus petites, comme des rides ou des dunes plus petites. D'une manière générale peu de rapport étudient les interactions entre les dunes, celles-ci ne représentent généralement pas le sujet principal d'une recherche, mais sont des observations supplémentaires.

De plus peu d'étude sur les interactions entre les barres et les dunes sont réalisées, et les approches via le transport sédimentaire restent encore faibles. Les recherches sur les barres sédimentaires sont donc à approfondir.

Mots Clés : Interactions, Structures sédimentaires, superpositions, dunes subaquatiques, barres sédimentaires.