



**POLYTECH<sup>®</sup>**  
**TOURS**

Département  
Aménagement et Environnement



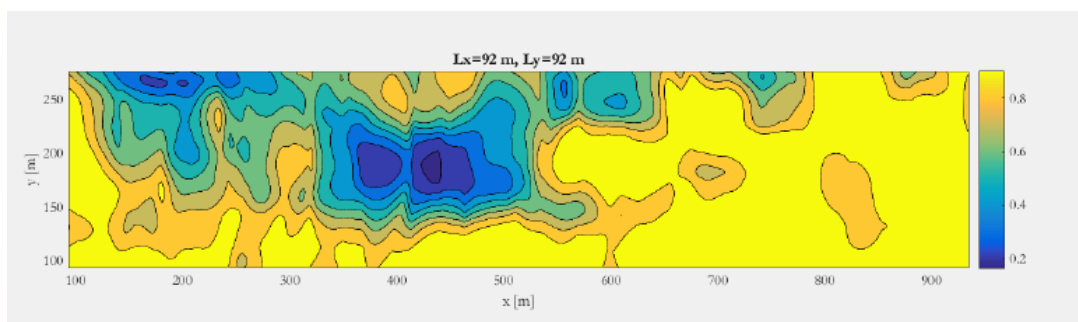
Ecole d'ingénieurs  
polytechnique  
de l'université de Tours

**CITERES**  
**UMR 7324**  
**Cités, Territoires,**  
**Environnement et Sociétés**

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

**Projet de Fin d'Etudes**

## **Approche analytique de la morphologie et de la dynamique des dunes subaquatiques**



**2017-2018**

**Directeur de recherche**

**RODRIGUES Stéphane**

**DALIDO Chloé**

# Approche analytique de la morphologie et la dynamique des dunes subaquatiques

## Synthèse bibliographique

**RODRIGUES Stéphane**

**DALIDO Chloé**

**2017/2018**

# 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 génie de l'aménagement 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 M. Stéphane RODRIGUES, mon tuteur de PFE, de m'avoir guidée, conseillée et d'avoir été disponible tout au long du projet. Je le remercie également d'avoir contacté pour moi des personnes pouvant m'aider à avoir accès à plus d'informations concernant les outils trouvés lors de mes recherches.

Mes remerciements s'adressent également M. Jules LE GUERN pour ses conseils et échanges concernant le logiciel BEDFORMSATM.

Enfin, je souhaite remercier M. Pascal MAKRIS de se rendre disponible pour m'expliquer comment interpréter les outils de Fourier et les ondelettes pour la continuité de mon projet.

# SOMMAIRE

---

Signification des sigles.....	2
Introduction - Problématique.....	3
1. Les dunes des formes dépendantes des conditions hydro-sédimentaires de son milieu.....	4
1.1. Morphologies des dunes .....	4
1.2. Conditions de création des dunes .....	5
1.3. Paramètres influençant et influencés par les dunes .....	6
1.3.1. Les paramètres hydrauliques .....	6
1.3.2. Les paramètres sédimentaires .....	7
1.4. Évolution, migration des dunes.....	8
1.5. Modèles de prévision de changement de forme des dunes .....	9
2. Méthode manuelle de détection des dunes pour un modèle linéaire .....	10
2.1. Méthode « <i>zero crossing</i> » : une méthode manuelle .....	10
2.2. <i>Bed form Tracking tool</i> : une méthode liée à la longueur d'onde dominante .....	11
3. La transformée de Fourier : outil de traitement du signal majeur pour détecter les dunes .....	12
3.1. Principe de la transformée rapide de Fourier .....	12
3.2. <i>2D Fast Fourier Transform</i> : un algorithme complémentaire de la méthode de <i>zero crossing</i> 13	
4. Les ondelettes des outils répondant aux limites des transformées de Fourier .....	17
4.1. Principe des ondelettes .....	17
4.2. <i>BEDFORMS-ATM</i> : un outil ayant plusieurs fonctionnalités.....	18
5. D'autres pistes étudiées .....	22
6. Quels sont les outils les mieux adaptés pour le projet R-TEMUS?.....	25
7. Protocole opératoire : test de la précision des outils les plus pertinents sur la Loire .....	27
7.1. Étape 1 : Choix des logiciels étudiés.....	27
7.2. Étape 2 : Modification des données pour les rendre exploitables.....	27
7.3. Étape 3 : Caractérisation des dunes sur les logiciels et manuellement .....	28
7.4. Étape 4 : Étude comparative des différentes techniques .....	28
Conclusion .....	29
Bibliographie.....	31
Webographie .....	34
Liste des figures et tableaux.....	35

---

## Signification des sigles

---

BTT : *Bedform Tracking Tool*

MATLAB : *Matrix Laboratory*

MNT : Modèle Numérique de Terrain

R-TEMUS : Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'USages en Basse Loire

SHOM : Service Hydrographique et Océanique de la Marine

SI : Système International

1D : une dimension

2D : deux dimensions

3D : trois dimensions

---

## Introduction - Problématique

---

Les dunes sont des corps sédimentaires qui se forment suite à une friction du sol, composée de sédiments meubles, générée par l'action du vent ou du courant. Ainsi les dunes sont observées dans divers écosystèmes. D'un point de vue continental elles sont présentes dans les déserts et sur les côtes littorales. Mais les dunes existent aussi dans les milieux aquatiques. Ubiquistes, elles sont aussi bien présentes dans les océans, que les estuaires, fleuves et au niveau des glacis continentaux. (Ferret, 2011). Dans les milieux aquatiques continentaux, les dunes se développent sur des fonds sableux ou sablo-graveleux. Ces formes ont un rôle dans le fonctionnement biotique et abiotique des écosystèmes fluviaux. Elles servent d'habitats pour les macro-invertébrés benthiques et influent sur le transport sédimentaire. La répartition des sédiments influençant la dynamique hydraulique d'un cours d'eau, il est important d'étudier les dunes lors de projets d'aménagement. Leur morphologie dépend des conditions hydro-sédimentaires du régime hydraulique et de si elles sont en équilibre ou non (Bridge, 2003). Ces paramètres évoluant dans le temps et d'un milieu à un autre, les dunes présentent une multitude de formes (sinueuse, droite, en croissant, asymétrique). Cette diversité a présenté bien des obstacles pour les chercheurs qui souhaitaient en découvrir plus sur le fonctionnement de ce micro écosystème.

Ainsi aux prémices des recherches, les chercheurs expliquaient la morphologie des dunes et leur évolution à l'aide de formules mathématiques. Elles combinaient les divers paramètres hydrauliques influençant les dunes (Wever, 2016). Cependant, ces formules étaient créées à partir de données déjà existantes et/ou de phénomènes observés sur un lieu d'études. Les chercheurs, n'étant pas encore conscients de la diversité morphologique des dunes, se rendaient alors compte que leur méthodologie n'était pas reproductible. Elle ne servait qu'à expliquer les phénomènes locaux. Il a fallu attendre l'arrivée des technologies de positionnement, des échosondeurs multifaisceaux et de la cartographie SIG pour mettre en évidence cette réalité (Ogor et Zerr, 2016). Ces technologies ont apporté un gain de temps considérable aux chercheurs et plus d'informations sur le fonctionnement des dunes comme la densité de la couche de sable, la direction du courant, la turbulence et la variation de vitesse de migration du lit (Wever, 2016).

Des relevés bathymétriques à l'aide d'échosondeurs sont actuellement réalisés sur la Loire entre Montsoreau et Nantes dans le cadre du projet R-TEMUS afin de mieux connaître le fonctionnement abiotique de cet écosystème et caractériser la morphodynamique des dunes et barres sédimentaires. Seulement une fois les données récoltées et mise sous forme de modèle numérique de terrain, les chercheurs ne disposent pas d'outils adaptés pour analyser et caractériser les dunes de façon automatique et précise.

Afin de répondre à ce problème, un projet de fin d'études a été mis en place. Le premier semestre consiste en un état de l'art des outils pouvant mesurer les dunes. Le deuxième semestre consistera en une application des outils trouvés sur des relevés bathymétriques réalisés en Loire dans le cadre du programme R-TEMUS. La synthèse bibliographique suivante se centre dans un premier temps sur le fonctionnement des dunes afin d'expliquer en quoi leur morphologie est complexe à caractériser. Dans un second temps, elle met en évidence les techniques actuelles qui permettent de traiter les signaux d'échosondeurs multifaisceaux et les outils informatiques fonctionnels associés. Ensuite, une analyse comparative de ces différents outils est effectuée afin de déterminer lesquels seraient intéressants à utiliser sur la Loire. Enfin cette synthèse bibliographique se termine par un protocole opératoire de traitement des données via les outils choisis. Ce protocole opératoire sera mis en œuvre au second semestre.



# 1. Les dunes des formes dépendantes des conditions hydro-sédimentaires de son milieu

Dans cette partie est expliqué pourquoi l'étude de la morphologie des dunes est un sujet complexe. Dans un premier temps sont détaillées les morphologies des dunes et comment elles se créent. Ensuite, les paramètres influençant ce domaine sont présentés ainsi que le phénomène de migration. Enfin deux modèles de prédiction de changement de forme des dunes seront présentés.

## 1.1. Morphologies des dunes

Les dunes sont des corps sédimentaires très présents dans les chenaux fluviaux. D'une hauteur comprise entre 10m et 100m, les dunes sont considérées comme des mésoformes. Les dunes possèdent deux faces : une qui s'érode à l'amont et une où les sédiments se déposent à l'aval (voir figure 1). La crête est orientée perpendiculairement au sens du courant.

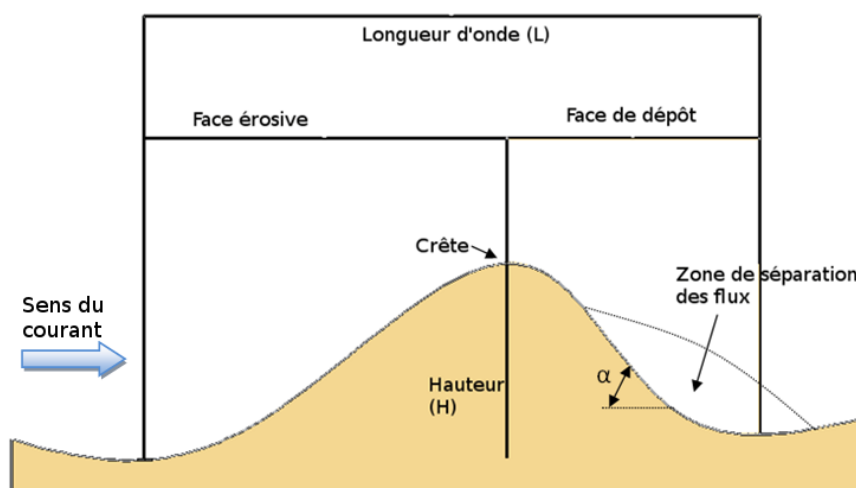


Figure 1 : Schéma descriptif de la morphologie d'une dune

Si l'on décrit les dunes par rapport à leur profil, on distingue les dunes asymétriques des dunes symétriques. La première catégorie présente les caractéristiques suivantes. La face d'érosion est longue avec une pente douce tandis que la face de dépôt est courte et abrupte (généralement plus de 25°) (Kostaschuk, 2005). La zone de cisaillement est quant à elle très développée. Le ratio hauteur/longueur d'onde est important. Au contraire, les dunes symétriques présentent deux faces de longueur similaires avec des pentes douces (inférieure à 14°). Le ratio  $H/L$  est plus restreint. Dans la Loire, la majorité des dunes observées sont des dunes asymétriques (Claude, 2012). D'un point de vue planaire, les dunes sont de forme 2D ou 3D. Les dunes 2D se forment préférentiellement à des vitesses de courant faibles et présentent un litage plan et une crête rectiligne. Les dunes 3D se forment à des vitesses plus importantes et présentent une déformation de la crête qui est sinueuse ou en forme de lobe. Son plan de litage est oblique et incurvé (Kostaschuk, 2005).

Les dunes peuvent avoir la forme d'un croissant, d'un lobe ou d'une langue (Bridge, 2003). Les strates sont formées sur la face de dépôt et inclinées suivant l'angle de repos. L'épaisseur de ces couches varie de l'ordre du millimètre au centimètre. Suivant leurs formes, le processus de stratification est différent. Pour les dunes linéaires, les strates se forment parallèlement à la ligne de crête, la superposition ne varie pas suivant la direction de l'inclinaison. Quand la dune migre, le courant de la ligne de rattachement érode en balayant les surfaces planaires. On parle alors de *planar cross stratification* (Bridge, 2003). Pour les dunes incurvées, la superposition varie selon la direction de l'inclinaison des dunes. Le courant de ligne de rattachement dans les zones érodables crée des formes d'éperons. Il balaie les surfaces d'érosion et crée des creux dans les profils transversaux. On parle de *through cross stratification* (Bridge, 2003).

Un indice, créé par Dalrymple en 1984, permet de déterminer la sinuosité d'une dune. Cet indice met en relation l'extension longitudinale de la dune (E) et la longueur de la crête (Lc). Plus E/Lc est proche de 1, plus la dune tend à être linéaire (Ferret, 2011).

Suivant le stock sédimentaire disponible, les dunes sont isolées ou structurées en champ. Ce dernier cas arrive lorsque le stock sédimentaire est important (Ferret, 2011).

Les dunes peuvent être des corps surimposés par des rides. Les rides sont des microformes qui se créent suivant les mêmes processus que les dunes mais sont de taille plus petite (1 à 10m). Elles se forment à l'arrière des dunes lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 25 et que la pente n'excède pas 15° selon Dewez (Ferret, 2011). Elles peuvent aussi surimposer des barres. Les dunes observées sur les barres sont plus grandes que celles se trouvant dans le talweg. (Claude, 2012)

## 1.2. Conditions de création des dunes

Le développement des dunes est avant tout influencé par la couche limite turbulente lorsque les écoulements sont sous-critiques ( $Fr < 1$ ) (Rodrigues et al., 2016). La couche limite turbulente contient plusieurs sous-couches dont une laminaire et visqueuse au contact du fond du lit. Dans cette sous couche, les écoulements sont ralentis. Selon Yalin, dès qu'une irrégularité du lit entraîne une perturbation du courant et une friction entre le courant et le lit, l'épaisseur de la couche limite turbulente augmente. Il en est de même pour la sous-couche laminaire (Ferret, 2011). Ce phénomène favorise le dépôt de sédiments. Mais la friction entraîne également une augmentation de la contrainte de cisaillement en aval (Ferret, 2011). Avec ces deux paramètres, un processus de création de zones de dépôt et érosion se produit et crée les dunes.

Les dunes se forment dans un chenal lorsque les écoulements sont transitoires ou peu turbulents et que la granulométrie du fond est supérieure à 0,1 mm. Il faut également que la résistance des sédiments soit élevée et que la longueur d'onde soit du même ordre de grandeur que celle de la hauteur d'eau du cours d'eau. C'est un facteur limitant de développement. D'après les travaux de Yalin de 1964, la profondeur d'eau correspond à six fois la hauteur de la dune (Bridge, 2003).

Afin de savoir si une dune est en état d'équilibre, on calcule sa *steepness* (ratio hauteur/longueur d'onde). Une dune est considérée comme cherchant l'état d'équilibre lorsque ce ratio est inférieur à 0.06. En effet, il traduit une profondeur d'eau et/ou apport et/ou disponibilité des sédiments trop faibles (Rodrigues et al. 2016). La migration des dunes s'effectue alors sans une

conservation de sa forme. Selon Bridge, les dunes atteignent un état d'équilibre quand le nombre de Reynolds est supérieur à 10.

### 1.3. Paramètres influençant et influencés par les dunes

---

La géométrie des dunes évolue sans cesse. Ces corps sédimentaires ont une hauteur et une longueur d'onde qui varient continuellement. Il en est de même pour l'état d'équilibre. Selon Bridge, la variabilité de la géométrie des dunes s'observe aussi bien entre elles, qu'au sein même de celles-ci. Ce sont des profils en long et en travers qui ont pu mettre en évidence cette diversité. Si la géométrie est aussi différente d'une dune à une autre, c'est parce qu'elle s'adapte aux conditions hydrauliques et sédimentaires lors des épisodes de crues.

#### 1.3.1. Les paramètres hydrauliques

---

La morphologie des dunes est dépendante de la profondeur d'eau, notamment lorsque le courant est unidirectionnel. En effet, lorsque le courant arrive au niveau de la face d'érosion, la profondeur d'eau diminue, ce qui augmente sa vitesse. On observe le phénomène inverse au niveau de la face de dépôt. La vitesse du courant et la contrainte de cisaillement étant corrélées positivement, un processus d'érosion et de transport sédimentaire est observé sur la face amont et un dépôt sédimentaire sur la face aval. Sur cette face, une séparation des flux se produit et crée des turbulences. Ces turbulences ont un rôle dans le transport sédimentaire (voir la partie suivante).

En régime permanent, la hauteur et la longueur d'onde des dunes dépendent surtout de la contrainte de cisaillement. À débit constant, la vitesse et la hauteur d'eau peuvent être différents et donc entraîner la présence de dunes plus ou moins grandes (Bridge, 2003). De plus, la hauteur d'eau et vitesse d'écoulement peuvent incurver une dune pour des hauteurs et longueurs d'onde différentes.

Lors des crues, en période montante, il y a peu de résistance à l'écoulement et la hauteur d'eau est faible. La vitesse est par contre importante. Cela entraîne une réduction de la taille et hauteur des dunes. En période descendante, les paramètres hydrauliques s'inversent et les dunes ont tendance à se développer, ayant des valeurs plus importantes que celles à l'équilibre (Bridge, 2003).

Les dunes ne s'adaptent pas instantanément aux modifications des paramètres hydrauliques lors des épisodes de crues. Un temps de latence est observé. En effet, il existe une relation d'hystérèse entre le taux de transport et le débit liquide. Cela affecte l'hydrologie et la déformation du lit (Rodrigues, 2014). En effet, selon les études de Ten Bricke publiées en 1999, ce phénomène augmente la rugosité hydraulique des dunes et réduit le transport sédimentaire lors de la décrue.

Lorsque les contraintes hydrauliques sont importantes, il arrive que les dunes subissent un effondrement vertical, les transformant ainsi en bossues (humpback dunes).

Enfin, bien que les dunes soient influencées par les paramètres hydrauliques, elles ont également un effet rétroactif sur eux. Lorsqu'elles se développent et se rapprochent de leur état d'équilibre, elles augmentent la rugosité du lit comme le montre la formule de Van Rijn :

$$k_{dunes} = 1.1\gamma Hd(1 - \exp^{-\frac{25Hd}{L}})$$

L représente la longueur d'onde de la dune; Hd la hauteur de la dune et  $\gamma$  est le paramètre de forme des dunes

Cela a des conséquences sur la résistance à l'écoulement qui augmente, élève le niveau du lit et diminue le taux de transport solide (Rodrigues, 2014).

### 1.3.2. Les paramètres sédimentaires

---

Les dunes se développent lorsqu'il y a un faible taux sédimentaire et une contrainte de cisaillement (Bridge, 2003).

Le taux de transport sédimentaire et la hauteur des dunes sont corrélés positivement pour une migration constante (Bridge, 2003). La contrainte de cisaillement influe sur la dynamique des dunes dans le dos de celles-ci, en dehors de la zone de séparation des flux. Une corrélation a été mise en évidence par Yalin en 1964 entre la contrainte de cisaillement et le ratio hauteur/profondeur d'eau :

$$\frac{H}{d} = \frac{1}{6}(1 - \frac{\tau_c}{\tau_0})$$

$\tau_c$  représente la contrainte de cisaillement sur les grains et  $\tau_0$  la contrainte de cisaillement moyenne. Plus la contrainte de cisaillement est forte moins la dune est haute.

Lorsque la contrainte de cisaillement varie, le taux de charriage s'active aussi avec un léger décalage dans le temps. Quand le taux de charriage est maximal sur la face d'érosion de la dune, il y a formation d'une crête et donc augmentation de la hauteur de la dune. Un taux de charriage faible dans les systèmes sablo-graveleux crée une structure modulable de graviers. Le sable s'installe alors dans les interstices (Bridge, 2003). Lorsque ce dernier augmente les graviers peuvent être déplacés jusqu'à la crête.

La qualité et les apports sédimentaires influencent tout autant la dynamique des dunes. C'est notamment le cas avec les armures. Ces surfaces sont plus riches en particules grossières que la couche sous-jacente et protège ce stock sédimentaire. Cela influence donc l'épaisseur de la couche sédimentaire et le relargage des sédiments qui sont stockés temporairement. Une armure limite les apports en sédiments fins pour le développement des dunes. N'ayant pas ces sédiments, les dunes sont donc limitées dans leur expansion en hauteur (Bridge, 2003). Lorsque les armures rompent lors des crues, il arrive que le transport solide soit alors pulsé dans les systèmes sablo-graveleux. On a également un apport pulsé de sédiments grossiers lors de crues saisonnières et fontes des neiges. De plus, plus les sédiments composant la dune sont grossiers plus la dune est imposante (Bridge, 2003). Le stock sédimentaire influe, lui, la structuration des dunes et sa longueur d'onde. Quand il est important, les dunes forment des champs. Dans ses études publiées en 2001, Le Bot a montré que leurs longueurs d'ondes étaient plus régulières que les dunes isolées.

Enfin, la morphologie des dunes est influencée par son taux de migration et d'érosion. En effet, lorsque le taux d'érosion est supérieur au taux de migration, la pente aval sera faible et inversement si celui-ci est inférieur (Bridge, 2003).

#### 1.4. Évolution, migration des dunes

---

Comme il a été expliqué dans la partie 1.3.1, un phénomène de dépôt se produit sur la face aval de la dune. De façon périodique, il arrive que les sédiments retombent dans le fond du lit, de la même manière qu'une avalanche (Bridge, 2003). Ce mécanisme participe à l'évolution des dunes. Lorsque le taux de transport est faible, le phénomène d'avalanche est irrégulier. Les sédiments grossiers se retrouvent alors à la base de la face de dépôt et les grains plus fins se calent dans les interstices. Quand le taux de transport est important, il n'y a pas de tri des sédiments et le mécanisme d'avalanche est continu. Quand les écoulements sont turbulents, une partie des sédiments peut être remis en suspension, ce qui entraîne leur rehaussement sur la face de dépôt.

Lorsqu'une dune migre, une faible partie des sédiments part en suspension. Dans la zone de séparation des flux, des phénomènes turbulents se produisent. Au bas de la face amont, cela marque le début de l'érosion et entraîne la suspension de sédiments dans le lit. Les tourbillons entraînent des mouvements de réhaussement du fluide et les sédiments remontent jusqu'à la surface de l'eau. Lorsqu'ils remontent, ils créent des bulles à la surface comme si l'eau bouillait (Bridge, 2003). Plus les sédiments sont fins, plus les turbulences sont importantes et donc augmentent la longueur d'onde de la dune.

Le déplacement des dunes est variable, surtout pour les dunes isolées (Bridge, 2003). Suivant Wintenberger, il arrive qu'une dune se déplace de 10m en une journée (Rodrigues et al, 2016). Bien que variable, une formule du taux de migration des dunes a pu être établie en écoulement permanent :

$$C = \frac{i_m}{H \cdot C_b} = \frac{2Im}{H \cdot C_b}$$

$i_m$  représente le transport volumétrique moyen pour une dune de forme triangulaire;  $i_c$  le transport volumétrique moyen pour les dunes en forme de crête;  $H$  la hauteur moyenne des dunes et  $C_b$  la concentration des sédiments dans le lit (l'inverse de la porosité) (Rodrigues, 2014). À partir de cette équation et si le transport sédimentaire est constant, on peut déterminer une corrélation négative entre la vitesse de migration et la hauteur d'une dune. Quand une dune migre moins vite, sa hauteur augmente.

En régime permanent, différents phénomènes sont observés. Il y a des phénomènes d'affouillement et les dunes peuvent se dépasser entre elles (Bridge, 2003). Lorsqu'une dune rattrape une autre en aval, la dune qui va se faire dépasser voit sa hauteur augmenter et sa longueur diminuer de part une augmentation du phénomène d'affouillement (Leclair 2000 in Bridge, 2003). La vitesse de migration diminue pour les deux dunes avec une influence plus importante pour la dune qui est en amont quand elle atteint la zone de séparation des flux de la dune rattrapée. Au moment du dépassement la hauteur et la longueur de la dune dépassée diminuent. Cela est dû au fait qu'à ce

moment là de nouvelles dunes se forment sur son dos. La vitesse de migration et la hauteur des dunes augmentent de nouveau une fois le dépassement terminé.

### 1.5. Modèles de prévision de changement de forme des dunes

Afin de faciliter les études géomorphologiques dans les rivières et fleuves, de nombreuses équations empiriques pour calculer les dimensions des dunes furent mises en place. Cependant, elles ne présentaient pas de reproductibilité. Allen a décidé d'aller plus loin en créant en 1978 un modèle pour prédire les formes des dunes lors des changements de débit. Il est basé sur les changements d'hauteur, de longueur d'onde et de populations vivant dans un canal pour un coefficient de résistance, une pente et un profil en travers constants. Seul le débit est périodiquement variable. Dans ce modèle, Allen a défini pour les dunes un taux de migration fixe et une longueur d'onde moyenne lorsque le régime est permanent. Seule la hauteur varie suivant le débit pour atteindre la valeur d'équilibre en agissant sur le coefficient de changement et le taux de migration. Le modèle a mis en évidence que lorsque le débit augmente, il en est de même pour le temps de relaxation longueur d'onde/hauteur et le taux de destruction des dunes (Allen,1982). Cependant, ce modèle présente certaines limites. En réalité, la longueur d'onde et la résistance d'écoulement varie au cours du temps. Néanmoins, ce modèle permet d'estimer la géométrie des dunes à quelques jours près.

En 1979, Fredsøe a créé un autre modèle qui a montré que le changement de hauteur était dû à un changement de débit, à la contrainte de cisaillement et au taux de transport sédimentaire du fond du lit à la crête de la dune. Wibenhø et Klaasen en 1983 et Gabel en 1993 ont confirmé cela. Ce modèle est calibré pour un débit variant faiblement et émet également l'hypothèse que la longueur d'onde est constante. Il ne s'applique que pour les dunes isolées et est peu réaliste puisqu'il ne prend pas en compte les phénomènes de construction et destruction des dunes.

C'est face à ses résultats applicables qu'à des milieux spécifiques que des nouvelles technologies se sont mises en place.

---

## 2. Méthode manuelle de détection des dunes pour un modèle linéaire

---

Un modèle linéaire est dit modèle 1D. Il peut être obtenu à partir de données récoltées par des sondeurs monofaisceau ou multifaisceaux. Avec la première technique, le sondage est réalisé à la verticale du navire, on obtient donc une ligne. Avec le sondeur multifaisceaux, le sondage s'effectue perpendiculairement au bateau avec des directions différentes, ce qui permet d'obtenir des données 2D. Pour que ces données soient analysées sous un modèle linéaire, il faut qu'elles soient présentées sous forme de plan.

---

### 2.1. Méthode « *zero crossing* » : une méthode manuelle

---

Avec cette méthode, les dunes sont reconnues à partir des intersections entre le profil d'élévation du lit et une courbe de tendance.

La courbe de tendance est obtenue en décomposant le profil. Il faut d'abord enlever manuellement les erreurs notifiées (quand un maximum ou un minimum est considéré comme un creux ou une crête et ne le devrait pas) puis modifier la courbe de tendance pour la rendre plus adaptée au terrain (Van der Mark & Blom, 2007). Les courbes de tendances sont tracées à partir de trois points successifs minimum (le maximum étant le nombre points disponibles et exploitables) en utilisant une fonction de densité spectrale de puissance. Elle analyse les différentes composantes spectrales d'un signal en réalisant une analyse harmonique. Cela permet d'obtenir une grandeur physique plus adaptée et de connaître les longueurs d'onde des dunes (Van der Mark & Blom, 2007). On compare toutes ces lignes pour ensuite déterminer la longueur de dunes dominante. Cette information va servir pour créer la courbe de tendance. Afin que le profil d'élévation du lit fluctue autour de zéro, le profil d'élévation du lit est modifié en soustrayant de sa valeur, la valeur de la courbe de tendance créée.

Pour déterminer les points qui intersectent la courbe de tendance (*zero crossing*), une moyenne glissante est utilisée sur le profil via la fenêtre de Hann. Cet outil mathématique est une fenêtre d'observation symétrique très utilisée pour les signaux aléatoires (Van der Mark & Blom, 2007). En appliquant cette méthode, les petites perturbations fluctuant autour de zéro ne sont pas prises en compte. Une fois cela réalisé, les *zero upcrossing* et *zero downcrossing* sont déterminés. Les *zero upcrossing* sont les points du profil qui intersectent la courbe de tendance et dont le point suivant a une valeur positive. Pour les *zero downcrossing*, c'est l'inverse.

Une fois tous les paramètres déterminés, les crêtes et creux des dunes sont déterminés. Une crête correspond au point le plus haut entre une intersection montante et une descendante. Le creux de la dune (ou dépression aval) est le point le plus bas entre une intersection descendante et une montante (Claude, 2012).

Une fois cela effectué, il est possible de déterminer les paramètres morphologiques de la dune. Pour la hauteur de la dune, il y a deux façons de la déterminer. En mesurant la distance entre la crête et le creux de la face amont ou en mesurant entre la crête et le creux de la face aval, lieu de

dépôt. Pour la longueur d'onde, quatre moyens de détermination sont possibles : mesurer la distance entre deux crêtes, entre deux creux, entre deux *zero upcrossing* ou entre deux *zero downcrossing*.

## 2.2. *Bed form Tracking tool* : une méthode liée à la longueur d'onde dominante

---

Cet outil Matlab calcule et extrait des paramètres morphologiques des dunes en se basant sur la méthode du *zero crossing*.

Le logiciel permet de calculer la hauteur d'une dune, sa longueur d'onde, l'angle de la dune au niveau de la face de dépôt ainsi que la hauteur et longueur de chacune des faces de la dune. Avec ce logiciel, il est possible de déterminer la hauteur et longueur d'onde des dunes suivant diverses méthodes comme il est décrit dans la sous partie précédente. Rolien Van der Mark, la conceptrice du logiciel, a réalisé une étude de dérivation standard avec les différentes méthodes afin de savoir laquelle était la plus adaptée. En comparant les écarts de dérivation standard, elle conseille de mesurer la hauteur de la dune en prenant la distance entre la crête et la creux de la face aval. Pour la longueur d'onde, elle déconseille de la déterminer en mesurant la distance entre deux creux.

Le logiciel peut s'appliquer à des structures surimposées. Pour cela, l'utilisateur doit déterminer deux longueur d'ondes dominantes, soit une courbe de tendance pour chaque type de forme de lit (Van der Mark & Blom, 2007). Le code s'exécute alors deux fois car il traite séparément les longueurs d'ondes dominantes.

Ce modèle, bien qu'utile, présente quelques limites. Il faut que les données soient mesurées sur une grille uniforme. Avec la présence d'une courbe de tendance due à la méthode des *zero crossing*, certaines formes de lit ayant des dimensions très éloignées de la longueur d'onde dominante ne peuvent être détectées. De plus, avec les modifications faites au signal, il est désormais plus faible. Il arrive parfois qu'à certains endroits le signal original coupe la courbe de tendance et pas le corrigé. Dans ce cas, la forme de lit n'est pas considérée comme telle. Notamment pour les dunes de plus de 20m dont la hauteur est sensiblement égale à celle des dunes plus petites (Claude, 2012). Le logiciel découpe alors les grandes dunes en plusieurs dunes de petites taille. De plus, les petites dunes migrent plus rapidement que les grandes dunes. La vitesse de migration déterminée par la distance traversée entre deux balayements est donc surestimée pour les grandes dunes. Néanmoins, étant un outil de Matlab, il possède l'avantage d'être libre d'utilisation.

Bien que désormais de nouvelles techniques plus performantes se développent, l'outil BTT reste un outil fiable et souvent utilisé en comparaison afin de vérifier la validité des résultats de la méthode émergente. Lisimenka & Kubicki ont ainsi vérifié les résultats de 200 profils batymétriques du fond du fleuve Vistule pour valider leur nouvelle méthode de travail.

La méthode de *zerocrossing* reste encore très utilisée, mais plus comme technique en soit mais comme une étape. En effet, pour caractériser la morphologie et dynamique des dunes certains chercheurs se basent désormais sur la transformée de Fourier et un algorithme : *2D Fast Fourier Transform* (Van Djick, 2008; Cazenave et al. , 2013).



---

### 3. La transformée de Fourier : outil de traitement du signal majeur pour détecter les dunes

---

Les échosondeurs étant des outils renvoyant les données sous forme de signaux, les outils de traitement de signaux furent les premières techniques d'analyses utilisées. Dès le début, la transformée rapide de Fourier fut utilisée dans de nombreuses études et devint la méthode majeure d'analyse des formes de lit.

#### 3.1. Principe de la transformée rapide de Fourier

---

La transformée de Fourier est une fonction mathématique qui permet de passer d'une représentation temporelle d'un signal à une représentation fréquentielle en décomposant une fonction apériodique en somme de fonctions périodiques de différentes fréquences. Cela permet de caractériser le signal étudié en découpant son spectre de fréquence. Une représentation fréquentielle permet de mieux représenter les données et de mieux isoler les informations que l'on souhaite analyser et donc de réaliser l'étude du signal plus facilement (Thome, 2016). La particularité de la transformée est que contrairement à la série, elle peut s'appliquer sur des signaux apériodiques (Launay, 2007). C'est une condition importante car les dunes n'ont pas les mêmes caractéristiques morphologiques entre elles. La transformée de Fourier décompose un signal en une intégrale (c'est à dire une somme infinie) de fonctions trigonométriques complexes ou réelles qui peut être représentée sous forme d'exponentielle. Le signal est représenté comme une somme de signaux sinusoïdaux et cosinusoidaux (Launay, 2007). La transformée de Fourier peut également reconstituer un signal à partir de ses différentes composantes spectrales (harmoniques) sans qu'il y ait de perte d'informations. Elle peut être calculée pour tout signal appartenant à  $\mathbb{R}^n$ . Elle a pour formule pour un signal 1D :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \text{ avec } f \in \mathbb{R}$$

Pour un signal 2D sa formule est la suivante :

$$X(f, g) = \iint_{-\infty}^{\infty} x(t, u)e^{-i2\pi(ft+gu)} dt du \text{ avec } (f, g) \in \mathbb{R}^2$$

La transformée rapide de Fourier (*Fast Fourier transform*) est un algorithme de transformation de Fourier discrète qui réduit le nombre d'opérations et notamment celui des multiplications grâce à une complexité de calcul inférieure à celle de la transformée continue (Baudoin et Bercher, 2001).

Afin de limiter le domaine fréquentiel du signal analysé pour faciliter l'étude du signal, des fenêtres de pondération peuvent être utilisées. Le signal tronqué est alors défini de la façon suivante :

$$X_{tr}(f) = X(f) * F(f)$$

Xtr représente le signal tronqué, X le signal d'origine et F(f) la fenêtre d'observation.  $F(f) = 1$  si f est dans la fenêtre d'observation sinon  $F(f) = 0$

### 3.2. *2D Fast Fourier Transform: un algorithme complémentaire de la méthode de zero crossing*

---

Appelé fft2 fonction sous Matlab, cet algorithme permet de localiser les crêtes et creux des dunes. Il permet également de mettre en évidence des corps sédimentaires surimposés et de les isoler.

Lors d'une étude sur le fleuve Vistule en 2012, l'algorithme *2D Fast Fourier Transform* fut utilisé après que les données relatives à la profondeur aient été prémultipliées par une fonction appartenant aux séquences sphéroïdales discrètes (Lisimenka & Rudowski, 2013). En plus du spectre de densité, la fréquence spatiale et directionnelle du pic le plus énergétique furent calculées suivant cette méthode. L'algorithme a permis d'identifier les différentes formes de lits, leur localisation, orientation, taille et de voir les phénomènes d'érosion (Lisimenka & Rudowski, 2013). Le logiciel a permis de mettre en évidence le système de superposition de différentes formes de lit mais les dunes d'une longueur de plus de 25m ont été exclues de l'étude car leur fréquences étaient superposées à celles des dunes de petites tailles (Lisimenka & Rudowski, 2013).

Une étude a approfondi l'aspect de superposition en quantifiant la morphologie des formes de lit hôtes et celles surimposant l'hôte (Van Djick, 2008). L'algorithme a été exécuté sur le signal original. Puis ce dernier fut tronqué à plusieurs reprises afin de déterminer les différentes formes de lit. La détection des crêtes et creux des dunes se faisant par un calcul des courbures, le signal représentant le lit fut lissé en utilisant le filtre de Butterworth d'ordre 6. Ce filtre est linéaire et constant, ce qui permet une coupure plus douce et supprime les déformations du signal suite aux approximations (phénomène de Gibbs). Puis les dérivées premières et secondes furent calculées. Les crêtes furent considérées comme un point où la valeur de courbure est extrême et où la dérivée première directionnelle le long de la surface est nulle. Pour le creux, c'est un point où la valeur de courbure est également très importante. Mais pour que le point soit considéré comme un minimum local, il faut aussi que la dérivée seconde directionnelle soit nulle le long de la courbure minimale (Van Djick, 2008). L'étude a confirmé que l'outil fournissait une bonne précision de la localisation des formes de lit. Elle a également mis en évidence que l'algorithme permettait de localiser les crêtes et creux des dunes mais également les point d'inflexion et *brink point* (points où la zone de séparation des flux est active). La localisation des différentes formes de lits s'est révélée précise tout comme pour l'étude menée en Pologne sur le fleuve Vistule.

L'outil a également été utilisé pour déterminer en plus de la hauteur et longueur de la dune, son orientation et son asymétrie (Cazenave et al., 2013). Pour calculer l'orientation des dunes, l'algorithme est effectué sur le signal original. Puis un filtre passe-haut circulaire lisse ce signal. Cela va permettre une extraction automatique des nombres d'ondes intéressants avec leurs directions suivant l'axe x et y. Ces chiffres sont ensuite superposés à l'emplacement de la puissance spectrale maximale. L'angle à partir de l'axe des y est calculé à partir de formules trigonométriques. L'orientation de la crête est ensuite déterminée perpendiculairement de cet angle (Cazenave et al., 2013). Pour le calcul de l'asymétrie des dunes, de leur longueur et de leur hauteur, un filtre passe-bande de Butterworth d'ordre 6 est exécuté sur le signal. Ensuite un calcul de l'inverse de la

transformée de Fourier 2D y est appliqué puis une analyse de *zerocrossing* (Cazenave et al., 2013). La hauteur est déterminée suivant la différence de hauteur entre une crête et un creux adjacent. L'asymétrie des dunes est calculée suivant le ratio de la longueur de chacune des faces de la dune (Cazenave et al., 2013). Les mesures de longueur et d'orientation des crêtes sont conformes aux résultats trouvés manuellement. Le fait d'extraire des nombres d'ondes de façon discrète réduit quelque peu la précision dans les résultats mais cela est corrigé par le filtre passe-haut. Conçu autour du domaine des données d'entrée, il a supprimé les erreurs représentant des désalignements, ce qui permet d'identifier plus facilement le spectre. Les résultats des hauteurs correspondent à la réalité malgré une sous-estimation des hauteurs pour les signaux étant dans la limite haute de la fenêtre d'observation.

Lisimenka a publié les résultats d'une étude qui montre une utilisation et exploitation plus approfondie de l'algorithme. Tout comme en 2013, son étude fut menée sur le fleuve Vistule. Cette fois le chercheur a approfondi l'étude du signal. En plus de la partie la plus énergétique, il a extrait les informations de la seconde structure du spectre 2D sans application de filtre passe bande dans les fréquences élevées et faibles.

Le modèle digital de terrain obtenu suite au relevé bathymétrique avait une précision de quadrillage de 0.1m. L'élévation du lit de la rivière a été divisé en sous domaines en utilisant une fenêtre d'observation de 200x200m avec un recouvrement de 75% avec les fenêtres adjacentes. Le fait de créer des fenêtres réduit les biais dans l'étude mais diminue également la résolution du spectre.

Pour chaque cellule, la profondeur moyenne a été soustraite à chacune des données puis la surface bathymétrique a été modélisée en 2D en appliquant un modèle de régression polynomial de 3ème ordre. Pour minimiser les pertes de spectre, les données de chaque sous-domaine furent déformées orthogonalement par une fonction appartenant aux séquences sphéroïdales discrètes. Elle permet la meilleure suppression des lobes secondaires. Une fonction de séquences sphéroïdales discrètes bidimensionnelles de l'ordre 0 à fenêtre a été multipliée au produit de la demie bande passante  $TW=2.5$ . Il a été calculé à partir du produit du signal unidimensionnel pour chaque dimension. Son coefficient de pondération a été défini de la manière qui suit :

$$W_{coeff} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N Ftaper_{x,y}$$

M correspond au nombre d'échantillons pris dans la direction des abscisses; N à celui pris dans la direction des ordonnées; *Ftaper* sont les valeurs de la fonction d'affinement bidimensionnelle

Ensuite, l'analyse spectrale basée sur l'algorithme 2D DFT fut exécutée et a permis d'obtenir une fonction de spectre bidimensionnel qui décrit la hauteur du lit dans le domaine de la fréquence spatiale. Pour minimiser les erreurs, l'algorithme a été exécuté en plusieurs sous groupes (Lisimenka & Kubicki, 2017). En prenant en compte l'application de la fonction à fenêtre et pour recouvrir la hauteur des dunes suffisamment, la fonction du pouvoir du spectre a été multipliée par l'inverse du coefficient de pondération :

$$P(f_x, f_y) = \frac{1}{w_{coeff}} |\mathfrak{F}\{s(x, y)\}|^2$$

$P(f, x, y)$  correspond à la fonction du pouvoir du spectre estimé à partir du champ de la hauteur de la hauteur du lit :  $s(x, y)$ . Le symbole  $\mathfrak{F}$  représente la transformée de fourier discrète de seconde bidimensionnelle.

Le spectre étant symétrique, seule la partie supérieure fut étudiée. Ensuite, 180 tranches  $P_{\theta i}$  unidimensionnelles avec un pas d'un degré basé sur l'algorithme de tracé de segment de Bresenham ont été extraites du spectre 2D, où  $i \in [0: 1: 180]$  représente l'angle d'alignement approprié  $\theta_i$  de la  $i^{\text{ème}}$  tranche. Dans un souci de clarté, une multiplication par un facteur 2 a aussi été apportée pour obtenir un spectre de puissance unilatéral. Pour éliminer certains doutes à propos du problème d'échantillonnage directionnel, des fréquences particulières discrétisées  $f_{\theta i}$  associées à un intervalle  $\Delta f_{\theta i}$  pour chaque tranche furent calculées à partir d'une géométrie simple. Puis un spectre variant  $S$  fut déterminé pour chaque tranche en ajustant le pouvoir du spectre avec la fréquence Nyquist :

$$S_{\theta i}(f_{\theta i}) = \frac{P_{\theta i}}{F_s/2}$$

La fréquence de Nyquist est la fréquence maximale que doit contenir un signal pour pouvoir être découpé suivant un échantillonnage d'intervalle régulier.

Plusieurs paramètres du spectre ont été dérivés de la fonction du spectre à partir de calculs sur les moments spectraux et leur combinaison. Un des avantages des moments spectraux est d'extraire l'information directement du spectre de Fourier et également leur intensité qui indique les changements de phase.

Les moment spectraux d'ordre 0 et 2 ont été appliqués pour quantifier la hauteur des dunes (Lisimenka & Kubicki, 2017). Le moment d'ordre 0 correspond au pic d'énergie à travers le domaine de fréquence du spectre. Il représente la variance du spectre. Il est défini de la façon suivante :

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df$$

Le moment d'ordre 2 est une pondération de la composition chaque fréquence du spectre par amplification du second ordre de la fréquence au niveau des chutes de hautes fréquences. Sur cette partie du spectre, le pouvoir est beaucoup plus faible et même plus faible que le pouvoir des basses fréquences du spectre. En réalisant l'amplification, cela permet d'extraire des informations sur des dunes de petite taille, dunes de deuxième génération. Il est défini de la façon suivante :

$$m_2 = \int_0^{\infty} f^2 S(f) df$$

Pour connaître la longueur d'onde dominante du site d'étude, un calcul basé une intégrale pondérée d'ordre 4 a été appliqué selon la méthode proposée par Young (1995) :

$$\lambda_{ch} = \frac{1}{f_{ch}(\theta_i)}$$

avec

$$f_{ch}(\theta_i) = \frac{m_2(\theta_i)}{m_0(\theta_i)} = \frac{\sum_{f_{\theta_i}=f_{tresh}}^{F_s/2} f_{\theta_i} S^4(f_{\theta_i}) \Delta f_{\theta_i}}{\sum_{f_{\theta_i}=f_{tresh}}^{F_s/2} S^4(f_{\theta_i}) \Delta f_{\theta_i}}$$

$m_0(\theta_i)$  renvoie les informations d'ondulation du spectre suivant un angle d'alignement déterminé.  $f_{tresh}$  correspond à la fréquence la plus basse et  $F_s/2$  correspond à la fréquence de Nyquist

La hauteur caractéristique des dunes selon un angle d'alignement déterminé est quant à elle caractérisée en appliquant une dérivation standard pondérée selon la méthode de Sverdrup et Munk (1947) :

$$\eta_{ch} = 2\sqrt{2}\sqrt{m_0(\theta_i)}$$

L'étude a permis de déterminer l'alignement de la crête, la longueur et la hauteur des formes de lit mais également les formes primaires et secondaires. Il n'y a pas de caractéristiques propres pour une génération de dunes. Des dunes de première génération sont plus petites que la taille moyenne des dunes de deuxième génération et inversement. Les résultats sont fiables mais quelque peu surestimés par rapport à ceux donnés avec la méthode du *bedform tracking tool*. Cela s'explique par le fait que, pour la nouvelle technique, les caractéristiques de chaque génération de dunes sont calculées séparément. Au contraire, pour le *bedform tracking tool*, c'est l'ensemble de la fréquence qui est analysée. L'influence d'une génération de dunes sur l'autre et réciproquement est une limite à l'obtention de résultats plus précis (Lisimenka & Kubicki, 2017). La rugosité topographique a également été bien paramétrée grâce à l'utilisation du moment spectral d'ordre 0 (Lisimenka & Kubicki, 2017). L'analyse a permis d'identifier les zones de convergence et divergence des dunes (Lisimenka & Kubicki, 2017). Notamment du fait qu'il a été observé que deux groupes de dunes se dirigeaient vers l'embouchure de la mer par des chemins distincts. Les chercheurs ont émis une hypothèse pour justifier cela. Selon eux, cela serait dû au régime hydrologique.

La technique mise en place présente quelques limites. Les données recueillies en bathymétrie doivent être très précises et il n'est pas possible de décrire la rugosité du lit pour un jeu de données important de façon automatique. Améliorer la méthode est donc nécessaire. Bien que donnant des résultats justes en comparant à la méthode de *zerocrossing*, réaliser cette analyse pour caractériser les dunes surimposées reste complexe et lent au travers des nombreux calculs à réaliser.

---

## 4. Les ondelettes des outils répondant aux limites des transformées de Fourier

---

Avec la transformée rapide de Fourier, les chercheurs ne pouvaient extraire des données lorsque les signaux variaient trop longtemps. Les oscillations représentaient des imprécisions dans leurs résultats (Takewaza, 2006 in Gutierrez et al, 2013). Ils se sont donc tournés vers d'autres techniques de traitement du signal. Ils ont trouvés en les ondelettes un outil répondant à leurs attentes (Catanolopera et al, 2009; Singh et al, 2011 in Gutierrez et al, 2013).

### 4.1. Principe des ondelettes

---

Les ondelettes décomposent le signal, tout comme la transformée de Fourier, tout en répondant aux limites de cet outil. La base de la transformation n'est pas uniquement sinusoïdale. Cela permet une meilleure adaptation au signal (Perrier, 2005). De plus, il n'y a pas de perte temporelle avec les ondelettes, car la décomposition se fait de manière fréquentielle et spatiale. La fenêtre d'observation est alors localisée en temps et en fréquence. Sa taille peut s'adapter à la fréquence car certaines ondelettes sont des fonctions oscillantes (Perrier, 2005). Cela permet de garder la même finesse d'analyse malgré une variation de la fréquence du signal (Leducq & Schelgel, 1990).

Pour dimensionner les dunes subaquatiques, le type d'ondelettes utilisé est les ondelettes continues (Bultheel, 1995). Ces ondelettes, une fois appliquées à une fonction, renvoient des vecteurs de dimension supérieure de 1 par rapport au vecteur d'entrée. Par exemple, lorsque les données sont en format 1D, les résultats sont représentés sous forme d'une image du plan temps-fréquence. Il est ainsi plus aisé de visualiser l'évolution fréquentielle du signal pendant un temps donné (Bultheel, 1995). Les ondelettes obtenues sont non-orthogonales. Les données résultantes sont corrélées (car redondantes) ce qui permet de vérifier plus facilement les résultats obtenus et donc faciliter l'analyse (Bultheel, 1995). Il existe plusieurs types d'ondelettes continues. Les plus connues sont l'ondelette de Morlet et l'ondelette de type dérivée gaussienne (DOG, Derivative of Gaussian) (Bultheel, 1995).

L'ondelette de Morlet est basée sur une analyse des basses fréquences. Elle permet d'avoir une bonne résolution fréquentielle du signal mais une mauvaise résolution temporelle (Bultheel, 1995). Sa formule est :

$$\psi(x) = e^{-\pi x^2} e^{10i\pi x}$$

L'ondelette de type dérivée Gaussienne a une utilisation inverse de l'ondelette de Morlet. Elle est basée sur une analyse des hautes fréquences et permet une bonne résolution temporelle mais pas fréquentielle (Bultheel, 1995). Elle est définie de la façon suivante :

$$\psi_n(x) = \frac{d^n}{dx^n} e^{-\pi x^2} \text{ avec } n > 1$$

## 4.2. BEDFORMS-ATM : un outil ayant plusieurs fonctionnalités

De son nom complet *Bedforms Analysis Tool Multiscale Modeling*, cet outil est basé sur les ondelettes continues et la méthode d'interpolation des splines. Le principe est de différencier les formes de lit pour ensuite calculer leurs descripteurs morphologiques. Créée par un chercheur péruvien, Ronald R. Gutierrez, l'interface est en anglais. Cette application est gratuite en s'intégrant à l'interface MATLAB. Avec ce logiciel, il est possible de réaliser quatre tâches (Gutierrez, 2017).

Le fichier à importer pour réaliser les analyses doit être en format matlab ou texte. Pour le format texte, les coordonnées de chaque point doivent se trouver sur la même ligne. Le format des données doit être en 2D et 3D. Pour les données 2D, les coordonnées doivent être relatives ou ordinales. Pour les données 3D, les coordonnées doivent être absolues et issues d'un tracé rectangulaire ou courbe (Gutierrez, 2017). Pour tous les formats, les données doivent être exprimées en mètres. Il en est de même pour les coordonnées verticales qui représentent soit la profondeur d'eau soit l'élévation du lit. Pour chaque analyse, il est possible de sauvegarder les résultats pendant et après l'exécution de l'application. Avant son exécution, le logiciel estime le temps nécessaire à la réalisation du traitement des données (Gutierrez, 2017).

La première analyse est basée sur des transformées à une dimension d'ondelettes continues effectuée sur le signal d'origine (Gutierrez et al., 2013). Elle a pour but de déterminer le spectre des dunes présentes sur le terrain d'études. Le spectre est déterminé à partir d'un algorithme basé sur la méthode des moindres carrés pénalisés qui lisse les données à travers une transformation cosinusoidale discrète (Gutierrez et al., 2013). Pour éviter une perte d'informations, une fonction de pondération construit des poids jusqu'à ce que leur résidus demeurent inchangés (Gutierrez et al., 2013). Les données lissées sont estimées selon un produit scalaire positif.

L'interface pour cette analyse se présente sous la forme suivante :

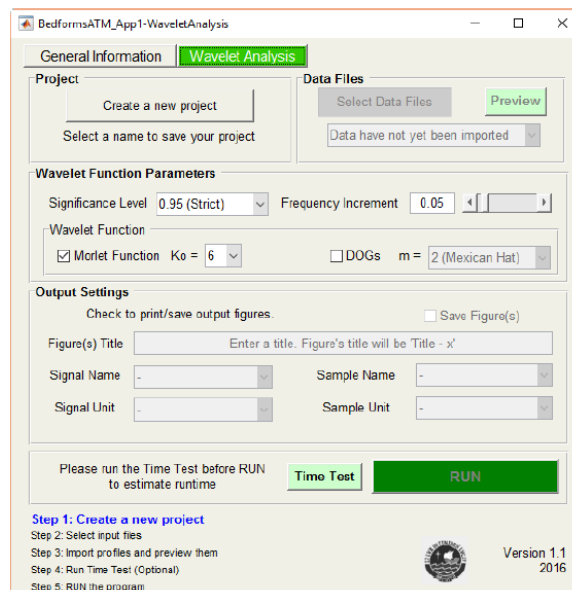
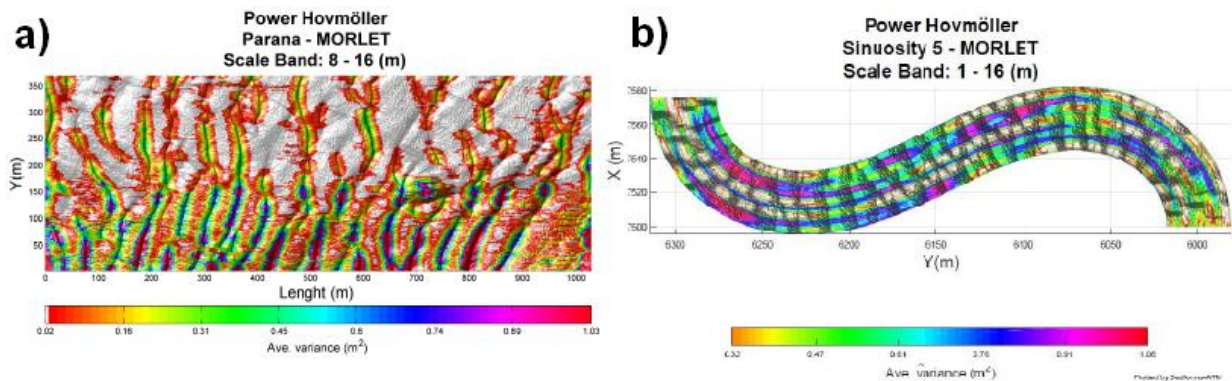


Figure 2 : Interface de l'analyse 1 du logiciel BedformsATM (Gutierrez, 2017)

Avant de lancer l'analyse, l'utilisateur peut expliquer le niveau de précision de l'analyse, la fréquence de l'incrémentation et choisir l'ondelette. Gutierrez recommande de mettre une fréquence d'incrémentation importante pour avoir une meilleure résolution. Pour les ondelettes, l'utilisateur peut choisir l'ondelette de Morlet ou les dérivées de l'ondelette Gaussienne (Gutierrez, 2017). Ce choix dépend des caractéristiques du terrain d'études. L'ondelette de Morlet permet notamment de renvoyer les fréquences d'échantillonnage inférieures à 0.25m qui sont souvent les fréquences représentant les rides (Gutierrez et al., 2013). Elle renvoie aussi des longueurs d'ondes plus importantes. Les ondelettes de type dérivée Gaussienne sont plus adaptées lorsque l'ordre des dérivées du signal sont plus importantes (Gutierrez & Abad, 2014).

Avant de rentrer les données, il ne faut pas oublier de donner un titre à la figure, rentrer la nature du signal et de l'échantillon : profondeur ou élévation pour le signal, abscisse ou longueur pour l'échantillon. Il faut également préciser les unités pour ces deux objets (Gutierrez, 2017). Il est possible de sélectionner le mètre, kilomètre, miles, pied ou encore sans dimension. Néanmoins, l'unité SI reste celle recommandée.

La seconde analyse est basée sur le diagramme d'Hovmöller. C'est un contour 2D qui permet de mettre en évidence les fluctuations des ondelettes représentant les formes de lit. Il permet de mettre en évidence les oscillations des ondelettes dans les directions longitudinales et latérales et d'isoler la longueur des dunes (Cataño-Lopera et al, 2009). Les données en entrée doivent contenir les mêmes informations que l'application précédente. Suivant ces données, le logiciel présélectionne une intervalle de longueur et échelle maximum pour traiter l'ensemble des données. L'utilisateur peut quant à lui rentrer la valeur de l'échelle minimale. Le diagramme résultant peut être sauvegardé en format pdf, tiff, jpg, fig et tecplot (Gutierrez, 2017). Suivant l'origine du format des données, le diagramme ne se présente pas de la même manière comme le montre la figure suivante :



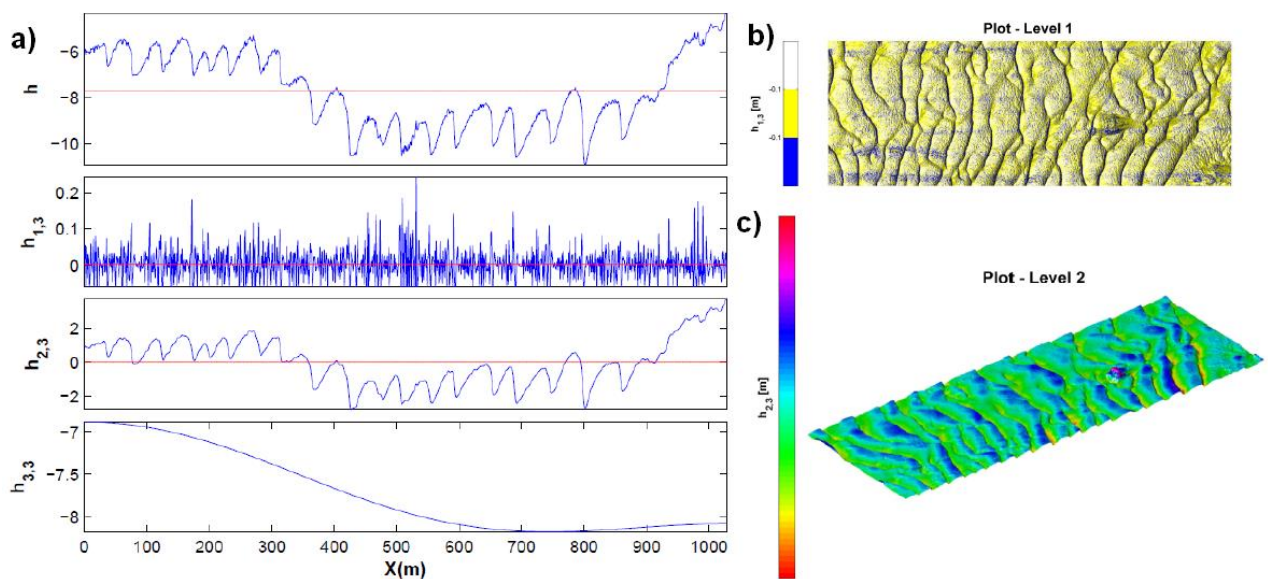
**Figure 3 :** Diagramme de Hovmöller pour des données de coordonnées rectangulaires (à droite) ou courbes (à gauche) (Gutierrez, 2017)

La troisième analyse permet d'identifier la hauteur et hiérarchiser les différentes formes de lits. Elle est effectuée en utilisant une interpolation des splines sur le signal originel. Une transformée d'ondelettes est ensuite effectuée sur chacun des signaux filtrés (Gutierrez et al., 2013). Le signal ayant la longueur d'onde moyenne la plus importante est considéré comme le seuil déterminant les barres des grandes dunes. Les signaux de la hiérarchie supérieure (grande dunes) sont obtenus en soustrayant la hauteur d'eau au seuil déterminant la troisième hiérarchie. Pour déterminer les



signaux des dunes moyennes, les signaux des grandes dunes sont filtrés par une interpolation des splines. Pour obtenir ceux des petites dunes, il faut soustraire les signaux des grandes dunes à ceux des moyennes dunes. Une transformée des ondelettes est ensuite effectuée sur ces derniers signaux pour déterminer le seuil séparant les petites dunes des rides.

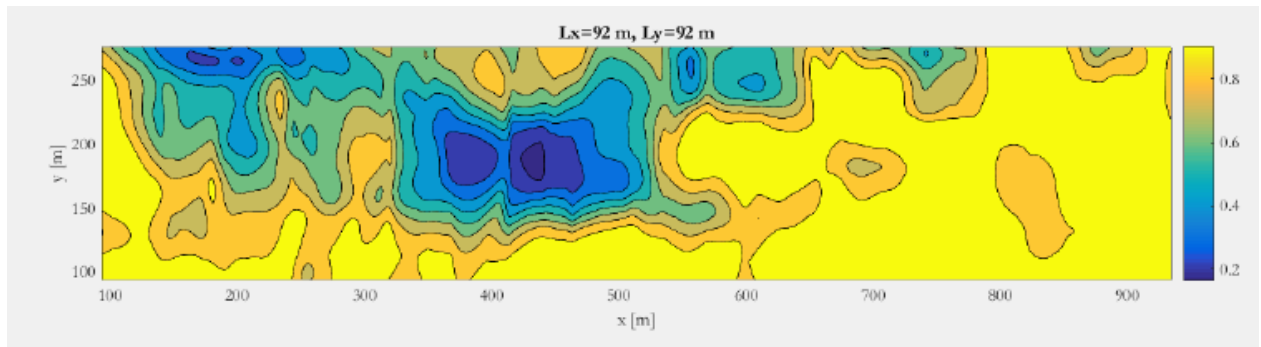
Pour effectuer l'analyse de discrimination, il est nécessaire d'avoir réalisé l'analyse 1 avant de l'exécuter. Ce n'est pas le cas de l'analyse d'Hovmöller. Une fois les données chargées, le logiciel les hiérarchise selon trois échelles parmi cinq catégories (rides, petites dunes (1 à 5 m), dunes moyennes (5 à 10 m), grandes dunes (10 à 100 m) et barres). Sur l'interface, un graphique montre les critères de hiérarchisation (Gutierrez,2017). Les fichiers en sortie sont des fichiers matlab et se présentent sous deux formes. Tout d'abord, des graphiques montrant les profils de chaque forme de lit sont dessinés. Ensuite, pour chaque catégorie, la surface est dessinée dans une vue 2D ou 3D comme le montre la figure ci-dessous :



**Figure 4 :** Profils du lit hiérarchisés en trois catégories de formes de lit (4.a) et modèle numérique de terrain en vue 2D (4.b) et 3D (4.c) (Gutierrez, 2017)

En parallèle, une analyse de corrélation croisée peut être exécutée si la profondeur du lit est le champ relevé dans les coordonnées verticales. Cette analyse permet de déterminer la similarité des dunes entre elles (Singh et al, 2011).

Enfin, la dernière analyse permet de quantifier les dimensions 3D des formes de lit. Pour cela, il faut importer les données de l'analyse précédente. Une fois cette étape réalisée, l'utilisateur peut choisir d'effectuer l'analyse sur l'ensemble du terrain ou sur seulement une catégorie de forme de lit. La zone d'études est aussi spécifiée par l'utilisateur. Une fois l'analyse exécutée, on obtient la figure suivante qui peut être sauvegardée en format pdf (Gutierrez, 2017).



**Figure 5 :** Cartographie résultant de l'analyse 3D (Gutierrez, 2017)

Le logiciel a été créé à partir d'une étude menée sur le fleuve Paraná qui possède un chenal en tresse. Large de 2,5km et profond de 5 à 12m, la rivière contient principalement des dunes 3D avec des crêtes linéaires. Les données ont été obtenues à partir d'un sondeur multifaisceaux et d'une grille de maillage 1m. Au total 370 profils longitudinaux ont été réalisés à partir de 1028 points (Gutierrez et al., 2013). Cette étude a démontré que la technique de BEDFORMSATM permettait d'obtenir des résultats fiables en différenciant les barres, dunes et rides isolées ou bien surimposées entre elles. Cependant l'analyse d'une ondelette 1D ne permet pas de distinguer les dunes 2D et 3D (Gutierrez et al., 2013). Le développement d'une analyse avec des transformées d'ondelettes 2D associée à une interpolation de splines 2D est actuellement en cours pour remédier à ce problème (Gutierrez et al., 2013).

## 5. D'autres pistes étudiées

Lors des recherches bibliographiques, d'autres outils basés sur des techniques différentes sont apparus comme des méthodes intéressantes pour déterminer la morphologie des dunes.

Tout d'abord le logiciel Paramdune. Cet outil a été développé par la société Réalisation Méditerranéenne du Signal pour le SHOM. L'interface est donc en français. Basé sur un algorithme de ligne de partage des eaux, il délimite d'abord la localisation des corps sédimentaires. Les ruptures de pente et crêtes des dunes sont détectées en créant des simulation de crues qui mettent en évidence les bassins d'accumulation des eaux. Une fois cette étape réalisée, le logiciel calcule automatiquement les paramètres morphologiques (Ferret, 2011). Le logiciel présente cinq volets comme le montre la figure ci-dessous :

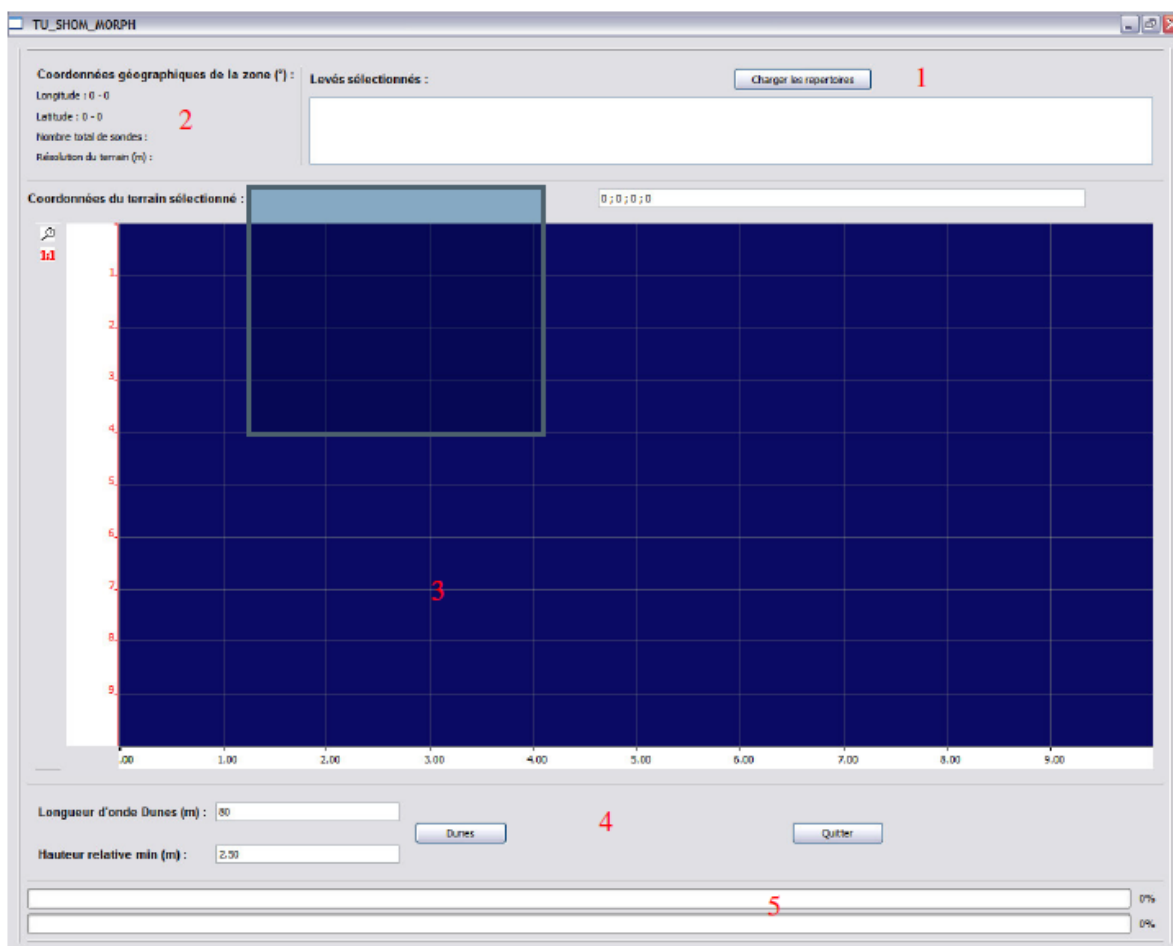


Figure 6: Interface du logiciel Paramdune (SHOM)

Le premier volet (voir [Figure 6](#)**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est celui correspondant à la sélection des données. Pour cela, il suffit de charger les fichiers de données récoltées lors des levés bathymétriques (fichier texte). Le deuxième volet correspond aux coordonnées géographiques de la

zone pour créer le MNT. Dans cette zone, il est possible de visualiser le nombre de sondes, les coordonnées extrêmes ainsi que la résolution des données. Le troisième volet est lié aux paramètres d'affichage. Il est possible de zoomer et sélectionner la zone de terrain que l'on souhaite étudier. Le quatrième volet trouve son utilité une fois le calcul du modèle numérique moyen calculé et la sélection du terrain réalisée. Cette zone permet de déterminer la longueur d'onde moyenne et la hauteur minimale de la dune par rapport au fond. Ces valeurs doivent être rentrées en mètre. Pour la longueur d'onde, une valeur entière doit être rentrée. Pour la hauteur, une valeur par défaut est préenregistrée. Il est conseillé de l'augmenter pour enlever les bruits de fond (Hoche, 2006). Cependant cette modification doit être effectuée avec précaution et selon le terrain étudié car en le faisant il y a un risque de ne pas détecter les dunes de faible hauteur. Une fois ces critères rentrés, le traitement peut commencer. Son avancée est visualisée dans le volet 5 soit par étape soit globalement.

Une fois les données traitées, le logiciel affiche dans le volet 1 le nombre réel de sondes utilisées, le taux d'échantillonnage. Les paramètres rentrés précédemment sont également affichés. Dans le volet 2 s'affiche le MNT. Les dunes détectées par l'outil sont délimitées par un contour noir. Le pied des dunes est coloré en vert pour la face de dépôt (flanc raide) et en rose pour la face d'érosion (flanc doux). Les crêtes sont, elles, colorées en orange. Pour chacune des dunes, une étiquette est associée au niveau du sommet (Hoche, 2006). Pour chaque dune sont renvoyés la localisation et hauteur du sommet ; la hauteur, longueur et largeur de la dune; la longueur et l'angle des faces amont et aval. La distance entre crête, la sinuosité, la plus forte pente, la zone de pente forte et le score de densité sont aussi relevés.

Si les résultats renvoyés ne satisfont pas complètement l'utilisateur à cause de dunes oubliées par exemple, il peut faire des modifications. Il peut ajouter et/ou des dunes ou des portions de dunes. Il peut faire une coupe transversale, sélectionner plusieurs dunes ou encore changer l'échelle du MNT (Hoche, 2006). Attention, à chaque fois que l'utilisateur réalise une modification, la distance entre crêtes doit être recalculée.

La sauvegarde des traitements se fait sous format texte pour les fichiers de configuration de traitements, de métadonnées et le fichier des résultats. Seul le fichier de l'image du terrain est sous format bitmap. Le logiciel enregistre plusieurs fichiers texte pour mémoriser le temps et l'avancement des traitements (Paramleve, Realdane, MNT, Extractdune, Dune) (Hoche, 2006). Cela permet d'améliorer les performances et de sécuriser les résultats.

Lors de son étude menée en Manche orientale en 2010, Yann Ferret a dû corriger et vérifier certaines données sur ArcGIS. Le logiciel est très sensible. Il faut donc veiller à bien nettoyer des sondes dites aberrantes qui sur- ou sous-estiment certains paramètres. De plus dans cette étude, seuls les paramètres morphologiques des dunes hôtes furent mesurés. Au delà des limites du logiciel, il est important d'avoir un ordinateur puissant ayant au minimum 1 Go de RAM, l'application prend à elle seule 250 Mo.

Le logiciel *Rheno bedform tracking* (Rheno BT) est également un outil apparu au cours d'une lecture. L'étude concernée porte sur la dynamique des formes de lit dans l'estuaire de l'Elbe en Allemagne en 2010. Le logiciel est décrit comme une évolution plus opérationnelle du logiciel DT2D (*dune tracking in two dimensions*). La longueur des dunes est déterminée à partir de deux points minimums du spectre consécutif. La hauteur de la dune correspond à la perpendiculaire à la surface entre un point minimal et un point maximal correspondant à la crête (Wilbers & Ten Brinke, 2003). Cette méthode fut utilisée dans diverses études (Carling et al., 2000; Wilbers & Ten Brinke, 2003, Hendershot et al, 2016). Mais, cet outil présente quelques limites. Calculant la longueur des dunes à partir de deux minimum consécutifs du spectre, les dunes ne sont calculées de façon correcte que si elles sont mesurées avec dix points minimum. De plus, dans l'étude menée par Wilbers en 2003 sur le Rhin partie néerlandaise, les dunes mesurant moins de 3 m n'ont pu être déterminées.

Le logiciel Rheno BT a permis de calculer les propriétés des dunes et leur migration entre deux mesures consécutives (Gehres et al, 2013). Avec des données 3D, le logiciel calcule les profils 2D de l'élévation du lit. Tous les points situés à 5m d'un profil d'élévation du lit sont sélectionnés puis projetés. Ensuite les formes du lit sont identifiées à partir de l'aval en suivant une direction longitudinale 2D. Une technique de fenêtrage d'observation est utilisée pour étudier le profil. Les données 3D entre deux profils d'élévation du lit consécutifs sont l'objet d'une corrélation croisée pour quantifier la migration des dunes (Gehres et al, 2013). Concernant les paramètres morphologiques renvoyés par le logiciel se sont les suivants : hauteur, longueur, superficie et le facteur de forme. Ce dernier paramètre représente le pourcentage de similarité de la forme du lit à un triangle. L'étude menée par Gehres avec cet outil a permis de mettre en évidence que le logiciel est stable et ses résultats reproductibles. Malgré une résolution spatiale faible des données, il a été possible de caractériser les différentes formes de lit du site d'étude. Les résultats morphologiques sont corrects uniquement si la forme de lit est constitué d'à minima dix points (Gehres et al, 2013).

Lors d'une lecture, le développement d'une technique différente est apparu. Deux chercheurs de l'ENSTA Bretagne ont fait le constat suivant. La caractérisation des dunes est réalisée grâce à des techniques de traitement d'image semi-automatique selon l'hypothèse que ce sont des structures quasi-périodiques. Ces techniques sont efficaces pour les champs de dunes mais discutées pour les dunes isolées et rares (Ogor et Zerr, 2016). Pour obtenir une détection automatique de tout type de dune, ils ont décidé de tenter une approche géomorphométrique. Ils délimitent les dunes à partir de leur pente, aspect et courbure. Pour cela ils ont créé un algorithme de sédimentation d'image basé sur les pixels. Les points de bases de l'algorithme sont les crêtes des dunes qui sont des entités structurantes du lit et elles sont très fines. Pour les détecter, les chercheurs ont utilisé un attribut géomorphométrique : la courbure. L'intersection de la surface avec un plan décrit une courbe. Il est donc aisé de les quantifier à partir de première et seconde dérivées. Sur chaque cellule du modèle de terrain digitalisé, une fonction quadratique bivariée fut appliquée et ajustée à la technique des moindres carrés. Les valeurs de courbures maximales correspondent aux lignes de crêtes et celles étant proches de zéro représentent les pentes (Ogor et Zerr, 2016). Quantifier les courbures permet également de quantifier la vitesse de changement de direction de la courbe. Après cette étape de détection vient l'étape de création de régions de crête. Elles furent déterminées en collectant les cellules du modèle numérique de terrain adjacentes ayant des valeurs de courbures plus importantes que le seuil fixé par l'utilisateur.

En mettant en pratique cette technique sur le plateau continental aux côtes bretonnes, les chercheurs ont remarqué que l'extraction des dunes se faisait correctement et simplement. Plus la dune était haute et épaisse, plus elle était facile à extraire. Il a également été mis en évidence que les dunes isolées sont plus faciles à extraire que les dunes qui se séparent ou fusionnent dans un large banc de dune. Bien que la technique semble remédier à certains problèmes d'extraction, elle doit être améliorée. La morphologie des dunes est variable. Il est donc nécessaire de mieux ajuster les seuils de courbure et pente ainsi que la taille du voisinage. Une valeur de seuil trop importante pour la détection des crêtes empêche la détection de dunes trop fines ou crée la division de crêtes dans une région. Au contraire, une valeur trop faible fusionne certaines crêtes. Le seuil de pente influence les résultats de croissance des dunes. Ils ne peuvent être les mêmes pour les deux faces des dunes qui sont généralement asymétriques (Ogor et Zerr, 2016). Afin que les paramètres de l'algorithme soient moins dépendants de l'utilisateur, une approche plus mathématique basée plus sur les données est en développement. L'automatisation de la détection des dunes reste donc un sujet complexe.

## 6. Quels sont les outils les mieux adaptés pour le projet R-TEMUS?

Suite à la présentation des différents outils, le tableau comparatif ci-dessous fut dressé pour déterminer celui qui est le plus adapté pour servir aux chercheurs travaillant sur le projet R-TEMUS :

**Tableau 1** : Caractéristiques des différents outils recensés dans la synthèse bibliographique

Outils	BTT	2DFFT	BEDFORMS-ATM	Paramdune	Rheno BT	Algorithme sédimentation d'image
Automatisation	oui	En partie	oui	oui	oui	oui
Outil disponible	oui	oui	oui	Demander au SHOM	En développement	En développement
Outil libre et gratuit	libre (outil MATLAB)	libre (outil MATLAB)	libre (outil MATLAB)	Demander au SHOM	NP	NP
Format à entrer	texte (ASCII) ou MATLAB/ modèle linéaire	texte (ASCII) ou MATLAB	texte (ASCII) ou matlab/ données en m, si 2D : données relatives ou ordinales, si 3D : données absolues rectangulaires ou courbes	format bathymétrique *	NP	NP
Format résultats	texte	texte	cartographies et graphiques	texte et image	NP	NP
Prise en main	interface MATLAB	nécessité de connaître plusieurs fonctions MATLAB	savoir quel type d'ondelette choisir pour l'analyse, interface en anglais	interface en français	NP	NP
Limites pour caractérisation morphologique	seuils choisis par l'utilisateur + taille des dunes (20m)	taille du jeu de données	structures 2D ou 3D non différenciées	nécessité de données bathymétrique propres	10 points minimum par dune	seuils choisis par utilisateur + extraction dunes qui fusionnent
Calcul de la dynamique	suresstimé pour dunes supérieures à 25m de long	orientation de la dune	oui	non	oui	oui
Calcul sur formes surimposées	durée d'exécution double	oui	oui	oui	NP	NP
Calcul sur dunes isolées	précision discutée	précision discutée	NP	oui	NP	oui
Autres caractéristiques calculées	angle de chaque face, longueur de chaque face	asymétrie, rugosité	corrélations croisées	largeur, angle de la dune, longueur de chaque face, sinuosité, plus forte pente et distance entre crêtes	superficie, facteur de forme	pente et courbure
Sites d'études où l'outil a été appliqué	Estuaire de la Vistule, Loire moyenne	Estuaire de la Vistule, plateau continental et baie de la mer du nord, Péninsule arabique	Rio Parana	Manche Orientale	Elbe	Plateau continental aux côtes bretonnes

NP : Non précisé

\* : Pas de précision si c'est le format propre au SHOM

Seuls quatre des outils recensés pourraient être utilisés par l'équipe de recherche. Bien que l'outil 2DFFT présente de nombreux avantages dans les fonctionnalités de calculs, l'ensemble de la procédure n'est pas automatisée, les chercheurs devront donc rentrer les fonctions des différentes étapes sur MATLAB. Cela va leur demander plus de temps d'autant qu'il faut qu'ils soient familiarisés avec ces différentes fonctions. L'outil BTT présente différentes fonctionnalités mais c'est un modèle linéaire. Il reste donc deux logiciels intéressants : BEDFORMSATM et Paramdune. Ce dernier permet de caractériser plus de paramètres morphologiques mais il ne calcule pas la dynamique des dunes. De plus, le logiciel étant développé pour le SHOM le format des levés bathymétriques à entrer est sûrement le format .glz. Ce format est un format texte auquel est rajouté un identifiant SHOM. Si c'est bien le cas l'équipe de chercheurs ne pourra utiliser le logiciel. De part ces problèmes, c'est donc l'outil BEDFORMSATM qui semble le plus adapté.

---

## 7. Protocole opératoire : test de la précision des outils les plus pertinents sur la Loire

---

L'analyse réalisée à la partie précédente est purement théorique. En effet, les conclusions sont tirées d'études menées sur des sites autre que la Loire moyenne. La plupart d'entre eux sont des milieux maritimes ou estuariens. Il est donc nécessaire d'appliquer ces outils avec des données de la Loire pour vérifier s'ils sont bien adaptés. L'application de ces outils et leur résultats sont l'objet de la seconde partie de ce projet de fin d'études. Dans cette partie il sera seulement détaillé le protocole opératoire qui sera mené.

### 7.1. Étape 1 : Choix des logiciels étudiés

---

La caractérisation morphologique des dunes sera exécutée sur le logiciel BEDFORSATM, Paramdune et BTT. BTT et Paramdune seront testés car ils présentent certains avantages.

BTT est un outil déjà à disposition de l'équipe de recherche qui l'utilise. En exécutant les analyses, cela permettra de déterminer si cet outil doit toujours être utilisé ou non.

Paramdune permettrait aux chercheurs d'avoir plus d'informations sur la morphologie des dunes. Un test du format des données d'entrée est donc nécessaire afin de ne pas passer à côté d'un outil qui pourrait être utile pour les recherches menées.

### 7.2. Étape 2 : Modification des données pour les rendre exploitables

---

Les données à disposition des chercheurs sont sous forme de MNT au format raster adf. Les logiciels utilisant des formats texte, il est nécessaire de modifier les données. Cela est possible sur ArcGIS en transformant les données au format ASCII.

Dans un premier temps, afin de réduire le temps d'exécution des analyses, une zone d'intérêt des données sera extraite. Afin de pouvoir savoir si les logiciels renvoient des résultats proches de la réalité, la zone devra contenir au minimum 40 dunes. Plusieurs zones d'intérêt seront étudiées. Leur nombre dépendra du temps pris par les logiciels à réaliser les diverses analyses. Pour cela la procédure suivante sera effectuée :

- Ouverture du fichier sur ArcGIS et ouverture de l'outil «*Arctoolbox*»
- Sélection de la catégorie «*Outils Spatial Analyst*»
- Sélection du menu «*Extraction*» puis de l'outil «*Extraction par polygone*»

Une fois cette étape réalisée, vient l'étape de transformation des données au format ASCII :

- Sélection de la couche et ouverture de l'outil «*Arctoolbox*»



- Sélection de la catégorie «Outils de conversion»
- Sélection de la catégorie «A partir d'un raster»
- Sélection de l'outil «Raster vers ASCII»

Une troisième étape sera menée pour savoir si le logiciel Paramdune peut être utilisé. Un test avec des données bathymétriques ayant subies les étapes précédentes fut mené sur le logiciel. Il s'est alors affiché le message suivant :

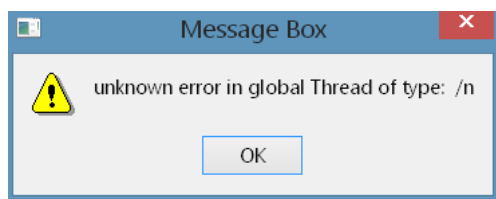


Figure 7 : Message d'erreur affiché sur Paramdune lors du test (SHOM)

Le manuel d'utilisateur ne comportant pas de section expliquant les messages d'erreurs possibles, il faudra prendre contact avec un utilisateur du logiciel (employé au SHOM) ou avec une des personnes conceptrices du logiciel.

### 7.3. Étape 3 : Caractérisation des dunes sur les logiciels et manuellement

---

Une fois les données utilisables, les analyses seront lancées sur l'ordinateur. Pour éviter toute surcharge de l'ordinateur, elles seront lancées les unes après les autres. Elles seront effectuées dans l'ordre qui suit : (Paramdune), BedformsATM et BTT.

Une fois ces analyses faites, des mesures manuelles seront effectuées sur chacune des dunes.

### 7.4. Étape 4 : Étude comparative des différentes techniques

---

L'ensemble des résultats seront rentrés sur excel avec une colonne par outil. La méthode manuelle sera la technique de référence.

Une étude comparative sera menée en calculant les écarts à la méthode de référence pour chacun des paramètres. Ces écarts seront exprimés en pourcentage.

Le seuil d'acceptabilité d'écart entre la méthode de référence et la technique étudiée sera fixé à 5%. Si plusieurs techniques ont un seuil inférieur à 5%, le plus petit écart détermine la technique la plus performante.

Un classement des techniques par paramètre et global sera ensuite effectué.

---

## Conclusion

---

L'objectif de cette synthèse bibliographique était de mettre en lumière les différents outils d'analyse développés pour traiter les résultats des levés bathymétriques réalisés par des sondeurs multifaisceaux.

Lors des diverses lectures il est apparu que les chercheurs utilisaient principalement des formules mathématiques utilisées dans le domaine du traitement de signal ou la méthode du *zerocrossing*. Bien qu'appliquées dans de nombreuses études, peu d'entre elles ont analysé les dunes à partir d'outils automatisés.

Le premier outil à avoir été développé et automatisé est basé sur la technique du *zerocrossing*. Elle repose sur une reconnaissance des crêtes et creux des dunes par une intersection du signal du profil d'élévation avec une courbe de tendance. L'outil appelé *Bedform Tracking Tool* est un outil libre de MATLAB. Ce modèle permet de renvoyer des hauteurs et longueurs d'ondes représentatives de la réalité et reproductibles. Cependant, cela reste une analyse 1D, limitée. En tant que premier outil développé, il reste une référence et est encore utilisé dans de nombreuses études (Claude, 2012; Lisimenka & Kubicki, 2017).

Pour s'affranchir de ces limites, les chercheurs se sont ensuite tournés vers la transformée de Fourier ou les ondelettes. Ces deux outils permettent de représenter le signal de façon fréquentielle en le décomposant. Contrairement à la transformée de Fourier, l'ondelette peut localiser le signal aussi bien en temps et fréquence. De ces deux fonctions mathématiques sont nés l'outil 2DFFT et BEDFORMSATM. Ils sont tous deux libres car ils fonctionnent sous MATLAB. Le premier est un algorithme qui permet de localiser les crêtes et creux des dunes. Pour caractériser les paramètres morphologiques il faut ensuite appliquer la méthode de *zerocrossing* (Van Djick, 2008; Cazenave et al., 2013) ou calculer des moments spectraux de différents ordres (Lisimenka & Kubicki, 2017). Cette méthode permet une analyse des corps sédimentaires surimposés et de l'asymétrie mais n'est pas entièrement automatisée. L'analyse est donc plus complexe. BEDFORMSATM est, lui, entièrement automatisé. Le logiciel réalise des analyses à partir de données 2D et 3D. Il détermine aussi bien la morphologie des dunes que leur migration. Développé il y a moins de trois ans, l'outil a été appliqué que sur peu de sites (Gutierrez, 2017) ce qui ne nous permet pas de dire s'il fournit des résultats exacts sur tout type de milieux aquatiques.

Enfin, un quatrième outil d'intérêt est apparu. Nommé Paramdune il est utilisé par le SHOM et permet une caractérisation morphologique plus précise avec 8 paramètres renvoyés (Hoche, 2006). Malheureusement, cet outil ne détermine pas la dynamique des dunes et le format d'entrée des données n'est pas spécifié. Le SHOM utilisant un format de levé bathymétrique propre, le logiciel pourrait être inexploitable par un autre type d'utilisateur.

Afin de savoir si les outils recensés dans cette synthèse bibliographique permettent d'obtenir des résultats probant sur la Basse Loire, une application des outils BTT, BEDFORMSATM et Paramdune sera effectuée. Elle se fera à partir de dalles issues du projet R-TEMUS et lors de la deuxième phase du projet de fin d'études qui commence à la fin janvier.

La recherche concernant la caractérisation morphologique des formes de lit est active. Des chercheurs français sont en train de développer une technique permettant de caractériser plus facilement les dunes isolées (Ogor et Zerr, 2016). Avant de lancer l'analyse, la plupart des techniques demandent d'entrer des valeurs représentant des seuils de détection ou de différenciation pour les formes de lit. Ces seuils sont différents selon l'utilisateur et représentent donc une limite à la précision des résultats (Lisimenka & Kubicki, 2017; Ogor et Zerr, 2016). Des recherches sont menées

pour s'affranchir de ces derniers. Enfin, bien que les outils développés aient plusieurs fonctionnalités, aucun d'entre eux ne permet de différencier les dunes 2D des 3D.

Enfin, pour avoir une connaissance plus complète de la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau, il pourrait être intéressant de savoir s'il existe des outils modélisant et quantifiant le taux de charriage et le transport solide

---

## Bibliographie

---

Allen J.R.L, 1982. *Sedimentary Structures : Their character and physical basis* Volume 1. *Sedimentology*. Volume 30.

Bridge J.S, 2003. *Rivers and Floodplains*. Chapter 4 : *Bedforms and sedimentary structures*. Blackwell Science Ltd.

Carling, P. A., Götz, E., Orr, H. G., & Radecki-Pawlik, A., 2000. The morphodynamics of fluvial sand dunes in the River Rhine, near Mainz, Germany. I. *Sedimentology and morphology*. *Sedimentology*, Volume 47(1), pp227–252.

Cataño-Lopera, Y. A., Abad, J. D., & García, M. H. 2009. Characterization of bedform morphology generated under combined flows and currents using wavelet analysis. *Ocean Engineering*, Volume 36. pp617–632.

Cazenave, P. W., Dix, J. K., Lambkin, D. O., & Mcneill, L. C. (2013). A method for semi-automated objective quantification of linear bedforms from multi-scale digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, Volume 38(3), pp221–236.

Claude, N., 2012. *Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablograveleuse : influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France)*, Thèse, Université François-Rabelais de Tours.

Dalrymple, R.W. 1984. Morphology and internal structure of sandwaves in the Bay of Fundy. *Sedimentology*. Volume 31. pp 365-382.

Dewez, S. 1988. *Sédimentation et dynamique en Manche Orientale (de la Baie d'Authie au Cap d'Alprech)*. Thèse, Université de Lille Flandres-Artois.

Ferret, Y., 2011. *Morphodynamique des dunes sous-marines en contexte de plateforme mega-tidale (Manche orientale)*. Approche multi-échelles spatio-temporelles (France), Thèse, Université de Rouen

Fredsøe, J., 1979. Unsteady flow in straight alluvial streams : modification of individual dunes. *Journal of Fluid Mechanics*. Volume 91. pp 497-512

Gabel, S. 1993. Geometry and kinematics of dunes during steady and unsteady flows in the Calamus River, Nebraska, USA. *Sedimentology*, Volume 40. pp 237–269.

Gehres, N., Winterscheid, A., Frings, R. M., & Vollmer, S. 2013. Bed form dynamics in relation to headwater discharge and human influences in the tidal Elbe river, Germany. *MARID IV*, 15-16 avril 2013, Bruges (Belgique)

Gutierrez, R.R, 2017. *Bedforms Analysis Tool for Multiscale Modeling*. Pontificia Universidad Catolica del Peru.

Gutierrez, R. R., & Abad, J. D. (2014). On the analysis of the medium term planform dynamics of meandering rivers. *Water Resources Research*, Volume 50(5), pp3714–3733.

Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Parsons, D. R., & Best, J. L., 2013. Discrimination of bed form scales using robust spline filters and wavelet transforms: Methods and application to synthetic signals and bed forms of the Río Paraná, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Volume 118, pp

1400–1419.

Hendershot, M.L, Vendetti, J.G., Bradley R.W, Kostaschuk R., Church M. & Allison M.A, 2016. Response of low-angle dunes to variable flow. *Sedimentology*. Volume 63. pp743-760.

Hoche, M.A. 2006. Logiciel calcul des paramètres morphologiques des dunes à partir de données bathymétriques smf : manuel d'utilisateur. Réalisations Méditerranéennes du Signal. Aix en Provence

Kostaschuk, R. 2005. Sediment transport mechanics and subaqueous dune morphology. RCEM 2005 : 4ème IAHR Symposium on River, Coastal, and Estuarine Morphodynamics, 4-7 Octobre 2005, Urbana, Illinois, USA

Le Bot, S., 2001. Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du Pas-de-Calais. Thèse, Université de Lille.

Leclair, S.F., 2000. Preservation of cross strata due to migration of subaqueous dunes., Thèse, Université de Binghamton, New-York

Leducq, D. et Schelgel, R., 1990. Application de l'analyse par ondelettes à l'hydroacoustique. *Journal de Physique Colloques*, Tome 51, pp217-220

Lisimenka, A. et Kubicki, A., 2017, Estimation of dimensions and orientation of multiple riverine dune generations using spectral moments, *Geo-marine Letters*, Volume 37, Issue 1, pp59-74

Lisimienka, A. et Rudowski, S., 2013. Bedform characterization in river channel through 2D spectral analysis. *MARID IV*, 15-16 avril 2013, Bruges (Belgique)

Ogor, J. and Zerr, B., 2016. Towards the automation of sand dune detection in the bathymetry. *MARID IV*, 4-5 Avril 2016, Galles du Nord, Royaume-Uni

Rodrigues, S., 2014. Dynamique sédimentaire des cours d'eau à charge sablo-granuleuse : processus et archivage, Habilitation à diriger des recherches, Université de Tours

Rodrigues, S., Le Hir, P.; Moatar, F., Claude, N., 2016. Transferts de particules dans le continuum fluvio-estuarien. In Moatar.F, Dupont.N, La Loire fluviale et estuarienne. QUAE, Versailles, pp 85-111.

Singh, A. Lanzoni, S., Wilcock, P. R., & Foufoula-Georgiou, E., (2011). Multiscale statistical characterization of migrating bed forms in gravel and sand bed rivers. *Water Resources Research*, Volume 47.

Sverdrup, H.U., Munk, W.H., 1947. Wind, sea, and swell. Theory of relations for forecasting. US Navy Hydrographic Office, HO Publ no 601.

Takezawa, K. 2006, Introduction to Nonparametric Regression, 640 p., John Wiley and Sons, New Jersey, USA.

Ten Brinke, W. B. M., Wilbers, A. W. E. et 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. *Fluvial Sedimentology VI: International Association of Sedimentologists*, Special Publication 28 . pp 15-32.

Van Dijk, T., Lindenbergh, R. & Egberts, P., 2008. Separating bathymetric data representing multiscale rhythmic bed forms : A geostatistical and spectral method compared. *Journal of Geophysical Research*. Volume 113.

Van der Mark, C. F., & Blom, A. 2007. {A} new and widely applicable tool for determining the geometric properties of bedforms. *Rapport de recherche*. 2007R-003/WEM-002. ISSN 1568 4652, University of Twente, Enschede, Pays-bas, 49p.

Wever, T and Papili, S. 2016. New strategy for predictions bedform migration. *MARID IV*, 4-5 Avril 2016, Galles du Nord, Royaume-Uni.

Wijbenka, J.H.A et Klaassen, G.K., 1983. Changes in bedform dimensions under unsteady flow conditions in a straight flume. *Int. Ass. Sed. Spec. Pub.*, Volume 6, pp 35-48.

Wilbers, A. W. E. et Ten Brinke, W. B. M. 2003. The response of subaqueous dunes to floods in sand and gravel bed reaches of the Dutch Rhine. *Sedimentology*. Volume 50. pp 1013-1034.

Wintenberger, C., 2015. Dynamique fluviale et végétation pionnière à la Salicaceae en rivière sablo-graveleuse : études in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire moyenne (France). Thèse, Université François Rabelais de Tours.

Yalin, S. 1964. Geometrical properties of sand waves. *Proc.Am.Soc.Civil Eng.* Volume 90. pp 105-119.

Young, I., 1995. The determination of confidence limits associated with estimates of the spectral peak frequency. *Ocean Engineering*. Volume 22. pp 669-689.

---

## Webographie

---

Baudoin G. et Bercher F. 2001. Transformée de fourier discrète. [en ligne]. Disponible sur : [https://perso.esiee.fr/~bercherj/New/polys/poly\\_tfd.pdf](https://perso.esiee.fr/~bercherj/New/polys/poly_tfd.pdf) (consulté le 23/11/2017)

Bultheel A. 1995. Chapitre 4 : Traitement et Analyse des Données Transformée en ondelettes. [en ligne]. Disponible sur : <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-fr/wavelet-transform.html#wavelet-transform-ref-1> (consulté le 30/11/2017)

Launay, F., 2007. Cours traitement du signal cours première année : télécommunication TEL1. [en ligne]. Disponible sur : [https://www.lias-lab.fr/perso/fredericlaunay/Cours/T1/Traitement%20du%20signal\\_etudiant.pdf](https://www.lias-lab.fr/perso/fredericlaunay/Cours/T1/Traitement%20du%20signal_etudiant.pdf) (consulté le 24/11/2017)

Perrier, V., 2005 Application de la théorie des ondelettes. [en ligne]. Disponible sur : <http://www-ijl.imag.fr/membres/Valerie.Perrier/PUBLI/Cours1-VP.pdf> (consulté le 28/11/2017)

Thome, N., 2016. Bases du traitement des images : Transformées de Fourier. [en ligne]. Disponible sur : [http://webia.lip6.fr/~thomen/Teaching/BIMA/cours/Fourier\\_1.pdf](http://webia.lip6.fr/~thomen/Teaching/BIMA/cours/Fourier_1.pdf)

---

## Liste des figures et tableaux

---

### Table des figures :

Figure 1 : Schéma descriptif de la morphologie d'une dune.....	4
Figure 2 : Interface de l'analyse 1 du logiciel BedformsATM (Gutierrez, 2017).....	18
Figure 3 : Diagramme de Hovmöller pour des données de coordonnées rectangulaires (à droite) ou courbes (à gauche) (Gutierrez, 2017).....	19
Figure 4 : Profils du lit hiérarchisés en trois catégories de formes de lit (4.a) et modèle numérique de terrain en vue 2D (4.b) et 3D (4.c) (Gutierrez, 2017) .....	20
Figure 5 : Cartographie résultant de l'analyse 3D (Gutierrez, 2017).....	21
Figure 6: Interface du logiciel Paramdune (SHOM).....	22
Figure 7 : Message d'erreur affiché sur Paramdune lors du test (SHOM) .....	28

### Table des tableaux :

Tableau 1 : Caractéristiques des différents outils recensés dans la synthèse bibliographique .....	25
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----



**Directeur de recherche :**

**RODRIGUES Stéphane**

**DALIDO Chloé**

**Projet de Fin d'Etudes**

**DAE5**

**2017-2018**

## **Résumé :**

Les dunes sont des milieux ubiquistes qui se créent suite à une friction du sol par un agent dynamique tel que le vent ou le courant. Les dunes subaquatiques ont des fonctions essentielles dans la dynamique des milieux aquatiques aussi bien pour le compartiment biotique que l'abiotique. Il est donc essentiel de les étudier pour créer des projets d'aménagement en adéquation avec son milieu. C'est d'ailleurs une partie du programme de recherche R-TEMUS mené sur la Basse Loire. Cependant, la morphologie d'une dune est complexe à caractériser de par son adaptation aux conditions hydro-sédimentaires. De nombreuses techniques se sont développées pour permettre d'obtenir plus facilement ces données. Notamment la hauteur et la longueur d'onde des dunes qui sont les paramètres les plus caractéristiques. Malgré le développement d'outils de détection automatisés, l'existence d'outils permettant leur analyse est encore méconnue.

Face à cette problématique, un sujet de projet de fin d'études a été créé. Il est constitué de deux phases : la première étant un état de l'art et la seconde une application des outils trouvés sur le site d'étude du projet R-TEMUS. La présente synthèse bibliographique expose dans un premier temps le fonctionnement des dunes pour permettre une meilleure compréhension de la problématique. Les parties suivantes présentent les techniques analytiques pouvant caractériser morphologiquement les dunes et leurs outils associés. La synthèse bibliographique se clôture par le protocole opératoire qui sera effectué dans la seconde partie du projet de fin d'études.

## **Mots Clés :**

Géomorphologie, dunes subaquatiques, transformée de Fourier rapide, ondelettes, *méthode zerocrossing*