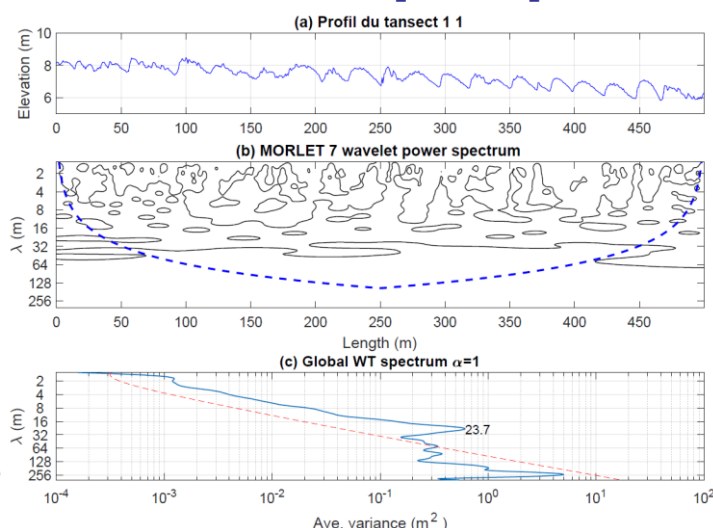


Projet de Fin d'Etudes

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



2018

DALIDO Chloé

Directeurs de recherche

RODRIGUES Stéphane & LE GUERN Jules

Approche analytique de la morphologie et la dynamique des dunes subaquatiques

Partie analytique

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 conseillée durant le 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 tout particulièrement à M. Jules LE GUERN pour ses conseils concernant les logiciels BEDFORMSATM et ArcGIS. Il a su être disponible à chaque fois que je le sollicitais.

Je suis reconnaissante envers Mme Coraline Wintenberger, ingénieure de recherche, pour avoir mis à ma disposition un ordinateur contenant les logiciels de l'étude.

Je remercie également M. Benoit Deleplacque et M. Thimothée Handfus pour m'avoir aidé à trouver certains outils ArcGIS.

Enfin, je souhaite remercier M. Pascal MAKRIS de s'être rendu disponible pour m'expliquer comment interpréter les signaux des ondelettes.

SOMMAIRE

Signification des sigles.....	2
Introduction - Problématique.....	3
1. Rappel des éléments majeurs de la synthèse bibliographique	4
1.1. Les dunes des formes dépendantes des conditions hydro-sédimentaires de son milieu.....	4
1.2. BedformsATM, un logiciel multifonctionnel qui utilise les ondelettes pour caractériser les dunes	5
2. Matériel et méthodes.....	8
2.1. Prétraitement des données en vue de leur exploitation	8
2.1.1. Choix des données à traiter.....	8
2.1.2. Modification du format des données.....	9
2.2. Caractérisation des dunes sur le logiciel	11
2.2.1. Test des différents formats d'entrée.....	11
2.2.2. Test des différentes ondelettes utilisées pour l'analyse	11
2.3. Caractérisation des dunes par la méthode manuelle	12
3. Résultats obtenus	13
3.1. Caractérisation des dunes avec BedformsATM.....	13
3.1.1. Caractérisation de la longueur d'onde moyenne	13
3.1.1.1. Analyses avec le format d'entrée comme paramètre variant.....	13
3.1.1.2. Analyses avec le type d'ondelette comme paramètre variant.....	16
3.1.2. Caractérisation de la hauteur de la dune	17
3.2. Caractérisation des dunes avec la méthode manuelle	21
3.3. Comparaison des deux techniques	21
4. Discussion	25
4.1. Le classement des coordonnées du profil; un élément clé pour l'exploitation des données	25
4.2. Les formats 3D, seuls formats renvoyant une représentation du profil cohérente	25
4.3. Le choix de l'ondelette : une étape déterminante	26
4.4. Une caractérisation de la longueur d'onde moyenne avec une détection des creux et crêtes différente.....	27
4.5. Un logiciel récent qui reste à améliorer	27
Conclusion	28
Bibliographie.....	29
Webographie	30
Annexes	31
Liste des tableaux, figures et annexes.....	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

3D : trois dimensions

Introduction - Problématique

Les dunes sont des corps sédimentaires qui se forment suite à la friction d'un fluide (eau, vent) sur un fond composé de sédiments meubles. Les dunes sont observées dans divers écosystèmes (déserts, littoraux, fonds marins et fluviaux) (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 influencent le transport sédimentaire et les niveaux d'eau en crue. La distribution de ces corps 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 et de leur état d'équilibre (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 ces formes progradantes.

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 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 mises sous forme de modèle numérique de terrain, les chercheurs ne disposent pas d'outils adaptés pour analyser et caractériser les dunes de façon automatisée et précise.

Afin de répondre à ce problème, un projet de fin d'études a été mis en place. Au premier semestre un état de l'art des outils pouvant mesurer les paramètres morphologiques des dunes fut mené. Un outil intéressant a notamment été découvert : BedformsATM mis au point par R.Gutierrez et al en 2016. L'application de ce dernier sur des relevés bathymétriques réalisés en Loire dans le cadre du programme R-TEMUS fut mise en place ce semestre. Ce rapport rappelle les éléments clés de la synthèse bibliographique dans un premier temps. Ensuite, elle détaille le protocole opératoire mis en place pour vérifier la robustesse de l'outil *Matlab*. Dans un troisième temps, les résultats calculés par le logiciel BedformsATM ainsi que la comparaison des résultats issus du logiciel et de la méthode manuelle seront exposés. Enfin, le rapport se terminera par une discussion qui débouchera sur l'efficacité et la robustesse du logiciel BedformsATM.

1. Rappel des éléments majeurs de la synthèse bibliographique

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

Les dunes sont des corps sédimentaires très présents dans les chenaux fluviaux sableux et sablo-graveleux. Les dunes sont considérées comme des mésoformes (leur longueur d'onde étant du même ordre de grandeur que la profondeur d'eau qui les engendre). Les dunes possèdent deux faces : une face d'érosion à l'amont et une où les sédiments se déposent à l'aval (figure 1). La crête est orientée perpendiculairement au sens du courant.

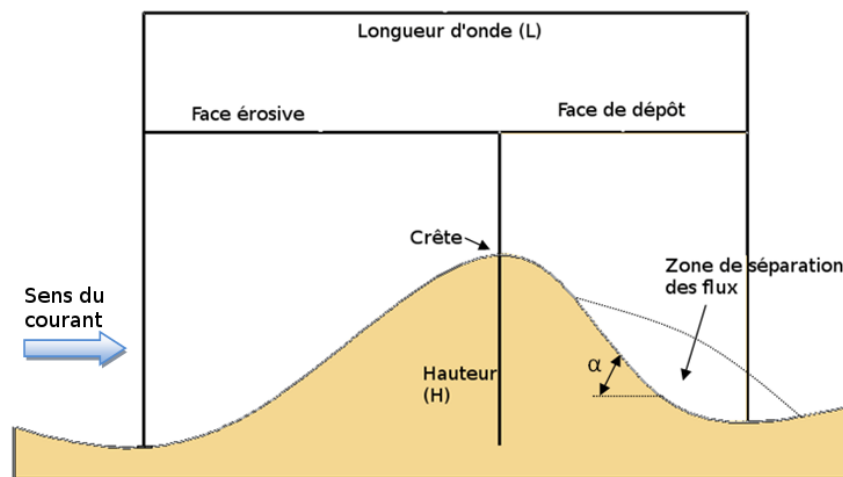


Figure 1 : Schéma descriptif de la morphologie d'une dune

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 contient plusieurs sous-couches dont une laminaire et visqueuse au contact du fond du lit. Dans cette sous-couche, les écoulements sont ralentis et la viscosité domine. 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).

La morphologie des dunes est dépendante de critères à la fois hydrauliques (profondeur d'eau) que sédimentaires (contraintes de cisaillement). La profondeur d'eau est notamment déterminante 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 et la contrainte de cisaillement. 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. Lors des crues, en période de montée de crue, 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).

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). 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. Lorsque la contrainte de cisaillement varie, le taux de charriage augmente 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 le taux de charriage augmente les graviers peuvent être déplacés jusqu'à la crête.

La qualité des apports sédimentaires et ces derniers en eux-mêmes 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 plus fin. 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 en hauteur (Bridge, 2003).

1.2. BedformsATM, un logiciel multifonctionnel qui utilise les ondelettes pour caractériser les dunes

Bedforms Analysis Tool Multiscale Modeling est un outil 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 cosinoïdale 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 :

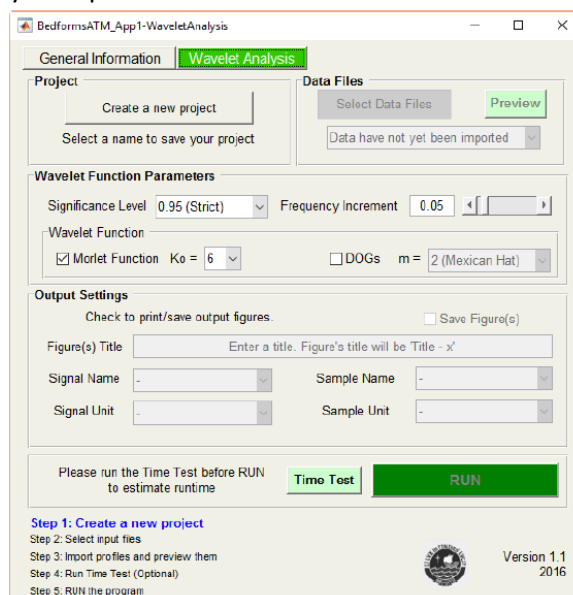


Figure 2: Interface de l'analyse 1 du logiciel BedformsATM (Gutierrez, 2017)

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. L'unité SI restant 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).

La troisième analyse permet de hiérarchiser les différentes formes du lit. Elle est effectuée en utilisant une interpolation des splines sur le signal original. 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. 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 si plus de dix profils ont été rentrés pour l'analyse comme le montre la figure suivante :

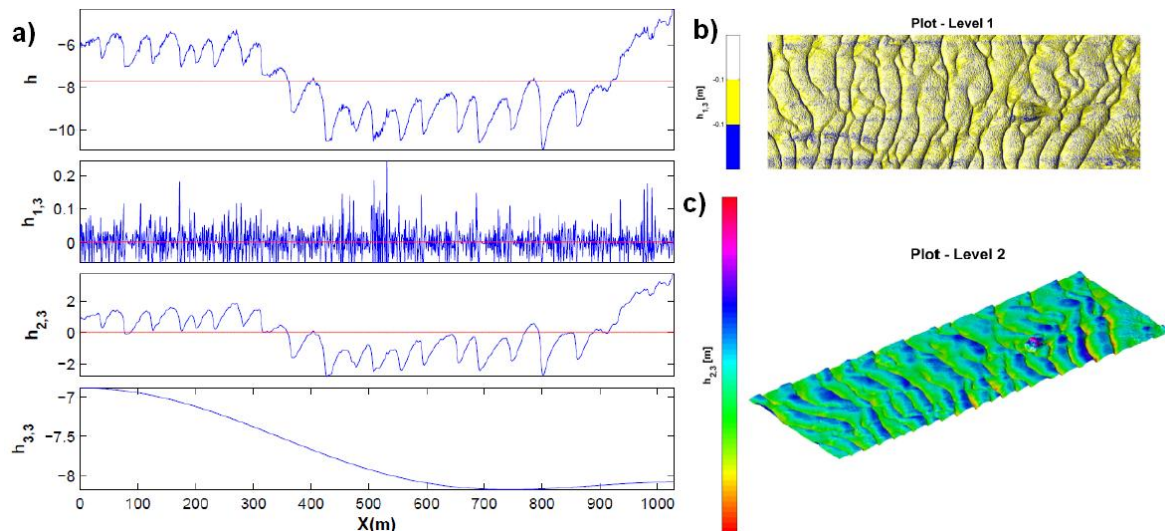


Figure 3 : Profils du lit hiérarchisés en trois catégories de formes de lit (4.a) et modèle numérique de terrain en vue 2D (4.b) et 3D (4.c) (Gutierrez, 2017)

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'étude est aussi spécifiée par l'utilisateur. Il faut faire attention à bien choisir la taille de la fenêtre d'observation afin de pouvoir détecter toutes les dunes présentes. Pour réduire ce risque une deuxième fenêtre d'observation quatre fois plus petite que la première dans la direction de l'axe X ou Y est automatiquement créée une fois la première définie. Une fois l'analyse exécutée, on obtient la figure suivante qui peut être sauvegardée en format pdf (Gutierrez, 2017) :

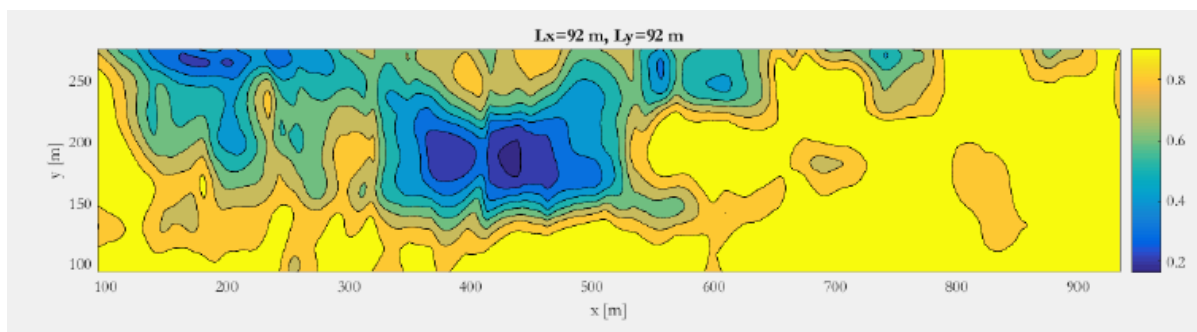


Figure 4 : Cartographie résultant de l'analyse 3D (Gutierrez, 2017; données en entrée : Parsons et al, 2005)

2. Matériel et méthodes

Cette partie présente le protocole opératoire pour caractériser les dunes via le logiciel *BedformsATM* et comparer leurs résultats à ceux obtenus par la méthode manuelle. Pour que le logiciel dimensionne les dunes, il a fallu au préalable modifier les données. Cette méthode constitue d'ailleurs le premier point de ce chapitre.

Contrairement à ce qui était annoncé dans la conclusion de la synthèse bibliographique, l'étude du logiciel Paramdune n'a pu être effectuée. En effet, dans la première partie de ce projet, un test du format des données en entrée dans le logiciel Paramdune avait été réalisé. Il avait alors abouti sur un message d'erreur. Depuis, des emails ont été envoyés afin de comprendre l'origine du problème. L'extension du fichier de données en format texte a été modifiée en format glz (format propre au SHOM), mais cela n'a rien changé. D'autres emails ont été envoyés mais restant sans réponse au moment de la rédaction de ce rapport, le logiciel n'a pu être testé.

2.1. Prétraitement des données en vue de leur exploitation

Le format des données des levés bathymétriques réalisés sur la Loire sont au format raster adf. Cela leur permet d'obtenir un MNT et de visualiser aisément la topographie du site. Malheureusement, *BedformsATM* ne prend en charge que des données en format matlab (.mat) ou texte (.txt). Il a donc été décidé de transformer les données en format raster, dans un format texte.

2.1.1. Choix des données à traiter

Les données d'entrée pour ce protocole sont des données issues de relevés réalisés dans le cadre du projet R-TEMUS, sur le site d'Ingrandes - Le Fresne Sur Loire.

Afin de tester la robustesse du logiciel et comparer ces résultats par la méthode manuelle, il a été choisi de traiter des données issues d'une dalle bathymétriques où les dunes se distinguaient aisément comme le montre la figure suivante. Si, dans ce cas, *BedformsATM* ne donne pas de résultats représentatifs de la réalité, alors le logiciel n'est pas considéré comme fiable.

Localisation des profils sur le site d'Ingrandes-Le Fresne Sur Loire

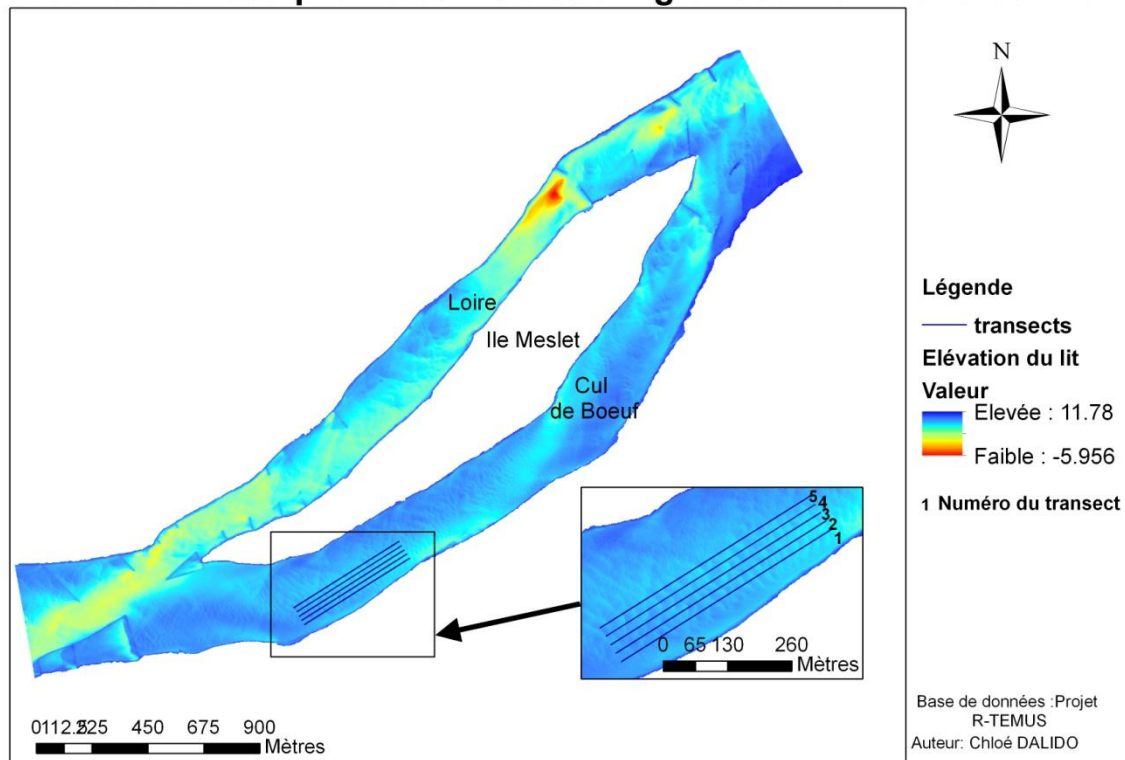


Figure 5 : Carte de localisation des transects servant de données d'entrée au logiciel

La dalle bathymétrique a une dimension importante. Pour permettre de lancer des analyses au temps d'exécution plus courts et donc d'en réaliser plus, une extraction de la dalle a été réalisée sous forme de profils (voir sous partie suivante). Les profils ont été tracés parallèlement aux berges dans des zones exemptes de changement d'orientation des berges, afin d'éviter toute complication lors du traitement des données par le logiciel. La distance des transects a été fixée à 500m afin de disposer d'une zone représentative tout en ayant un nombre de dunes raisonnable à mesurer par méthode manuelle. La distance entre chaque transect est fixée à 20m.

2.1.2. Modification du format des données

La modification du format des données est réalisée en trois grandes étapes : extraction, modification du format, mise en forme du fichier texte. À noter que pour que les données soient traitées par BedformsATM, chaque profil doit avoir son propre fichier texte et donc être sur une couche qui lui est propre. Tout le protocole sera à répéter autant de fois qu'il y aura de transects à réaliser.

Pour réaliser la première étape, il faut réaliser les tâches suivantes :

- Ajouter la dalle bathymétrique aux couches et ouvrir «*Arctoolbox*»
- Choisir l'outil «Créer une classe d'entité» situé dans le menu «Outils de gestion de données» et dans la catégorie «Classe d'entité». Lors de la création, il faut bien être vigilant au type de géométrie, au système de coordonnées mais également à préciser que l'entité contient des valeurs Z.
- Sélectionner l'outil «Extraction par masque» situé dans le menu «Outils de Spatial Analyst» et la catégorie «Extraction». Spécifier la couche que l'on veut extraire puis la couche qui sert de masque.

Le format ainsi obtenu est un raster. Pour avoir des coordonnées de notre transect il faut donc modifier le format et réaliser les tâches suivantes :

- Sélectionner l'outil «Convertir Raster en Point» situé dans le menu «Outils de conversion» et la catégorie «A partir d'un raster».
- Sélectionner l'outil «Ajout de coordonnées XY» situé dans le menu «Outils de gestion de données» et la catégorie «Entités».

À ce stade là, on obtient des points sur le transect et autour, les points représentant le centre de chaque pixel intersectant le transect. En utilisant l'outil «Intersecter», nous n'obtenons pas suffisamment de points pour traiter les données. Avec moins d'un point par mètre, le signal est lissé. Ainsi il faut projeter les points autour du transect dessus. Pour cela, il faut accomplir les opérations suivantes :

- Ouvrir la barre d'outils «Mise à jour avancée»
- Sélectionner tous les points du transect concerné
- Sélectionner l'outil «Aligner sur une forme»
- Sélectionner la couche à aligner
- Cliquer sur l'icone en forme de triangle
- Matérialiser la droite d'alignement en cliquant une fois sur le point de démarrage et une autre fois pour finir la droite
- Spécifier la tolérance de sélection des points à aligner. Ici, elle a été fixée à 3 pour être sûr de pouvoir aligner tous les points.

Une fois ces opérations effectuées, il faut répéter l'opération «Ajout de coordonnées XY» pour être sûr que les coordonnées ont bien été modifiées.

Ensuite, il suffit d'extraire le fichier et de le mettre en forme pour qu'il soit traité par le logiciel. Pour cela il faut :

- Ouvrir la table attributaire du transect
- Exporter la table en format .txt
- Ouvrir la table sur Excel en choisissant le type de données «délimité» et le séparateur «virgule».
- Enlever les colonnes ne représentant pas les coordonnées et les entêtes.
- Faire attention à ce que les colonnes soient dans l'ordre suivant : coordonnées X, coordonnées Y et coordonnées Z.

Remarque : Il est possible de lancer une seule analyse pour tous les transects en même temps. Il suffit de sélectionner tous les profils lors de la sélection des dossiers. Au préalable, il faut également avoir été attentif au fait que les profils doivent être tous équidistants les uns des autres et de la même longueur. Pour cela, il faut construire les transects à partir du premier tracé grâce à l'outil «Copie parallèle» dans l'éditeur.

2.2. Caractérisation des dunes sur le logiciel

Le logiciel BedformsATM propose à l'utilisateur plusieurs formats de données d'entrée. Pour l'analyse déterminant la longueur d'onde, l'utilisateur peut choisir le type d'ondelette qui servira à la réalisation de l'analyse. Cette première analyse servant de base à toutes les autres, il est nécessaire de ne pas se tromper dans ce choix.

L'utilisateur peut également modifier le niveau de précision de l'analyse (intervalle de confiance) et la fréquence d'incrémentation de l'ondelette. Ces paramètres ne seront pas testés et resteront sur les valeurs prédéfinies. En effet, dans le manuel d'utilisateur il précise qu'une fréquence d'incrémentation importante permet une meilleure résolution et recommande d'utiliser un intervalle de confiance élevé (Gutierrez, 2017).

2.2.1. Test des différents formats d'entrée

Quatre choix de formats de données d'entrée s'offrent à l'utilisateur :

- «*Rectangular plot*»
- «*Curved plot*»
- X,Y, N coordonnées relatives 2D avec un nombre ayant des coordonnées ordinales
- X,Y, coordonnées relatives 2D

Voulant réaliser une analyse 3D, les deux premiers formats seront testés mais également le troisième. En effet dans le tutoriel du logiciel (Gutierrez, 2016), les données issues de son étude sur le fleuve Paraná sont considérées comme de format X,Y,N.

Lorsque les analyses seront lancées, seul ce paramètre sera changeant. Le choix de l'ondelette pour l'analyse sera fixé. L'étude se centrant sur les dunes, l'ondelette fixée sera une dérivée gaussienne DGOs.

Si plusieurs formats présentent des résultats identiques, ils seront également testés sur l'ondelette de Morlet. Si pour les deux types d'ondelettes les conclusions sont identiques, l'analyse se fera sur les coefficients.

2.2.2. Test des différentes ondelettes utilisées pour l'analyse

Lors du lancement de l'analyse, deux types d'ondelettes avec plusieurs choix de coefficients sont proposés à l'utilisateur :

- L'ondelette de Morlet avec les coefficients Ko 6, 7, 8, 9 et 10
- L'ondelette de type dérivée gaussienne (DGOs) avec les dérivées d'ordre 2 ou 6

L'ondelette de Morlet permettrait notamment de renvoyer les fréquences d'échantillonnage inférieures à 0.25m qui sont souvent les fréquences représentant les petites formes de lit (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).

Comme pour la partie précédente, le type d'ondelette et son coefficient seront les seuls paramètres changeants. Le choix du format d'entrée sera fixé en fonction des résultats du test précédent.

Cela sera effectué aussi bien pour l'analyse 1, déterminant les longueurs d'ondes, que l'analyse 3, permettant de déterminer la hauteur de la dune.

2.3. Caractérisation des dunes par la méthode manuelle

La réalisation de cette étape se déroule à partir du fichier txt obtenu sur ArcGIS et mis en forme sur Excel. La caractérisation est effectuée en deux phases : réalisation du profil et calcul de la longueur d'onde et de la hauteur de chaque dune.

Pour réaliser le profil, il faut effectuer les opérations suivantes :

-Calculer dans une colonne la distance de chaque point par rapport au premier point à partir de la formule suivante :

$\sqrt{(X_1 - X_n)^2 + (Y_1 - Y_n)^2}$ n étant la position du point dans le profil

- Créer un nuage de points avec des courbes marquées représentant le profil. Pour cela sélectionner la colonne des distances pour les abscisses et la colonne de coordonnées Z pour les ordonnées.

Le profil réalisé, il ne reste plus qu'à calculer la hauteur de la dune et sa longueur d'onde. Ici la hauteur d'une dune est la distance entre un sommet et le creux suivant. La longueur d'ondes est définie de deux manières : distance entre deux sommets consécutifs ou distance entre deux creux consécutifs. Les deux méthodes seront testées. Ceci sera à effectuer par lecture graphique et ce pour chaque dune.

3. Résultats obtenus

3.1. Caractérisation des dunes avec BedformsATM

3.1.1. Caractérisation de la longueur d'onde moyenne

Pour déterminer la longueur d'onde moyenne, quatre paramètres peuvent être choisis par l'utilisateur : le format des données, le type d'ondelette, la fréquence d'incrémentations et l'intervalle de confiance. Pour ces deux derniers, le créateur du logiciel émet des recommandations. Cependant, il n'y a pas d'explications sur l'influence du coefficient pour les ondelettes, ni sur le format d'entrée à sélectionner. Ainsi ces deux paramètres seront testés. Dans un premier temps, ce sera le format d'entrée qui sera testé puis le type d'ondelette.

3.1.1.1. Analyses avec le format d'entrée comme paramètre variant

Voulant une analyse 3D, il serait logique d'utiliser les formats d'entrée 3D «*Rectangular plot*» ou «*Curved plot*» mais dans le tutoriel c'est le format X,Y,N qui est utilisé sur les données du fleuve Paraná (Gutierrez, 2016). Les trois formats seront donc étudiés.

Dans un premier temps, cette analyse avait été lancée à partir d'un fichier texte issu d'une extraction par polygone de la dalle bathymétrique. Malheureusement pour tous les formats d'entrée, le message d'erreur suivant s'affichait :

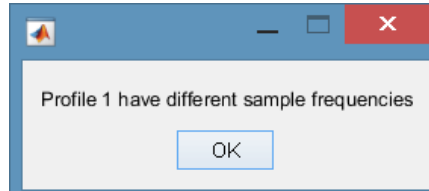


Figure 6: Message d'erreur concernant les fréquence du profil

Après relecture des articles (Gutierrez et al., 2013) et du manuel d'utilisateur (Gutierrez, 2016), il s'est avéré que M. Gutierrez n'appliquait ses analyses qu'à partir de transect. La méthodologie pour modifier les données a donc été changée. C'est celle décrite dans la partie 2.1.

En appliquant cette méthodologie, plusieurs résultats sont apparus.

Pour le format «X,Y, N coordonnées relatives 2D» un premier message s'affiche demandant la distance entre les profils et ce même si l'utilisateur n'a rentré qu'un seul profil à analyser comme le montre la figure suivante :

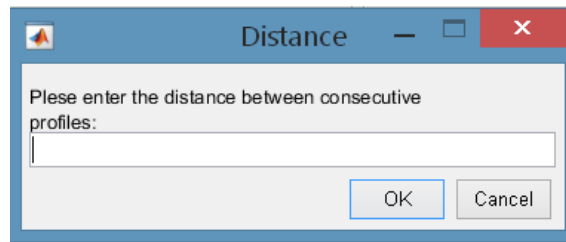


Figure 7: Message demandant une information complémentaire à l'utilisateur pour le format «X,Y,N coordonnées 2D»

En voulant réaliser l'analyse avec plusieurs profils, ce même message apparaît suivi du message d'erreur concernant les fréquences (Figure 6).

Concernant les formats 3D («*Rectangular plot*» et «*Curved plot*»), l'analyse se lance mais lorsque la prévisualisation du profil apparaît, nous remarquons que la longueur du profil retournée n'est pas la bonne. Pourtant il n'y a pas d'incohérence dans la vue en plan. Les coordonnées sont bien celles du fichier texte. Les profils sont étirés comme le montre la figure suivante :

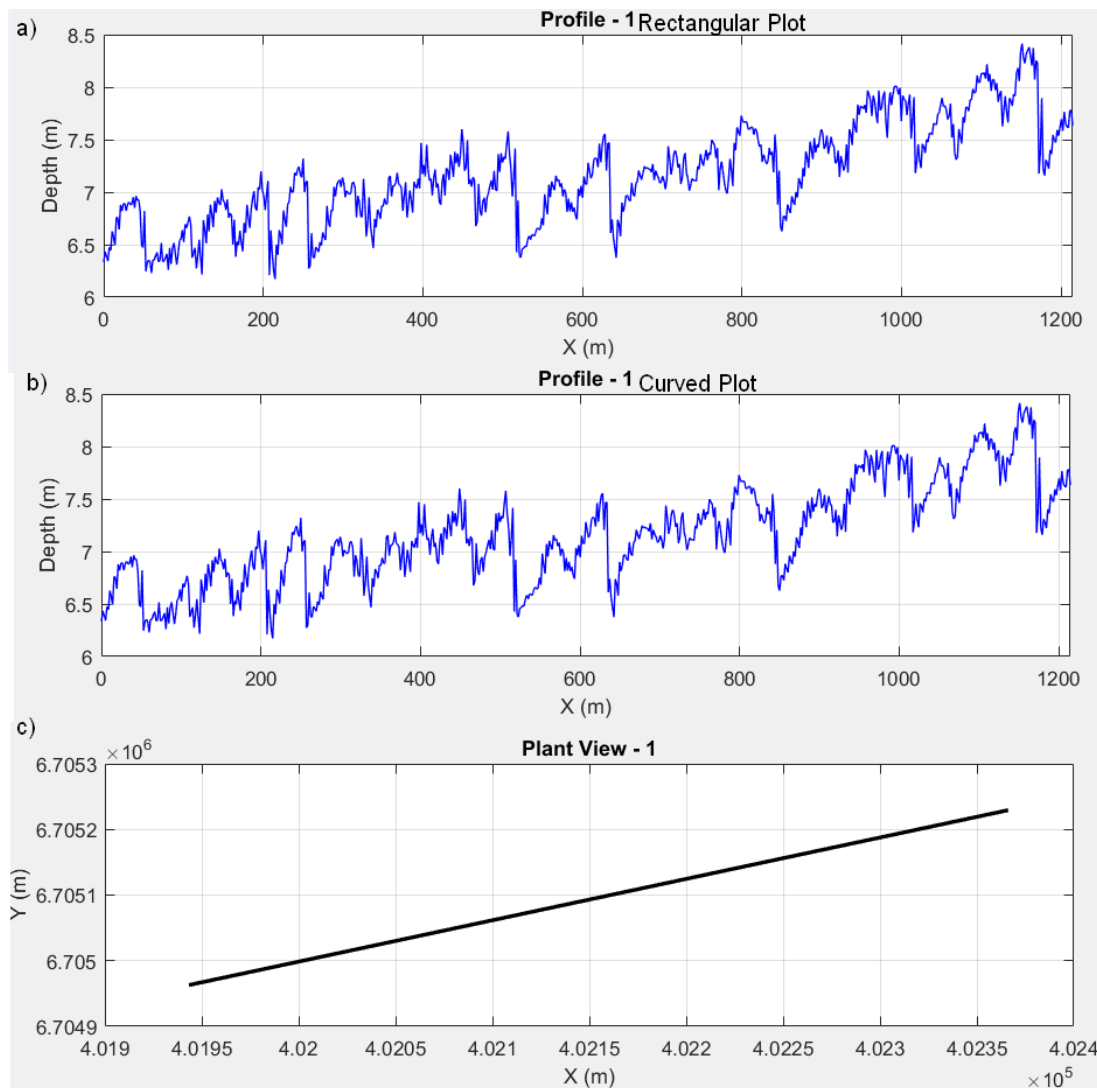


Figure 8: *Preview* des analyses 1 avec le format d'entrée «*Rectangular Plot*» (a) et «*Curved Plot*» (b) ainsi que la vue en plan du transect pour les deux formats (c)

Le profil qui fait initialement 500m en fait plus du double une fois l'analyse effectuée (1200m).

Face à ces divers problèmes, les données *opensource* dont se sert M.Gutierrez ont été téléchargées et comparées à celles utilisées. Cette étude a révélé deux choses différentes. Pour les données du fleuve Paraná les chiffres sont écrits au format scientifiques. Pour les données utilisées avec le format d'entrée «*Rectangular Plot*» et «*Curved Plot*», les coordonnées X sont triées dans l'ordre croissant. Afin que les données suivent la même logique que les données utilisant les formats «*Rectangular Plot*» et «*Curved Plot*» les deux étapes suivantes ont été rajoutées à la méthodologie décrites dans la partie 2.1 :

- Filtrer les 3 colonnes
- Trier les X dans l'ordre croissant

Avec ces nouveaux fichiers et après avoir lancé l'analyse, nous obtenons les résultats suivants :

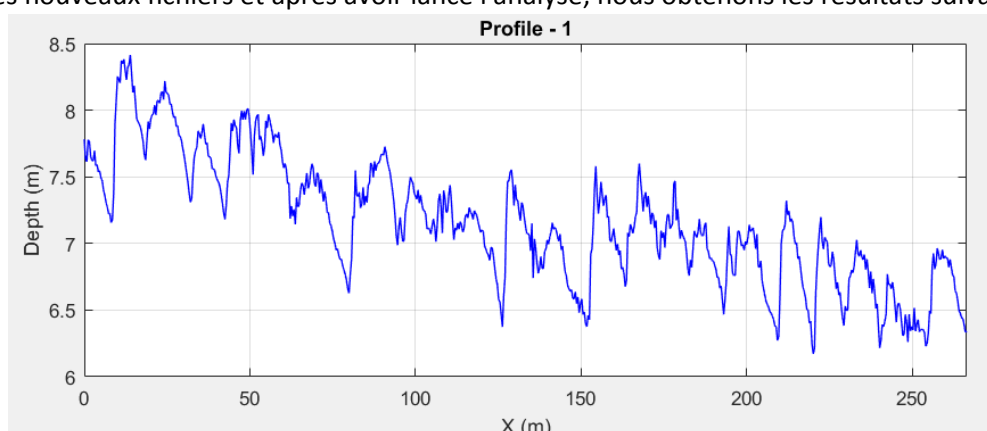


Figure 9: Résultats de l'analyse avec le format «X,Y,N coordonnées 2D»

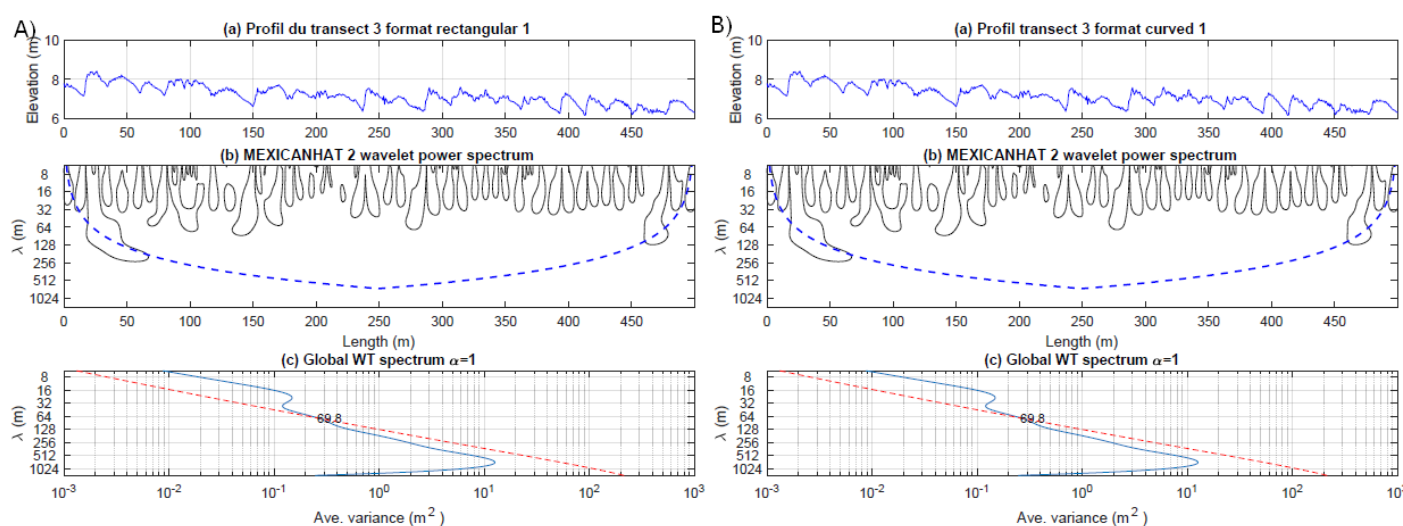


Figure 10: Résultats de l'analyse 1 avec le transect 3 pour le format «*Rectangular Plot*» (A) et «*Curved Plot*» (B)

Pour le format «X,Y,N coordonnées 2D», le profil se retrouve compressé : sa longueur se retrouve diminuée par un facteur 2.

Pour les formats 3D le souci de longueur du profil est résolu et l'analyse s'est déroulée sans encombre. En comparant le format «*Rectangular Plot*» et «*Curved Plot*», nous observons que les deux profils sont identiques et que les longueurs d'ondes renvoyées sont également semblables.

Choisir le format «*Rectangular Plot*» ou «*Curved Plot*» ne semble donc pas avoir d'incidence. Vu que les données sont issues d'un transect, il est plus logique d'utiliser le format «*Rectangular Plot*». C'est donc ce format qui sera utilisé pour le test suivant.

3.1.1.2. Analyses avec le type d'ondelette comme paramètre variant

Au vu des résultats précédents et du fait que les données soit issues d'un transect, le format d'entrée choisi pour ces analyses est le format «*Rectangular Plot*».

Le tableau suivant présente les longueurs d'ondes renvoyées par BedformsATM avec un intervalle de confiance de 95 % :

Tableau 1: Longueur d'onde moyenne renvoyée par BedformsATM pour chacun des transects suivant l'ondelette choisie pour l'analyse

	Longueur d'onde de la dune suivant le type d'ondelette utilisé et son coefficient (en m)						
	Gaussienne (DGOs)		Morlet				
	DGO= 2	DGO =6	Ko =6	Ko =7	Ko =8	Ko =9	Ko =10
Transect 1	25.6	24	24	23.7	23	23.6	23.6
Transect 3	69.8	22.4	22.3	22.1 et 71.2	21.5 et 72.2	22 et 71.3	22 et 71.3
Transect 5	31.5	30.6	28.5	31.2	32.6	32.2	45.5

Les valeurs retournées par les deux ondelettes de type gaussienne sont du même ordre de grandeur pour un même transect, excepté pour le transect 3 où la valeur de la DGO2 est 3 fois plus importante que celle de la DGO6.

Les valeurs retournées par les différentes ondelettes de Morlet sont également du même ordre de grandeur pour un même transect sauf dans deux cas. Au transect 5, l'ondelette avec le coefficient 10 donne une valeur plus élevée de 14m par rapport aux autres en moyenne. Au transect 3, l'ondelette de Morlet avec le coefficient 6 est la seule à donner une seule valeur. Elle ne détecte que les formes de lit de petites longueurs d'onde.

En comparant les résultats des ondelettes de dérivées gaussienne avec celle dites de Morlet, il semblerait que la DGO2 ne prenne pas en compte que les formes de lits avec une longueur d'onde importante (type barre). Ce serait le cas inverse pour la DGO6 et l'ondelette de Morlet de coefficient 6. Les autres ondelettes de Morlet, quand à elles, différencient les longueurs d'ondes des dunes et celles des barres.

La question qui se pose alors est : «Les ondelettes d'un même type mais aux coefficients différents donnent-elles des résultats équivalents?» Le tableau suivant présente les écarts issus de comparaison de résultats d'analyses de même type :

Tableau 2 : Ecart entre les résultats d'analyses issus de deux ondelettes d'une même famille sur les longueurs d'ondes reflétant la présence de dunes

Ecart entre les résultats renvoyés par deux ondelettes d'une même famille											
Transect	les 2 DGOs	Morlet:6vs7	Morlet:6vs8	Morlet:6vs9	Morlet:6vs10	Morlet:7vs8	Morlet:7vs9	Morlet:7vs10	Morlet:8vs9	Morlet:8vs10	Morlet:9vs10
1	6.25%	1.25%	4.17%	1.67%	1.67%	0.42%	0.42%	0.42%	2.54%	2.54%	0.00%
3	67.91%	0.90%	4.02%	1.35%	1.35%	2.71%	0.14%	0.14%	2.27%	2.54%	0.00%
5	2.86%	9.47%	6.13%	11.49%	59.65%	4.29%	3.11%	31.43%	1.24%	28.35%	29.23%

XX Ecart significatif car supérieur à 5%

A l'issue de l'analyse comparative et en considérant qu'un écart est significatif à partir de 5%, nous pouvons observer que les valeurs données par les deux ondelettes de type dérivées gaussiennes sont différentes. Choisir l'ondelette de Morlet de coefficient 7, 8 ou 9 ne semble pas avoir d'impact significatif sur les résultats.

Tableau 3: Comparaison des résultats renvoyés entre deux ondelettes de type différent

Ecart entre les résultats renvoyés par deux ondelettes de familles différentes										
Transects	DGO2 VS Morlet 6	DGO2 VS Morlet 7	DGO2 VS Morlet 8	DGO2 VS Morlet 9	DGO2 VS Morlet 10	DGO6 VS Morlet 6	DGO6 VS Morlet 7	DGO6 VS Morlet 8	DGO6 VS Morlet 9	DGO6 VS Morlet 10
1	6.25%	6.25%	7.42%	10.16%	7.81%	0.00%	1.25%	4.17%	1.67%	1.67%
3						0.45%	1.34%	4.02%	1.79%	1.79%
5	9.52%	0.95%	3.37%	2.17%	30.77%	6.86%	1.92%	6.13%	4.97%	32.75%

XX Ecart significatif car supérieur à 5%

L'ondelette DGO2 renvoie des résultats différents de ceux des ondelettes de Morlet sauf au transect 5 où les résultats des ondelettes de Morlet avec les coefficients 7, 8 et 9 sont sensiblement équivalents. Pour l'ondelette DGO6, il n'y a qu'au transect 5 qu'il y a des écarts significatifs avec les ondelettes de Morlet ayant un coefficient pair.

3.1.2. Caractérisation de la hauteur de la dune

Pour la hauteur des dunes, seule l'influence des ondelettes est testée. La hauteur des dunes est déterminée lors de l'analyse 4 mais il faut réaliser l'analyse 3 (discrimination des formes de lit) pour la lancer (voir partie 1.2). En effet, les fichiers d'entrée pour l'analyse 4 sont ceux représentant les résultats de l'analyse 3.(voir annexe 1)

Ainsi, l'analyse de discrimination a été effectuée sur chaque transect pour chaque type d'ondelette proposée à la première analyse. Les trois figures suivantes présentent les profils de dunes obtenus pour chaque transect :

Signal représentant les dunes du transect 1 après discrimination

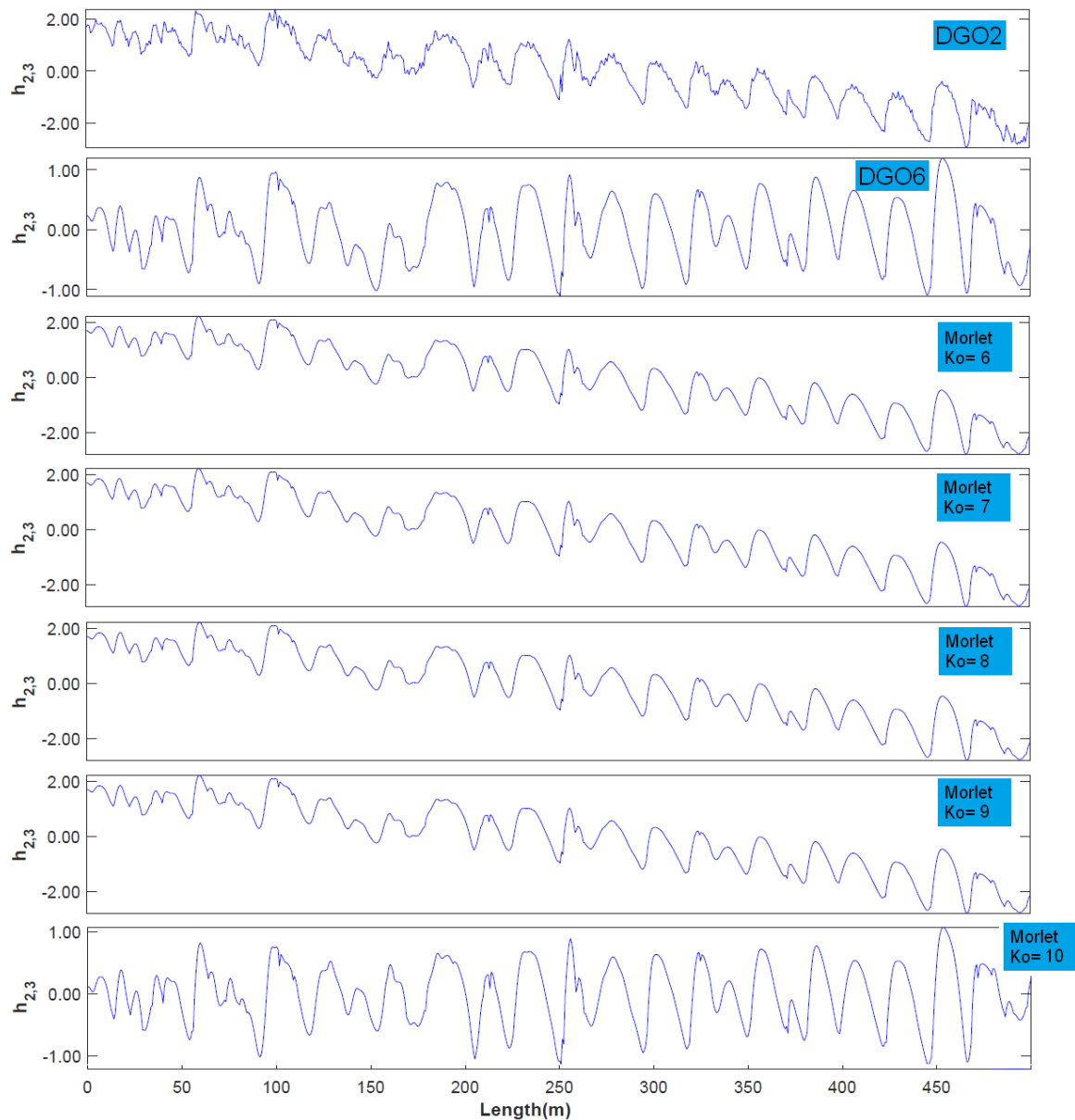


Figure 11: Profil des dunes présentes sur le transect 1 selon l'ondelette utilisée pour l'analyse

Pour ce transect, nous notons la présence de petites formes de lits avec l'ondelette DGO2 qui ne le sont pas avec les autres ondelettes. Les résultats retournés par les ondelettes de Morlet avec des coefficients allant de 6 à 9 sont identiques. Les ondelettes DGO6 et de Morlet avec un coefficient 10 renvoient des profils à la même allure, excepté à la fin du profil entre 480m et 500m.

Signal représentant les dunes du transect 3 après discrimination

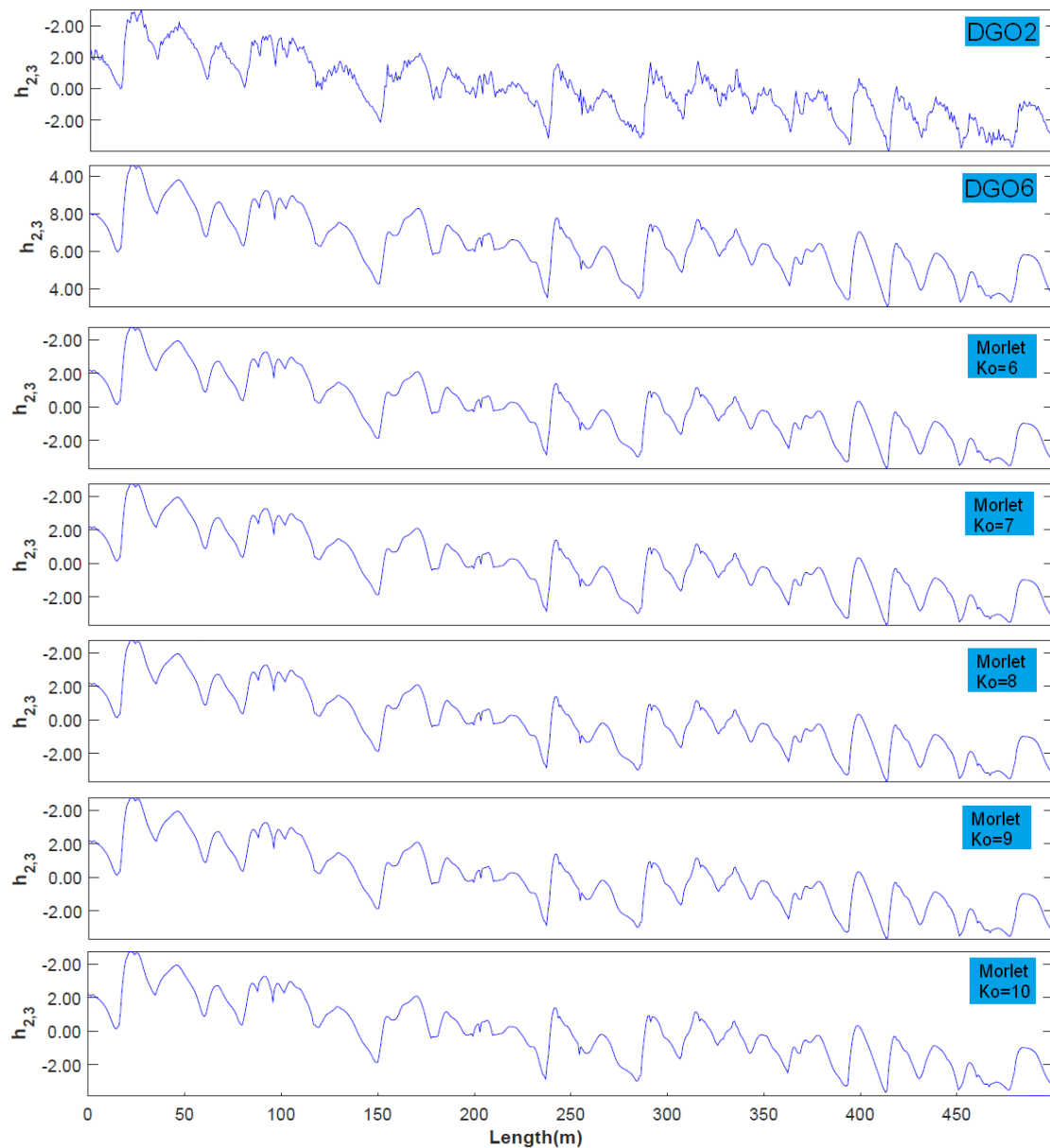


Figure 12: Profil des dunes présentes sur le transect 3 suivant l'ondelette utilisée lors de l'analyse

Tout comme pour le profil 1, nous observons des petites dunes sur le profil renvoyé par l'ondelette DGO2 qui ne sont pas présentes sur les profils renvoyés par les autres ondelettes. Pour toutes les autres ondelettes, le profil renvoyé a une allure identique.

Signal représentant les dunes du transect 5 après discrimination

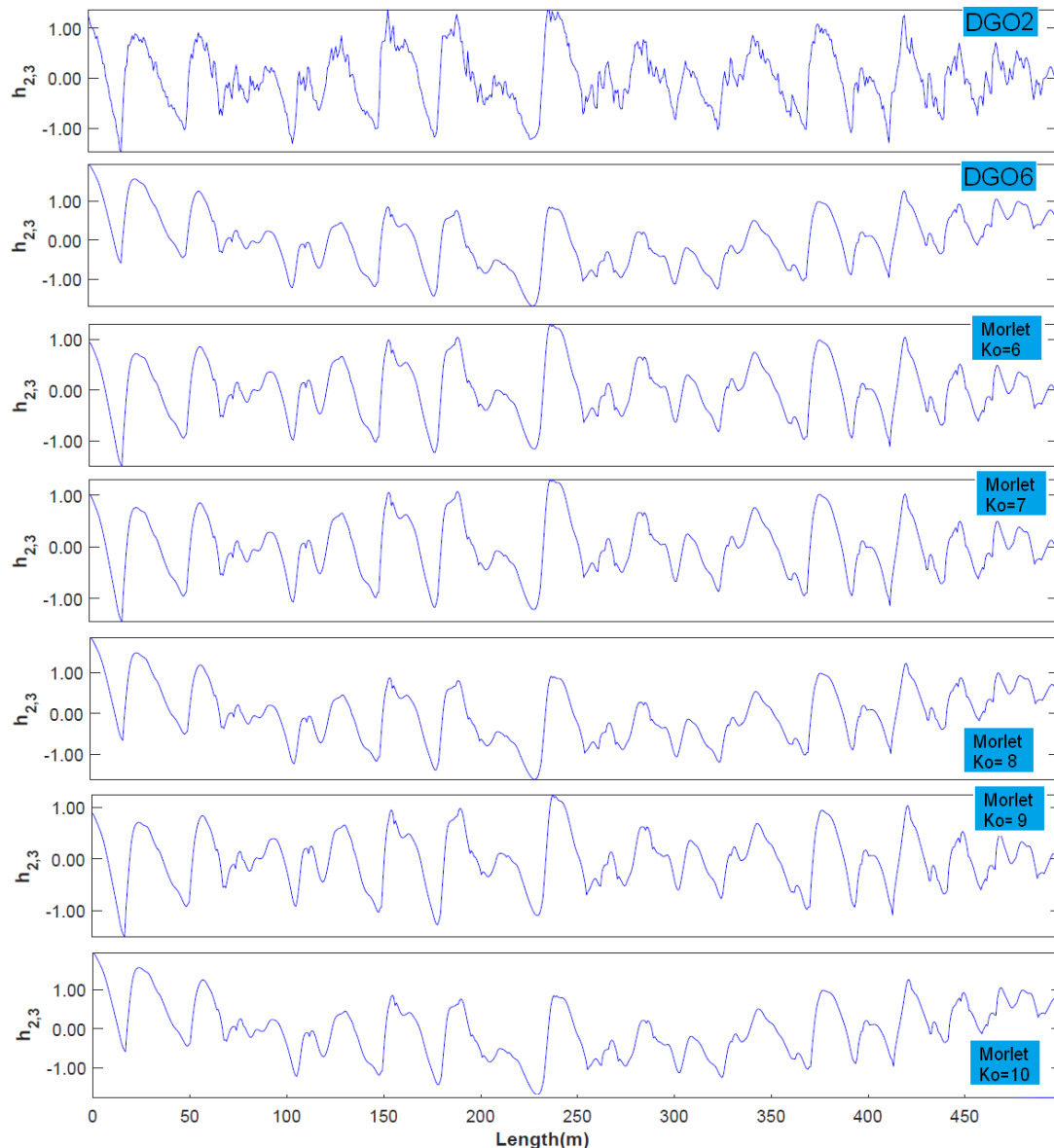


Figure 13: Profil des dunes présentes sur le transect 5 suivant l'ondelette choisie

Comme pour les profils précédents, nous remarquons une discrimination différente réalisée par l'ondelette DGO2 par rapport aux autres. Elle est moins stricte. Ici, les ondelettes de Morlet avec les coefficients 6, 7 et 9 renvoient des profils identiques. Les ondelettes de Morlet avec les coefficients 8 et 10 ainsi que l'ondelette DGO6 renvoient des profils à l'allure similaire.

- En comparant les résultats des trois transects, trois faits sont présents à chaque fois :
- le signal renvoyé par l'ondelette DGO2 semble discriminer les dunes de façon plus large que les autres ondelettes
 - les ondelettes de Morlet avec les coefficients 6, 7 et 9 renvoient des résultats identiques
 - les ondelettes DGO6 et de Morlet avec Ko= 10 renvoient également des résultats identiques

Avec ces résultats, nous pouvons nous attendre à retrouver ces conclusions pour la caractérisation des hauteurs de dunes effectuée par l'analyse 4.

Malheureusement suite à un problème technique non dépendant de l'utilisateur, il s'avère que l'analyse 4 ne réagit pas quand l'utilisateur clique sur «*Import discrimination data*» pour importer les fichiers. Un message d'erreur apparaît. Il semblerait qu'il y ait une erreur de codage.

En examinant les fichiers à entrer pour les analyses, il n'y a pas moyen de retrouver les données de hauteur des dunes. Il y a uniquement les coordonnées de chaque point suivant la hiérarchie du profil. (Annexes 2 et 3).

3.2. Caractérisation des dunes avec la méthode manuelle

Lorsque la caractérisation manuelle de chacune dune des profils est effectuée (Annexe 4), nous obtenons les longueurs d'ondes et hauteurs moyennes suivantes pour les trois transects :

Tableau 4: Tableau représentant les λ moyennes des dunes, ainsi que leurs hauteurs moyennes, déterminées par méthode manuelle

	Transect 1	Transect 3	Transect 5
Hmoy (en m)	0.78	0.75	0.81
λ moy entre deux creux (en m)	18.54	20.91	23.15
λ moy entre deux crêtes (en m)	19.21	21.26	24.03
Ecart entre les deux méthodes de caractérisation des λ	3.48%	1.65%	3.65%

Les longueurs d'ondes moyennes obtenues pour un même transect suivant les deux méthodes sont identiques à 1m près. Les mesures réalisées entre deux crêtes donnent des valeurs plus élevées pour les trois transects. L'écart entre les deux méthodes est inférieur à 5% nous pouvons le considérer comme non significatif.

3.3. Comparaison des deux techniques

Les trois graphiques présentent les résultats de l'analyse comparative pour chacun des transects :

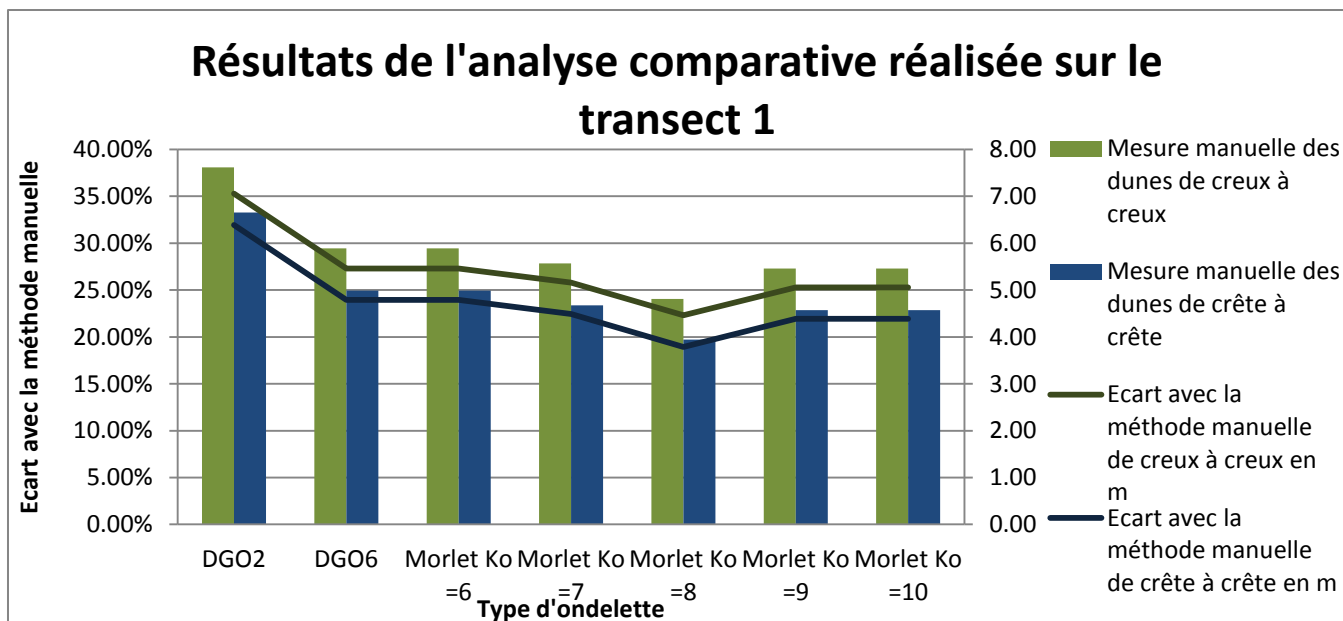


Figure 14 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 1

Entre les méthodes de caractérisation de BedformsATM et manuelle il y a un écart de l'ordre de 5 m soit de plus de 25% (cf Annexe 5). Les valeurs données par le logiciel sont plus importantes.

L'ondelette donnant la longueur la plus élevée est la DGO2 (écart de l'ordre de 7 m soit 38%). Au contraire, l'ondelette de Morlet avec le coefficient fixé à 8 donne le résultat le plus proche de ceux des méthodes manuelles. Cependant, au vu de la valeur de l'écart (24% avec la mesure entre deux creux et 20% avec la mesure entre deux crêtes), l'écart est significatif, nous ne pouvons donc considérer ce résultat comme fiable.

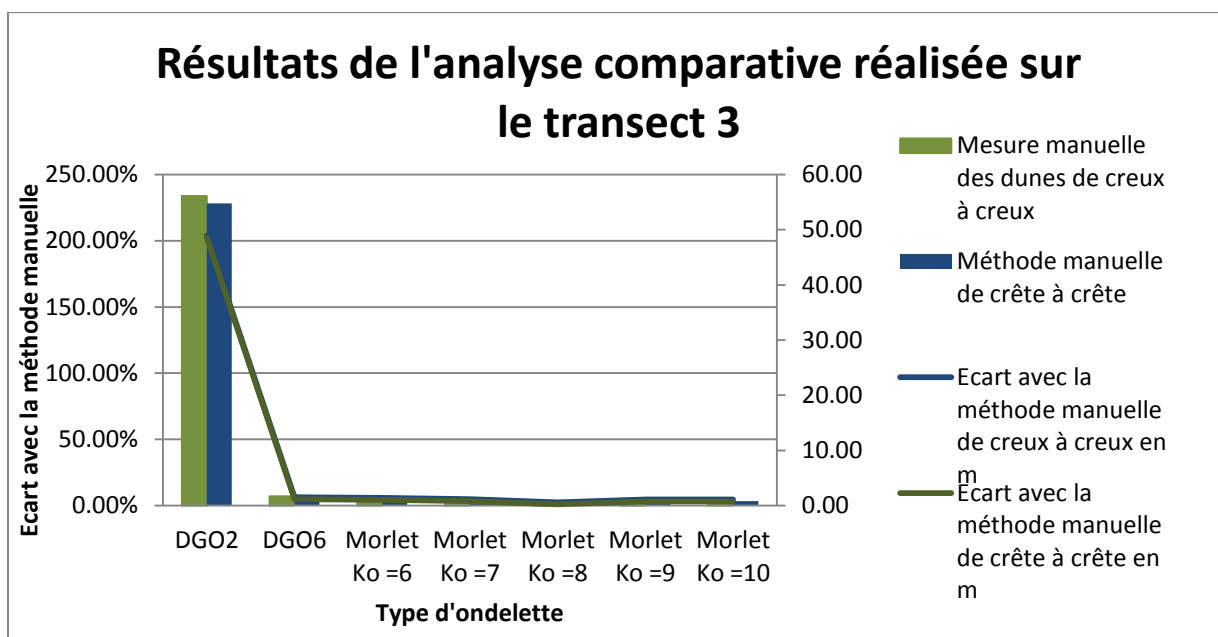


Figure 15 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 3

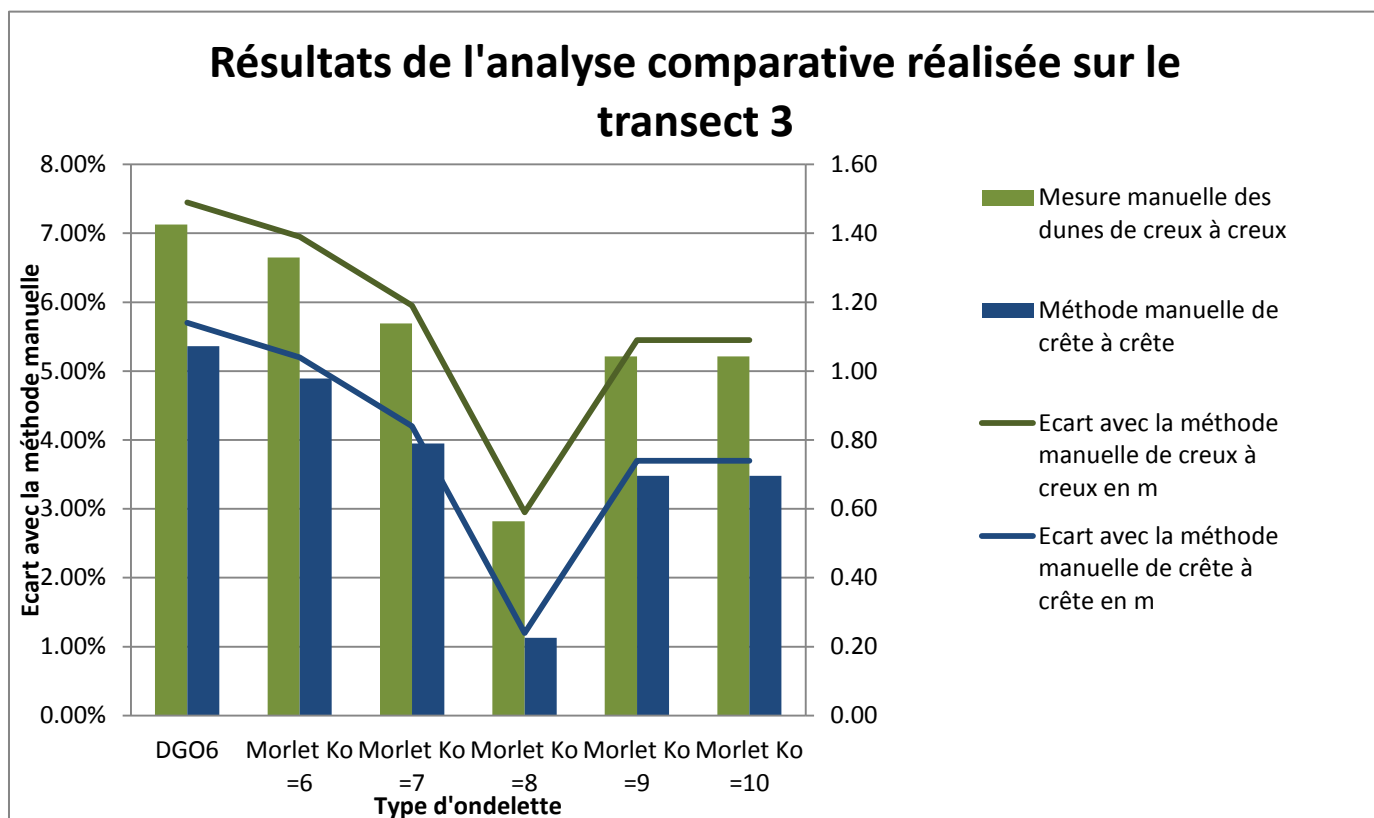


Figure 16: Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 3 avec la valeur aberrante donnée par la DGO2 retirée

Sur ce transect les écarts entre méthodes automatisées et manuelles est beaucoup plus faible : de l'ordre d' 1m soit moins de 5%. Sauf pour l'ondelette DGO2 où l'écart est d'environ 48m soit plus du double de la longueur d'onde retournée par les méthodes manuelles. Cette valeur est jugée aberrante. Les valeurs données par le logiciel sont là aussi plus importantes.

Ce sont les mêmes ondelettes qui donnent les valeurs les plus éloignées (DGO2 avec un écart de plus de 230%) et plus proches (Morlet de coefficient Ko=8 avec un écart inférieur à 3%).

Cependant, ici, les ondelettes de Morlet donnent des résultats proches de ceux donnés en mesurant la longueur d'onde entre deux crêtes. Ces résultats sont considérés comme fiables. Ce n'est pas le cas des ondelettes de dérivée gaussienne.

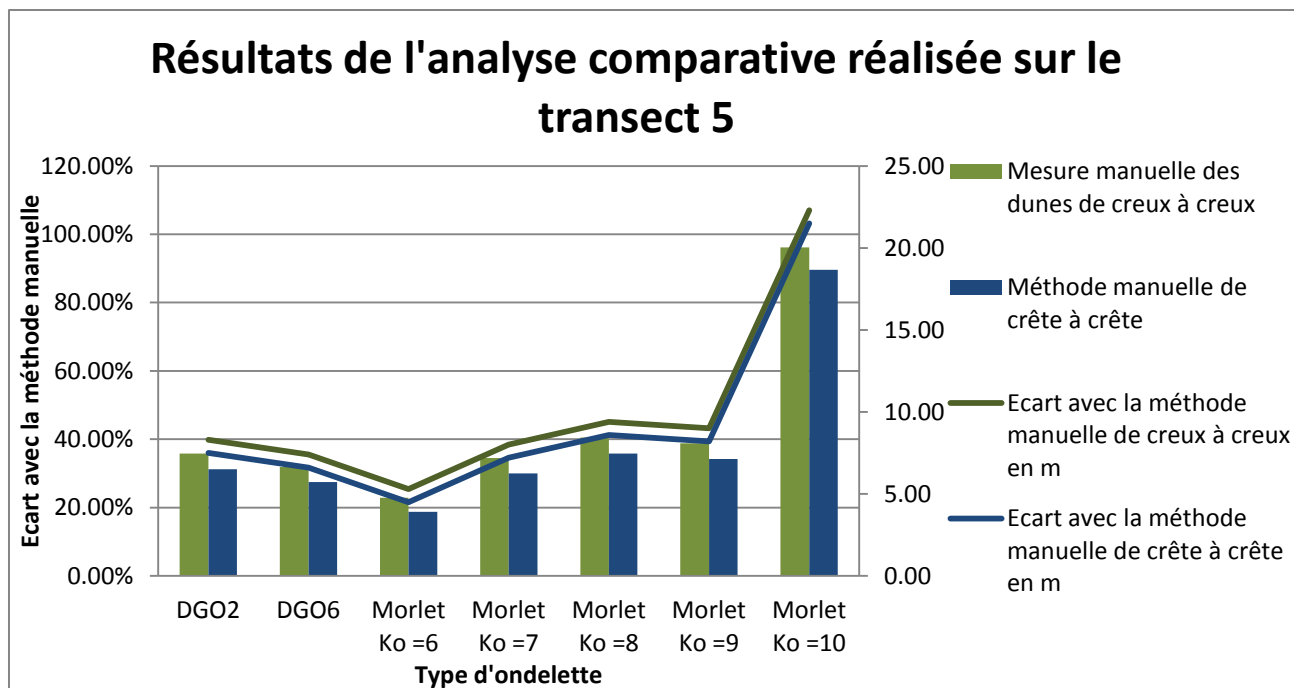


Figure 17 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 5

Sur ce transect les valeurs retournées par BedformsATM sont aussi plus importantes que celles obtenues par méthode manuelle. Exceptée la valeur retournée par l'ondelette de Morlet avec le coefficient fixé à 10, les écarts sont de l'ordre de 7 et 8 m soit entre 30 et 34%.

Ici, l'ondelette renvoyant les valeurs les plus éloignées est l'ondelette de Morlet avec Ko=10 puisqu'elle donne une valeur qui peut être considérée comme aberrante. La valeur renvoyée est le double de celles renvoyées par les méthodes manuelles. L'ondelette renvoyant les résultats les plus proches des caractérisations manuelles est l'ondelette de Morlet avec Ko fixé à 6. Cependant, l'écart reste important (23%), le résultat ne peut donc pas être considéré comme représentatif de la réalité.

4. Discussion

Les résultats des analyses ont permis de mettre en lumière plusieurs faits.

4.1. Le classement des coordonnées du profil; un élément clé pour l'exploitation des données

Le premier test de format d'entrée des données s'est révélé être un échec, aucun format n'acceptant les données ou renvoyant des profils près de deux fois et demie plus long (cas des formats 3D). En comparant les données utilisées par M. Gutierrez et celles de l'équipe du projet R-TEMUS, il s'est avéré que dans la colonne des coordonnées des X les chiffres étaient dans l'ordre croissant dans le cas du créateur du logiciel. En calculant sur Excel la distance du profil, mais également la distance entre chaque point, un fait sur le fonctionnement du logiciel BedformsATM est apparu. BedformsATM construit les profils en calculant par accumulation les distances entre chaque point. Si les coordonnées de l'axe des abscisses ne sont pas classées, il est donc normal que la distance du profil soit plus importante qu'en réalité et donc que le profil soit étiré. Afin d'avoir la bonne distance de profil, le classement des points du profil suivant l'axe des X est donc primordial.

De plus, lors de la transformation des données sur ArcGIS, pour les rendre exploitable sur BedformsATM, il est également essentiel que l'opérateur n'oublie pas de réaliser ces différents transects sur des couches différentes. Chaque couche doit posséder sa table attributaire, sinon l'analyse calculera un transect à partir de l'ensemble des points. L'analyse sera faussée. Et s'il souhaite lancer l'analyse en même temps pour plusieurs transects ces derniers doivent être équidistants les uns des autres.

4.2. Les formats 3D, seuls formats renvoyant une représentation du profil cohérente

Le test de format d'entrée a montré qu'avec les données de l'équipe du projet R-TEMUS, seuls deux formats permettaient d'exploiter les données : le format 3D «*Rectangular plot*» et le format 3D «*Curved plot*». Bien que le format «X,Y,N coordonnées 2D» soit utilisé par M.Gutierrez pour caractériser des signaux naturels (Gutierrez, 2016), il est impossible de l'exploiter ici. Cela est sûrement dû au format des cellules différent entre les fichiers du chercheur péruvien et de ceux de l'équipe de recherche R-TEMUS : scientifique et nombre. De plus, avec ce format, l'analyse 3D aurait été réalisée avec des coordonnées relatives, ce qui aurait sûrement entraîné une perte de précision lors de l'exécution des analyses.

Les deux formats 3D ont été testés pour chaque famille d'ondelette et chaque type au sein de la famille. En comparant les résultats pour ces deux paramètres, les graphiques renvoyés se sont révélés identiques et ce pour toutes les ondelettes. S'il y a le choix entre ces deux paramètres, il doit y avoir une condition pour laquelle l'une ou l'autre est plus précise. Cependant, cela n'impacte pas les données qui ont été testées. Au vu de l'absence d'explications dans le manuel d'utilisateur et du manque de connaissances sur le fonctionnement du logiciel, aucune explication n'a pu être apportée. Néanmoins, les données étant issues d'un transect et donc d'un tracé plutôt rectangulaire, il vaut mieux utiliser le format «*Rectangular plot*».

4.3. Le choix de l'ondelette : une étape déterminante

Les analyses ont montré que les valeurs renvoyées par les ondelettes de type gaussienne sont plus importantes que celles renvoyées par les ondelettes de Morlet. En général, pour chaque famille d'ondelette, le coefficient n'influe pas significativement les résultats excepté au transect 3. Sur ce transect des ondelettes renvoient des longueurs d'onde pour deux formes de lit (ondelettes de Morlet avec des coefficient allant de 7 à 10). D'autres renvoient uniquement pour les formes de lits les plus importantes (DGO2). À l'inverse, les ondelettes DGO 6 et de Morlet avec le coefficient fixé à 6 renvoient seulement les petites formes de lit.

Concernant le projet R-TEMUS, l'étude est surtout centrée sur les dunes, il est donc déconseillé d'utiliser l'ondelette DGO2. Pour que les études soient le plus complètes possible et que les chercheurs puissent distinguer les dunes des barres, il est plus intéressant d'utiliser les ondelettes différenciant les deux formes de lit.

Les analyses comparatives ont confirmées l'exclusion du choix de l'ondelette DGO2 lors de l'exécution des analyses, puisque c'est celle qui donne les valeurs les plus éloignées des méthodes de caractérisations manuelles.

Les résultats donnés par BedformsATM surestiment les longueurs d'ondes des dunes comparés aux méthodes manuelles. Les ondelettes de type dérivées gaussiennes donnant des résultats plus importants que celles dites de Morlet, il est préférable de ne pas les sélectionner au moment de l'analyse au risque de perdre en précision.

Concernant les ondelettes de Morlet, l'ondelette de coefficient 10 renvoie une valeur aberrante sur le transect 5. En effet, la valeur retournée est plus importante de 10m par rapport aux autres ondelettes et est deux fois plus importante que les valeurs déterminées par méthode manuelle. Ne connaissant pas assez le fonctionnement des ondelettes pour expliquer ce phénomène, je conseille néanmoins d'écarter cette ondelette pour les analyses.

Sur les quatre ondelettes de Morlet restantes, il s'avère que l'ondelette avec le coefficient fixé à 6 donne le résultat le plus proche de la réalité sur le transect 5. Pour les transects 1 et 3 c'est l'ondelette avec $Ko = 8$. En comparant le classement des quatre ondelettes sur les trois transects, il est noté que l'ondelette avec le coefficient 6 est celle qui donne les moins bons résultats sur les deux autres transects. En faisant une moyenne sur les trois transects, elle est moins fiable que les ondelettes de coefficient 7 et 9. D'ailleurs c'est la seule ondelette parmi les quatre qui donne des résultats ayant un écart significatif sur le transect 3. Au contraire l'ondelette de coefficient 8 est la seule à donner des résultats similaires à ceux des deux méthodes manuelles sur le transect 3. Malgré sa troisième place sur le transect 5, elle reste l'ondelette donnant les résultats les plus proches des méthodes manuelles.

Au vu des différents résultats des analyses, l'ondelette de Morlet avec le coefficient Ko fixé à 8 apparaît comme la plus fiable.

4.4. Une caractérisation de la longueur d'onde moyenne avec une détection des creux et crêtes différente

L'analyse comparative a mis en évidence une surestimation des résultats par rapport aux mesures réalisées manuellement. Concernant la comparaison entre mesures de longueur d'onde de creux à creux et mesures automatisées, il y a des écarts supérieurs à 5% pour tous les transects. Concernant la comparaison avec la méthode de détection de longueur d'ondes de crête à crête, un seul profil présente des résultats avec un écart inférieurs à 5% par rapport à la méthode : le transect 3 qui est situé au milieu du lit. Les transects 1 et 5 sont respectivement situés à proximité directe de la rive gauche et de la rive droite du bras. Ces transects sont localisés sur les extrémités des champs de dunes.

En étudiant et comparant les trois transects, les creux du transect 3 sont plus marqués. Concernant les crêtes, elles sont peu marquées sur le transect 1. La détection des points hauts (crêtes) et bas (creux) est plus compliquée à déterminer, il est donc plus probable que les points sélectionnés par BedformsATM et l'utilisateur aient été différents. Cela expliquerait les écarts plus importants aux transects 1 et 5.

4.5. Un logiciel récent qui reste à améliorer

Lors des analyses, il s'est révélé que l'exécution de l'analyse 4, qui permet d'obtenir les informations d'hauteur des dunes, était impossible. De plus, lorsque les résultats de l'analyse 3 sont renvoyés, des axes graphiques ne possèdent pas d'unité (voir figures 11,12 et 13). Cela ne facilite pas leur compréhension. Le logiciel étant disponible depuis seulement 1 an (avril 2017), il est récent, propre à un domaine précis et donc utilisé par peu de personnes. Ayant un nombre de contributeurs limité, l'amélioration du fonctionnement du logiciel prend donc plus de temps. De plus, dans le manuel d'utilisateur, le créateur communique ses coordonnées pour qu'il soit informé lorsqu'une erreur est détectée (Gutierrez, 2017). Cela montre bien, qu'il est conscient que son outil est perfectible et qu'il cherche à l'améliorer.

Conclusion

L'objectif de cette application était de déterminer si le logiciel BedformsATM était robuste pour un fleuve comme la Loire. Le logiciel étant testé uniquement sur le fleuve Paraná en Amérique du Sud, le climat et les dynamiques du cours d'eau sont différentes. Il est donc logique de s'interroger quant à la reproductibilité de résultats fiables dans un contexte ligérien.

L'étude menée sur le logiciel a permis de mieux comprendre son fonctionnement. Elle a également mis en évidence quelques points faibles. C'est notamment le cas concernant l'exploitation des données. Le test a mis en évidence la technique de calcul pour la création du profil : une addition de la distance entre chaque point du profil. Dans le manuel d'utilisateur de BedformsATM, il est bien précisé le format d'entrée mais il n'est pas spécifié que les points du profil doivent être dans l'ordre croissant des coordonnées X. Il faut donc être vigilant au moment de l'entrée des données dans l'interface au risque de voir son profil être étiré.

Les hauteurs des dunes n'ont pu être déterminées suite à une probable erreur de codage dans l'analyse 4. Le logiciel est récent et l'erreur a été signalée, il est donc fortement probable qu'une nouvelle version de BedformsATM corrigée apparaisse prochainement.

Au delà du fonctionnement et des points faibles de l'interface, les tests ont permis de déterminer les paramètres à choisir pour avoir des résultats proches de ceux des méthodes manuelles. Concernant, les formats d'entrée il s'est avéré que seuls les formats 3D étaient utilisables. Les données étant issues de transects, la logique est d'utiliser le format «*Rectangular plot*». Cependant, utiliser le format 3D «*Curved plot*» ne semble pas avoir d'influence. Les résultats renvoyés par ces deux formats sont identiques. Concernant les ondelettes, celles dites de Morlet sont celles qui donnent des résultats plus complets en détectant aussi bien les formes de lit de type dunes et barres. C'est celle avec le coefficient fixé à 8 qui donne les résultats les plus proches de la réalité et donc qui paraît la plus fiable. Elle est à utiliser lors des analyses.

Pour les trois transects, les valeurs retournées par le logiciel sont surestimées. Il n'y a qu'au transect 3, que les résultats sont jugés similaires lorsqu'un intervalle de 95% est appliqué. Le logiciel ne doit pas considérer les mêmes points hauts (crêtes) et bas (creux) que l'utilisateur lorsqu'il mesure les dunes manuellement. Pour avoir des résultats représentatifs de la réalité il faut donc que les creux et crêtes du profil soient bien marqués.

L'étude n'a pu être réalisée que sur peu de transects, il faudrait la poursuivre en l'appliquant sur plusieurs dalles bathymétriques avec des transects plus nombreux sur une même zone (et donc moins espacés) afin de vérifier si les conclusions de ce rapport se confirment.

La comparaison avec les outils BTT et Paramdune n'a pu être réalisée. Si les employés du SHOM communiquent avec ceux de l'équipe R-TEMUS il serait intéressant de déterminer si BedformsATM est l'outil le plus précis des trois.

Bibliographie

- Bridge J.S, 2003. Rivers and Floodplains. Chapter 4 : Bedforms and sedimentary structures. Blackwell Science Ltd.
- 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.
- 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
- 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.
- 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
- 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.
- 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
- 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., 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.
- Rodrigues S., Mosselman E., Claude N., Winterberger C., Juge P., 2015. Alternate bars in a sandy gravel bed river : generation, migration and interactions with surimposed dunes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40 (5), pp 610-628
- Wever, T and Papili, S. 2016. New strategy for predictions bedform migration. MARID IV, 4-5 Avril 2016, Galles du Nord, Royaume-Uni.
- Yalin, S. 1964. Geometrical properties of sand waves. *Proc.Am.Soc.Civil Eng.* Volume 90. pp 105-119.

Webographie

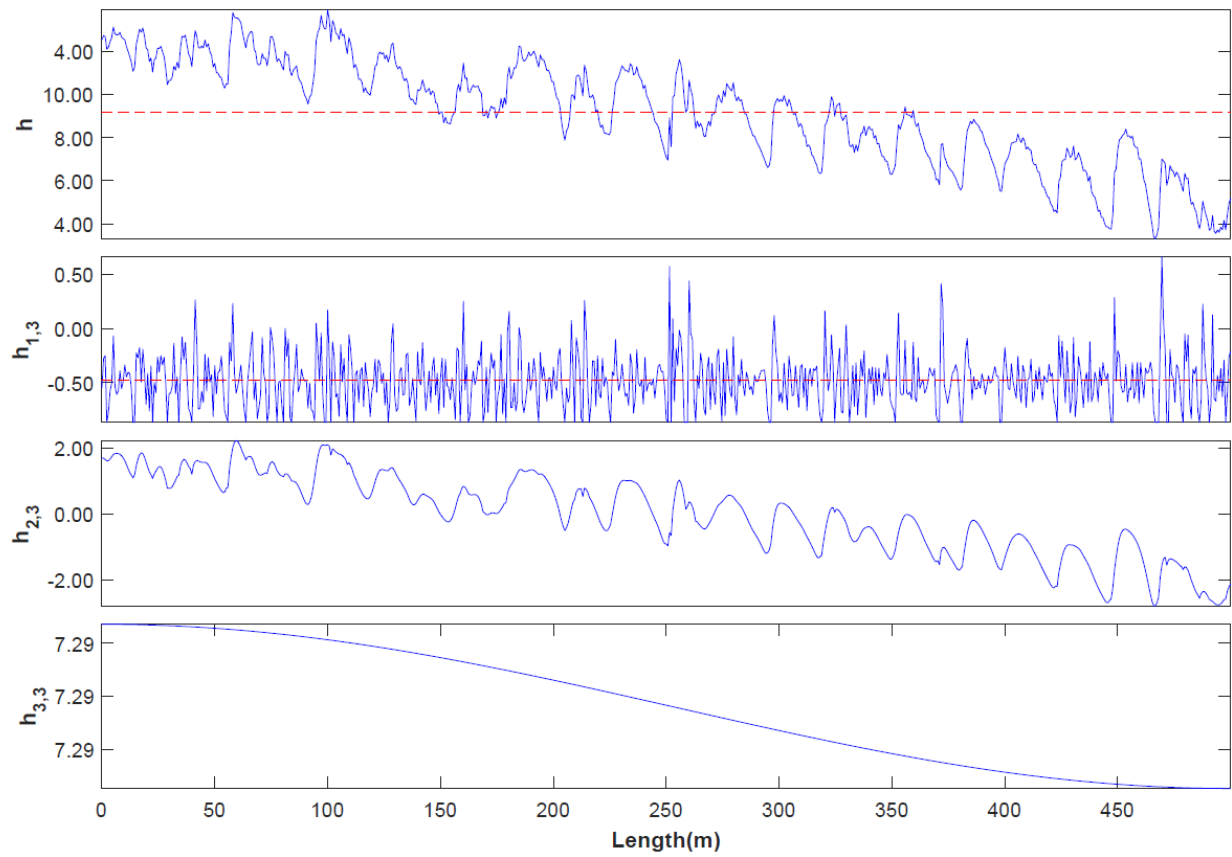
Gutierrez, R. 2016. Bedforms ATM V11- Instructional Video. [en ligne] Disponible sur : <http://videos.pucp.edu.pe/videos/ver/4244b766f4a6a027df577f75f40417a6> (consulté le 14/02/2017)

Source Forge. 2016. Bedforms ATM - Parana_NT2D. [en ligne] Disponible sur : https://sourceforge.net/projects/bedforms-atm/files/Support%20Material/Sample%20Input%20Files/Parana/Parana_NT2D.rar/download (consulté le 20/02/2018)

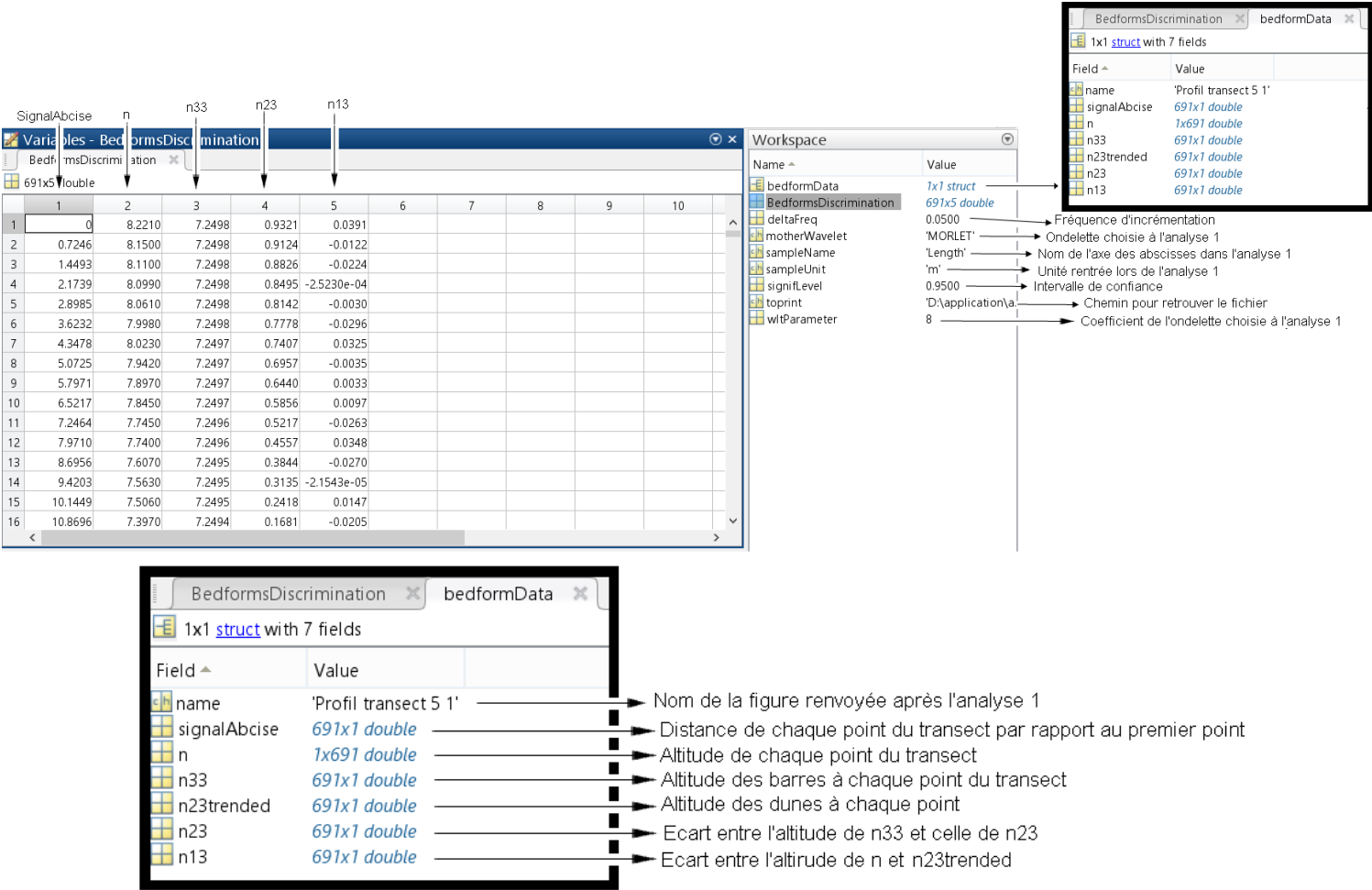
Source Forge. 2016. Bedforms ATM - Parana_NT2D. [en ligne] Disponible sur : <https://sourceforge.net/projects/bedforms-atm/files/Support%20Material/Sample%20Input%20Files/CurvedPlots/T2E.rar/download> (consulté le 20/02/2018)

Annexes

Annexe 1: Exemple de résultats renvoyés après lancement de l'analyse 3 : ici analyse faite sur le transect 1 avec l'ondelette de Morlet avec le coefficient $Ko=7$



Annexe 2 : Signification des divers paramètres du fichier BedformsDiscriminations.mat, créé en sortie de l'analyse 3



Annexe 3: Signification du fichier Discrimination ForAnalysis.mat, fichier utilisé pour l'analyse 4

	BFPScale1	5	Coefficient de séparation entre la hiérarchie 1 (rides) et hiérarchie 2 (dune)
	BFPScale2	109.5683	Coefficient de séparation entre la hiérarchie 2 et 3 (barres)
	deltaFreq	0.0500	Fréquence d'incrémentation
Distance de chaque point du transect par rapport au premier point	FileBed_dataMX	691x1 double	
Coordonnée selon l'axe Y de chaque point	FileBed_dataMY	691x1 double	
Altitude de chaque point du transect	FileBed_dataMZ	691x1 double	
	FileBed_dataMZ13	691x1 double	
	FileBed_dataMZ23	691x1 double	
	FileBed_dataMZ33	691x1 double	
	forAnalysis	1x1 cell	Chemin pour retrouver le fichier des données en sortie de l'analyse 3
	motherWavelet	'MORLET'	Ondelette choisie à l'analyse 1
	signifLevel	0.9500	Intervalle de confiance
	wltParameter	8	Coefficient de l'ondelette choisie à l'analyse 1

Annexe 4: Résultats bruts obtenus lors de la caractérisation manuelle des dunes

Résultats obtenus pour le transect 1 :

Dune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Moyenne
L creux (en m)	11.5	9.5	6	11	16	32	27	20	15	15.5	35	19	25.5	18	28	15	16.5	21	10	17.5	34.5	14	20	20	6	18.54
L crête (en m)	10	8.5	10.5	9	14	41	29	13	18	29	23	21	24	21	25	14	19	14.5	14	19.5	23	25	21.5	14.5		19.21
H (en m)	0.5	0.5	0.45	0.4	0.65	1.1	1	0.7	0.5	0.65	1.1	0.9	1.1	0.9	0.9	0.75	0.65	0.5	0.9	0.55	0.8	0.95	0.85	1.3	0.85	0.78

Résultats obtenus pour le transect 3 :

Dune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Moyenne
L creux (en m)	18	26	19	16	31	29	20.5	10.5	27	17	31	22	19	17	19	31	20	18	20	16	10	23		20.91
L crête (en m)	22	23	21	22	25	19.5	40.5	16	20	13	23	24	28	21	20	14	29	21	18	21	19	14	15	21.26
H (en m)	0.8	0.95	0.75	0.5	0.85	0.95	0.8	0.5	0.45	0.9	0.8	0.8	0.9	0.75	0.75	0.75	0.85	0.8	0.85	0.85	0.55	0.3		0.75

Résultats obtenus pour le transect 5

Dune	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Moyenne
L creux (en m)	35.0	19.0	14.0	14.0	30.0	30.0	25.0	24.0	28.0	19.0	28.0	22.0	46.0	23.0	19.5	27.5	18.0	14.0	14.0	13.0	23.2	23.2
L crête (en m)	32.5	21.0	16.0	18.0	17.0	33.0	26.0	23.0	29.0	26.0	20.0	25.0	34.0	34.0	24.0	21.0	25.0	22.5	9.5			24.0
H (en m)	1.05	0.90	0.40	0.80	0.50	0.95	1.35	1.30	1.05	0.50	0.80	0.70	0.85	1.05	0.70	0.95	0.75	0.40	0.45			0.8

Annexe 5 : Tableaux représentant les résultats de l'analyse comparative effectuée sur les transects

TRANSECT 1						
Méthode choisie	λmoy des dunes du transect (en m)	Ecart avec la méthode manuelle de creux à creux en %	Ecart avec la méthode manuelle de creux à creux en m	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en %	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en m	
Ondelettes	DGO2	25.6	38.08%	7.06	33.26%	6.39
	DGO6	24	29.45%	5.46	24.93%	4.79
	Morlet Ko =6	24	29.45%	5.46	24.93%	4.79
	Morlet Ko =7	23.7	27.83%	5.16	23.37%	4.49
	Morlet Ko =8	23	24.06%	4.46	19.73%	3.79
	Morlet Ko =9	23.6	27.29%	5.06	22.85%	4.39
	Morlet Ko =10	23.6	27.29%	5.06	22.85%	4.39
Méthode manuelle	λ entre deux crêtes	19.21				
	λ entre deux creux	18.54				
Moyenne des écarts			29.06%	5.39	24.56%	4.72

Légende :

x% écart significatif (supérieur à 5%)

ondelette donnant le résultat le plus proche de la méthode de référence

ondelette donnant le résultat le plus éloigné de la méthode de référence

TRANSECT 3						
Méthode choisie	λmoy des dunes du transect (en m)	Ecart avec la méthode manuelle de creux à creux en %	Ecart avec la méthode manuelle de creux à creux en m	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en %	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en m	
Ondelettes	DGO2	69.8	233.81%	48.89	228.32%	48.54
	DGO6	22.4	7.13%	1.49	5.36%	1.14
	Morlet Ko =6	22.3	6.65%	1.39	4.89%	1.04
	Morlet Ko =7	22.1	5.69%	1.19	3.95%	0.84
	Morlet Ko =8	21.5	2.82%	0.59	1.13%	0.24
	Morlet Ko =9	22	5.21%	1.09	3.48%	0.74
	Morlet Ko =10	22	5.21%	1.09	3.48%	0.74
Méthode manuelle	λ entre deux crêtes	21.26				
	λ entre deux creux	20.91				
Moyenne des écarts hors valeurs aberrantes (en gras)			5.45%	1.14	3.72%	0.79

Méthode choisie	λmoy des dunes du transect (en m)	Ecart avec la méthode manuelle de creux à creux en %	méthode manuelle de creux à creux en m	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en %	Ecart avec la méthode manuelle de crête à crête en m	
Ondelettes	DGO2	31.5	35.78%	8.30	31.25%	7.50
	DGO6	30.6	31.90%	7.40	27.50%	6.60
	Morlet Ko =6	28.5	22.84%	5.30	18.75%	4.50
	Morlet Ko =7	31.2	34.48%	8.00	30.00%	7.20
	Morlet Ko =8	32.6	40.52%	9.40	35.83%	8.60
	Morlet Ko =9	32.2	38.79%	9.00	34.17%	8.20
	Morlet Ko =10	45.5	96.12%	22.30	89.58%	21.50
Méthode manuelle	λ entre deux crêtes	24				
	λ entre deux creux	23.2				
Moyenne des écarts hors valeurs aberrantes (en gras)			34.05%	7.90	29.58%	7.10

Liste des tableaux, figures et annexes

Tableau 1: Longueur d'onde moyenne renvoyée par BedformsATM pour chacun des transects suivant l'ondelette choisie pour l'analyse.....	16
Tableau 2 : Ecart entre les résultats d'analyses issus de deux ondelettes d'une même famille sur les longueurs d'ondes reflétant la présence de dunes.....	17
Tableau 3: Comparaison des résultats renvoyés entre deux ondelettes de type différent.....	17
Tableau 4: Tableau représentant les λ moyennes des dunes, ainsi que leurs hauteurs moyennes, déterminées par méthode manuelle	21

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)	6
Figure 3 : 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)	7
Figure 4 : Cartographie résultant de l'analyse 3D (Gutierrez, 2017; données en entrée : Parsons et al, 2005).....	7
Figure 5 : Carte de localisation des transects servant de données d'entrée au logiciel	9
Figure 6: Message d'erreur concernant la fréquence du profil.....	13
Figure 7: Message demandant une information complémentaire à l'utilisateur pour le format «X,Y,N coordonnées 2D»	14
Figure 8: <i>Preview</i> des analyses 1 avec le format d'entrée « <i>Rectangular Plot</i> » (a) et « <i>Curved Plot</i> » (b) ainsi que la vue en plan du transect pour les deux formats (c)	14
Figure 9: Résultats de l'analyse avec le format «X,Y,N coordonnées 2D»	15
Figure 10: Résultats de l'analyse 1 avec le transect 3 pour le format « <i>Rectangular Plot</i> » (A) et « <i>Curved Plot</i> » (B).....	15
Figure 11: Profil des dunes présentes sur le transect 1 selon l'ondelette utilisée pour l'analyse	18
Figure 12: Profil des dunes présentes sur le transect 3 suivant l'ondelette utilisée lors de l'analyse... ..	19
Figure 13: Profil des dunes présentes sur le transect 5 suivant l'ondelette choisie	20
Figure 14 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 1 .	22
Figure 15 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 3 .	22
Figure 16: Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 3 avec la valeur aberrante donnée par la DGO2 retirée	23
Figure 17 : Graphique représentant les résultats de l'analyse comparative menée sur le transect 5 .	24

Table des annexes :

Annexe 1: Exemple de résultats renvoyés après lancement de l'analyse 3 : ici analyse faite sur le transect 1 avec l'ondelette de Morlet avec le coefficient $Ko = 7$	31
Annexe 2 : Signification des divers paramètres du fichier BedformsDiscriminations.mat, créé en sortie de l'analyse 3	32
Annexe 3: Signification du fichier Discrimination_ForAnalysis.mat, fichier utilisé pour l'analyse 4	33
Annexe 4: Résultats bruts obtenus lors de la caractérisation manuelle des dunes.....	34
Annexe 5 : Tableaux représentant les résultats de l'analyse comparative effectuée sur les transects	35

Equipe DATE

*Dynamiques et Actions Territoriales et
Environnementales*

35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeurs de recherche :

RODRIGUES Stéphane et

LE GUERN Jules

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 en calculant la hauteur et la longueur d'onde des dunes qui sont les paramètres les plus caractéristiques morphologiquement parlant. 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 synthèse bibliographique a été réalisée au premier semestre et a mis en évidence l'existence de deux outils intéressants. Malheureusement, l'un d'entre eux s'est révélé inexploitable. Ce rapport se centre donc sur l'étude de la robustesse et fiabilité du deuxième outil : BedformsATM. Les résultats des analyses qu'il retournera seront comparés à la méthode manuelle, méthode la plus robuste à ce jour. Avant de conclure sur l'efficacité de ce logiciel, ce rapport présente dans un premier temps les conclusions de la synthèse bibliographique suivi du protocole opératoire mené pour tester le logiciel et des résultats de l'étude.

Mots Clés :

Géomorphologie, dunes subaquatiques, ondelettes, BedformsATM