



## Estimation de l'influence des conditions hydrodynamiques sur les flux sédimentaires associés à la migration des dunes au large de Dunkerque

Nicolas MICHELET<sup>1</sup>, Mathilde BARY<sup>1</sup>, Olivier BLANPAIN<sup>1</sup>, Sophie LE BOT<sup>2</sup>,  
Maëlle NEXER<sup>1</sup>

1. France Energies Marines, 525 Av. Alexis de Rochon, 29280 Plouzané, France.  
[nicolas.michelet@france-energies-marines.org](mailto:nicolas.michelet@france-energies-marines.org)
2. Normandie Univ., UNIROUEN, UNICAEN, CNRS, M2C, 76000 Rouen, France.  
[sophie.lebot@univ-rouen.fr](mailto:sophie.lebot@univ-rouen.fr)

### Résumé :

La présence de nombreuses dunes en Manche et Mer du Nord a une influence directe sur le design, l'implantation et la maintenance des structures offshores. A l'occasion du projet de parc éolien au large de Dunkerque, il est paru intéressant de mieux connaître la dynamique de ces corps sédimentaires. Dans ce but, huit levés bathymétriques ont été effectués entre novembre 2019 et juillet 2021 sur trois zones distinctes, une à l'intérieur de la zone du futur parc éolien et deux le long du corridor de raccordement électrique. En utilisant la méthode de « Dune Tracking », l'observation des déplacements des dunes a montré une tendance générale de migration résiduelle vers l'Est pouvant atteindre plusieurs mètres. Cependant, deux levés bathymétriques espacés de 29 jours ont enregistré que la migration de ces dunes s'était effectuée vers l'Ouest, contrairement à la tendance générale. Afin d'expliquer ces mouvements, observés à l'échelle de quelques semaines ou mois, la présente étude propose de calculer des flux sédimentaires instantanés via des formules empiriques qui s'appuient sur des forçages hydrodynamiques en un point (0D). Les flux résiduels estimés par les deux méthodes sont tout d'abord comparés sur la période 03-04/2020 avec des forçages réalistes. La variabilité des flux en direction et en intensité a ensuite été étudiée en appliquant des forçages hydrodynamiques idéalisés. Ainsi, la contribution de l'intensité du courant de marée, de la hauteur d'eau, des paramètres de houle et de leurs interactions a pu rapidement être quantifiée. Ces calculs ont permis d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes déterminants la morphodynamique dans cette zone et d'avancer une première explication aux épisodes de migration qui ont été observés à l'inverse du mouvement résiduel habituel vers l'Est.

### Mots-clés :

Morphodynamique, Sédiments, Environnement côtiers, Dune Tracking.

## *Thème 2 – Dynamique sédimentaire*

### **1. Introduction**

Près des côtes françaises en Manche et Mer du Nord, les dunes sous-marines sont des structures sédimentaires fréquemment observées (LE BOT & TRENTESAUX, 2004). Ces formes de fond principalement sableuses sont très dynamiques lorsqu'elles sont soumises à de fortes conditions hydrodynamiques (courants et houle). En ingénierie, de nombreux problèmes comme l'affouillement proviennent de la variation du fond ; la migration de ces dunes est donc un élément qui nécessite d'être pris en compte. En effet, ces dernières peuvent poser des problèmes significatifs sur les domaines de l'industrie offshore (WHITEHOUSE *et al.*, 2000) et particulièrement celles des énergies marines renouvelables (BARRIE & CONWAY, 2014). Les interactions entre les dunes et les composants du futur parc éolien en mer de Dunkerque (câbles, fondations) vont influencer les choix de design, d'implantation et la maintenance des machines. Pour lever ces verrous, il est donc nécessaire de mieux comprendre la dynamique de ces dunes qui est influencée principalement par les courants de marée, ceux induit par le vent, et la houle. Sur cette zone du plateau épicontinental, la migration des dunes et le transport sédimentaire sont généralement contraints par les courants de marée. Cependant, les courants induits par le vent et la houle peuvent aussi jouer un rôle important. Les premiers peuvent induire une inversion de la polarité des dunes (HARRIS, 1989, 1991). LE BOT *et al.* (2000) et LE BOT & TRENTESAUX (2004) ont également montré que ces courants induits par le vent peuvent modifier les taux et directions de migration selon le régime considéré. En ce qui concerne la houle, TONNON *et al.* (2007) ont montré que son influence en zone côtière peut également engendrer une augmentation des taux de transport par charriage et en suspension.

L'objectif principal de cette étude est d'établir l'influence des différents forçages hydrodynamiques sur les flux sédimentaires associés à la migration des dunes au large de Dunkerque. Pour cela, les flux sont estimés via trois formulations appliquées dans des conditions réalistes et comparés à ceux issus de la méthode de « Dune Tracking » (BARY, 2021 ; BARY *et al.*, 2021). Des estimations de flux sont ensuite calculées sur un cas idéalisé afin de compléter l'étude de l'influence des différents forçages physiques.

### **2. Données et méthodes**

#### **2.1 Site d'étude et conditions hydrodynamiques**

Les dunes sous-marines, superficielles, situées sur le site d'étude (figure 1) sont composées de sable moyen et grossier. Elles sont présentes sur les flancs de grands bancs d'orientation NE-SW. Ces dunes possèdent une très forte variabilité morphologique et présentent des vitesses de déplacement pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres par an (BARY, 2021 ; BARY *et al.*, 2021). Une dynamique qui, d'après TESSIER *et al.* (1999), est majoritairement actionnée par les courants de marée et l'influence des vagues.

La zone d'étude est un environnement macrotidal où la marée a la particularité d'être une onde progressive : le flot commence à mi-montant, atteint son maximum au moment de la pleine-mer et s'achève au moment du mi-perdant. Le jusant est le courant qui porte en sens inverse, il atteint son maximum au moment de la basse mer. Les ellipses de courants associées à cette onde de marée montrent des courants symétriques en direction (VICAIRE, 1991) avec les directions principales en période de flot et de jusant respectivement comprises entre N60-90° et N250-270° (TESSIER *et al.*, 1999). Les courants sont cependant asymétriques en intensité avec des valeurs au pic de flot pouvant atteindre un maximum de 1,25 m/s contre 0,75 m/s au pic de jusant (LATAPY, 2020). Cette asymétrie en intensité engendre une différence de durée des périodes de flot et de jusant qui sont, d'après des données extraites d'une simulation MARS3D (CAILLAUD *et al.*, 2016), respectivement de 5h25 et 7h environ.

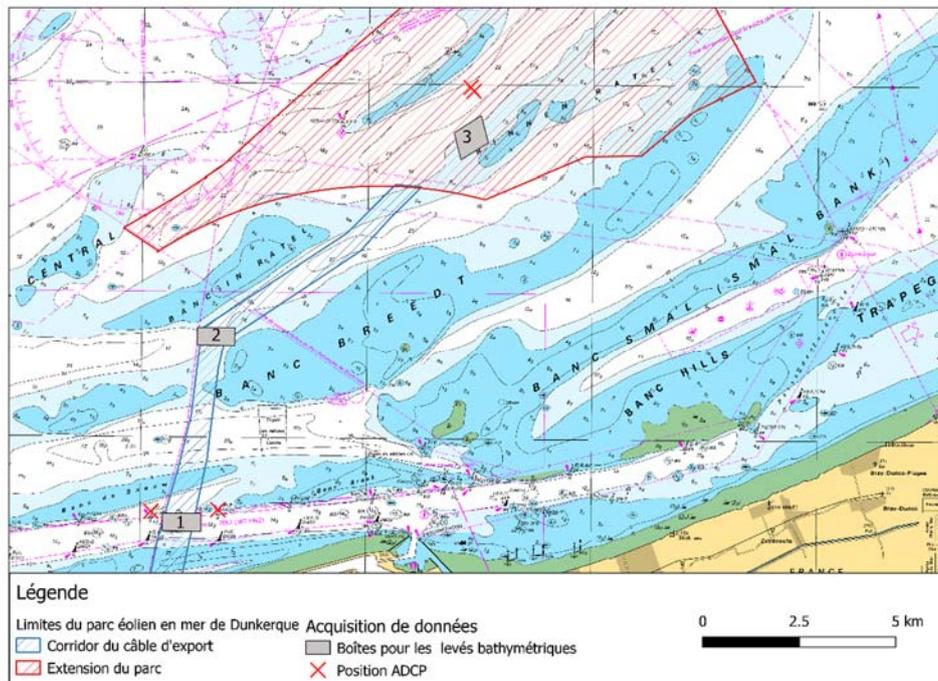


Figure 1. Localisation de la zone du parc éolien en mer de Dunkerque et des trois zones où 8 levés bathymétriques ont été effectués entre novembre 2019 et juillet 2021, (Crédit France Energies Marines).

Les données recueillies de l'houlographe situé à Westhinder, en Belgique, à 65 km à l'Est de Dunkerque sur la même portion de côte montrent qu'une partie majoritaire de la houle provient de la Manche au Sud-Ouest et l'autre partie de l'intérieur de la Mer du Nord au Nord-Ouest et Nord-Est. BONNEFILLE *et al.* (1971) ont déployé un houlographe à 2,5 km au large du banc de Snouw (au Nord-Ouest de la zone 1, figure 1) et ont montré par une analyse statistique que la période de la houle (notée  $T_p$ ) est comprise entre 5 et 12 s

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

avec une hauteur significative (notée  $H_s$ ) inférieure à 1,2 m plus de 50% du temps. Pendant les périodes de tempêtes la houle engendrée atteint généralement des hauteurs de 3 m avec des périodes plus longues comprises entre 7 et 10 s (LATAPY, 2020).

### 2.2 Mesures *in-situ*

Dans le cadre de l'installation du parc éolien en mer de Dunkerque, 8 levés bathymétriques ont été effectués entre novembre 2019 et juillet 2021 sur trois zones distinctes (figure 1) accompagnés de prélèvement de sédiments. Deux des zones sont situées le long du corridor du câble d'export et la dernière dans la zone du parc. Dans la présente étude, seuls les levés sur la zone 1 (figure 1), appelée B1, sont considérés. Les prélèvements réalisés dans cette zone montrent que la composition des dunes est très homogène. Une seule classe de sédiments est donc considérée pour la suite avec un  $d_{50}=327,78 \mu\text{m}$  et un  $d_{90}=557,62 \mu\text{m}$ .

Les levés bathymétriques montrent la présence de six dunes comprenant, d'Ouest en Est, 2 barkhanes, une dune sinueuse et trois dunes rectilignes (figure 2). La comparaison des différents levés a permis d'établir que la tendance générale de migration de ces dunes est dirigée vers l'Est et est conforme au schéma des courants tidaux. Les dunes semblent donc suivre le même comportement migratoire que celle observées dans le détroit du Pas de Calais par LE BOT *et al.* (2000). Cependant, la différence entre les levés 2 et 3, respectivement effectués le 18/03/2020 et le 16/04/2020, montre une inversion de la migration de certaines dunes de la zone B1. D'Ouest en Est, les dunes 1, 4, 5 et 6 ont une migration vers l'Ouest de plusieurs mètres alors que les dunes 2 et 3 suivent la tendance générale avec un déplacement vers l'Est, bien que plus faible.

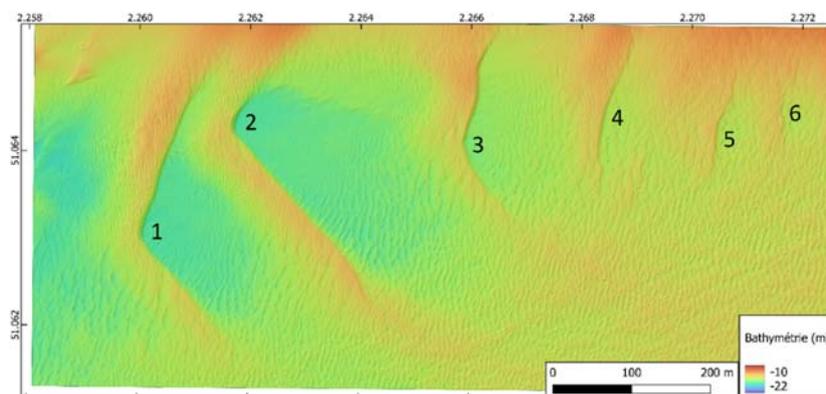


Figure 2. Premier levé bathymétrique de la zone B1 effectuée le 17/11/2019, (Crédit France Energies Marines).

### 2.3 Calcul de flux

Afin de proposer une première explication sur l'inversion de la direction de migration des dunes 1, 4, 5 et 6, l'influence des forçages hydrodynamiques est étudiée via l'estimation

des flux sédimentaires associés. Cette étude se base sur le code développé par BLANPAIN (2009) en utilisant les formulations de YALIN (1963), VAN RIJN (1984) et WU *et al.* (2000). Les formulations de Wu *et al.* et Van Rijn employées, sont utilisées sous leur forme classique et ne sont pas décrites ici. Concernant la formulation de Wu *et al.*, comme l'étude de BLANPAIN (2009), la contrainte critique de mise en mouvement est estimée avec un paramètre de mobilité critique constant de  $\theta_{cr} = 0,03$ . Dans sa version de base, la formulation de Yalin est décrite en fonction de  $u_c$  la vitesse du courant et ne prend donc pas en compte le déplacement engendré par la houle. Cependant, comme le décrivent VAN DER A *et al.* (2013), en général la vitesse parallèle au fond est décrite comme la somme de la vitesse du courant et de la vitesse orbitale de la houle au fond. Afin de prendre en compte l'influence de la houle sur les flux calculés, la formulation de Yalin est donc modifiée comme suit:

$$Q_Y = \frac{0.5 \cdot U \cdot (u_*^2 - u_{cri}^2)}{(s-1)g} \quad (1)$$

où  $U = u_c + u_b$  décrit la somme de la vitesse du courant et la vitesse orbitale de la houle au fond,  $u_*$  la vitesse de frottement,  $u_{cri}$  la vitesse critique de mise en mouvement,  $s$  le rapport des masses volumiques eau/sédiment et  $g$  la constante de gravitation.

Les calculs sont effectués en un point situé dans la zone B1 où le niveau moyen est de 15,6 m cohérent avec la profondeur moyenne des dunes variant entre 14 et 17 m (niveau moyen entre les crêtes et les creux des dunes). Les caractéristiques du courant et de l'évolution de la surface libre sont extraites d'une simulation MARS3D couvrant la zone Manche-Golfe de Gascogne (CAILLAUD *et al.*, 2016). Les intensités et directions du courant considérées dans cette étude, sont extraites à 0,2 m au-dessus du fond. De la même manière, les caractéristiques de la houle sont extraites d'une simulation de WaveWatch3 couvrant la zone Manche – Golfe de Gascogne (BOUDIERE *et al.*, 2013). Les calculs sont ensuite effectués avec un pas de temps d'une heure pour le cas en conditions réelles (décrit section 3.2) et un pas de temps de 5 minutes pour le cas idéalisé (décrit section 3.3). Les flux instantanés sont ensuite projetés sur l'axe Est-Ouest puis sommés et convertis en t/m/an ou en t/m/evt, où evt décrit l'évènement sur lequel le calcul est effectué, ici un cycle de marée. La direction du transport du sédiment est considérée égale à celle du courant et représentée par le signe associé à la valeur. Ce signe est négatif pour un transport vers l'Ouest et positif vers l'Est. Le résultat final permet donc d'estimer le flux sédimentaire résiduel sur la période temporelle considérée.

### **3. Résultats et discussion**

#### **3.1 Calcul de flux par « Dune Tracking »**

Les flux sédimentaires ont été approchés à partir de la migration et la morphologie des dunes en considérant la méthode de « Dune Tracking » (BARY, 2021 ; BARY *et al.*,

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

2021). Ces flux sont ensuite exprimés en masse sédimentaire sèche en multipliant par la masse volumique de la silice ( $2650 \text{ kg/m}^3/\text{s}$ ). La vitesse de migration et la hauteur des dunes sont mesurées tous les 20 m le long de sa longueur en suivant des transects horizontaux. Les flux sédimentaires sont ensuite estimés pour chaque transect et moyennés sur chaque dune.

Tableau 1. Moyenne des flux sédimentaires (en t/m/an) sur la période L2-L3 utilisant la méthode du « Dune Tracking » (BARY, 2021 ; BARY *et al.*, 2021).

	<b>Dune 1</b>	<b>Dune 2</b>	<b>Dune 3</b>	<b>Dune 4</b>	<b>Dune 5</b>	<b>Dune 6</b>
Flux sédimentaires	-15,91	41,49	22,38	-29,77	-16,50	-2,73
	+ : migration vers l'Est - : migration vers l'Ouest					

Entre les levés 2 et 3 (entre le 18/03/2020 et le 16/04/2020), la migration est dirigée vers l'Ouest pour les dunes 1, 4, 5 et 6. Les flux moyens estimés varient entre  $-2,73 \text{ t/m/an}$  pour la dune 6 et  $-29,77 \text{ t/m/an}$  pour la dune 4 (tableau 1). Pour les autres dunes (dunes 2 et 3), la migration s'effectue vers l'Est mais est ralentie par rapport à la moyenne sur la période L1-L8. Malgré le fait que seulement 29 jours séparent les levés L2 et L3, ces valeurs sont du même ordre de grandeur que la différence entre d'autres levés plus espacés dans le temps. Par exemple, entre les levés L3 et L4, le flux sédimentaire estimé pour la dune 4 est égal à  $30,60 \text{ t/m/an}$  avec une migration dirigée vers l'Est. Cette valeur est très similaire à celle estimée entre les levés L2 et L3 alors que quasiment 4 mois séparent les levés L3 et L4. Ce résultat est cohérent avec les mesures effectuées par LE BOT et TRENTESAUX (2004) dans le détroit du Pas-de-Calais, qui ont montré que les tempêtes engendrent une accélération de la migration des dunes. Cette augmentation de la vitesse de migration se traduit ici par une valeur équivalente entre les deux périodes bien que les mesures soient espacées d'un intervalle 4 fois plus grand pour la période L3-L4.

### 3.2 Conditions réelles

Afin de vérifier la cohérence des deux méthodes, les flux  $Q_{VR}$ ,  $Q_{Wu}$  et  $Q_Y$  estimés via les formulations respectives de VAN RIJN (1984), WU *et al.* (2000) et YALIN (1963) sont confrontés aux résultats du « Dune Tracking ». La figure 3 présente les caractéristiques du courant et de la houle extraites des modèles précédemment décrits sur la période L2-L3 (18/03/2020 – 16/04/2020). Comme décrit par VICAIRE (1991) et TESSIER *et al.* (1999), les directions du courant sont symétriques avec une direction principale au pic de flot et de jusant respectivement de  $N90^\circ$  et  $N270^\circ$ . Les intensités de courant extraites montrent une dominance continue de la période de flot. Le rapport entre les vitesses aux pics de jusant et de flot varie entre 0,5, pour les plus forts coefficients (fin de la période L2-L3), et 0,8 pour des marées faibles (début de la période L2-L3). Pour de fortes

marées, la vitesse au pic de flot peut donc atteindre le double de celle au pic de jusant. Les données extraites de la variation de la surface libre montrent également que les pics de flot et de jusant sont respectivement synchronisés avec la pleine et la basse mer. Durant cette période, des événements de vents forts ont pu être observés en provenance de l'Est-Nord-Est et du Nord-Nord-Est. La houle extraite (figure 3) est cohérente avec ces événements et provient majoritairement du Nord et du Nord-Nord-Est. Les caractéristiques montrent que pendant la majeure partie de la période, les hauteurs significatives sont inférieures à 1 m en adéquation avec les mesures et l'analyse statistique de BONNEFILLE *et al.* (1971).

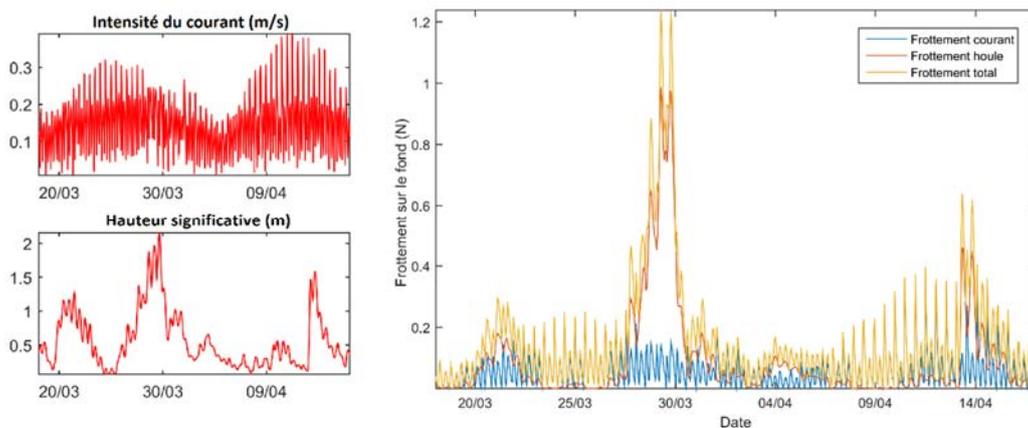


Figure 3. Conditions hydrodynamiques réalistes extraites des simulations MARS3D et WW3 sur la période L2-L3. Frottement induit pour les forçages de courant, houle et la composition des deux sur la même période.

La figure 3 montre également l'évolution temporelle des frottements induits par le courant, la houle et la composition des deux calculés suivants les formulations décrites par SOULSBY (1997). Ici on peut voir très clairement une dominance de l'influence de la houle sur le transport sédimentaire. En effet, la valeur estimée pour le frottement induit par le courant varie aux alentours de 0,1 N et atteint un maximum proche de 0,4 N pour de très fortes marées (coefficient 116 le 10/04/2020), alors que le frottement induit par la houle atteint un maximum de 1,25 N avec des hauteurs significatives aux alentours de 2 m. Ce premier résultat montre que la houle peut engendrer le mouvement d'une plus grande quantité de sédiments que les courants tidiaux.

La figure 4 présente l'évolution des flux instantanés calculés avec chaque formulation. L'évolution des flux sédimentaires, suit logiquement celle du frottement total induit par la composition de la houle et du courant. Ils sont principalement régis par les fortes houles et donc les périodes de vents forts. En effet, les flux estimés par la formule de VAN RIJN (1984) pendant la période de fortes vagues du 27/03 au 30/03, atteignent un maximum de  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ , ce qui est supérieur au reste des flux instantanés estimés par cette

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

formulation sur la période L2-L3. L'impact du courant est quant à lui limité sauf pour les très fortes marées.

Toujours durant la période du 27/03 au 30/03, on observe une variation rapide des flux calculés. En seulement 12h, le flux estimé par la formulation de YALIN (1963), passe d'une valeur de  $2,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$  à  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$  pour ensuite revenir à la première valeur. Les autres formulations donnent le même type d'évolution des flux avec des valeurs plus faibles. Cette variation n'est cependant pas en adéquation avec les maximums de hauteur significative et malgré le fait que le Hs soit important en période de flot ou de jusant, les trois formulations estiment une migration plus conséquente pendant les périodes de jusant. Le frottement dû à la houle dépendant également de la profondeur d'eau, la synchronisation de la basse mer avec les pics de jusant est donc le seul autre moteur pouvant expliquer cette différence.

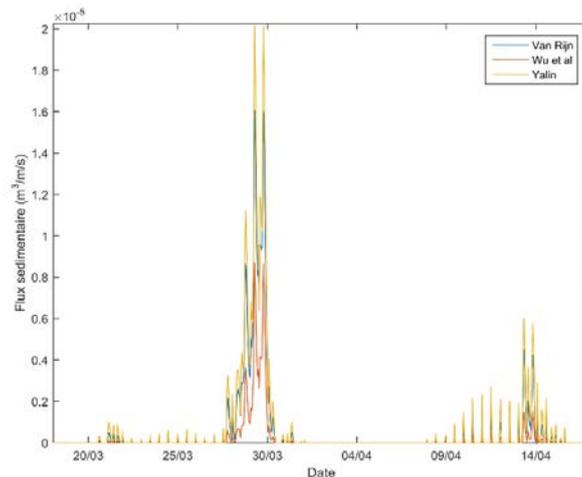


Figure 4. Valeurs des flux sédimentaires instantanés calculés suivant les formulations de VAN RIJN (1984), WU et al. (2000) et YALIN (1963).

Le tableau 2 synthétise les résultats du calcul de flux pour chaque formulation. La formulation de Van Rijn se démarque des deux autres avec une valeur de  $Q_{VR} = -21,85 \text{ t/m/an}$  équivalente aux flux estimés pour les dunes 1, 4 et 5. La formulation de Yalin donne une valeur plus importante de  $Q_Y = -25,98 \text{ t/m/an}$ . Cette valeur montre que la modification apportée à la formulation semble appropriée à ce cas et le résultat est très cohérent avec les résultats de la méthode de « Dune Tracking » mais également avec la formulation de Van Rijn. Dans le cas de la formulation de WU et al. (2000), celle-ci donne une valeur de  $Q_{WU} = -9,86 \text{ t/m/an}$  faible par rapport aux autres mais qui reste du même ordre de grandeur. Cette valeur plus faible peut s'expliquer par le fait que la formule a été modélisée et testée par rapport à des mesures réalisées en rivières. Bien que le courant soit symétrique en direction, le changement de sens du courant et l'influence de la houle limitent l'estimation des flux. Globalement, les trois formulations

reproduisent bien un flux plus important vers l'Ouest qui est du même ordre de grandeur que ceux estimés par la méthode de « Dune Tracking ».

*Tableau 2. Synthèse des résultats de calcul de flux suivant les trois formulations de VAN RIJN (1984), WU et al. (2000) et YALIN (1963) pour la période L2-L3.*

		<i>Van Rijn (1984)</i>	<i>Wu et al. (2000)</i>	<i>Yalin (1963)</i>
<i>Flux sédimentaire</i>	<i>Moyenne sur</i>	-21,85	-9,86	-25,98
<i>(en t/m/an)</i>	<i>la période L2-L3</i>			

*+ : migration vers l'Est ; - : migration vers l'Ouest*

### 3.3 Cas idéalisé

L'influence de la houle est l'élément majeur régissant le transport par charriage dans la zone. Cependant, comme décrit précédemment, son influence seule ne permet pas d'expliquer le changement de direction de la migration des dunes. La synchronisation de la basse mer avec le pic de jusant et de la pleine mer avec le pic de flot semble être la meilleure explication de ce changement. Afin de montrer l'influence du niveau de la surface libre, les calculs de flux sont réalisés pour un cas idéalisé. Pour s'affranchir de l'influence de la hauteur significative et de la période sur la variation des flux, toutes deux sont considérées constantes. Ces deux paramètres sont fixés en accord avec la période du 27/03 au 30/03, soit  $H_s = 2$  m et  $T_p = 6$  s. La direction de provenance de la houle est également considérée constante égale à  $N5^\circ$  comme au pic maximal de hauteur significative extrait sur la période L2-L3. Les courants sont reconstitués via un signal sinusoïdal simple pour une marée de vive-eau moyenne en prenant en compte l'asymétrie en intensité. La magnitude du courant aux pics de flot et de jusant est donc respectivement de 0,31 m/s et 0,21 m/s à 0,2 m au-dessus du fond. La direction, extraite de la même manière, est fixée à une valeur constante durant chaque phase avec  $N85^\circ$  pour le flot et  $N270^\circ$  pour le jusant. Ici le but étant d'étudier l'influence des différents forçages hydrodynamiques, les calculs de flux sont effectués en suivant seulement la formulation de Van Rijn jugée comme la plus adaptée ici.

La figure 5 représente la variation temporelle des contraintes de cisaillement, de la surface libre et des flux instantanés dépendant de ces conditions idéalisées. Dans ce cas, le flux estimé est de -0,62 t/m/evt pour l'ensemble de cette période. Une différence très marquée est calculée entre les pics de flot ( $Q_{VR}=0,8$  m<sup>3</sup>/m/s) et de jusant ( $Q_{Wu}=2,1$  m<sup>3</sup>/m/s). Ce résultat indique qu'en effet, la variation de la surface libre explique le changement de direction de la migration de certaines dunes dans la zone B1. La différence de hauteur d'eau entre la pleine mer et la basse mer est de 4,4 m avec une profondeur à 17,8 m et 13,4 m respectivement. La profondeur plus faible en période de jusant a pour effet d'augmenter la contrainte de cisaillement engendrée par la houle (figure 5). Pour un même forçage dû aux vagues, la quantité de sédiments mobilisée est donc accrue lors des

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

phases de jusant par rapport aux périodes de flot. Le transport sédimentaire se faisant selon le sens du courant, les flux dirigés vers l'Ouest seront plus importants que ceux dirigés vers l'Est. Par conséquent le transport résiduel se fera à l'inverse de celui observé habituellement vers l'Est car guidé par les courants de marée.

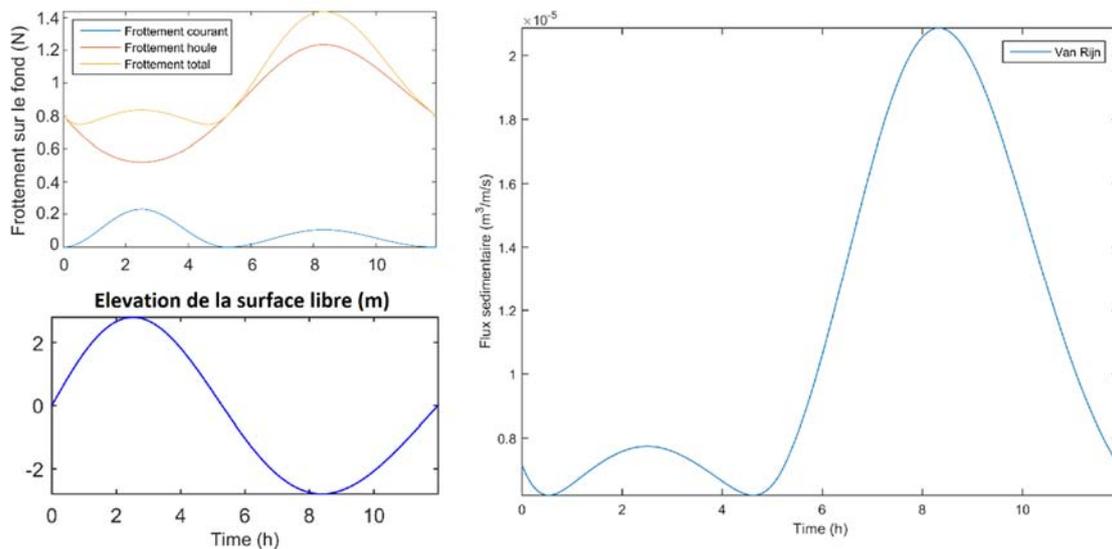


Figure 5. Evolution temporelle des contraintes de cisaillement au fond engendrées par le courant, la houle et la composition des deux (en haut à gauche). Variation de la surface libre pendant la période (en bas à gauche). Flux sédimentaires instantanés associés calculés suivant la formulation de VAN RIJN (1984) (à droite).

### 4. Conclusion

Des calculs de flux sédimentaires suivant trois formulations ont été effectués afin de mieux comprendre les phénomènes physiques impactant la migration des dunes sous-marines au large de Dunkerque. Les calculs ont tout d'abord été réalisés en utilisant des forçages réalistes et comparés aux résultats d'une précédente étude utilisant la méthode de « Dune Tracking » (BARY *et al.*, 2021). Ensuite, les calculs ont été effectués sur un cas idéalisé afin d'affiner l'étude de l'influence des processus hydrodynamiques. Les flux estimés via les trois formulations reproduisent bien l'inversion de la direction de migration observée et reste dans le même ordre de grandeur que les résultats du « Dune Tracking ». La basse mer étant synchronisée avec les pics de jusant, l'influence de la houle sur le transport sédimentaire est donc maximale au moment où le courant porte à l'Ouest. Un épisode de fortes vagues avec des vents de Nord-Est engendre donc une accélération de la migration des dunes vers l'Ouest, ce qui vient contrebalancer la migration résiduelle vers l'Est imposée par le schéma des courants tidaux. Cette étude reste cependant limitée. Le calcul étant effectué en un point, il ne permet pas d'expliquer la variabilité inter dunes sur une même période et notamment pourquoi la migration de certaines dunes est plus importante que d'autres et peut se faire dans des directions

opposées. Une perspective pour répondre à ce nouveau questionnement serait donc de réaliser une simulation tridimensionnelle à l'échelle de la zone d'étude et de quantifier les influences de chaque processus physique sur les différentes dunes ainsi que les interactions qu'elles peuvent avoir entre elles.

### **Remerciements**

Ce travail a bénéficié d'une aide de France Energies Marines et de l'Etat, gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'Avenir, portant la référence ANR-10-IEED-0006-34.

### **5. Références bibliographiques**

- BARRIE J.V., CONWAY K.W. (2014). *Seabed characterization for the development of marine renewable energy on the Pacific margin of Canada*. Continental Shelf Research, Vol. 83, pp 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.016>
- BARY, M. (2021). *Morphodynamique des dunes sous-marines et flux sédimentaires associés. Application au site éolien offshore de Dunkerque*. Mémoire de stage de Master 2<sup>ème</sup> année GEHYD, Université de Rouen Normandie, 56 pp + annexes.
- BARY M., LE BOT S., NEXER N., GARLAN T., BLANPAIN O., KERVELLA Y., HOMRANI S., TURKI I. (2021). *Morphodynamique de dunes sous-marines et flux sédimentaires associés à l'échelle mensuelle à saisonnière. Cas du futur parc éolien au large de Dunkerque*. 27<sup>ème</sup> Réunion des Sciences de la Terre, Lyon, 01-05 Novembre 2021.
- BLANPAIN O. (2009). *Dynamique sédimentaire multiclasse : de l'étude des processus à la modélisation en Manche*. Thèse de doctorat de l'université de Rouen. Disponible en ligne sur URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/00003/11426/7962.pdf>
- BONNEFILLE R., LEPETIT J.P., GRAFF M., LEROY J. (1971) *Nouvel avant-port de Dunkerque, Mesures en nature*. Laboratoire National d'Hydraulique Report HC042/05.
- BOUDIERE E., MAISONDIEU C., ARDHUIN F., ACCESI M., PINEAU-GUILLOU L., LEPASQUEUR J. (2013). *A suitable ocean hindcast database for the design of Marine energy converters*. International Journal of Marine Energy, Vol. 3-4, pp e40-e52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>
- CAILLAUD M., PETTON S., DUMAS F., ROCHETTE S., VASQUEZ M. (2016). *Rejeu hydrodynamique à 500 m de résolution avec le modèle MARS3D-AGRIF – Zone Manche-Gascogne*. <http://doi.org/10.12770/3edee80f-5a3e-42f4-9427-9684073c87f5>
- HARRIS P.T. (1989). *Sandwave movement under tidal and wind-driven current in a shallow marine environment: Adolphus Channel, northeastern Australia*. Continental Shelf Research, Vol. 9(11), pp 981-1002. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(89\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0278-4343(89)90003-4)
- HARRIS P.T. (1991). *Reversal of subtidal dune asymmetries caused by seasonally reversing wind-driven currents in Torres Strait, northeastern Australia*. Continental Shelf Research, Vol. 11(7), pp 655-662. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(91\)90018-2](https://doi.org/10.1016/0278-4343(91)90018-2)

## Thème 2 – Dynamique sédimentaire

- LATAPY A. (2020). *Influence des modifications morphologiques de l'avant-côte sur l'hydrodynamisme et l'évolution du littoral des Hauts-de-France depuis le XIXe siècle*. Thèse de doctorat, université du Littoral Côte d'Opale. Disponible en ligne sur URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02899411v2/document>
- LE BOT S., TRENTESAUX A., GARLAN T., BERNE S., CHAMLEY H. (2000). *Influence des tempêtes sur la mobilité des dunes tidales dans le détroit du Pas de Calais*. *Oceanologica Acta*, Vol. 23(2), pp 129-141. Disponible en ligne sur URL : <https://archimer.ifremer.fr/doc/2000/publication-519.pdf>
- LE BOT S., TRENTESAUX A. (2004). *Types of internal structure and external morphology of submarine dunes under the influence of tide- and wind-driven processes (Dover Strait, northern France)*. *Marine Geology*, Vol. 211, pp. 143-168. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.002>
- SOULSBY, R. (1997). *Dynamics of marine sand*. Thomas Telford, pp. 272.
- TESSIER B., CORBAU C., CHAMLEY H., AUFFRET J. (1999). *Internal structure of shoreface banks revealed by high-resolution seismic reflection in a macrotidal environment (Dunkerque Area, Northern France)*. *Journal of Coastal Research*, Vol. 15(3), pp 593–606. <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/81075/78249>
- TONNON P.K., VAN RIJN L.C., WALSTRA D.J.R. (2007). *The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface*. *Coastal Engineering*, Vol. 54, pp 279-296. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.005>
- VAN DER A D.A., RIBBERINK J.S., VAN DER WERF J.J., O'DONOGHUE T., BUIJSROGGE R.H., KRANENBURG W.M. (2013). *Practical and transport formula for non-breaking waves and currents*. *Coastal Engineering*, Vol. 76, pp 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.007>
- VAN RIJN L.C. (1984). *Sediment transport, part 1: bed load transport*. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110, pp 1431-1456. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- VICAIRE O. (1991). *Dynamique hydro-sédimentaire en Mer du Nord méridionale (du Cap Blanc Nez à la frontière belge)*. Thèse de doctorat, université de Lille1.
- WHITEHOUSE R.J.S., DAMGAARD J.S., LANGHORNE N. (2000). *Sandwaves and seabed engineering: the application to submarine cables*. *Proceeding of Marine Sandwaves Dynamics, MARID*, pp 227-234.
- WU W., Wang S.S.Y, Jia Y. (2000). *Nonuniform sediment transport in alluvial rivers*. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, pp 427-434. <https://doi.org/10.1080/00221680009498296>
- YALIN M. (1963). *An expression for bedload transportation*. *Journal of Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineering*, Vol. 90, pp 105-119. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000874>