

Morphodynamique d'une dune sous-marine du détroit du pas de Calais

Déborah Idier^{a,*}, Axel Ehrhold^b, Thierry Garlan^b

^a Institut de mécanique des fluides de Toulouse, allée du Professeur-Camille-Soula (IMFT), 31400 Toulouse, France

^b Établissement principal du Service hydrographique et océanographique de la Marine (EPSHOM), cellule sédimentologie, 13, rue du Châtelier, BP 30316, 29603 Brest cedex, France

Reçu le 6 mai 2002 ; accepté le 22 octobre 2002

Présenté par Georges Pédro

Abstract – Morphodynamics of an undersea sandwave of the Dover Straits. This paper investigates the dynamics of sandwaves in relationship with tidal currents and weather conditions. The studied sandwaves are located in the Dover Straits and are covered by megaripples. These megaripples have migration speeds of 1 m h^{-1} and slopes of 34° , suggesting the potential for avalanches to occur along the flanks of the sandwave. Tidal cycles without reversing currents were observed during stormy weather. Wind-induced currents lead to a unidirectional migration of megaripples and sandwaves. Well-defined areas without megaripples were observed and correlated with an increase in sandwave height. We propose interpretations for understanding sandwave saturation and migration. *To cite this article: D. Idier et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 1079–1085.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

sandwave / megaripples / currents / multi-beam / dynamics / storms / avalanche

Résumé – La mobilité d'une dune de sable et de ses mégarides est étudiée à diverses échelles de temps, sous l'influence des courants de marée et des tempêtes. La dune étudiée est couverte de mégarides, dont la vitesse de migration et les pentes peuvent atteindre respectivement 1 m h^{-1} et 34° , engendrant ainsi des avalanches. Nous observons également des zones sans mégarides, en corrélation avec la hauteur de la dune. Pendant les tempêtes, des marées sans renverse du courant sont observées. Des interprétations sont proposées concernant la saturation et la migration des dunes, en relation avec les avalanches et les tempêtes. *Pour citer cet article : D. Idier et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 1079–1085.*

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

dune / mégarides / courants / multi-faisceau / dynamique / tempêtes / avalanches

Abridged version

1. Introduction

Sandwaves are large-scale migrating sedimentary bedforms having heights up to several meters and wavelengths of the order of several hundreds metres. Commonly, such sandwaves are covered by smaller migrating megaripples [10]. The migration rate of sandwaves and megaripple can reach 150 m yr^{-1} [1] and around 1 m/M_2 tide [2, 11, 13, 14], respectively. On the weekly scale, sandwave dynamics are correlated to synoptic-scale weather patterns [5, 8].

In an effort to understand the processes involved in the migration and saturation of sandwaves, this article focuses

on sandwave and megaripples dynamics on different time scales, the shorter being five hours. The study site is located in the middle of the Dover Straits (upper panel, Fig. 1). It can be further subdivided into two areas (O and E), as defined by sandwaves that migrate in opposite directions on the decadal time scale (Fig. 1), although this pattern can change from year to year [8]. We focus on the southeastern section of the western sandwave as shown in Fig. 1, where the sandwave height is about 10 m. Most of the bathymetric data (Table 1) come from a field campaign performed in 2001 [6]. The bathymetry has been measured using a multi-beam echosounder. The horizontal and vertical precisions are estimated to be 3 m and 30 cm, respectively, with a horizontal resolution of about 1 m and a vertical resolu-

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : D.Idier@ctw.utwente.nl (D. Idier).

¹ Adresse actuelle : Université of Twente, Department of civil engineering, Integrated Modelling, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands.

tion of 2 cm. This data was then evaluated using a bathymetric numerical model with a grid size of 1 m square. The slope was computed at each grid point and the maximum slope estimated to be real when grid points having a same computed slope value form a cluster parallel to an observed bedform crest. In addition, current measurements were made at locations **a**, **b**, and **c** (Fig. 1) using Aquadopp current meter (**a** and **b**) and an ADCP (Acoustic Current Doppler Profiler) (**c**). In Fig. 1, for ease in map reading, a reference marker (+) is plotted at coordinates (604 000 m; 7 109 500 m) in Lambert 93 and (01°37'98"; 51°04'41") in RGF 93. In order to distinguish sandwaves and megaripples, the classification scheme of [3] is used.

2. Results

The sandwave is covered by two kinds of megaripples. The first type of megaripple overlaps the gentle slope (Figs. 1 and 2). Their height can reach 2 m and their wavelength is about 10 to 20 m. The second type of megaripple is seen on the lee slope of the sandwave (Fig. 2). Their height and wavelength are roughly 10% of the first type at about 20 cm and 2 m, respectively. All these megaripples are oriented 20° anti-clockwise to the sandwave crest orientation. Besides, on 17 October 2001, the bed slope of the lee side of the sandwave was estimated to be 17° as compared to the slope of the megaripples at about 34° (Fig. 3). The megaripple value of 34° is close to the bedform stability angle (35°) [12] beyond which there is a strong probability that avalanches will occur.

At the beginning of the campaign (17 October 2001), the weather was quiet and the ebb currents at the sandwave crest (point **a**) was about 1.5 m s⁻¹. Though precise megaripple migration is difficult to estimate (Fig. 4), on the bathymetric profile, the megaripple 1 moves 9 ± 3 m over a 5 hours period towards the North Sea (Fig. 5), leading to a migration speed up to 1 m h⁻¹. This is consistent with previous observations of sandwave crest migration of 3.5 m over a 6-h period [6]. After one tidal cycle, the migration of megaripple 1 is 5 ± 3 m, leading to a minimum migration of 2 m, in agreement with previous studies [5, 8, 13, 14], suggesting a maximum migration of about 1 m per tidal cycle.

In the same time, the position of the sandwave feet did not move (Fig. 6). The observed vertical bathymetric variations ranged between 2 m in 5 h and 3 m in 3 weeks are due to the megaripples dynamics. On the annual time scale, using the 1999, 2000 and P1 surveys, the sandwave migration speed is estimated to be comprised between 9 and 17 m yr⁻¹ towards the English Channel. The 2000 survey showed the sandwave vertical height was 3 m greater than for the other surveys.

Storms occurred during the 2001 field campaign on 24, 26, 30 October and 8 November with wind speeds varying between 25 and 32 m s⁻¹. They affected the entire water column on October 24, 26, and November 8 as indicated by the lack of reversing currents (Fig. 7). Then, during these periods, both the megaripples and the sandwave migrated unidirectionally over the tidal cycle towards the North Sea.

Such phenomenon occurred only for weak tidal coefficients where the tidal flood current is about 1 m s⁻¹ near the surface.

3. Discussion and conclusion

Megaripples have been identified as bathymetric features having great mobility. What is the influence of these bedforms and synoptic storms on sandwave dynamics?

First, in addition, to the observed megaripple slopes, we assume that the megaripples are migrating toward the English Channel, oriented along the primary axis of the observed sediment flux [4, 6]. Then, the megaripples migrate from the foot of the gentle slope toward the crest of the sandwave, increase in height until reaching the critical stability angle, and then induce avalanches on the lee side of the sandwave. It should be a sandwave migration process. During storms inducing current toward the North Sea, this behaviour should be different.

Some tidal cycles without reversing currents were observed to occur during storms. In order to determine the effect of the wind-induced currents under these conditions, we used an empirical approach (the wind-induced current is estimated to be 3% of the wind speed [9]) to compare the non-tidal residual currents to the wind-induced currents (Fig. 8). When the wind direction is established since at least two days (24, 26 October, and 8 November), there is a good agreement. Thus, the wind speed can explain modifications of the current without the help of the surface waves. Else, when the wind direction is less well defined (29–31 October), the differences are notable. They might be due to the variability of the wind direction.

For quiet weather conditions, our data suggest that there is another process for generating sandwave avalanches. In 2000, the sandwave height was much larger than in 1999 or in 2001. Quiet weather is known to favour sandwave growth [7]. This is confirmed by the atmospheric conditions prior to the different surveys. Besides, the 2000 survey shows that on both slopes of the sandwave, there are areas covered by megaripples overlapping areas without megaripples (Fig. 9). The last ones correspond to areas where the sandwave height was the largest. These results suggest that during quiet atmospheric conditions, the sandwave continues to grow until it reaches a sufficient height to supersede the critical stability angle, which induces avalanches on both sides of the sandwave.

To summarise, the contributions of this study are as follows: (i) the short-term bathymetric variation of sandwaves are due to megaripples; (ii) megaripple migration speeds can reach 1 m h⁻¹; (iii) megaripples, whose slopes can reach a value of 34°, trigger avalanches on the sandwave; (iv) there are well-defined areas without megaripples overlapping areas covered by megaripples; (v) storms can generate non-reversing currents, yielding to a net unidirectional migration of both sandwaves and megaripples. Some migration and saturation processes have been proposed: (i) sandwaves are subject to two kinds of avalanches – the first is due to megaripples and favours sandwave mi-

gration, and the second is due to the sandwave itself and limits the sandwave height –; (ii) tidal currents over the

studied sandwave are modified by the wind-induced currents and not by surface waves.

1. Introduction

Les dunes tidales sont des corps sédimentaires dont la hauteur peut dépasser 10 m, la longueur plusieurs kilomètres et la largeur plusieurs centaines de mètres, par des profondeurs de quelques dizaines de mètres. Elles sont le plus souvent recouvertes de mégarides [10]. Les dunes et les mégarides peuvent migrer, respectivement, de plus de 150 m an^{-1} [1] et de 1 m par cycle de marée [2, 11, 13, 14]. À l'échelle annuelle, leur dynamique est corrélée à la météorologie [5, 8]. Il existe peu de données sur des échelles temporelles inférieures à celle de la marée. Dans cette étude, cherchant à mieux comprendre les processus de migration et de saturation des dunes, nous nous intéressons à la dynamique des dunes et des mégarides surimposées, sur des échelles allant de cinq heures à quelques années.

La zone étudiée est située au milieu du détroit du pas de Calais (Fig. 1). Elle a déjà fait l'objet d'une étude morpho-sédimentaire [8]. Les courants de marée à 1,15 m au-dessus du fond sont de l'ordre de 1 m s^{-1} et le marnage est de 5,7 m en vive-eau moyenne [6]. De part et d'autre d'un axe orienté du sud-ouest vers le nord-est (Fig. 1), les dunes migrent dans des directions opposées à l'échelle décennale [8] : vers la mer du Nord, dans la partie ouest (O), vers la Manche, dans la partie est (E). À l'échelle annuelle, ce schéma peut être modifié par les tempêtes [8]. Nous avons focalisé nos travaux sur une portion de dune située dans la zone (E) (Fig. 1). La hauteur de la dune y est d'environ 10 m et la largeur de 150 m.

La plupart des mesures présentées sont issues d'une campagne réalisée au sein du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) en 2001. Cette dernière portait principalement sur des mesures bathymétriques et des mesures de courant [6]. Les mesures bathymétriques sont espacées de cinq heures à trois semaines. Ces levés et ceux utilisés en complément sont récapitulés dans le Tableau 1. La précision du GPS utilisé (5 m) et la superposition des différents levés bathymétriques permettent d'estimer une précision effective du positionnement de 3 m. Le sondeur utilisé est un sondeur multi-faisceau Simrad EM1002S, dont la précision verticale absolue est de 30 cm ; ses résolutions horizontales et verticales sont respectivement de 1 m et de 2 cm. Des modèles de bathymétrie de 1 m de taille de maille sont ainsi construits. Les valeurs de pente bathymétrique maximales sont évaluées en supposant que les valeurs mesurées sont réelles lorsqu'il existe des points adja-

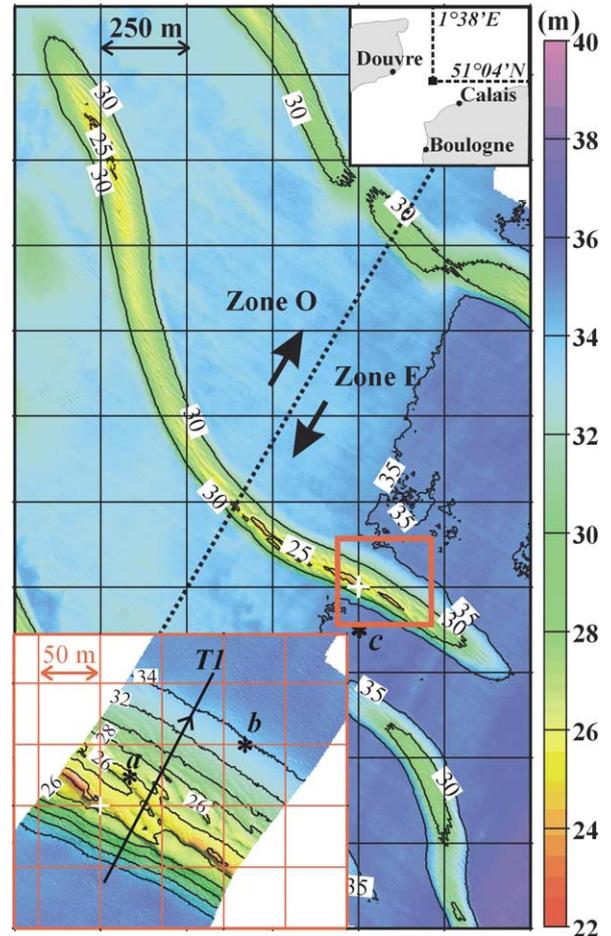


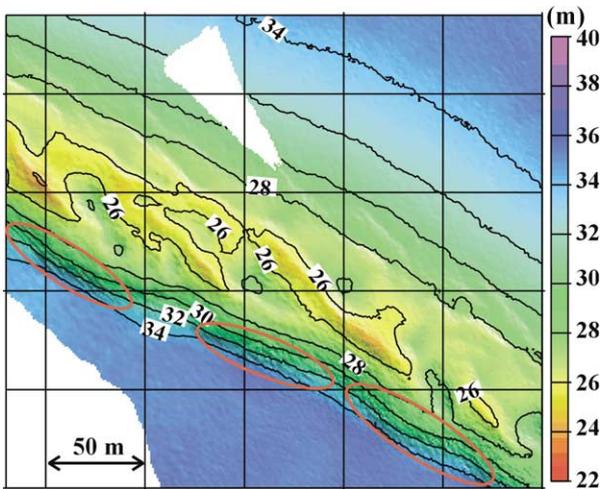
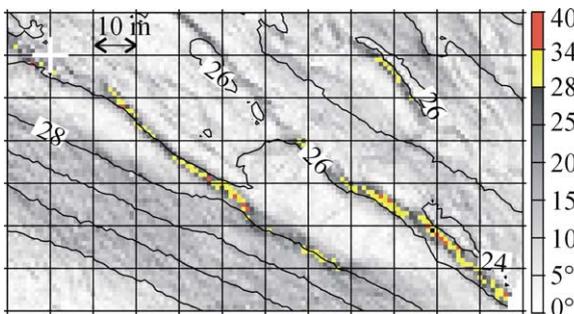
Fig. 1. Zone d'étude. Bathymétrie du champ de dunes et de la portion de dune étudiée. Levé P1.

Fig. 1. Study area. Bathymetry of the sandwave field in the study area. P1 survey.

cents de pente égale, formant un ensemble parallèle aux isobathes. Les mesures de courant sont effectuées à l'aide de courantomètres ponctuels à effet Doppler (points a et b, Fig. 2) et d'un ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*, point c). Ainsi, nous disposons de mesures de courant à 1,15 m au-dessus du fond en a et en b, et de 3 m au-dessus du fond jusqu'à la surface en c. Enfin, les données de vent sont issues du modèle ARPEGE (Météo-France). Dans ce qui suit, la projection cartographique utilisée est le Lambert 93. Afin de faciliter la lecture, un point repère de coordonnées (604 000 m ; 7 109 500 m) en Lambert 93 et (01°37'98" ; 51°04'41") en RGF 93, est reporté sur chaque figure. La bathymétrie est donnée par rapport au zéro hydrographique. Afin de distinguer les diffé-

Tableau 1. Dénomination des levés bathymétriques et phase du courant associé.**Table 1.** Bathymetric surveys and phase of the associated current.

Nom du levé/ Survey	Date	Phase du courant/ Current phase
1999	22–31/03/99	–
2000	30–31/05/00	–
P1	17/10/01, 22 h	Jusant/Ebb
P2	18/10/01, 03 h	Flot/Flood
P3	18/10/01, 10 h	Jusant/Ebb
P4	06/11/01	–

**Fig. 2.** Bathymétrie à partir du levé de 1999. Les contours rouges indiquent les zones de petites mégarrides.**Fig. 2.** Bathymetry from the 1999 survey. Red ellipses indicate areas of small megaripples.**Fig. 3.** Intensité des pentes et isobathes. Levé P1.**Fig. 3.** Bathymetric slopes and isobaths. P1 survey.

rents corps surimposés, nous utilisons la classification de [3].

2. Résultats

La dune est festonnée de deux réseaux de mégarrides. Le premier (I) est composé de grandes mégarrides (Fig. 1), dont la hauteur augmente du pied du

flanc doux vers la crête, pour atteindre 2 m de haut pour 10 à 20 m de longueur d'onde. Le deuxième réseau (II) (Fig. 2), est constitué de petites mégarrides, dont la longueur d'onde est d'environ 2 m et la hauteur est de 20 cm. Ces deux types de mégarrides sont inclinées d'environ 20° par rapport à la crête de la dune. En outre, la pente du flanc raide de la dune était d'environ 17° le 17 octobre 2001, tandis que celle des mégarrides peut atteindre 34° (Fig. 3) [7]. Une telle valeur est, d'une part, en accord avec les pentes allant de 28 à 34° mentionnées dans [1], d'autre part proche de l'angle critique de stabilité de 35° généralement admis [12]. Les mégarrides sont donc le siège d'avalanches.

Étudions les mégarrides 1 et 2, situées en crête de dune (Fig. 1), au début de la campagne de mesure (17 octobre 2001). Le temps était calme (vent d'environ 10 m s⁻¹) et les courants maximaux en crête de dune (point a) étaient de 1,5 m s⁻¹ près du fond. La polarité des mégarrides s'inverse entre le jusant et le flot (Fig. 4). En cinq heures, les mégarrides 1 et 2 migrent respectivement de 9 ± 3 m (i.e. 1,2 m h⁻¹) et 5 ± 3 m (i.e. 0,4 m h⁻¹) vers la mer du Nord (Fig. 5), ce qui est cohérent avec les oscillations maximales de 3,5 m de la crête d'une dune mesurées au cours d'une marée [7]. Après une marée, les migrations respectives des crêtes sont de 5 ± 3 m et 3 ± 3 m. La migration minimale de la mégarride 1 est donc de 2 m pendant le cycle de marée considéré (coefficient de marée 111), en accord avec les migrations observées dans la littérature [2, 11, 13, 14], qui vont de 0,5 à 1,5 m par cycle de marée.

Entre les levés P1 et P2 espacés de cinq heures, la forme générale de la dune ne varie pas (Fig. 6). Les variations verticales de 2 m sont dues à la dynamique des mégarrides. Le même comportement est observé après trois semaines. À partir de levés, espacés respectivement de 14 et 17 mois (1999–2000 et 2000–P1), nous estimons une migration annuelle de 9 à 17 m an⁻¹. Notons la variation de 3 m de la cote de la crête, qui, en mai 2000, est plus haute qu'en mars 1999 et qu'en octobre 2001 (Fig. 6).

Durant la campagne de mesure, des tempêtes ont eu lieu les 24, 26, 30 octobre et 8 novembre, avec des vitesses du vent allant de 25 à 32 m s⁻¹. Parallèlement, sur toute la tranche d'eau, les 24 et 26 octobre et le 8 novembre, il n'y a pas eu de renverse du courant (Fig. 7), alors que les coefficients de marée étaient faibles (30 à 47). Sans vent, le 8 octobre, le courant de flot près de la surface aurait été de 1,1 m s⁻¹ (point c). Pendant ces tempêtes, il n'y a donc pas eu d'oscillation de la dune et des mégarrides, mais une migration nette, soit vers le nord-est (24 et 26 octobre), soit vers le sud-ouest (8 novembre), selon le sens du vent. Ce phénomène de non-renverse n'est pas observé le 30 octobre (coefficient de marée 78).

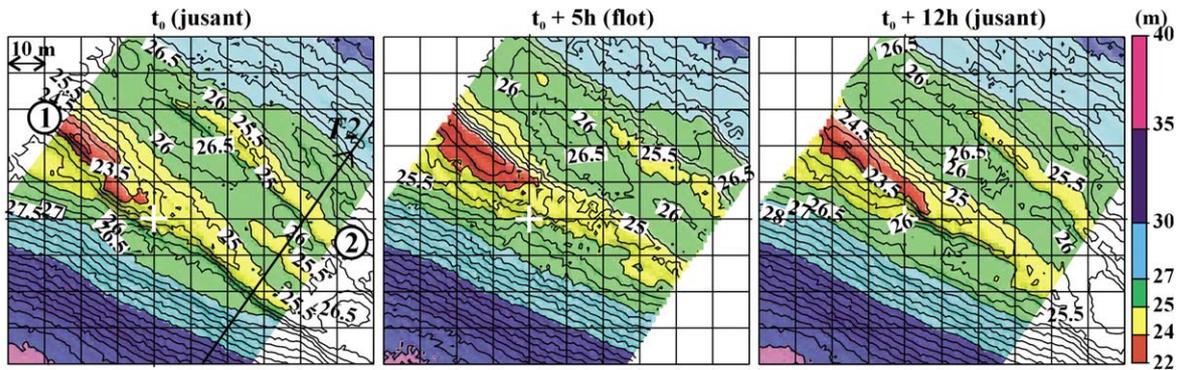


Fig. 4. Bathymétrie des mégarides. Levés P1, P2 et P3.
 Fig. 4. Megaripples bathymetry. P1, P2, and P3 surveys.

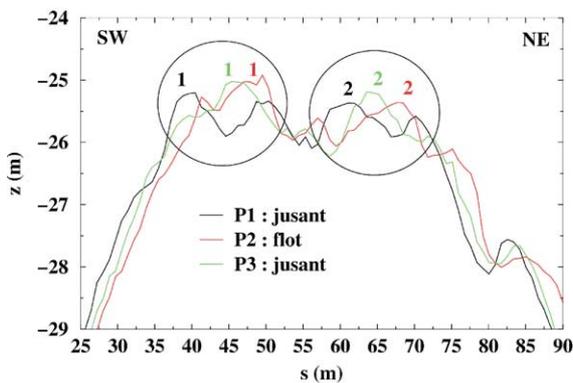


Fig. 5. Profils bathymétriques des mégarides 1 et 2 le long de la section T2 (Fig. 4). *s* : Abscisse le long du transect.
 Fig. 5. Bathymetric profiles of the megaripples 1 and 2 along cross-section T2 (Fig. 4). *s* : Abscissa oriented along the transect.

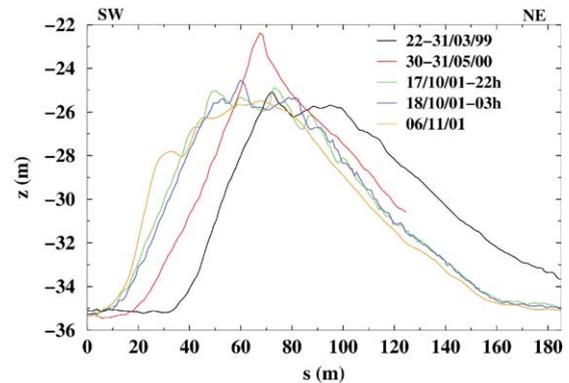


Fig. 6. Profils bathymétriques le long de la section T1 (Fig. 1). *s* : Abscisse le long du transect.
 Fig. 6. Bathymetric profile along cross-section T1 (Fig. 1). *s* : Abscissa oriented along the transect.

3. Discussion

Les résultats montrent l'existence de mégarides surimposées, qui sont le siège d'avalanches et dont les migrations sont de l'ordre du mètre par cycle de marée. En outre, lors des périodes de calme, les mesures de courant effectuées en **a** et en **b** [6], ainsi que des modélisations numériques [4, 6] montrent que le transport résiduel tidal est orienté vers la Manche. Ainsi, sous l'action des courants de marée, les mégarides migreraient du pied du flanc doux vers la crête, tandis que leur hauteur augmente, jusqu'à engendrer des pentes suffisantes pour déclencher des avalanches sur le flanc raide de la dune, favorisant ainsi la migration de la dune. Ce schéma est vraisemblablement modifié par les tempêtes lorsque le vent est orienté vers la mer du Nord.

Lors de ces tempêtes, des marées sans renverse sont observées (Fig. 7). Comparons alors les courants non dus à la marée aux courants induits par le vent. Le courant non dû à la marée est calculé à partir de la

mesure de courant effectuée au point **c**, près de la surface libre (Fig. 8). En première approche, le courant induit est calculé à l'aide d'une formule empirique l'estimant égal à 3% de la vitesse du vent [9]. Durant les tempêtes où le vent a une direction stable durant au moins deux jours (24, 26 octobre et 8 novembre), le courant résiduel non dû à la marée est proche de l'estimation du courant induit. Lorsque la direction du vent est variable (28–31 octobre), il est faible devant le courant estimé. Lorsque la direction du vent est stable, la prise en compte du vent uniquement suffirait donc à expliquer les modifications du courant pendant les tempêtes. L'action de la houle sur le courant serait alors négligeable.

Enfin, nous avons noté des variations de hauteur de dune entre 1999, 2000 et 2001 (Fig. 6). Les levés réalisés en 1999 et 2001 ont été précédés de fortes tempêtes. En 2000, le levé a été précédé de dix jours de calme. La reconstruction des dunes par temps calme est un phénomène connu [7]. Parallèlement, en 2000, sur le flanc doux, il existe des zones couvertes de mégarides, mais également des zones sans

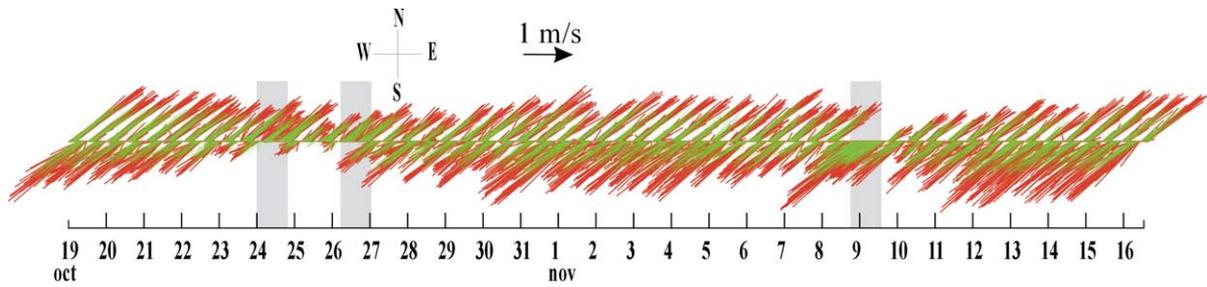


Fig. 7. Profil temporel des vecteurs courants au pied du flanc raide de la dune (point c, Fig. 1) à 3 m au-dessus du fond et 1 m sous le zéro hydrographique.

Fig. 7. Time series of current vectors south of the sandwave (point c, Fig. 1) at 3 m above the bottom and 1 m below hydrographic zero.

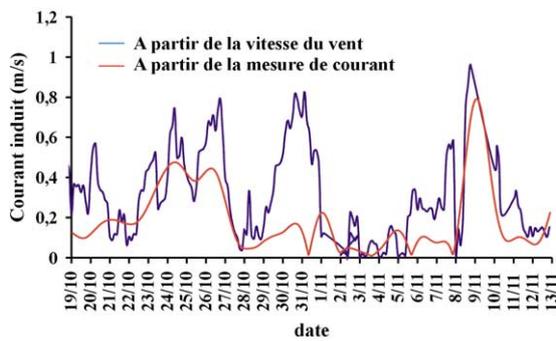


Fig. 8. Profils temporels de courants. Rouge : courants résiduels sub-surface non dus aux courants de marée et déduits de la mesure effectuée à la position c (Figs. 1 et 8). Bleu : courant calculé à partir de la vitesse locale du vent.

Fig. 8. Time series of currents. Red: sub-surface non-tidal residual currents inferred from current measurements made at position c (Figs. 1 and 8). Blue: wind-induced currents computed using the local wind speed [14].

mégarides, coïncidant avec les zones culminantes de la dune (Fig. 9). Ceci pourrait être la trace d’avalanches. Ainsi, par temps calme, la hauteur de la dune augmenterait, jusqu’à atteindre des pentes engendrant des avalanches, non seulement sur le flanc raide, mais également sur le flanc doux. Ceci pourrait être l’un des processus limitant la hauteur des dunes.

4. Conclusion

Les principales contributions à l’étude de la dynamique des dunes sont : (i) les variations bathymétriques des dunes en quelques heures sont dues à la dynamique des mégarides, (ii) les mégarides présentes en crête de dune peuvent atteindre une migration de plus de 1 m h^{-1} , (iii) les mégarides présentent des pentes pouvant atteindre 34° , déclenchant ainsi des avalanches, (iv) des zones couvertes de mégarides adjacentes à des zones sans mégarides ont été observées, ces dernières coïncidant avec les zones de hauteur de dune maximale, (v) les tempêtes peuvent an-

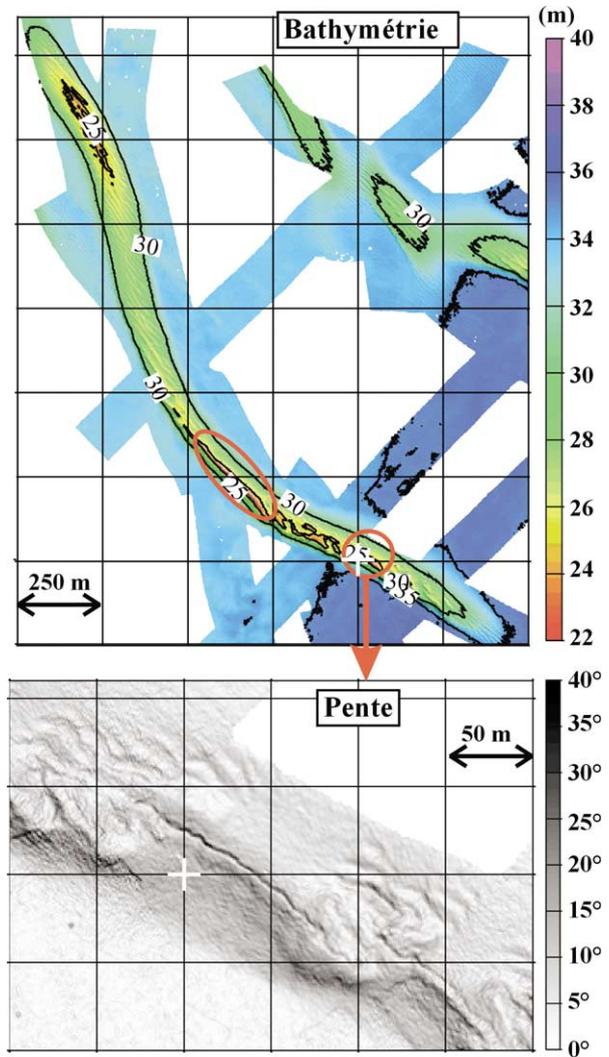


Fig. 9. Bathymétrie complète de la dune et carte des pentes de la zone étudiée en 2000. Les isobathes sont précisées sur la carte de pentes.

Fig. 9. Sandwave bathymetry and slopes from the 2000 survey. The isobaths are plotted on the slope map.

nuler des courants de marée de plus de 1 m s^{-1} en surface et impliquer ainsi une migration nette de la dune. Les observations effectuées permettent également de proposer les mécanismes suivants : (i) les dunes sont le siège de deux types d'avalanches, un premier étant

dû aux mégarides et favorisant la migration des dunes, un deuxième étant lié au corps principal de la dune et contribuant à la limitation de la hauteur des dunes ; (ii) la vitesse d'entraînement du vent serait le facteur principal modifiant les courants près du fond.

Remerciements. Les auteurs remercient vivement S. Berné et H. Chamley pour leurs critiques constructives, le SHOM, la Mission hydrographique de l'Atlantique, Météo France et la Marine nationale pour leur participation, ainsi que le SHOM et le CNRS pour leur soutien financier.

Références

- [1] S. Berné, G. Allen, J.-P. Auffret, H. Chamley, J. Durand, O. Weber, Essai de synthèse sur les dunes hydrauliques géantes tidales actuelles, *Bull. Soc. géol. France* 6 (1989) 1145–1160.
- [2] R.W. Dalrymple, Morphology and internal structure of sand waves in the Bay of Fundy, *Sedimentology* 31 (1984) 365–382.
- [3] R. Dalrymple, R. Knoght, J. Lambiase, Bedforms and their hydraulic stability relationship in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada, *Nature* 275 (1978) 100–104.
- [4] N. Grochowski, M. Collins, S. Boxall, J. Salomon, M. Breton, R. Lafite, Sediment transport pathways in the eastern English Channel, *Oceanol. Acta* 16 (5–6) (1993) 531–537.
- [5] P.T. Harris, Reversal of subtidal dune asymmetries caused by seasonally reversing wind-driven currents in Torres Strait, northeastern Australia, *Cont. Shelf Res.* 11 (7) (1998) 655–662.
- [6] D. Idier, Dynamiques des bancs et des dunes de sable du plateau continental : observations in situ et modélisation numérique, thèse, Institut national polytechnique de Toulouse, 2002, 302 p.
- [7] D.N. Langhorne, A study of the dynamics of marine sandwave, *Sedimentology* 29 (4) (1982) 571–594.
- [8] S. Le Bot, Morphodynamique de dunes sous-marines sous influence des marées et des tempêtes. Processus hydro-sédimentaires et enregistrement. Exemple du pas de Calais, thèse, université Lille-1, 2001, 300 p.
- [9] J.-P. Le Petit, B. Manoha, M. Darras, Un modèle de prévision de déplacement de nappes d'hydrocarbures utilisé lors de l'échouement de l'Amoco Cadiz, EDF, Bulletin de la direction des études et recherches – Série A : nucléaire, hydraulique, thermique 2 (1981) 39–59.
- [10] J. Terwindt, Sand waves in the southern bight of the North Sea, *Mar. Geol.* 10 (1971) 51–67.
- [11] F. Thauront, Les transits sédimentaires subtidaux dans les passes internes du bassin d'Arcachon, thèse, université Bordeaux-1, 1994.
- [12] L.C. Van Rijn, Handbook: Sediment Transport by Currents and Waves, Report H 461, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 1989.
- [13] M.J. Visser, Neap-spring cycles reflected in Holocene subtidal large-scale bedform deposits: a preliminary note, *Geology* 8 (1980) 543–543.
- [14] T. Wever, I. Stender, Strategies for and results from the investigation of migrating bedforms in the German Bight, *Marine Sandwave Dynamics*, Lille, 2000, pp. 221–226.