

Disposition, caractères et formation des barres d'avant-côte festonnées du Golfe du Lion

Barres festonnées
Sédimentation côtière
Ondes de coin
Golfe du Lion
Crescentic bars
Coastal sedimentation
Edge waves
Gulf of Lions

J. P. Barousseau^a, B. Saint-Guily^b

^a Centre de Recherche de Sédimentologie Marine, Université de Perpignan, avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan, et Faculté des Sciences, Université de Dakar, Dakar-Fann, Sénégal.

^b Muséum National d'Histoire Naturelle, Laboratoire d'Océanographie physique, 43, rue Cuvier, 75231 Paris Cedex 05, et Laboratoire Arago, 66650 Banyuls-sur-Mer.

Reçu le 6/1/81, révisé le 23/2/81, accepté le 9/3/81.

RÉSUMÉ

L'examen de photographies aériennes montre l'existence de nombreuses barres en forme de croissant sur une longueur de côte de 120 km dans le Golfe du Lion. Les houles qui sont à l'origine de ces formations sédimentaires ont une hauteur la plus fréquente égale à 0,30 m. Un dixième des vagues seulement ont une hauteur supérieure ou égale à 1 m. Les périodes sont comprises entre 2 et 10 secondes, et la période la plus fréquente est égale à 4 secondes. L'orientation de la côte varie progressivement du Nord au Nord-Est à l'exception de deux caps. Les pentes moyennes du fond diminuent du Sud au Nord (1,5 à 1,0 %).

La distribution et les caractéristiques de 267 barres en croissant, à savoir leurs longueurs L , les distances D des cornes à la côte et les profondeurs P entre les cornes et les creux ont été étudiées. La pente du fond, l'orientation de la côte et ses accidents sont les principaux facteurs qui contrôlent les variations et différences de ces barres. Mais la forme instantanée des festons résulte également de l'histoire météorologique antérieure.

La comparaison entre les valeurs théoriques et observées des rapports D/L et $(P+D)/L$ montre que les ondes de coin (en particulier les modes 2, 3, 4) doivent jouer un rôle important dans la formation des barres. De plus, ces résultats confirment que les barres observées correspondent à des conditions météorologiques, et par suite à des époques distinctes. Mais, si les ondes de coin semblent clairement impliquées, le mécanisme précis de formation des barres en croissant n'est pas expliqué de manière satisfaisante.

Oceanol. Acta, 1981, 4, 3, 297-304.

ABSTRACT

Distribution, characteristics and formation of crescentic bars in the Gulf of Lions

Aerial photography reveals that numerous crescent-shaped bars are produced over a distance of 120 km along the coastline of the Gulf of Lions. The height of the waves responsible for these sedimentary features is generally of the order of 0.30 m; only one in ten of the waves observed exceeds 1 m. Their period ranges between 2 and 10 seconds, the most frequent period being of 4 seconds. With the exception of two capes, the orientation of the coastline changes progressively Northerly to North-Easterly. The mean bottom slope increases regularly from 1.0 % in the North to 1.5 % in the South. The distribution and characteristics of 267 crescentic bars, comprising length L , distance from horn to shore D , and crescent depth P , were investigated. Offshore bottom slope and coastline orientation were found to be determinant as far as variations and differences are concerned, although earlier meteorological conditions are also partly responsible for the present curved shape.

Comparison between theoretical and observed values for D/L and $(P+D)/L$ indicates that edge waves (especially modes 2, 3, 4) play a prominent role in the formation of the

bars. These results also confirm that the bars observed correspond to specific meteorological conditions and hence to particular periods. If a connection with the edge waves appears certain, however, the actual mechanism of the creation of crescentic bars remains conjectural.

Oceanol. Acta, 1981, 4, 3, 297-304.

INTRODUCTION

Les barres d'avant-côte qui sont disposées à différentes profondeurs le long de certains rivages, traduisent l'adaptation d'un fond meuble aux contraintes dynamiques. Certaines d'entre elles prennent une forme tout à fait caractéristique en croissant. Les barres festonnées (crescentic bars), qui sont constituées de matériaux sableux ou graveleux, se trouvent dans les mers à marée (Sonu, 1973) et sans marée (Clos-Arceduc, 1962).

Généralement ces barres et les sinuosités de plages, c'est-à-dire la disposition du rivage en arcs successifs à concavité tournée vers le large, sont regroupées sous le nom de figures rythmiques (Bowen, Inman, 1971).

LA RÉGION ÉTUDIÉE

Le long de la côte du Golfe du Lion (fig. 1), sur plus de 120 km entre Le Racou et Sète, s'étend un système de barres d'avant-côte qui présente dans sa partie méridionale, au sud de Port-la-Nouvelle, des formes le plus souvent festonnées. Au nord de cette limite ces formes sont changeantes, surtout si on considère les barres externes qui sont le plus souvent rectilignes.

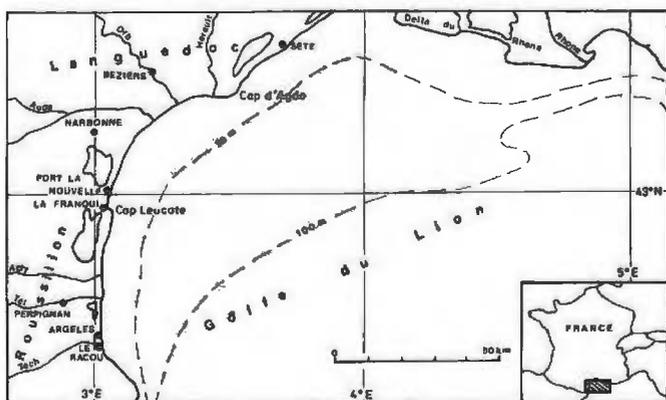


Figure 1
Région étudiée.
Region investigated.

Dans cette région, l'avant-côte subit l'action des houles résultant des deux régimes de vents dominants (Schuster, 1966) : le « Marin » du secteur SE, et les vents d'origine continentale, « Mistral » ou « Tramontane », du secteur NW. D'une manière générale, les houles sont caractérisées par une distribution des hauteurs et des périodes qui est présentée sur la figure 2. Les hauteurs sont le plus souvent inférieures à 3 m et la hauteur la plus fréquente est 0,30 m; pour un tiers, les vagues atteignent

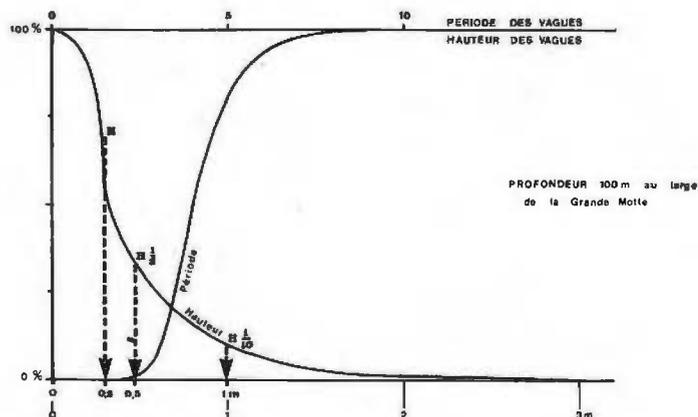


Figure 2
Distribution des hauteurs et périodes de la houle entre octobre 1974 et octobre 1975.
Wave heights and periods: distribution observed between October 1974 and October 1975.

ou dépassent 0,50 m et, pour un dixième, 1 m. Les périodes se trouvent dans un intervalle de 2 à 10 secondes avec 60 % des valeurs comprises entre 3,5 et 5 secondes; la période la plus fréquente est 4 secondes.

L'orientation du trait de côte varie assez régulièrement depuis N 10°E au Sud jusqu'à N 45°E au Nord. Le promontoire du cap Leucate et le massif volcanique d'Agde sont les deux seuls points singuliers. A l'exception des barres, la bathymétrie de l'avant-côte est assez régulière. Les profils transversaux présentent des pentes sensiblement rectilignes qui sont comprises entre 2,7 et 0,65 %. Si l'on considère les valeurs moyennes calculées entre 0 et 20 m de profondeur, la pente est supérieure à 1,5 % dans la partie située au sud de La Franqui, tandis qu'elle est de l'ordre de 1 % dans la partie située au nord de ce point. Dans le détail on trouve des variations sensibles surtout dans la partie méridionale (tableau 1). Il faut noter aussi une variation continue et rapide au large du promontoire de Port-la-Nouvelle.

Tableau 1
Pente moyenne de l'avant-côte dans le Golfe du Lion entre 0 et 20 m.
Mean bottom slope between 0 and 20 m in the Gulf of Lions.

Secteur considéré	Pente moyenne
De Sète à Agde	0,97
D'Agde à Port-la-Nouvelle	0,75
De Port-la-Nouvelle à La Franqui	0,70 à 0,80
Au large du promontoire de Leucate	2,10 au Nord 1,74 au Sud
De Leucate à Canet	1,33
De Canet à Saint-Cyprien	1,21
De Saint-Cyprien au Racou	1,74 à 2,67

Les barres d'avant-côte festonnées de cette région ont été étudiées par King et Williams (1949), Poncet (1961) et Rivière *et al.* (1961). Ces derniers ont envisagé leur formation sous l'action des courants de cisaillement; malheureusement leur argumentation repose sur l'hypothèse préliminaire d'un rivage initial à sinuosités périodiques, dont rien ne démontre l'exactitude. Des travaux plus récents confirment néanmoins que les courants de cisaillement jouent un rôle modificateur dans la formation des barres festonnées (Bowen, Inman, 1969; 1971; Mei, Liu, 1977; Hino, 1974).

LES BARRES D'AVANT-CÔTE DU GOLFE DU LION

Les photographies aériennes réalisées au cours de plusieurs missions de l'Institut Géographique National depuis 1954 fournissent un matériel abondant qui permet, dans un grand nombre de cas, de dénombrer les barres d'avant-côte et d'en préciser la forme et les mensurations.

Nombre et forme des barres

Il existe toujours plusieurs barres festonnées ou non. Quand elles n'apparaissent pas sur les clichés, c'est en raison des conditions d'éclairage ou de l'agitation de la mer, qui suppriment la transparence de l'eau. Il n'est pas toujours aisé de compter les barres, car près du rivage existent souvent des formes irrégulières et changeantes qui sont souvent mal séparées de la première barre clairement visible. Au sud de Port-la-Nouvelle on observe deux barres (fig. 3). Celles-ci sont toujours festonnées au sud de Leucate. Au Nord, entre La Franqui et Port-la-Nouvelle, la barre externe est tantôt festonnée, tantôt rectiligne. Parfois une troisième barre accolée au rivage apparaît (fig. 4); mais elle est mal individualisée et semble résulter de la progression vers le rivage d'une barre interne antérieure. De telles migrations ont été abondamment décrites (Lhermitte, 1958; Sonu, 1973). Nous n'avons pas pris en considération cette barre irrégulière, et nous avons admis qu'au sud de Port-la-Nouvelle la configuration typique comprenait seulement deux barres, l'une interne, l'autre externe.

Au nord de cette limite et jusqu'au cap d'Agde, on trouve trois barres : une barre interne toujours festonnée de faible longueur d'onde, une barre moyenne assez souvent festonnée avec parfois des irrégularités, et une barre externe qui est toujours rectiligne. Au-delà du cap d'Agde deux barres seulement apparaissent sur les clichés; elles sont rectilignes ou faiblement ondulées.

Caractères géométriques

L'examen des photos aériennes a permis de retenir 35 clichés sur lesquels on a mesuré, après détermination de l'échelle, la profondeur de la concavité P, la longueur d'onde L, et la distance D des cornes à la côte (fig. 5). Nous avons ainsi obtenu 267 groupes de valeurs pour P, D et L.

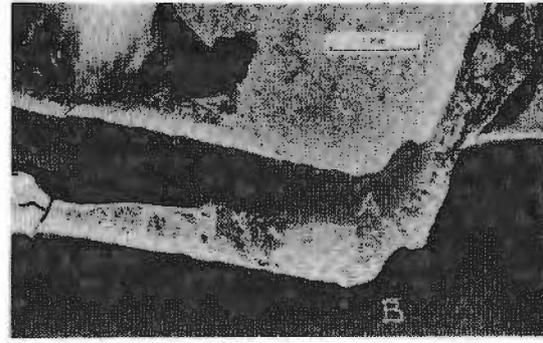


Figure 3
Barres festonnées mises en évidence au sud du Cap Leucate (photographies aériennes A et B).
Crescentic bars identified to the south of Cape Leucate (aerial photographs A and B).

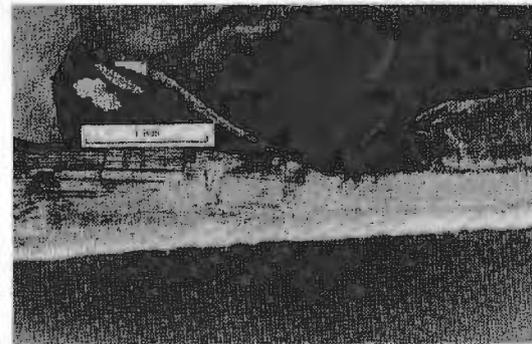


Figure 4
Barres festonnées au sud du Cap Leucate.
Crescentic bars south of Cape Leucate.

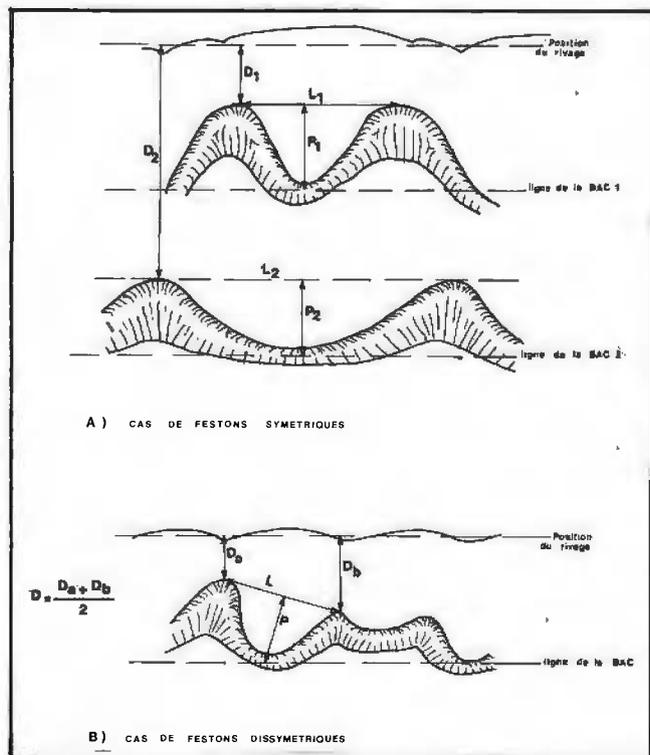


Figure 5
Modalités de mesure des paramètres D, P et L des festons.
Modalities of measurement of parameters D, P and L.

Distances du rivage

La répartition des distances au rivage (D+P) est différente de part et d'autre de Leucate pour la première et la seconde barre (fig. 6). Sans préjuger de leur position dans le système des barres d'avant-côte (BAC) en formation à la date de la photographie, elles sont désignées par ordre de proximité par rapport au rivage : BAC 1, BAC 2, BAC 3. Les moyennes (tableau 2) sont significativement différentes; mais il faut remarquer que la distance obtenue pour la deuxième barre au nord de La Franqui est proche de celle de la première barre au sud de cette limite. A l'est du cap d'Agde, où deux barres seulement ont été dénombrées, on retrouve la première barre à une distance de l'ordre de 150 m.

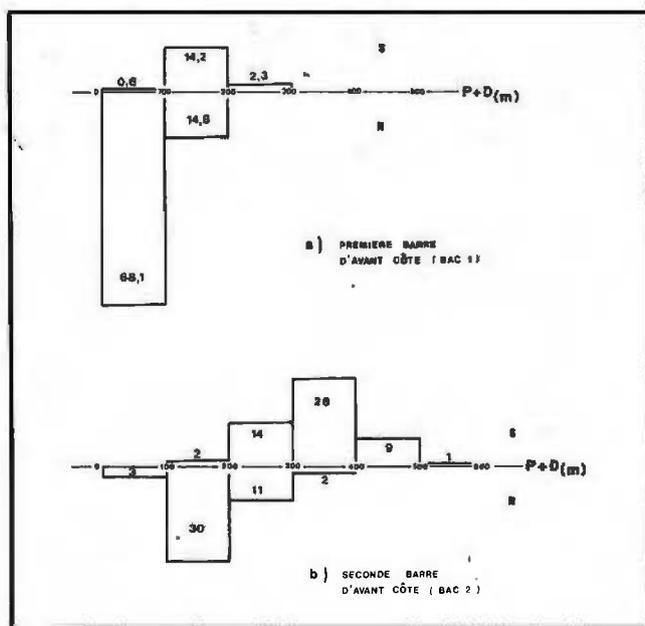


Figure 6
Histogramme des fréquences (%) des distances des barres à la côte de part et d'autre du promontoire de Leucate.
Frequencies (%) of bar distances from the coast on both sides of Cape Leucate.

Tableau 2
Moyenne et écart-type des distances des barres festonnées à la côte (nombre de données entre parenthèses).
Mean distances of bars from the coast and standard deviation (in brackets, number of data).

	BAC 1	BAC 2	BAC 3
Au sud de La Franqui (Cap Leucate)	160 ± 41,0 (31)	350 ± 64,7 (51)	inexistante
Au nord de La Franqui (Cap Leucate)	74 ± 22,4 (132)	180 ± 51,0 (46)	440 ± 49,0 (13)
D'Agde à Sète	145 ± 40,0 (5)	240 ± 74,5 (10)	inexistante

Profondeurs de la concavité

De même la profondeur moyenne de la concavité est plus réduite dans le secteur médian que celle des barres de même rang dans les autres secteurs. La profondeur des festons BAC 2 du secteur médian est comparable à celle des festons BAC 1 des secteurs Nord et Sud (tableau 3). Le calcul des coefficients de corrélation montre que la relation P, P+D varie avec le secteur et la position de la barre considérée (fig. 7).

Tableau 3
Moyenne et écart-type des profondeurs de la concavité des festons (nombre de données entre parenthèses).
Mean concavity depths of bars and standard deviation (in brackets, number of data).

	BAC 1 (m)	BAC 2 (m)
Secteur sud (Le Racou-Cap Leucate)	70 ± 22,2 (31)	135 ± 37,2(51)
Secteur médian (La Franqui-Cap d'Agde)	37 ± 10,5 (132)	60 ± 29,6(46)
Secteur nord (Agde-Sète)	52,0 ± 6,70 (5)	non festonnée

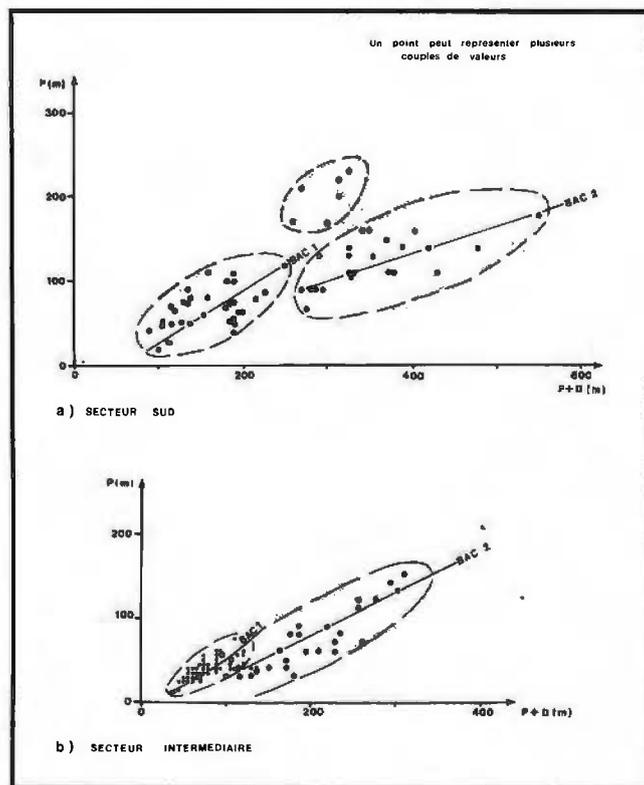


Figure 7
Profondeur de concavité des festons en fonction de la distance à la côte.
Concavity depth of the bars compared with distance from the coast.

Distribution des longueurs d'onde

Les valeurs moyennes des longueurs d'onde de la première barre (tableau 4) soulignent l'individualité de chaque secteur. Un test de Student-Fisher ($t=3,93$; $n=97$) appliqué aux longueurs d'onde de la seconde barre montre une différence significative (99,9 %) entre les valeurs du secteur sud et du secteur intermédiaire. Par ailleurs la longueur d'onde semble bien corrélée à la profondeur de concavité et à la distance au rivage des festons.

L'examen de ces mesures met en évidence l'existence de trois secteurs distincts : le premier au sud du cap Leucate, le second entre ce cap et le cap d'Agde, et le troisième au nord de ce point. De plus, le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle forme une subdivision du secteur intermédiaire. Mais de nombreuses situations particulières introduisent des disparités sensibles par rapport à l'aspect général; les écarts-types souvent élevés des moyennes (tableaux 2 et 3) soulignent la fréquence des caractères intermédiairei-

res. Les modifications altérant la régularité de la disposition des barres festonnées se manifestent par des changements de forme, des variations de dimension, progressives ou abruptes, et des réajustements de position. En outre des liaisons variées unissent les barres et les sinuosités du rivage.

Changement dans la forme

Généralement la forme des festons est symétrique et le creux du croissant bien marqué. Mais on observe des altérations par aplatissement ou dissymétrie. Dans le secteur Nord les festons BAC 1 sont notablement aplatis par l'augmentation de la longueur d'onde (tableau 4), plus que par la réduction de la profondeur qui est modeste (tableau 3). Le changement d'orientation du rivage, avec pour conséquence une approche frontale de la houle, est très probablement responsable de cette modification. Une certaine asymétrie des festons est fréquente. Mais dans quelques cas il s'agit d'une véritable dissymétrie. Ces altérations peuvent résulter de l'existence d'une singularité du rivage (rochers, embouchures de rivières, par exemple), mais aussi d'un changement de régime de houle provoquant une réorganisation et une nouvelle configuration du système des barres avec un aspect transitoire.



Figure 8
Barres festonnées à l'embouchure du Tech.
Crescentic bars at the mouth of the Tech river.

deltaïque édifié au droit des embouchures forme un talus dont la pente est plus accusée que celle des zones adjacentes. Dans cette zone, la longueur d'onde et la profondeur de la concavité sont plus petites (fig. 8).

Les caractères sédimentologiques de la région ont été étudiés ailleurs (Martin *et al.*, 1978; Jago, Barusseau, 1978) à la lumière de divers modèles (Johnson, Eagleson, 1966; Komar, Miller, 1975).

Conclusions

Rappelons d'abord qu'une relation entre les festons et les sinuosités de la plage a été souvent observée et que les sinuosités ont été tenues pour responsables de la formation des festons (Rivière *et al.*, 1961). Sur les 267 mesures que nous avons effectuées cette relation semble confirmée dans plus de la moitié des cas (53 % des mesures). On observe généralement un contrôle principal par les grands festons de la seconde barre et un contrôle secondaire par les croissants plus réduits du premier cordon. Il faut cependant souligner que l'absence de relation dans un cas sur deux montre la variabilité et la précarité de ces festons.

L'image instantanée donnée par la photographie est le résultat non seulement de l'équilibre qui tend à s'établir entre la forme sédimentaire et les conditions du moment mais aussi de l'histoire météorologique antérieure. Autrement dit le réajustement du modelé est permanent mais partiel; il conserve une certaine mémoire. De nombreuses disparités dans les caractères géométriques et la disposition des festons traduisent bien le fait que ces structures sédimentaires représentent des formes labiles intégrant à chaque instant les actions variables d'un facteur transitoire, la houle.

LA FORMATION DES BARRES D'AVANT-CÔTE

La structure des barres et les ondes de coin

La structure rythmique des barres en festons suggère une relation avec des ondes de coin stationnaires (Bowen, Inman, 1971). Nous admettons que la formation de ces barres est liée à la présence d'ondes de coin stationnaires. Rappelons que dans un coin d'eau formé par un fond de

Tableau 4
Moyenne et écart-type des longueurs d'onde des festons (nombre de données entre parenthèses).
Mean lengths of bars and standard deviation (in brackets, number of data).

	BAC 1 (m)	BAC 2 (m)	
Secteur sud	250 ± 70,5 (31)	450 ± 118 (51)	} 380 ± 141 (97)
Secteur médian	130 ± 44,6 (132)	330 ± 135 (46)	
Secteur nord	550 ± 214 (5)	rectiligne	

Variations dans les dimensions

Les dimensions des festons sont sensibles aux changements de plusieurs facteurs. Nous avons vu que des houles presque frontales entraînent un aplatissement des croissants par augmentation de leur longueur. La pente de l'avant-côte représente également un facteur important. L'exemple le plus typique est fourni par les barres de 2^e ligne au large de Leucate (fig. 3 A). Leurs dimensions varient du Sud vers le Nord; la profondeur de la concavité passe de 145 à 80 m, la longueur d'onde de 630 à 240 m et la distance à la côte de 315 à 240 m, tandis que la pente varie progressivement de 1,7 à 2,1 % du Sud (à gauche de la photo) au Nord.

On peut également imputer au changement local de pente les modifications des dimensions que l'on trouve au voisinage immédiat des embouchures des rivières importantes (Tech, Têt, Aude). Le promontoire

pente constante $h = \varepsilon x$ et la surface libre (représentée par le plan Oxy), il existe des ondes stationnaires (ou progressives) dont l'amplitude décroît exponentiellement à partir de la côte (représentée par l'axe Oy). La théorie tridimensionnelle (Ursell, 1952) n'est pas indispensable. La théorie bidimensionnelle montre que la dénivellation de la surface libre a pour expression :

$$\zeta = \sin \sigma t \sin ky e^{-z/2} F(\alpha, 1, z),$$

σ désigne la fréquence, k le nombre d'ondes (positif), F une fonction hypergéométrique confluyente avec :

$$z = 2kx, \quad \alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sigma^2}{kg\varepsilon} \right).$$

Comme la fonction F doit être régulière pour $z \rightarrow 0$ et $z \rightarrow \infty$, on a nécessairement $\alpha = -n$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) et F se réduit aux polynômes de Laguerre $L_n(z)$. La relation de dispersion est alors donnée par :

$$\sigma^2 = (2n + 1) kg\varepsilon.$$

Les positions des cornes des croissants doivent coïncider avec les points où la vitesse parallèle à la côte est nulle, c'est-à-dire avec les zéros de $e^{-z/2} L_n(z)$. Les positions des ventres des croissants doivent coïncider avec les points où la vitesse normale à la côte est nulle, c'est-à-dire avec les maximums de $e^{-z/2} L_n(z)$. Soit D la distance des cornes à la côte, P la profondeur de la concavité et L la longueur du croissant; le calcul des dimensions relatives D/L , $(P+D)/L$ des croissants possibles nous donne le tableau 5.

Tableau 5
Dimensions relatives des barres en croissant (théorie).
Relative dimensions of crescentic bars (theoretical).

Modés	Barres	D/L	(P+D)/L
$n=1$	$m=1$	0,159	0,477
$n=2$	$m=1$	0,093	0,246
$n=2$	$m=2$	0,543	1,027
$n=3$	$m=1$	0,066	0,171
$n=3$	$m=2$	0,365	0,619
$n=3$	$m=3$	1,000	1,597
$n=4$	$m=1$	0,051	0,132
$n=4$	$m=2$	0,278	0,460
$n=4$	$m=3$	0,722	1,048
$n=4$	$m=4$	1,496	2,169

Il est intéressant de comparer ces dimensions relatives avec celles des barres observées, et de calculer les périodes T correspondantes en tenant compte des relations :

$$T = 2\pi/\sigma, \quad L = \pi/k,$$

et des valeurs de la pente du fond. Pour ce faire nous formons les rapports D/L et $(P+D)/L$ à partir des tableaux 2, 3 et 4 et des valeurs notées au Cap Leucate. Puis nous les comparons avec ceux donnés par la théorie, c'est-à-dire par le tableau 5. Nous obtenons de cette manière les correspondances qui figurent dans les deux tableaux 6 et 7.

Tableau 6
Modes responsables des barres des secteurs Sud et Nord, et périodes correspondantes.
Generating modes for Southern and Northern bars, and corresponding periods.

Barres	Observations		Théorie		
	D/L	(P+D)/L	Barres	Modés	Périodes
1 ^{re} barre sud	0,36	0,64	$n=3$	$m=2$	58 secondes
2 ^e barre sud	0,48	0,78	$n=2$	$m=2$	95 secondes
1 ^{re} barre nord	0,28	0,56	$n=4$	$m=2$	46 secondes
2 ^e barre nord	0,36	0,54	$n=3$	$m=2$	83 secondes

Tableau 7
Modes responsables des barres proches du Cap Leucate, et périodes correspondantes.
Generating modes for bars near Cape Leucate, and corresponding periods.

Barres	Observations		Théorie		
	D/L	(P+D)/L	Modés	Barres	Période
2 ^e barre sud	0,27	0,50	$n=4$	$m=2$	72 secondes
2 ^e barre sud	0,30	0,57	$n=4$	$m=2$	64 secondes
2 ^e barre sud	0,40	0,77	$n=3$	$m=2$	58 secondes
2 ^e barre sud	0,48	0,86	$n=2$	$m=2$	61 secondes
2 ^e barre nord	0,67	1,00	$n=2$	$m=2$	60 secondes

Suivant ces tableaux, les barres formées seraient le plus souvent les barres 2 des modes 3 et 4, parfois la barre 2 du mode 2, et plus rarement la barre 3 du mode 4. Ces résultats impliquent en outre une formation des barres à des époques distinctes. Ces barres n'étant pas simultanées, sont liées à des ondes de longueurs d'onde et de périodes différentes. Notons que la gamme des périodes est comprise entre 40 et 95 secondes avec une moyenne de l'ordre de la minute. Les mesures de courant qui ont été faites en Grande-Bretagne (Huntley, 1976) ont fourni des spectres avec des pics étroits entre 20 et 80 secondes. Les pics semblent bien dus à des ondes de coin progressives qui sont liées d'ailleurs à des barres rectilignes. Naturellement les barres en croissant doivent être associées à des ondes de coin stationnaires. L'analyse qui précède est basée sur une solution dans le cas d'une pente constante. Mais la relation de dispersion et les caractéristiques des ondes de coin varient de façon sensible avec la forme du profil du fond, en particulier si le profil est concave (Holman, Bowen, 1979). Comme ce profil présente en outre des perturbations dues à la présence des barres, on doit s'attendre à des modifications sensibles des ondes de coin. Il est donc souhaitable d'obtenir des solutions analytiques pour des profils beaucoup plus complexes qu'un profil linéaire ou exponentiel (Ball, 1967). Ces solutions doivent apporter des éclaircissements et des précisions sur ces ondes qui sont guidées ou captées par le relief du fond. Néanmoins les dimensions relatives des barres observées sont dans l'ensemble proches des dimensions fournies par la théorie dans le cas d'une pente constante. Notons que les sinuosités de la plage représentent des facteurs

directement favorables à la formation des ondes de coin stationnaires et des barres en croissant. De plus la diminution de la longueur d'onde et de la profondeur de concavité des barres, lorsque la pente est plus accusée, s'explique par l'existence d'un mode de même fréquence mais d'ordre n moins élevé. C'est d'ailleurs ce qui apparaît sur le tableau 7, compte tenu du fait que la pente du fond augmente du Sud vers le Nord.

Origine des ondes de coin

Ondes de coin et « surf beats »

Nous avons vu que la formation des barres en croissant doit être liée à la présence d'ondes de coin stationnaires. Mais le mécanisme de formation de ces ondes n'est pas clair. Les basses fréquences qui les caractérisent sont comparables aux fréquences infra-gravitationnelles des « surf beats ». Ces oscillations dont les périodes sont comprises entre une et quelques minutes ont été associées aux battements dûs à la superposition d'un groupe d'ondes de périodes légèrement différentes (Tucker, 1950). Il semble exister une relation linéaire non seulement entre les hauteurs des vagues et l'amplitude des « surf beats » mais aussi entre leurs périodes (Bichkov *et al.*, 1970). C'est ainsi que des « surf beats » de 70 secondes sont corrélés à des vagues de 6 secondes. Par ailleurs, diverses raisons donnent à penser que les ondes de coin tiennent une place prédominante dans les « surf beats ».

Les interactions non linéaires

L'étude théorique des interactions non linéaires dans un groupe d'ondes fait apparaître une onde forcée du second ordre déphasée de 180° par rapport au groupe (Biesel, 1952; Longuet-Higgins, Stewart, 1962, 1964). Dans un groupe de vagues de forte amplitude le transport de masse associé est supérieur à celui correspondant aux vagues de faible amplitude. Il en résulte que le niveau moyen tend à s'abaisser dans le groupe des vagues hautes, et qu'une onde forcée du second ordre et de basse fréquence est ainsi produite. Sur un fond en pente les vagues déferlent; mais les ondes du second ordre sont réfléchies et se propagent alors vers le large comme des ondes libres. C'est très probablement ce mécanisme qui est à l'origine des « surf beats ». La théorie a été reprise pour les groupes de vagues avec des incidences obliques (Gallagher, 1971). Pour certaines combinaisons de

fréquences et de directions des ondes incidentes, l'onde du second ordre peut se trouver en résonance avec un mode d'onde de coin. Quand ces conditions de résonance sont satisfaites, l'amplitude de l'onde de coin croît et la réponse de basse fréquence est plus forte. Des expériences en laboratoire viennent à l'appui de cette théorie et du rôle important des ondes de coin dans les « surf beats » (Bowen, Guza, 1978).

Autres facteurs

Nous avons vu que les interactions non linéaires de vagues incidentes semblent être le mécanisme essentiel de la formation des ondes de coin. Mais d'autres facteurs doivent certainement intervenir. Ainsi l'existence de forts gradients (shears) dans les courants parallèles à la côte peut modifier de façon sensible les caractéristiques des ondes de coin (Kenyon, 1972). Les irrégularités dans la topographie du fond, et leur mobilité résultant des transports de sédiments jouent également un rôle non négligeable dans la formation des ondes de coin et des barres. Ces perturbations de la topographie du fond ont été prises en compte dans une théorie de la formation des « rip-currents » qui est basée sur une hypothèse d'instabilité hydrodynamique (Hino, 1974). Bien que cette hypothèse ne paraisse pas devoir être retenue, du moins sous la forme proposée, il serait souhaitable d'analyser de manière plus précise l'action conjuguée de la topographie du fond et des champs de vitesse.

En conclusion, les dimensions relatives des croissants sont proches de celles déduites de la théorie des ondes de coin pour une pente constante, en supposant que certaines des barres observées ont été formées à des époques différentes. Les fréquences infra-gravitationnelles des courants et des « surf beats » observés plaident en faveur de la présence d'ondes de coin qui ont les mêmes périodes. Le mécanisme de formation est probablement celui des interactions non linéaires allié aux conditions de résonance avec certains modes d'ondes de même nature que les ondes de coin, mais qui sont captées par un relief du fond plus complexe qu'une pente constante. Nous pensons donc que la formation des barres en croissant est liée à la présence de telles ondes. Mais les mécanismes précis de formation de ces barres ne sont pas encore éclaircis, et leur analyse, pour être menée à bien, demande un effort considérable à la fois théorique et expérimental.

RÉFÉRENCES

- Ball F. K.**, 1967. Edge waves in an ocean of finite depth, *Deep Sea Res.*, **14**, 79-88.
- Bichkov V. S., Darbyshire J., Strekalov S. S.**, 1970. The relation between surf beats and wind waves, *Dtsch Hydrogr. Z.*, **23**, 165-170.
- Biésel F.**, 1952. Équations générales au second ordre de la houle irrégulière, in: *La houille blanche*, **7**, 327-376.
- Bowen A. J., Inman D. L.**, 1969. Rip currents, 2, Laboratory and field observations, *J. Geophys. Res.*, **74**, 23, 5479-5490.
- Bowen A. J., Inman D. L.**, 1971. Edge waves and crescentic bars, *J. Geophys. Res.*, **76**, 8662-8671.
- Bowen A. J., Guza R. T.**, 1978. Edge waves and surf beat, *J. Geophys. Res.*, **83**, 1913-1920.
- Clos-Arceuduc A.**, 1962. Effets de la réflexion sur un obstacle d'une houle de longueur d'onde λ , *Photo interprétation*, Paris, 1-10.
- Gallagher B.**, 1971. Generation of surf beat by non linear wave interactions, *J. Fluid Mech.*, **49**, 1-20.
- Hino M.**, 1974. Theory on formation of rip-current and cuspidal coast, *Proc. 14th Conf. on Coastal Engineering*, 901-919.
- Holman R. A., Bowen A. J.**, 1979. Edge waves on complexe beach profiles, *J. Geophys. Res.*, **84**, 6339-6346.
- Huntley D. A.**, 1976. Long-period waves on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, **81**, 6441-6449.
- Jago C., Barusseau J. P.**, 1978. Sediment response to waves on the inner shelf of the Golfe du Lion, *Xth Intern. Congr. on Sedimentology, Jerusalem*, Abstr., 335.
- Johnson J. W., Eagleson P. S.**, 1966. Coastal processes, in: *Estuary and coastline hydrodynamics*, edited by A. T. Ippen, Mc Graw Hill, 405-493.
- Kenyon K. E.**, 1972. Edge waves with current shear, *J. Geophys. Res.*, **77**, 6599-6603.
- King C. A. M., Williams W. W.**, 1949. The formation and movement of sand bars by wave action, *Geogr. J.*, **113**, 70-84.
- Komar P. D., Miller M. C.**, 1975. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold, *J. Sediment. Petrol.*, **45**, 362-367.
- Lhermitte P.**, 1958. Contribution à l'étude de la couche-limite des houles progressives, *Mém. COEC*, **136**, 168 p.
- Longuet-Higgins M. S., Stewart R. W.**, 1962. Radiation stress and mass transport in gravity waves with application to « surf beats », *J. Fluid Mech.*, **13**, 481-504.
- Longuet-Higgins M. S., Stewart R. W.**, 1964. Radiation stress in water waves; a physical discussion, with applications, *Deep-Sea Res.*, **11**, 529-562.
- Martin R., Gadel F., Barusseau J. P.**, 1978. The evolution of two lagoons of Golfe du Lion Coast (France) during the Holocene, *Xth Intern. Congr. on Sedimentology, Jerusalem*, Abstr., 424.
- Mei C. C., Liu P. L.**, 1977. Effects of topography on the evolution in and near the surf zone. Linear theory, *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, **5**, 25-37.
- Poncet J.**, 1961. Existence de formes festonnées pré littorales en certains points de la côte algérienne; mise en évidence de courants d'arrachement, *Cah. Océanogr.*, **13**, 1.
- Rivière A., Arbey F., Vernhet S.**, 1961. Remarques sur l'évolution des structures de plage à caractère périodique, *C.R. Acad. Sci., Paris*, **252**, 767-769.
- Schuster J. P.**, 1966. Contribution à l'étude de l'évolution littorale du Languedoc-Roussillon, *Thèse Ingén., Doct., Géophysique, Univ. Strasbourg*.
- Sonu C. J.**, 1973. Three dimensional beach changes, *J. Geol.*, **81**, 1, 46-64.
- Tucker M. J.**, 1950. Surf beats: sea waves of 1 to 5 minutes period. *Proc. R. Soc., London*, **A 202**, 565-573.
- Ursell F.**, 1952. Edge waves on a sloping beach, *Proc. R. Soc., London*, **A 214**, 79-97.