

A1. Exemple du Golfe du Lion

A1.1. Contexte géographique

Le Golfe du Lion forme un grand rentrant du littoral méditerranéen français entre le Cap Sicié, en Provence, et le Cap de Creus, en Espagne, dans la chaîne des Albères.

Le long du littoral du Golfe du Lion, la plaine du Roussillon, les vallées de l'Aude et de l'Hérault, les collines du Bas Languedoc et le Delta du Rhône ont des rivages bas et rectilignes.

Des cordons littoraux accrochés à des îles devenues promontoires (Mont Saint-Clair, Mont d'Agde) ont isolé des lagunes qui communiquent avec la mer par des graux.

Le seul rivage accidenté de la partie occidentale du Golfe du Lion se rencontre au pied des Pyrénées et des Albères, entre le Cap Cerbère et Argelès-sur-Mer, où la côte est formée de falaises rocheuses et de criques étroites.

Du Sud-Ouest au Nord-Est du littoral, on rencontre :

- Une côte rocheuse qui s'étend du Cap Creus au Racou, un peu au sud d'Argelès-sur-Mer ; très découpée, elle abrite dans ses anfractuosités les ports de Cerbères, Banyuls, Port-Vendres et Collioure.
- Une bande sableuse longue de 23 milles nautiques et exposée à l'Est entre Argelès-sur-Mer et le Cap Leucate. Elle borde les étangs de Canet - Saint-Nazaire et de Leucate - Salses.
- Une plage rectiligne du Cap Leucate aux monts de la Clape à Narbonne-Plage. Elle est prolongée jusqu'au Cap d'Agde par une plage de sable en arc de cercle qui borde le Golfe de Narbonne. Les étangs de Lapalme, de Bages-Sigean, de l'Ayrolle, de Gruissan et de Mateille bordent ce littoral.
- Entre le Cap d'Agde et Sète, un lido rectiligne exposé au Sud-Est, avec une plage sablonneuse qui ferme une rade profonde : l'Etang de Thau.
- De Sète au Grau-du-Roi un cordon littoral sableux avec localement quelques graviers et galets. Cet étroit cordon sépare la mer d'un chapelet d'étangs presque jointifs.
- La petite Camargue, entre le Grau-du-Roi et l'embouchure du petit Rhône, qui englobe la Pointe de l'Espiguette et se poursuit à l'Est par un cordon littoral sableux bordant des étangs.
- La grande Camargue, entre le petit et le grand Rhône, bordée d'un cordon littoral sableux qui sépare des étangs de la mer, avec en son centre la flèche sableuse de la Pointe de Beauduc.

A1.2. Profondeurs

Les profondeurs d'eau dans le Golfe du Lion sont données par les cartes marines du SHOM.

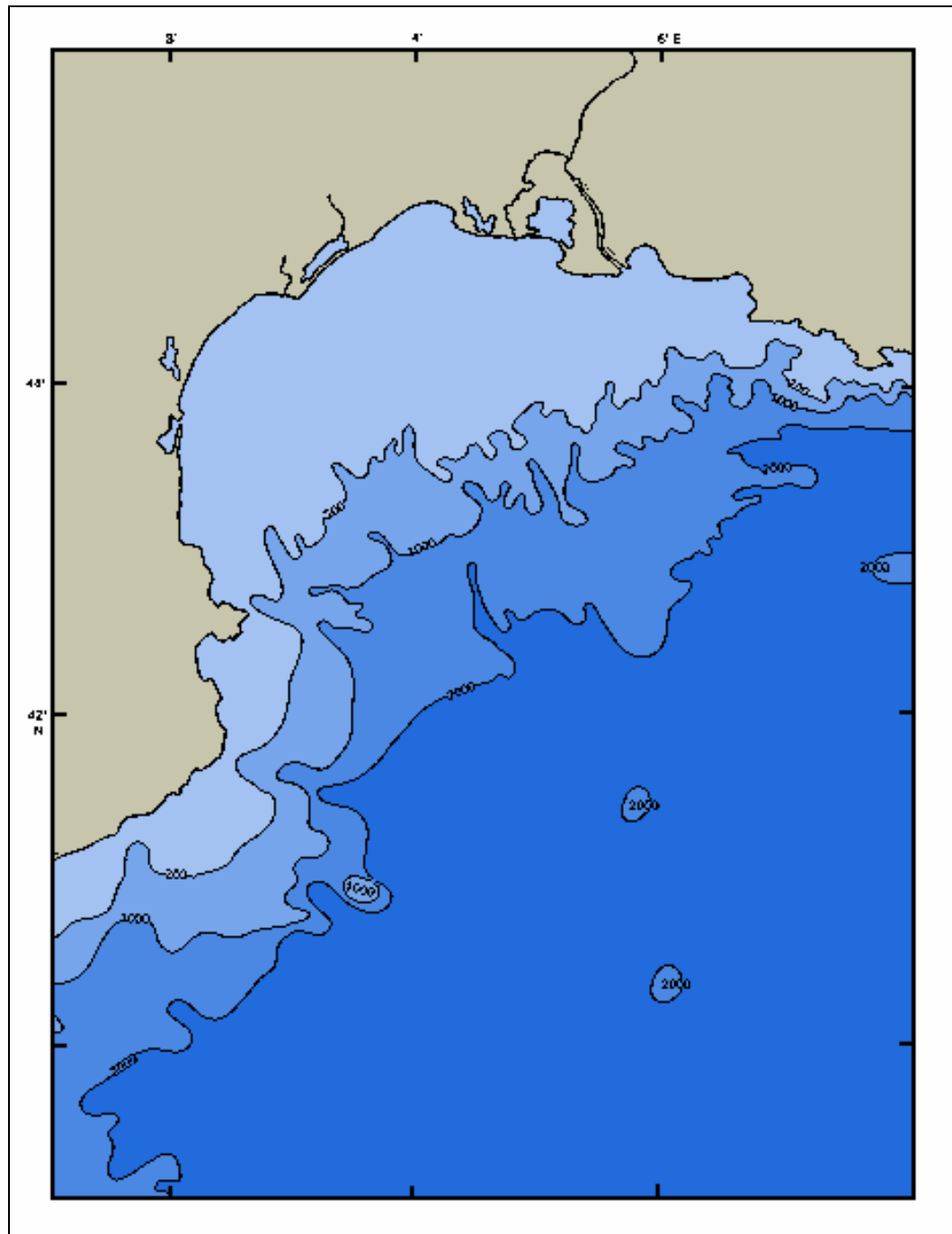


Figure A1.1 : Bathymétrie générale du Golfe du Lion d'après les Instructions Nautiques du SHOM.

Comme le montre la figure A1.1 issue des instructions nautiques, la partie du Golfe du Lion comprise entre le Cap Creus et Marseille a une profondeur inférieure à 200 mètres. Ensuite, la profondeur augmente très rapidement en allant vers le large.

Le long du trait de côte, de Port-Vendres au Delta du Rhône, les lignes bathymétriques sont réparties très régulièrement. Elles s'éloignent de la côte au fond de la Baie de Narbonne et du Golfe d'Aigues-Mortes et s'en rapprochent devant le Cap d'Agde et la Pointe de l'Espiguette. Elles suivent le trait de côte de manière d'autant plus scrupuleuse que la profondeur est faible.

La ligne des 50 mètres CM longe la côte à une distance de 4 à 9 milles nautiques, la ligne d'eau des 30 mètres à une distance de 1 à 6 milles nautiques et la ligne des 20 mètres à une distance de 0.5 à 3 milles nautiques.

Toutes ces lignes se resserrent considérablement au Sud de Port-Vendres, là où la montagne plonge dans l'eau. Elles se resserrent également à l'embouchure du grand Rhône où se forme le cône sédimentaire.

Le tableau A1.1 indique, pour différents points du littoral, les distances à la côte de quelques isobathes. Comme les lignes isobathes ne sont pas nécessairement parallèles entre elles et que c'est la plus courte distance qui a été relevée, il y a des variations de direction entre les différents relevés d'un même site.

Lieu	Isobathe 10 m	Isobathe 20 m	Isobathe 30 m	Isobathe 40 m	Isobathe 50 m	Pente (0 à 20 m)
Cap Cerbère	0.04	0.10	0.13	0.19	0.32	11. %
Cap Béar	0.05	0.13	0.22	0.34	0.46	8.0 %
Argelès-sur-Mer	0.28	0.88	2.35	3.40	4.32	1.2 %
Saint-Cyprien	0.43	0.81	2.08	3.40	4.43	1.3 %
Barcarès	0.36	0.76	1.92	2.89	5.43	1.4 %
Cap-Leucate	0.18	0.54	1.00	3.10	5.86	2.0 %
Port-la-Nouvelle	0.67	1.08	1.67	5.13	7.61	1.0 %
Narbonne-Plage	0.76	1.30	3.56	6.88	9.04	0.8 %
Marseillan-Plage	0.63	1.24	2.16	5.18	6.40	0.9 %
Sète	0.27	1.13	2.97	5.18	6.34	1.0 %
Palavas-les-Flots	1.08	2.16	5.99	7.29	8.37	0.5 %
Pointe de l'Espiguette	0.59	2.29	4.10	7.07	8.10	0.5 %
Embouchure du petit Rhône	1.03	1.89	2.86	7.34	9.45	0.6 %
Sainte-Maries-de-la-Mer	0.67	3.10	6.21	7.69	9.31	0.4 %
Phare de Beauduc	0.70	1.35	2.27	3.27	4.59	0.8 %
Embouchure du Rhône	0.81	0.89	1.03	1.16	1.30	1.2 %

Tableau A1.1 : Distance à la côte de quelques lignes isobathes, en milles nautiques.

A1.3. Zones portuaires

Les ports du Golfe du Lion sont listés dans le tableau A1.2 avec l'indication de leurs types d'activités. Il indique également les numéros des cartes de détail du SHOM qui donnent la bathymétrie dans ces ports à des échelles de l'ordre du 1/10000^{ème} au 1/15000^{ème}.

Ce tableau montre qu'il n'existe que trois ports permettant de recevoir des navires de commerce (cargos et pétroliers). Il s'agit de Port-Vendres, de Port-la-Nouvelle et de Sète.

Les accès à ces ports s'effectuent par des chenaux entretenus pour des tirants d'eau de 8 à 13 mètres.

Port	Type de navire	Carte	Commerce	Pêche	Plaisance
Cerbère	Embarcations légères				X
Banyuls-sur-Mer	Embarcations légères	7002		X	X
Port-Vendres	L<155m, TE<8.5	7002	X	X	X
Collioure	Embarcations légères	7002		X	X
Argelès-sur-Mer	Embarcations légères			X	X
Saint-Cyprien	Embarcations légères	7002		X	X
Canet-Plage	Embarcations légères			X	X
Barcarès	Embarcations légères			X	X
Port-Leucate	Embarcations légères			X	X
La Franqui	Mouillage				X
Port-la-Nouvelle	L<140m, B<22m, TE<8m	7002	X	X	X
Gruissan-Plage	Embarcations légères			X	X
Narbonne-Plage	Embarcations légères			X	X
Les Cabanes-de-Fleury	Embarcations légères			X	X
Valras-Plage	Embarcations légères			X	X
Port de l'Orb	Embarcations légères			X	X
Grau-d'Agde	Embarcations légères	7003		X	X
Cap-d'Agde	Embarcations légères	7003		X	X
Port-Ambionne	Embarcations légères				X
Marseillan-Plage	Embarcations légères				X
Port des Quilles	Embarcations légères				X
Sète	TE<13.2m		X	X	X
Frontignan-la-Peyrade	L<100m, TE<5.8m			X	
Frontignan	Embarcations légères				X
Etang de Thau	Embarcations légères	6839		X	X
Palavas-les-Flots	Embarcations légères	7004			X
Carnon-Plage	Embarcations légères	7004			X
La-Grande-Motte	Embarcations légères				X
Le-Grau-du-Roi	Embarcations légères			X	X
Aigues-Mortes	Embarcations légères	7004		X	X
Port-Camargue	Embarcations légères				X
Port de l'Amarée	Embarcations légères				X
Port-Gardian	Embarcations légères	7004		X	X
Mouillage de Beauduc	Embarcations légères				X

Tableau A1.2 : Ports du Golfe du Lion des Pyrénées au Rhône. Pour les grands ports, les longueurs L, largeur B et tirants d'eau TE maxima sont indiqués.

A1.4. Contexte Géologique

La formation du Golfe du Lion remonte à la fin de l'Oligocène, il y a environ 25 millions d'années B.P. (La datation anglo-saxonne Before-Present a son origine en 1950). Le tableau A1.3 présente une synthèse des âges géologiques et de leur correspondance avec la chronologie marine.

Ere	Période	Epoque	Date de Début	Chronologie Marine	Niveau de la mer	
Quaternaire Néozoïque	Holocène	Age moderne			0. m	
		Age des métaux			~ 0. M	
		Chalcolithique	-3000 A		~ 0. M	
		Néolithique	-5 000 A		~ 0. M	
			-7 500 A		-23 m	
		Mésolithique	-8 000 A		-37 m	
			-10 000 A		-55 m	
		Pléistocène	Paléolithique Supérieur	-12 000 A		-87 m
				-15 000 A		-87 m
				-16 000 A		-120 m
	-20 000 A			-120 m		
	-40 000 A		Versilien			
	-0.20 MA		Tyrrhénien			
	-0.55 MA	Sicilien				
	Paléolithique Moyen	-0.70 MA				
	Paléolithique Inférieur	-1.65 MA	Calabrien			
Tertiaire Cénozoïque	Néogène	Pliocène	-5.3 MA	Apparition de l'Homme Orogénèse des Alpilles		
		Miocène	-23.5 MA			
	Paléogène	Oligocène	-34 MA	Orogénèse Alpine Orogénèse Pyrénéenne		
		Eocène	-53 MA			
Secondaire Mésozoïque	Crétacé		-135 MA			
	Jurassique		-205 MA			
	Trias		-245 MA			
Primaire Paléozoïque	Permien		-295 MA			
	Carbonifère		-360 MA	Orogénèse Hercynienne		
	Dévonien		-410 MA			
	Silurien		-435 MA	Orogénèse Calédonienne		
	Ordovicien		-500 MA			
Pré-géologie Précambrien	Protérozoïque	Cambrien	-540 MA			
		Briovérien	-1000 MA	Individualisation des continents		
		Icartien récent	-1600 MA	première collision entre plaques		
	Archéen	Icartien ancien	-2500 MA	apparition de la vie animale		
		-4600 MA	Formation de la terre			

Tableau A1.3 : Synthèse des âges géologiques et de leur correspondance avec la chronologie marine (MA : millions d'années, A : ans).

Le Golfe du Lion constitue une unité géologique qui a subi une longue évolution depuis la surrection pyrénéenne à l'Eocène et celles des Alpilles et de la Nerthe au Miocène, jusqu'à la transgression Holocène.

Au Pliocène, la mer a envahi la vallée du Rhône en constituant un immense fjord qui s'étendait jusqu'aux environs de Lyon.

Au quaternaire, une succession de glaciations (une vingtaine ou plus) a engendré, au même rythme, une succession de régressions et de transgressions maritimes.

Le début du Quaternaire a vu la mise en place de vastes étendues de cailloutis liés aux grandes glaciations, et en particulier le comblement de la vallée du Rhône.

C'est lors de la dernière régression correspondant à la glaciation de Würm que les étangs de Thau et de Berre se sont creusés par érosion.

A la fin de la dernière glaciation de Würm, il y a 20 000 ans, le niveau marin était à la cote -120 mètres. Entre -15 000 ans et -5000 ans s'est produite la transgression Holocène (ou flandrienne) qui a amené la Méditerranée au voisinage de son niveau actuel.

Pendant cette lente remontée des eaux, la mer a construit un cordon littoral et l'a poussé vers l'intérieur au fur et à mesure que son niveau progressait. Ce cordon s'est finalement accroché aux piliers rocheux et s'est arrêté sur la ligne du lido actuel au terme de la transgression. Ce cordon, presque continu, a isolé des étangs et des lagunes qui ont été ensuite progressivement colmatés principalement par des apports fluviaux.

A l'époque Romaine, le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui en Bretagne, comparable à celui actuel à Marseille, plus haut en Italie centrale et plus bas dans diverses régions du monde hellénique.

A1.5. Géomorphologie

Sur le plan Géomorphologique, le littoral de la frontière espagnole au grand Rhône peut se décomposer en sept zones :

- la côte rocheuse du Cap Cerbère au Racou,
- la cote basse du Racou jusqu'au Cap Leucate,
- du Cap Leucate jusqu'à l'embouchure de l'Hérault,
- du Cap d'Agde à Sète
- de Sète à la Grande-Motte
- la petite Camargue,
- la grande Camargue.

A1.5.1. La côte rocheuse : le massif des Albères.

Le littoral rocheux s'étend sur environ 16 milles nautiques de la frontière espagnole au Racou, à la limite de la rivière de Massane qui se jette dans la mer à Argelès-sur-Mer.

La côte est rocheuse et très découpée. Les falaises schisteuses et abruptes qui constituent la chute du massif des Albères en Méditerranée, derniers contreforts de la chaîne des Pyrénées, offrent une série ininterrompue de caps escarpés et d'anses plus ou moins profondes dont les principales sont, du Sud au Nord, celles de Cerbère, Banyuls-sur-Mer, Port-Vendres et Collioure. Les quelques plages qu'on trouve sur ce littoral sont isolées et courtes. Elles sont de Galets (Banyuls et Cerbère) ou de sable (Collioure).

Les formations rocheuses remontent du Briovérien à l'Ordovicien. La partie immergée est un substratum anté-pliocène indifférencié.

A1.5.2. D'Argelès-sur-Mer au Cap-Leucate

Entre Argelès-sur-Mer et le Cap-Leucate, la côte est presque rectiligne. Elle ne présente que de légers renflements aux embouchures des fleuves côtiers formés par les apports des cours d'eau torrentiels et l'interruption partielle du transit sédimentaire littoral.

Entre Barcarès et le Cap-Leucate, un cordon littoral, bas et sablonneux, sépare la mer de l'Etang de Leucate.

Le massif calcaire de Leucate (calcaire lacustre du pliocène moyen) formait autrefois une île. Il est maintenant relié au cordon littoral par un cordon de sable. Ses falaises abruptes ont une hauteur de 40 à 50 mètres.

A1.5.3. Du Nord du Cap-Leucate à l'embouchure de l'Hérault

Long de 16 à 17 milles nautiques, du Cap-Leucate à l'embouchure de l'Hérault, le littoral est exposé à l'Est Sud-Est.

La côte, basse et sablonneuse, décrit un arc de cercle. Jusqu'à Saint-Pierre-sur-Mer, le cordon littoral sépare la mer d'une série d'étangs : Lapalme, Bages-Sigean, Ayrolle, Gruissan, Grazel, Mateille).

Au Nord de Port-la-Nouvelle, les dunes sont peu élevées. Les étangs ont tendance à se combler.

Du massif de la Clape (Narbonne-Plage) au Cap-d'Agde, la côte est basse et sablonneuse. Le cordon littoral sépare la mer des étangs (Pissevaches, marais de l'Aude, Vendres, le Grande-Marre, la Tour-Saint-André).

Le rocher isolé de la Batterie (Calcaire à Silex du Barrémien) à Saint-Pierre-sur-Mer est le seul qui existe entre les Albères et Agde.

A1.5.4. Du Cap-d'Agde à Sète

Entre le Cap d'Agde et Sète, le littoral se développe sur 13.5 milles nautiques. Trois zones peuvent être distinguées du Sud-Ouest au Nord-Est.

De la Tamarissière, à l'Ouest de l'Hérault au Cap d'Agde, la côte est basse et sablonneuse. Elle s'appuie sur une dune dense de quelques mètres de hauteur.

Du Cap-d'Agde à la Roquille, l'extrémité d'une coulée de lave resurgit pour former trois pointes rocheuses :

- une petite pointe à Roche-longue,

- une falaise basaltique d'un kilomètre de long et de 7 à 8 mètres de haut,
- l'île de Brescou, la seule du Golfe du Lion.

De la Roquille à Sète, la côte redevient basse et sablonneuse, formant une plage continue qui s'appuie sur des dunes en régression qui ont, par endroits, complètement disparu.

A1.5.5. De Sète à la Grande-Motte

La côte orientale du Golfe du Lion est formée d'un cordon de sable, de graviers et de galets.

La plage est recouverte de graviers et galets devant Frontignan et entre Maguelone et Palavas-les-Flots. Elle est essentiellement constituée de galets entre les Aresquiers et Maguelone.

Ces graviers et galets proviennent d'un banc produit de l'érosion d'un platier rocheux qui affleure sur les fonds, par cinq à dix mètres d'eau, à moins d'un mille nautique du rivage.

A1.5.6. La petite Camargue

Située à l'Ouest du petit Rhône, la petite Camargue a été formée par les alluvions du bras Ouest du Rhône.

Le rivage est constitué d'un cordon sableux. Il présente, dans sa partie Ouest, des massifs dunaires importants tels que ceux des Baronnets et de Terre-Neuve.

A l'Est, les étangs sont séparés par des dépôts sableux perpendiculaires au rivage en arrière du cordon. Certains d'entre eux, appelés radeaux, sont colonisés par des pinèdes.

A1.5.7. La grande Camargue

La grande Camargue est la zone construite par des alluvions du Rhône au Sud de la ville d'Arles, entre le petit Rhône et le grand Rhône actuels.

Cette région a été formée autrefois par les très importants apports d'autres bras du Rhône : le bras de Saint-Ferréol, le bras d'Ulmet, le bras de Fer, qui ont fait avancer le rivage. Leur disparition a provoqué une évolution rapide du littoral, et en particulier la formation de la flèche sédimentaire de Beauduc.

Le littoral est constitué d'un cordon sableux très étroit. Les dunes sont peu nombreuses et peu élevées, même sur la Pointe de Beauduc.

Entre l'embouchure du petit Rhône et les Saintes-Maries-de-la-Mer, l'érosion des anciens dépôts du Rhône fait émerger des mattes d'argile.

A1.6. Nature des fonds marins

Les fonds marins du Golfe du Lion sont essentiellement recouverts de sables littoraux et de vases terrigènes.

Les abords des Pyrénées sont marqués par un mélange de vase, de gravier et de rocher. De l'embouchure du Tech à celle de l'Aude, le plateau continental est, près de la côte, recouvert de sable, alors que plus au large, la vase se mêle au sable et au rocher.

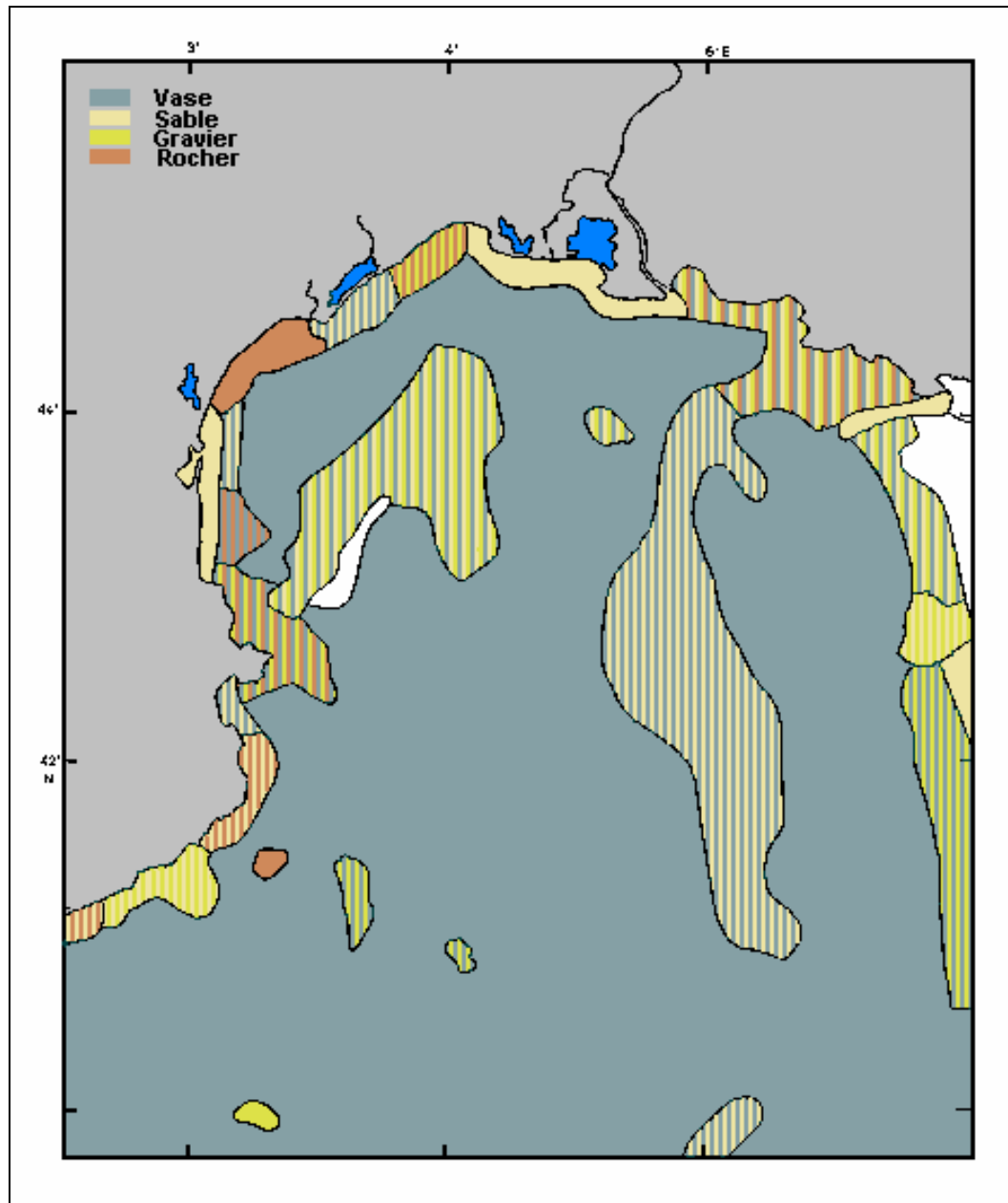


Figure A1.2 : Nature des fonds dans le Golfe du Lion d'après les Instructions Nautiques du SHOM.

La côte languedocienne, basse et sableuse, est précédée au large, d'Ouest en Est, par des rochers, de la vase et du sable, des graviers et des roches. A l'Est de Sète, et jusqu'au Delta du Rhône, la bordure interne du plateau continental est recouverte de sable jusqu'à des

profondeurs de 10 à 20 mètres CM. Au delà, en s'éloignant vers le large, la proportion de vase augmente pour dominer dans des fonds de 30 mètres CM.

Du Delta du Rhône au Cap de l'Aigle, le plateau continental, étroit et rocheux, est recouvert de sable, de vase et de graviers.

La figure A1.2 récapitule ces éléments.

A1.7. Transit sédimentaire

Les sédiments sont déplacés et transportés sous les actions combinées du vent, des courants et de la houle. Toutefois, les mouvements des sédiments sont essentiellement provoqués par les houles et les courants qu'elles engendrent au voisinage du rivage, lorsqu'elles déferlent.

Le transport sédimentaire se fait suivant deux directions, et dans les deux sens : le long du trait de côte et perpendiculairement au trait de côte.

Dans cette région fortement exposée aux vents de terre et aux vents de mer, l'action des vents peut être, soit directe sur les sables émergeant du cordon littoral (transport éolien), soit indirecte par génération de courants marins capables d'entraîner les particules les plus fines.

Le Cap d'Agde constitue le seul cap rocheux capable de séparer deux zones sédimentaires indépendantes dans le Golfe du Lion. Toutefois, les changements d'orientation du trait de côte engendrent des zones homogènes caractérisées par le sens du transport sédimentaire :

- de la frontière espagnole à Argelès-sur-Mer,
- d'Argelès-sur-Mer à Gruissan,
- de Gruissan au Cap d'Agde,
- du Cap d'Agde à Frontignan,
- de Frontignan au Grau-du-Roi,
- du Grau-du-Roi au petit Rhône,
- du petit Rhône à la pointe de Beauduc,
- de la pointe de Beauduc au grand Rhône.

D'après le Catalogue sédimentaire des côtes françaises, le transit littoral moyen se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est au sud de Gruissan et du Nord-Est vers le Sud-Ouest entre Gruissan et le Cap d'Agde. Il s'annule en moyenne au niveau du grau de la Vieille-Nouvelle.

Au niveau de Port-la-Nouvelle, le transit littoral moyen est estimé à 20 000 m³ vers le Nord. Les obstacles constitués par les jetées du port occasionnent une perturbation notable qui se traduit par une évolution rapide des fonds. Des dragages constants sont nécessaires pour maintenir l'accès du port aux navires importants.

Entre Gruissan et le Cap d'Agde, le transport littoral reste faible. Il peut être estimé en moyenne entre 2 000 et 4 000 m³ par an.

Le transport éolien est estimé au voisinage de Port-la-Nouvelle à $120\ 000\ \text{m}^3$ par kilomètre et par an de la terre vers la mer.

Entre le Cap d'Agde et les Aresquiers (à mi-chemin entre Frontignan et Maguelone), la plage n'est pas composée que de sable, mais aussi de graviers et de galets. Le transit littoral est alternatif. La résultante est orientée du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Il peut être évalué partir des volumes de dragage du port de Sète qui sont de l'ordre de $200\ 000\ \text{m}^3$ par an. Il s'annule aux Aresquiers, et reste quasiment nul entre les Aresquiers et Maguelone.

Entre Maguelone et la Grande-Motte, le transit littoral est orienté du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Il ne dépasse pas quelque dizaines de milliers de mètres cube par an.

Le long du littoral de la petite Camargue, le transit est orienté d'Est en Ouest. Il croît progressivement du petit Rhône au phare de l'Espiguette pour atteindre un maximum estimé, en 1984, à $340\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$ à l'Ouest immédiat du massif des Baronnets. Il s'annule ensuite à l'extrémité Nord de la Pointe de l'Espiguette. Ce maximum est estimé, en 1965, par la SOGREAH, entre $300\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$ et $340\ 000\ \text{m}^3/\text{an}$.

Au delà de la pointe de l'Espiguette, le transit hydrosédimentaire s'annule, bloqué par la digue d'arrêt des sables ; ce qui engendre une forte accrétion de la pointe de l'Espiguette et la création naturelle de flèches sableuses dont le développement a été provisoirement stoppé par la construction de la digue d'arrêt des sables, jusqu'à ce qu'elle soit contournée.

Entre le petit Rhône et la pointe de Beauduc le transit est orienté d'Ouest en Est. De la Pointe de Beauduc, où il s'annule, au grand Rhône, il est orienté d'Est en Ouest.

A.2. Evolution de la flèche sableuse de l'Espiguette

A2.1. Transit sédimentaire

A2.1.1. Granulométrie

Les granulométries ont été analysées par F. Sabatier et par la SOGREAH.

Du petit Rhône à la pointe de l'Espiguette, les sédiments sont assez homogènes. Leur diamètre médian, dont la moyenne est de l'ordre de 200 à 250 μm , reste compris entre 150 et 300 μm . Il présente un affinement vers les profondeurs de 1.5 mètres CM.

A l'Est immédiat de l'embouchure du petit Rhône, les sédiments sont plus grossiers avec un diamètre moyen de 250 à 300 μm .

Les sédiments de la plage de l'Espiguette et des petits fonds attenants ont un diamètre médian de l'ordre de 200 à 250 μm (Sabatier 1997). D'après la SOGREAH, ils sont un peu plus grossiers 310 μm par profondeurs de 3 mètres CM et 320 μm par profondeurs de 0 mètres CM.

Au Nord de Port-Camargue, les sédiments sont plus fins : diamètre médian de l'ordre de 170 μm par 0.60 mètre CM de profondeur.

A2.1.2. Les apports du Rhône

A Beaucaire, le débit moyen du Rhône est de 1700 m^3/s avec une crue annuelle atteignant 8000 m^3/s et un débit maximum estimé à 11640 m^3/s . Seulement 10% environ de ce débit passe par le petit Rhône.

De l'ordre de 20 millions de m^3/an au XIX^{ème} siècle, le débit solide du Rhône a été réduit à quelques millions de m^3/an par la construction de nombreux barrages sur le fleuve.

En adoptant pour le débit solide la même répartition entre le petit et le grand Rhône que le débit liquide, l'apport sédimentaire du petit Rhône est actuellement de l'ordre de quelques centaines de milliers de m^3/an .

Le volume de la charge de fond est très difficile à préciser et varie beaucoup d'un auteur à l'autre. Dans l'axe du chenal, les matériaux charriés ont une taille importante (galets, graviers et sables grossiers) qui diminue sur les bancs latéraux (sables de diamètre médian 50 à 300 μm) pour devenir fins sur les levés (sables de diamètre médian 40 à 100 μm) et sur le champ d'inondation (sables de diamètre médian 4 à 30 μm).

Les matières en suspensions, trop fines, jouent un rôle négligeable dans l'alimentation du littoral. Seul le matériel sableux participe à l'alimentation

de la frange littorale. Les matériaux plus grossiers ne franchissent pas la diffluence.

A2.1.3. Transport sédimentaire

Les sédiments sont déplacés et transportés sous les actions combinées du vent, des courants et de la houle. Toutefois, les mouvements des sédiments sont essentiellement provoqués par les houles et les courants qu'elles engendrent au voisinage du rivage, lorsqu'elles déferlent.

Le transport sédimentaire se fait suivant deux directions, et dans les deux sens : le long du trait de côte et perpendiculairement au trait de côte.

Dans cette région fortement exposée aux vents de terre et aux vents de mer, l'action des vents peut être, soit directe sur les sables émergeant du cordon littoral (transport éolien), soit indirecte par génération de courants marins capables d'entraîner les particules les plus fines.

Le Cap d'Agde constitue le seul cap rocheux capable de séparer deux zones sédimentaires indépendantes dans le Golfe du Lion. Toutefois, les changements d'orientation du trait de côte engendrent des zones homogènes caractérisées par le sens du transport sédimentaire :

- de la frontière espagnole à Argelès-sur-Mer,
- d'Argelès-sur-Mer à Gruissan,
- de Gruissan au Cap d'Agde,
- du Cap d'Agde à Frontignan,
- de Frontignan au Grau-du-Roi,
- du Grau-du-Roi au petit Rhône,
- du petit Rhône à la pointe de Beauduc,
- de la pointe de Beauduc au grand Rhône.

Entre le Cap d'Agde et les Aresquiers (à mi-chemin entre Frontignan et Maguelone), la plage n'est pas composée que de sable, mais aussi de graviers et de galets. Le transit littoral est alternatif. La résultante est orientée du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Il peut être évalué partir des volumes de dragage du port de Sète qui sont de l'ordre de 200 000 m³/an. Il s'annule aux Aresquiers, et reste quasiment nul entre les Aresquiers et Maguelone.

Entre Maguelone et la Grande-Motte, le transit littoral est orienté du Sud-Ouest vers le Nord-Est. Il ne dépasse pas quelque dizaines de milliers de mètres cube par an.

Le long du littoral de la petite Camargue, le transit est orienté d'Est en Ouest. Il croît progressivement du petit Rhône au phare de l'Espiguette pour atteindre un maximum estimé, en 1984, à 340 000 m³/an à l'Ouest immédiat du massif des Baronnets. Il s'annule ensuite à l'extrémité Nord de la Pointe de l'Espiguette. Ce maximum est estimé, en 1965, par la SOGREAH, entre 300 000 m³/an et 340 000 m³/an. Le maximum de la valeur résultante du transport hydrosédimentaire obtenu, en 1997, par F. Sabatier par une méthode analytique est beaucoup plus faible, de l'ordre de 74 000 m³/an au droit du Grand Radeau au Grau d'Orgon. L'utilisation, par cet auteur, pour un littoral convexe, de formulations établies pour des

littoraux droits, en est sans doute une des causes. Dans la suite, nous retiendront donc l'hypothèse du Catalogue sédimentologique des côtes françaises, dont l'ordre de grandeur est manifestement plus réaliste eu égard aux phénomènes d'érosion du littoral de la petite Camargue, d'accrétion de la pointe de l'Espiguette et d'ensablement de Port-Camargue.

Au delà de la pointe de l'Espiguette, le transit hydrosédimentaire s'annule, bloqué par la digue d'arrêt des sables ; ce qui engendre une forte accrétion de la pointe de l'Espiguette et la création naturelle de flèches sableuses dont le développement a été provisoirement stoppé par la construction de la digue d'arrêt des sables, jusqu'à ce qu'elle soit contournée.

A2.2. Edification des cordons littoraux de la région d'Aigues-Mortes

Les sources d'approvisionnement en sable se sont toujours situées à l'Est (Rhône de Peccaïs, Rhône Vif, Petit Rhône) ce qui se traduit par un amincissement des cordons d'Est en Ouest, et une granulométrie des sédiments qui s'affine d'Est en Ouest.

Les cordons successifs se sont édifiés en périodes de haut niveau marin, tandis que les espaces occupés par les lagunes et les marais qui se sont développés entre les cordons correspondent aux phases de niveau marin plus bas.

Les premiers cordons, établis de 7300 à 6000 ans B.P., de forme concave présentent des pentes inclinées vers la mer plus fortes et une granulométrie beaucoup plus grossière que les cordons ultérieurs en forme concave au Nord-Ouest et convexe au Nord-Est. Ce phénomène est la conséquence de la diminution de la profondeur engendrée par le comblement du golfe d'Aigues-Mortes.

L'histoire de l'édification des cordons littoraux peut être résumée d'après le BRGM sous la forme suivante :

- Haut niveau de 7300 à 7000 ans B.P. : formation de la bordure septentrionale du premier cordon. Ce cordon qui est le plus interne est actuellement recouvert de vases.
- Haut niveau entre 6650 et 6500 B.P. ans : édification du premier cordon (cordon Saint Jean). Il est formé de galets très usés et de restes coquilliers.
- Haut niveau entre 6200 et 6000 ans B.P. suivi d'un bas niveau relatif entre 6000 et 5900 ans B.P. : phase transgressive avec rupture de berge, formation des flèches de Fourcat.
- Haut niveau de 5900 à 5450 ans B.P. : édification du second cordon (cordon d'Aigues-Mortes).
- Bas niveau de 5400 à 4350 ans B.P. phase régressive avec fermeture du milieu lagunaire.

- Haut niveau de 4250 à 4100 ans B.P. début de l'édification du troisième cordon (cordon du Listel).
- Haut niveau vers 2250 ans B.P. fin de l'édification du cordon du Listel.
- Bas niveau romain accompagné d'une régression.

A2.3. Evolution de la côte depuis la fin du XVIII^{ème}

L'évolution du trait de côte depuis deux siècles est relatée dans les documents d'accompagnement de la carte géologique du BRGM.

Le recul du rivage de la petite Camargue depuis 1895 varie de 350 à 500 mètres, ce qui représente une érosion annuelle de l'ordre de 4.0 à 5.5 mètres. Les sables arrachés au rivage vont, par transit littoral, engraisser la pointe de l'Espiguette. Avec la réduction des apports sédimentaires du petit Rhône, ce recul s'est accentué depuis quelques décennies pour atteindre 5 à 10 mètres par an avec une valeur maximale de 18 mètres par an près des salins d'Aigues-Mortes.

Les dunes qui bordaient encore le rivage il y a 25 ans, à l'Est du débouché du canal de Saint-Jean, ont été pratiquement toutes détruites par les houles de tempête. Ni la protection frontale établie, en 1962, sur 6 km par la Compagnie des Salins du Midi, ni la digue construite en retrait de la côte à partir de 1972 n'ont résisté aux tempêtes, et en particulier à la tempête des 6 et 7 novembre 1982.

Depuis, la stratégie de défense du trait de côte a été changée avec la construction d'épis de 75 mètres tous les 200 mètres. Aujourd'hui, la zone précédemment en recul entre le petit Rhône et la racine de la pointe de l'Espiguette (16,5 km de littoral) est protégée par des épis. Bien que certains épis aient été contournés, le recul de la côte a été fortement réduit.

Lors de son achèvement, en 1869, le phare de l'Espiguette était situé à 40 mètres de la mer. En 1874, il était à 159 mètres du rivage. Il est actuellement à 640 mètres. Cela correspond à une progression moyenne de 5.5 mètres par an.

C'est vers l'extrémité de la flèche de l'Espiguette que la progradation de la côte due aux atterrissements sableux a été la plus forte. Le schéma évolutif de la côte met en évidence le risque d'ensablement encouru lors de l'implantation de Port-Camargue en 1968. Depuis 1895 l'avancée de la côte, au Sud du canal bordant le village de vacances, dépasse 1600 mètres, soit 18 mètres par an. Plusieurs digues ont permis de ralentir la poussée des sables, mais au prix d'une accélération du processus d'engraissement avec un taux qui est passé de 18 à 30 mètres par an.

A2.4. Evolution depuis la création de Port-Camargue

En préalable à la construction du port de plaisance de Port-Camargue, la SOGREAH a réalisé des études concernant l'évolution de la pointe de l'Espiguette et les solutions envisageables pour stabiliser le trait de côte au Sud-Est du nouveau port.

Dans le cadre de cette dernière étude, deux familles de solutions ont été analysées. L'une était relative à la stabilisation globale du trait de côte du petit Rhône à la pointe de l'Espiguette, tandis que l'autre recherchait une stabilisation locale de la pointe de l'Espiguette.

Dans la seconde famille, deux cas extrêmes ont été étudiés :

- la création d'une digue étanche au transport sédimentaire capable d'éviter tout contournement,
- la création d'une digue acceptant un contournement contrôlé pour que le toit de la flèche sableuse reste au dessous d'une profondeur de l'ordre de 5 mètres CM.

Le tableau A2.1 rassemble les résultats concernant ces deux solutions possibles, en termes de longueur de digue nécessaire en fonction du temps. Naturellement, les données relatives à ce qui a été réellement fait sont également indiquées. La création du début de la digue remonte à 1973 et non en 1964, ce qui explique le décalage de l'échelle de temps du tableau par rapport à celle adoptée par la SOGREAH lors du projet. Par ailleurs, l'origine des longueurs de la digue est supposée être à son intersection avec le trait de côte de 1964 qui ne figure pas sur les mêmes documents. La précision obtenue est donc liée à celle du recollement des plans.

Ces résultats montrent que les prévisions de la SOGREAH se sont réalisées avec une très bonne précision pour des phénomènes sédimentologiques. Cela confirme, par ailleurs, l'idée que c'est l'estimation du transit sédimentaire de la SOGREAH qui est la bonne.

Cette bonne corrélation entre prévision et réalisation permet de prolonger les prévisions avec une bonne probabilité de fiabilité.

Temps		Cas sans contournement		Cas avec contournement		Cas réalisé	
Année	Age	Longueur nécessaire	Variation annuelle	Longueur nécessaire	Variation annuelle	Longueur réalisée	Variation annuelle
1974	0	400 m	200 m/an	400 m	85 m/an	650 m	34 m/an
	2	800 m	175 m/an	550 m	85 m/an		
	4	1100 m	120 m/an	760 m	85 m/an		
1980	6	1280 m	85 m/an	890 m	55 m/an	785 m	46 m/an
	8	1440 m	80 m/an	980 m	35 m/an		
	10	1600 m	80 m/an	1030 m	25 m/an		
	12	1760 m	80 m/an	1080 m	20 m/an		
	14	1920 m	80 m/an	1110 m	13 m/an		
1990	16	2080 m	80 m/an	1130 m	10 m/an	1100 m	16 m/an
	18	-	-	-	-		
	20	-	-	-	-		
	22	-	-	-	-		
	24	-	-	-	-		
2000	26	-	-	-	-	1400 m (1620 m)	33 m/an
Equilibre				1600 m	-		-

Tableau A2.1 : Longueur de la digue d'arrêt des sables en fonction du temps sous différentes hypothèses.

A2.5. Prévisions pour les prochaines années

La prolongation de la digue d'arrêt des sables va arrêter le contournement pendant un certain nombre d'années. En considérant que la projection de la nouvelle partie sur l'axe de l'ancienne, ou plutôt selon l'axe de la flèche, est de l'ordre de 300 mètres, et que la progression est de l'ordre de 30 mètre par an, le contournement sédimentaire sera interrompu pendant une dizaine d'années. 3 000 000 de mètres cubes devront donc être stockés dans un volume qui s'étalera sur une longueur de l'ordre de 1000 mètres (500m devant l'Espiguette et 500m devant la digue) une largeur de l'ordre de 300 mètres et une hauteur de l'ordre de 10 mètres.

Après, le processus de contournement actuel va reprendre son cours. Les houles de Sud-Est nourriront la flèche qui tendra à pousser vers le Nord-Ouest et les houles de Sud-Ouest l'infléchiront vers le Nord-Est à l'abri de l'action des houles de Sud-Est.

Comme la profondeur d'eau augmente avec la longueur de la flèche, la différence d'efficacité entre les houles fortes de Sud-Est et les houles plus faibles de Sud-Ouest s'accroîtra, jusqu'à ce que le transport sédimentaire passe au large de Port-Camargue pour rejoindre la côte au voisinage de Carnon.

Pour que l'équilibre puisse s'établir, il est nécessaire que la flèche reste en permanence soumise à l'action des houles de Sud-Est, même après son inflexion sous l'effet des houles de Sud-Ouest. Cela ne pourra guère se produire à moins de 2000 mètres de la racine de la digue actuelle, ce qui correspond sensiblement à la ligne bathymétrique des 10 mètres CM.

La digue d'arrêt des sables devra donc être prolongée à nouveau de l'ordre de 600 mètres vers l'Ouest, en deux ou trois étapes.

Les époques appropriées pour effectuer ces allongements dépendront de la profondeur admise pour le toit de la flèche sableuse, c'est à dire de la profondeur d'eau nécessaire au Nord de la digue. La profondeur admise pour le port de plaisance était de 5 mètres CM, elle sera insuffisante pour des navires de commerce qui ont besoin d'une dizaine de mètres. En effet, un navire vraquier qui cale 6.5 mètres de tirant d'eau se surenfonce, en eau calme de 0.2 mètre à 5 nœuds, et de 0.8 mètre à 10 nœuds. Ce phénomène est amplifié par la houle de l'ordre de 0.3 à 0.5 mètre pour un crête à creux de 1.5 mètre. De plus, sur ce même type de clapot, le pilonnement et le tangage combinés peuvent engendrer des mouvements verticaux de l'ordre de 1 à 2 mètres à l'avant ou à l'arrière du navire. En ajoutant à cela le pied de pilote, le chenal ouvert doit être dragué à une profondeur de l'ordre de 9 à 10 mètres. Naturellement, la profondeur nécessaire diminue en zone abritée et le cercle d'évitage peut être dragué à une profondeur plus faible de l'ordre de 7 à 8 mètres.

Ainsi, si l'allongement prévu dans le cadre de ce projet est le dernier, une fois le transit littoral rétabli, la profondeur nécessaire pour les navires, de

l'ordre de 10 mètres CM devra être maintenue par dragage d'un volume annuel de l'ordre de 300 000 m³.

Si la digue est à nouveau allongée en temps utile, la nécessité d'un dragage sera repoussée dans le temps. Ensuite, après que l'équilibre se soit instauré, les dragages seront limités au maintien de la profondeur nécessaire pour les navires. Ces volumes à draguer peuvent être estimés entre 10 et 20% du transit littoral, soit de l'ordre de 50 000 m³ par an.